Cinquante ans de prix Nobel de physique

Textes de l'Académie royale des sciences de Suède

traduits en français par Nicolas Bacaër

Cinquante ans de prix Nobel de physique

Communiqués de presse (1972-1999)

et textes de vulgarisation (2000-2022)

de l'Académie royale des sciences de Suède

Traduits en français par Nicolas Bacaër

Les textes originaux et les illustrations ont été publiés en suédois et en anglais sur le site `www.nobelprize.org`.
© Académie royale des sciences de Suède

Ces textes ont été traduits automatiquement avec le logiciel DeepL puis relus et corrigés.

Contact :
Nicolas Bacaër
Institut de recherche pour le développement
`nicolas.bacaer@ird.fr`

Couverture : Robert Delaunay, *Rythme n^o 1* (1938), musée d'Art moderne de Paris.

Introduction

> Code de la recherche, article premier :
>
> « La politique nationale de la recherche et du développement technologique vise à
>
> 1. Accroître les connaissances ;
> 2. Partager la culture scientifique, technique et industrielle ;
> 3. Valoriser les résultats de la recherche au service de la société ; [...]
> 4. Promouvoir la langue française comme langue scientifique. »

Depuis 1901, l'Académie royale des sciences de Suède annonce en automne les lauréats du prix Nobel de physique et les lauréats des autres prix. La cérémonie a lieu en décembre. La fondation Nobel publie quelque temps après un volume intitulé « Les Prix Nobel en ... » suivi de l'année en question [1]. Ce volume annuel comprend notamment les « conférences Nobel » des lauréats, de courtes biographies et des informations sur le déroulement de la cérémonie. Quand on consulte les volumes relativement anciens, on est frappé par leur plurilinguisme. Par exemple, le volume pour l'année 1966 contient des textes en suédois, en français, en anglais, en allemand et en hébreu.

À partir de la fin des années 1960, la fondation Nobel a négocié des accords avec des éditeurs, d'abord Elsevier puis World Scientific, pour publier des compilations issues des volumes annuels, mais focalisées sur une seule discipline et regroupant plusieurs années. Ces compilations sont intégralement en anglais, les textes dans les autres langues ayant tous été traduits.

De nos jours, le site de la fondation Nobel (`www.nobelprize.org`) est devenu la source d'information la plus facilement accessible. Sur ce site, on apprend que l'annonce des prix Nobel de physique est accompagnée depuis 1972 d'un communiqué de presse, qui semble n'avoir d'abord été disponible qu'en anglais, puis à partir de 1995 également en suédois. Certaines années, ce communiqué de presse a été traduit en

1. Le titre principal est resté en français de 1901 à 2011.

français (de 1999 à 2003 puis en 2007), en allemand (de 1999 à 2003 puis en 2005 et 2007), en russe (en 2000, 2003 et 2010) ou en japonais (en 2002 et 2008). Hormis le cas du français et de l'allemand de 1999 à 2003, le choix de ces langues était lié à la nationalité des lauréats. Depuis 2010, il n'y a plus que les versions anglaise et suédoise.

À partir de l'année 2000, la fondation Nobel a par ailleurs décidé de diffuser un communiqué de presse plus court, mais de l'accompagner d'un texte de vulgarisation disponible en suédois et en anglais. En revanche, le texte de présentation plus technique destiné aux spécialistes n'est disponible qu'en anglais.

Étant donné les progrès récents de la traduction automatique, notamment ceux du logiciel DeepL, l'idée de traduire de nouveau en français certains textes de l'Académie suédoise semble d'actualité. Ces traductions automatiques doivent évidemment être relues et corrigées. C'est ce que l'on trouvera dans ce livre. On a traduit les communiqués de presse pour la période de 1972 à 1998 et les textes de vulgarisation de 2000 à 2022. Pour l'année 1999, il n'y a eu qu'à reprendre le communiqué déjà disponible en français, auquel on a apporté quelques corrections mineures.

On a indiqué à la fin de certains chapitres les livres écrits par les lauréats qui sont disponibles en français. On a adapté quelques indications temporelles, mais il faut néanmoins garder à l'esprit l'année où les textes ont été écrits. La base terminologique FranceTerme (`www.culture.fr/franceterme`) et le Grand dictionnaire terminologique (`https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca`) ont facilité la traduction de certains termes techniques.

Je tiens à remercier Yvan Castin, du laboratoire Kastler-Brossel à l'École normale supérieure, pour ses encouragements.

Nicolas Bacaër

Sommaire

La théorie de la supraconductivité
(1972 : Bardeen, Cooper, Schrieffer) **1**

Effet tunnel et effets Josephson
(1973 : Esaki, Giaever, Josephson) **3**

La radioastrophysique et les pulsars
(1974 : Ryle, Hewish) **6**

Dans les noyaux atomiques
(1975 : Bohr, Mottelson, Rainwater) **9**

Une particule élémentaire lourde d'une nouvelle espèce
(1976 : Richter, Ting) **12**

Les systèmes magnétiques et désordonnés
(1977 : Anderson, Mott, Van Vleck) **15**

Hélium superfluide et fond diffus cosmologique
(1978 : Kapitsa, Penzias, R. W. Wilson) **18**

L'unification des interactions faible et électromagnétique
(1979 : Glashow, Salam, Weinberg) **23**

Des violations des principes de symétrie
(1980 : Cronin, Fitch) **27**

Spectroscopie laser et spectroscopie électronique
(1981 : Bloembergen, Schawlow, Siegbahn) **30**

Les transitions de phase
(1982 : K. G. Wilson) **35**

L'évolution stellaire
(1983 : Chandrasekhar, Fowler) **39**

Les médiateurs de l'interaction faible
(1984 : Rubbia, Van der Meer) **41**

L'effet Hall quantique
(1985 : Klitzing) **45**

Microscope électronique et microscope à effet tunnel
(1986 : Ruska, Binnig, Rohrer) **50**

La supraconductivé de matériaux céramiques
(1987 : Bednorz, Müller) **56**

La découverte du neutrino muonique
(1988 : Lederman, Schwartz, Steinberger) **60**

La spectroscopie atomique de précision
(1989 : Ramsey, Dehmelt, Paul) **64**

La diffusion profondément inélastique d'électrons
(1990 : Friedman, Kendall, R. E. Taylor) **69**

Cristaux liquides et polymères
(1991, de Gennes) **74**

La chambre proportionnelle multifils
(1992 : Charpak) **80**

Un pulsar binaire
(1993 : Hulse, J. H. Taylor) **85**

Des neutrons pour l'étude de la matière condensée
(1994 : Brockhouse, Shull) **91**

Le lepton tau et le neutrino
(1995 : Perl, Reines) **98**

La superfluidité de l'hélium 3
(1996 : Lee, Osheroff, Richardson) **106**

Refroidir et piéger les atomes
(1997 : Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips) **112**

Un fluide quantique avec des excitations de charge fractionnaire (1998 : Laughlin, Störmer, Tsui) **119**

La structure quantique de l'interaction électrofaible (1999 : 't Hooft, Veltman) **125**

Physique et technologie de l'information (2000 : Alferov, Kroemer, Kilby) **134**

Le condensat de Bose-Einstein (2001 : Cornell, Ketterle, Wieman) **140**

Deux nouvelles fenêtres sur l'Univers (2002 : Davis, Koshiba, Giacconi) **149**

Un écoulement sans résistance (2003 : Abrikosov, Ginzburg, Leggett) **159**

L'interaction forte expliquée (2004 : Gross, Politzer, Wilczek) **168**

Quelles sont les limites du mesurable ? (2005 : Glauber, Hall, Hänsch) **180**

L'anisotropie du fond diffus cosmologique (2006 : Mather, Smoot) **191**

De meilleures têtes de lecture (2007 : Fert, Grünberg) **199**

Découvrir les symétries cachées de la nature (2008 : Nambu, Kobayashi, Maskawa) **208**

Les maîtres de la lumière (2009 : Kao, Boyle, Smith) **220**

Le graphène : un réseau atomique parfait (2010 : Geim, Novoselov) **233**

L'accélération de l'expansion de l'Univers (2011 : Perlmutter, Schmidt, Riess) **241**

Contrôle des particules dans un monde quantique
(2012 : Haroche, Wineland) **252**

Le boson de Higgs
(2013 : Englert, Higgs) **261**

Les DEL bleues, une nouvelle lumière dans le monde
(2014 : Akasaki, Amano, Nakamura) **271**

Les neutrinos ont une masse
(2015 : Kajita, McDonald) **278**

Des phénomènes étranges en deux dimensions
(2016 : Thouless, Haldane, Kosterlitz) **287**

Les ondes gravitationnelles
(2017 : Weiss, Barish, Thorne) **295**

Des outils faits de lumière
(2018 : Ashkin, Mourou, Strickland) **306**

De nouvelles perspectives sur notre place dans l'Univers
(2019 : Peebles, Mayor, Queloz) **316**

Les trous noirs
(2020 : Penrose, Genzel, Ghez) **329**

Le climat et autres phénomènes complexes
(2021 : Manabe, Hasselmann, Parisi) **340**

L'intrication quantique
(2022 : Aspect, Clauser, Zeilinger) **355**

Des impulsions lumineuses attosecondes
(2023 : Agostini, Krausz, L'Huillier) **365**

La théorie de la supraconductivité

Le prix Nobel de physique 1972 a été attribué à John Bardeen, Leon Neil Cooper et John Robert Schrieffer

> « pour la théorie de la supraconductivité qu'ils ont élaborée ensemble, généralement appelée théorie BCS ».

Le phénomène de la supraconductivité a été découvert par le physicien néerlandais Kamerlingh Onnes dès 1911. Ses premières mesures indiquaient déjà qu'il avait découvert un état de la matière fondamentalement nouveau. Le terme « supraconductivité » fait référence à la disparition complète de la résistance électrique. De nombreuses propriétés remarquables ont été découvertes au cours des décennies suivantes. Le problème central, à savoir le mécanisme sous-jacent de la supraconductivité, est resté cependant un mystère jusqu'à la fin des années cinquante. La différence d'énergie entre l'état supraconducteur et l'état normal d'un métal est extrêmement faible par rapport à toutes les énergies typiques d'un métal. Par conséquent, de nombreux mécanismes différents étaient *a priori* possibles. Une étape importante a été franchie vers 1950 lorsque l'on a découvert théoriquement et expérimentalement que le mécanisme de la supraconductivité était lié au couplage des électrons avec les vibrations du réseau cristallin. À partir de ce mécanisme, Bardeen, Cooper et Schrieffer ont développé en 1957 une théorie de la supraconductivité qui donnait une explication théorique complète du phénomène.

La nouvelle théorie montrait que l'interaction entre les électrons et le réseau conduit à la formation de paires d'électrons liés, souvent appelées paires de Cooper. Les différentes paires sont fortement couplées l'une à l'autre, ce qui conduit à un modèle collectif complexe dans lequel une fraction considérable du nombre total d'électrons de conduction est couplée pour former l'état supraconducteur. En raison du couplage caractéristique entre tous les électrons, il est impossible de rompre une seule paire d'électrons sans perturber également toutes les autres, ce qui nécessite une quantité d'énergie qui doit dépasser une valeur critique. Bon nombre des propriétés remarquables des supraconducteurs peuvent être comprises qualitativement à partir de la structure de cet état corrélé à plusieurs électrons.

La théorie développée par Bardeen, Cooper et Schrieffer, ainsi que les extensions et les raffinements de la théorie, qui ont été développés par de nombreux auteurs peu après la découverte clé, ont en effet permis d'expliquer de manière très détaillée les propriétés des supraconducteurs. La théorie a également permis de prédire de nouveaux effets et a stimulé une intense activité de recherche théorique et expérimentale, qui a ouvert de nouveaux domaines de recherche. On peut citer à titre d'exemple l'utilisation de l'effet tunnel en mécanique quantique pour étudier les supraconducteurs, la découverte de la quantification du flux magnétique et les remarquables effets Josephson. Ces développements plus récents sont intimement liés à la théorie fondamentale de la supraconductivité et ont confirmé de manière éclatante la validité des concepts et idées théoriques développés par Bardeen, Cooper et Schrieffer.

Les lauréats

— John Bardeen, né en 1908, professeur de génie électrique et de physique à l'université de l'Illinois à Urbana ;
— Leon N. Cooper, né en 1930, professeur de physique à l'université Brown à Providence ;
— John Robert Schrieffer, né en 1931, professeur de physique à l'université de Pennsylvanie à Philadelphie.

Effet tunnel et effets Josephson

Le prix Nobel de physique 1973 a été attribué pour moitié conjointement à Leo Esaki et Ivar Giaever

> « pour leurs découvertes expérimentales concernant l'effet tunnel dans les semi-conducteurs et dans les supraconducteurs ».

L'autre moitié revient à Brian David Josephson

> « pour ses prédictions théoriques des propriétés d'un supercourant à travers une barrière tunnel, en particulier les phénomènes qui sont généralement connus sous le nom d'effets Josephson ».

Les lois de la physique moderne

L'effet tunnel est l'une des conséquences les plus directes des lois de la physique moderne. Selon la physique quantique, les électrons se comportent à la fois comme des particules et comme des ondes et sont décrits par les solutions de l'équation dite de Schrödinger. Ces ondes peuvent franchir une barrière qui serait une zone interdite si la particule était considérée de manière classique. L'expression « effet tunnel » fait référence à cette propriété : la particule traverse la zone interdite en « passant par un tunnel ». Le cas le plus connu d'effet tunnel est la désintégration alpha des noyaux atomiques lourds, qui a été expliquée dès 1928.

On a envisagé très tôt l'existence possible de nombreux phénomènes intéressants liés à l'effet tunnel dans les solides, mais la théorie et les expériences ont souvent donné des résultats contradictoires. La découverte du transistor et le développement de la physique des semi-conducteurs qui en a découlé ont intensifié la recherche de nouveaux effets tunnel, mais celle-ci est restée infructueuse pendant de nombreuses années.

Un travail de pionnier

Grâce aux travaux pionniers des lauréats du prix de physique pour l'année 1973, Esaki, Giaever et Josephson, l'étude de l'effet tunnel dans

les solides est devenue un vaste domaine de recherche très actif qui a abouti à de nombreux résultats importants de nature fondamentale et qui a ouvert de nouvelles portes pour les applications techniques. Les premiers travaux ont été réalisés par Leo Esaki, qui travaillait à l'époque dans le laboratoire de recherche de la société Sony au Japon. À l'aide d'expériences d'une simplicité déconcertante, il a montré dans un article publié en 1958 l'existence d'un nouveau type d'effet tunnel dans un semi-conducteur. Sa découverte a également montré que cet effet pouvait être utilisé techniquement dans ce que l'on appelle les diodes à tunnel. La découverte d'Esaki a ouvert un nouveau champ de recherche et a donné lieu à des développements intensifs et fructueux dans de nombreux laboratoires de recherche internationaux.

L'étape suivante a été franchie en 1960 par Ivar Giaever au laboratoire de recherche de la société General Electric à Schenectady. Il a mis en évidence l'effet tunnel à travers une très fine couche d'oxyde entourée de part et d'autre d'un métal à l'état supraconducteur ou à l'état normal. Son expérience a fourni une preuve très directe de l'existence de ce que l'on appelle l'écart énergétique dans les supraconducteurs, qui était l'une des prédictions les plus importantes de la théorie de la supraconductivité développée par Bardeen, Cooper et Schrieffer (récompensée par le prix Nobel en 1972). Dans ses travaux ultérieurs, Giaever a transformé ses expériences liées à l'effet tunnel en une méthode spectroscopique extrêmement précise pour l'étude des supraconducteurs.

Description théorique : les effets Josephson

Les expériences de Giaever liées à l'effet tunnel ont incité le jeune physicien anglais Brian D. Josephson à analyser de plus près leur description théorique. En 1962, cela a conduit à la prédiction de phénomènes entièrement nouveaux dans les supraconducteurs et en particulier aux effets généralement connus sous le nom d'effets Josephson. L'un de ces effets signifie qu'un supercourant peut circuler à travers une barrière tunnel même lorsqu'aucune tension n'est appliquée à la barrière. Le second effet est encore plus particulier, puisqu'il montre qu'une différence de tension constante à travers la barrière entraîne un courant tunnel à haute fréquence dans la gamme des micro-ondes. Les prédictions théoriques de Josephson ont été confirmées par des expériences en l'espace d'un an environ et ont exercé une forte influence sur les développements de la physique au cours des années suivantes.

Des travaux indépendants

Les découvertes de ces trois physiciens ont été faites de manière assez indépendante, mais elles sont étroitement liées. Les travaux pionniers d'Esaki en 1958 ont servi de base aux expériences de Giaever avec des supraconducteurs en 1960. À leur tour, les travaux de Giaever ont jeté les bases et stimulé les découvertes théoriques de Josephson en 1962. Leurs découvertes ont ouvert de nouveaux domaines de recherche et ont récemment conduit à un certain nombre d'applications importantes, auxquelles un grand nombre de physiciens ont contribué. Des exemples d'applications dans le domaine des semi-conducteurs sont les diodes et détecteurs à effet tunnel, les transistors à effet tunnel et certaines formes de lasers à semi-conducteurs. Les effets Josephson ont entraîné une révision des valeurs des constantes fondamentales, une nouvelle méthode de mesure précise des tensions et une méthode interférométrique extrêmement sensible qui a de nombreuses applications en métrologie.

Les lauréats

— Leo Esaki est né en 1925 à Osaka au Japon. Il a obtenu son doctorat en physique à Tokyo en 1959. Il a travaillé pour la société Kobe-Kogyo et la société Sony. Depuis 1960, il travaille au centre de recherche Thomas J. Watson de la société IBM, à Yorktown Heights aux États-Unis.

— Ivar Giaever est né en 1929 à Bergen en Norvège. Il a obtenu son doctorat en physique en 1964 et travaille pour la société General Electric à Schenectady aux États-Unis.

— Brian D. Josephson est né en 1940. Il est docteur en physique. Il a fait ses études à Cambridge en Angleterre, où il est depuis 1967 directeur adjoint de la recherche au département de physique.

La radioastrophysique et les pulsars

Le prix Nobel de physique 1974 a été attribué à Martin Ryle et Antony Hewish

> « pour leurs recherches pionnières en radioastrophysique : Ryle pour ses observations et ses inventions, en particulier la technique de synthèse d'ouverture, et Hewish pour son rôle décisif dans la découverte des pulsars ».

La physique des étoiles

L'astrophysique, la science qui traite des propriétés physiques des étoiles et des systèmes stellaires, s'est développée rapidement au cours des dernières décennies. C'est principalement dû aux nouvelles découvertes faites grâce aux méthodes de radioastronomie. Ces méthodes sont d'une importance vitale lorsqu'il s'agit d'effectuer des observations sur des distances cosmiques, de l'ordre de milliards d'années-lumière ou plus. Il est essentiel de pouvoir couvrir de telles distances pour tenter de retracer l'évolution de l'Univers. Une année-lumière est la distance parcourue par la lumière en un an. La lumière se déplace à une vitesse de 300 millions de mètres par seconde.

Contrairement à la lumière visible qui nous parvient de la sphère céleste, les ondes radio provenant d'autres espaces ne peuvent être perçues qu'à l'aide de télescopes. Des instruments électroniques très sensibles amplifient et traitent les données des signaux.

Plusieurs petits téléscopes « forment » un grand téléscope

Au cours des vingt-cinq dernières années, Martin Ryle a mis au point de nouveaux télescopes et principes d'enregistrement qui ont fait date. Grâce à eux, il a exploré les sources radio de l'Univers et a progressivement atteint une précision de plus en plus grande dans la détermination de la direction. Ryle a développé une technique, la technique de synthèse d'ouverture, qui signifie qu'à l'aide d'un certain nombre de petits télescopes, dont les positions sont mutuellement ajustables à une distance de près de 5 kilomètres, on peut atteindre une précision égale à celle que l'on obtiendrait en couvrant toute la zone avec un

seul grand télescope, une construction qui ne serait techniquement pas possible. Ryle utilise également ici la rotation de la Terre pour changer les positions des télescopes par rapport à la sphère céleste.

La richesse des détails de la cartographie de l'Univers réalisée ces dernières années avec cet appareil est absolument unique. Depuis un certain nombre d'années, Ryle a fait des observations avec ses différents instruments qui ont été d'une importance cruciale pour l'étude des caractéristiques physiques des étoiles et des systèmes stellaires et pour la cosmologie, l'étude de l'évolution de l'Univers dans son ensemble.

Les pulsars

Au cours de l'été 1967, Antony Hewish a entamé une série d'observations qui ont rapidement abouti à une découverte extrêmement intéressante et imprévue. Certaines sources radio dans l'espace, appelées plus tard « pulsars », émettaient des signaux radio, des pulsations, qui se répétaient très régulièrement à des intervalles d'une seconde environ. Cette découverte a permis d'établir la présence d'étoiles à neutrons dans l'Univers, un phénomène sur lequel les scientifiques s'interrogeaient depuis les années trente. Les étoiles à neutrons sont des corps extrêmement lourds par rapport à leur taille, environ 10 kilomètres de diamètre. Un centimètre cube de matière d'étoile à neutrons, dont sont constitués les pulsars, pèse des millions de tonnes ! L'émission observée d'un pulsar montre qu'il doit avoir un champ magnétique extraordinairement puissant, des millions de fois plus puissant que n'importe quel champ magnétique utilisé dans les laboratoires sur Terre. Chaque signal émis par les pulsars correspond à d'énormes quantités d'énergie. Il est probable que l'étoile à neutrons, qui est le « noyau » d'un pulsar, s'entoure d'un plasma, un gaz conducteur d'électricité, et que tout le système, y compris le champ magnétique, tourne. Le pulsar est alors perçu depuis la Terre comme une balise radio !

Le pulsar le plus connu se trouve dans la nébuleuse du Crabe. Cette nébuleuse est constituée d'un nuage de gaz incandescent, vestige d'une explosion stellaire qui, selon les archives chinoises, a eu lieu en l'an 1054. C'est l'un des phénomènes les plus intéressants de la voûte céleste. On a découvert que son centre, à partir duquel il se dilate, contient un pulsar qui émet non seulement des pulsations radio, mais aussi des pulsations lumineuses et des pulsations à rayons X.

La découverte des pulsars est d'une importance capitale pour la physique et l'astrophysique. Les pulsars jouent un rôle essentiel dans

la genèse des éléments et le développement chimique des galaxies. De nouvelles voies ont été ouvertes pour étudier les propriétés de la matière dans des conditions très extrêmes.

Dans les noyaux atomiques

Le prix Nobel de physique 1975 a été attribué conjointement à Aage Niels Bohr, Ben Roy Mottelson et Leo James Rainwater

> « pour la découverte du lien entre mouvement collectif et mouvement des particules dans le noyau atomique, et le développement de la théorie de la structure du noyau fondée sur ce lien ».

À la fin des années quarante, la physique nucléaire avait atteint un stade où une image plus détaillée de la structure du noyau atomique commençait à émerger et où il devenait possible d'évaluer ses propriétés. Les modèles sur lesquels les scientifiques travaillaient à l'époque étaient cependant assez lacunaires et dans une certaine mesure contradictoires. Le plus ancien était le « modèle de la goutte liquide », dans lequel le noyau était considéré comme une goutte et les nucléons correspondaient aux atomes du liquide. Certaines propriétés du noyau, notamment celles associées aux « nombres magiques », montraient cependant que les nucléons individuels influençaient bien le comportement du noyau. Cette découverte, mise en évidence dans le « modèle en couches », a été récompensée par le prix Nobel de physique en 1963.

Au fil du temps, on s'est aperçu que le noyau avait des propriétés qui ne pouvaient pas être expliquées par ces théories. Les aberrations très marquées par rapport à la symétrie sphérique dans la distribution de la charge observée dans certains noyaux étaient peut-être les plus frappantes. Plusieurs chercheurs ont également fait remarquer que cela pourrait indiquer que certains noyaux ne sont pas sphériques mais déformés en ellipsoïde, mais personne n'a pu donner une explication raisonnable de ce phénomène.

La solution du problème a été présentée pour la première fois par James Rainwater, de l'université Columbia à New York, dans un court article envoyé pour publication en avril 1950. Il y observe l'interaction entre la plus grande partie des nucléons, qui forment un noyau interne, et les nucléons externes, les nucléons de valence, et il souligne que les nucléons de valence peuvent influencer la forme du noyau interne. Comme les nucléons de valence se déplacent dans un champ déterminé par la distribution des nucléons internes, cette influence est

réciproque. Si plusieurs nucléons de valence se déplacent dans des directions similaires, cet effet de polarisation sur le reste du noyau peut être si important que le noyau dans son ensemble se déforme de façon permanente. Exprimé très simplement, on peut dire que, du fait de leur rotation, certains nucléons exposent les « parois » du noyau à une pression centrifuge si élevée que celui-ci se déforme. Rainwater a également tenté de calculer théoriquement cet effet et a obtenu des résultats qui correspondaient aux données expérimentales sur la distribution de la charge.

Aage Bohr, qui travaillait à Copenhague mais était à cette époque en visite à l'université Columbia, avait tout à fait indépendamment de Rainwater réfléchi dans le même sens. Dans un article, envoyé pour publication environ un mois après celui de Rainwater, il formule le problème d'une manière plus générale, mais moins lucide du point de vue physique.

Ces idées relativement vagues ont été développées par Bohr dans un travail célèbre de 1951, dans lequel il donne une étude très complète du couplage des oscillations de la surface nucléaire avec les mouvements des nucléons individuels. Grâce à une analyse de la formule théorique de l'énergie cinétique du noyau, il a pu prédire les différents types d'excitations collectives : les vibrations obtenues par un changement périodique de la forme du noyau autour d'une certaine valeur moyenne et la rotation du noyau entier autour d'un axe à angle droit par rapport à l'axe de symétrie.

Les progrès réalisés jusqu'alors étaient purement théoriques et les nouvelles idées manquaient largement de fondement expérimental. La comparaison très importante avec les données expérimentales a été réalisée dans trois travaux, rédigés conjointement par Bohr et Mottelson, et publiés dans les années 1952-1953. Le résultat le plus spectaculaire fut la découverte que la position des niveaux d'énergie dans certains noyaux pouvait être expliquée par l'hypothèse qu'ils forment un spectre de rotation. La conformité entre la théorie et l'expérience était si complète qu'il ne pouvait y avoir aucun doute sur l'exactitude de la théorie. Cela a donné lieu à de nouvelles études théoriques, mais surtout à de très nombreuses expériences pour vérifier les prédictions théoriques. Ce développement dynamique a très vite conduit à une compréhension approfondie de la structure du noyau atomique.

Dans les recherches menées depuis lors, Bohr et Mottelson ont été des figures centrales et ont assurément inspiré la recherche dans ce domaine, bien qu'ils n'aient pas eux-mêmes publié beaucoup de tra-

vaux. Cependant, sur le plan des principes, c'est peut-être à eux (en collaboration avec Pines) que l'on doit la découverte la plus importante de cette période. Il s'agit du fait que la matière nucléaire a des propriétés qui rappellent celles des supraconducteurs.

Une particule élémentaire lourde d'une nouvelle espèce

Le prix Nobel de physique 1976 a été attribué à Burton Richter et Samuel Chao-Chung Ting [2]

> « pour leur travail d'avant-garde dans la découverte d'une particule élémentaire lourde d'une nouvelle espèce ».

Le prix récompense les découvertes dans l'exploration des plus petits composants de la matière, plus petits que les atomes et leurs noyaux. Selon la célèbre loi d'Einstein sur l'énergie et la masse, $E = mc^2$, une grande énergie cinétique est nécessaire pour créer une particule lourde. En outre, l'énergie doit être concentrée. Les deux expériences primées ont été réalisées indépendamment l'une de l'autre dans deux des plus grands accélérateurs de particules du monde. Ting et ses associés ont construit leur équipement en liaison avec le synchrotron à protons du laboratoire national de Brookhaven. L'accélérateur est un appareil d'un diamètre de quelque 200 mètres et l'équipement de mesure de l'équipe de Ting mesure près de 15 mètres de long. Richter et ses collègues ont connecté leur équipement à l'accélérateur linéaire d'électrons de 3 km de long de Stanford. L'équipement de Richter est d'une taille telle qu'il ne peut être conservé à l'intérieur. L'exploration de petits objets nécessite de grands microscopes. Pour les plus petits morceaux de matière, les plus grandes installations sont nécessaires.

L'appareil de Richter est une sorte de carrousel (un anneau de stockage) où un flux d'électrons et un flux de positrons tournent en sens inverse à des vitesses très élevées, qui peuvent être réglées avec précision. Lors de collisions frontales, toute l'énergie d'un électron et d'un positron en collision peut en principe donner naissance à une particule très lourde et immobile, qui devrait se transformer en plusieurs autres particules par désintégration dans un laps de temps très court. On n'avait pas prévu qu'une telle chose puisse se produire autrement qu'à des énergies plus basses où existent les particules élémentaires connues et plus légères. À l'aide d'un détecteur magnétique spécial, le programme de recherche s'est donc concentré sur une idée très intéressante et significative initiée à Frascati en Italie et poursuivie à Cam-

2. NDT. En pinyin : Dīng Zhàozhōng.

bridge aux États-Unis. La découverte de la nouvelle particule a été soudaine et spectaculaire, bien qu'elle ait été précédée par des années de planification et de préparation. La vitesse des collisions frontales peut être réglée sur plus d'un millier de valeurs différentes. La nouvelle particule n'apparaît qu'à l'une d'entre elles. Vers le 10 novembre 1974, l'équipe de Richter a réglé la vitesse correcte et a constaté qu'un nombre énorme de collisions donnait la nouvelle particule, baptisée psi (ψ). Ce qui est le plus remarquable, c'est que la particule psi s'est transformée avec une lenteur inattendue, c'est-à-dire qu'elle a vécu environ mille fois plus longtemps que ce que l'on pouvait prévoir.

L'expérience de Ting s'est déroulée tout à fait différemment. Des protons à grande vitesse — la direction est ici plus importante que le réglage de la vitesse — sont amenés à entrer en collision avec une cible immobile de béryllium. L'équipe de Ting espérait trouver de nouvelles particules lourdes, qui se transforment en deux autres particules, un électron et un positron. Pendant de nombreuses années, Ting et ses collaborateurs ont été les champions du monde dans ce domaine, en étudiant de près la manière dont les particules mères plus légères et mieux connues donnent naissance à des paires filles d'électrons et de positrons. Les propriétés de la particule mère peuvent être calculées à partir des mesures effectuées sur les paires de filles qui fusent rapidement. La difficulté consistait à trier un très petit nombre de paires filles parmi des millions d'autres particules en train de fuser, ce qui dans ce contexte n'est pas souhaitable mais inévitable. C'était comme entendre un grillon à proximité du décollage d'un avion gros porteur. C'est pourquoi l'équipement était volumineux, doté de nombreux perfectionnements et entouré de tonnes de protection contre les radiations. Avec le temps, il est apparu clairement qu'une nouvelle particule lourde se formait de temps à autre lors des collisions. Elle a été baptisée « particule J ».

Le 11 novembre 1974, Richter et Ting se rencontrèrent à l'accélérateur linéaire de Stanford et constatèrent que les deux équipes de recherche avaient découvert la même particule.[3] L'annonce parut immédiatement et les publications scientifiques dans la semaine qui suivit. Peu de temps après, la découverte fut confirmée, d'abord à Frascati en Italie, puis au synchrotron à électrons de Hambourg.

De 1960 à 1976, on a découvert de nombreuses nouvelles particules élémentaires, qui présentent des liens de parenté entre elles au sein de groupes ou de familles. La nouvelle particule était quelque chose de dis-

3. NDT. C'est le « méson J/ψ ».

tinct et de nouveau. Elle a formé le début d'une nouvelle famille qui lui est propre. Un nouveau champ de recherche a été ouvert. Ces particules, que l'on croyait être les plus petits éléments constitutifs de la matière, ont-elles encore quelque chose à offrir ? Pendant des siècles, les physiciens et les chimistes ont consacré une grande partie de leurs efforts à la recherche des plus petits composants de la matière. La limite du plus petit constituant s'est lentement déplacée des atomes vers les noyaux atomiques et vers ce que l'on appelle les particules élémentaires. Depuis quelques années, les physiciens doivent déplacer cette limite vers le bas. Tout indique que les particules élémentaires sont elles aussi constituées d'unités encore plus petites, les quarks. On pensait que trois quarks, ayant à certains égards des propriétés différentes, suffiraient. Mais pour comprendre la structure de la nouvelle particule psi, un quatrième quark est très probablement nécessaire, de l'avis de nombreux chercheurs.

Les systèmes magnétiques et désordonnés

Le prix Nobel de physique 1977 a été attribué à Philip Warren Anderson, Nevill Francis Mott et John Hasbrouck Van Vleck

> « pour leurs recherches théoriques fondamentales sur la structure électronique des systèmes magnétiques et désordonnés ».

Les trois lauréats sont des théoriciens dans le domaine de la physique du solide, la branche de la physique qui est à l'origine de parties essentielles du développement technique actuel, en particulier dans le domaine de l'électronique. Tous trois ont ajouté à la théorie de nombreux nouveaux concepts de base qui ont permis de comprendre de nouveaux résultats expérimentaux. La distance entre les résultats de la recherche fondamentale et les applications techniques est en général relativement courte dans ce domaine. À titre d'exemple, on peut mentionner que les idées de Van Vleck ont joué un rôle central dans le développement du laser, alors que le développement technique des matériaux amorphes comme le verre, qui est actuellement en cours, serait impensable sans les contributions de Mott et d'Anderson à la théorie fondamentale.

Van Vleck a été qualifié de « père du magnétisme moderne ». Il a développé des méthodes qui permettent de comprendre le comportement d'un ion ou d'un atome étranger dans un cristal. Dans un premier temps, les électrons d'une telle masse perturbatrice subissent l'influence du champ électrique (le champ cristallin) engendré par les noyaux atomiques et les électrons du cristal hôte. Par l'intermédiaire de ses électrons, l'ion perturbateur peut également établir une liaison chimique avec son environnement, généralement appelé ligand. Van Vleck a été le premier à développer la théorie du champ cristallin et la théorie du champ de ligands pour décrire ces phénomènes de manière plus détaillée. Ces méthodes de chimie quantique sont aujourd'hui presque devenues des outils de routine, en particulier en chimie inorganique, avec des extensions importantes à la biologie moléculaire, à la médecine et à la géologie.

Une autre partie importante du travail de Van Vleck concerne l'effet Jahn-Teller, qui est associé à une interaction entre les électrons et les positions des noyaux atomiques. Un atome perturbateur dans un cristal

peut parfois remplacer un atome hôte sans que le réseau environnant ne subisse de modifications essentielles. Dans certaines circonstances, la structure électronique de l'atome perturbateur est tellement incompatible avec la symétrie de l'environnement qu'elle entraîne une distorsion locale du réseau. Cet effet dit de Jahn-Teller a été prédit dans les années 1930, mais ce n'est qu'au cours de la dernière décennie que l'on est parvenu, essentiellement grâce aux travaux de Van Vleck, à comprendre ce phénomène plus en détail et à en saisir l'importance expérimentale.

Van Vleck a été le premier à souligner l'importance essentielle de la corrélation électronique (l'interaction entre les mouvements des électrons) pour l'apparition de moments magnétiques locaux, c'est-à-dire de « mini-aimants » dans les matériaux. Son ancien élève, P. W. Anderson, a développé ces idées et a réussi à expliquer comment des moments magnétiques locaux peuvent apparaître dans des métaux, comme par exemple le cuivre et l'argent, qui ne sont pas du tout magnétiques à l'état pur. Ces phénomènes peuvent être très complexes. La force des « mini-aimants » peut par exemple changer brusquement lorsque la concentration de l'ion perturbateur ne varie que de quelques pour cent. Dans un modèle quantique simple, Anderson a saisi tous les aspects qui semblent être d'une importance décisive pour comprendre ce qui se passe dans de pareilles situations.

Mott et Anderson ont séparément apporté des contributions essentielles à notre connaissance des systèmes désordonnés. Dans les matériaux cristallins, les atomes forment des réseaux réguliers, ce qui facilite grandement le traitement théorique. Dans les matériaux désordonnés, cette régularité fait défaut, soit que les composants d'un alliage soient placés au hasard dans les positions régulières du réseau, soit qu'il n'y ait pas de réseau du tout, comme c'est le cas par exemple dans le verre. Il est extrêmement difficile de traiter théoriquement de tels matériaux. En 1958, Anderson a publié un article dans lequel il montrait dans quelles conditions un électron dans un système désordonné peut soit se déplacer dans l'ensemble du système, soit être plus ou moins lié à une position spécifique en tant qu'électron localisé. C'est Mott qui, plusieurs années plus tard, a attiré l'attention des physiciens expérimentateurs sur cet article, qui est devenu l'une des pierres angulaires de notre compréhension, entre autres, de la conductivité électrique dans les systèmes désordonnés. Dans une série d'articles, Mott et Anderson ont créé une multitude de nouveaux concepts qui se sont avérés essentiels à la compréhension des matériaux désordonnés. Leurs idées ont été dans une large mesure vérifiées expérimentalement et elles ont jeté

les bases d'importants développements techniques.

Les propriétés électriques des cristaux sont décrites par la « théorie des bandes », qui donne une classification de la conductivité des métaux, des semi-conducteurs et des isolants. Cette théorie n'est cependant pas universellement valable. Une exception célèbre est fournie par l'oxyde de nickel, qui selon la théorie des bandes devrait être un conducteur métallique, mais qui est en réalité un isolant. Mott a montré comment cela peut s'expliquer par une théorie plus fine qui tient compte de l'interaction électron-électron. Cela a également conduit à l'étude des transitions dites de Mott, par lesquelles certains métaux peuvent devenir des isolants lorsque la densité électronique diminue en séparant les atomes les uns des autres d'une manière appropriée.

Tous les lauréats ont été actifs dans de vastes domaines de la physique où ils ont apporté des contributions de grande valeur. Le prix de 1977 met l'accent sur leurs travaux concernant l'interaction électron-électron et le couplage entre les mouvements des électrons et des noyaux atomiques dans les matériaux magnétiques et désordonnés, où ils sont allés bien au-delà des théories précédentes, en particulier dans le traitement des états électroniques localisés, ce qui a une importance directe pour les expériences et la technologie.

Bibliographie

— Mott (Nevill F.), *Éléments de mécanique ondulatoire* (trad. Y. Cauchois), Paris, Éd. de la Revue d'optique, 1953.
— Mott (Nevill F.), *La Structure atomique et la résistance des métaux* (trad. G. Guéron), Paris, Dunod, 1958.

Hélium superfluide et fond diffus cosmologique

Le prix Nobel de physique 1978 a été attribué pour moitié à Piotr Leonidovitch Kapitsa

> « pour ses inventions et découvertes fondamentales dans le domaine de la physique des basses températures ».

L'autre moitié revient conjointement à Arno Allan Penzias et Robert Woodrow Wilson

> « pour leur découverte du fond diffus cosmologique ».

Physique des basses températures

Tous les objets et la matière sont constitués de petites particules, atomes et molécules, en mouvement constant. La température de la matière ou du corps dépend de l'intensité de ce que l'on appelle le « mouvement thermique ». Lorsque ce mouvement est interrompu, la température du corps tombe au « zéro absolu », à -273 °C.

La physique des basses températures s'intéresse aux propriétés des matériaux à des températures légèrement supérieures au zéro absolu. On a montré qu'à ces températures, certains matériaux acquièrent des propriétés radicalement différentes, qui intéressent les physiciens et sont souvent précieuses d'un point de vue technique. Par exemple, de nombreux métaux et alliages deviennent supraconducteurs.

Le premier prix Nobel dans ce domaine a été décerné en 1913 à Kamerlingh Onnes, de l'université de Leyde aux Pays-Bas, pour « ses recherches sur les propriétés de la matière à basse température, qui ont conduit entre autres à la production d'hélium liquide ». Cette substance est devenue depuis l'un des moyens les plus utiles pour atteindre les basses températures.

En 1934, Kapitsa a construit un nouveau dispositif de production d'hélium liquide, qui refroidit le gaz par des détentes périodiques. Pour la première fois, une machine pouvait produire de l'hélium liquide en grande quantité sans refroidissement préalable par de l'hydrogène liquide. Cela a marqué une nouvelle étape dans le domaine de la physique des basses températures.

Dans les années 1920, on a découvert que lorsque l'hélium liquide était exposé à une température inférieure à 2,3 degrés au-dessus du zéro absolu, il se transformait en une forme inhabituelle, qui a été baptisée « hélium II ». En 1938, Kapitsa a pu montrer que l'hélium II avait une mobilité interne si grande et une viscosité si négligeable, voire nulle, qu'il pouvait être qualifié de « superfluide ». Au cours des années suivantes, les expériences de Kapitsa sur les propriétés de l'hélium II ont montré qu'il se trouvait dans un « état quantique » macroscopique et qu'il s'agissait donc d'un « fluide quantique » à entropie nulle, c'est-à-dire qu'il possédait un ordre atomique parfait.

Grâce à ses remarquables capacités expérimentales et techniques, Kapitsa a joué un rôle de premier plan dans la physique des basses températures pendant plusieurs décennies. Il a également fait preuve d'une étonnante capacité à organiser et à diriger des travaux : il a créé des laboratoires pour l'étude des basses températures à Cambridge (au Royaume-Uni) et à Moscou. L'un de ses associés était Lev D. Landau, qui a reçu en 1962 le prix Nobel de physique pour ses études théoriques sur l'hélium liquide. Les découvertes, les idées et les nouvelles techniques de Kapitsa ont été à la base du développement moderne de la physique des basses températures.

Le mystérieux fond diffus cosmologique

On sait depuis relativement longtemps que divers objets astronomiques émettent des rayonnements sous forme d'ondes radio. La radioastronomie a pris de l'importance et constitue aujourd'hui un complément très important de l'astronomie optique classique. Le rayonnement est émis de différentes manières. Par exemple, les nuages d'hydrogène de la galaxie émettent un rayonnement lorsqu'ils sont excités, et les électrons des rayons cosmiques émettent un rayonnement lorsqu'ils tournent en spirale dans les faibles champs magnétiques de l'espace interstellaire. On a découvert que divers objets, tels que des étoiles, des galaxies et des quasars, émettent des ondes radio. Afin d'étudier ces sources radio, il est bien sûr nécessaire que leur rayonnement apparaisse au-dessus du fond de rayonnement général. La composition et l'origine de ce fond ont longtemps été mal comprises. On supposait qu'il s'agissait du rayonnement intégré d'un grand nombre de sources, tant galactiques qu'extragalactiques.

L'étude du rayonnement micro-onde cosmique, et en particulier du faible rayonnement diffus, nécessite évidemment l'utilisation d'un

récepteur très sensible. Un tel appareil a été construit au début des années 1960 dans les laboratoires des téléphones Bell aux États-Unis. Il a été utilisé à l'origine pour les communications radio avec les satellites *Echo* et *Telstar*. Lorsque cet instrument est devenu disponible pour la recherche, les deux radioastronomes Arno Penzias et Robert Wilson ont décidé de l'utiliser pour l'étude du rayonnement micro-onde cosmique. Il était très bien adapté à cet usage : le bruit de l'instrument, c'est-à-dire le rayonnement créé par l'instrument lui-même, était très faible ; de plus, il était accordé sur une longueur d'onde de 7 centimètres. On savait déjà que l'intensité des micro-ondes cosmiques diminue avec la longueur d'onde. On pouvait donc s'attendre à ce que l'intensité à 7 centimètres soit très faible. Cependant, à leur grande surprise, Penzias et Wilson ont trouvé une intensité relativement élevée. Ils ont d'abord pensé que ce rayonnement devait provenir soit de l'instrument, soit de l'atmosphère. Cependant, en procédant à des tests minutieux, ils ont montré qu'il provenait de l'espace et que son intensité était la même dans toutes les directions. Leurs mesures ont donc permis de tirer la conclusion surprenante que l'Univers est uniformément rempli de rayonnement micro-onde.

Ces deux chercheurs n'ont fait aucune suggestion quant à l'origine de ce mystérieux rayonnement. Lorsque cependant leur découverte a été connue, il s'est avéré qu'on avait déjà spéculé sur l'existence d'un faible rayonnement micro-onde. Le point de départ de ces spéculations avait été un certain nombre de tentatives, faites dans les années 1940, pour expliquer la synthèse des éléments chimiques. Une théorie développée par le physicien américain Gamow et ses collaborateurs suggérait que cette synthèse avait eu lieu au début de l'existence de l'Univers. L'étude des spectres des étoiles et des galaxies montre que l'Univers est actuellement en expansion uniforme. Cela signifie qu'à un certain moment, il y a 15 milliards d'années, l'Univers était très compact. Il est donc tentant de supposer que l'Univers a été créé par une explosion cosmique, ou *Big Bang*, bien que d'autres explications soient possibles. Cette théorie du *Big Bang* implique l'apparition de températures très élevées, de l'ordre de 10 milliards de degrés. Ce n'est qu'à ces températures que diverses réactions nucléaires peuvent avoir lieu, de sorte que des éléments chimiques peuvent être construits à partir des particules élémentaires supposées être présentes dès le début. Cela implique également la libération d'une grande quantité de rayonnement, dont le spectre s'étend des rayons X aux ondes radio, en passant par la lumière visible. Après cette explosion hypothétique, la température

aurait diminué rapidement (on suppose que la « création » s'est achevée en quelques minutes). La question qui se pose alors est de savoir ce qu'il est advenu des débris de l'explosion : la matière, composée d'hydrogène, d'hélium et de divers autres éléments légers, se serait répandue sous la forme d'un nuage de gaz chaud qui se serait progressivement refroidi pour former des condensations, lesquelles se seraient transformées en galaxies et en étoiles. Mais qu'en est-il du rayonnement ? Étant donné que l'Univers est pratiquement transparent au rayonnement de ces longueurs d'onde, il ne lui serait rien arrivé : le rayonnement se serait étendu dans l'Univers à la même vitesse que l'Univers lui-même. La question est de savoir s'il existe encore et, dans l'affirmative, s'il est possible de le détecter. La difficulté réside dans le fait qu'en raison de l'expansion de l'Univers, la longueur d'onde du rayonnement a diminué, de la même manière que la lumière provenant de galaxies lointaines est « décalée vers le rouge ». Au lieu du rayonnement « dur » qui aurait été émis lors du *Big Bang*, le rayonnement que l'on pourrait détecter aujourd'hui correspondrait à celui émis par un corps dont la température serait de 3 degrés au-dessus du zéro absolu. Aucune lumière visible n'est émise à une température aussi basse : le rayonnement émis se situe entièrement dans le domaine des micro-ondes, avec une intensité maximale à environ 0,1 centimètre. C'est à cause de ces difficultés que les premières prédictions ont été oubliées : on pensait qu'il serait impossible de détecter un rayonnement aussi faible dans le bruit cosmique.

Lorsque Penzias et Wilson ont découvert le fond diffus cosmologique, il était raisonnable de penser qu'il s'agissait d'un rayonnement fossile issu du *Big Bang*. Cette interprétation a été étayée par un certain nombre d'études sur la forme du spectre, qui ont rapidement montré qu'il s'agissait bien de la forme attendue pour un corps ayant une température de 3 degrés. D'autres interprétations sont toutefois possibles, même si elles ne s'appuient pas sur des bases théoriques détaillées. La découverte de Penzias et Wilson était fondamentale : elle a permis d'obtenir des informations sur les processus cosmiques qui se sont déroulés il y a très longtemps, à l'époque de la création de l'Univers.

Récemment, l'étude de ce rayonnement a été élargie. Comme il remplit tout l'Univers et qu'il interagit avec la matière interstellaire et intergalactique, il peut être utilisé comme sonde de mesure. Ces dernières années, on a découvert que ce rayonnement n'est pas tout à fait uniforme et que son intensité dépend de la direction. Cela peut être interprété comme un effet du mouvement de la Terre et du système

solaire par rapport au champ de rayonnement, et sa variation peut être utilisée pour mesurer ce mouvement. Comme la distribution de l'intensité du rayonnement reflète la distribution de la matière dans l'Univers, il est possible de définir un mouvement absolu dans l'espace. Ainsi, la découverte du fond diffus cosmologique par Penzias et Wilson a marqué une étape importante dans la science de la cosmogonie.

Bibliographie

— Kapitsa (P. L.), *Le Livre du problème de physique* (trad. IREPS de Strasbourg), Paris, CEDIC, 1977.

L'unification des interactions faible et électromagnétique

Le prix Nobel de physique 1979 a été attribué à Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg

> « pour leurs contributions à la théorie unifiée des interactions faible et électromagnétique entre particules élémentaires et notamment pour la prédiction du courant neutre faible ».

La physique, comme d'autres sciences, s'efforce de trouver des causes communes à des observations naturelles ou expérimentales apparemment sans rapport entre elles. Un exemple classique est la force de gravitation introduite par Newton pour expliquer des phénomènes aussi disparates que la chute d'une pomme sur le sol et le mouvement de la Lune autour de la Terre.

Un autre exemple s'est produit au XIX^e^ siècle, lorsqu'on s'est rendu compte, principalement grâce aux travaux d'Œrsted au Danemark et de Faraday en Angleterre, que l'électricité et le magnétisme étaient étroitement liés et constituaient en réalité des aspects différents de la force électromagnétique ou de l'interaction entre les charges. La synthèse finale a été présentée dans les années 1860 par Maxwell en Angleterre. Son travail prédisait l'existence d'ondes électromagnétiques et interprétait la lumière comme un phénomène d'ondes électromagnétiques.

La découverte de la radioactivité de certains éléments lourds vers la fin du XIX^e^ siècle et le développement de la physique du noyau atomique qui s'en est suivi ont conduit à l'introduction de deux nouvelles forces ou interactions : la force forte et la force faible. Contrairement à la gravitation et à l'électromagnétisme, ces forces n'agissent qu'à de très courtes distances, de l'ordre du diamètre nucléaire ou moins. Alors que l'interaction forte maintient les protons et les neutrons ensemble dans le noyau, l'interaction faible provoque ce que l'on appelle la radioactivité bêta. Le processus typique est la désintégration du neutron : le neutron, de charge nulle, est transformé en proton chargé positivement, avec l'émission d'un électron chargé négativement et d'une particule neutre, sans masse [4], le neutrino.

4. NDT. C'est ce que l'on pensait en 1979.

Bien que l'interaction faible soit beaucoup plus faible que l'interaction forte et l'interaction électromagnétique, elle revêt une grande importance dans de nombreux domaines. L'énergie du Soleil, essentielle à la vie sur Terre, est produite lorsque l'hydrogène fusionne ou brûle en hélium dans une chaîne de réactions nucléaires se produisant à l'intérieur du Soleil. La première réaction de cette chaîne, la transformation de l'hydrogène en hydrogène lourd (deutérium), est provoquée par la force faible. Sans cette force, la production d'énergie solaire ne serait pas possible. Encore une fois, si la force faible avait été beaucoup plus forte, la durée de vie du Soleil aurait été trop courte pour que la vie ait eu le temps d'évoluer sur une quelconque planète. L'interaction faible trouve une application pratique dans les éléments radioactifs utilisés en médecine et dans la technologie, qui ont en général une radioactivité bêta, et dans la désintégration bêta d'un isotope du carbone en azote, qui est à la base de la méthode du carbone 14 pour la datation des vestiges archéologiques organiques.

Théories de l'interaction faible

Une première théorie de l'interaction faible a été proposée dès 1934 par le physicien italien Fermi. Toutefois, on n'a pu donner une description satisfaisante de l'interaction faible entre les particules à basse énergie qu'après la découverte en 1956 que la force faible diffère des autres forces en ce qu'elle n'est pas symétrique par réflexion. En d'autres termes, la force faible fait une distinction entre la gauche et la droite. Bien que cette théorie ne soit valable que pour les basses énergies et ait donc un domaine de validité restreint, elle suggère une certaine parenté entre l'interaction faible et l'interaction électromagnétique.

Dans une série de travaux distincts réalisés dans les années 1960, les lauréats du prix Nobel 1979, Glashow, Salam et Weinberg, ont élaboré une théorie qui s'applique également à des énergies plus élevées et qui, dans le même temps, unifie les interactions faible et électromagnétique dans un formalisme commun. Glashow, Salam et Weinberg sont partis de contributions antérieures d'autres scientifiques. Une généralisation du principe dit de jauge pour la description de l'interaction électromagnétique a revêtu une importance particulière. Cette généralisation a été élaborée vers le milieu des années 1950 par Yang et Mills aux États-Unis. Après les travaux fondamentaux des années 1960, on a développé la théorie. Une contribution importante a été apportée en 1971 par le jeune physicien néerlandais 't Hooft.

La théorie prédit notamment l'existence d'un nouveau type d'interaction faible, dans lequel les particules qui réagissent ne changent pas de charge. Ce comportement est similaire à ce qui se passe dans l'interaction électromagnétique. On dit que l'interaction se produit par l'intermédiaire d'un courant neutre. Il convient d'opposer ce comportement à la désintégration bêta du neutron, où la charge est modifiée lorsque le neutron se transforme en proton.

Première observation du courant neutre faible

La première observation d'un effet du nouveau type d'interaction faible a été faite en 1973 au laboratoire européen de recherche nucléaire, le CERN à Genève, lors d'une expérience où des noyaux ont été bombardés par un faisceau de neutrinos. Depuis lors, une série d'expériences sur les neutrinos au CERN et au laboratoire Fermi près de Chicago ont donné des résultats en bon accord avec la théorie. D'autres laboratoires ont également testé avec succès les effets du courant neutre faible. Un résultat particulièrement intéressant, publié au cours de l'été 1978, est celui d'une expérience menée à l'accélérateur d'électrons SLAC à Stanford aux États-Unis. Dans cette expérience, on a étudié la diffusion d'électrons de haute énergie sur des noyaux de deutérium et on a pu observer un effet dû à une interaction directe entre les parties électromagnétique et faible de l'interaction unifiée.

Une interaction portée par des particules

Une conséquence importante de la théorie est que l'interaction faible est portée par des particules ayant certaines propriétés en commun avec le photon, qui porte l'interaction électromagnétique entre particules chargées. Ces « bosons vecteurs » se distinguent du photon sans masse principalement par une masse importante, ce qui correspond à la faible portée de l'interaction faible. La théorie prévoit des masses de l'ordre d'une centaine de protons, mais les accélérateurs de particules actuels ne sont pas assez puissants pour produire ces particules.

Les contributions récompensées par le prix Nobel de physique 1979 ont été d'une grande importance pour le développement intense de la physique des particules au cours de cette décennie.

Bibliographie

— Glashow (Sheldon L.), *Le Charme de la physique* (trad. O. Colardelle), Paris, Albin Michel, 1997.
— Weinberg (Steven), *Les Trois premières minutes de l'univers* (trad. J.-B. Yelnik), Paris, Seuil, 1978.
— Weinberg (Steven), *Le Monde des particules* (trad. F. Bouchet), Paris, Belin, 1985.
— Weinberg (Steven), *Le Rêve d'une théorie ultime* (trad. J.-P. Mourlon), Paris, Odile Jacob, 1997.

Des violations des principes de symétrie

Le prix Nobel de physique 1980 a été attribué à James Watson Cronin et Val Logsdon Fitch

> « pour la découverte de violations des principes fondamentaux de symétrie dans la désintégration des mésons K neutres ».

Les symétries jouent un rôle important dans de nombreuses sciences et dans beaucoup d'autres domaines. Le prix Nobel de physique 1980 a été décerné pour une découverte inattendue dans une expérience consacrée à l'examen critique de la validité de trois principes de symétrie liés. Ces principes sont d'une importance capitale pour la formulation des lois fondamentales de la nature.

L'expérience

La découverte a été faite au laboratoire national de Brookhaven par un groupe de recherche dirigé par James Cronin et Val Fitch, qui ont également initié la recherche. Un faisceau de particules élémentaires neutres a été produit à l'aide de l'accélérateur de protons AGS. Leur désintégration radioactive en vol a été enregistrée et mesurée avec une grande précision. Le dispositif de détection spécialement conçu était vaste et complexe. Toutes les difficultés rencontrées dans l'analyse des données ont été surmontées de manière habile et convaincante. Le type de mésons K neutres que Cronin et Fitch ont choisi d'étudier est remarquable, car on peut considérer qu'ils sont constitués pour moitié de matière ordinaire et pour moitié d'antimatière.

Trois principes de symétrie

L'un des trois principes de symétrie stipule que les lois de la nature sont exactement les mêmes pour l'antimatière et la matière ordinaire. Les mésons K neutres sont les objets les plus appropriés pour tester de manière critique et sensible la validité de ce principe, comme l'ont montré Cronin et Fitch. Les deux autres principes de symétrie stipulent que les lois fondamentales ont une symétrie miroir exacte et une symétrie

par renversement du temps. Par cette dernière expression, on entend la symétrie en cas d'inversion du sens du mouvement.

La situation avant la découverte primée

La symétrie complète vaut pour les lois qui décrivent les phénomènes électriques et magnétiques, qui englobent la plupart des choses de notre vie quotidienne. C'est le cas des trois symétries. Elles sont également respectées par la gravitation et par l'interaction forte (une force entre particules élémentaires). En revanche, il existe une absence maximale de symétrie gauche-droite, c'est-à-dire de symétrie miroir, dans un type de processus physique : les désintégrations radioactives. T. D. Lee et C. N. Yang, lauréats du prix Nobel en 1957, ont compris que la violation de cette symétrie était profondément ancrée dans la loi même de l'interaction faible, qui est à l'origine des désintégrations radioactives et des processus connexes. L'affirmation presque évidente qui a cessé d'être valable en 1957 disait que l'image miroir d'un processus physique est toujours un processus physique possible.

Cependant, dès 1957, on pouvait éviter de conclure que la nature faisait une distinction absolue entre la gauche et la droite. Les processus radioactifs n'ont pas non plus montré une symétrie complète entre la matière et l'antimatière. Ce manque de symétrie a été annulé par l'autre d'une manière complète et élégante. Ainsi, l'image miroir d'un processus physique dans notre monde est toujours un processus possible dans l'antimonde et vice versa. Si l'Univers était également constitué d'antimatière, les habitants éventuels d'une autre planète ne pourraient pas déterminer par eux-mêmes s'ils sont constitués de l'un ou de l'autre type d'atomes.

Symétrie par renversement du temps

La conclusion de 1957 selon laquelle les deux violations de symétrie s'annulaient l'une l'autre était très satisfaisante car elle permettait au troisième principe de symétrie de conserver sa validité. Ce principe dit que les lois fondamentales ne changent pas lorsque tous les mouvements sont inversés. Cette symétrie par renversement du temps est en fait valable pour tous les processus régis par les forces électromagnétiques. Il s'agit donc d'une pierre angulaire de la physique et de la chimie. La symétrie est également valable pour les processus régis par la force gravitationnelle et la force forte. En raison de l'annulation

mutuelle des violations de symétrie dans les processus faibles, on pouvait considérer que la symétrie de renversement du temps continuait à être généralement valide. Elle est devenue la nouvelle pierre angulaire de la théorie.

Conséquences de la découverte primée

Le résultat des travaux primés a montré pour la première fois que l'asymétrie gauche-droite n'est pas toujours complètement compensée par le passage de la matière à l'antimatière. Ce résultat a été vérifié dans plusieurs expériences similaires menées dans d'autres laboratoires et par d'autres groupes de recherche. Cela a conduit à une remise en cause de la nouvelle pierre angulaire. En vain on a essayé de se soustraire à la conclusion aussi radicalement nouvelle que celle qui affirme que la symétrie parfaite par renversement du temps n'est pas toujours vraie. Les nouvelles connaissances nous permettent de faire une distinction entre la matière et l'antimatière d'une manière absolue et pas seulement relative. Les directions gauche et droite pourraient alors également recevoir une signification absolue, perdant ainsi le caractère arbitraire de la définition.

La recherche des causes profondes des violations de symétrie découvertes lors de l'expérience de Cronin et Fitch se poursuit activement à l'heure actuelle. Les progrès de la physique des particules élémentaires au cours des dernières années ont créé de nouvelles possibilités intéressantes.

L'objectif était d'essayer de comprendre comment un univers, à l'origine très chaud et symétrique, pouvait éviter que la matière et l'antimatière ne s'annihilent presque immédiatement l'une l'autre. En d'autres termes, on s'est efforcé de décrire comment la matière dont nous sommes constitués a été créée lors d'un *Big Bang* et comment elle a pu survivre aux douleurs de l'accouchement.

Cette découverte souligne, une fois de plus, que même les principes scientifiques presque évidents ne peuvent être considérés comme pleinement valables tant qu'ils n'ont pas été soumis à un examen critique dans le cadre d'expériences précises.

Spectroscopie laser et spectroscopie électronique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1981 pour moitié conjointement à Nicolaas Bloembergen de l'université Harvard et à Arthur L. Schawlow de l'université Stanford

> « pour leur contribution au développement de la spectroscopie laser ».

L'autre moitié du prix revient à Kai M. Siegbahn de l'université d'Uppsala

> « pour sa contribution au développement de la spectroscopie électronique à haute résolution ».

Ce prix récompense le développement de deux formes de spectroscopie atomique, à savoir la spectroscopie laser, c'est-à-dire l'étude des systèmes atomiques à l'aide de la lumière laser, et la spectroscopie électronique, c'est-à-dire l'étude des électrons expulsés des systèmes atomiques par différents types de processus.

La spectroscopie laser

En 1917, Albert Einstein a montré qu'il existait trois types de processus de rayonnement : l'absorption (lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par le système), l'émission spontanée (lorsqu'un système sans influence extérieure émet un rayonnement) et l'émission stimulée (lorsqu'un système est incité à émettre un rayonnement par le biais d'influences extérieures). Les deux premiers processus étaient connus depuis longtemps. Ils sont par exemple à l'origine des spectres optiques. L'existence de l'émission stimulée était toutefois une nouveauté à l'époque des célèbres travaux d'Einstein, mais aucune importance pratique n'a pu être décelée à ce moment-là.

Au début des années 1950, des scientifiques des États-Unis et de l'Union soviétique ont tenté d'utiliser l'émission stimulée de systèmes atomiques pour amplifier de faibles signaux micro-ondes et concevoir des oscillateurs basés sur de tels systèmes. C'est ainsi qu'est né le maser, « amplification de micro-ondes par émission stimulée de rayonnement »,

conçu pour la première fois par Townes et ses collaborateurs aux États-Unis et suggéré à la même époque par Basov et Prokhorov en URSS.

L'idée d'étendre le principe du maser au domaine infrarouge ou optique est apparue dans différents groupes à la fin des années 1950. La contribution décisive à la réalisation de cette idée a été apportée en 1958 par Schawlow et Townes, qui ont ensuite publié un travail qui analysaient les conditions préalables nécessaires à une telle conception, tant sur le plan théorique que pratique. Prokhorov a proposé à la même époque une conception similaire pour la production d'ondes plus longues. D'autres suggestions basées sur la même idée ont également été présentées à cette époque. Toutefois, ce sont principalement les travaux de Schawlow et de Townes qui ont initié tout le domaine dynamique que nous associons aujourd'hui au concept de « laser » (amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement).

Le prix Nobel de physique 1964 a été décerné à Townes, Prokhorov et Basov pour « des travaux fondamentaux dans le domaine de l'électronique quantique, qui ont conduit à la construction d'oscillateurs et d'amplificateurs basés sur le principe du laser-maser ». Toutefois, les développements ultérieurs, en particulier dans le domaine des lasers, ont rendu ce domaine de plus en plus digne de récompenses supplémentaires.

Le principe fondamental du laser, comme pour le maser, est que l'on tente d'une manière ou d'une autre de provoquer une inversion de population, c'est-à-dire un système avec plus d'atomes dans un état supérieur que dans un état inférieur, contrairement à ce que l'on obtient lorsque le système est laissé à lui-même sans influences extérieures. Si un atome dans l'état supérieur tombe dans l'état inférieur par l'émission d'un photon (quantum de lumière), ce photon peut stimuler un autre atome à émettre un photon du même type, etc. Un processus en chaîne peut ainsi se mettre en place. On obtient ce que l'on appelle la lumière laser. Cette lumière a la particularité d'être cohérente et les photons qui composent le faisceau lumineux oscillent largement en phase les uns avec les autres, contrairement à la lumière ordinaire comme celle d'une ampoule. La lumière laser peut en outre être rendue extrêmement parallèle et monochromatique, ce qui est à la base de bon nombre de ses domaines d'application.

Le premier laser fonctionnel a été construit en 1960 et les progrès depuis lors ont été rapides. Il est désormais possible de produire de la lumière laser dans toute la gamme des longueurs d'onde visibles, ainsi que dans certaines parties des gammes infrarouge et ultraviolette. Le

laser est donc devenu un instrument de spectroscopie atomique presque idéal pour étudier les propriétés des atomes et des molécules. Un certain nombre de méthodes spectrographiques ont été mises au point ces dernières années. Nombre de ces méthodes sont basées sur des phénomènes optiques non linéaires, dus au fait que la lumière laser est si puissante que les relations linéaires habituelles ne s'appliquent plus.

L'une de ces méthodes spectrographiques non linéaires, qui a été développée et appliquée en particulier par Schawlow et ses collègues de l'université Stanford, est fondée sur le fait que des « phénomènes de saturation » peuvent apparaître dans l'absorption de la lumière laser en raison de sa forte intensité. Ce phénomène peut être utilisé dans ce que l'on appelle la spectroscopie sans effet Doppler, où l'élargissement des lignes spectrales dû au mouvement des atomes (l'effet Doppler) a été éliminé. On a appliqué cette méthode à l'étude de la plus simple des substances, l'hydrogène, avec une très grande précision. Il a ainsi été possible de déterminer l'une des constantes atomiques les plus fondamentales, la constante de Rydberg, avec un degré de précision nettement supérieur à ce qui était possible auparavant, ce qui est de la plus haute importance pour notre connaissance des constantes fondamentales de la nature en général.

Une autre catégorie de méthodes optiques non linéaires de spectroscopie est basée sur le mélange de deux ou plusieurs ondes lumineuses. Ce type de phénomène a été mis en évidence peu après l'introduction du laser et sa théorie a été étudiée en profondeur à la même époque par Nicolaas Bloembergen et ses collaborateurs. Le mélange de quatre ondes, où trois ondes lumineuses cohérentes agissent ensemble pour produire une quatrième onde lumineuse, présente un intérêt particulier. Cette méthode permet de produire de la lumière laser bien au-delà du domaine visible, dans l'infrarouge et l'ultraviolet. Cette méthode a donc considérablement élargi la gamme des longueurs d'onde accessibles aux études de spectroscopie laser. Une forme particulière de mélange à quatre ondes est connue sous le nom de « diffusion Raman anti-Stokes cohérente », qui a été appliquée à des études très diverses, allant de l'optimisation des processus de combustion dans les moteurs automobiles à l'étude du transport d'éléments dans les tissus biologiques.

Spectroscopie électronique

Lorsqu'une substance est irradiée par des rayons ultraviolets ou des rayons X, elle peut émettre des électrons. Cet effet photoélectrique a

été observé pour la première fois par Heinrich Hertz dans les années 1880. Albert Einstein en a donné l'explication correcte en 1905 en utilisant l'hypothèse quantique introduite par Max Planck cinq ans plus tôt. L'énergie des électrons émis est égale à l'énergie des photons de la lumière incidente moins l'énergie avec laquelle l'électron est lié à l'échantillon. En utilisant une lumière monochromatique, pour laquelle tous les photons ont la même énergie, il est donc possible, en étudiant les électrons émis, d'obtenir des informations précieuses sur la structure électronique de l'échantillon examiné. Cette méthode a commencé à être appliquée dès les années 1910, principalement par H. Robinson en Grande-Bretagne. Cependant, il s'est avéré que les spectres obtenus ne donnaient que peu d'informations sur le matériau étudié, principalement parce que les électrons sont exposés à des pertes d'énergie plus ou moins importantes par le biais de collisions lors de leur sortie du matériau. La méthode n'a donc pas pris une grande importance à cette époque. Au lieu de cela, une autre méthode a été développée pour étudier l'intérieur des atomes, à savoir la spectroscopie des rayons X, où l'on étudie le rayonnement émis lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie interne à un autre.

L'intérêt pour l'étude sérieuse des photoélectrons ne s'est ravivé que dans les années 1950. L'étape décisive a été franchie lorsque Kai Siegbahn et ses collaborateurs Carl Nordling et Evelyn Sokolowski ont commencé à analyser les photoélectrons à l'aide d'un spectromètre à haute résolution et à double focalisation, conçu à l'origine pour l'étude précise des électrons émis lors de la désintégration radioactive de certains noyaux atomiques, appelée désintégration bêta. Les spectres d'électrons contenaient, outre les raies larges observées précédemment, un certain nombre de raies fortes et extrêmement étroites qui n'avaient jamais été observées auparavant et qui provenaient d'électrons ayant quitté l'échantillon sans perte d'énergie. Comme les pertes d'énergie sont quantifiées, c'est-à-dire que les électrons ne peuvent restituer de l'énergie à l'échantillon qu'en certaines quantités, la probabilité qu'il n'y ait pas de perte d'énergie est considérable. Pour découvrir ces lignes nettes, il faut toutefois que la résolution de l'instrument soit suffisamment élevée, ce qui n'était pas le cas dans les expériences précédentes. Cette découverte a ouvert la voie à une nouvelle forme de spectroscopie.

Cette nouvelle forme de spectroscopie électronique pouvait dès lors concurrencer sérieusement la technique de spectroscopie des rayons X. Siegbahn, Nordling et Sokolowski ont réalisé pendant plusieurs années, à la fin des années 1950, une étude systématique des énergies électro-

niques de liaison de différents éléments, étude qui constitue toujours la principale source d'information.

En étudiant de plus près les énergies électroniques, on s'est aperçu que celles-ci, pour un même atome, dépendaient dans une faible mesure de la molécule ou du cristal auquel l'atome était lié, c'est-à-dire d'un déplacement chimique. On avait déjà observé des décalages similaires dans les spectres de rayons X, mais ces décalages étaient beaucoup plus difficiles à interpréter. Les déplacements chimiques sont dus à des densités d'électrons différentes à proximité des atomes. Le développement de la spectroscopie électronique a permis d'obtenir une méthode analytique utile en pratique, grâce à laquelle il est possible d'étudier non seulement les atomes présents dans un échantillon, mais aussi l'environnement chimique dans lequel ces atomes se trouvent. C'est dans ce contexte que le concept d'analyse chimique par spectroscopie d'électrons a été forgé.

Après cette phase d'introduction, la spectroscopie électronique s'est rapidement développée. Cette évolution a été largement influencée par les efforts de Siegbahn et de ses collaborateurs. Des spectromètres électroniques commerciaux sont disponibles depuis quelques années déjà et la spectroscopie électronique est maintenant appliquée sous diverses formes dans des centaines de laboratoires à travers le monde. La méthode a trouvé plusieurs champs d'application importants, par exemple dans l'étude des processus chimiques de surface tels que la catalyse et la corrosion.

Les transitions de phase

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1982 à Kenneth G. Wilson, professeur à l'université Cornell aux États-Unis,

> « pour sa théorie des phénomènes critiques liés aux transitions de phase ».

Dans la vie quotidienne et la physique classique, nous savons que la matière peut exister sous différentes phases et que des transitions d'une phase à l'autre peuvent se produire si l'on modifie, par exemple, la pression ou la température. Un liquide passe en phase gazeuse lorsqu'il est suffisamment chauffé, un métal fond à une certaine température, un aimant permanent perd son aimantation au-delà d'une certaine température critique, pour ne citer que quelques exemples.

Les transitions de phase sont étudiées en physique depuis longtemps et pour un grand nombre de systèmes différents. La transition de phase est souvent caractérisée par un changement brusque de la valeur de certaines propriétés physiques. Dans d'autres cas, la transition d'une phase à une autre peut se faire en douceur. Des exemples de ce dernier cas sont la transition entre le liquide et le gaz au point critique, et le passage du ferromagnétisme au paramagnétisme dans des métaux tels que le fer, le nickel et le cobalt. Ces transitions de phase lisses présentent au contraire un certain nombre d'anomalies typiques à proximité du point critique. Certaines quantités dépassent toutes les limites lorsque l'on s'approche de la température critique. Ces anomalies, généralement appelées phénomènes critiques, sont liées aux très grandes fluctuations qui se produisent dans le système lorsque l'on s'approche du point critique.

Une première description qualitative du comportement critique de certains systèmes spéciaux a été donnée dès le début du XX^{e} siècle. La transition entre un liquide et un gaz et la transition entre le ferromagnétisme et le paramagnétisme en sont des exemples. Le physicien soviétique L. Landau, lauréat du prix Nobel de physique en 1962, a publié en 1937 une théorie générale des transitions de phase, qui contenait les résultats de la plupart des théories antérieures en tant que cas particuliers.

Une étape essentielle vers une meilleure compréhension a été franchie lorsque L. Onsager, lauréat du prix Nobel de chimie en 1968, a trouvé la solution exacte pour les propriétés thermodynamiques d'un modèle bidimensionnel sujet de fréquentes discussions. Ce fut une grande surprise de constater que la théorie de Landau ainsi que toutes les théories précédentes échouaient complètement à prédire le comportement à proximité du point critique. Ce résultat déconcertant a conduit à des études approfondies et détaillées d'un grand nombre de systèmes. On s'est aperçu que le comportement critique était très différent des prédictions de la théorie de Landau. Des calculs numériques utilisant différents modèles théoriques ont également montré de fortes déviations par rapport à la théorie de Landau. M. E. Fisher, de l'université Cornell, a joué un rôle de premier plan grâce à son analyse des données expérimentales, étayée par des analyses théoriques et des calculs numériques, et, ce qui est probablement le plus important, en prenant des initiatives et en agissant comme un catalyseur pour de nouveaux progrès. Il convient de mentionner les importantes contributions théoriques de B. Widom, également de l'université Cornell, des physiciens soviétiques A. Z. Patashinski et V. L. Pokrovski et surtout de L. P. Kadanoff, de l'université de Chicago. Kadanoff a avancé une idée nouvelle et originale très importante qui semble avoir eu une forte influence sur les développements ultérieurs. Sa théorie ne permettait cependant pas de calculer le comportement critique.

Le problème a été résolu de manière précise et profonde par Kenneth Wilson dans deux articles fondamentaux publiés en 1971, suivis d'une série d'articles dans les années suivantes. Wilson s'est rendu compte que les phénomènes critiques sont différents de la plupart des autres phénomènes physiques en ce sens qu'il faut tenir compte des fluctuations du système sur des échelles de longueur très différentes. Normalement, nous n'avons affaire qu'à une seule échelle de longueur pour un phénomène donné. La physique des ondes radio, celle des ondes hydrodynamiques, de la lumière visible, des atomes, des noyaux ou des particules élémentaires, où chaque système est caractérisé par une certaine échelle de longueur et où nous n'avons pas à nous préoccuper d'échelles de longueur très différentes, sont des exemples de situation normale. Mais pour un système condensé ou un gaz proche du point critique, nous ne pouvons pas nous limiter à une seule échelle de longueur. Outre les fluctuations à grande échelle du même ordre de grandeur que l'ensemble du système, nous avons des fluctuations de plus courte portée jusqu'à la dimension atomique. Dans des cas typiques, nous pouvons avoir des

fluctuations d'une portée de l'ordre du centimètre et jusqu'à moins d'un millionième de centimètre. Toutes ces fluctuations sont importantes à proximité du point critique et une description théorique doit prendre en compte l'ensemble du spectre des fluctuations. Une attaque frontale avec des méthodes directes est hors de question, même avec l'aide des ordinateurs les plus rapides.

Wilson a réussi à développer une méthode ingénieuse pour résoudre le problème. Au lieu d'une attaque frontale, il a développé une méthode pour diviser le problème en une suite de problèmes plus simples, dans lesquels chaque partie peut être résolue. Wilson a construit sa théorie sur une modification essentielle d'une méthode de physique théorique appelée « groupe de renormalisation », qui a été développée dès les années cinquante et a été appliquée avec un succès variable à différents problèmes.

La théorie de Wilson sur les phénomènes critiques donne une description théorique complète du comportement à proximité du point critique et fournit également des méthodes pour calculer numériquement les quantités cruciales. Son analyse a montré que suffisamment près du point critique, la plupart des variables du système deviennent redondantes. Les phénomènes critiques sont essentiellement déterminés par deux nombres : la dimension du système (1, 2 ou 3) et la dimension d'une quantité clé appelée « paramètre d'ordre », une quantité introduite dès la théorie de Landau. Il s'agit d'un résultat physique d'une grande généralité. Il implique que de nombreux systèmes, différents et sans aucun rapport entre eux, peuvent présenter un comportement identique près du point critique. À titre d'exemple, on peut citer les liquides, les mélanges de liquides, les matériaux ferromagnétiques et les alliages binaires : tous présentent le même comportement critique. Les travaux expérimentaux et théoriques des années soixante suggéraient cette forme d'universalité, mais la théorie de Wilson a apporté une preuve convaincante à partir de principes fondamentaux. Les calculs des paramètres cruciaux montrent une bonne concordance avec les données expérimentales.

Wilson est le premier physicien à avoir mis au point une méthode générale et pratique dans laquelle des échelles de longueur très différentes apparaissent simultanément. Cette méthode est donc applicable, moyennant des modifications appropriées, à d'autres problèmes importants et non encore résolus. La turbulence dans les fluides et les gaz est un exemple classique où de nombreuses échelles de longueur différentes apparaissent. Dans l'atmosphère, on trouve des écoulements turbulents

de toutes tailles, du plus petit tourbillon de poussière aux ouragans. Les nouvelles idées de Wilson ont également trouvé une application en physique des particules. Il a développé une forme modifiée de la théorie et l'a appliquée avec succès à des problèmes actuels de la physique des particules, en particulier au confinement des quarks. Les méthodes théoriques de Wilson représentent une nouvelle forme de théorie qui a apporté une solution complète au problème classique des phénomènes critiques pour les transitions de phase, mais qui semble également avoir un grand potentiel pour s'attaquer à d'autres problèmes importants et jusqu'à présent non résolus.

L'évolution stellaire

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1983 pour moitié à Subrahmanyan Chandrasekhar, professeur à l'université de Chicago,

> « pour ses études théoriques des processus physiques importants pour la structure et l'évolution des étoiles ».

L'autre moitié du prix revient à William A. Fowler, professeur à l'institut de technologie de Californie à Pasadena,

> « pour ses études théoriques et expérimentales des réactions nucléaires importantes pour la formation des éléments chimiques dans l'Univers ».

Le thème commun est l'évolution stellaire. Une étoile se forme à partir des nuages de gaz et de poussière qui existent dans les galaxies. Sous l'influence de la gravité, il se produit une condensation qui se contracte lentement pour former une étoile. Au cours de ce processus, de l'énergie est libérée, ce qui entraîne le réchauffement de l'étoile nouvellement formée. Finalement, la température est suffisamment élevée pour déclencher des réactions nucléaires à l'intérieur de l'étoile. L'hydrogène, qui constitue la majeure partie de l'étoile, est alors brûlé et transformé en hélium. Cela crée une pression qui arrête la contraction et stabilise l'étoile, qui peut alors exister pendant des millions d'années. Lorsque l'hydrogène est consommé, d'autres réactions nucléaires prennent le relais, notamment dans les étoiles les plus massives. Des éléments de plus en plus lourds, jusqu'au fer, se forment. Lorsque l'évolution a atteint ce stade, l'étoile ne peut plus résister à la gravité et subit une forme d'effondrement, dont la nature exacte dépend de la masse de l'étoile. Dans certains cas, l'effondrement prend la forme d'une explosion dont le résultat visible est la création d'une supernova. Celle-ci provoque un flux de neutrons bref mais extrêmement intense, qui conduit à la formation des éléments les plus lourds. Pour les étoiles moins lourdes ayant une masse de l'ordre de celle de notre Soleil, l'effondrement donne naissance à ce que l'on appelle une naine blanche. La matière y est comprimée de telle sorte qu'un centimètre cube pèse environ un kilogramme. Les enveloppes électroniques des atomes sont écrasées et l'étoile se compose de noyaux atomiques et de gaz d'électrons. Pour

les étoiles un peu plus lourdes, le stade final est un état encore plus comprimé dans lequel les électrons et les noyaux s'unissent pour former des neutrons. Pour les étoiles les plus lourdes, dont la masse dépasse deux à trois masses solaires, la force de gravité devient si forte que la matière disparaît tout simplement sous la forme d'un trou noir.

Cela devrait indiquer que l'évolution stellaire donne des exemples d'un certain nombre de processus physiques d'une importance fondamentale. De nombreux scientifiques ont étudié ces problèmes, mais Chandrasekhar et Fowler sont les plus connus.

Les travaux de Chandrasekhar portent sur un grand nombre de caractéristiques de l'évolution stellaire. L'une de ses principales contributions est l'étude du problème de la stabilité dans les différentes phases de l'évolution. Ces dernières années, il a étudié les effets relativistes, qui prennent de l'importance en raison des conditions extrêmes qui apparaissent au cours des derniers stades de l'évolution stellaire. La réalisation la plus connue de Chandrasekhar, accomplie alors qu'il avait une vingtaine d'années, est l'étude de la structure des naines blanches. Bien que nombre de ces recherches soient assez anciennes, elles ont connu un regain d'intérêt ces dernières années grâce aux progrès considérables de l'astronomie et de la recherche spatiale.

Les travaux de Fowler portent sur les réactions nucléaires qui ont lieu dans les étoiles au cours de leur évolution. Outre la production de l'énergie rayonnée, ces réactions sont importantes, car elles conduisent à la formation des éléments chimiques à partir de la matière originelle, qui se compose principalement de l'élément le plus léger, l'hydrogène. Fowler a réalisé de nombreux travaux sur l'étude expérimentale des réactions nucléaires d'intérêt en astrophysique ainsi que des calculs théoriques. Avec un certain nombre de collaborateurs, il a développé dans les années 1950 une théorie complète de la formation des éléments chimiques dans l'Univers. Cette théorie est toujours à la base de nos connaissances dans ce domaine. Les progrès les plus récents de la physique nucléaire et de la recherche spatiale ont encore confirmé sa justesse.

Les médiateurs de l'interaction faible

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1984 à Carlo Rubbia et à Simon van der Meer, du CERN à Genève,

> « pour leurs contributions décisives au grand projet qui a conduit à la découverte des particules de champ W et Z, vecteurs de l'interaction faible ».

L'interaction faible est l'un des quatre champs de force fondamentaux de l'Univers. Elle opère au plus profond de la matière, là où résident les quarks et les leptons.

On s'attendait à ce que l'interaction faible soit communiquée par des particules hypothétiques extrêmement lourdes, W et Z. En 1976, Carlo Rubbia a présenté une idée visant à transformer un grand accélérateur existant en un anneau de stockage pour des protons et des antiprotons. Les particules W et Z pourraient alors être produites lors de violentes collisions frontales entre les particules stockées. Simon van der Meer avait inventé une méthode ingénieuse pour regrouper et stocker les protons de manière dense, méthode désormais appliquée aux antiprotons. Un grand projet a combiné l'idée de Rubbia et l'invention de Van der Meer. On a observé les premières collisions dans l'accélérateur du CERN en 1981. La découverte du W et du Z a été annoncée en 1983 par Rubbia et de grandes équipes de scientifiques, en se basant sur les signaux émis par des détecteurs spécialement conçus pour cette tâche.

Le projet du CERN, l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire à Genève, est le plus important qui ait jamais figuré dans le contexte d'un prix Nobel. Deux personnes se sont distinguées dans ce projet : Carlo Rubbia, qui a eu l'idée et l'a développée, et Simon van der Meer, dont l'invention a rendu le projet réalisable.

L'interaction faible

La découverte des particules lourdes W et Z est l'aboutissement de cinquante ans de recherches scientifiques sur la nature de l'interaction faible. La découverte de W et Z au CERN en 1983 a marqué une étape importante sur cette voie.

La radioactivité bêta et les processus nucléaires qui contrôlent la puissance du Soleil sont des exemples de processus faibles. Le surplus d'énergie de la désintégration bêta rayonne sous forme de paires d'électrons et de neutrinos. On supposait que ces paires étaient créées directement lors de la transformation des neutrons en protons. C'était en 1934.

Cinquante ans plus tard, on sait que la création de ces paires est un processus en deux étapes. Lors de la première étape, le médiateur W^- est émis (dans l'exemple de la désintégration des neutrons). Dans d'autres processus, un W^+ est émis, dans d'autres encore un Z^0. Lors de l'étape finale, un peu plus éloignée dans le temps et l'espace, le W disparaît et transfère de l'énergie à la paire électron-neutrino. La distance dans l'espace et le temps est si courte que le W était resté caché. Il en va de même pour Z^0. En 1983, ils ont été exposés pour la première fois au grand jour.

Relation avec les forces électriques

L'idée d'introduire des médiateurs dans les interactions est ancienne en physique. Elle est utilisée dans le traitement moderne des forces électriques. Deux corps chargés interagissent à distance en échangeant des photons, comme s'ils se lançaient des balles.

Le prix Nobel de physique 1979 a été décerné à Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg pour leur théorie mathématique de l'interaction faible. Cette théorie a non seulement permis de résoudre certaines difficultés liées au processus direct, mais elle était également basée sur une unité intime entre les interactions faible et électromagnétique. Outre les deux médiateurs lourds chargés W^+ et W^-, la théorie contient deux médiateurs neutres : l'un lourd, l'autre sans masse. Le médiateur sans masse est le photon. Le Z^0 lourd représente quelque chose de complètement nouveau. La première fois qu'un processus causé par le Z^0 caché a été observé, c'était en 1973 au CERN par une équipe internationale, en utilisant la chambre à bulles *Gargamelle* construite en France.

Le grand projet du CERN

On ne pouvait être certain de l'existence des médiateurs tant qu'ils restaient cachés. Pour être convaincant, il fallait les produire sous forme

libre. De nouveaux champs de recherche seraient alors ouverts. L'existence des ondes radio a été découverte il y a près de cent ans par Heinrich Hertz. Le W et le Z ont été produits et détectés au CERN, avec des preuves de leur existence aussi convaincantes que celles de Hertz pour les ondes radio.

Le projet a débuté en 1976. À l'époque, il n'existait nulle part dans le monde l'énergie disponible en concentration suffisante pour créer le W ou le Z.

Carlo Rubbia a présenté une nouvelle idée, proposée par lui et deux collègues américains lors d'une conférence internationale de physique en 1976. Rubbia a apporté l'idée au CERN. En s'investissant intensément, en exploitant ses connaissances approfondies dans de nombreux domaines et en faisant preuve d'un enthousiasme débordant, il a réussi à convaincre la direction du CERN de la faisabilité du projet. La méthode nécessite une grande quantité d'antiprotons, de l'antimatière. Si ce problème était résolu, W et Z pourraient être créés lors de collisions frontales entre antiprotons et protons dans le nouvel accélérateur, le synchrotron à protons du CERN. On a pu estimer la probabilité d'une collision réussie. Pour produire une dizaine de particules médiatrices, il fallait environ un milliard de collisions. Pour y parvenir dans un délai raisonnable, le nombre d'antiprotons circulant dans le synchrotron devait être énorme, de l'ordre de plusieurs centaines de milliards.

Les antiprotons n'existent pas dans la nature. Ils peuvent être créés par lots lors de collisions dans un autre accélérateur du CERN. Cependant, seule une infime fraction du nombre requis d'antiprotons est obtenue dans chaque lot. On rencontre des difficultés presque insurmontables lorsqu'on essaie de collecter et de stocker densément des centaines de milliers de lots d'antiprotons frais.

Simon van der Meer avait inventé quelques années plus tôt une méthode ingénieuse pour regrouper de manière dense des protons circulant sur une orbite dans une chambre à vide, guidés par des champs magnétiques. La méthode était assez sophistiquée. Même les experts avaient du mal à croire à cette possibilité. La méthode a été testée avec succès au CERN. Elle a été mise au point pour être utilisée sur le courant d'antiprotons. Van der Meer et ses collègues ont finalement réussi à augmenter le courant d'antiprotons plusieurs centaines de milliers de fois en utilisant une installation spécialement construite pour la production, le stockage et la compression. Les premières collisions dans le synchrotron à protons ont eu lieu au cours de l'été 1981. Les expériences ont débuté en novembre de la même année. La chasse aux

phénomènes attendus et inattendus commençait.

Les quelques W et Z attendus devaient être trouvés et mesurés en détail. Les appareils de mesure nécessaires à cet effet n'étaient pas encore disponibles. Carlo Rubbia a réuni un groupe de scientifiques autour de lui pour concevoir et construire un détecteur de très grande taille. Il a été adapté à la tâche difficile de détecter les médiateurs et de mesurer leurs propriétés. Une autre équipe de scientifiques a également participé à cette chasse fructueuse avec son détecteur spécialement conçu pour cette tâche.

Des centaines de scientifiques et d'ingénieurs ont participé aux différentes phases de ces projets à grande échelle pendant de nombreuses années. Ils venaient de laboratoires de nombreux pays, principalement des États membres du CERN et du CERN lui-même.

L'effet Hall quantique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1985 au professeur Klaus von Klitzing, de l'institut Max-Planck pour la recherche sur l'état solide à Stuttgart,

« pour la découverte de l'effet Hall quantique ».

Lorsqu'un courant électrique traverse une bande métallique, il n'y a normalement pas de différence de potentiel à travers la bande si on la mesure perpendiculairement au courant. Toutefois, si un champ magnétique est appliqué perpendiculairement au plan de la bande, les électrons sont déviés vers l'un des bords, ce qui crée une différence de potentiel à travers la bande. Ce phénomène, appelé effet Hall, a été découvert au XIX^{e} siècle par le physicien américain E. H. Hall. Dans les métaux courants et les semi-conducteurs, cet effet a été étudié de manière approfondie et il est bien compris.

Des phénomènes entièrement nouveaux apparaissent lorsque l'effet Hall est étudié dans des systèmes électroniques bidimensionnels, dans lesquels les électrons sont contraints de se déplacer dans une couche superficielle extrêmement fine entre par exemple un métal et un semi-conducteur. Les systèmes bidimensionnels n'existent pas à l'état naturel, mais grâce à une technologie avancée et à des techniques de production développées dans le domaine de l'électronique des semi-conducteurs, il est devenu possible de les produire.

Depuis une dizaine d'années, on a des raisons de penser que dans les systèmes bidimensionnels, ce qu'on appelle la conductivité de Hall ne varie pas progressivement, mais change « par paliers » lorsqu'on varie le champ magnétique appliqué. Les paliers devraient apparaître à des valeurs de conductivité représentant un nombre entier multiplié par une constante naturelle d'une importance physique fondamentale. On dit alors que la conductivité est quantifiée.

On ne s'attendait cependant pas à ce que la règle de quantification s'applique avec une grande précision. La surprise a donc été grande lorsque Klitzing a montré expérimentalement au printemps 1980 que la conductivité de Hall présentait des paliers qui suivaient cette règle avec une précision exceptionnellement élevée, s'écartant d'un nombre entier de moins de 0,000 000 1.

Klitzing a montré par son expérience que l'effet Hall quantique a des implications fondamentales pour la physique. Sa découverte a ouvert un nouveau champ de recherche d'une grande importance et d'une grande pertinence.

En raison de l'extrême précision de l'effet Hall quantique, il peut être utilisé comme étalon de résistance électrique. D'autre part, il offre une nouvelle possibilité de mesurer la constante déjà mentionnée, ce qui est d'une grande importance, par exemple, dans les domaines de la physique atomique et de la physique des particules. Ces deux possibilités de mesure ont été étudiées dans de nombreux laboratoires du monde entier au cours des cinq années qui ont suivi l'expérience de Klitzing. Il est tout aussi intéressant de noter qu'il s'agit ici d'un phénomène nouveau en physique quantique, dont les caractéristiques ne sont encore que partiellement comprises.

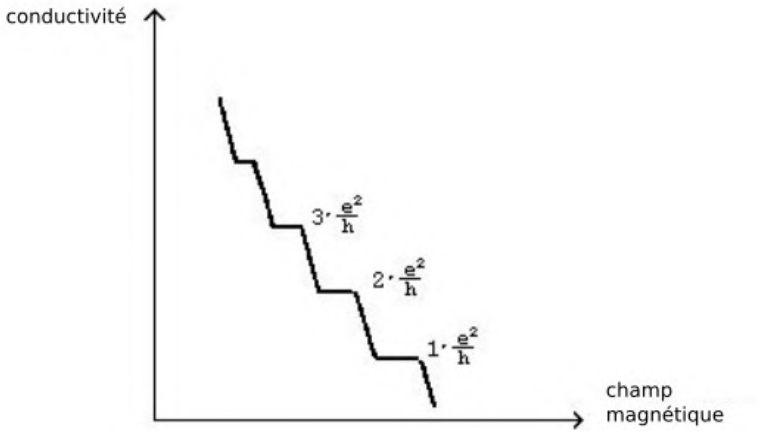


FIG. 1 – *La conductivité varie « par paliers » lorsque le champ magnétique varie. On dit que la conductivité est quantifiée.*

Le mouvement des électrons dans les champs magnétiques

Sous l'influence d'un champ magnétique, un électron dans le vide suit une trajectoire en spirale dont l'axe est orienté dans la direction du champ magnétique. Dans le plan perpendiculaire au champ, l'électron se déplace en cercle. Dans un métal ou un semi-conducteur, l'électron a tendance à se déplacer le long d'une trajectoire fermée plus complexe,

mais avec des champs magnétiques assez forts et à des températures normales, ce mouvement ordonné est fragmenté par des collisions. À des températures extrêmement basses (quelques degrés au-dessus du zéro absolu) et avec des champs magnétiques extrêmement puissants, l'effet des collisions est supprimé et les électrons sont à nouveau contraints à un mouvement ordonné. Dans ces conditions extrêmes, la théorie classique ne s'applique pas : le mouvement est quantifié, ce qui signifie que l'énergie ne peut prendre que certaines valeurs définies, appelées niveaux de Landau, d'après le physicien russe L. Landau (prix Nobel en 1962) qui en a développé la théorie dès 1930.

Des systèmes bidimensionnels

Les systèmes matériels bidimensionnels n'existent pas à l'état naturel. Dans des circonstances particulières, cependant, certains systèmes peuvent se comporter comme s'ils étaient bidimensionnels, mais seulement dans des intervalles d'énergie et des plages de température très limités. J. R. Schrieffer (lauréat du prix Nobel en 1972) a été le premier à mettre en évidence théoriquement cette possibilité. Dans des travaux publiés en 1957, il a montré que dans une couche superficielle entre un métal et un semi-conducteur, les électrons peuvent se déplacer le long de la surface mais pas perpendiculairement à celle-ci. Onze ans plus tard, une équipe de chercheurs d'IBM a montré que cette idée pouvait être réalisée expérimentalement. L'étude des systèmes bidimensionnels s'est rapidement développée au cours des années suivantes.

Ces expériences ont utilisé des échantillons employant un transistor particulier, appelé MOSFET (transistor à effet de champ à structure métal-oxyde-semiconducteur). D'autres types d'échantillons artificiels, les hétérostructures, ont été utilisés par la suite. Ces échantillons ont été développés à l'aide de faisceaux moléculaires.

Il convient également de mentionner que les progrès de la technologie et des méthodes de production dans le domaine de l'électronique des semi-conducteurs ont joué un rôle crucial dans l'étude des systèmes électroniques bidimensionnels et ont été une condition préalable à la découverte de l'effet Hall quantique.

L'effet Hall quantique

Une étape importante vers la découverte expérimentale a été franchie dans une étude théorique réalisée par le physicien japonais

T. Ando. Avec ses collaborateurs, il a calculé que la conductivité pouvait en certains points prendre des valeurs qui sont des multiples entiers de e^2/h, où e est la charge de l'électron et h la constante de Planck. Cependant, on ne pouvait guère s'attendre à ce que la théorie s'applique avec une grande précision.

Au cours des années 1975 à 1981, de nombreux chercheurs japonais ont publié des articles expérimentaux traitant de la conductivité de Hall. Ils ont obtenu des résultats correspondant à ceux d'Ando en des points particuliers, mais ils n'ont pas essayé d'en déterminer la précision. Leur méthode n'était pas non plus spécialement adaptée pour atteindre une grande précision.

Une méthode nettement meilleure a été développée en 1978 par Th. Englert et K. von Klitzing. Leur courbe expérimentale présente des plateaux bien définis, mais les auteurs n'ont pas commenté ces résultats. L'effet Hall quantifié aurait pu être découvert dès ce moment-là.

L'expérience cruciale a été réalisée par Klaus von Klitzing au printemps 1980 au laboratoire des champs magnétiques intenses de Grenoble, et publiée dans un article commun avec G. Dorda et M. Pepper. Dorda et Pepper avaient mis au point les méthodes de production des échantillons utilisés dans l'expérience. Ces échantillons présentaient une mobilité électronique extrêmement élevée, ce qui était une condition préalable à la découverte.

L'expérience a clairement démontré l'existence de plateaux dont les valeurs sont quantifiées avec une précision extraordinairement grande. On a également obtenu une valeur pour la constante e^2/h qui correspondait bien à la valeur admise précédemment. C'est ce travail qui représente la découverte de l'effet Hall quantique.

Après la découverte initiale, un grand nombre d'études ont été menées pour élucider différents aspects de l'effet Hall quantique. Les laboratoires nationaux de métrologie en Allemagne, aux États-Unis, au Canada, en Australie, en France, au Japon et dans d'autres pays ont mené des études très détaillées sur la précision de la quantification, afin de pouvoir l'utiliser comme étalon.

Une nouvelle découverte tout à fait inattendue a été faite au début des années 1980 lorsqu'une équipe de chercheurs des laboratoires Bell a trouvé des paliers qui correspondaient aux fractions 1/3, 2/3, 4/3, 5/3, 2/5, 3/5, 4/5, 2/7... multipliées par la constante e^2/h. C'était la découverte de l'effet Hall quantique fractionnaire. Il s'agit d'un phénomène quantique d'un type entièrement nouveau, dans lequel les mouvements des différents électrons sont très fortement liés les uns aux autres.

Cet effet fait actuellement l'objet d'études expérimentales et théoriques approfondies.

Microscope électronique et microscope à effet tunnel

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1986 pour moitié à Ernst Ruska, de l'institut Fritz-Haber de la société Max-Planck à Berlin,

> « pour ses travaux fondamentaux en optique électronique et pour la conception du premier microscope électronique ».

L'autre moitié du prix revient conjointement à Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich,

> « pour la conception du microscope à effet tunnel ».

L'importance du microscope électronique dans différents domaines scientifiques tels que la biologie et la médecine n'est plus à démontrer. Il s'agit de l'une des inventions les plus importantes du XX^{e} siècle.

Son développement a commencé par des travaux effectués par Ruska alors qu'il était jeune étudiant à l'université technique de Berlin à la fin des années 1920. Il a découvert qu'une bobine magnétique pouvait agir comme une lentille pour les électrons et qu'une telle lentille électronique pouvait être utilisée pour obtenir une image d'un objet irradié par des électrons. En couplant deux lentilles électroniques, il a produit un microscope primitif. Il a très vite amélioré certains détails. En 1933, il a pu construire le premier microscope électronique, dont les performances étaient nettement supérieures à celles du microscope optique conventionnel. Par la suite, Ruska a contribué activement au développement de microscopes électroniques commerciaux produits en masse, qui ont rapidement trouvé des applications dans de nombreux domaines scientifiques.

La microscopie électronique s'est depuis développée grâce à des améliorations techniques et à l'avènement de concepts entièrement nouveaux, dont le microscope électronique à effet tunnel. Un certain nombre de chercheurs ont pris part à ce développement et à celui qui l'a précédé, mais le travail de pionnier de Ruska est clairement la réalisation la plus remarquable.

L'autre moitié du prix pour l'année 1986 a été attribuée conjointement à Gerd Binnig et Heinrich Rohrer pour « la conception du microscope à effet tunnel ». Cet instrument n'est pas un véritable micro-

scope, c'est-à-dire un instrument qui donne une image directe d'un objet, puisqu'il repose sur le fait que la structure d'une surface peut être étudiée à l'aide d'un stylet qui balaie la surface à une distance fixe de celle-ci. L'ajustement vertical du stylet est contrôlé par ce que l'on appelle l'effet tunnel, d'où le nom de l'instrument. Un potentiel électrique entre la pointe du stylet et la surface fait qu'un courant électrique circule entre les deux, bien qu'ils ne soient pas en contact. L'intensité du courant dépend fortement de la distance, ce qui permet de maintenir une distance constante d'environ 10^{-7} cm, soit environ deux diamètres d'atomes. Le stylet est également extrêmement pointu, sa pointe étant formée d'un seul atome. Cela lui permet de suivre les moindres détails de la surface qu'il balaie. L'enregistrement du mouvement vertical du stylet permet d'étudier la structure de la surface atome par atome.

Le microscope à effet tunnel est tout à fait nouveau et nous n'avons encore vu que le début de son développement. Il est cependant clair que des domaines entièrement nouveaux s'ouvrent pour l'étude de la structure de la matière. La grande réussite de Binnig et Rohrer est d'avoir réussi, à partir de travaux et d'idées antérieurs, à maîtriser les énormes difficultés expérimentales liées à la construction d'un instrument de la précision et de la stabilité requises.

L'invention du microscope conventionnel a représenté un grand pas en avant pour la science, en particulier en biologie et en médecine. Au fur et à mesure de la construction de microscopes de plus en plus performants, on a découvert qu'il existait une limite qui ne pouvait pas être dépassée. Cette limite est liée aux caractéristiques ondulatoires de la lumière. En utilisant les ondes lumineuses, il est impossible de distinguer des détails plus petits que la longueur d'onde de la lumière. Le terme « résolution » fait référence à la distance entre deux détails d'une image qui peuvent être distingués. Pour un microscope conventionnel utilisant la lumière visible, la résolution est d'environ 4 000 Å (1 Å = 1 angström = 10^{-8} cm).

La grande percée dans le domaine de la microscopie a été réalisée lorsqu'il a été possible de produire une image d'un objet à l'aide d'un faisceau d'électrons. Le point de départ a été la découverte qu'une bobine magnétique peut fonctionner comme une lentille optique. Un faisceau divergent d'électrons traversant la bobine est focalisé en un point. Un champ électrique approprié peut également agir comme une lentille électronique. Une telle lentille permet d'obtenir une image agrandie d'un objet irradié par des électrons. L'image est enregistrée sur

un écran fluorescent ou une plaque photographique. Il s'est également avéré possible de combiner deux ou plusieurs lentilles pour augmenter le grossissement. Les travaux ont été menés à l'université technique de Berlin à la fin des années 1920.

Le scientifique qui a le plus contribué à ce développement est Ernst Ruska. Jeune étudiant, il a commencé à étudier de simples bobines magnétiques avec son directeur Max Knoll. Il a découvert que l'utilisation d'une encapsulation de fer bien conçue améliorait leurs propriétés électro-optiques. Surtout, il devenait désormais possible de construire une lentille de courte distance focale. Cette caractéristique est essentielle si l'on souhaite obtenir un fort grossissement. En utilisant deux bobines en série, Ruska a obtenu un grossissement de quinze fois. Bien que ce résultat fût modeste, il représentait néanmoins le premier prototype de microscope électronique. Par la suite, Ruska s'est efforcé d'améliorer les détails. En 1933, il a construit ce que l'on peut qualifier de premier microscope électronique au sens moderne du terme, un instrument dont les performances étaient nettement supérieures à celles d'un microscope optique conventionnel. Il a ensuite été engagé par la société Siemens et a participé au développement du premier microscope électronique commercialisé en série, qui est entré sur le marché en 1939. Cet événement peut être considéré comme la véritable percée de la microscopie électronique.

Depuis lors, le microscope électronique a connu un développement très important. Son pouvoir de résolution pourrait être considéré comme théoriquement illimité, puisque l'électron est une particule ponctuelle. Cependant, selon la mécanique quantique, chaque particule possède des caractéristiques ondulatoires qui introduisent une incertitude dans la détermination de sa position. Cela fixe une limite théorique à la résolution pour les potentiels d'accélération normalement utilisés, de l'ordre de 0,5 à 1 Å. Dans la pratique, des résolutions de l'ordre de 1 Å ont été atteintes.

Le type de microscope électronique développé par Ruska est appelé microscope à transmission. L'objet à examiner se présente sous la forme d'une fine section. Le faisceau d'électrons le traverse de part en part, de la même manière que la lumière traverse l'objet dans un microscope optique. Il existe cependant plusieurs autres types de microscope électronique, le plus important en dehors du microscope à transmission étant sans doute le microscope électronique à balayage. Dans ce cas, un faisceau d'électrons extrêmement concentré frappe l'objet. Les électrons secondaires émis sont collectés par un détecteur et le courant est

enregistré. Des bobines magnétiques permettent au faisceau d'électrons de balayer l'objet de la même manière que le faisceau d'un tube de télévision. Les variations dans l'émission des électrons secondaires peuvent être utilisées pour construire une image. L'avantage est la grande profondeur de champ qui permet d'obtenir une image en trois dimensions, contrairement à l'image en coupe obtenue avec un microscope à transmission. En revanche, la résolution est moins bonne. Ces deux types de microscopes sont donc complémentaires.

La microscopie électronique s'est considérablement développée au cours des dernières décennies, avec des améliorations techniques et des conceptions entièrement nouvelles. Son importance ne peut être exagérée. Dans ce contexte, l'importance des premiers travaux fondamentaux devient de plus en plus évidente. Bien que de nombreux chercheurs aient été impliqués, les contributions de Ruska sont clairement prédominantes. Ses recherches sur l'optique électronique et la construction du premier véritable microscope électronique ont été cruciales pour les développements ultérieurs.

La dernière contribution au développement de la microscopie est ce que l'on appelle le microscope à effet tunnel. Son principe diffère complètement de celui des autres microscopes. Un dispositif mécanique est utilisé pour détecter la structure d'une surface. Le principe est le même que celui de la lecture du braille. Dans le braille, ce sont les doigts du lecteur qui détectent les caractères imprimés, mais une image beaucoup plus détaillée de la topographie d'une surface peut être obtenue si la surface est parcourue par un stylet fin, dont le mouvement vertical est enregistré. Ce qui détermine la quantité de détails dans l'image (la résolution), c'est la netteté du stylet et sa capacité à suivre la structure de la surface. Il est évident que si la pointe du stylet est trop acérée, elle est rapidement détruite. Une solution à ce problème consiste à maintenir le stylet à une distance faible et constante de la surface. Le premier à y être parvenu a été le physicien américain Russel Young au Bureau national des normes aux États-Unis. Il a utilisé le phénomène connu sous le nom d'émission de champ. Si l'on applique un potentiel suffisamment élevé entre le stylet et la surface, un courant circule dont l'intensité dépend de la distance entre le stylet et la surface. Cette distance peut être maintenue constante sans contact mécanique si elle est régulée par un mécanisme d'asservissement commandé par le courant. Young a réussi à construire un instrument fonctionnant selon ce principe. La distance entre la pointe du stylet et la surface était d'environ 200 Å. La résolution était donc nettement inférieure à celle

d'un microscope électronique

C'est un effet quantique qui permet à un électron (ainsi qu'à d'autres particules) de traverser une zone où, selon la physique classique, il ne pourrait se trouver faute d'une énergie suffisamment élevée. Il se fraie pour ainsi dire un chemin à travers une barrière potentielle par effet tunnel, d'où le nom de microscope à effet tunnel. Cela signifie que si la pointe du stylet est suffisamment proche de la surface (10 Å, c'est-à-dire 1 à 2 diamètres d'atomes), un courant circule même à faible tension. Comme pour l'émission de champ, il devrait être possible de contrôler le stylet sans contact mécanique. Cependant, Young n'a pas pu mettre cette idée en pratique en raison des difficultés expérimentales exceptionnellement grandes qu'elle impliquait

Les premiers chercheurs à avoir réussi à construire un microscope à effet tunnel sont Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, des laboratoires de recherche d'IBM à Zurich. La raison de leur succès était la précision exceptionnelle de la conception mécanique. Par exemple, les vibrations perturbatrices de l'environnement ont été éliminées en construisant le microscope sur un lourd aimant permanent flottant librement dans une coupelle de plomb supraconducteur. Des dispositifs moins encombrants mais tout aussi efficaces ont été mis au point pour suspendre le microscope de manière stable et sans perturbations. Des éléments piézoélectriques sont utilisés pour contrôler le mouvement horizontal du stylet dans deux directions perpendiculaires afin qu'il balaie la surface en longues lignes parallèles, d'où le nom de microscope à balayage. Le mouvement vertical du stylet est contrôlé et mesuré à l'aide d'un autre élément piézoélectrique. Grâce à une technique spéciale, il a été possible de produire des stylets dont les pointes sont constituées d'un seul atome. La précision de l'image est donc particulièrement élevée. La résolution horizontale est d'environ 2 Å et la résolution verticale d'environ 0,1 Å. Cela permet de représenter des atomes individuels, c'est-à-dire d'étudier avec le plus grand détail possible la structure atomique de la surface examinée.

Il est évident que cette technique est extrêmement prometteuse et que nous n'en sommes qu'au début de son développement. De nombreux groupes de recherche dans différents domaines scientifiques utilisent aujourd'hui le microscope à effet tunnel. L'étude des surfaces est une partie importante de la physique, avec des applications particulières en physique des semi-conducteurs et en microélectronique. En chimie également, les réactions de surface jouent un rôle important, par exemple dans le cadre de la catalyse. Il est également possible de fixer

des molécules organiques sur une surface et d'étudier leur structure. Cette technique a notamment été utilisée pour l'étude des molécules d'ADN.

La supraconductivé de matériaux céramiques

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1987 à Johannes Georg Bednorz et à Karl Alexander Müller, du laboratoire de recherche d'IBM à Zurich,

> « pour leur importante percée dans la découverte de la supraconductivité de matériaux céramiques ».

La supraconductivité, l'un des phénomènes les plus spectaculaires de la physique, est connue depuis 1911. La supraconductivité apparaît lorsqu'un matériau supraconducteur est refroidi à une température critique assez basse. Un courant électrique peut soudain circuler sans la moindre résistance. Simultanément se produit ce que l'on appelle l'effet Meissner. Cela signifie qu'un champ magnétique ne peut pas pénétrer dans le matériau, ou seulement partiellement. Jusqu'à présent, tous les matériaux supraconducteurs devaient être refroidis à des températures si basses que seul l'hélium, dont le point d'ébullition est de −269 °C, pouvait être utilisé comme réfrigérant. De nombreux chercheurs rêvaient de trouver un matériau qui reste supraconducteur à des températures plus élevées. Mais malgré de petites avancées, rien n'avait abouti depuis 1973, date à laquelle un alliage est devenu supraconducteur à −250 °C.

En 1986, Bednorz et Müller ont annoncé avoir découvert la supraconductivité dans un oxyde à une température supérieure de 12 °C à celle connue jusqu'alors. Ce fut le point de départ d'une évolution explosive au cours de laquelle des centaines de laboratoires dans le monde entier ont commencé à travailler sur des matériaux similaires. De meilleurs supraconducteurs ont déjà été produits.

Bednorz et Müller ont abandonné les matériaux « conventionnels », des alliages de compositions variées. Depuis 1983, ils se sont concentrés sur les oxydes qui contiennent, en plus de l'oxygène, du cuivre et une ou plusieurs terres rares. L'idée nouvelle était que les atomes de cuivre d'un tel matériau pouvaient transporter des électrons qui interagissent plus fortement avec le cristal environnant que dans les conducteurs électriques normaux. Pour obtenir un matériau chimiquement stable, les deux chercheurs ont ajouté du baryum aux cristaux ou à l'oxyde de lanthane et de cuivre pour produire un matériau céramique qui est devenu le premier supraconducteur « à haute température ».

Bednorz et Müller apparaissent clairement comme les découvreurs de cette supraconductivité spécifique. Ils ont incité d'autres chercheurs à synthétiser des substances supraconductrices à des températures plus de quatre fois supérieures (à partir du zéro absolu à −273 °C) à celles des substances précédentes. Ce développement est suivi avec un vif intérêt par les spécialistes de l'électrotechnique et de la microélectronique, ainsi que par les physiciens qui envisagent de nouvelles applications passionnantes dans le domaine de la métrologie.

La supraconductivité a une longue histoire. Elle a été découverte dès 1911 par le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes, qui a reçu le prix Nobel en 1913. L'effet Meissner associé a été observé pour la première fois en 1933. Malgré de nombreuses expériences et tentatives théoriques au cours des années suivantes pour expliquer l'apparition de la supraconductivité, ce n'est qu'en 1957 que les Américains John Bardeen , Leon Cooper et Robert Schrieffer ont pu formuler une théorie cohérente, la théorie BCS, pour laquelle un prix Nobel a été décerné en 1972. Cette théorie repose sur l'idée que les électrons forment ce que l'on appelle des paires de Cooper, qui effectuent ensuite un mouvement fortement coordonné au sein du conducteur. De l'énergie est nécessaire pour briser les paires de Cooper et ramener le matériau à son état conducteur normal. Plus les paires de Cooper sont fortement liées, plus la température à laquelle cette rupture se produit est élevée.

Dans les années 1960, un autre développement de la supraconductivité a été initié par l'Anglais Brian Josephson, qui a reçu le prix Nobel en 1973. Ce développement concernait les courants qui traversent les points de contact entre les matériaux supraconducteurs et les matériaux normalement conducteurs, et devait apprendre aux physiciens beaucoup de choses sur l'effet tunnel (comment les particules peuvent « traverser » les barrières) et sur les interférences (comment les ondes de matière interagissent). Ces points de contact sont devenus des outils importants pour la détermination avec une haute précision des champs magnétiques et des différences de tension.

La supraconductivité a également été utilisée dans la technologie. On trouve des bobines de matériaux supraconducteurs dans les grands aimants des accélérateurs des instituts de recherche. Des systèmes pilotes ont également été développés pour d'autres applications telles que les générateurs électriques et les dispositifs de stockage d'énergie. Il existe également des inventions basées sur le fait que des objets peuvent « flotter » sur des « coussins » magnétiques, par exemple dans les coussinets de roue. D'autres applications sont envisagées dans le domaine

de l'électronique et concernent les commutateurs et les éléments de mémoire.

Cependant, les applications techniques ont jusqu'à présent été fortement limitées, dans de nombreux cas à la planche à dessin, car les matériaux supraconducteurs disponibles nécessitaient un refroidissement à des températures si basses que, dans la pratique, seul l'hélium liquide était accessible en tant que réfrigérant. La manipulation de l'hélium liquide, dont le point d'ébullition est de −269 °C, est compliquée et coûteuse.

Trouver des matériaux qui restent supraconducteurs à des températures plus élevées a donc été au cours des 75 dernières années un rêve que de nombreux chercheurs ont tenté de réaliser. Le niveau de la température critique a été lentement relevé, mais rien ne s'était produit depuis 1973, date à laquelle on a produit un alliage présentant une température de transition de 23 °C au-dessus du zéro absolu.

En avril 1986, Georg Bednorz et Alex Müller ont effectué des mesures sur un oxyde où la transition vers la supraconductivité s'est produite à une température de 12 °C supérieure à la température la plus élevée connue à l'époque. Plus tard dans la même année, les deux chercheurs ont purifié le matériau. Les propriétés magnétiques associées à un véritable état supraconducteur ont également été mises en évidence.

Ce fut le début d'une avalanche. Des centaines de laboratoires dans le monde entier travaillèrent bientôt sur des matériaux similaires à ceux de Bednorz et Müller. Des températures de transition de plus de 90 °C au-dessus du zéro absolu ont été atteintes au cours des premiers mois de 1987 aux États-Unis, en Chine, au Japon et en Europe, et il semble que ce développement ne soit pas encore terminé. Les appareils basés sur ces « supraconducteurs à haute température » peuvent être refroidis avec de l'azote liquide, qui est un réfrigérant nettement moins cher, plus efficace et plus facile à manipuler que l'hélium liquide.

La nouvelle approche de Bednorz et Müller a consisté à abandonner les alliages semi-conducteurs « conventionnels », par exemple de type niobium-germanium ou niobium-étain, et à orienter leurs recherches vers les oxydes métalliques. On savait que certains de ces oxydes pouvaient conduire l'électricité, mais leur conductivité est normalement très limitée.

À première vue, il semble donc étonnant que de tels matériaux puissent passer à l'état supraconducteur lorsqu'ils sont refroidis. Pourtant, c'est avec divers oxydes (qui, en plus de l'oxygène, contiennent

du cuivre ou du nickel et certaines terres rares) que Bednorz et Müller travaillent depuis 1983.

Lorsqu'ils ont enfin franchi toutes les limites existantes pour les matériaux supraconducteurs, c'était le résultat d'un travail systématique, d'une connaissance approfondie et d'une expérience des problèmes structurels de la physique et de la chimie de l'état solide (et en plus, on peut le supposer, de l'intuition caractéristique de vrais scientifiques). En outre, ils ont eu l'audace de se concentrer sur de nouvelles voies de recherche. Leur raisonnement était que les atomes de cuivre ou de nickel des matériaux qu'ils utilisaient pouvaient être amenés à transférer des électrons, qui interagissent plus fortement avec le cristal environnant (et donc aussi avec les oscillations provoquées par les atomes dans le cristal) que ce n'est le cas dans les conducteurs normaux. Cette forte interaction est, selon la théorie actuelle, l'une des conditions de l'appariement des électrons et du maintien du mouvement fortement coordonné qu'ils requièrent dans l'état supraconducteur. Pour obtenir un matériau chimiquement stable tout en augmentant la conductivité normale, Bednorz et Müller ont ajouté du baryum à des cristaux d'oxyde de lanthane et de cuivre pour obtenir la composition approximative $La_{1,85}Ba_{0,15}CuO_4$, qui s'est avérée être le premier supraconducteur à haute température.

Bednorz et Müller ont incité un grand nombre d'autres scientifiques à travailler sur des matériaux apparentés. Comme nous l'avons déjà mentionné, cela a permis de synthétiser des substances qui sont supraconductrices à des températures plus de quatre fois plus élevées (au-dessus du zéro absolu) qu'auparavant. Les détails de l'apparition de la supraconductivité dans les nouveaux matériaux sont encore inconnus. Des travaux intensifs sont menés en utilisant tout l'arsenal des méthodes de mesure de la physique du solide pour découvrir les mécanismes essentiels à l'origine de ce phénomène. L'une des principales questions est de savoir si les descriptions de la supraconductivité utilisées jusqu'à présent (c'est-à-dire la théorie de Bardeen-Cooper-Schrieffer) sont suffisantes ou si de nouveaux concepts seront nécessaires. Peut-être faudra-t-il reconsidérer certains aspects du mouvement et de l'interaction des électrons dans les substances solides.

La découverte du neutrino muonique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1988 à Leon Lederman, Melvin Schwartz et Jack Steinberger

> « pour la méthode du faisceau de neutrinos et la démonstration de la structure en doublet des leptons par la découverte du neutrino muonique ».

L'expérience a été planifiée lorsque les trois chercheurs étaient associés à l'université Columbia à New York, et réalisée à l'aide du synchrotron à gradients alternés du laboratoire national de Brookhaven, à Long Island aux États-Unis. Leon Lederman est actuellement directeur du laboratoire Fermi à Batavia près de Chicago, où se trouve le plus grand accélérateur de protons au monde. Melvin Schwartz, ancien professeur aux universités Columbia et Stanford, est président de sa propre entreprise spécialisée dans les communications informatiques, à Mountain View en Californie. Jack Steinberger, citoyen américain, travaille depuis longtemps comme physicien au CERN à Genève, où il a dirigé un certain nombre de grandes expériences en physique des particules élémentaires, y compris des expériences utilisant des faisceaux de neutrinos.

Les travaux récompensés ont été menés dans les années 1960. Ils ont conduit à des découvertes qui ont ouvert des perspectives entièrement nouvelles pour la recherche sur la structure et la dynamique les plus profondes de la matière. Deux grands obstacles aux progrès de la recherche sur la force faible, l'une des quatre forces fondamentales de la nature, ont été levés par les travaux récompensés. L'un de ces obstacles était l'absence de méthode pour l'étude expérimentale de la force faible à haute énergie. L'autre obstacle, plus fondamental sur le plan théorique, a été surmonté grâce à la découverte par les trois chercheurs de l'existence d'au moins deux types de neutrinos. L'un appartient à l'électron, l'autre au muon. Le muon est une particule élémentaire chargée, relativement lourde, qui a été découverte dans le rayonnement cosmique au cours des années 1930. L'idée, aujourd'hui acceptée, d'un regroupement par paires des particules élémentaires trouve son origine dans la découverte des lauréats.

Les neutrinos sont des constituants presque fantomatiques de la matière. Ils peuvent traverser n'importe quelle paroi sans être affectés.

En fait, toute matière leur est transparente. Lors de la transformation des noyaux atomiques au centre du Soleil, d'énormes quantités de neutrinos (qui appartiennent à la famille des électrons) sont produites. Ils traversent le Soleil pratiquement sans entrave et s'écoulent continuellement de sa surface dans toutes les directions. Chaque être humain est pénétré par les neutrinos du Soleil à raison de plusieurs milliards par centimètre carré et par seconde, jour et nuit, sans laisser de trace perceptible. Les neutrinos sont inoffensifs. Ils n'ont pas de charge électrique et voyagent à la vitesse de la lumière, ou presque. Qu'ils soient sans masse ou qu'ils aient une masse très petite est l'un des problèmes non résolus aujourd'hui.

La contribution récompensée consistait notamment à transformer le neutrino fantôme en un outil de recherche actif. Tout comme dans le rayonnement cosmique, les neutrinos qui appartiennent à la famille des muons peuvent être produits par un processus en plusieurs étapes dans les accélérateurs de particules. C'est ce que les lauréats ont utilisé. Des accélérateurs appropriés existent dans quelques laboratoires à travers le monde. Comme toute matière est transparente aux neutrinos, il est difficile de mesurer leur action. Les neutrinos ne sont cependant pas totalement inactifs. Dans de très rares cas, un neutrino peut frapper directement au hasard ou, plus exactement, manquer de peu un quark, une particule ponctuelle à l'intérieur d'un nucléon (proton ou neutron) dans le noyau d'un atome, ou un électron tout aussi infinitésimal dans la couche externe d'un atome. La rareté de tels impacts directs implique qu'un seul neutrino d'énergie modérée serait capable de traverser sans encombre un mur de plomb d'une épaisseur mesurée en années-lumière. Dans les expériences sur les neutrinos, la rareté des réactions est compensée par l'intensité du faisceau de neutrinos. Dès la première expérience, le nombre de neutrinos s'est compté en centaines de milliards. La probabilité d'un succès augmente également avec l'énergie des neutrinos. La méthode des lauréats permet d'atteindre des énergies très élevées, limitées uniquement par les performances de l'accélérateur de protons. Les faisceaux de neutrinos peuvent révéler les parties internes dures d'un proton d'une manière qui n'est pas différente de celle avec laquelle les rayons X révèlent le squelette d'une personne.

Lorsque la méthode du faisceau de neutrinos a été inventée par l'équipe de Columbia au début des années 1960, le concept de quark était encore inconnu. La méthode n'est devenue importante que plus tard dans la recherche sur les quarks. La découverte expérimentale d'une toute nouvelle façon pour un neutrino d'interagir avec un électron

ou un quark en conservant sa propre identité après l'impact est également plus tardive. La réaction classique implique que le neutrino se transforme en lepton chargé électriquement (électron ou muon). C'est cette réaction qui a été utilisée par les lauréats.

La toute première expérience utilisant un faisceau de neutrinos de haute énergie a vu le jour lors d'une des pauses café quotidiennes du laboratoire Pupin, où les professeurs et les doctorants se détendaient pendant une demi-heure. C'est dans cette atmosphère stimulante, autour des lauréats du prix Nobel T. D. Lee et C. N. Yang (prix Nobel de physique 1957) et d'autres, qu'est apparue à la fin des années 1950 la nécessité de trouver une méthode réalisable pour étudier l'effet de la force faible à des énergies élevées. Jusque là, on n'avait pu étudier les processus de désintégration radioactive, des processus spontanés, qu'à des énergies relativement faibles. Des faisceaux de toutes les particules courantes (électrons, protons et neutrons) ont été évoqués. Bien qu'ils soient relativement simples à produire, ils se sont avérés inutilisables à cette fin. La situation apparemment sans issue a soudain changé lorsque Melvin Schwartz a proposé de produire et d'utiliser un faisceau de neutrinos. Au cours des deux années suivantes, avec Leon Lederman et Jack Steinberger, il a travaillé sur cette proposition afin d'obtenir un faisceau de neutrinos suffisamment intense et exempt de tout autre type de particule, et de concevoir un détecteur pour mesurer les réactions des neutrinos. Le groupe de Columbia comprenait également G. Danby, J. M. Gaillard, K. Goulianos et N. Mistry.

Les neutrinos de l'expérience de Columbia ont été produits par la désintégration en vol de mésons pi chargés. Dans un premier temps, des protons ont été accélérés à des vitesses élevées et dirigés vers une cible en béryllium. L'étape suivante a consisté à produire des mésons pi à grande vitesse dans un faisceau dirigé vers l'avant. Les mésons sont radioactifs et se désintègrent en un muon et un neutrino lorsqu'on les laisse parcourir une trajectoire de vol libre, fixée à 21 mètres. Au cours de cette étape, des neutrinos de haute énergie ont été produits sous la forme d'un faisceau dirigé vers l'avant, contenant encore des quantités de mésons pi et de muons qui avaient été formés en même temps. Pour éliminer complètement ces particules indésirables du faisceau, un mur d'acier de 13,5 mètres d'épaisseur a été nécessaire. Le matériau provenait de navires de guerre mis au rebut. L'appareil de mesure (détecteur) a été construit derrière le mur, qui était bien sûr transparent pour les neutrinos. Pour que le détecteur ne soit pas entièrement transparent, il a été jugé préférable de le construire sous la forme d'une chambre

à étincelles de 10 tonnes, un nouveau type qui n'avait pas encore été testé. Le détecteur était constitué d'un grand nombre de plaques d'aluminium séparées par des éclateurs. Un muon ou un électron produit par un neutrino dans l'une des plaques d'aluminium photographiait sa propre trace sous la forme d'une série d'étincelles, à l'aide d'un dispositif spécial d'auto-exposition.

Un problème brûlant s'est posé au moment de l'expérience concernant les mesures de la désintégration radioactive des muons. Les résultats des mesures, auxquelles ont contribué entre autres Jack Steinberger et Bruno Pontecorvo, étaient en désaccord avec les calculs théoriques acceptés. De nombreux chercheurs, dont G. Feinberg et T. D. Lee, ainsi que Pontecorvo sur le plan méthodologique, se sont penchés sur le problème et ont indiqué qu'une solution au dilemme serait l'existence de deux types de neutrinos totalement différents.

Si les neutrinos du faisceau de l'expérience de Columbia étaient identiques aux neutrinos habituels de la désintégration bêta, les réactions dans le détecteur devraient convertir le neutrino en un électron rapide aussi souvent qu'en un muon rapide. En revanche, s'il y avait deux types de neutrinos différents, il n'y aurait que des muons. Les lauréats et leurs collaborateurs ont disposé leur détecteur de manière à pouvoir interpréter la cause des traces d'étincelles. Les résultats ont montré que les neutrinos du faisceau ne produisaient que des muons, et pas d'électrons. Il existe donc un nouveau type de neutrino qui forme une paire intime avec le muon. Par conséquent, l'électron forme sa propre famille bien délimitée avec son neutrino.

La découverte a donc eu des conséquences immédiates. La connaissance du rôle du concept de famille et de la grande importance de la méthode dans la physique des particules élémentaires s'est accrue au cours du temps qui s'est écoulé depuis la découverte. Une question toujours d'actualité est de savoir s'il existe ou non de petites déviations par rapport à l'appartenance stricte à une famille.

Bibliographie

— Lederman (Leon) et Teresi (Dick), *Une sacrée particule* (trad. G. Joublin et M. Schaison), Paris, Odile Jacob, 1996.

La spectroscopie atomique de précision

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1989 pour des contributions importantes au développement de la spectroscopie atomique de précision. Une moitié revient à Norman F. Ramsey, de l'université Harvard,

> « pour l'invention de la méthode des champs oscillatoires séparés et son utilisation dans le maser à hydrogène et autres horloges atomiques ».

L'autre moitié revient conjointement à Hans G. Dehmelt, de l'université de Washington à Seattle, et à Wolfgang Paul, de l'université de Bonn,

> « pour le développement de la technique du piège à ions ».

Les travaux des lauréats ont conduit à un développement spectaculaire dans le domaine de la spectroscopie atomique de précision au cours des dernières années. La méthode de résonance du professeur Norman F. Ramsey, de l'université Harvard, qui utilise des champs oscillatoires séparés, est à la base de l'horloge atomique au césium qui est notre étalon de temps actuel. Le professeur Wolfgang Paul, de l'université de Bonn, et le professeur Hans G. Dehmelt, de l'université de Washington à Seattle, ont introduit et développé la technique du piège à ions, qui a permis d'étudier un seul électron ou un seul ion avec une extrême précision. Ramsey et ses collègues ont également mis au point le maser à hydrogène, qui est actuellement notre source de rayonnement électromagnétique la plus stable. Ces méthodes ont été utilisées pour tester des principes physiques fondamentaux tels que l'électrodynamique quantique et la théorie de la relativité générale. Elles sont également utilisées dans les communications spatiales et pour mesurer la dérive des continents. Les techniques ont atteint un niveau de précision sans précédent et le développement ne semble pas encore avoir atteint son apogée.

Selon la physique quantique, un atome libre ne peut avoir que certains niveaux d'énergie. Un atome situé à un niveau d'énergie autre que l'état le plus bas tombe spontanément vers un état inférieur après un certain temps, normalement en émettant un rayonnement électromagnétique tel que de la lumière. Le rayonnement émis a une fréquence ou une longueur d'onde caractéristique qui dépend de la différence d'énergie entre les deux niveaux, ce qui explique l'apparition des

spectres optiques étudiés depuis le XIX^e siècle. Les longueurs d'onde mesurées permettent d'obtenir des informations sur la structure des niveaux de l'atome, ce qui a longtemps été notre principale source d'information sur la structure atomique.

Un pas important vers une plus grande précision a été franchi en 1937 par I. I. Rabi à l'université Columbia, lorsqu'il a introduit la méthode de résonance magnétique par jet atomique. Rabi a utilisé le fait qu'une transition entre les niveaux de l'atome peut être induite au moyen d'un rayonnement caractéristique, comme l'avait d'abord proposé Albert Einstein. C'est également la base d'autres méthodes de résonance développées ultérieurement, comme la résonance magnétique nucléaire (RMN).

Dans la méthode de Rabi, un faisceau d'atomes traverse un champ magnétique homogène auquel est superposé un champ électromagnétique oscillant. Ce dernier peut induire les transitions souhaitées si la fréquence est adéquate. Le temps que les atomes passent dans le champ oscillant détermine la largeur de la raie de résonance : plus le temps est long, plus la raie est étroite, à condition que le champ magnétique soit suffisamment homogène. L'homogénéité est cependant un problème sérieux et de nouvelles techniques ont dû être inventées pour accroître la précision.

En 1949, Norman F. Ramsey a modifié la méthode de résonance magnétique par jet atomique de Rabi en introduisant deux champs oscillatoires séparés. Une figure d'interférence apparaît alors, avec une netteté qui dépend de la distance entre les deux champs oscillatoires mais qui est indépendante du degré d'homogénéité du champ magnétique. Cela a permis d'augmenter sensiblement la précision de la méthode de Rabi. Par la suite, Ramsey a montré qu'il était possible d'utiliser plus de deux champs oscillatoires et de les séparer dans le temps plutôt que dans l'espace. Cela a eu d'importantes implications pour les développements ultérieurs.

Une application importante de la méthode de Ramsey est l'horloge atomique au césium, qui est notre étalon de temps actuel. On observe ici les transitions entre deux niveaux très rapprochés (niveaux hyperfins) de l'atome de césium. La précision d'une telle horloge est aujourd'hui d'environ 1 pour 10^{13}, c'est-à-dire une partie sur dix mille milliards. Depuis 1967, une seconde est définie comme le temps pendant lequel l'atome de césium effectue exactement 9 192 631 770 oscillations.

La possibilité d'observer un seul atome ou ion, un rêve ancien des spécialistes de spectroscopie, a récemment été réalisée en grande partie

grâce au travail des lauréats. Ce développement se fait en trois étapes :

— piéger les atomes ou les ions ;
— les « refroidir » à basse température ;
— augmenter la sensibilité pour pouvoir observer un seul atome ou un seul ion.

Les premières expériences de piégeage d'atomes et d'ions ont été réalisées dans le laboratoire de Wolfgang Paul à Bonn dans les années 1950. Paul a montré qu'il était possible de concentrer des atomes dans un faisceau en utilisant un champ magnétique à six pôles. Avec son collaborateur H. Steinwedel, il a montré que des ions de masses différentes pouvaient être séparés par un champ électrique à quatre pôles superposé à un champ de fréquence radio. Cette méthode a été développée pour devenir une méthode standard de séparation de masses, aujourd'hui largement utilisée. Le « piège de Paul » utilisé aujourd'hui dans la spectroscopie par piège à ions est un développement ultérieur de ce filtre de masse. Un autre type de piège à ions, le « piège de Penning », également utilisé à cette fin, a été développé simultanément dans le laboratoire de Paul et par Hans Dehmelt et ses collaborateurs à Seattle.

Dehmelt et ses collaborateurs ont utilisé la spectroscopie par piège à ions principalement pour étudier les électrons. Le facteur g pour l'électron, c'est-à-dire le rapport des moments magnétiques et cinétiques, est exactement égal à deux d'après la mécanique quantique relativiste. Dans les années 1940, on a découvert un écart d'environ 0,1 % par rapport à cette valeur. On a attribué peu après cet écart aux effets de l'électrodynamique quantique, c'est-à-dire à l'interaction avec le champ de rayonnement environnant. Des méthodes améliorées, développées en particulier à l'université du Michigan, ont ensuite permis de déterminer cette anomalie avec plus de précision, mais le développement le plus important a eu lieu plus récemment dans le laboratoire de Dehmelt à Seattle.

En 1973, Dehmelt a réussi pour la première fois à observer un électron unique dans un piège. Deux ans plus tard, il a introduit une méthode pour « refroidir » l'électron, deux inventions qui ont considérablement amélioré la précision. L'anomalie du facteur g a maintenant été déterminée par Dehmelt et ses collègues avec une précision de quelques parties par milliard, ce qui, avec les calculs théoriques correspondants, constitue l'un des tests les plus critiques dont nous disposons pour la théorie de l'électrodynamique quantique.

Plus tard, dans les années 1970, Dehmelt a réussi, avec P. Toschek

à Heidelberg, à observer un seul ion dans un piège. Cela a ouvert la voie à un nouveau type de spectroscopie, la spectroscopie à un seul ion, qui a été affinée et appliquée en particulier à l'Institut national des normes et de la technologie à Boulder dans le Colorado. En utilisant la méthode de Ramsey avec des champs oscillatoires séparés, on a atteint une stabilité qui dépasse même celle de l'horloge au césium.

Une autre méthode de stockage et d'étude des atomes a été développée par Ramsey en collaboration avec D. Kleppner et d'autres. Il s'agit du maser à hydrogène. Des atomes d'hydrogène dans un état excité sont introduits dans une cavité, qui peut être amenée à l'auto-oscillation si elle est correctement réglée. La largeur de la raie est déterminée par le temps moyen que les atomes passent dans la cavité, qui est d'environ une seconde. Les parois de la cavité sont recouvertes de téflon pour réduire l'effet des collisions avec les parois. Le maser à hydrogène a d'abord été utilisé pour étudier la structure hyperfine de l'hydrogène avec une extrême précision. L'instrument présente une stabilité nettement supérieure à celle de l'horloge au césium pour les temps courts et intermédiaires (heures et jours), mais sa précision absolue est inférieure. Il a donc été utilisé principalement comme étalon secondaire et pour des mesures de décalages de fréquence nécessitant une extrême précision. Un exemple est la mesure de la dérive des continents à l'aide de l'interférométrie à très longue base, où les signaux d'une étoile radio sont comparés à partir de deux radiotélescopes situés sur des continents différents. Une autre application est la vérification du « décalage gravitationnel vers le rouge ». Il s'agit de l'effet de la gravitation sur le rayonnement électromagnétique prédit par la théorie de la relativité générale. En comparant les fréquences d'un maser à hydrogène embarqué dans une fusée et d'un maser à hydrogène terrestre, les prédictions de la théorie ont été vérifiées avec une précision d'un pour 10 000.

La technique du maser à hydrogène a été considérablement améliorée ces dernières années. En refroidissant l'instrument à moins de 1 K (un degré au-dessus du zéro absolu), les parois de la cavité peuvent être recouvertes d'hélium superfluide. Cela permet de réduire considérablement les collisions perturbatrices avec les parois et d'augmenter en conséquence la stabilité et la reproductibilité. Une stabilité impressionnante de 10^{18} (un par milliard de milliards) semble réaliste.

Une stabilité de fréquence du même ordre serait également possible avec la technique du piège à ions. La méthode est basée sur une idée de Dehmelt pour observer ce que l'on appelle le saut quantique d'un seul ion dans un piège. Un rayonnement laser correspondant à deux

transitions différentes est utilisé, une transition forte et une transition très faible. La première est utilisée pour détecter la seconde, qui est très étroite et ne peut être observée directement.

La mise au point de méthodes d'une extrême précision, qui semble désormais possible, ouvre de toutes nouvelles perspectives pour tester les principes fondamentaux de la physique quantique, de la théorie de la gravitation et d'autres branches de la physique fondamentale.

La diffusion profondément inélastique d'électrons sur les protons et les neutrons

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1990 à Jerome I. Friedman et Henry W. Kendall, de l'institut de technologie du Massachusetts, et à Richard E. Taylor, de l'université Stanford,

> « pour leurs recherches novatrices sur la diffusion profondément inélastique d'électrons sur les protons et les neutrons liés, qui ont été d'une importance essentielle pour le développement du modèle des quarks en physique des particules ».

Une avancée dans notre compréhension de la structure de la matière

Les professeurs Jerome I. Friedman et Henry W. Kendall, tous deux de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT), et Richard E. Taylor, du centre de l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC), étaient des personnes clés dans une équipe de recherche qui a trouvé des signes clairs de l'existence d'une structure interne dans les protons et les neutrons du noyau atomique. Ce que l'on a appelé « l'expérience SLAC-MIT » a ouvert la voie à d'autres recherches sur les structures les plus profondes de la matière. Depuis le début du XX^{e} siècle, les chercheurs étudient la structure interne des atomes. Nos connaissances ont progressé d'abord grâce à la découverte (vers 1910-1930) du noyau de l'atome et de ses nucléons. Dans les années 1950, on a découvert un grand nombre de hadrons, dont les propriétés ressemblaient à celles des nucléons. Pour les mettre en ordre, le concept de quark a été introduit au début des années 1960. Pourtant, jusqu'à l'expérience SLAC-MIT, il était impossible de voir des traces de quarks dans la nature.

Cette découverte a été faite lorsque des protons et des neutrons ont été exposés à des faisceaux provenant d'un « microscope électronique » géant, un accélérateur de deux miles de long situé en Californie. La structure interne a été interprétée comme signifiant que les quarks constituent les éléments fondamentaux des protons et des neutrons. La « colle » électriquement neutre qui lie les quarks entre eux est appelée « gluons ». Toute la matière sur Terre, y compris notre corps humain,

est constituée à plus de 99 % de quarks et de gluons associés. Le peu qui reste est constitué d'électrons.

Les travaux récompensés ont été menés à la fin des années 1960 et au début des années 1970 par un groupe de chercheurs du MIT et du SLAC. Ils s'inscrivent dans le prolongement d'études antérieures au cours desquelles la structure des nucléons (protons et neutrons) a été étudiée en utilisant l'électron comme sonde. Contrairement aux études précédentes, des faisceaux d'électrons d'une énergie record étaient désormais disponibles. Ces faisceaux étaient fournis par un accélérateur linéaire de deux miles de long au SLAC, ce qui permettait d'obtenir un « microscope » d'une résolution plus élevée qu'auparavant. Aucun phénomène nouveau n'était attendu : l'expérience était généralement considérée comme une expérience de routine. La diffusion d'électrons contre des nucléons, mais à des énergies d'électrons plus faibles, avait été réalisée pendant plus de deux décennies. On pensait que l'on en savait assez sur la structure des nucléons, une opinion qui s'est avérée totalement fausse.

L'essentiel des expériences SLAC-MIT consistait à observer comment un faisceau d'électrons à grande vitesse (avec une énergie de 4 GeV à 21 GeV) est affecté lorsqu'il traverse une cible constituée soit d'hydrogène liquide, soit de deutérium. Les électrons diffusés ont été enregistrés à l'aide de deux grands spectromètres magnétiques. L'un d'entre eux a été utilisé pour observer les électrons diffusés à 6 et 10 degrés, et l'autre pour des angles de diffusion plus importants (18, 26 et 34 degrés). Outre l'angle de diffusion, on a mesuré l'énergie des électrons à l'aide des spectromètres.

La collaboration entre SLAC et MIT a commencé au début de 1967, avec l'étude de la diffusion élastique sur les protons (le processus $e + p \rightarrow e + p$, dans lequel l'électron rebondit sur le proton comme s'il s'agissait de deux balles en caoutchouc). Des expériences similaires menées à des énergies d'électrons plus faibles avaient montré que les nucléons se comportaient comme des structures « molles » qui n'étaient capables de diffuser les électrons que sous de petits angles. Les nouveaux résultats de la diffusion élastique ont confirmé les mesures précédentes. La probabilité d'obtenir un grand angle de diffusion s'est avérée très faible. Après cette phase initiale conventionnelle, on décida d'examiner également ce que l'on a appelé la diffusion inélastique des électrons, $e + p \rightarrow e + X$, où X n'est pas nécessairement un proton. De tels processus étaient connus grâce à des expériences réalisées à des énergies plus basses. Rien de fondamentalement nouveau n'était attendu. Cependant, les chercheurs

ont découvert avec stupéfaction que la probabilité d'une diffusion profondément inélastique, où l'électron incident perd une grande partie de son énergie initiale et émerge à un angle important par rapport à la direction d'origine, était considérablement plus élevée que prévu. Ils ont d'abord cru que le résultat était erroné ou mal interprété. L'une des sources d'erreur suspectées était ce que l'on appelle les corrections de rayonnement : l'électron incident ou sortant pouvait rayonner une partie de son énergie sous forme de lumière, ce qu'ils n'avaient pas observé et qui aurait donc pu, pensaient-ils, les amener à mal interpréter ce qui s'était passé. Mais après un travail minutieux de la part du groupe de recherche, il est apparu progressivement qu'une structure interne au noyau, appelée centres de diffusion durs, avait été observée. L'un des événements les plus importants de l'histoire de la physique, la découverte du noyau de l'atome, se répétait, bien qu'à un niveau plus profond.

L'histoire

Au début du XX^{e} siècle, Hans Geiger et Ernest Marsden ont réalisé une série d'expériences au cours desquelles ils ont mesuré la diffusion de particules alpha traversant une fine feuille de métal. Geiger et Marsden (1909) ont constaté avec surprise que certaines particules alpha étaient diffusées à des angles très importants, par exemple 90°, par rapport à leur direction initiale. Le directeur du centre de Manchester, où Geiger et Marsden travaillaient, était Ernest Rutherford, l'un des physiciens les plus éminents de l'époque et lauréat du prix Nobel de chimie en 1908. Rutherford a entrepris une étude théorique systématique des résultats de Geiger et Marsden et de ceux d'expériences similaires avec des particules bêta (comme on appelait les électrons à l'époque). Dans ces expériences, on avait découvert un phénomène tout à fait étonnant, à savoir qu'une petite fraction des électrons incidents était renvoyée en boomerang après l'impact. Rutherford a montré dans un article classique (1911) que les observations faites ne concordaient pas avec l'image alors admise de l'atome, une sphère molle semblable à une gelée dans laquelle les charges positives et négatives étaient distribuées de manière diffuse. Une cible aussi molle pouvait tout au plus produire une légère déviation des particules incidentes. Il a également constaté que la probabilité qu'un grand nombre de petites déviations s'additionnent pour produire une grande déviation était infiniment petite. Après avoir soigneusement comparé les données avec les attentes théoriques, il a conclu

que « si l'on considère l'ensemble des preuves, il semble plus simple de supposer que l'atome contient une charge centrale répartie dans un très petit volume et que les grandes déviations individuelles sont dues à la charge centrale dans son ensemble, et non à ses constituants ». C'est ainsi qu'est né le concept de noyau atomique.

La connaissance de la structure du noyau de l'atome a considérablement progressé lorsque James Chadwick a découvert le neutron en 1932. La même année, Werner Heisenberg a compris que les noyaux atomiques sont constitués de protons et de neutrons. Chadwick a reçu le prix Nobel de physique en 1935 pour la découverte du neutron et Heisenberg a reçu le prix de physique en 1932 pour « la création de la mécanique quantique ». La prise de conscience que le proton et le neutron sont des éléments constitutifs des noyaux atomiques a représenté un pas de géant dans la systématisation de la conception de la matière. Le proton, le neutron et l'électron sont devenus les trois éléments fondamentaux de la nature. Mais dès 1933-1934, on a soupçonné que le proton et le neutron étaient des particules plus complexes que l'électron. Les nucléons présentaient des champs magnétiques d'une ampleur inattendue (« moments magnétiques anormaux ») qui pouvaient être interprétés par des courants électriques internes. Les propriétés magnétiques des nucléons ont été mesurées pour la première fois par Otto Stern et ses collaborateurs. Stern a reçu le prix Nobel de physique en 1943 pour « la méthode des jets moléculaires et la découverte du moment magnétique du proton ».

Au cours des années 1950, on a systématiquement étudié la structure des nucléons par diffusion d'électrons. On a observé une série de phénomènes intéressants, notamment le fait que les électrons d'une énergie allant jusqu'à 1 GeV voyaient les nucléons comme des « sphères » molles, ce qui impliquait que la diffusion des électrons à de grands angles était très improbable. On a effectué des mesures sur la manière dont la charge et le magnétisme sont distribués à l'intérieur des nucléons. Robert Hofstadter a joué un rôle de premier plan dans ces recherches et a reçu le prix Nobel de physique en 1961 pour « ses études novatrices sur la diffusion des électrons par les noyaux atomiques et pour ses découvertes sur la structure des nucléons ».

Au cours des années 1950 et 1960, la position particulière du proton et du neutron en tant qu'éléments constitutifs de la matière a été remise en question. Un grand nombre de particules, appelées hadrons, ont été découvertes à cette époque. Elles présentaient des similitudes avec les nucléons. Il devenait urgent de mettre de l'ordre dans la physique afin

de comprendre comment classer ces hadrons. Après de nombreuses tentatives, l'énigme des hadrons a été résolue avec succès, principalement grâce aux travaux de Murray Gell-Mann (prix Nobel de physique 1969). On a découvert que les différents hadrons étaient liés et se comportaient comme les membres d'une sorte de famille (les « représentations d'un groupe de symétrie »). Cette description mathématique abstraite est devenue sensiblement plus facile et plus compréhensible lorsque trois éléments constitutifs ont été introduits, les quarks. Tous les hadrons connus à l'époque pouvaient alors être construits à partir de ces trois quarks et de leurs antiparticules. Comme il s'agissait d'une grande simplification conceptuelle, le concept de quark a été immédiatement pris au sérieux. On a recherché des quarks à la fois dans la nature, par exemple dans l'eau de mer, les météorites et les rayons cosmiques, et dans des expériences utilisant des accélérateurs à haute énergie. Mais on n'a trouvé aucun quark. Après un certain temps, l'explication la plus répandue de l'absence de quarks était qu'ils n'étaient que des « quantités mathématiques » incluses dans les équations de la physique.

Les premières traces de quarks

Les expériences SLAC-MIT sont devenues le pendant contemporain de l'expérience de Geiger et Marsden. À l'époque, la diffusion des particules alpha sous de grands angles était expliquée par l'existence d'un « grain dur », le noyau atomique, au milieu de l'atome. Dans la version moderne, le rôle de Rutherford a été assumé principalement par les théoriciens James D. Bjorken et Richard P. Feynman (qui a reçu le prix Nobel de physique en 1965). Cette fois, la diffusion des électrons aux grands angles est expliquée par l'existence de « grains durs », les quarks, dans les nucléons. Mais les résultats n'ont pas pu être entièrement expliqués par les seuls quarks. Les expériences indiquaient que les nucléons contenaient également des composants électriquement neutres. On s'est empressé de découvrir leur nature. Les développements ont été rapides et les composants neutres des nucléons ont rapidement été interprétées comme des gluons, les médiateurs de la force forte. Une nouvelle ère s'ouvrait alors dans l'histoire de la physique.

Cristaux liquides et polymères

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1991 à Pierre-Gilles de Gennes, professeur au Collège de France à Paris,

> « pour avoir découvert que les méthodes développées pour l'étude des phénomènes d'ordre dans les systèmes simples peuvent être généralisées à des formes plus complexes de la matière, en particulier aux cristaux liquides et aux polymères ».

Ordre et désordre dans la nature

Le lauréat a décrit mathématiquement comment par exemple les dipôles magnétiques, les longues molécules ou les chaînes de molécules peuvent dans certaines conditions former des états ordonnés. Il a aussi décrit le passage d'un état ordonné à un état désordonné. De tels changements d'ordre se produisent lorsque par exemple un aimant chauffé passe d'un état dans lequel tous les petits aimants atomiques sont alignés parallèlement à un état désordonné dans lequel les aimants sont orientés de manière aléatoire. La transition du désordre à l'ordre se produit toujours à une température bien définie et peut parfois se produire par sauts. Il y a une transition de phase à une température critique qui, dans le cas des matériaux ferromagnétiques, est appelée température de Curie.

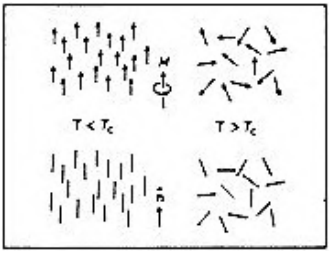


Fig. 2 –
Ordre magnétique.

Pierre-Gilles de Gennes a commencé par travailler sur les transitions de phases magnétiques, mais au cours des années 1960 et 1970,

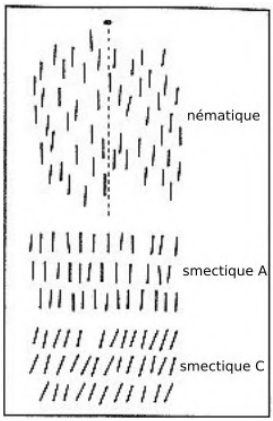


Fig. 3 – *Ordre dans les cristaux liquides.*

il a étudié d'autres phénomènes d'ordre plus compliqués. La transition vers un état supraconducteur dans certains matériaux, d'un état ordonné à un état désordonné dans les cristaux liquides, les régularités dans l'arrangement géométrique et le mouvement des chaînes de polymères, les conditions de stabilité dans les micro-émulsions, et d'autres phénomènes : tous ces éléments ont intéressé Pierre-Gilles de Gennes. Certains de ces systèmes sont si compliqués que les physiciens n'avaient pas réussi à dégager de règles générales sur leur comportement lors du passage de l'ordre au désordre. De Gennes y est parvenu dans de nombreux cas, notamment pour les cristaux liquides et les polymères. En outre, il a montré que les transitions de phase dans des systèmes physiques apparemment très différents tels que les aimants, les supraconducteurs, les cristaux liquides et les solutions de polymères peuvent être décrites en termes mathématiques d'une généralité étonnante.

Quelques exemples de contributions du lauréat

Les cristaux liquides sont connus depuis le XIX^e^ siècle et leur hydrodynamique, c'est-à-dire la façon dont ils s'écoulent, a été étudiée dès les années 1920 par le professeur Wilhelm Oseen à Uppsala. Mais ce n'est que dans les années 1960 que le développement des cristaux liquides s'est accéléré avec l'exploitation technique de leurs propriétés optiques pour l'affichage des chiffres dans les calculatrices de poche, les montres-bracelets, etc. Les cristaux liquides ont été appelés « la phase délicate de la matière dans la nature » parce que les molécules peuvent être arran-

gées de nombreuses manières différentes et caractéristiques, et parce que l'arrangement est également facilement affecté par de faibles champs électriques ou magnétiques. L'une des phases ordonnées est la phase « nématique », dans laquelle les molécules se déplacent comme dans un liquide tridimensionnel ordinaire, mais avec leurs axes orientés principalement dans la même direction. D'autres phases sont dites « smectiques », c'est-à-dire semblables à du savon : les molécules peuvent également s'écouler, mais uniquement en deux dimensions, en couches parallèles. Dans l'industrie, ces propriétés ont conduit aux applications optiques mentionnées, car les cristaux liquides sont également optiquement actifs et modifient la polarisation de la lumière ou la diffusent fortement lorsqu'elle traverse de fines couches de cristaux. Récemment, des écrans de télévision « plats » sont apparus. Ils sont basés sur les propriétés électro-optiques des cristaux liquides. En physique, par contre, les cristaux liquides sont souvent considérés comme un « terrain de jeu » passionnant où les arrangements qu'ils prennent peuvent être facilement modifiés et étudiés. Dans ce cas, les cristaux liquides peuvent servir de systèmes modèles pour des expériences visant à tester des théories plus générales.

À la fin des années 1960, de Gennes a formé un groupe d'étude des cristaux liquides à Orsay. Cette équipe de recherche était composée à la fois d'expérimentateurs et de théoriciens. Elle est rapidement devenue l'un des principaux groupes dans ce domaine. De Gennes lui-même a apporté sa principale contribution à notre connaissance des cristaux liquides en expliquant ce que l'on appelle la diffusion anormale de la lumière par les cristaux liquides nématiques. Cette diffusion de la lumière dépend de manière complexe des fluctuations de l'ordre des orientations. Une autre contribution importante a été sa description des conditions de l'un des points de transition qui se produisent lorsqu'on applique un faible champ électrique alternatif. En outre, de Gennes a mis en évidence d'importantes similitudes entre le comportement des cristaux liquides et celui des supraconducteurs. Publié en 1974, son livre *The Physics of Liquid Crystals* (« La Physique des cristaux liquides ») est devenu un ouvrage de référence.

Un peu plus tard, de Gennes a commencé à s'intéresser à la conformation et à la dynamique des polymères. Les polymères sont formés de très longues chaînes de liens plus simples, appelés monomères. Les maillons peuvent avoir une longueur d'environ 10 angströms (c'est-à-dire 10^{-7} cm) et les chaînes sont constituées de dizaines de milliers de maillons similaires. Dans les solutions diluées, les molécules de poly-

mère forment des boucles ou des « enchevêtrements », un peu comme des spaghettis. Lorsqu'on les suit de bout en bout, l'enroulement apparaît comme un mouvement (presque) aléatoire en trois dimensions. Des tentatives avaient déjà été faites pour décrire en termes mathématiques et statistiques les différentes possibilités de disposition spatiale des molécules, en tenant compte du fait qu'une chaîne ne peut pas avoir plus d'un maillon au même endroit au même moment. L'Anglais S. F. Edwards a apporté d'importantes contributions dans ce domaine en introduisant une technique de calcul issue de la physique des particules. L'importante découverte de de Gennes fut qu'il y avait beaucoup plus de similitudes qu'on ne l'avait soupçonné jusqu'alors entre cet « ordre dans le désordre » dans l'arrangement des polymères et les conditions qui s'appliquent lorsqu'un système de moments magnétiques passe de l'ordre au désordre. De Gennes a ainsi ouvert la voie à de nouvelles descriptions des phénomènes d'ordre complexes dans les polymères, qui sont basées sur les principes physiques généraux des transitions de phase. Dans le « groupe d'Orsay », ces descriptions ont rapidement été développées pour s'appliquer également aux polymères dans des solutions plus concentrées, dans lesquelles les différentes chaînes peuvent en partie « s'enchevêtrer », et à des concentrations élevées dans des polymères fondus purs.

Pour ces derniers cas, de Gennes a également fait un certain nombre de prédictions concernant la manière dont les chaînes de polymères et leurs éléments peuvent se déplacer, ce que les physiciens appellent la dynamique des polymères. Ces prédictions ont souvent le caractère de « lois d'échelle » : elles indiquent que les conditions seront similaires pour certaines combinaisons de variables de départ (telles que la concentration de polymère dans une solution et la température). Il s'agit de propriétés qui peuvent parfois être contrôlées expérimentalement. De nombreux travaux sur la dynamique des polymères ont été réalisés à l'aide de techniques de diffusion des neutrons. Dans ce type d'expériences, il est possible de distinguer comment les éléments d'une chaîne de polymères se déplacent en notant comment une oscillation d'une longueur d'onde choisie, initiée par la collision de neutrons, est amortie pendant un certain temps mesurable. Ces mesures ont permis de confirmer les modèles de de Gennes concernant le mouvement des chaînes de polymères. L'un de ces modèles, le modèle des « blobs », stipule qu'un certain segment typique d'une chaîne peut se déplacer comme s'il était libre, même dans des solutions plus concentrées. Un autre modèle est celui de la « reptation », qui décrit le mouvement

serpentin d'une chaîne de polymères dans un « enchevêtrement » de chaînes de polymères environnantes.

De Gennes a également créé un groupe d'étude des polymères et a rassemblé autour de lui un grand nombre de collaborateurs au sein de STRASACOL, un projet commun avec des physiciens et des chimistes de Strasbourg, de Saclay et du Collège de France (auquel de Gennes avait été nommé à l'époque). Ses travaux dans ce domaine sont décrits dans son livre *Scaling Concepts in Polymer Physics* (« Concepts d'échelle en physique des polymères »), publié en 1979. De Gennes a depuis apporté de nouvelles idées dans de nombreux domaines non conventionnels pour les physiciens, tels que les gels, les milieux poreux et d'autres systèmes dits mous.

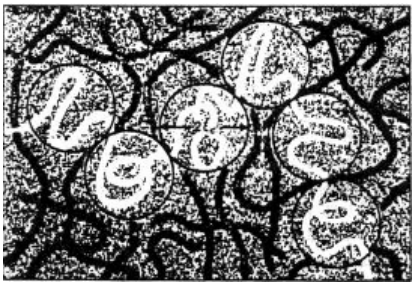


FIG. 4 – *Le modèle des « blobs ».*

Pierre-Gilles de Gennes, un coordinateur en physique

Pierre-Gilles de Gennes a été qualifié par certains membres du comité Nobel d'« Isaac Newton de notre temps ». La raison de cette épithète flatteuse est probablement que de Gennes a réussi à percevoir des caractéristiques communes dans les phénomènes d'ordre dans des systèmes physiques très différents et a pu formuler des règles sur la façon dont ces systèmes passent de l'ordre au désordre. Certains des systèmes traités par de Gennes étaient si compliqués que peu de physiciens avaient pensé auparavant qu'il était possible de les intégrer dans une description physique générale. Les physiciens sont souvent fiers de traiter des systèmes aussi simples et « purs » que possible, mais les travaux de de Gennes ont montré que même les systèmes physiques « désordonnés » peuvent être décrits avec succès en termes généraux. Il a ainsi ouvert de nouveaux domaines de la physique et stimulé un grand

nombre de travaux théoriques et expérimentaux dans ces domaines. S'il s'agit de recherche pure, cela a également permis de jeter des bases plus solides pour l'exploitation technique des matériaux mentionnés ici : les cristaux liquides et les polymères.

Bibliographie

— De Gennes (Pierre-Gilles), *Leçon inaugurale faite le 10 novembre 1971*, Paris, Collège de France, 1972.
— De Gennes (Pierre-Gilles), *Les Objets fragiles*, Paris, Plon, 1994.
— De Gennes (Pierre-Gilles), *Petit point*, Paris, Éd. Le Pommier, 2002.
— De Gennes (Pierre-Gilles), Brochard-Wyart (Françoise) et Quéré (David), *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Paris, Belin, 2002.

La chambre proportionnelle multifils

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1992 à Georges Charpak, professeur à l'École supérieure de physique et de chimie à Paris et chercheur au CERN à Genève,

> « pour l'invention et le développement de détecteurs de particules, en particulier de la chambre proportionnelle multifils ».

Une percée dans la technique d'exploration des parties les plus internes de la matière

Le prix Nobel de physique 1992 est attribué à Georges Charpak pour l'invention et le développement de détecteurs dans le domaine de la physique des hautes énergies. Depuis 1959, Charpak travaille au CERN, le laboratoire européen de physique des particules situé dans le canton de Genève en Suisse. Charpak a inventé la chambre proportionnelle multifils au CERN. Ce travail novateur a été publié en 1968. C'est en grande partie grâce à son travail que les physiciens des particules ont pu concentrer leur intérêt sur des interactions de particules très rares, qui révèlent souvent les secrets des parties internes de la matière. Parfois, seule une interaction de particules sur un milliard est recherchée. La difficulté expérimentale consiste à choisir, parmi les nombreuses interactions de particules observées, celles qui sont très peu nombreuses mais exceptionnellement intéressantes. Les méthodes photographiques, qui ont connu un grand succès dans l'exploration des processus particulaires, ne sont pas assez performantes pour cela. Dans la nouvelle chambre à fils, Charpak a utilisé l'électronique moderne et a réalisé l'importance de connecter le détecteur directement à un ordinateur. Cette invention a permis de multiplier par mille la vitesse de collecte des données par rapport aux méthodes précédentes d'enregistrement des trajectoires des particules chargées. Dans le même temps, la résolution spatiale était très souvent considérablement améliorée. Son idée fondamentale a été développée depuis lors. Pendant plus de vingt ans, Charpak a été à l'avant-garde de ce développement.

Le développement de détecteurs va très souvent de pair avec les progrès de la recherche fondamentale. Différents types de détecteurs

de particules basés sur l'invention originale de Charpak ont été d'une importance décisive pour de nombreuses découvertes en physique des particules au cours des deux dernières décennies. Plusieurs d'entre elles ont été récompensées par le prix Nobel de physique. Charpak a activement contribué à l'utilisation de ce nouveau type de détecteur dans diverses applications, notamment en médecine et en biologie.

L'étude des réactions entre particules élémentaires permet de connaître leurs propriétés et les forces qui agissent entre elles. Les réactions sont souvent très complexes. Parfois, plusieurs centaines de particules peuvent être créées dans une seule réaction. Pour les interpréter, les scientifiques doivent très souvent enregistrer chaque trajectoire de particule. Jusqu'en 1970 environ, cet enregistrement était souvent effectué à l'aide de méthodes photographiques. Les images étaient analysées à l'aide d'appareils de mesure spéciaux, un processus lent et laborieux.

L'invention de Charpak consiste à utiliser un développement antérieur, le compteur proportionnel, d'une manière particulièrement peu conventionnelle. Le compteur proportionnel classique, comme le compteur Geiger-Müller, se compose d'un fil fin placé au milieu d'un tube d'un diamètre d'environ un centimètre. Une haute tension de quelques kilovolts est appliquée entre le fil et la paroi du tube. Une particule chargée qui traverse le tube rempli de gaz ionise le gaz. Au cours de ce processus, les électrons, qui ont une charge électrique négative, sont libérés des atomes neutres du gaz, qui deviennent alors chargés positivement. Dans le champ électrique, les électrons se déplacent vers le fil central, l'anode. À proximité du fil, le champ électrique est très fort et entraîne une accélération rapide des électrons. Ils ont alors suffisamment d'énergie pour ioniser le gaz et d'autres électrons sont libérés, qui sont à leur tour accélérés, et ainsi de suite. Il en résulte une avalanche d'électrons et d'ions positifs et c'est le mouvement des électrons et des ions qui donne lieu à un signal électrique sur le fil. La position de la particule chargée qui a déclenché l'ionisation dans le gaz ne peut cependant être déterminée qu'avec une précision d'environ un centimètre, soit la taille du tube.

Couvrir de grandes surfaces avec des couches de ces tubes proportionnels classiques n'est pas pratique et la précision spatiale souhaitée ne peut être atteinte. La percée s'est produite avec l'invention par Charpak de la chambre proportionnelle multifils. Elle se compose d'un grand nombre de fils fins et parallèles disposés dans un plan situé entre deux plans de cathode distants de quelques centimètres. Les fils anodiques ont un diamètre d'environ un dixième de millimètre et sont placés à

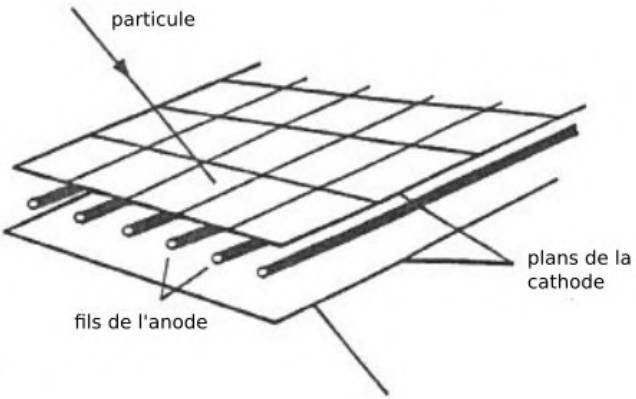


FIG. 5 – Le principe de la chambre proportionnelle multifils. *La distance entre les fils de l'anode est d'environ 2 mm et la distance entre les plans de la cathode est d'environ 2 cm. Une particule chargée ionise le gaz entre les plans cathodiques et les charges (les électrons et les ions) se déplacent respectivement vers l'anode et les cathodes. Plusieurs chambres sont placées à différentes distances les unes des autres pour permettre de déterminer avec précision la trajectoire des particules.*

quelques millimètres les uns des autres. En 1968, Charpak s'est rendu compte que, contrairement à la croyance générale, chaque fil se comporterait comme un compteur proportionnel et donnerait une précision spatiale d'environ un millimètre ou moins. Chaque fil pouvait supporter un taux très élevé de particules, plusieurs centaines de milliers par seconde, ce qui était à l'époque un taux exceptionnellement élevé.

Chaque fil est équipé d'un amplificateur. L'utilisation d'un si grand nombre d'amplificateurs est possible grâce aux développements de l'électronique qui permettent de construire des amplificateurs compacts avec une très faible consommation d'énergie. Un autre avantage très important est la possibilité d'enregistrer les signaux dans des ordinateurs et de traiter de grandes quantités de données.

Dans ce travail novateur datant de 1968, Charpak indique également les développements possibles de la chambre proportionnelle multifils. L'une de ces applications utilise le temps nécessaire à l'ionisation primaire pour dériver vers le fil anodique. La mesure du temps de dérive

permet d'améliorer la précision spatiale. Cette application est appelée chambre à dérive et permet une résolution spatiale d'un dixième de millimètre.

L'histoire

Très souvent, les découvertes en physique sont liées au développement de détecteurs. Le prix Nobel de l'année 1927 a été décerné à C. T. R. Wilson pour la mise au point de la chambre à brouillard, qui enregistre les traces de particules chargées dans un gaz. La chambre à brouillard a été utilisée pour la découverte de la première antiparticule, le positron, pour laquelle C. D. Anderson (d'origine suédoise) a reçu le prix Nobel en 1936. Le prix Nobel de physique 1948 a été décerné à P. M. S. Blackett pour le développement de la technique de la chambre à brouillard et son utilisation dans l'étude du noyau de l'atome et du rayonnement cosmique. Dans les études du rayonnement cosmique menées dans les années 1940 et 1950, des émulsions photographiques spéciales ont été utilisées pour enregistrer les traces des particules chargées. C. F. Powell a reçu le prix Nobel de physique en 1950 pour le développement de la technique de l'émulsion et la découverte du méson pi.

L'invention de la chambre à bulles, pour laquelle D. A. Glaser a reçu le prix Nobel de physique en 1960, a été d'une grande importance pour l'évolution de la physique des particules dans les années soixante. Dans la chambre à bulles, qui est remplie d'un liquide surchauffé, les particules chargées donnent naissance à de petites bulles là où le liquide est en ébullition le long de la trajectoire. Ces chapelets de bulles sont photographiés. Cependant, les photos ne peuvent être prises qu'environ une fois par seconde. Au cours des années soixante, on a découvert un grand nombre de nouvelles particules élémentaires grâce à la technique de la chambre à bulles. L. W. Alvarez a reçu le prix Nobel de physique en 1968 pour le développement de cette technique.

La découverte de Charpak en 1968 a déclenché un développement massif de différents types de chambres à fils. Aujourd'hui, pratiquement toutes les expériences de physique des particules utilisent un type de détecteur à fils qui a été développé à partir de l'invention originale de Charpak. Charpak lui-même a été au centre de ce développement dont des milliers de scientifiques, au CERN et ailleurs, ont profité. Lors de la découverte du quark charmé en 1974, qui a donné lieu à l'attribution du prix Nobel de physique 1976 à B. Richter et S. C. C. Ting, plusieurs

chambres proportionnelles multifils ont été utilisées. La chambre à fils a également été utilisée pour la découverte des bosons intermédiaires au CERN en 1983. Pour cette découverte, le prix Nobel de physique 1984 a été attribué à C. Rubbia et S. van der Meer. Les détecteurs développés par Charpak sont de plus en plus utilisés en dehors de la physique, par exemple en médecine pour la détection des rayons X.

Bibliographie

— Charpak (Georges), *La vie à fil tendu*, Paris, Odile Jacob, 1993.
— Charpak (Georges), *Enfants, chercheurs et citoyens*, Paris, Odile Jacob, 1998.
— Charpak (Georges), *Mémoires d'un déraciné, physicien et citoyen du monde*, Paris, Odile Jacob, 2008.
— Charpak (Georges) et Broch (Henri), *Devenez sorciers, devenez savants*, Paris, Odile Jacob, 2002.
— Charpak (Georges) et Garwin (Richard L.), *Feux follets et champignons nucléaires*, Paris, Odile Jacob, 1996.
— Charpak (Georges), Garwin (Richard L.) et Journé (Venance), *De Tchernobyl en tchernobyls*, Paris, Odile Jacob, 2005.
— Charpak (Georges), Léna (Pierre) et Quéré (Yves), *L'Enfant et la Science*, Paris, Odile Jacob, 2005.
— Charpak (Georges) et Omnès (Roland), *Soyez savants, devenez prophètes*, Paris, Odile Jacob, 2004.

Un pulsar binaire

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1993 à Russell A. Hulse et Joseph H. Taylor (fils), tous deux de l'université de Princeton aux États-Unis,

> « pour la découverte d'un nouveau type de pulsar, découverte qui a ouvert de nouvelles possibilités pour l'étude de la gravitation ».

Étude de la gravitation avec un pulsar binaire

La découverte récompensée par le prix Nobel de physique 1993 a été faite en 1974 par Russell A. Hulse et Joseph H. Taylor (fils), à l'aide du radiotélescope de 300 m d'Arecibo, à Porto Rico dans les Antilles. Taylor, alors professeur à l'université du Massachusetts à Amherst, et son étudiant Hulse recherchaient systématiquement des pulsars, une sorte de phare cosmique en rotation rapide d'une masse légèrement supérieure à celle du Soleil et d'un rayon d'environ dix kilomètres. Un être humain à la surface d'un pulsar pèserait quelque cent milliards de fois plus que sur Terre. La lumière du pulsar se situe souvent dans le domaine des ondes radio.

Le premier pulsar a été découvert en 1967 au laboratoire de radioastronomie de Cambridge en Angleterre (prix Nobel 1974 à Antony Hewish). La nouveauté du pulsar de Hulse et Taylor réside dans le fait que, d'après le comportement du signal de la balise, on peut déduire qu'il est accompagné d'un compagnon à peu près aussi lourd, situé à une distance correspondant à quelques fois seulement la distance de la Lune à la Terre. Le comportement de ce système astronomique s'écarte considérablement de ce que l'on peut calculer pour un couple de corps célestes à l'aide de la théorie de Newton. Un nouveau « laboratoire spatial » révolutionnaire a ainsi été découvert pour tester la théorie de la relativité générale d'Einstein et les théories alternatives de la gravité. Jusqu'à présent, la théorie d'Einstein a passé les tests avec brio. La possibilité de vérifier avec une grande précision la prédiction de la théorie selon laquelle le système devrait perdre de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles, de la même manière qu'un système de charges électriques en mouvement émet des ondes électromagnétiques, a suscité un intérêt particulier.

L'importance de la découverte du pulsar binaire

La découverte du premier pulsar binaire revêt avant tout une grande importance pour l'astrophysique et pour l'étude de la gravitation. La gravitation est la plus ancienne force naturelle connue, celle dont nous sommes le plus conscients dans la vie quotidienne. En même temps, c'est en un sens la force la plus difficile à étudier, car elle est beaucoup plus faible que les trois autres forces naturelles : la force électromagnétique, la force nucléaire forte et la force nucléaire faible. Le développement de la technologie et de la science depuis la seconde guerre mondiale, avec les fusées, les satellites, les voyages dans l'espace, la radioastronomie, la technologie radar et la mesure précise du temps à l'aide d'horloges atomiques, a conduit à une renaissance de l'étude de cette force naturelle la plus anciennement connue. La découverte du pulsar binaire représente une étape importante dans cette évolution historique.

Théorie de la relativité et gravitation

Selon la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein, la gravitation est causée par des changements dans la géométrie de l'espace et du temps : l'espace-temps s'incurve à proximité des masses. Einstein a présenté sa théorie en 1915. Il est devenu une célébrité mondiale lorsque l'astrophysicien anglais Arthur Eddington a annoncé en 1919 que l'une des prédictions de la théorie, la déviation de la lumière des étoiles qui passe près de la surface du Soleil (la lumière est attirée vers le Soleil), avait été vérifiée lors d'expéditions consacrées aux éclipses solaires. Cette déviation de la lumière, ainsi qu'une petite contribution de la relativité générale au mouvement du périhélie de Mercure (une rotation lente de l'orbite elliptique de Mercure autour du Soleil), a été pendant plusieurs décennies le seul soutien, en partie incertain, de la théorie d'Einstein.

Pendant longtemps, la théorie de la relativité a été considérée comme esthétiquement très belle et satisfaisante, probablement correcte, mais de peu d'importance pratique pour la physique, sauf dans ses applications en cosmologie, l'étude de l'origine, du développement et de la structure de l'Univers.

L'attitude à l'égard de la théorie de la relativité générale a toutefois changé au cours des années 1960, lorsque les développements expérimentaux et théoriques ont fait de la gravitation un domaine d'actualité

de la physique. De nouvelles possibilités d'expériences précises, basées sur la technologie des satellites et des radars, se sont ouvertes. Les recherches des Américains R. Dicke et I. Shapiro y ont notamment contribué. Dicke a réalisé des expériences de précision dans lesquelles le champ gravitationnel du Soleil sur la Terre a été utilisé pour vérifier ce que l'on appelle le principe d'équivalence, l'identité entre la masse gravitationnelle et la masse inertielle, l'un des principes de base de la théorie de la relativité générale (et aussi de plusieurs théories alternatives de la gravitation). Shapiro a également apporté une contribution importante en prédisant théoriquement et en vérifiant expérimentalement, à l'aide d'échos radar provenant de Mercure, une autre conséquence de la théorie de la relativité générale, à savoir un effet de retard pour les signaux électromagnétiques qui traversent des champs gravitationnels.

Toutes ces expériences étaient cependant limitées à notre système solaire, avec ses champs gravitationnels très faibles et par conséquent de petites déviations difficiles à mesurer par rapport à la théorie newtonienne de la gravitation. Il n'a donc été possible de tester la théorie de la relativité générale et d'autres théories que dans la première approximation post-newtonienne.

La découverte du pulsar binaire

La découverte par Hulse et Taylor en 1974 du premier pulsar binaire, appelé PSR 1913+16 (PSR signifie pulsar et 1913+16 précise la position du pulsar dans le ciel) a donc provoqué une révolution dans le domaine. Il s'agit de deux astres très petits, d'une dizaine de kilomètres de rayon chacun, mais d'une masse comparable à celle du Soleil et à faible distance l'un de l'autre, quelques fois seulement la distance de la Lune à la Terre. Les écarts par rapport à la théorie de la gravitation de Newton sont alors importants. À titre d'exemple, on peut mentionner que le décalage du périastre, la rotation de l'orbite elliptique que le pulsar suit dans ce système (selon la première loi de Kepler qui remonte au début du XVII^{e} siècle), est de 4 degrés par an. Le décalage relativiste correspondant pour l'exemple le plus favorable de notre système solaire, le mouvement du périhélie de Mercure mentionné ci-dessus, est de 43 secondes d'arc par siècle, ce qui représente moins d'un dixième des contributions beaucoup plus importantes au mouvement du périhélie causées par les perturbations d'autres planètes, principalement Vénus et Jupiter. La différence de taille entre les décalages est en partie due à la vitesse orbitale du pulsar binaire, qui est presque cinq fois

supérieure à celle de Mercure, et en partie au fait que le pulsar effectue environ 250 fois plus d'orbites par an que Mercure. La durée de l'orbite du pulsar binaire est inférieure à huit heures, à comparer au mois que prend notre Lune pour tourner autour de la Terre.

Une propriété très importante du nouveau pulsar est que sa période de pulsation, le temps entre deux balayages de la balise (0,05903 s), s'est avérée extrêmement stable, contrairement à ce qui s'applique à de nombreux autres pulsars. La période de pulsation du pulsar augmente de moins de 5 % en un million d'années. Cela signifie que le pulsar peut être utilisé comme une horloge dont la précision peut rivaliser avec les meilleures horloges atomiques, ce qui est très utile pour étudier les caractéristiques du système.

La période de pulsation très stable est en fait une moyenne de la période de pulsation observée sur Terre pendant la durée d'une orbite du système qui forme le pulsar. La période observée varie en fait de plusieurs dizaines de microsecondes, c'est-à-dire d'une quantité beaucoup plus importante que la variation de la valeur moyenne. Il s'agit d'un effet Doppler, qui a permis de conclure que le pulsar observé se déplace sur une orbite périodique, ce qui signifie qu'il doit avoir un compagnon. Lorsque le pulsar s'approche de la Terre, les impulsions atteignent la Terre plus fréquemment ; lorsqu'il s'en éloigne, elles arrivent moins souvent. La variation de la période des pulsations permet de tirer des conclusions sur la vitesse du pulsar sur son orbite et sur d'autres caractéristiques importantes du système.

Mise en évidence des ondes gravitationnelles

Une observation très importante a été faite après avoir suivi le système pendant quelques années. Elle faisait suite aux prédictions théoriques faites peu après la découverte initiale du pulsar. On a constaté que la période de l'orbite diminuait : les deux corps astronomiques tournent de plus en plus vite l'un autour de l'autre sur une orbite de plus en plus serrée. Le changement est très faible. Il correspond à une réduction de la période de l'orbite d'environ 75 millionièmes de seconde par an, mais grâce à une observation sur une période suffisante, cette réduction est néanmoins tout à fait mesurable. On supposait que ce changement se produisait parce que le système émettait de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles, conformément à ce qu'Einstein avait prédit en 1916 pour des masses se déplaçant relativement l'une par rapport à l'autre. Selon les données les plus récentes, la valeur théo-

rique calculée à partir de la théorie de la relativité correspond à environ un demi pour cent près à la valeur observée. Le premier rapport sur cet effet est dû à Taylor et ses collègues à la fin de 1978, quatre ans après la découverte du pulsar binaire.

Le bon accord entre la valeur observée et la valeur théorique pour l'orbite peut être considéré comme une preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles. Il faudra probablement attendre le XXI^{e} siècle pour une mise en évidence directe de leur existence. De nombreux projets à long terme ont été lancés afin d'observer directement les ondes gravitationnelles qui frappent la Terre. Le rayonnement émis par le pulsar binaire est trop faible pour être observé sur la Terre avec les techniques existantes. Cependant, les violentes perturbations de la matière qui se produisent lorsque les deux corps d'une étoile binaire (ou d'un pulsar binaire) se rapprochent au point de tomber l'un sur l'autre pourraient peut-être donner lieu à des ondes gravitationnelles qui pourraient être observées ici. On espère également pouvoir observer de nombreux autres événements violents dans l'Univers. L'astronomie des ondes gravitationnelles est la dernière branche de l'astronomie observationnelle qui n'a pas encore fait ses preuves. L'astronomie des neutrinos est son prédécesseur le plus direct. L'astronomie des ondes gravitationnelles serait donc la première technique d'observation dont le principe de base a été testé pour la première fois dans un contexte astrophysique. Toutes les techniques d'observation antérieures en astronomie étaient basées sur des phénomènes physiques connus pour la première fois dans un contexte terrestre.

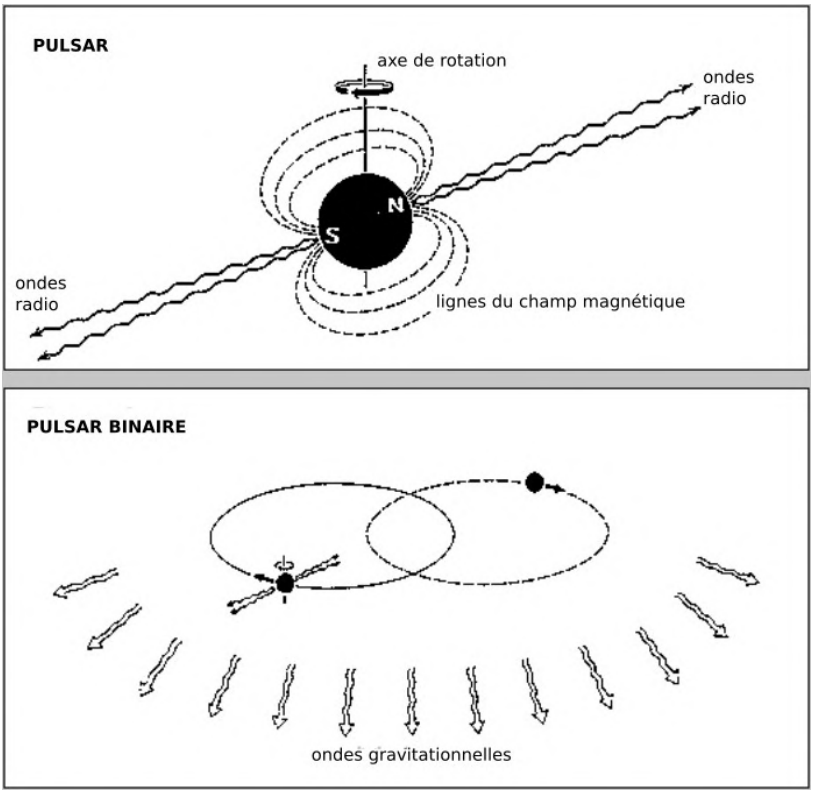


FIG. 6 – *Les ondes radio d'un pulsar sont émises en deux paquets qui balaient l'espace à la même vitesse que la rotation du pulsar (figure du haut). Un pulsar binaire émet également des ondes gravitationnelles (figure du bas).*

Des neutrons pour l'étude de la matière condensée

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1994 pour des contributions novatrices au développement des techniques de diffusion neutronique pour l'étude de la matière condensée. Une moitié revient à Bertram N. Brockhouse, de l'université McMaster à Hamilton dans l'Ontario au Canada,

> « pour la mise au point de la spectroscopie neutronique ».

L'autre moitié revient à Clifford G. Shull, de l'institut de technologie du Massachussets aux États-Unis,

> « pour la mise au point de la technique de diffraction neutronique ».

La structure et la dynamique de la matière révélées

La plupart des gens savent que les rayons X et la microscopie peuvent être utilisés pour étudier des objets en détail. Malgré des améliorations, ces méthodes ne sont pas toujours adéquates. Les chercheurs récompensés en 1994 ont mis au point des techniques de diffusion neutronique, des méthodes puissantes d'analyse de la matière solide et fluide (condensée). Ces techniques ont été mises au point dans les réacteurs nucléaires relativement simples et peu puissants qui ont été mis à la disposition des chercheurs peu après la seconde guerre mondiale. Des développements successifs ont conduit aux grandes installations actuelles spécialement construites pour l'étude de la matière condensée, par exemple en France, en Angleterre et aux États-Unis. D'autres sont prévues.

Les deux méthodes sont basées sur l'utilisation de neutrons provenant d'un réacteur nucléaire. Lorsque les neutrons rebondissent sur les atomes de l'échantillon étudié, leur direction change en fonction de la position relative des atomes. Cela montre comment les atomes sont disposés les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire la structure de l'échantillon. Les changements de vitesse des neutrons, en revanche, donnent des informations sur les mouvements des atomes, par exemple leurs oscillations individuelles et collectives, c'est-à-dire leur dynamique. En termes simples, Clifford G. Shull a contribué à répondre à la question

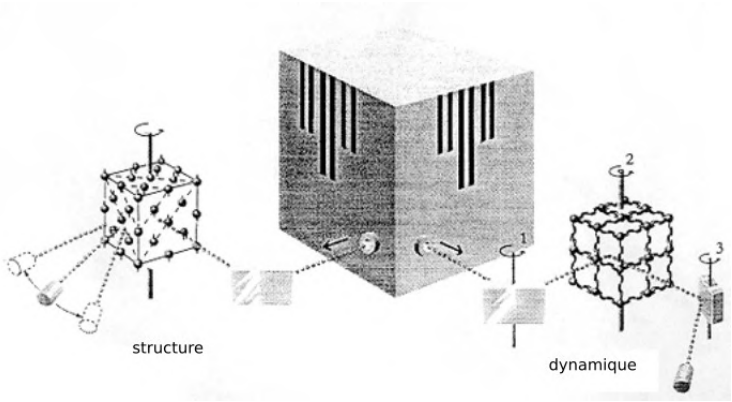
de savoir où se trouvent les atomes et Bertram N. Brockhouse à celle de savoir ce que font les atomes.

Les techniques de diffusion neutronique sont utilisées dans des domaines aussi variés que l'étude des nouveaux supraconducteurs céramiques, le nettoyage catalytique des gaz d'échappement, les propriétés élastiques des polymères et la structure des virus.

Un développement dynamique

Brockhouse et Shull ont fait œuvre de pionniers dans les premiers réacteurs nucléaires aux États-Unis et au Canada dès les années 1940 et 1950. Les techniques de diffusion neutronique se sont considérablement développées depuis lors. Les neutrons ont été de plus en plus utilisés pour étudier la structure (l'arrangement) et la dynamique (le mouvement) de la matière solide et fluide. Les chercheurs dans ce domaine se comptent aujourd'hui par milliers et mènent des recherches intensives dans les nombreuses installations de diffusion neutronique du monde entier. Le réacteur à haut flux de l'institut Laue-Langevin à Grenoble est un exemple de grande installation de recherche européenne datant du début des années 1970 (récemment modernisée). Les études portent sur la structure et la dynamique des nouveaux supraconducteurs céramiques (prix Nobel 1987 à Bednorz et Müller), les mouvements de molécules sur des surfaces importantes pour le nettoyage catalytique des gaz d'échappement, la structure des virus et la façon dont ils se défendent contre la déshydratation, et le lien entre les structures ordonnées et non ordonnées des polymères et leurs propriétés élastiques (prix Nobel 1991 attribué à de Gennes). Le manuel destiné aux chercheurs souhaitant utiliser l'installation décrit pas moins de 16 instruments pour l'étude de la structure et 14 pour la dynamique.

Au laboratoire Rutherford Appleton en Angleterre, une source de neutrons basée sur un accélérateur (ISIS) a été construite à des fins similaires. À l'Institut national des normes et de la technologie aux États-Unis, il existe une variante datant de 1990 de l'installation de Grenoble. Il est maintenant prévu d'ouvrir de nouvelles installations très avancées en Europe, aux États-Unis et en Asie. Celles-ci devraient permettre d'acquérir de nouvelles connaissances de base, mais aussi de développer des applications technologiques (mémoire des ordinateurs) et environnementales (chimie de la pollution).



Ce qui se passe

L'illustration montre comment on peut utiliser les neutrons d'un réacteur de recherche pour l'étude de la structure et de la dynamique. Dans la partie gauche de l'image, le faisceau de neutrons est d'abord réfléchi par un cristal. En raison de la nature ondulatoire des neutrons, une caractéristique de toutes les particules en mouvement, et de la disposition stricte des atomes du cristal en un motif régulier, les neutrons réfléchis dans une certaine direction auront une longueur d'onde bien définie (condition de Bragg). En plaçant le cristal sous un angle approprié, il est possible de sélectionner une certaine longueur d'onde pour les neutrons. Ces neutrons « monochromatiques » irradient alors l'échantillon à étudier. Les neutrons étant électriquement neutres, ils ont une grande capacité de pénétration et fouillent donc l'ensemble de l'échantillon. La plupart des neutrons quittent l'échantillon avec une énergie inchangée (diffusion élastique) et une préférence pour certaines directions (diffraction). En comptant les neutrons dans un détecteur rotatif, on obtient une figure de diffraction qui montre les positions relatives des atomes dans l'échantillon. C'est pour le développement de cette variante de la technique de diffusion neutronique que Clifford G. Shull a reçu son prix Nobel. Il a montré comment les neutrons peuvent être utilisés pour déterminer la structure atomique d'un matériau.

La partie droite de l'image montre le principe de base utilisé par Brockhouse. Les neutrons provenant du réacteur sont d'abord rendus monochromatiques par un cristal qui peut tourner autour d'un axe (1). Lorsque les neutrons pénètrent dans l'échantillon, qui peut

tourner autour d'un autre axe (2), ils peuvent déclencher ou annuler des oscillations dans les atomes de l'échantillon. Ces mouvements, auxquels participent collectivement tous les atomes, sont appelés phonons. Si les neutrons parviennent à créer (exciter) des phonons, ils perdent eux-mêmes de l'énergie (diffusion inélastique). Lorsque les neutrons ont quitté l'échantillon, leur énergie est analysée dans un cristal qui peut tourner autour d'un troisième axe (3) et finalement mesurée dans un détecteur. Un tel appareil, un spectromètre à trois axes, permet d'étudier les mouvements (la dynamique) d'un matériau ou d'un cristal. C'est pour le développement de cette technique, la spectroscopie neutronique pour la matière condensée, que Bertram N. Brockhouse a reçu son prix Nobel.

Comment tout a commencé

À la fin de la seconde guerre mondiale, les chercheurs américains ont eu accès aux importants flux de neutrons que les réacteurs nucléaires, même relativement modestes, étaient capables de produire. Les neutrons étaient alors connus depuis plus d'une décennie comme des éléments constitutifs du noyau atomique (prix Nobel décerné à Chadwick en 1935 pour leur découverte). Enrico Fermi a montré en 1942 que les neutrons issus de la fission du noyau d'uranium pouvaient alimenter une réaction en chaîne contrôlée. Il avait auparavant fait l'importante découverte que les neutrons ralentis (les « neutrons thermiques ») sont beaucoup plus enclins à réagir que les neutrons rapides (prix Nobel pour cette découverte parmi d'autres décerné à Fermi en 1938). Ce sont les propriétés particulières de ces neutrons lents qui les rendent aptes à détecter les positions et les mouvements des atomes. Avant même l'entrée des réacteurs nucléaires dans le domaine de la recherche, les résultats de l'utilisation de sources de neutrons simples avaient indiqué que les faisceaux de neutrons pouvaient être utilisés pour étudier les corps solides et les liquides. Cependant, il restait de nombreuses difficultés à surmonter avant de pouvoir concrétiser ces possibilités.

Au réacteur nucléaire d'Oak Ridge aux États-Unis, le regretté E. O. Wollan a formé un groupe de travail chargé d'examiner les possibilités de développer des faisceaux de neutrons et des appareils pour déterminer des structures. Clifford Shull a été très tôt associé à ce groupe et n'a pas tardé à y jouer un rôle majeur. Des efforts similaires étaient déployés ailleurs, mais c'est le groupe Wollan-Shull (et plus tard Shull en collaboration avec d'autres chercheurs) qui a procédé avec le

plus de détermination et obtenu des résultats avec une rapidité surprenante. Les études de Shull sur les cristaux simples ont jeté les bases de l'interprétation des structures très compliquées analysées par la cristallographie neutronique moderne.

Où sont les atomes d'hydrogène ?

L'hydrogène est l'un des éléments les plus courants de la matière biologique. Il est également présent dans de nombreuses formes de matières inorganiques techniquement importantes. La localisation de l'hydrogène dans les structures de ces matières aurait été pratiquement impossible avec l'ancienne méthode de diffraction des rayons X (pour laquelle von Laue et les Bragg, père et fils, ont reçu le prix Nobel en 1914-1915), car l'atome d'hydrogène diffuse à peine les rayons X. Les rayons X sont diffusés par les électrons des atomes diffractants. Or l'atome d'hydrogène n'a qu'un seul électron. En revanche, le noyau de l'atome d'hydrogène, le proton, constitue un centre de diffusion des neutrons très efficace et sa position peut donc être déterminée par la diffraction neutronique. Grâce à ses premières expériences réussies, Shull a ouvert ce qui allait devenir un champ très vaste pour découvrir comment l'hydrogène est lié, par exemple, dans la glace, les hydrures métalliques et les composés organiques.

Structures magnétiques

Les neutrons sont de petits aimants, tout comme les atomes d'un matériau magnétique. Lorsqu'un faisceau de neutrons frappe un tel matériau, les neutrons peuvent donc changer de direction par interaction magnétique avec les atomes du matériau. Cela donne lieu à un nouveau type de diffraction des neutrons (le type décrit précédemment est basé sur l'interaction des neutrons avec les noyaux atomiques) qui peut être utilisé pour étudier les orientations relatives des petits aimants atomiques. Ici aussi, la méthode des rayons X a été impuissante et, dans ce domaine d'application, la diffraction des neutrons a depuis lors pris une position entièrement dominante. Il est difficile d'imaginer la recherche moderne sur le magnétisme sans cette aide.

Une nouvelle percée

Alors que Shull développait la technique basée sur la diffraction des neutrons diffusés de manière élastique, Brockhouse, au réacteur de recherche de Chalk River au Canada, se concentrait principalement sur la diffusion inélastique. Il a conçu le spectromètre à trois axes déjà mentionné et a développé une méthodologie pour étudier le spectre énergétique des neutrons une fois qu'ils ont été diffusés. Cela nécessitait une connaissance approfondie des propriétés des neutrons et beaucoup d'ingéniosité. Ce n'est qu'avec les contributions de Brockhouse que la diffusion inélastique des neutrons est devenue un outil utile en physique de la matière condensée. Les neutrons se sont à nouveau révélés avoir des propriétés de diffusion uniques, en l'occurrence parce que leur énergie est du même ordre de grandeur que celle des phonons dans la matière solide et liquide. Entre 1955 et 1960, le travail de pionnier de Brockhouse a été sans équivalent dans le domaine de la spectroscopie neutronique. Cela a permis à la technique de devenir une source d'information unique à bien des égards, qui a révolutionné notre capacité à représenter la dynamique atomique, par exemple les vibrations atomiques dans les cristaux, les mouvements de diffusion dans les liquides et les fluctuations dans les matériaux magnétiques. Ces informations contribuent activement à l'élucidation des forces qui lient les atomes les uns aux autres dans les corps solides et qui déterminent, par exemple, le passage de l'état solide à l'état liquide.

Phonons et magnons

Le nombre d'atomes dans une quantité macroscopique de matière est très élevé, ce qui donne lieu à une riche variété de types de mouvements dans les corps solides et liquides. Le lien entre l'énergie et la longueur d'onde, par exemple dans les oscillations cristallines, appelé relation de dispersion des phonons, est une fonction complexe. La forme de la courbe de dispersion est cependant caractéristique d'un cristal et son étude fournit des informations précieuses sur les propriétés des matériaux. Dès 1955, Brockhouse et A. T. Stewart ont fait état de résultats concernant les phonons dans les cristaux d'aluminium, entre autres, et ont spécifié pour la première fois une courbe de dispersion mesurée expérimentalement pour ces cristaux.

Dans les cristaux de matériaux magnétiques, comme la magnétite, un type de mouvement ondulatoire collectif peut se produire parmi

les aimants atomiques élémentaires. Ce mouvement ondulatoire peut être excité par des neutrons. Brockhouse a été le premier à étudier et à mesurer la courbe de dispersion des excitations élémentaires de ce mouvement ondulatoire, appelées « magnons ».

Mouvement non ordonné

Pour le mouvement non ordonné dans les liquides et les matières fondues, comme dans les aimants, le regretté L. Van Hove a formulé au début des années 1950 une théorie sur la façon dont la mémoire d'un certain arrangement d'atomes disparaît progressivement au fil du temps. Les neutrons permettent de suivre l'évolution des structures atomiques dans le temps. Brockhouse a été le premier à montrer expérimentalement comment on pouvait déterminer ces fonctions de « corrélation » ou de « mémoire » en utilisant la diffusion des neutrons dans des expériences avec notamment H_2O (l'eau) et D_2O (l'eau lourde). De même, ses expériences avec le plomb liquide ont servi de modèle à d'autres.

Ces expériences ont été le point de départ d'un développement important des théories sur les liquides et les systèmes non ordonnés en général. Des phénomènes tels que la dynamique et la diffusion dans les réseaux ont connu une renaissance grâce à ces contributions et à d'autres recherches ultérieures.

Les études de la structure et de la dynamique atomiques rendues possibles par Bertram N. Brockhouse et Clifford G. Shull grâce au développement des techniques de diffusion neutronique permettent d'obtenir des informations précieuses qui peuvent être utilisées par exemple pour le développement de nouveaux matériaux. Un exemple important est celui des céramiques supraconductrices qui ont fait l'objet d'études intensives, bien qu'elles n'aient pas encore été développées pour un usage commercial.

Le lepton tau et le neutrino

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1995 pour des contributions expérimentales innovantes à la physique des leptons. Une moitié revient à Martin L. Perl, de l'université Stanford,

« pour la découverte du lepton tau ».

L'autre moitié revient à Frederick Reines, de l'université de Californie à Irvine,

« pour la détection du neutrino ».

La découverte de deux particules subatomiques récompensée

L'homme cherche sa place dans la nature. Il s'efforce de trouver des réponses aux questions philosophiques et physiques. Le foyer de l'humanité, l'Univers, a été créé lors d'un *Big Bang*. De quoi est composé cet Univers ? Quels sont les plus petits constituants de l'Univers et quelles sont leurs propriétés ? Que peuvent-ils nous apprendre sur l'histoire de l'Univers et sur son avenir ? Les lauréats de l'année 1995 ont apporté des contributions durables à cette recherche : ils ont découvert deux des particules subatomiques les plus remarquables de la nature.

Martin L. Perl et ses collègues ont découvert, grâce à une série d'expériences menées entre 1974 et 1977 à l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC) aux États-Unis, que l'électron a un parent quelque 3 500 fois plus lourd, appelé « tau » (τ).

Dans les années 1950, Frederick Reines et Clyde L. Cowan (fils) ont fait œuvre de pionniers en démontrant expérimentalement l'existence de l'antineutrino électronique.

La découverte du tau par Martin Perl a été le premier signe de l'existence d'une troisième « famille » de briques fondamentales. Quelques années plus tard, un autre élément a été découvert : l'un des deux quarks de la famille, le quark b (*bottom*, « dessous »). Ce n'est que 18 ans plus tard que son autre quark, le quark t (*top*, « dessus »), a été découvert. L'existence de la troisième famille est très importante pour la confiance des physiciens dans le modèle théorique actuel qui permet de comprendre les propriétés des plus petits constituants de la nature. C'est ce qu'on appelle le modèle standard. Sans une troisième

famille, le modèle aurait été incomplet et incapable d'admettre ce que l'on appelle la violation de charge et de parité (CP), une violation d'un principe fondamental de symétrie qui régit notamment la désintégration des particules (prix Nobel à Cronin et Fitch en 1980). La découverte d'une quatrième famille de quarks et de leptons pourrait signifier que le modèle standard doit être révisé et qu'une reconstruction plus poussée de la physique des particules élémentaires doit être entamée.

La première observation des neutrinos par Frederick Reines et Clyde L. Cowan a été une contribution novatrice qui a ouvert les portes de la région des expériences « impossibles » sur les neutrinos. Aujourd'hui, nous essayons de détecter les neutrinos dans le rayonnement cosmique qui peut provenir du Soleil ou des supernovae (des étoiles qui explosent). En raison de la réticence des neutrinos à réagir avec les noyaux atomiques et donc à se laisser détecter, ces expériences nécessitent des détecteurs de très grand volume. Alors que Reines et Cowan, dans les années 1950, ont réussi à placer environ un demi-mètre cube d'eau dans leur détecteur, les expériences à grande échelle menées dans les années 1990 utilisent plusieurs milliers de mètres cubes. Certaines expériences ont même utilisé la mer ou la glace environnante comme volume de détection.

Les éléments constitutifs de la nature et leur structure en familles

Les plus petites structures naturelles étudiées jusqu'à présent sont les douze types de particules de matière : six quarks et six leptons. Chacune de ces particules possède son antiparticule, une sorte d'image miroir de la particule. Outre les quarks et les leptons, il existe d'autres types de particules subatomiques appelées particules de force, car elles sont responsables de trois des forces connues : la force forte, la force électromagnétique et la force faible. Les forces gravitationnelles n'entrent pas dans le cadre de ces forces. La différence la plus essentielle entre les quarks et les leptons est que les leptons ne sont pas affectés par la force forte.

Une propriété remarquable des particules de matière est qu'elles présentent une structure en « familles ». Elles se répartissent en trois familles, chacune composée de deux quarks et de deux leptons (fig. 7). Ces trois familles se comportent à bien des égards comme des copies les unes des autres. La question de savoir s'il existe un principe fondamental qui justifie l'existence de seulement trois familles est l'une des

questions en physique restées sans réponse.

	leptons		quarks	
famille 1	e	ν_e	u	d
famille 2	μ	ν_μ	c	s
famille 3	τ	ν_τ	t	b

FIG. 7 – *Les particules élémentaires du modèle standard, un nouveau système périodique. La figure représente le dieu Triton.*

Les quarks de la première famille sont les quarks u (*up*, « haut ») et d (*down*, « bas »). Ses leptons sont l'électron et le neutrino électronique. Ces deux quarks forment les protons et les neutrons, qui à leur tour forment les noyaux atomiques et donc plus de 99 % de toute la matière terrestre. Le petit reste est constitué d'électrons. Le neutrino électronique peut être imaginé très schématiquement comme un électron dépourvu de charge et de masse. La question de savoir si ce neutrino aurait tout de même une masse minuscule est une autre question sans réponse. C'est ce neutrino électronique que Reines et son collègue Cowan, tous deux employés à l'époque au laboratoire scientifique de Los Alamos, ont réussi à détecter.

La découverte du tau

Au cours des années 1960, de nombreux groupes de recherche ont mené des expériences dont l'un des objectifs était de découvrir de nouvelles particules chargées, y compris de nouveaux leptons. Une approche consistait à rechercher les nouvelles particules dans les produits de désintégration des particules disponibles, par exemple les kaons. Une autre approche consistait à tenter de les produire dans un accélérateur, par exemple lors de collisions entre des électrons de haute énergie et une cible. Martin Perl a fait partie d'une équipe qui a réalisé une telle expérience au SLAC en 1966, mais aucun nouveau lepton chargé n'a été découvert. En 1973, une nouvelle machine a été mise en service au SLAC : un collisionneur électron-positron appelé

SPEAR. Un tel collisionneur est le rêve de tout chasseur de leptons, car le mécanisme de production possible de nouveaux leptons chargés (X^+, X^-) est simple et facile à interpréter :

$$\text{électron} + \text{positron} \rightarrow X^+ + X^-$$

Le collisionneur SPEAR a offert à Perl une occasion exceptionnelle de poursuivre sa chasse aux nouveaux leptons, cette fois dans une nouvelle plage d'énergie, inaccessible jusqu'alors, d'environ 5 GeV (5 milliards d'électronvolts). Au bout d'un an seulement, le premier indice d'un phénomène passionnant est apparu, qui pouvait signaler la production d'un nouveau type de lepton. L'année suivante, Perl et ses collègues ont publié les premiers résultats. Mais il a fallu attendre encore quelques années avant d'avoir la certitude d'avoir découvert un lepton. Le nouveau lepton est désigné par la lettre grecque tau (τ), qui correspond à la première lettre du mot τριτον (« troisièmement »).

L'expérience de Perl et de ses collaborateurs

L'expérience a enregistré des collisions frontales entre des électrons et leurs antiparticules, les positrons. Un grand détecteur cylindrique placé dans un champ magnétique entourait la zone de collision. Le détecteur était constitué de nombreux composants, notamment un certain nombre de chambres à fils, des compteurs de jets construits avec des scintillateurs en plomb et quelques chambres proportionnelles. La première indication d'un nouveau phénomène possible a été que l'équipe de recherche a observé 24 événements du type

$$\text{électron} + \text{positron} \rightarrow \text{électron} + \text{antimuon} + \text{p.i.}$$

ou

$$\text{électron} + \text{positron} \rightarrow \text{positron} + \text{muon} + \text{p.i.},$$

où p.i. signifie « particules invisibles », c'est-à-dire celles qui ne laissent aucune trace dans le détecteur. Ainsi, seuls un électron (ou positron) et un antimuon (ou muon) dont les charges sont de signe opposé ont été détectés. En appliquant la loi de conservation de l'énergie, Perl et ses collaborateurs ont constaté qu'ils avaient produit au moins deux particules invisibles.

Une interprétation possible de ces événements était qu'une paire de leptons lourds, appelés plus tard particules tau, avait été produite dans un premier temps :

électron + positron → tau + antitau.

Mais on s'attendait à ce que ces particules se désintègrent très rapidement et les électrons et muons observés ont donc été interprétés comme des produits de désintégration issus de réactions

tau → électron (ou muon) + neutrinos

antitau → antimuon (ou positron) + neutrinos.

Les particules invisibles étaient les neutrinos qui, du fait de leur insensibilité notoire à leur environnement, disparaissaient sans laisser de traces visibles (fig. 8). Ils se sont toutefois fait remarquer à travers le bilan énergétique. Ils avaient emporté avec eux une part non négligeable de l'énergie (voir ci-dessous).

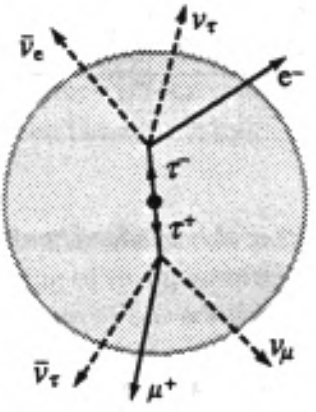


FIG. 8 – *Interprétation d'une trace électron-muon typique provenant du détecteur SPEAR. Les deux leptons lourds se désintègrent à quelques millimètres du point de collision et ne sont pas directement visibles. Les neutrinos sont également invisibles. Seules les particules chargées* e *et* μ *sont détectées.*

L'hypothèse de Perl et de ses collaborateurs a été vérifiée par une nouvelle série d'observations sur plusieurs années. Peu à peu, il est apparu que le tau avait passé le test avec succès et qu'il remplissait ainsi toutes les conditions possibles pour être plus lourd que l'électron et le muon. Comme ces derniers, le tau possède également son propre neutrino, le neutrino tauique.

La loi de conservation de l'énergie annonce l'arrivée d'un neutrino

L'hypothèse du neutrino remontait à une quarantaine d'années. Le neutrino est « né » en tant que particule hypothétique dans une lettre écrite en 1930 par Wolfgang Pauli (prix Nobel 1945). À l'époque, on savait que de nombreux noyaux atomiques terminaient leur vie en émettant un électron. Ce processus, appelé désintégration bêta, causait de nombreux maux de tête aux chercheurs, notamment parce qu'une des lois sacrées de la physique, la loi de la conservation de l'énergie, semblait ne pas s'appliquer. Pour rétablir l'ordre dans le livre des lois de la physique, Pauli a proposé ce qu'il a appelé une « solution désespérée » : le noyau n'émettait pas l'électron seul. Il était accompagné d'une autre particule subatomique dépourvue de charge électrique et réagissant très peu avec son environnement. Cette petite particule, que l'on a appelée le neutrino, emportait avec elle une partie de l'énergie et disparaissait dans le néant sans laisser de trace. Le bilan énergétique s'avérait conforme aux prévisions si l'on tenait compte de ce que le neutrino emportait.

Pauli pensait avoir fait « une chose effrayante », comme il disait, en proposant une particule qui ne pourrait jamais être découverte. Il a fallu trois décennies et l'ingéniosité de Reines et Cowan pour que le neutrino soit mis en évidence.

La découverte du neutrino

L'hypothèse du neutrino de Pauli était peut-être « effrayante », mais elle était aussi extrêmement séduisante. Elle a permis de sauver la loi de conservation de l'énergie et de résoudre simultanément de nombreuses autres énigmes. L'hypothèse du neutrino a été utilisée de façon magistrale par Enrico Fermi (prix Nobel 1938) pour formuler une théorie sur l'une des forces de la nature, la force faible. Cette magnifique théorie a donné une grande crédibilité à l'hypothèse selon laquelle le neutrino

est créé en même temps que l'électron à chaque fois qu'un noyau se désintègre par désintégration bêta. Mais comment apporter la preuve irréfutable de l'existence du neutrino ? Les chercheurs Hans Bethe (prix Nobel 1967) et Rudolf Peierls avaient évalué la probabilité d'arrêter les neutrinos produits lors de la désintégration bêta des noyaux radioactifs et constaté qu'elle était si minime qu'il faudrait une cible de plusieurs années-lumière d'épaisseur pour détecter efficacement ces neutrinos. Lorsque les premiers réacteurs nucléaires ont été construits dans les années 1940, Fermi a été l'un de ceux qui ont réalisé que les réacteurs pouvaient servir de sources intenses de neutrinos. On estimait que les réacteurs pourraient produire un flux de neutrinos d'environ 10^{12} à 10^{13} par seconde et par cm^2. Ce flux était de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui obtenu à partir de sources radioactives.

En 1953, Reines et Cowan ont proposé une expérience de détection des neutrinos dans un réacteur. La réaction à étudier était la suivante :

$$\text{antineutrino} + \text{proton} \rightarrow \text{neutron} + \text{positron}.$$

Malgré la grande intensité des neutrinos produits par le réacteur, la vitesse de comptage prévue pour cette réaction était si faible que la tentative semblait à la limite de l'impossible. Reines et Cowan ont compris l'importance de détecter à la fois le neutron et le positron pour réduire le risque d'interprétation erronée. Après un premier essai au réacteur de Hanford, Reines et Cowan ont travaillé à l'usine de Savannah River.

La cible de l'expérience de Reines et Cowan était constituée d'environ 400 litres d'eau contenant du chlorure de cadmium placés entre de grands détecteurs à scintillation liquides. Le déroulement de la réaction recherchée était le suivant (voir la formule ci-dessus) : le neutrino entre en collision avec un proton dans l'eau et crée un positron et un neutron. Le positron est ralenti par l'eau ; il s'annihile avec un électron (la matière rencontre l'antimatière), ce qui crée deux photons (particules de lumière). Ceux-ci sont enregistrés simultanément dans les deux détecteurs (fig. 9). Le neutron perd également de la vitesse dans l'eau ; il est finalement capturé par un noyau de cadmium, ce qui entraîne l'émission de photons. Ces photons atteignent les détecteurs environ une microseconde plus tard que ceux provenant de la destruction du positron et apportent la preuve de la détection des neutrinos.

La faible vitesse de comptage et le bruit de fond élevé ont posé des problèmes. Au cours de l'expérience, seulement quelques événements

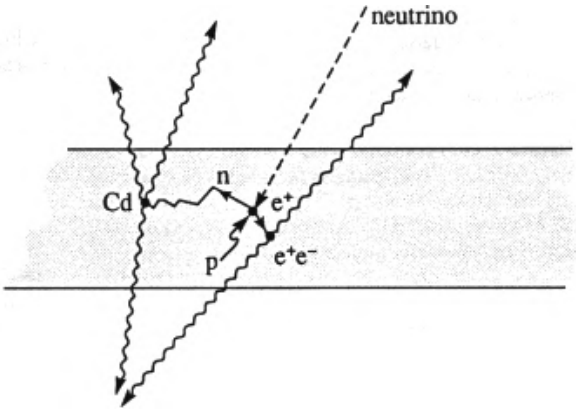


FIG. 9 – *Schéma du détecteur de neutrinos de Reines et Cowan (voir explication dans le texte).*

ont été enregistrés par heure. Néanmoins, Reines et Cowan ont réussi un exploit considéré comme à la limite de l'impossible : ils ont fait passer le neutrino du statut de produit de l'imagination à celui de particule libre.

Les lauréats

— Martin L. Perl, né en 1927 à New York, docteur en physique en 1955 de l'université Columbia ;
— Frederick Reines, né en 1918 à Paterson dans le New Jersey, docteur en physique en 1944 de l'université de New York.

La superfluidité de l'hélium 3

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1996 à David M. Lee, Douglas D. Osheroff et Robert C. Richardson

« pour leur découverte de la superfluidité de l'hélium 3 ».

Une percée dans la physique des basses températures

Lorsque la température baisse par une froide journée d'hiver, la vapeur d'eau devient de l'eau liquide et l'eau liquide devient de la glace. Ces transitions de phase et les changements d'état de la matière peuvent être grossièrement décrits et compris à l'aide de la physique classique. Lorsque la température baisse, le mouvement aléatoire lié à la chaleur dans les gaz, les liquides et les corps solides cesse. Mais la situation est tout à fait différente lorsque la température continue de baisser et s'approche du zéro absolu, soit −273,15 °C. Dans les échantillons d'hélium liquide, il se produit ce que l'on appelle la superfluidité, un phénomène qui ne peut être compris en termes de physique classique. Lorsqu'un liquide devient superfluide, ses atomes perdent soudain tout caractère aléatoire et se déplacent de manière coordonnée à chaque mouvement. Le liquide est alors dépourvu de tout frottement interne : il peut déborder d'une tasse, s'écouler par de très petits trous et présenter toute une série d'autres effets non classiques. La compréhension fondamentale des propriétés d'un tel liquide nécessite une forme avancée de physique quantique. Ces liquides très froids sont donc appelés liquides quantiques. En étudiant en détail les propriétés des liquides quantiques et en les comparant aux prédictions de la physique quantique à basse température, les chercheurs apportent des connaissances précieuses sur les bases de la description de la matière au niveau microscopique.

David M. Lee, Douglas D. Osheroff et Robert C. Richardson ont découvert au début des années 1970, dans le laboratoire de basses températures de l'université Cornell, qu'un isotope de l'hélium, l'hélium 3, pouvait devenir superfluide à une température d'environ deux millièmes de degré seulement au-dessus du zéro absolu. Ce liquide quantique superfluide est très différent de celui déjà découvert dans les années 1930 et étudié à une température d'environ deux degrés (c'est-à-dire

mille fois) plus élevée dans l'isotope normal de l'hélium, l'hélium 4. Le nouveau liquide quantique, l'hélium 3, présente des caractéristiques très particulières. Ces caractéristiques montrent notamment que les lois quantiques de la physique microscopique régissent parfois directement le comportement des corps macroscopiques.

Les isotopes de l'hélium

Dans la nature, l'hélium, gaz inerte, existe sous deux formes, ses isotopes, dont les propriétés sont fondamentalement différentes. L'hélium 4 est le plus courant, tandis que l'hélium 3 n'existe qu'en très faible quantité. L'hélium 4 possède un noyau composé de deux protons et de deux neutrons (le 4 représente le nombre total de nucléons, c'est-à-dire de protons et de neutrons). Le noyau est entouré d'une enveloppe électronique contenant deux électrons. Le fait que le nombre de particules constituant l'atome soit pair fait de l'hélium 4 ce que l'on appelle un boson. Le noyau de l'hélium 3 possède également deux protons, mais un seul neutron. Comme son enveloppe électronique comporte également deux électrons, l'hélium 3 est constitué d'un nombre impair de particules, ce qui en fait ce que l'on appelle un fermion. Comme les deux isotopes de l'hélium sont constitués d'un nombre différent de particules, des différences spectaculaires de comportement apparaissent lorsqu'ils sont refroidis à des températures proches du zéro absolu.

Les propriétés des isotopes

Les bosons tels que l'hélium 4 suivent la statistique de Bose-Einstein, ce qui signifie notamment que dans certaines circonstances ils se condensent dans l'état qui possède le moins d'énergie. Le processus de transition de phase dans lequel cela se produit est appelé « condensation de Bose-Einstein ». La première personne à avoir réussi à refroidir de l'hélium 4 à des températures si basses qu'il s'est liquéfié est Heike Kamerlingh Onnes (prix Nobel de physique 1913). Cela s'est produit au début des années 1900. Il remarqua déjà à l'époque que lorsque la température s'approchait du zéro absolu de moins de 2 degrés, il se passait quelque chose de particulier dans le liquide. Mais ce n'est qu'à la fin des années 1930 que Piotr Kapitsa (prix Nobel de physique 1978) a découvert expérimentalement le phénomène de superfluidité dans l'hélium 4, un phénomène d'abord expliqué schématiquement par Fritz London, puis en détail par Lev Landau (prix Nobel de

physique 1962). Les explications sont basées sur le fait que le liquide superfluide, qui apparaît lors d'une transition de phase alors que la température n'est que de 2,17 degrés au-dessus du zéro absolu, est une sorte de condensat de Bose-Einstein d'atomes d'hélium.

Les fermions tels que l'hélium 3 suivent la statistique de Fermi-Dirac et ne devraient pas être condensables dans l'état d'énergie le plus bas. C'est pourquoi la superfluidité ne devrait pas être possible dans l'hélium 3 qui, comme l'hélium 4, peut être liquéfié à une température de quelques degrés au-dessus du zéro absolu. Les fermions peuvent en fait être condensés, mais d'une manière plus compliquée. C'est ce que propose la théorie BCS de la supraconductivité dans les métaux, formulée par John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer (prix Nobel de physique 1972). Cette théorie repose sur le fait que les électrons sont des fermions (ils sont constitués d'une seule particule, un nombre impair) et qu'ils suivent donc la statistique de Fermi-Dirac, tout comme les atomes d'hélium 3. Mais dans les métaux fortement refroidis, les électrons peuvent se combiner par deux pour former ce que l'on appelle des paires de Cooper et se comporter alors comme des bosons. Ces paires peuvent former un condensat de Bose-Einstein. En partant de l'expérience de la superfluidité dans l'hélium 4 et de la supraconductivité dans les métaux, on s'attendait à ce que les fermions de l'hélium 3 liquide soient capables de former des paires de bosons et que la superfluidité puisse être obtenue dans des échantillons très froids d'hélium 3. Bien que de nombreux groupes de recherche aient travaillé sur le problème pendant des années, en particulier au cours des années 1960, aucun n'y est parvenu et beaucoup considéraient qu'il ne serait jamais possible d'atteindre la superfluidité dans l'hélium 3.

La découverte

Les chercheurs de l'université Cornell étaient des spécialistes des basses températures et avaient construit eux-mêmes leur appareil. Grâce à cet appareil, ils ont pu obtenir des températures si basses que l'échantillon se trouvait à quelques millièmes de degrés du zéro absolu. David Lee et Robert Richardson étaient les chercheurs principaux, tandis que Douglas Osheroff était un étudiant de troisième cycle dans l'équipe. En fait, ils recherchaient un phénomène différent : une transition de phase vers une sorte d'ordre magnétique dans la glace d'hélium 3. Pour trouver cette transition de phase, ils étudiaient la pression mesurée à l'intérieur de l'échantillon en fonction du temps pen-

dant que le volume était lentement augmenté puis réduit. C'est l'œil vigilant d'Osheroff qui a noté de petits sauts supplémentaires dans la courbe mesurée (fig. 7). Il est facile de considérer ces petites déviations comme des caractéristiques plus ou moins inexplicables de l'appareil, mais cet étudiant et ses collègues plus âgés ont acquis la conviction qu'il s'agissait d'un effet réel. Dans un premier rapport publié en 1972, le résultat a été interprété comme une transition de phase dans la glace d'hélium 3 solide qui peut également se former à ces basses températures. Mais comme l'interprétation ne correspondait pas exactement aux résultats des mesures, une série rapide de mesures supplémentaires a été entreprise. La même année, les chercheurs ont pu montrer dans une deuxième publication qu'il y avait en fait deux transitions de phase dans l'hélium 3 liquide. Cette découverte a marqué le début de recherches intensives sur le nouveau liquide quantique. Le théoricien Anthony Leggett a apporté une contribution particulièrement importante à l'interprétation de la découverte. Cette découverte revêt donc une grande importance pour notre connaissance de la manière dont les lois de la physique quantique, formulées pour des systèmes microscopiques, régissent parfois directement des systèmes macroscopiques.

La superfluidité dans l'hélium 3

Le fait que le nouveau liquide soit réellement superfluide a été confirmé peu après la découverte, notamment par une équipe de recherche dirigée par Olli Lounasmaa à l'université de technologie d'Helsinki. Ils ont mesuré l'amortissement d'une corde oscillante placée dans l'échantillon et ont constaté que l'amortissement diminuait d'un facteur mille lorsque le liquide environnant subissait la transition de phase vers le nouvel état. Cela montrait que le liquide était dépourvu de friction interne (c'est-à-dire de viscosité).

Des recherches ultérieures ont montré que l'hélium 3 possède au moins trois phases superfluides différentes, dont l'une n'apparaît que si l'échantillon est placé dans un champ magnétique. En tant que liquide quantique, l'hélium 3 présente donc une structure nettement plus complexe que l'hélium 4. Il est par exemple anisotrope, ce qui signifie qu'il a des propriétés différentes selon les directions de l'espace, ce qui ne se produit pas dans les liquides classiques mais ressemble davantage aux propriétés des cristaux liquides (voir le prix Nobel de physique 1991 décerné à Pierre-Gilles de Gennes).

Si un liquide superfluide est mis en rotation à une vitesse supérieure

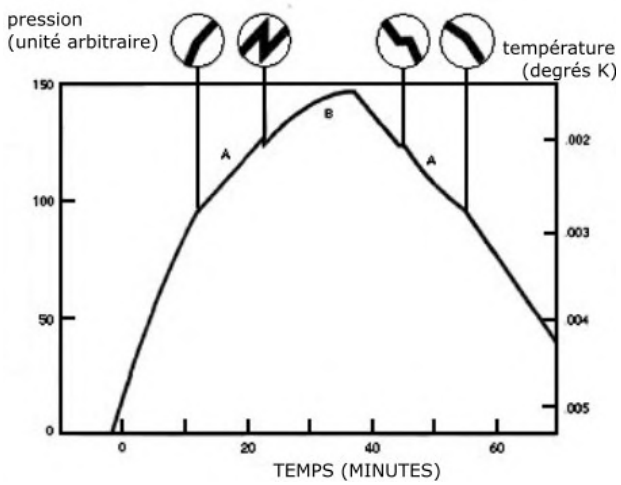


FIG. 10 – *La figure montre la pression à l'intérieur d'un échantillon contenant un mélange d'hélium 3 liquide et de glace d'hélium 3 solide. L'échantillon est d'abord soumis à une pression externe croissante pendant environ 40 minutes, puis la pression externe est réduite. Notez les changements de pente de la courbe en A et B et les températures auxquelles ils se produisent. Le graphique ressemble à celui publié par D. D. Osheroff, R. C. Richardson et D. M. Lee dans la revue* Physical Review Letters *en 1972, dans lequel les nouvelles transitions de phase de l'hélium 3 ont été signalées pour la première fois. La figure ci-dessus est tirée d'un article de N. D. Mermin et D. M. Lee paru dans la revue* Scientific American *en 1976.*

à une valeur critique, des tourbillons microscopiques apparaissent. Ce phénomène, également connu pour l'hélium 4 superfluide, a donné lieu à des recherches approfondies pour l'hélium 3, dont les tourbillons peuvent prendre des formes plus complexes. Des chercheurs finlandais ont mis au point une technique utilisant des fibres optiques pour observer directement comment les tourbillons affectent la surface de l'hélium 3 en rotation à des températures situées à un millième de degré seulement du zéro absolu.

Une application fascinante de la superfluidité de l'hélium 3

Les transitions de phase vers la superfluidité de l'hélium 3 ont récemment été utilisées par deux équipes de recherche pour tester une théorie concernant la formation de ce que l'on appelle les cordes cosmiques dans l'Univers. Ces immenses objets hypothétiques, dont on pense qu'ils ont pu jouer un rôle important dans la formation des galaxies, peuvent être la conséquence des transitions de phase rapides qui auraient eu lieu une fraction de seconde après le *Big Bang*. Les équipes de chercheurs ont utilisé des réactions nucléaires induites par des neutrinos pour chauffer localement et rapidement leurs échantillons d'hélium 3 superfluide. Lorsque ceux-ci ont été refroidis à nouveau, des boules de tourbillons se sont formées. Ce sont ces tourbillons qui sont supposés correspondre aux cordes cosmiques. Le résultat, qui ne doit pas être considéré comme une preuve de l'existence de cordes cosmiques dans l'Univers, est que la théorie testée semble être applicable à la formation de tourbillons dans l'hélium 3 superfluide.

Les lauréats

— David M. Lee, né en 1931 à Rye, dans l'État de New York, docteur en physique en 1959 de l'université Yale, professeur à l'université Cornell ;
— Douglas D. Osheroff, né en 1945 à Aberdeen, dans l'État de Washington, docteur en physique en 1973 de l'université Cornell, professeur à l'université Stanford en Californie ;
— Robert C. Richardson, né en 1937 à Washington, docteur en physique en 1966 de l'université Duke, professeur à l'université Cornell.

Refroidir et piéger les atomes

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 1997 à Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William D. Phillips

> « pour le développement de méthodes permettant de refroidir et de piéger les atomes avec la lumière laser ».

Atomes flottant dans une mélasse optique

À température ambiante, les atomes et les molécules qui composent l'air se déplacent dans différentes directions à une vitesse d'environ 4 000 km/h. Il est difficile d'étudier ces atomes et molécules, car ils disparaissent trop rapidement de la zone observée. En abaissant la température, on peut réduire la vitesse, mais le problème est que lorsque les gaz sont refroidis, ils se condensent d'abord sous forme liquide, puis gèlent sous forme solide. Dans les liquides et les solides, l'étude est rendue plus difficile par le fait que les atomes et les molécules sont trop proches les uns des autres. Toutefois, si le processus se déroule dans le vide, la densité peut être maintenue à un niveau suffisamment bas pour éviter la condensation et la congélation. Mais même une température aussi basse que −270 °C implique des vitesses d'environ 400 km/h. Ce n'est que lorsqu'on s'approche du zéro absolu (−273 °C) que la vitesse diminue fortement. Lorsque la température n'est que d'un millionième de degré (1 microkelvin ou 1 μK), les atomes d'hydrogène libres (par exemple) se déplacent à des vitesses inférieures à 1 km/h, soit 25 cm/s.

Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji et William D. Phillips ont mis au point des méthodes permettant d'utiliser la lumière laser pour refroidir des gaz jusqu'à des températures de l'ordre du microkelvin et pour maintenir les atomes refroidis flottants ou capturés dans différents types de « pièges à atomes ». La lumière laser fonctionne comme un liquide épais, appelé mélasse optique, dans lequel les atomes sont ralentis. Les atomes individuels peuvent être étudiés avec une très grande précision et leur structure interne peut être déterminée. Lorsque de plus en plus d'atomes sont capturés dans le même volume, un gaz subtil se forme, dont on peut étudier les propriétés en détail. Les nouvelles méthodes d'investigation mises au point par les lauréats du prix Nobel ont grandement contribué à améliorer notre connaissance de l'interaction entre

le rayonnement et la matière. Elles ont notamment ouvert la voie à une compréhension plus approfondie du comportement quantique des gaz à basse température. Les méthodes peuvent conduire à la conception d'horloges atomiques plus précises utilisées par exemple pour la navigation spatiale et la détermination exacte de la position. On a également commencé à concevoir des interféromètres atomiques qui permettent d'effectuer des mesures très précises des forces gravitationnelles, ainsi que des lasers atomiques qui pourraient être utilisés à l'avenir pour fabriquer des composants électroniques de très petite taille.

Ralentir les atomes avec des photons

La lumière peut être décrite comme un flux de particules, les photons. Les photons n'ont pas de masse au sens normal du terme mais, tout comme une pierre de curling [5] glissant sur la glace, ils ont une certaine quantité de mouvement. Une pierre de curling qui entre en collision avec une pierre identique peut transférer toute sa quantité de mouvement (masse multipliée par la vitesse) à cette pierre et devenir elle-même immobile. De même, un photon qui entre en collision avec un atome peut transférer toute sa quantité de mouvement à cet atome. Pour que cela se produise, le photon doit avoir la bonne énergie, ce qui revient à dire que la lumière doit avoir la bonne fréquence ou la bonne couleur. En effet, l'énergie du photon est proportionnelle à la fréquence de la lumière, qui détermine à son tour la couleur. La lumière rouge est ainsi constituée de photons moins énergétiques que ceux de la lumière bleue.

Ce qui détermine la bonne énergie pour que les photons puissent influencer les atomes, c'est la structure interne (les niveaux d'énergie) des atomes. Si un atome se déplace, les conditions changent en raison de ce que l'on appelle l'effet Doppler, le même effet qui donne au sifflet d'un train une tonalité plus aiguë lorsque le train s'approche que lorsqu'il est à l'arrêt. Si l'atome se déplace vers la lumière, celle-ci doit avoir une fréquence plus basse que celle requise pour un atome immobile afin d'être « entendue » par l'atome. Supposons que l'atome se déplace dans la direction opposée à la lumière à une vitesse considérable et qu'il soit frappé par un flux de photons. Si les photons ont la bonne énergie, l'atome pourra absorber l'un d'entre eux et prendre son énergie et sa quantité de mouvement. L'atome est alors quelque

5. NDT. Le curling est un sport sur glace, dont le but est de placer des pierres le plus près possible d'une cible circulaire dessinée sur la glace.

peu ralenti. Après un temps extrêmement court, de l'ordre d'un centmillionième de seconde, l'atome ralenti émet un photon. L'atome peut alors immédiatement absorber un nouveau photon du flux entrant. Le photon émis a également une quantité de mouvement, ce qui confère à l'atome une certaine vitesse de recul. Mais la direction du recul varie au hasard, de sorte qu'après de nombreuses absorptions et émissions, la vitesse de l'atome a considérablement diminué. Pour ralentir un atome, un faisceau laser intense est nécessaire. Dans de bonnes conditions, il est possible d'obtenir des effets d'une puissance correspondant à ce que l'on verrait si une balle était projetée vers le haut depuis la surface d'une planète dont la gravité est 100 000 fois celle de la Terre.

Refroidissement Doppler et mélasse optique

L'effet de ralentissement décrit ci-dessus constitue la base d'une méthode puissante de refroidissement des atomes par la lumière laser. Cette méthode a été mise au point vers 1985 par Steven Chu et ses collègues des laboratoires Bell à Holmdel, dans le New Jersey. Ils ont utilisé six faisceaux laser opposés par paires et disposés dans trois directions à angle droit. Les atomes de sodium provenant d'un faisceau dans le vide ont d'abord été arrêtés par un faisceau laser opposé, puis conduits à l'intersection des six faisceaux laser de refroidissement. La lumière des six faisceaux laser était légèrement décalée vers le rouge par rapport à la couleur caractéristique absorbée par un atome de sodium stationnaire. Ainsi, quelle que soit la direction dans laquelle les atomes de sodium tentaient de se déplacer, ils étaient accueillis par des photons de la bonne énergie et repoussés dans la zone d'intersection des six faisceaux laser. C'est alors que s'est formé ce qui, à l'œil nu, ressemblait à un nuage incandescent de la taille d'un petit pois, composé d'environ un million d'atomes refroidis. Ce type de refroidissement a été appelé « refroidissement Doppler ».

À l'intersection des faisceaux laser, les atomes se déplacent comme dans un liquide épais, d'où le nom de mélasse optique. Pour calculer la température des atomes refroidis dans la mélasse optique, on éteint les lasers. On a constaté que la température était d'environ 240 μK. Cela correspond à une vitesse des atomes de sodium d'environ 30 cm/s, ce qui correspond très bien à une température calculée théoriquement, la limite Doppler, considérée à l'époque comme la température la plus basse pouvant être atteinte par refroidissement Doppler.

Les atomes de l'expérience ci-dessus sont refroidis, mais pas cap-

turés. La gravité les fait tomber de la mélasse optique en une seconde environ. Pour capturer réellement les atomes, un piège est nécessaire. Un piège très efficace a été construit en 1987. Il s'agit d'un piège magnéto-optique. Il utilise six faisceaux laser dans le même type de réseau que dans l'expérience décrite ci-dessus, mais il comporte en plus deux bobines magnétiques qui produisent un champ magnétique légèrement variable avec un minimum dans la zone où les faisceaux se croisent. Comme le champ magnétique affecte les niveaux d'énergie caractéristiques des atomes (effet Zeeman), une force supérieure à la gravité se développe et attire les atomes au centre du piège. Les atomes sont alors réellement capturés et peuvent être étudiés ou utilisés pour des expériences.

La limite Doppler franchie

Au début des années 1980, William D. Phillips et ses collègues avaient déjà utilisé des champs magnétiques pour ralentir et arrêter complètement les atomes dans des faisceaux atomiques lents. Phillips avait mis au point ce que l'on appelait un ralentisseur Zeeman, une bobine avec un champ magnétique variable. Le long de son axe, les atomes pouvaient être ralentis par un faisceau laser opposé. Avec son dispositif, Phillips avait en 1985 arrêté et capturé des atomes de sodium dans un piège purement magnétique. Le confinement dans ce piège est cependant relativement faible, ce qui explique que les atomes qui s'y trouvent doivent être extrêmement froids pour y rester. Lorsque Chu a réussi à refroidir des atomes dans de la mélasse optique, Phillips a conçu une expérience similaire et a commencé une étude systématique de la température des atomes dans la mélasse. Il a mis au point plusieurs nouvelles méthodes de mesure de la température, dont l'une consiste à laisser tomber les atomes sous l'influence de la pesanteur, la courbe de leur chute étant déterminée à l'aide d'un laser de mesure.

Phillips a découvert en 1988 qu'on pouvait atteindre une température aussi basse que 40 μK. Cette valeur était six fois inférieure à la limite Doppler calculée théoriquement ! Il s'est avéré que la limite Doppler avait été calculée pour un modèle d'atome simplifié qui avait été considéré jusqu'alors comme suffisamment réaliste. Cependant, Claude Cohen-Tannoudji et ses collègues de l'École normale supérieure de Paris avaient déjà étudié dans des travaux théoriques des schémas de refroidissement plus compliqués. L'explication du résultat de Phillips réside dans la structure des niveaux d'énergie les plus bas de l'atome de

sodium. Ce qui se passe peut être comparé à Sisyphe faisant rouler sans cesse sa pierre sur la pente, mais découvrant dans ce cas que la pente au-delà de la crête est également une pente ascendante. Cette comparaison a conduit à appeler le processus « refroidissement Sisyphe ».

La vitesse de recul d'un atome lorsqu'il émet un seul photon correspond à une température appelée limite de recul. Pour les atomes de sodium, la limite de recul est de 2,4 μK et pour les atomes de césium, un peu plus lourds, d'environ 0,2 μK. En collaboration avec Cohen-Tannoudji et ses collègues parisiens, Phillips a montré que les atomes de césium pouvaient être refroidis dans une mélasse optique jusqu'à environ dix fois la limite de recul, c'est-à-dire jusqu'à environ 2 μK. Il est d'abord apparu que dans la mélasse optique, il n'était généralement possible d'atteindre des températures qu'environ dix fois supérieures à la limite de recul. Par la suite, Phillips et le groupe de Paris ont montré qu'avec des réglages laser appropriés, il est possible de piéger les atomes de manière à ce qu'ils se regroupent à intervalles réguliers dans l'espace, formant ainsi ce que l'on appelle un réseau optique. Les groupements d'atomes dans le réseau se produisent à des distances d'une longueur d'onde lumineuse les uns des autres. Les atomes d'un réseau optique peuvent, comme on l'a montré, être refroidis à une température environ cinq fois supérieure à la limite de recul.

La limite de recul est également dépassée

Si la vitesse de recul d'un atome avec un seul photon fixe une limite aux refroidissements Doppler et Sisyphe, c'est que même les atomes les plus lents sont continuellement contraints d'absorber et d'émettre des photons. Ces processus confèrent à l'atome une vitesse faible mais non négligeable et le gaz a donc une certaine température. Si l'on pouvait faire en sorte que les atomes les plus lents ignorent tous les photons dans la mélasse optique, on pourrait peut-être atteindre des températures plus basses. On connaissait déjà un mécanisme par lequel un atome stationnaire peut être amené à occuper un état « noir » dans lequel il n'absorbe pas de photons. Mais la difficulté était de combiner cette méthode avec le refroidissement par laser.

Claude Cohen-Tannoudji et son groupe ont développé entre 1988 et 1995 une méthode basée sur l'utilisation de l'effet Doppler qui transfère les atomes les plus lents dans un état noir. Ils ont montré que la méthode fonctionne en une, deux et trois dimensions. Toutes leurs expériences utilisent des atomes d'hélium, pour lesquels la limite de recul est de

4 μK. Dans la première expérience, deux faisceaux laser opposés ont été utilisés et une distribution de vitesse unidimensionnelle a été obtenue, qui correspondait à la moitié de la température limite de recul. Avec quatre faisceaux laser, une distribution bidimensionnelle de la vitesse a été obtenue, qui correspondait à une température de 0,25 μK, seize fois inférieure à la limite de recul. Enfin, avec six faisceaux laser, on a atteint un état dans lequel l'ensemble de la distribution de vitesse correspondait à une température de 0,18 μK. Dans ces conditions, les atomes d'hélium rampent à une vitesse d'environ 2 cm/s seulement !

Des applications à portée de main

Le refroidissement par laser et la capture d'atomes neutres font l'objet d'un développement intensif. Chu a notamment construit une fontaine atomique, dans laquelle des atomes refroidis par laser sont projetés d'un piège comme dans un jet d'eau. Lorsque les atomes tournent au sommet de leur trajectoire et recommencent à tomber, ils sont presque immobiles. Ils sont alors exposés à des impulsions de micro-ondes qui détectent la structure interne des atomes. Cette technique devrait permettre de construire des horloges atomiques d'une précision cent fois supérieure à la précision actuelle. La technique récompensée est également à la base de la découverte de la condensation de Bose-Einstein dans les gaz atomiques, un phénomène qui a suscité un grand intérêt.

Les lauréats

— Steven Chu, né en 1948 à Saint-Louis dans le Missouri, docteur en physique en 1976 de l'université de Californie à Berkeley, professeur à l'université Stanford depuis 1990 ;
— Claude Cohen-Tannoudji, né en 1933 à Constantine en Algérie, docteur en physique en 1962 de l'École normale supérieure de Paris, professeur au Collège de France depuis 1973 ;
— William D. Phillips, né en 1948 à Wilkes-Barre en Pennsylvanie, docteur en physique en 1976 de l'institut de technologie du Massachusetts, employé à l'Institut national des normes et de la technologie à Gaithersburg dans le Maryland.

Bibliographie

— Cohen-Tannoudji (Claude), *Leçon inaugurale faite le mardi 11 décembre 1973, Chaire de physique atomique et moléculaire*, Paris, Collège de France, 1974.
— Cohen-Tannoudji (Claude), *Sous le signe de la lumière*, Paris, Odile Jacob, 2019.
— Cohen-Tannoudji (Claude), Diu (Bernard) et Laloë (Franck), *Mécanique quantique*, tome I, nouvelle édition, Les Ulis, EDP Sciences, 2018.
— Cohen-Tannoudji (Claude), Diu (Bernard) et Laloë (Franck), *Mécanique quantique*, tome II, nouvelle édition, Les Ulis, EDP Sciences, 2018.
— Cohen-Tannoudji (Claude), Diu (Bernard) et Laloë (Franck), *Mécanique quantique*, tome III, Les Ulis, EDP Sciences, 2017.
— Cohen-Tannoudji (Claude), Dupont-Roc (Jacques) et Grynberg (Gilbert), *Processus d'interaction entre photons et atomes*, Les Ulis, EDP Sciences, 2001.
— Cohen-Tannoudji (Claude) et Guéry-Odelin (David), *Avancées en physique atomique : du pompage optique aux gaz quantiques* (trad. H. Perrin), Paris, Hermann, 2016.

Un fluide quantique avec des excitations de charge fractionnaire

L'Académie royale des sciences de Suède a décerné le prix Nobel de physique 1998 à Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer et Daniel C. Tsui

> « pour leur découverte d'une nouvelle forme de fluide quantique avec des excitations de charge fractionnaire ».

Les lauréats ont découvert que les électrons agissant ensemble dans des champs magnétiques puissants peuvent former de nouveaux types de « particules », avec des charges qui sont des fractions de la charge de l'électron.

Les électrons sous un nouveau jour

Horst L. Störmer et Daniel C. Tsui ont fait cette découverte en 1982 lors d'une expérience qui utilisait des champs magnétiques extrêmement puissants et des températures basses. Moins d'un an après la découverte, Robert B. Laughlin a réussi à expliquer leur résultat. Grâce à une analyse théorique, il a montré que les électrons dans un champ magnétique puissant peuvent se condenser pour former une sorte de fluide quantique apparenté aux fluides quantiques qui apparaissent dans la supraconductivité et dans l'hélium liquide. Ce qui rend ces fluides particulièrement importants pour les chercheurs, c'est que les événements qui se produisent dans une goutte de fluide quantique peuvent permettre de mieux comprendre la structure interne générale et la dynamique de la matière. Les contributions des trois lauréats ont donc permis une nouvelle percée dans notre compréhension de la physique quantique et le développement de nouveaux concepts théoriques importants dans de nombreuses branches de la physique moderne.

Les effets quantiques deviennent visibles

En 1879, Edwin H. Hall, alors jeune étudiant, a découvert un phénomène inattendu. Il a constaté que si une fine plaque d'or est placée dans un champ magnétique perpendiculaire à sa surface, un courant

électrique circulant le long de la plaque peut provoquer une différence de potentiel perpendiculaire à la fois au courant et au champ magnétique (figure 11). Ce phénomène, appelé effet Hall, est dû au fait que les particules chargées électriquement (dans ce cas, les électrons) qui se déplacent dans un champ magnétique sont influencées par une force et dévient latéralement. L'effet Hall peut être utilisé pour déterminer la densité des porteurs de charge (électrons négatifs ou trous positifs) dans les conducteurs et les semi-conducteurs. C'est devenu un outil standard dans les laboratoires de physique du monde entier.

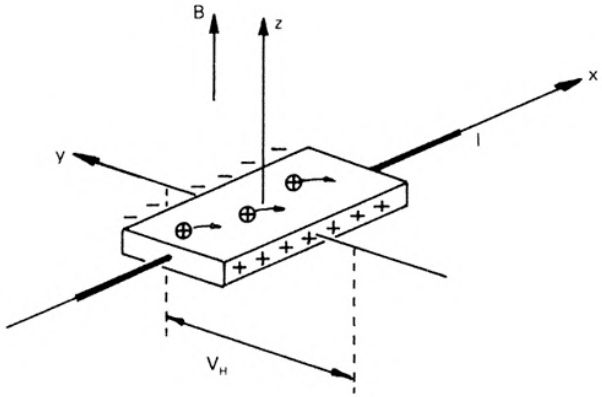


Fig. 11 – *Une tension* V *entraîne un courant* I *dans la direction des x positifs. La résistance ohmique normale est* V/I. *Un champ magnétique dans la direction des z positifs dévie les porteurs de charge positive dans la direction des y négatifs. Cela génère un potentiel de Hall* (V_H) *et une résistance de Hall* (V_H/I) *dans la direction y. [Kosmos, 1986]*

Hall a réalisé ses expériences à température ambiante et avec des champs magnétiques modérés de moins d'un tesla (1 T). À la fin des années 1970, les chercheurs ont utilisé des températures extrêmement basses (quelques degrés seulement au dessus du zéro absolu, soit environ −272 °C) et des champs magnétiques très puissants (avec un maximum d'environ 30 T). Ils ont étudié l'effet Hall dans le type de semiconducteur utilisé dans l'industrie électronique pour fabriquer des transistors à faible bruit. Le matériau contient des électrons qui, bien que piégés près d'une surface interne séparant deux parties distinctes du matériau, sont très mobiles le long de la surface.

Dans une telle couche, les électrons peuvent à basse température

être amenés à se déplacer comme sur une surface plane, c'est-à-dire en deux dimensions seulement. Cette limitation géométrique entraîne de nombreux effets inattendus. L'un d'eux est que l'effet Hall change de nature. On le constate très simplement en mesurant la variation de la résistance de Hall en fonction de l'intensité du champ magnétique appliqué.

En 1980, le physicien allemand Klaus von Klitzing a découvert, lors d'une expérience similaire, que la résistance de Hall ne varie pas de façon linéaire mais « par paliers » avec l'intensité du champ magnétique (figure 12). Les paliers se produisent à des valeurs de résistance qui ne dépendent pas des propriétés du matériau, mais qui sont donnés par une combinaison de constantes physiques fondamentales divisée par un nombre entier. On dit que la résistance est quantifiée. Aux valeurs quantifiées de la résistance de Hall, la résistance ohmique normale disparaît et le matériau devient en quelque sorte supraconducteur.

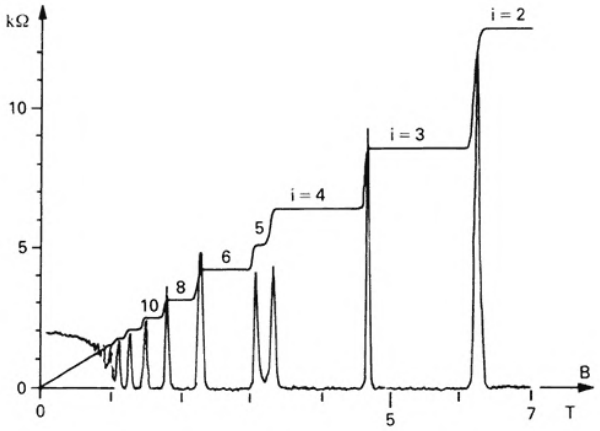


FIG. 12 – *La résistance de Hall varie par paliers en fonction du champ magnétique* B. *La hauteur du palier est donnée par la constante physique* h/e^2 *(valeur approximative de 25 kilo-ohms) divisée par un nombre entier* i. *La figure montre des paliers pour* $i = 2, 3, 4, 5, 6, 8$ *et 10. Cet effet a donné lieu à une nouvelle norme internationale pour la résistance. Depuis 1990, celle-ci est représentée par l'unité 1 klitzing, définie comme la résistance de Hall au quatrième échelon* ($h/4e^2$). *La courbe inférieure représente la résistance ohmique, qui s'annule à chaque palier. [Kosmos, 1986]*

Pour la découverte de ce que l'on appelle l'effet Hall quantique entier, Klitzing a reçu le prix Nobel de physique en 1985. L'effet peut être compris à partir des lois de la physique quantique sur le comportement des électrons individuels dans des champs magnétiques puissants. En termes simples, les électrons ne se déplacent que sur certaines trajectoires circulaires, dont les dimensions de base sont déterminées par le champ magnétique. Les différents paliers montrent combien de trajectoires, parmi les plus petites, sont entièrement remplies d'électrons.

Dans leurs études expérimentales affinées de l'effet Hall quantique, qui utilisaient notamment des températures plus basses et des champs magnétiques plus puissants, Störmer, Tsui et leurs collaborateurs ont trouvé à leur grande surprise un nouveau palier dans la résistance de Hall qui était trois fois plus élevé que le palier le plus élevé de Klitzing. Par la suite, ils ont trouvé de plus en plus de nouveaux paliers, à la fois au-dessus et entre les nombres entiers. Toutes les hauteurs des nouveaux paliers peuvent être exprimées à l'aide de la même constante que précédemment, mais divisée par différentes fractions. C'est pourquoi cette nouvelle découverte a été baptisée « effet Hall quantique fractionnaire ». Elle a constitué un grand mystère pour les chercheurs qui n'ont pas pu expliquer les raisons de l'apparition de ces nouveaux paliers.

Un nouveau type de fluide quantique

Un an après la découverte de l'effet Hall quantique fractionnaire, Laughlin a proposé une explication théorique. Selon sa théorie, la basse température et le puissant champ magnétique obligent le gaz d'électrons à se condenser pour former un nouveau type de fluide quantique. Les électrons étant les plus réticents à se condenser (ce sont des fermions), ils se combinent d'abord, en quelque sorte, avec les « quanta de flux » du champ magnétique. Lors des premières étapes découvertes par Störmer et Tsui, les électrons capturent chacun trois quanta de flux, formant ainsi une sorte de particule composite ne s'opposant pas à la condensation (ils deviennent ce que l'on appelle des bosons).

Des fluides quantiques ont déjà été observés à très basse température dans l'hélium liquide (prix Nobel 1962 à Landau, 1978 à Kapitsa, 1996 à Lee, Osheroff et Richardson) et dans les supraconducteurs (prix Nobel 1913 à Kamerlingh Onnes, 1972 à Bardeen, Cooper et Schrieffer, 1987 à Bednorz et Müller). Les fluides quantiques ont certaines propriétés en commun, comme la superfluidité, mais ils présentent également d'importantes différences de comportement. Certains, comme le fluide

de Laughlin, sont constitués de particules composites.

Outre sa superfluidité, qui explique la disparition de la résistance ohmique aux paliers de la résistance de Hall, le nouveau fluide quantique proposé par Laughlin possède de nombreuses propriétés inhabituelles. L'une des plus remarquables est que si l'on ajoute un électron, le fluide sera affecté (excité) et un certain nombre de « quasiparticules » de charge fractionnaire seront créées. Ces quasiparticules ne sont pas des particules au sens normal du terme, mais le résultat de la danse commune des électrons dans le fluide quantique. Laughlin a été le premier à montrer que les quasiparticules ont précisément la charge fractionnelle correcte pour expliquer les résultats de Störmer et Tsui. Des mesures ultérieures ont mis en évidence des paliers de charges fractionnaires de plus en plus nombreux dans l'effet Hall (figure 13). Le fluide quantique de Laughlin s'est avéré capable d'expliquer tous les paliers découverts expérimentalement.

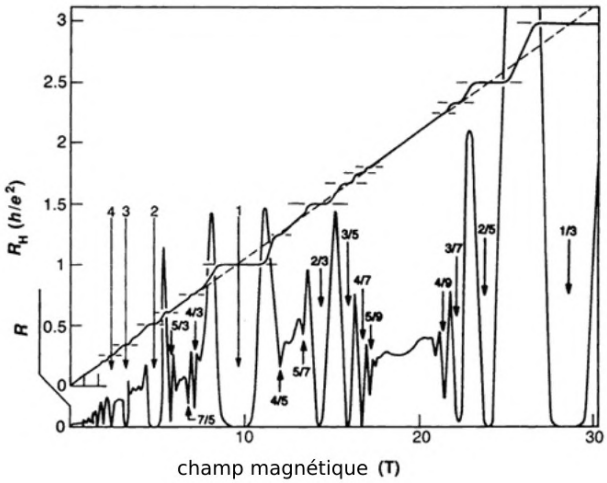


FIG. 13 – *La ligne diagonale en pointillé représente la résistance de Hall classique et la courbe diagonale en escalier les résultats expérimentaux. Les champs magnétiques à l'origine des paliers sont marqués par des flèches. Notez en particulier le palier découvert pour la première fois par Störmer et Tsui (1/3) à la valeur la plus élevée du champ magnétique et les paliers découverts précédemment par Klitzing (nombres entiers) avec un champ magnétique plus faible. [Science, 1990]*

Le nouveau fluide quantique résiste fortement à la compression ; on dit qu'il est incompressible. En effet, il réagit à la compression en formant davantage de quasiparticules, ce qui coûte de l'énergie.

Mise en évidence directe des quasiparticules

La découverte et l'explication de l'effet Hall quantique fractionnaire en 1982-1983 peuvent être considérées comme une mise en évidence indirecte du nouveau fluide quantique et de ses quasiparticules chargées fractionnairement. Plusieurs groupes de recherche ont récemment réussi à observer directement ces nouvelles particules. Cela s'est produit par exemple dans des expériences où de très petites variations d'un courant ont pu être attribuées à des quasiparticules individuelles circulant dans le circuit. Ces mesures, comparables à la distinction du son des grêlons lors d'une tempête de grêle et à la détermination qu'ils ne représentent qu'une fraction de leur taille normale, ont été rendues possibles par l'évolution étonnante de la microélectronique depuis que les trois lauréats de 1998 ont apporté leurs contributions pionnières. Les mesures peuvent être considérées comme la vérification concluante de leurs découvertes.

Les lauréats

— Robert B. Laughlin, né en 1950 à Visalia en Californie, docteur en physique en 1979 de l'institut de technologie du Massachusetts, professeur de physique à l'université Stanford depuis 1989 ;
— Horst L. Störmer, né en 1949 à Francfort-sur-le-Main, docteur en physique en 1977 de l'université de Stuttgart, directeur du laboratoire de recherche en physique des laboratoires Bell de 1992 à 1997, professeur à l'université Columbia et directeur adjoint de la physique aux laboratoires Bell de la société Lucent Technologies depuis 1998 ;
— Daniel C. Tsui, né en 1939 dans la province du Henan en Chine, docteur en physique en 1967 à l'université de Chicago, professeur à l'université de Princeton depuis 1982.

La structure quantique de l'interaction électrofaible

L'Académie royale des sciences de Suède a attribué le prix Nobel de physique de l'année 1999 à Gerardus 't Hooft et Martinus J. G. Veltman

> « pour l'élucidation de la structure quantique des interactions électrofaibles ».

Les lauréats ont fourni à la physique des particules une base mathématique plus solide. Il ont notamment montré comment utiliser la théorie pour préciser les calculs de grandeurs physiques mesurables. Des expériences dans les accélérateurs de particules en Europe et aux États-Unis ont récemment confirmé de nombreux résultats de ces calculs.

Les objets de notre environnement quotidien sont tous constitués d'atomes, eux-mêmes constitués d'électrons et de noyaux atomiques. Ces derniers sont à leur tour composés de protons et de neutrons, eux-mêmes constitués de quarks. L'étude de la matière au niveau de ces éléments internes exige des accélérateurs puissants. Les premiers remontent aux années 1950 et marquent la naissance de la physique des particules moderne. Pour la première fois, les chercheurs réussirent alors à provoquer, sous une forme contrôlée, des collisions de particules atomiques hautement énergétiques. C'est ainsi que les physiciens observèrent l'apparition de nouvelles particules et identifièrent les forces qui agissent entre elles.

C'est aussi dans les années 1950 que fut formulée une première version de la théorie moderne qui, après de nombreuses années de perfectionnement, a finalement donné naissance au modèle standard de la physique des particules. Selon ce modèle, toutes les particules élémentaires, regroupées dans trois familles de quarks et de leptons, interagissent à l'aide d'un certain nombre de particules médiatrices pour les forces forte et électrofaible (figure 14).

La base théorique du modèle standard était initialement incomplète du point de vue mathématique et il n'était même pas certain qu'elle fût applicable à des calculs détaillés sur des grandeurs physiques mesurables. Gerardus 't Hooft et Martinus J. G. Veltman ont été récompensés par le prix Nobel 1999 pour avoir fourni à cette théorie mathématique une base plus solide. Les chercheurs disposent désormais d'un

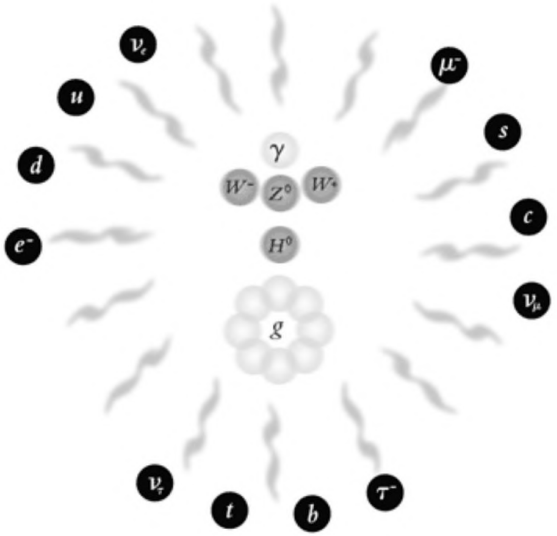


FIG. 14 – *Les particules fondamentales de la matière sont les six leptons et les six quarks. Dans le modèle standard de la physique des particules, les forces entre ces éléments sont décrites par des théories quantiques des champs qui toutes sont des théories de jauge non abéliennes. Selon celles-ci, les forces électrofaibles sont transmises par quatre particules médiatrices : le photon de masse nulle (gamma) et les trois particules lourdes* W^+, W^- *et* Z^0. *La force forte est transmise par huit « gluons » g de masse nulle. En plus de ces douze particules médiatrices, la théorie prédit également l'existence d'une particule de champ très lourde, le boson de Higgs* H^0, *dont le champ engendre toutes les masses des particules.*

édifice théorique qui peut leur servir notamment à prédire les propriétés des nouvelles particules.

Une nouvelle dénomination d'une ancienne théorie

Les modèles théoriques modernes exploités dans le modèle standard de la physique des particules et qui décrivent l'interaction entre les particules sont appelés « théories de jauge ». Le mot « jauge » définit une propriété spécifique de ces théories, la symétrie de jauge, considérée par de nombreux chercheurs comme l'une des propriétés les plus fondamentales de la physique. Dès les années 1860, l'Écossais James Clerk Maxwell avait formulé une théorie applicable à l'électromagnétisme, qui selon la terminologie moderne est une théorie de jauge. Sa théorie, encore valable de nos jours, unifiait l'électricité au magnétisme et prédisait entre autres l'existence d'ondes hertziennes.

Il est possible d'illustrer le concept de la symétrie de jauge de la façon suivante : les champs électriques et magnétiques peuvent être exprimés à l'aide de fonctions potentielles. Celles-ci peuvent être changées (c'est-à-dire subir une transformation de jauge) selon un certain modèle sans provoquer la modification du champ. La transformation la plus simple consiste à additionner une constante au potentiel électrique. Pour les grandeurs physiques mesurables, ceci illustre une loi bien connue. Il est possible de calculer le potentiel électrique à partir d'un point zéro de l'espace-temps choisi arbitrairement : on change le potentiel de jauge sans que le champ ne subisse la moindre modification. C'est ce qui explique qu'un écureuil puisse se promener sur une ligne à haute tension, sans risquer d'être électrocuté ! Pour les physiciens, le fait que le point zéro puisse être déplacé de la sorte illustre une symétrie dans la théorie : la symétrie de jauge.

Lorsque l'on effectue deux transformations de jauge successivement, l'ordre dans lequel elles sont réalisées n'a aucune importance. L'interprétation généralement donnée à ce phénomène est que l'électromagnétisme est une théorie de jauge abélienne, du nom du mathématicien Niels Henrik Abel (1802-1829). Les rotations dans le plan sont un exemple simple de transformations abéliennes. Essayons de l'illustrer à l'aide d'un crayon (fig. 15) !

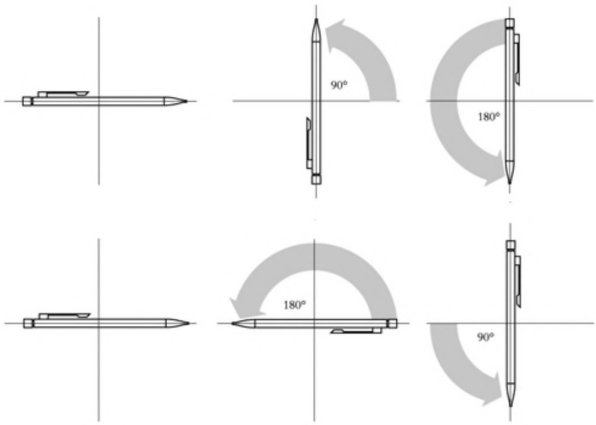


FIG. 15 – *Les rotations dans un plan bidimensionnel constituent un exemple de groupe abélien de transformations. En haut : posons un crayon sur une table, faisons-lui d'abord effectuer une rotation de 90°, puis une rotation de 180° dans le même sens. En bas : inversons maintenant l'ordre des rotations, en faisant effectuer au crayon d'abord une rotation de 180° puis une rotation de 90°.*

La mécanique quantique pose des problèmes

Dès que la mécanique quantique fut formulée autour de 1925, les chercheurs entreprirent d'associer les fonctions ondulatoires de la mécanique quantique et le champ électromagnétique dans une théorie quantique des champs. Mais les chercheurs se heurtèrent à des difficultés ! La nouvelle électrodynamique quantique se révélait complexe et quand on effectuait des calculs, les résultats obtenus étaient absurdes. Ceci était en partie dû à la théorie quantique qui prédit que le champ électromagnétique proche d'un électron ou d'un proton, par exemple, peut spontanément engendrer des myriades de paires de particules et d'antiparticules de longévité très brève, les particules virtuelles (fig. 16). Un système constitué d'un seul électron devenait subitement un problème relevant d'une multitude de particules.

Ce problème fut résolu dans les années 1940 par Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et Richard P. Feynman (qui obtinrent le prix Nobel en 1965 pour leurs travaux). La méthode développée par ces trois chercheurs s'appelle « renormalisation ». En simplifiant, on peut

dire que cette approche consiste à observer les particules individuelles « à une certaine distance ». Ainsi, il n'est pas nécessaire de considérer les paires de particules virtuelles individuellement : il suffit de laisser le « nuage » formé de paires de particules virtuelles ombrager la particule centrale initiale. Ainsi, celle-ci se caractérise, entre autres, par une nouvelle charge et une nouvelle masse. En utilisant la terminologie moderne, on peut dire que Tomonaga, Schwinger et Feynman renormalisèrent une théorie de jauge abélienne.

Ces derniers temps, les chercheurs ont testé l'électrodynamique quantique sur des grandeurs physiques mesurables avec une précision plus grande que pour toute autre théorie. Par exemple, Hans Dehmelt (prix Nobel de physique 1989) a réussi à mesurer dans un piège ionique le magnétisme de l'électron avec une précision de 12 chiffres. Les chercheurs ont comparé les 10 premiers chiffres aux résultats des calculs : la concordance était parfaite !

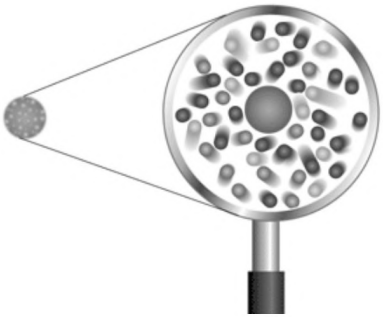


FIG. 16 – *Selon le théorie quantique des champs, une particule physique réelle se compose d'une particule centrale « nue », enrobée d'un manteau nuageux de « particules virtuelles » de longévité très brève.*

Unification des interactions électromagnétique et faible

La découverte et l'étude de la radioactivité, relayées par l'évolution de la physique nucléaire au cours de la première moitié du XX^{e} siècle, donnèrent naissance aux notions d'interaction forte et faible. Pour les expliquer de façon très simplifiée, on peut dire que l'interaction forte retient ensemble les éléments du noyau atomique alors que l'interaction

faible permet la désintégration radioactive de certains d'entre eux. Dans les années 1930 déjà, les chercheurs formulèrent une première théorie quantique des champs pour l'interaction faible. Ce modèle théorique se heurta à des difficultés encore plus sérieuses que celles qu'avait connu l'électrodynamique quantique. Pas même la méthode de renormalisation développée par Tomonaga, Schwinger et Feynman ne pouvait les surmonter.

Mais au milieu des années 50, plusieurs chercheurs formulèrent un premier exemple de théorie quantique des champs présentant de nouvelles propriétés : une théorie de jauge non abélienne. À la différence de la variante abélienne, selon laquelle les transformations de jauge peuvent être réalisées indépendamment de leur ordre, les résultats de la théorie non abélienne dépendent de cet ordre. Ceci confère à la théorie une structure mathématique plus complexe, mais ouvre par ailleurs de nouvelles perspectives. Les rotations dans l'espace sont un exemple simple de transformations non abéliennes (fig. 17).

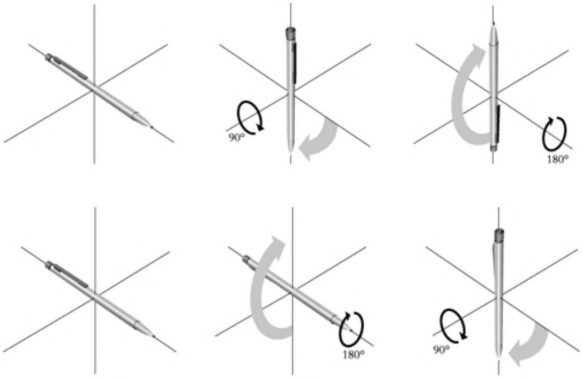


Fig. 17 – *Les rotations dans l'espace tridimensionnel constituent un exemple de groupe non abélien de transformations. En haut : tenons d'abord un crayon à l'horizontale pointant vers la droite ; effectuons ensuite une rotation de 90° de sorte qu'il pointe vers le sol ; tournons-le enfin de 180° afin qu'il pointe vers le haut. En bas : inversons maintenant l'ordre des rotations ; effectuons d'abord la rotation à 180° (ce qui ne change pas la direction de la pointe mais provoque la rotation du crayon d'un demi-tour sur lui-même), puis effectuons la rotation à 90° (le crayon pointe alors vers le sol). Le résultat est tout à fait différent !*

Il fallut attendre les années 1960 pour que les nouvelles possibilités offertes par la théorie soient pleinement exploitées. Plusieurs équipes de chercheurs contribuèrent alors au développement d'une théorie de jauge non abélienne qui combine l'interaction électromagnétique et l'interaction faible en une interaction électrofaible (prix Nobel 1979 attribué à Sheldon H. Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg). Cette théorie quantique des champs prédisait notamment l'existence des nouvelles particules W et Z. Ces dernières furent mises en évidence en 1983 au CERN, le laboratoire d'accélération de particules à Genève (prix Nobel 1984 décerné à Carlo Rubbia et Simon van der Meer).

L'histoire se répète

La théorie de l'interaction électrofaible développée pendant les années 1960 constituait certainement un grand pas en avant, mais la communauté scientifique l'accepta difficilement dans un premier temps. Lorsqu'elle tentait de l'utiliser pour effectuer des calculs plus précis des propriétés des nouvelles particules W et Z (ainsi que de nombreuses autres grandeurs physiques mesurables), les chercheurs obtenaient des résultats absurdes. Cette situation rappelait celle des années trente, avant que Tomonoga, Schwinger et Feynman ne réussissent à renormaliser l'électrodynamique quantique. De nombreux chercheurs exprimaient leur pessimisme sur les perspectives offertes par cette théorie.

Martinus J. G. Veltman faisait partie des physiciens qui espéraient encore réussir à renormaliser les théories de jauge non abéliennes. À la fin des années soixante, il venait d'être nommé professeur à l'université d'Utrecht. Veltman avait élaboré un logiciel, Schoonschip, qui effectuait symboliquement les simplifications algébriques d'expressions complexes engendrées par toutes les théories quantiques des champs lorsque l'on entreprenait des calculs quantitatifs. Vingt ans auparavant, Feynman avait bien systématisé le problème des calculs et introduit les diagrammes dits de Feynman, très vite adoptés par le monde des chercheurs. Mais à cette époque, les ordinateurs n'existaient pas. Veltman était pleinement convaincu qu'il trouverait un moyen d'effectuer la renormalisation. Son logiciel constituait une pierre angulaire dans le vaste travail consistant à tester les différentes idées.

Au printemps 1969, Veltman accueillit un nouvel élève de 22 ans nommé Gerardus 't Hooft, qui avait exprimé le désir d'étudier la physique des hautes énergies. Après avoir rédigé un premier mémoire, 't Hooft fut admis à préparer sa thèse de doctorat en automne de

la même année. Sa tâche consistait à participer à la recherche d'une méthode pour réaliser la renormalisation des théories de jauge non abéliennes. Il réussit au-delà de toute espérances et publia dès 1971 deux articles représentant une percée dans ce programme de recherche.

À l'aide du logiciel de Veltman, la vérification des résultats partiels de 't Hooft fut possible et ils développèrent ensemble une méthode de calcul détaillée fonctionnelle. Ainsi, la théorie de jauge non abélienne de l'interaction électrofaible devenait maintenant un édifice théorique utilisable, qui allait permettre d'effectuer des calculs précis, tout comme pour l'électrodynamique quantique vingt ans auparavant.

Vérification des postulats théoriques

Ainsi qu'il a été décrit ci-dessus, la théorie électrofaible prédisait dès son origine l'existence des nouvelles particules W et Z. Mais les travaux de Veltman et de 't Hooft ouvrirent la voie à des calculs de grandeurs physiques plus précises dans lesquelles les propriétés de W et Z jouaient un rôle. Dans l'accélérateur LEP du CERN, les scientifiques créent depuis une dizaine d'années d'importantes quantités de particules W et Z dans des conditions contrôlables. Les comparaisons entre les mesures et les calculs ont constamment montré une grande concordance, confirmant ainsi les postulats théoriques.

Une quantité particulière se laissait appréhender par la méthode de calcul de Veltman et de 't Hooft à partir des résultats obtenus au LEP : la masse du quark t (*top*, « dessus »), le plus lourd des deux quarks appartenant à la troisième famille du modèle standard. Ce quark fut directement identifié pour la première fois en 1995 au laboratoire Fermi aux États-Unis, mais sa masse avait était prédite déjà plusieurs années auparavant. Là encore, la concordance entre l'expérience et la théorie donna satisfaction.

À quand la prochaine grande découverte ?

Un élément important de l'édifice théorique élaborée par Veltman et 't Hooft est une particule non encore identifiée, baptisée boson de Higgs (fig. 14). Tout comme pour d'autres particules dont l'existence a été prédite par des arguments théoriques puis qui ont été identifiées expérimentalement, les chercheurs attendent maintenant l'observation directe du boson de Higgs. Par des calculs comparables à ceux effectués pour déterminer la masse du quark t, on sait qu'il y a une certaine chance

pour que l'un des accélérateurs existants produisent quelques bosons de Higgs. Mais le LHC (Grand collisionneur de hadrons) du CERN, le seul accélérateur suffisamment puissant pour permettre l'étude détaillée de la particule est actuellement en construction. Alors les chercheurs devront faire preuve d'un peu de patience, car sa mise en service n'est prévue que pour l'an 2005 !

Les lauréats

— Gerardus 't Hooft, né en 1946 à Den Helder aux Pays-Bas, docteur en physique en 1972 de l'université d'Utrecht, professeur de physique dans cette université depuis 1977 ;
— Martinus J. G. Veltman, né en 1931 aux Pays-Bas, docteur en physique en 1963 de l'université d'Utrecht, professeur de physique dans cette université de 1966 à 1981 puis à l'université du Michigan à Ann Arbor à partir de 1981 (désormais retraité).

Physique et technologie de l'information

L'Académie royale des sciences de Suède a décerné le prix Nobel de physique de l'année 2000 pour des travaux fondamentaux sur les technologies de l'information et de la communication. Une moitié du prix revient à Jaurès I. Alferov, de l'institut physico-technique A. F. Ioffe de Saint-Pétersbourg, et à Herbert Kroemer, de l'université de Californie à Santa Barbara,

> « pour le développement d'hétérostructures semi-conductrices utilisables en électronique rapide et en optoélectronique ».

L'autre moitié du prix revient à Jack S. Kilby, de la société Texas Instruments à Dallas,

> « pour sa participation à l'invention du circuit intégré ».

Les technologies de l'information, qui comprennent la technologie des ordinateurs et la technologie des télécommunications, ont radicalement changé notre société en quelques décennies. Derrière cette évolution se cache un développement scientifique et technique très avancé, issu en grande partie d'inventions scientifiques fondamentales dans le domaine de la physique.

Le développement rapide de la technologie des ordinateurs a réellement commencé avec l'invention du circuit intégré vers 1960 et du microprocesseur dans les années 1970, lorsque le nombre de composants sur une puce est devenu suffisamment important pour permettre la création d'un microordinateur complet. L'augmentation rapide du nombre de composants a été prédite par la « loi de Moore » : le nombre de composants sur une puce double tous les dix-huit mois. C'est ce qui s'est produit depuis les années 1960 et on trouve aujourd'hui des puces comportant des millions de composants distincts, à des prix pratiquement inchangés.

Le développement des puces s'est accompagné d'une évolution tout aussi dynamique et puissante de la technologie des télécommunications. Tout comme le circuit intégré a été et est toujours un élément moteur de la technologie des ordinateurs, les transistors ultra-rapides et les lasers à semi-conducteurs basés sur des hétérostructures de semi-conducteurs jouent un rôle décisif dans les télécommunications modernes.

Les hétérostructures dans les téléphones portables, les lecteurs de CD, les lecteurs de codes-barres, les feux de freinage, etc.

Les composants électroniques sont généralement constitués de semi-conducteurs, c'est-à-dire d'un matériau qui se situe entre un conducteur et un isolant. La bande interdite permet de déterminer si un semi-conducteur ressemble plus à un conducteur ou à un isolant. Il s'agit de la quantité d'énergie nécessaire pour produire des porteurs de charge mobiles sous la forme d'électrons et de « trous ».

La plupart des composants semi-conducteurs sont en silicium, mais les semi-conducteurs composites de type arséniure de gallium prennent de plus en plus d'importance. Un semi-conducteur composé de plusieurs couches minces présentant des bandes interdites différentes est appelé « hétérostructure semi-conductrice ». Les couches peuvent avoir une épaisseur variant de quelques couches atomiques à des micromètres et peuvent être constituées d'arséniure de gallium (GaAs) ou d'arséniure de gallium et d'aluminium (AlGaAs). Les couches sont généralement choisies de manière à ce que leurs structures cristallines s'adaptent l'une à l'autre et que les porteurs de charge puissent se déplacer presque librement à l'interface. C'est cette propriété des hétérostructures qui peut être exploitée de différentes manières.

Les hétérostructures sont très importantes dans la technologie. Les amplificateurs haute fréquence à faible bruit utilisant des hétéro-transistors sont employés dans les communications par satellite et pour améliorer le rapport signal/bruit dans la téléphonie mobile. Les lasers à semi-conducteurs à base d'hétérostructures sont utilisés dans les communications par fibre optique, dans le stockage optique de données, comme têtes de lecture dans les lecteurs de CD, comme lecteurs de codes-barres et marqueurs laser, etc. Les diodes électroluminescentes à base d'hétérostructures sont utilisées dans les feux de freinage des voitures et d'autres signaux d'avertissement et pourraient un jour remplacer les ampoules électriques.

Les hétérostructures ont également joué un rôle important dans la recherche scientifique. Les propriétés de ce que l'on appelle un gaz d'électrons bidimensionnel formé dans la couche d'interface entre les semi-conducteurs ont été le point de départ de l'étude de l'effet Hall quantique (prix Nobel de physique en 1985 à Klaus von Klitzing et en 1998 à Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer et Daniel C. Tsui). La conductance quantifiée a également été étudiée dans des canaux

unidimensionnels et des contacts de pointe, des atomes et molécules artificiels des « boîtes quantiques » avec un nombre limité d'électrons de conduction libres enfermés dans de très petits espaces, des composants à un électron, etc.

Le transistor à hétérostructure

La première proposition élaborée de transistor à hétérostructure a été publiée en 1957 par Herbert Kroemer, qui travaillait alors à la RCA (*Radio Corporation of America*) à Princeton. Ses travaux théoriques ont montré qu'un transistor à hétérostructure peut être supérieur à un transistor conventionnel, en particulier pour l'amplification du courant et les applications à haute fréquence. On a mesuré une fréquence allant jusqu'à 600 GHz dans un transistor à hétérostructure, soit environ 100 fois plus que les meilleurs transistors ordinaires. En outre, le bruit est faible dans les amplificateurs basés sur ces composants.

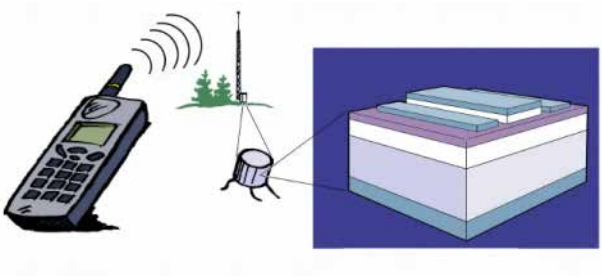


FIG. 18 – *Les transistors rapides des stations de base des téléphones portables comportent des hétérostructures semi-conductrices.*

Le laser à hétérostructure

Les hétérostructures ont joué un rôle crucial dans le développement des lasers à semi-conducteurs. Jaurès I. Alferov, de l'institut Ioffe à l'Académie des sciences de Russie dans ce qui était alors Léningrad, et Herbert Kroemer, alors chez Varian à Palo Alto, ont proposé en 1963 indépendamment l'un de l'autre le principe du laser à hétérostructure, une invention qui est probablement aussi importante que celle du transistor à hétérostructure.

Alferov a été le premier à réussir à produire une hétérostructure adaptée à un réseau (AlGaAs/GaAs, 1969) avec des frontières claires entre les couches. L'équipe de recherche d'Alferov a réussi à développer rapidement de nombreux types de composants constitués d'hétérostructures, y compris le laser à injection qu'Alferov a breveté en 1963. Une percée technologique s'est produite vers 1970 lorsque les lasers à hétérostructures sont devenus capables de fonctionner en continu à des températures ambiantes. Ces propriétés ont par exemple rendu possibles en pratique les communications par fibre optique.

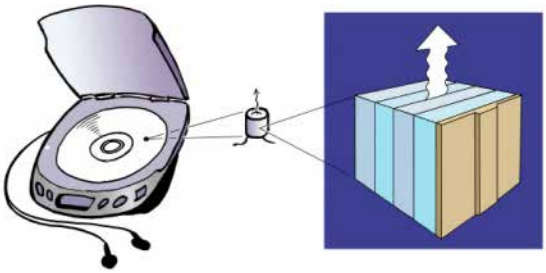


FIG. 19 – *La diode laser du lecteur CD contient une hétérostructure semi-conductrice.*

Le circuit intégré et la puce

L'invention du transistor juste avant Noël 1947 marque généralement le début du développement de la technologie moderne des semiconducteurs (prix Nobel de physique en 1956 à William B. Shockley, John Bardeen et Walter H. Brattain). Le transistor était un composant nettement plus petit, plus fiable et moins gourmand en énergie que le tube électronique, qui a ainsi perdu de son importance. La complexité croissante d'un système utilisant de plus en plus de tubes électroniques signifiait qu'une limite pratique avait été atteinte avec environ un millier de tubes. En soudant des transistors individuels sur un circuit imprimé, le système pouvait être porté à plus de dix mille transistors.

Même si le transistor a permis d'accroître la complexité d'un système de composants individuels soudés, il est vite apparu que le nombre de transistors était le facteur limitant pour répondre aux besoins de l'industrie informatique naissante. Dès le début des années 1950, des idées et des réflexions ont été menées sur la fabrication de transistors, de

résistances et de condensateurs dans un bloc semi-conducteur composite, un circuit intégré.

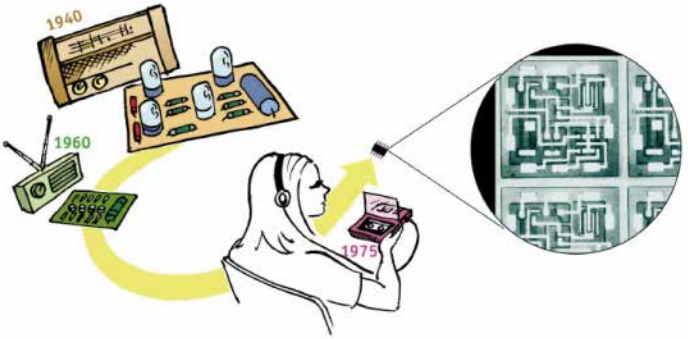


FIG. 20 – *Le développement est passé des tubes électroniques aux transistors puis aux circuits intégrés et aux puces, que l'on retrouve aujourd'hui dans toute l'électronique moderne.*

Les personnes qui allaient démontrer la possibilité pratique d'un circuit intégré étaient deux jeunes ingénieurs, Jack S. Kilby et Robert Noyce, qui travaillaient indépendamment l'un de l'autre. Kilby a toutefois été le premier à déposer une demande de brevet et Noyce a eu connaissance de ces travaux lorsqu'il a déposé sa propre demande.

Le circuit intégré est davantage une invention technique qu'une découverte en physique. Cependant, il est évident qu'il englobe de nombreuses questions de physique. Un exemple est la question de savoir comment l'aluminium et l'or, qui font partie d'un circuit intégré, diffèrent en ce qui concerne leur adhésion au silicium. Une autre question est de savoir comment produire des couches denses dont l'épaisseur n'est que de quelques atomes.

Il est donc évident que le développement du circuit intégré a entraîné d'énormes investissements dans la recherche et le développement de la physique du solide. Cela a conduit non seulement au développement de la technologie des semi-conducteurs, mais aussi à un développement gigantesque des appareils et des instruments. La miniaturisation continue s'est en outre heurtée à un certain nombre de limitations et de problèmes matériels et physiques qu'il a fallu résoudre.

La notion de circuit intégré existait déjà. Mais dix ans se sont écoulés après l'invention du transistor avant que la technologie ne soit suffisamment mûre pour permettre la fabrication des différents éléments

dans un seul et même matériau de base et en une seule pièce. Cette invention fait partie d'une série de nombreuses autres qui ont rendu possible le grand développement des technologies de l'information. Le circuit intégré est toujours, après 40 ans, dans une phase dynamique de développement qui ne montre aucun signe d'essoufflement.

Jack S. Kilby et Robert Noyce sont tous deux considérés comme les inventeurs du circuit intégré. Kilby est celui qui a construit le premier circuit. Noyce a développé le circuit tel qu'il a été fabriqué plus tard dans la pratique, avec du silicium et du dioxyde de silicium comme semiconducteur et comme isolant et avec de l'aluminium comme élément conducteur d'électricité. Tous deux ont reçu à plusieurs reprises des prix et des distinctions.

Robert Noyce est décédé en 1990. Il a alors été honoré comme l'un des plus importants fondateurs de la *Silicon Valley* et pour le rôle de premier plan que son entreprise a joué dans le développement des technologies de l'information, avec le circuit intégré comme pierre angulaire.

Jack S. Kilby a poursuivi sa carrière d'inventeur, avec une soixantaine de brevets. Il est notamment co-inventeur de la calculatrice de poche, l'une des premières applications du circuit intégré. Une étude de marché réalisée avant le début de la planification de la fabrication a montré que l'intérêt pour une calculatrice de poche était négligeable. Après tout, les gens avaient des règles à calcul !

Les lauréats

— Jaurès I. Alferov, né en 1930 à Vitebsk en Biélorussie (ex-Union soviétique), docteur en physique et mathématiques en 1970 à l'institut physico-technique Ioffe de Saint-Pétersbourg (alors Léningrad), directeur de cet institut à partir de 1987 ;
— Herbert Kroemer, né en 1928 en Allemagne, docteur en physique de l'université de Göttingen en 1952, a travaillé entre autres aux laboratoires RCA à Princeton (1954-1957) et pour la société Varian Associates à Palo Alto en Californie (1959-1966), professeur de physique à l'université du Colorado à Boulder (1968-1976) puis à l'université de Californie à Santa Barbara ;
— Jack S. Kilby, né en 1923 à Jefferson City dans le Missouri, a travaillé pour la société Texas Instruments à partir de 1958, professeur à l'université A&M du Texas de 1978 à 1985.

Le condensat de Bose-Einstein

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2001 à

— Eric A. Cornell, du JILA [6] et de l'Institut national des normes et de la technologie à Boulder dans le Colorado,
— Wolfgang Ketterle, de l'institut de technologie du Massachusetts,
— Carl E. Wieman, du JILA et de l'université du Colorado à Boulder,

« pour la réalisation d'un condensat de Bose-Einstein dans des gaz dilués d'atomes alcalins et pour les premières études fondamentales des propriétés des condensats ».

La matière qui nous entoure est constituée d'atomes qui obéissent aux lois de la mécanique quantique. À des températures normales, celles-ci sont souvent conformes aux conceptions classiques. Un gaz dans ces conditions se comporte plutôt comme un essaim de boules de billard qui rebondissent les unes contre les autres et contre les parois du récipient. Toutefois, lorsque la température est abaissée et que la vitesse des atomes est réduite, leurs propriétés sont de plus en plus dominées par les principes de la mécanique quantique. Les atomes tournent autour de leur axe — ils ont un spin — et ce mouvement est décrit par un nombre quantique de spin, qui doit être un nombre entier ou un demi-entier. Les particules qui ont un spin entier sont appelées bosons, tandis que celles qui ont un spin demi-entier sont appelées fermions. Les bosons ont un comportement « social » marqué : ils s'efforcent à basse température de se rassembler dans un seul et même état quantique, celui dont l'énergie est la plus basse. Les fermions, en revanche, s'évitent les uns les autres. Ils ne peuvent pas apparaître exactement dans le même état quantique, de sorte que des états d'énergie plus élevée doivent également être utilisés. On peut comprendre la disposition des éléments dans le tableau périodique à partir du fait que les électrons au sein des atomes sont des fermions.

Dès 1924, le physicien indien S. N. Bose a effectué un calcul statistique pour le type de particules qui portent aujourd'hui son nom, les

6. Le JILA est un institut de recherche commun à l'Institut national des normes et de la technologie (NIST) et à l'université du Colorado. Il s'appelait auparavant Institut commun d'astrophysique de laboratoire. Aujourd'hui, seule l'abréviation JILA est utilisée.

bosons, et plus particulièrement pour les particules de lumière appelées par la suite photons. Bose proposa un calcul alternatif pour la loi de rayonnement trouvée précédemment par Planck. Bose envoya son travail à A. Einstein, qui se rendit compte de son importance. Il le traduisit en allemand et le fit publier. Einstein étendit rapidement la théorie aux bosons dotées d'une masse et publia lui-même deux articles en succession rapide, qui prédisaient que lorsqu'un certain nombre de particules s'approchent suffisamment les unes des autres et se déplacent suffisamment lentement, elles se convertissent ensemble à l'état d'énergie le plus bas : il se produit ce que nous appelons aujourd'hui la condensation de Bose-Einstein.

Depuis la publication de ce travail précurseur, les physiciens ont souhaité pouvoir atteindre ce nouvel état fondamental de la matière, dont on attendait de nombreuses propriétés intéressantes et utiles. Soixante-dix ans se sont écoulés avant que les lauréats de 2001, Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle et Carl E. Wieman, n'y parviennent enfin en 1995 en utilisant des méthodes très avancées. Cet état a été atteint dans des gaz d'atomes alcalins, dans lesquels le phénomène peut être étudié de manière très pure. Nulle part ailleurs dans l'Univers on ne peut trouver les conditions extrêmes que représente la condensation de Bose-Einstein dans les gaz dilués. Des manifestations de la condensation de Bose-Einstein ont déjà été observées dans des systèmes plus complexes : condensation d'électrons appariés dans les supraconducteurs (perte de toute résistance électrique) et superfluidité (perte de friction interne dans les fluides). Ici aussi, de basses températures sont nécessaires. La recherche dans ces domaines a été récompensée par plusieurs prix Nobel. Contrairement aux gaz d'atomes alcalins, ces systèmes quantiques ne sont pas simples, car le phénomène de condensation ne concerne qu'une partie des systèmes et les fortes interactions mises en jeu tendent à masquer le phénomène de condensation de Bose-Einstein.

Ondes ou particules ?

Selon les lois de la mécanique quantique qui régissent le monde microscopique, ce que nous appelons normalement une particule peut parfois se comporter comme une onde. Ce phénomène est bien connu. Il est utilisé par exemple dans le microscope électronique. Dès 1924, L. de Broglie a postulé l'existence d'ondes de matière et a exprimé leur longueur d'onde λ en fonction de la quantité de mouvement p des

particules :

$$\lambda = \mathrm{h}/p,$$

où h est la constante de Planck. Plus la particule se déplace lentement, moins sa quantité de mouvement est importante et plus la longueur d'onde de de Broglie est grande. Selon la théorie cinétique des gaz, les faibles vitesses des particules correspondent à des températures basses. Si l'on pouvait produire un gaz suffisamment dense d'atomes froids, les longueurs d'onde de matière des particules seraient du même ordre de grandeur que la distance qui les sépare. C'est à ce moment-là que les différentes ondes de matière peuvent « se sentir » les unes les autres et coordonner leur état : c'est la condensation de Bose-Einstein. On dit parfois qu'il s'agit d'un « super-atome », car l'ensemble est décrit par une seule fonction d'onde, exactement comme dans un seul atome. On peut également parler de matière cohérente comme on parle de lumière cohérente dans le cas d'un laser.

Lorsqu'ils sont refroidis, les gaz se condensent généralement en liquides. Cela doit être évité et, comme l'ont montré les lauréats du prix Nobel 2001, c'est possible avec les atomes alcalins. Pour le rubidium avec le nombre de masse 87, ^{87}Rb, et pour le sodium avec son seul isotope stable ^{23}Na, qui ont tous deux un spin atomique entier, des forces répulsives faibles apparaissent entre les atomes dans chaque cas. On peut montrer que la condensation de Bose-Einstein se produit si la densité, exprimée comme le nombre d'atomes dans un cube de côté λ, dépasse 2,6. On peut calculer que les atomes, pour des densités réalistes, doivent alors se déplacer très lentement, à des vitesses de l'ordre de quelques millimètres par seconde. Cela correspond à des températures de l'ordre de 100 nanokelvins (nK), soit un dixième de millionième de degré au-dessus du zéro absolu. Les lauréats du prix Nobel 2001 y sont parvenus en utilisant de manière décisive les méthodes de refroidissement et de piégeage d'atomes neutres pour lesquelles le prix Nobel de physique a été décerné en 1997 (S. Chu, C. Cohen-Tannoudji et W. D. Phillips).

Le refroidissement par laser et le refroidissement par évaporation conduisent à la condensation de Bose-Einstein

Le refroidissement d'atomes neutres par laser a été proposé en 1975 par T. W. Hänsch et A. L. Schawlow. Le principe de base est l'échange de quantité de mouvement entre les photons et les atomes. On obtient le refroidissement en faisant en sorte que les photons ne puissent être

absorbés que s'ils entrent en collision frontale avec l'atome dans son vol. La vitesse est alors réduite, principalement jusqu'à une limite fixée par le caractère aléatoire de l'émission spontanée. Les lauréats du prix Nobel de 1997 ont montré que l'on peut dépasser cette « limite Doppler » grâce à des processus raffinés, pour atteindre des températures considérablement plus basses. Cependant, le nuage d'atomes refroidis doit également être maintenu ensemble, ce qui peut se faire dans des « pièges à atomes ». Ceux-ci fonctionnent souvent en combinant des faisceaux laser et des champs magnétiques. Le piège magnéto-optique est devenu particulièrement important. Plusieurs groupes de recherche ont utilisé cette technique pour approcher des conditions de la condensation de Bose-Einstein. Cependant, une autre technique de refroidissement s'est avérée nécessaire : le refroidissement par évaporation, qui a été utilisé par le groupe de D. Kleppner et T. J. Greytak au MIT. Dans ce cas, le milieu est refroidi en s'assurant que les atomes les plus rapides quittent le groupe. La température moyenne de ceux qui restent est alors réduite. Le café dans une tasse se refroidit de la même manière ! Dans un piège à atomes, les atomes sont maintenus en place par des forces dipolaires magnétiques. La force d'attraction peut être transformée en force de répulsion si les pôles magnétiques des atomes sont inversés. Cette inversion peut être réalisée à l'aide d'un champ de fréquences radio, une méthode efficace proposée par D. E. Pritchard au MIT. Les atomes les plus rapides se déplacent en hauteur au bord du puits de potentiel, où le champ magnétique et donc la fréquence de conversion pour l'inversion des pôles sont élevés. En appliquant d'abord une fréquence élevée, puis en l'abaissant progressivement, il est possible d'éliminer successivement les atomes chauds. C'est ainsi que le groupe du JILA, dirigé par Cornell et Wieman, a réussi en juin 1995, pour la première fois, à atteindre la limite de condensation pour ^{87}Rb. Une dernière difficulté à surmonter était d'éviter la perte d'atomes au centre du piège, où le champ magnétique est nul et où la commutation spontanée des pôles est possible. En faisant tourner un champ magnétique suffisamment rapidement au-dessus de l'échantillon, il a été possible d'empêcher les atomes de se déverser systématiquement hors du piège.

Vers 1990, Wieman a élaboré des lignes directrices sur la manière de réaliser la condensation de Bose-Einstein dans les atomes alcalins. Les aspects importants étaient le refroidissement par laser dans un piège magnéto-optique et le transfert dans un piège purement magnétique dans lequel le refroidissement par évaporation pourrait ensuite être appliqué. Cornell a été engagé par Wieman pour travailler sur le projet,

d'abord en tant que postdoctorant, mais il a rapidement été employé de manière permanente au NIST. Dans les expériences du JILA, dont les résultats spectaculaires sont illustrés dans la figure 21, le processus a été initié à une température d'environ 170 nK. En rendant le refroidissement par évaporation plus efficace, un condensat pur a été obtenu à une température de 20 nK. Il restait alors environ 2 000 atomes dans l'échantillon.

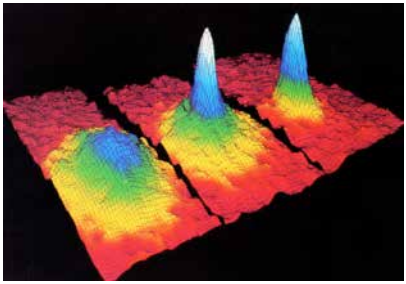


FIG. 21 – *Apparition de la condensation de Bose-Einstein dans le rubidium. De gauche à droite est représentée la distribution atomique dans le nuage juste avant la condensation, au début de la condensation et après la condensation complète. Les pics élevés correspondent à un grand nombre d'atomes. Les silhouettes du nuage d'atomes en expansion ont été enregistrées 6 ms après l'arrêt des forces de confinement du piège à atomes.*

Les images de la figure ont été obtenues en coupant soudainement les forces de confinement dans le piège, après quoi le nuage se dilate, de plus en plus lentement au fur et à mesure que les atomes sont plus froids. Une image de la silhouette du nuage a été réalisée à l'aide d'une lumière laser résonnante après un délai prédéterminé. La température a été calculée sur la base de la taille que le nuage avait atteinte pendant cette période. La figure montre les distributions atomiques calculées à partir des images de la silhouette.

Ketterle a travaillé indépendamment du groupe du Colorado en utilisant des atomes de sodium qui absorbent et émettent de la lumière jaune. Il est venu d'Allemagne en 1990 en tant que postdoctorant dans le groupe de D. Pritchard au MIT et a assumé la responsabilité principale du projet de condensation de Bose-Einstein en 1993. Ketterle a résolu le problème des pertes d'atomes au centre du piège en y concentrant un puissant faisceau laser qui éloigne les atomes de la zone de

perte. Il a publié ses résultats de condensation de Bose-Einstein pour le sodium quatre mois seulement après la publication du groupe du JILA. Ketterle a montré des enregistrements similaires à ceux de la figure 21, mais avec beaucoup plus d'atomes dans le condensat. Comme il y avait maintenant des centaines de fois plus d'atomes avec lesquels travailler, il est devenu possible de faire des mesures spectaculaires des propriétés du condensat. On a mis par exemple en évidence que deux condensats séparés, que l'on laisse se dilater l'un dans l'autre, présentent des figures d'interférence très claires (figure 22), ce qui confirme la cohérence des ondes de matière et la corrélation à longue portée. Ketterle a également montré comment des parties du condensat pouvaient être successivement échangées dans des « gouttes de condensat de Bose-Einstein » qui tombent dans le champ de gravité (figure 23). Le phénomène a été décrit comme un laser atomique de matière cohérente.

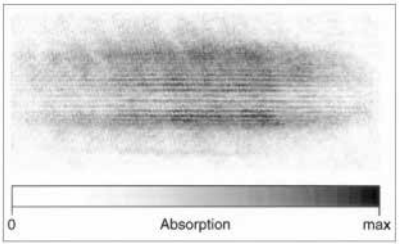


Fig. 22 – *Figure d'interférence entre deux condensats de Bose-Einstein d'atomes de sodium qui se chevauchent. L'image a été réalisée en absorption. Les interférences des ondes de matière ont une période de 15 micromètres. L'enregistrement montre que les atomes des deux condensats étaient parfaitement coordonnés.*

Le domaine des condensats de Bose-Einstein se développe rapidement

Après les mises en évidence très spectaculaires de la condensation de Bose-Einstein dans le rubidium et le sodium par les groupes du JILA et du MIT, le domaine s'est développé de manière explosive et plus de vingt groupes ont mené peu après des expériences sur la condensation de Bose-Einstein. Les activités du groupe de R. G. Hulet à l'université Rice méritent une mention particulière. Ce groupe a travaillé sur l'isotope ^{7}Li du lithium, pour lequel des forces d'attraction apparaissent

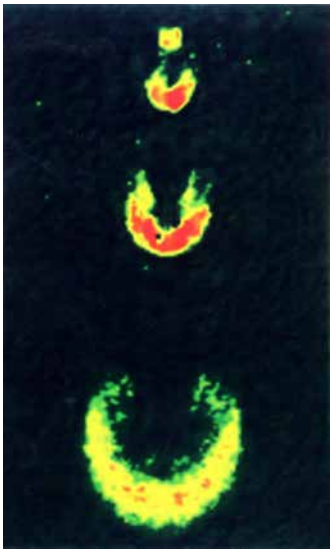


FIG. 23 – *Libération répétée hors du piège de parties d'un condensat de Bose-Einstein d'atomes de sodium. Des impulsions de matière cohérente tombent dans le champ gravitationnel : le phénomène peut être considéré comme un laser à atomes. La taille réelle de l'image est de 2,5 mm × 5 mm.*

lorsque deux atomes s'approchent l'un de l'autre, contrairement à ce qui se passe pour ^{87}Rb et ^{23}Na. Dans une publication de 1997, le groupe a montré clairement qu'on obtenait un petit condensat d'environ mille atomes, exactement comme le prévoyait la théorie. Le fait que le nuage ne s'effondre pas en agrégats de molécules sous l'influence des forces d'attraction est dû aux fluctuations d'énergie des atomes dans le piège.

Bien qu'un très grand nombre de groupes soient entrés dans le domaine, les groupes de Cornell, Wieman et Ketterle ont maintenu leur avance et ont présenté de nombreux nouveaux résultats intéressants. Le groupe du JILA a étudié notamment les excitations collectives et les formations de tourbillons dans les condensats. Le groupe de Ketterle a mis au point une méthode améliorée d'imagerie du condensat, qui n'est pas influencée par la mesure et peut donc être répétée plusieurs fois. Des résonances dépendantes du champ magnétique ont également été observées dans les forces entre les atomes ; celles-ci influencent forte-

ment les propriétés du condensat. En outre, le groupe a montré qu'on peut amplifier un faisceau laser atomique de manière analogue à un faisceau laser. Le groupe de W. D. Phillips au NIST dans le Maryland fait également partie de ceux qui ont présenté des résultats fondamentaux, qui mettent entre autres en évidence un phénomène qui correspond au mélange de quatre ondes en optique non linéaire, mais en utilisant des ondes de matière.

La recherche expérimentale sur la condensation de Bose-Einstein dans les gaz dilués a commencé très tôt avec l'utilisation d'hydrogène à spin polarisé dans le groupe de Kleppner et Greytak au MIT, mais il s'est avéré très difficile d'obtenir les conditions appropriées. Cependant, plus de trois ans après le premier article du groupe du JILA, des résultats sur la condensation de Bose-Einstein ont été publiés pour l'hydrogène. D. Kleppner a joué un rôle important, notamment en tant que source d'inspiration. La condensation de Bose-Einstein a récemment été développée pour couvrir d'autres types d'atomes par deux groupes à Paris, qui ont rapporté la condensation dans des atomes d'hélium méta-stables.

Prospectives

La condensation de Bose-Einstein dans les gaz dilués offre des possibilités particulièrement riches pour l'étude des processus fondamentaux de la mécanique quantique. Une activité de recherche extrêmement complète, à la fois expérimentale et théorique, est en cours dans ce domaine, comprenant des études de processus non linéaires et la manipulation de la vitesse de propagation de la lumière. L'influence sur d'autres domaines de recherche est également importante. Le groupe du JILA a récemment démontré qu'il est possible avec ^{85}Rb d'utiliser les résonances déjà mentionnées pour passer rapidement des forces atomiques attractives aux forces répulsives, ce qui conduit à une dissolution du condensat qui ressemble à celle d'une supernova (la « Bose-nova »). L'étude par D. Jin et ses collègues du JILA des phénomènes liés à la condensation de Bose-Einstein pour les fermions à des températures extrêmement basses révèle de nouveaux aspects des conditions statistiques dans les systèmes physiques, ce qui suggère de nouvelles possibilités pour observer la formation de paires atomiques et des propriétés de superfluidité. Le groupe de R. G. Hulet a montré qu'une pression vers l'extérieur résulte de la nature répulsive des fermions dans un gaz de Fermi atomique dégénéré et qu'il est possible de simuler des conditions

semblables à celles des étoiles appelées « naines blanches ».

Il sera possible d'exploiter le phénomène de condensation de Bose-Einstein dans les gaz pour des mesures de précision de phénomènes naturels fondamentaux où l'on utilise des résonances nettes dans des atomes essentiellement immobiles ou des franges nettes d'interférence de matière. Des applications révolutionnaires de la condensation de Bose-Einstein en lithographie, en nanotechnologie et en holographie semblent être à portée de main.

Les lauréats

— Eric A. Cornell, maître ès sciences de l'université Stanford en 1985, docteur en physique au MIT en 1990, physicien à l'Institut national de normalisation et de technologie à Boulder depuis 1992, professeur adjoint au département de physique de l'université du Colorado à Boulder depuis 1995 ;
— Wolfgang Ketterle, diplomé de physique à l'université technique de Munich en 1982, docteur en physique à l'université Louis-Maximilien de Munich et à l'institut Max-Planck pour la physique quantique de Garching en 1986, au MIT depuis 1990, professeur depuis 1997 ;
— Carl E. Wieman, docteur de l'université Stanford en 1977, professeur de physique à l'université du Colorado à Boulder depuis 1987.

Deux nouvelles fenêtres sur l'Univers

Le prix Nobel de physique 2002 porte sur la découverte et la détection de particules et de rayonnements cosmiques qui ont donné naissance à deux nouveaux domaines de recherche : l'astronomie des neutrinos et l'astronomie des rayons X. La première moitié du prix est attribuée conjointement à Raymond Davis (fils), du département de physique et d'astronomie de l'université de Pennsylvanie, et à Masatoshi Koshiba, du Centre international de physique des particules élémentaires de l'université de Tokyo,

> « pour leurs travaux d'avant-garde dans le domaine de l'astrophysique, en particulier pour la détection des neutrinos cosmiques ».

La seconde moitié du prix est attribuée à Riccardo Giacconi (*Associated Universities, Inc.*, à Washington)

> « pour des travaux pionniers dans le domaine de l'astrophysique qui ont conduit à la découverte de sources cosmiques de rayons X ».

Pourquoi le soleil brille-t-il ?

Au XIX^e^ siècle, des discussions animées ont eu lieu sur la source d'énergie du Soleil. Une théorie voulait que cette réaction solaire fût due à la libération d'énergie gravitationnelle lors de la contraction de la matière du Soleil. Mais dans ce cas, l'espérance de vie du Soleil aurait été trop courte, d'après les calculs. Elle aurait été d'environ 20 millions d'années, alors que l'âge de la Terre est d'environ 5 milliards d'années d'après nos connaissances actuelles.

En 1920, une expérience a montré qu'un atome d'hélium a une masse inférieure à celle de quatre atomes d'hydrogène. L'astrophysicien britannique Arthur Eddington a compris que les réactions nucléaires de transformation de l'hydrogène en hélium pouvaient être à la base de l'approvisionnement énergétique du Soleil, en utilisant la formule d'Albert Einstein $E = m\,c^2$. La transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil donne deux neutrinos pour chaque noyau d'hélium formé par une série de réactions (expliquées notamment par le prix Nobel

Hans Bethe). Le rêve de vérifier cette théorie en détectant des neutrinos était considéré comme impossible en pratique par la plupart des scientifiques. Cependant, dans les années 1950, le lauréat du prix Nobel Frederick Reines et ses collègues ont réussi à montrer qu'il était possible de mettre en évidence l'existence des neutrinos. Dans leur expérience, ils ont utilisé les réactions d'un réacteur nucléaire, qui génère un flux important de neutrinos.

Le flux de neutrinos provenant du Soleil est très important : d'après les estimations, des milliers de milliards de neutrinos solaires traverseraient notre corps chaque seconde sans que nous nous en apercevions. En effet, ces neutrinos réagissent très faiblement avec la matière. Seul un neutrino solaire sur mille milliards serait arrêté lors de sa traversée de la Terre.

À la fin des années 1950, Raymond Davis (fils) était le seul scientifique à oser essayer de montrer l'existence des neutrinos solaires, malgré ses faibles chances de succès. Alors que la plupart des réactions dans le Soleil créent des neutrinos dont l'énergie est si faible qu'ils sont très difficiles à détecter, une réaction rare crée un neutrino de haute énergie. Le physicien italien Bruno Pontecorvo a proposé de détecter ce neutrino après qu'il a réagi avec un noyau de chlore, formant un noyau d'argon et un électron. Ce noyau d'argon est radioactif et a une durée de vie d'environ 50 jours.

Des particules détectées dans les mines

Dans les années 1960, Davis a placé un réservoir rempli de 615 tonnes de tétrachloroéthylène (fig. 24), un liquide de nettoyage courant, dans une mine d'or du Dakota du Sud, aux États-Unis. Au total, le réservoir contenait environ 2×10^{30} atomes de chlore. Il a calculé que chaque mois, environ 20 neutrinos devaient réagir avec le chlore ou, en d'autres termes, que 20 atomes d'argon devaient être créés. L'approche pionnière de Davis a consisté à développer une méthode pour extraire ces atomes d'argon et les compter. Il a libéré de l'hélium gazeux à travers le liquide chloré et les atomes d'argon s'y sont attachés — un exploit bien plus difficile que de trouver un grain de sable particulier dans tout le désert du Sahara !

Cette expérience a permis de recueillir des données jusqu'en 1994. Environ 2 000 atomes d'argon ont été extraits au total. Toutefois, ce chiffre était inférieur aux prévisions. Grâce à des expériences de contrôle, Davis a pu montrer qu'il ne restait aucun atome d'argon dans

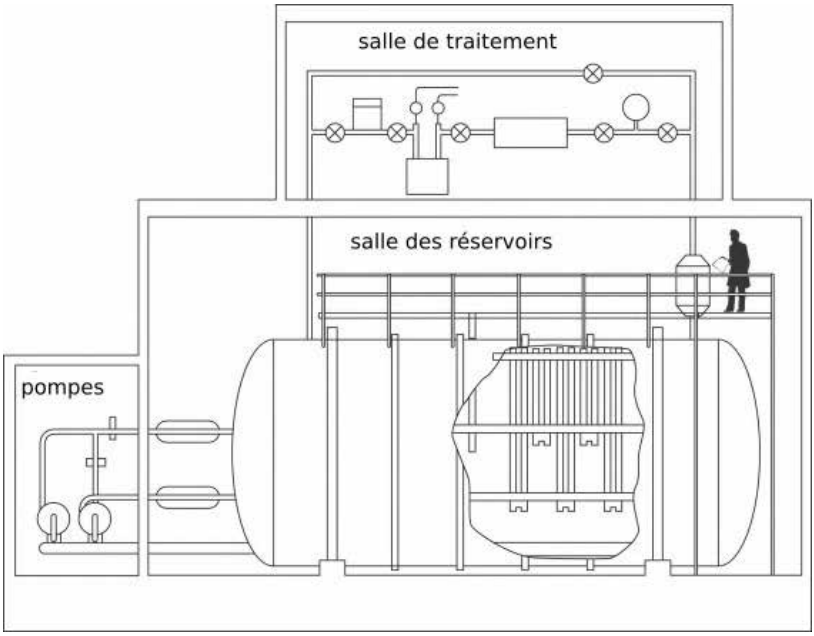


FIG. 24 – *Le détecteur de Davis qui, pour la première fois dans l'histoire, a montré l'existence des neutrinos solaires. Le réservoir, placé dans une mine d'or, contenait plus de 600 tonnes de tétrachloroéthylène et mesurait 14,6 mètres de long pour un diamètre de 6,1 mètres.*

le réservoir de chlore. Il semblait donc que notre compréhension de ces processus dans le Soleil fût incomplète ou qu'une partie des neutrinos eût disparu sur le chemin vers la Terre.

Des neutrinos de l'espace

Pendant que l'expérience de Davis se déroulait, le physicien japonais Masatoshi Koshiba et son équipe ont construit un autre détecteur, baptisé *Kamiokande*. Il a été placé dans une mine au Japon et consistait en un énorme réservoir rempli d'eau. Lorsque les neutrinos traversent ce réservoir, ils peuvent interagir avec les noyaux atomiques présents dans l'eau. Cette réaction entraîne la libération d'un électron, ce qui crée de petits éclairs de lumière. La cuve était entourée de photomultiplicateurs capables de capter ces éclairs. En ajustant la sensibilité

des détecteurs, la présence de neutrinos a pu être mise en évidence et le résultat de Davis a été confirmé. Les différences décisives entre les expériences de Davis et de Koshiba étaient que cette dernière enregistrait à quels moments avaient lieu ces événements et était sensible à la direction. Il a donc été possible pour la première fois de montrer que les neutrinos provenaient du Soleil (fig. 25a).

Le détecteur *Kamiokande* a été touché en février 1987 par une salve de neutrinos provenant de l'explosion d'une supernova appelée 1987A, dans une galaxie voisine de la Voie lactée, le Grand Nuage de Magellan (fig. 25b). Cette galaxie se trouve à environ 170 000 années-lumière de la Terre (une année-lumière correspond à 10^{16} mètres). Si une étoile à neutrons se forme lors de l'explosion d'une supernova, la majeure partie de l'énorme quantité d'énergie libérée sera émise sous forme de neutrinos. On estime qu'environ 10^{58} neutrinos au total ont été émis par la supernova 1987A. Le groupe de recherche de Koshiba a observé douze des quelque 10^{16} neutrinos qui ont traversé le détecteur. Une expérience similaire menée aux États-Unis a confirmé cette découverte.

Les neutrinos se transforment-ils ?

Afin d'accroître la sensibilité aux neutrinos cosmiques, Koshiba a construit un détecteur plus grand, *Super-Kamiokande*, qui est entré en service en 1996. Cette expérience a récemment observé les effets des neutrinos produits dans l'atmosphère, indiquant un phénomène totalement nouveau, les oscillations de neutrinos, dans lequel un type de neutrino peut se transformer en un autre type. Cela implique que les neutrinos ont une masse non nulle, ce qui est très important pour le modèle standard des particules élémentaires et pour le rôle que jouent les neutrinos dans l'Univers. Cela pourrait également expliquer pourquoi Davis n'a pas détecté autant de neutrinos que prévu.

Les découvertes de Davis et Koshiba et le développement de leurs instruments ont jeté les bases d'un nouveau domaine, l'astronomie des neutrinos, qui revêt une grande importance pour la physique des particules élémentaires, l'astrophysique et la cosmologie. Le modèle standard des particules élémentaires devra être modifié si les neutrinos ont une masse. Cette masse peut être très importante pour la masse totale de l'Univers. Des études visant à confirmer ou à infirmer la théorie de l'oscillation des neutrinos sont en cours dans de nombreux laboratoires du monde entier.

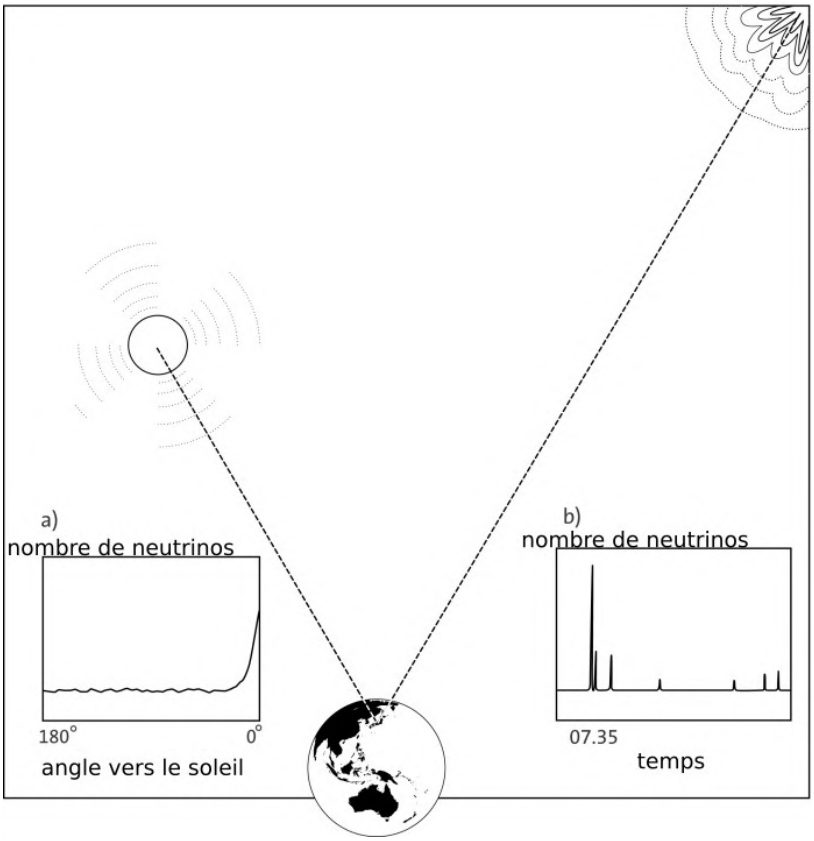


FIG. 25 – *Observations des neutrinos solaires dans l'expérience Kamiokande. Un pic clair est visible pour l'angle correspondant à la direction du Soleil. Le fond plat provient du rayonnement cosmique et de la radioactivité autour du détecteur. b) Observation de la salve de neutrinos de SN1987A. Cette figure montre le nombre de photomultiplicateurs touchés dans un intervalle de 17 minutes commençant à 7 h 33 TU. La rafale de neutrinos s'est produite à 7 h 35 TU le 23 février 1987.*

Un firmament invisible

Les rayons X découverts par Wilhelm Röntgen en 1895 ont été rapidement utilisés par les physiciens et les médecins dans les laboratoires et les cliniques du monde entier. En revanche, il a fallu un demi-siècle aux astronomes pour étudier ce type de rayonnement. La principale raison est que les rayons X, qui pénètrent si facilement les tissus humains et autres matériaux solides, sont presque entièrement absorbés par l'air de l'épaisse atmosphère terrestre. Ce n'est que dans les années 1940 que des fusées ont été construites pour envoyer des instruments suffisamment haut dans l'atmosphère.

Le premier rayonnement X en dehors de la Terre a été enregistré en 1949 par des instruments placés dans une fusée par le regretté Herbert Friedman et ses collègues. On a montré que ce rayonnement provenait de zones de la surface du Soleil avec des taches solaires et des éruptions, ainsi que de la couronne environnante, qui a une température de plusieurs millions de degrés Celsius. Mais ce type de rayonnement aurait été très difficile à enregistrer si le Soleil avait été aussi éloigné que les autres étoiles de la Voie lactée.

En 1959, Riccardo Giacconi, alors âgé de 28 ans, a été recruté pour mettre en place un programme de recherche spatiale pour une société qui devait permettre aux jeunes chercheurs d'obtenir par exemple plus facilement des commandes de la NASA. Avec l'homme qui a pris cette initiative, le regretté Bruno Rossi, Giacconi a élaboré les principes de la construction d'un télescope en rayons X. Cette construction recueillait le rayonnement à l'aide de miroirs incurvés en forme de cône sur lesquels le rayonnement tombait très obliquement et était totalement réfléchi. C'est le même phénomène que lorsqu'un paysage se reflète dans l'air au-dessus d'une route en asphalte par une chaude journée d'été.

Giacconi et son nouveau groupe ont également réalisé des expériences avec des fusées pour tenter de mettre en évidence la présence de rayons X provenant de l'Univers, principalement pour voir si la Lune pouvait émettre des rayons X sous l'influence du Soleil. Lors d'une expérience, une fusée a volé à haute altitude pendant six minutes. Aucun rayonnement lunaire n'a pu être détecté, mais une source étonnamment forte a été enregistrée à une plus grande distance, car la fusée tournait et ses détecteurs (fig. 26) balayaient le ciel. En outre, un fond de rayonnement X a été découvert, réparti uniformément dans le ciel.

Ces découvertes inattendues ont donné une impulsion au développement de l'astronomie des rayons X. Avec le temps, la manière de

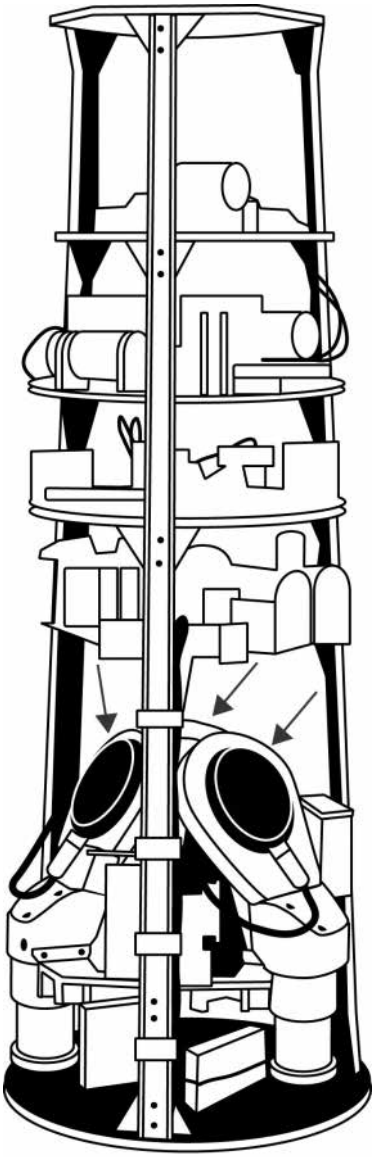


Fig. 26 – *L'instrument situé dans le nez de la fusée* Aerobee*, lancée en juin 1962 par Giacconi et son groupe et qui fut le premier à enregistrer une source de rayons X en dehors du système solaire. L'instrument, d'une longueur d'environ un mètre, contenait trois compteurs Geiger (indiqués par des flèches), munis de fenêtres d'épaisseur variable qui permettaient de déterminer l'énergie du rayonnement.*

déterminer la direction du rayonnement a été améliorée et les sources ont pu être identifiées grâce à des observations faites en lumière normale. La source découverte lors de la première expérience réussie était une étoile lointaine dans l'ultraviolet dans la constellation du Scorpion, Scorpius X-1 (X pour rayons X, 1 pour la première). D'autres sources importantes étaient des étoiles de la constellation du Cygne (Cygnus X-1, X-2 et X-3). La plupart des sources nouvellement découvertes étaient des étoiles doubles, dans lesquelles une étoile tourne sur une orbite rapprochée autour d'un autre objet très compact : une étoile à neutrons ou peut-être un trou noir (fig. 27). Cependant, il était difficile de mener à bien ces études, car les temps d'observation possibles à partir des ballons et des fusées étaient trop courts.

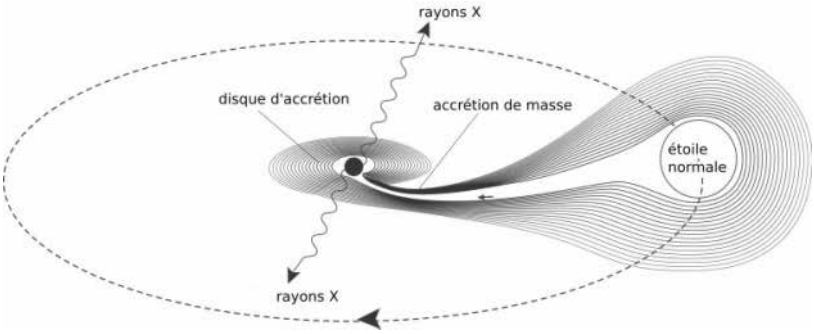


FIG. 27 – Une étoile double qui génère des rayons X. *Le gaz s'écoule de l'étoile vers l'objet compact et accélère dans son puissant champ gravitationnel jusqu'à atteindre des vitesses très élevées. Lorsque les atomes de gaz entrent en collision les uns avec les autres et ralentissent à la surface de l'étoile à neutrons et sous l'effet de son champ magnétique, des rayons X intenses sont émis.*

Les satellites à rayons X ont élargi nos horizons

Afin d'allonger les durées d'observation, Giacconi a lancé la construction d'un satellite destiné à étudier le ciel à la recherche de rayons X. Ce satellite a été lancé en 1970 depuis une base au Kenya et baptisé *Uhuru* (« liberté » en swahili). Il était dix fois plus sensible que les expériences sur les fusées et, chaque semaine en orbite, il produisait plus de résultats que toutes les expériences précédentes réunies.

Cependant, aucun télescope à rayons X haute définition capable de fournir des images nettes n'avait encore été envoyé dans l'espace. Giacconi en a construit un, qui a été prêt à être utilisé en 1978. Il s'agissait de l'observatoire Einstein des rayons X, capable de fournir des images relativement nettes de l'Univers dans les longueurs d'onde des rayons X. Sa sensibilité a été améliorée et on a pu enregistrer des objets un million de fois plus faibles que Scorpius X-1 (voir ci-dessus).

Ce télescope a permis de faire un grand nombre de découvertes. De nombreuses étoiles doubles à rayons X ont été étudiées en détail, notamment un certain nombre d'objets dont on pensait qu'ils contenaient des trous noirs. On a pu également étudier des étoiles plus normales pour la première fois dans les rayons X. Des restes de supernovae ont été analysés, des étoiles à rayons X ont été découvertes dans des galaxies situées en dehors de la Voie lactée et des éruptions de rayons X provenant de galaxies actives lointaines ont pu être examinées de plus près. Le rayonnement X du gaz entre les galaxies dans les groupes de galaxies a aidé les scientifiques à tirer des conclusions sur le contenu en matière noire de l'Univers.

En 1976, Giacconi a lancé la construction d'un observatoire de rayons X amélioré et encore plus grand. Il n'a été lancé qu'en 1999 et a été baptisé *Chandra* en l'honneur de l'astrophysicien et lauréat du prix Nobel Subrahmanyan Chandrasekhar. *Chandra* a fourni des images extraordinairement détaillées des corps célestes dans les rayons X (fig. 28), équivalentes à celles du télescope spatial Hubble ou des nouveaux télescopes terrestres utilisant la lumière visible.

Un nouvel éclairage sur les trous noirs

Grâce à l'astronomie en rayons X et à ses pionniers, en particulier à Giacconi, notre vision de l'Univers a été modifiée de manière décisive. Il y a cinquante ans, notre point de vue était dominé par une image d'étoiles et de constellations d'étoiles en équilibre, où toute évolution était très lente et graduelle. Aujourd'hui, nous savons que l'Univers est également le théâtre d'évolutions extrêmement rapides, au cours desquelles d'énormes quantités d'énergie sont libérées lors de processus qui durent moins d'une seconde, en relation avec des objets qui ne sont pas beaucoup plus grands que la Terre, mais incroyablement compacts. L'étude des processus dans ces objets et dans les parties centrales des noyaux actifs des galaxies repose en grande partie sur les données de l'astronomie en rayons X. On a découvert et étudié un nouveau

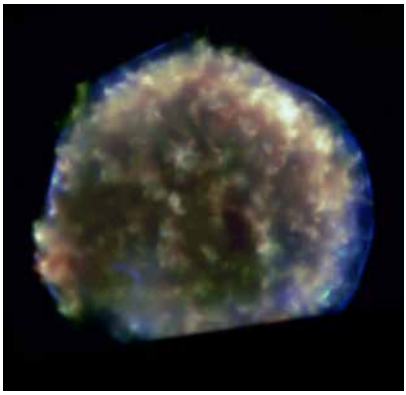


FIG. 28 – *Vestiges de la supernova (une étoile qui explose) dans la constellation de Cassiopée, que Tycho Brahe a découverte en 1572 depuis Herrevadskloster et qu'il a décrite en détail. La supernova se trouve à une distance de 7 500 années-lumière de la Terre et mesure 20 années-lumière de large (une année-lumière correspond à* 10^{16} *mètres). Cette image a été prise par le satellite* Chandra *dans les rayons X. NASA/CXC/SAO.* http://chandra.harvard.edu

zoo fantastique de corps célestes importants et étranges. Aujourd'hui, l'Univers semble beaucoup plus remarquable que ce que nous pensions il y a 50 ans, en grande partie grâce à l'astronomie en rayons X.

Les lauréats

— Raymond Davis (fils), né en 1914 à Washington, docteur en chimie en 1942 de l'université Yale, professeur émérite au département de physique et d'astronomie de l'université de Pennsylvanie à Philadelphie ;
— Masatoshi Koshiba, né en 1926 à Toyohashi au Japon, docteur en 1955 de l'université de Rochester aux États-Unis, professeur émérite à l'université de Tokyo ;
— Riccardo Giacconi, né en 1931 à Gênes, docteur en 1954 de l'université de Milan, directeur de *Associated Universities, Inc.*, à Washington.

Un écoulement sans résistance

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2003 à

— Alexei A. Abrikosov, du laboratoire national d'Argonne dans l'Illinois,
— Vitaly L. Ginzburg, de l'institut de physique P. N. Lebedev à Moscou,
— Anthony J. Leggett, de l'université de l'Illinois à Urbana,

« pour des travaux novateurs dans la théorie des supraconducteurs et des superfluides ».

La physique quantique qui contrôle le monde microscopique a un large éventail d'effets spectaculaires qui ne se produisent normalement pas dans notre monde macroscopique ordinaire. Il existe cependant certaines situations dans lesquelles les phénomènes quantiques sont visibles. Le prix Nobel de physique 2003 récompense des travaux portant sur deux de ces situations : la supraconductivité et la superfluidité. Alexei Abrikosov et Vitaly Ginzburg ont développé des théories pour la supraconductivité et Anthony Leggett a expliqué un type de superfluidité. La supraconductivité et la superfluidité se produisent toutes deux à des températures très basses.

Un effet inattendu lié au froid

Lorsque les premières recherches sur la nature de l'électricité ont été menées au XIX^e^ siècle, il était évident que les métaux et certains alliages conduisaient l'électricité en permettant aux électrons de se déplacer entre les atomes. Mais la façon désorganisée dont les électrons se déplacent fait vibrer les atomes, ce qui génère de la chaleur. Si le courant est trop fort, la chaleur peut être si importante que le conducteur fond. En outre, on a découvert qu'un courant électrique traversant un conducteur crée un champ magnétique qui à son tour génère un courant dans la direction opposée. L'électricité et le magnétisme interagissent et peuvent donc se contrecarrer.

En 1911, le physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes a fait une découverte remarquable. Il s'intéressait particulièrement aux propriétés des substances à basse température et avait réussi à produire

de l'hélium liquide, dont la température est extrêmement basse. En étudiant la conductivité électrique du mercure, Onnes a constaté que lorsque le métal était refroidi au moyen d'hélium liquide à quelques degrés au-dessus du zéro absolu, sa résistance électrique devenait nulle. Il a baptisé ce phénomène « supraconductivité ». Bien qu'aucune explication théorique n'avait pu être trouvée pour ce phénomène, il était évident qu'il pouvait avoir une importance considérable dans une société moderne qui devenait de plus en plus dépendante de l'électricité. Onnes reçut le prix Nobel de physique en 1913 pour ce travail.

Deux types de supraconducteurs

Près de 50 ans se sont écoulés avant que les physiciens John Bardeen, Leon Cooper et Robert Schrieffer (prix Nobel de physique en 1972) ne parviennent à présenter une théorie, la théorie BCS, nommée d'après les initiales de leurs noms de famille, qui explique le phénomène. Cette théorie montre que certains des électrons chargés négativement dans un supraconducteur forment des paires, appelées paires de Cooper. Ces paires d'électrons circulent le long de canaux d'attraction formés par la structure régulière des atomes métalliques chargés positivement dans le matériau. Grâce à cette combinaison et à cette interaction, le courant peut circuler de manière régulière et la supraconductivité se produit. Les électrons appariés sont généralement considérés comme un condensat, semblable aux gouttes de liquide qui se forment dans un gaz refroidi. Contrairement à un liquide ordinaire, ce « fluide électronique » est supraconducteur.

Ces supraconducteurs sont appelés de type I. Ce sont des métaux qui se caractérisent par l'effet Meissner, c'est-à-dire qu'à l'état supraconducteur, ils s'opposent activement à un champ magnétique environnant tant que l'intensité de celui-ci ne dépasse pas une certaine limite (fig. 29). Si le champ magnétique environnant devient trop fort, la propriété supraconductrice disparaît.

Mais on sait qu'il existe des supraconducteurs qui n'ont pas d'effet Meissner ou qui ne l'ont que partiellement. Il s'agit en général d'alliages de divers métaux ou de composés constitués de non-métaux et de cuivre. Ils conservent leur propriété supraconductrice même dans un champ magnétique intense. Les expériences montrent que les propriétés de ces supraconducteurs dits de type II ne peuvent pas être décrites par la théorie BCS.

Alexei Abrikosov, qui travaillait à l'institut Kapitsa pour les pro-

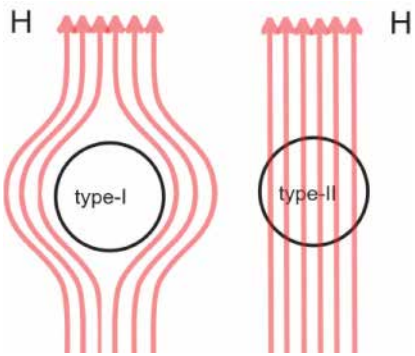


FIG. 29 – *Les supraconducteurs de type I repoussent un champ magnétique (effet Meissner). Si l'intensité du champ magnétique augmente, ils perdent leur supraconductivité. Ce n'est pas le cas des supraconducteurs de type II, qui s'accommodent de champs magnétiques puissants en les laissant entrer.*

blèmes physiques à Moscou, a réussi à formuler une nouvelle théorie pour décrire le phénomène. Il est parti d'une description de la supraconductivité dans laquelle la densité du condensat supraconducteur est prise en compte à l'aide d'un paramètre d'ordre (une fonction d'onde). Abrikosov a pu montrer mathématiquement comment le paramètre d'ordre peut décrire des tourbillons et comment le champ magnétique externe peut pénétrer dans le matériau le long des canaux de ces tourbillons (fig. 30).

Abrikosov a également pu prédire en détail comment le nombre de tourbillons peut augmenter à mesure que le champ magnétique s'intensifie et comment la propriété supraconductrice du matériau est perdue si les noyaux des tourbillons se chevauchent. Cette description a constitué une percée dans l'étude des nouveaux matériaux supraconducteurs. Elle est toujours utilisée dans le développement et l'analyse de nouveaux supraconducteurs et de nouveaux aimants. Ses articles de la fin des années 1950 ont été cités de plus en plus fréquemment au cours des dix dernières années.

La théorie sur laquelle repose l'argument d'Abrikosov a été formulée au début des années 1950 par Vitaly Ginzburg et Lev Landau ; ce dernier a reçu le prix Nobel de physique en 1962 pour d'autres travaux (voir ci-dessous). Cette théorie visait à décrire la supraconduc-

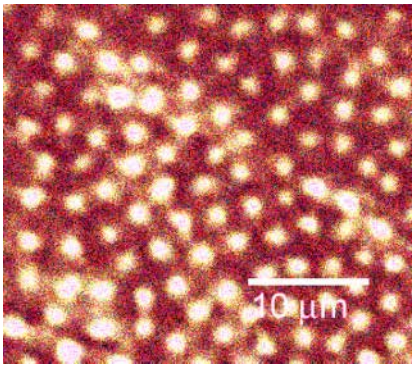


FIG. 30 – *Cette image représente un réseau d'Abrikosov de tourbillons dans le fluide électronique d'un supraconducteur de type II. Le champ magnétique passe à travers ces tourbillons.*

tivité et les intensités critiques du champ magnétique dans les supraconducteurs connus à l'époque. Ginzburg et Landau ont réalisé qu'on devait introduire un paramètre d'ordre (une fonction d'onde) décrivant la densité du condensat supraconducteur dans le matériau si l'on voulait expliquer l'interaction entre le supraconducteur et le magnétisme. Après l'introduction de ce paramètre, on s'est aperçu qu'il y avait un point critique lorsqu'une valeur caractéristique atteignait environ 0,71 et qu'il existait bien en principe deux types de supraconducteurs. Pour le mercure, la valeur est d'environ 0,16. Les autres supraconducteurs connus à l'époque ont des valeurs proches. Il n'y avait donc, à l'époque, aucune raison de considérer des valeurs supérieures au point critique. Abrikosov a été en mesure de conforter la théorie en montrant que les supraconducteurs de type II avaient précisément ces valeurs-là.

Notre connaissance de la supraconductivité a débouché sur des applications révolutionnaires (fig. 31). De nouveaux composés dotés de propriétés supraconductrices sont découverts en permanence. Au cours des dernières décennies, on a développé un grand nombre de supraconducteurs à haute température. Le premier a été produit par Georg Bednorz et Alex Müller, qui ont reçu le prix Nobel de physique en 1987. Tous les supraconducteurs à haute température sont de type II. Le refroidissement est un facteur critique pour l'utilisation des supraconducteurs. Une limite importante est 77 K (−196 °C), le point d'ébullition de l'azote liquide, qui est moins cher et plus facile à gérer que

l'hélium liquide.

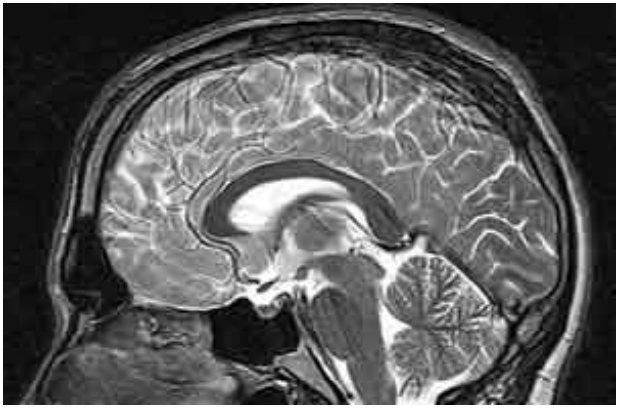


FIG. 31 – *Image IRM d'un cerveau humain. La résolution de la caméra à résonance magnétique dépend en partie de l'intensité du champ magnétique. Aujourd'hui, on utilise des aimants supraconducteurs puissants, tous de type II.*

Deux superfluides fascinants

L'hélium, le gaz rare le plus léger, existe dans la nature sous deux formes, deux isotopes. La forme habituelle est représentée par ^{4}He, où le chiffre 4 représente le nombre de nucléons dans le noyau atomique (deux protons et deux neutrons). Dans la forme inhabituelle, ^{3}He, le noyau atomique n'a qu'un seul neutron, il est donc plus léger. Dans l'hélium naturel, l'isotope le plus lourd est plus fréquent que le plus léger, avec un rapport d'environ 10 millions. C'est pourquoi ce n'est qu'au cours des cinquante dernières années qu'on a pu produire de grandes quantités d'hélium 3, dans les centrales nucléaires par exemple. À température normale, les gaz des deux isotopes ne diffèrent que par leur poids atomique.

Si l'hélium gazeux est refroidi à basse température, environ 4 degrés au-dessus du zéro absolu (−273,15 °C), le gaz passe à l'état liquide : il se condense. Cela se produit de la même manière que lorsque la vapeur se condense en eau. Si la température n'est pas trop basse, les liquides des deux isotopes ont des propriétés similaires. L'hélium liquide est largement utilisé comme réfrigérant, par exemple dans les aimants

supraconducteurs. Dans ce cas, on utilise bien sûr l'hélium naturel, c'est-à-dire la forme habituelle et la moins chère de l'hélium, ^{4}He.

Si l'hélium liquide est refroidi à des températures encore plus basses, des différences spectaculaires apparaissent entre les liquides des deux isotopes. Des effets quantiques apparaissent qui font que les liquides perdent toute résistance au mouvement interne : ils deviennent superfluides. Cela se produit à des températures très différentes pour les deux superfluides et ils présentent un large éventail de propriétés fascinantes, comme le fait de s'écouler librement par les ouvertures du récipient dans lequel ils sont conservés. Ces effets ne s'expliquent que par la physique quantique.

Des découvertes historiques

Le fait que l'hélium 4 devienne superfluide a été découvert par Piotr Kapitsa, entre autres, dès la fin des années 1930. Ce phénomène a été expliqué presque immédiatement par le jeune théoricien Lev Landau, qui a reçu le prix Nobel de physique en 1962 pour cette découverte (Kapitsa a également reçu le prix Nobel de physique, mais seulement en 1978). La transformation d'un liquide normal en liquide supraconducteur, qui se produit pour l'hélium 4 à environ 2 degrés au-dessus du zéro absolu, est un exemple de condensation de Bose-Einstein, un processus qui a également été observé plus récemment dans les gaz (voir le prix Nobel de physique décerné en 2001 à Eric Cornell, Wolfgang Ketterle et Carl Wieman).

Pour l'isotope ^{3}He, la transformation en un état superfluide n'a été découverte qu'au début des années 1970 par David Lee, Douglas Osheroff et Robert Richardson (lauréats du prix Nobel de physique en 1996). L'une des raisons pour lesquelles cette découverte a été si tardive est que la transformation se produit à une température beaucoup plus basse, environ 1 000 fois plus basse que pour l'hélium 4. Même si l'hélium 3 diffère de l'hélium 4 sur le plan de la physique quantique et ne peut pas subir directement la condensation de Bose-Einstein, cette découverte n'était pas inattendue. Grâce à la théorie microscopique de la supraconductivité présentée dans les années 1950 par Bardeen, Cooper et Schrieffer (voir ci-dessus), il existait un mécanisme, la formation de paires de Cooper, qui devait être observé de manière parallèle dans l'hélium 3 (fig. 32).

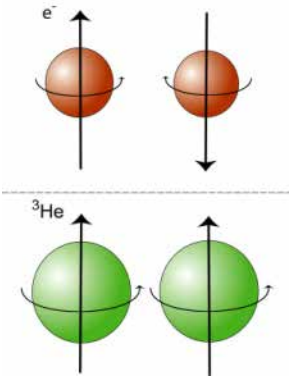


FIG. 32 – *La formation de paires qui se produit dans l'hélium 3 superfluide diffère de celle qui se produit entre les électrons dans un supraconducteur (paires de Cooper). Les propriétés magnétiques des atomes d'hélium agissent ensemble, tandis que celles des électrons se neutralisent.*

Le superfluide multiforme

Le théoricien qui est parvenu le premier à expliquer de manière décisive les propriétés du nouveau superfluide est Anthony Leggett, qui travaillait dans les années 1970 à l'université du Sussex en Angleterre. Sa théorie a aidé les expérimentateurs à interpréter leurs résultats et a fourni un cadre pour une explication systématique. La théorie de Leggett, qui a d'abord été formulée pour la superfluidité de l'hélium 3, s'est également avérée utile dans d'autres domaines de la physique, par exemple pour la physique des particules et la cosmologie.

En tant que superfluide, l'hélium 3 est constitué de paires d'atomes et ses propriétés sont beaucoup plus complexes que celles de l'hélium 4 superfluide. En particulier, les paires d'atomes du superfluide ont des propriétés magnétiques, ce qui signifie que le liquide est anisotrope : il a des propriétés différentes selon les directions. Ce fait a été utilisé dans des expériences sur le liquide immédiatement après sa découverte. Les mesures magnétiques ont révélé que le superfluide avait des propriétés très complexes et qu'il présentait un mélange de trois phases différentes. Ces trois phases ont des propriétés différentes et les proportions du mélange dépendent de la température, de la pression et des champs magnétiques externes (fig. 33).

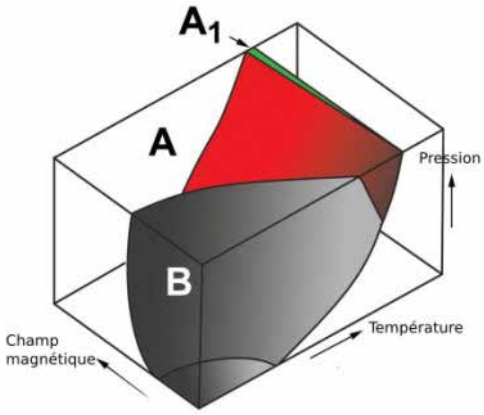


FIG. 33 – *L'hélium 3 superfluide peut exister sous trois phases appelées A, A1 et B. Le type de phase est déterminé par la pression, la température et le champ magnétique selon le diagramme de phase de la figure.*

L'hélium 3 superfluide est un outil que les chercheurs peuvent utiliser en laboratoire pour étudier d'autres phénomènes. En particulier, la formation de turbulences dans le superfluide a récemment été utilisée pour étudier comment l'ordre peut se transformer en chaos (fig. 34). Ces recherches pourraient permettre de mieux comprendre les mécanismes de formation de la turbulence, l'un des derniers problèmes non résolus de la physique classique.

Les lauréats

— Alekseï A. Abrikosov, né en 1928 à Moscou, docteur en physique en 1951 de l'institut des problèmes physiques de Moscou, scientifique émérite au laboratoire national d'Argonne aux États-Unis ;
— Vitaly L. Ginzburg, né en 1916 à Moscou, docteur en physique de l'université de Moscou, ancien chef du groupe de physique théorique à l'institut de physique P. N. Lebedev de Moscou ;
— Anthony J. Leggett, né en 1938 à Londres, docteur en physique en 1964 de l'université d'Oxford, professeur à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign aux États-Unis.

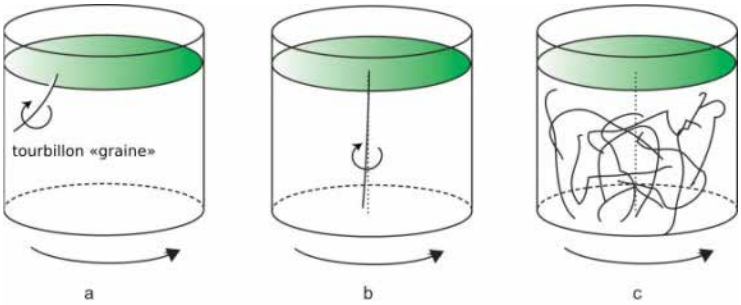


FIG. 34 – *On a récemment montré que si l'on crée un tourbillon dans un récipient en rotation contenant de l'hélium 3 superfluide (a), le résultat peut dépendre de façon critique de la température. Au-dessus d'une température critique, le tourbillon s'aligne le long de l'axe de rotation (b). En dessous de la température critique, on a une confusion de tourbillons (c).*

L'interaction forte expliquée

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2004 à

— David J. Gross, de l'institut Kavli de physique théorique de l'université de Californie à Santa Barbara,

— H. David Politzer, de l'institut de technologie de Californie à Pasadena,

— Frank Wilczek, de l'institut de technologie du Massachusetts,

« pour la découverte de la liberté asymptotique dans la théorie des interactions fortes ».

La découverte récompensée est d'une importance décisive pour notre compréhension de l'une des forces fondamentales de la nature, la force qui relie les plus petits éléments de la matière, les quarks. David Gross, David Politzer et Frank Wilczek ont permis, par leurs contributions théoriques, de compléter le modèle standard de la physique des particules, le modèle qui décrit les plus petits objets de la nature et la manière dont ils interagissent. En même temps, il s'agit d'une étape importante dans l'effort visant à fournir une description unifiée de toutes les forces de la nature, quelle que soit l'échelle spatiale, des distances les plus minuscules à l'intérieur du noyau atomique aux vastes distances de l'Univers.

L'interaction forte, souvent appelée force de couleur, est l'une des quatre forces fondamentales de la nature. Elle agit entre les quarks, les constituants des protons, des neutrons et des noyaux. Les progrès de la physique des particules ou leur pertinence pour notre vie quotidienne peuvent parfois sembler difficiles à appréhender pour quiconque n'a pas de connaissances en physique. Pourtant, lorsqu'on analyse un phénomène quotidien comme une pièce de monnaie qui tourne sur une table, ses mouvements sont déterminés par les forces fondamentales entre les éléments de base que sont les protons, les neutrons et les électrons. En fait, environ 80 % du poids de la pièce est dû aux mouvements et aux processus à l'intérieur des protons et des neutrons, c'est-à-dire à l'interaction entre les quarks. Le prix Nobel 2004 porte sur cette interaction, l'interaction forte ou force de couleur.

David Gross, David Politzer et Frank Wilczek ont découvert une propriété de l'interaction forte qui explique pourquoi les quarks ne se

comportent presque comme des particules libres qu'à des énergies élevées. Cette découverte a jeté les bases de la théorie de la force de couleur, dont le nom plus complet est « chromodynamique quantique ». Cette théorie a été testée en détail, en particulier ces dernières années au Laboratoire européen de physique des particules, le CERN à Genève.

Le modèle standard et les quatre forces de la nature

La première force qui a dû être évidente pour l'homme est la gravité. Il s'agit de l'interaction qui fait tomber les objets sur le sol, mais qui régit également les mouvements des planètes et des galaxies. La gravité peut sembler forte. Pensez, par exemple, aux grands cratères formés par les comètes qui ont frappé la Terre ou aux énormes fusées qui sont nécessaires pour lancer un satellite dans l'espace. Cependant, dans le microcosme, parmi les particules telles que les électrons et les protons, la force de gravité est extrêmement faible (fig. 35).

Les trois forces ou interactions, comme les physiciens préfèrent les appeler, qui s'appliquent au microcosme sont décrites par le modèle standard. Il s'agit de l'interaction électromagnétique, de l'interaction faible et de l'interaction forte. Grâce aux contributions de plusieurs lauréats du prix Nobel, le modèle standard bénéficie d'un statut théorique très solide. En effet, il s'agit de la seule description mathématique qui tienne compte à la fois de la théorie de la relativité d'Einstein et de la mécanique quantique.

Le modèle standard décrit les quarks, les leptons et les particules porteuses de force. Les quarks forment les protons et les neutrons du noyau atomique. Les électrons qui forment l'enveloppe extérieure des atomes sont des leptons et, pour autant que l'on sache, ne sont pas construits à partir de constituants plus petits. Les atomes s'assemblent pour former des molécules, les molécules construisent des structures et c'est ainsi que l'on peut enfin décrire l'ensemble de l'Univers.

L'interaction électromagnétique fournit de la lumière et de la cohésion

L'interaction électromagnétique est responsable d'un certain nombre de phénomènes courants dans le monde qui nous entoure, tels que la friction, le magnétisme et le fait que les objets que nous déposons ne tombent pas à travers le sol.

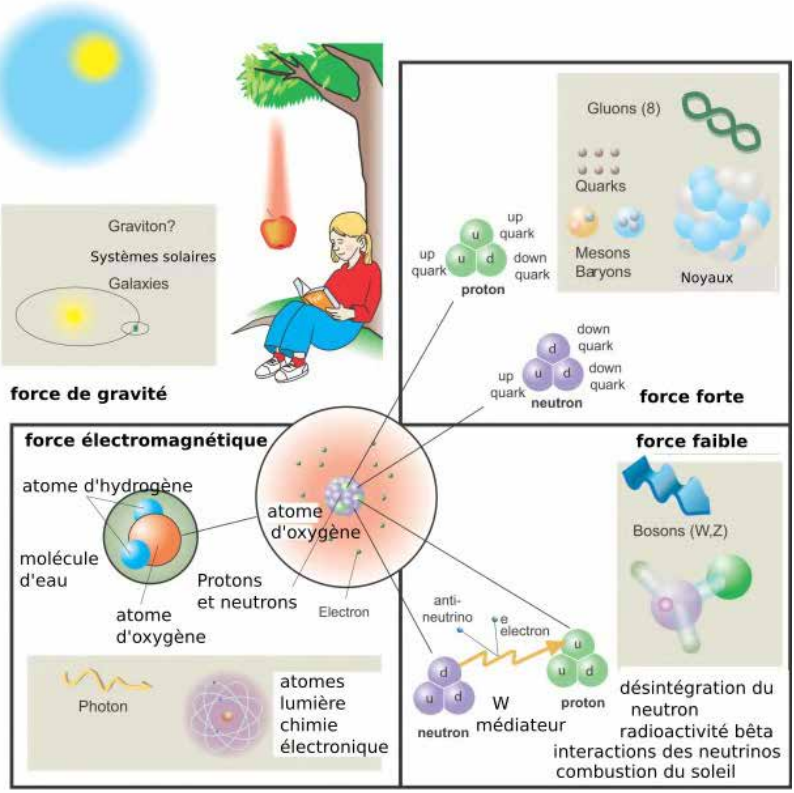


FIG. 35 – *Les quatre forces (ou interactions) de la nature, leurs particules médiatrices de force et les phénomènes ou particules qu'elles affectent. Les trois interactions qui régissent le microcosme sont toutes beaucoup plus puissantes que la gravité et ont été unifiées par le modèle standard.*

L'interaction électromagnétique qui lie un électron et un proton dans un atome d'hydrogène est 10^{41} fois plus forte que la gravité, un chiffre inconcevable. Pourtant, malgré la très grande différence de force entre les deux interactions, il existe plusieurs similitudes. L'intensité de l'interaction diminue avec le carré de la distance et a une longue portée. L'interaction électromagnétique et l'interaction gravitationnelle sont toutes deux transmises par des médiateurs de force, le graviton et le photon (la particule de lumière). Contrairement au photon, le graviton n'a pas encore été découvert. On peut démontrer que leur longue portée est due au fait qu'ils n'ont pas de masse au repos. Les photons du Soleil sont nécessaires à la vie sur Terre. Cependant, lorsque l'énergie est produite par la fusion au centre du Soleil, les deux autres interactions du modèle standard jouent également un rôle important. Le photon possède une propriété remarquable : il est électriquement neutre mais se couple avec des charges électriques. C'est pourquoi les photons n'interagissent pas entre eux.

L'interaction électromagnétique est décrite par la théorie de l'électrodynamique quantique, l'une des théories les plus abouties de la physique. Elle concorde avec les résultats des expériences avec une précision proche d'un sur dix millions. Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger et Richard Feynman ont reçu le prix Nobel pour cette théorie en 1965. L'une des raisons de ce succès est que l'équation contient une petite constante, appelée constante de structure fine ou constante de couplage, α_{em}, d'une valeur égale à $1/137$, qui est considérablement plus petite que 1. Cela permet de calculer les effets électromagnétiques comme un développement en série de la petite constante, une méthode mathématique élégante appelée calcul des perturbations, qui a été largement développée par Feynman.

Une propriété importante de l'électrodynamique quantique est que l'on peut montrer que la constante de structure fine varie avec l'énergie ; elle augmente avec l'énergie. Dans les accélérateurs actuels, par exemple l'accélérateur LEP du CERN, la valeur a été mesurée à $1/128$ au lieu de $1/137$ à des énergies correspondant à environ 100 milliards d'électronvolts. Si l'on représente la dépendance énergétique de la constante de structure fine par rapport à l'énergie, la courbe est légèrement ascendante. Les physiciens théoriciens disent que la dérivée, ou fonction bêta, est positive.

L'interaction faible : la désintégration radioactive

L'interaction faible est portée par les bosons $W^{\pm}$ et Z^0, des particules qui, contrairement au photon et au graviton, ont des masses très importantes (environ 100 fois la masse d'un proton). C'est pourquoi l'interaction a une faible portée. Elle agit à la fois sur les quarks et les leptons. Elle est responsable de certaines désintégrations radioactives et étroitement liée à l'interaction électromagnétique. On dit que les deux interactions sont réunies dans l'interaction électrofaible, qui a été élucidée dans les années 1970. Gerardus 't Hooft et Martinus Veltman ont reçu le prix Nobel 1999 pour la formulation finale de cette théorie.

L'interaction forte : charge et couleur

On sait depuis les années 1960 que le proton et le neutron sont composites et constitués de quarks. Cependant, il n'était curieusement pas possible de produire des quarks libres. Ils sont confinés, une propriété fondamentale de ces briques. Seuls des agrégats de deux ou trois quarks peuvent exister librement comme par exemple dans le proton. Les quarks ont des charges électriques qui sont une fraction de celle du proton, $-1/3$ ou $+2/3$, une caractéristique étrange qui n'a pas encore été expliquée. Chaque quark, en plus de sa charge électrique, possède également une propriété particulière qui comme sa charge électrique est quantifiée, c'est-à-dire qu'elle ne peut prendre que certaines valeurs. Cette propriété est appelée « charge de couleur », en raison de sa similitude avec le concept de couleur.

Les quarks peuvent porter des charges de couleur rouge, bleu ou vert. Pour chaque quark, il existe un antiquark, de la même manière que l'électron a une antiparticule, le positron. Les antiquarks portent les charges de couleur antirouge, antibleu ou antivert. Les agrégats de quarks qui peuvent exister librement sont de couleur neutre. Les trois quarks du proton (u, u et d) ont des charges de couleur différentes, de sorte que la charge de couleur totale est blanche (ou neutre). De la même manière que les molécules électriquement neutres peuvent former des liaisons (grâce à l'attraction entre leurs parties positives et négatives), l'échange de forces entre les protons et les neutrons dans le noyau se produit grâce aux forces de couleur qui s'échappent de leurs quarks et de leurs particules médiatrices de forces.

La force entre les quarks est portée par les gluons (du mot « glu »), qui comme les photons n'ont pas de masse. Toutefois, contrairement

aux photons, les gluons possèdent également la propriété de charge de couleur, composée d'une couleur et d'une anticouleur. C'est cette propriété qui rend la force de couleur si complexe et si différente de la force électromagnétique.

Un couplage plus faible libère les particules

Pendant longtemps, les physiciens ont cru qu'il serait impossible de trouver une théorie permettant de calculer les effets de l'interaction forte entre les quarks de la même manière que pour l'interaction électromagnétique ou pour l'interaction faible. Si l'on étudie, par exemple, l'interaction entre deux protons dans un noyau, on obtient d'assez bons résultats en la décrivant comme un échange de mésons pi, idée qui a valu à Hideki Yukawa le prix Nobel en 1949. Une constante de couplage supérieure à 1 est cependant nécessaire, ce qui signifie que les calculs de perturbation de Feynman (voir ci-dessus) ne peuvent pas être utilisés. Malheureusement, il n'existe toujours pas de méthode satisfaisante pour calculer ces effets d'interaction forte.

La situation semble être encore pire pour les énergies plus élevées. Si la fonction bêta (la façon dont la constante de couplage change avec l'énergie) est positive, l'interaction sera encore plus forte et les calculs deviendront de plus en plus absurdes.

Le physicien théoricien allemand Kurt Symanzik (décédé depuis) s'est rendu compte que le seul moyen de parvenir à une théorie raisonnable était d'en trouver une avec une fonction bêta négative. Cela expliquerait également pourquoi les quarks peuvent parfois apparaître comme des particules libres, des grains, à l'intérieur du proton — un effet qui avait été observé lors d'expériences de diffusion entre les électrons et les protons.

Malheureusement, Symanzik lui-même n'a pas trouvé de théorie qui convienne. Bien que Gerardus 't Hooft ait été très proche d'en découvrir une au cours de l'été 1972, les physiciens ont commencé à désespérer. Des « preuves » ont même été présentées selon lesquelles toutes les théories réalistes auraient une fonction bêta positive. Nous savons aujourd'hui que c'était faux, car en juin 1973, les lauréats de 2004 sont entrés dans l'arène. Deux publications consécutives dans la revue *Physical Review Letters*, l'une de Gross et Wilczek et l'autre de Politzer, annonçaient la découverte étonnante que la fonction bêta pouvait être négative. Lorsque cette découverte a été faite, ces physiciens étaient très jeunes : Wilczek et Politzer étaient encore des étudiants de troisième

cycle.

Selon leurs théories, les médiateurs de force, les gluons, ont une propriété unique et très inattendue, à savoir qu'ils interagissent non seulement avec les quarks, mais aussi entre eux. Cette propriété signifie que plus les quarks sont proches les uns des autres, plus la charge de couleur des quarks est faible et plus l'interaction est faible. Les quarks se rapprochent les uns des autres lorsque l'énergie augmente, de sorte que l'intensité de l'interaction diminue avec l'énergie. Cette propriété, appelée liberté asymptotique, signifie que la fonction bêta est négative. En revanche, la force d'interaction augmente avec la distance, ce qui signifie qu'un quark ne peut pas être retiré d'un noyau atomique. La théorie a confirmé les expériences : les quarks sont confinés, par groupes de trois, à l'intérieur du proton et du neutron, mais peuvent être visualisés comme des « grains » dans des expériences appropriées.

La liberté asymptotique permet de calculer l'interaction à petite distance pour les quarks et les gluons, en supposant qu'il s'agit de particules libres. En faisant entrer en collision les particules à des énergies très élevées, il est possible de les rapprocher suffisamment. Lorsqu'on a découvert la liberté asymptotique et formulé une théorie, la chromodynamique quantique, qui était asymptotiquement libre, on a pu effectuer pour la première fois des calculs qui ont montré une excellente concordance avec les expériences (fig. 36).

Les gerbes de particules révèlent la vérité

Une confirmation importante de la chromodynamique quantique est fournie par les collisions entre les électrons et leurs antiparticules, les positrons, avec une énergie cinétique très élevée, lorsqu'ils s'annihilent l'un l'autre. Selon l'équation d'Einstein $E = mc^2$, l'énergie cinétique peut être transformée en nouvelles particules, par exemple en quarks dotés d'une masse et d'une énergie cinétique. Ces quarks sont créés très profondément dans le processus, très proches les uns des autres, mais en s'éloignant les uns des autres à une vitesse extrêmement élevée. Grâce à la liberté asymptotique de la chromodynamique quantique, il est désormais possible de calculer ce processus.

Certes, lorsque les quarks se sont éloignés les uns des autres, ils sont influencés par des forces de plus en plus fortes qui conduisent finalement à la création de nouvelles particules quark-antiquark. Une gerbe de particules apparaît respectivement dans la direction des quarks et des antiquarks d'origine. Mais le processus conserve une « mémoire » de la

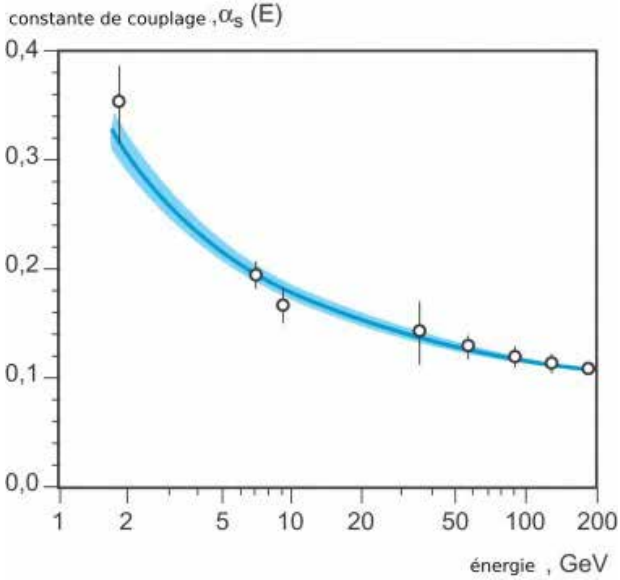


FIG. 36 – *La valeur de la constante de couplage « courante » α_s en fonction de l'énergie* E. *La courbe qui s'incline vers le bas (fonction bêta négative) est une prédiction de la liberté asymptotique en chromodynamique quantique. Comme on peut le voir, elle est en accord très étroit avec les mesures qui ont été faites.*

première partie asymptotiquement libre qui peut être calculée, donnant une valeur pour la probabilité d'occurrence de ces événements à deux gerbes qui est en accord avec les observations.

Les occurrences de trois gerbes découvertes à l'accélérateur DESY de Hambourg à la fin des années 1970 sont peut-être encore plus convaincantes. Ces événements peuvent être interprétés avec succès comme un gluon rayonnant loin d'un quark ou d'un antiquark (fig. 37).

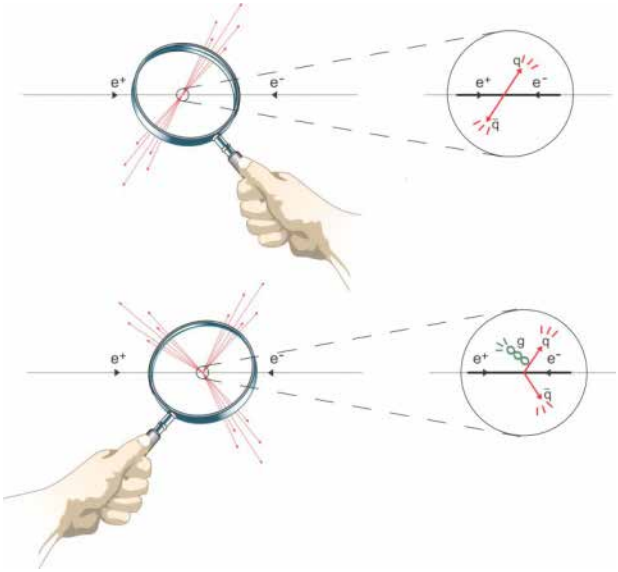


FIG. 37 – *Occurrences de deux ou trois gerbes de particules observées lors de collisions entre électrons et positrons. La partie agrandie montre l'interprétation de la chromodynamique quantique, qui permet également des calculs détaillés de la probabilité de ces occurrences. Ces probabilités concordent très bien avec les données mesurées (*e^- *= électron,* e^+ *= positron,* q = *quark,* $\overline{q}$ = *antiquark,* g= *gluon).*

La liberté asymptotique de la chromodynamique quantique, découverte par les lauréats de 2004, a également fourni aux physiciens une explication d'un phénomène observé plusieurs années auparavant à l'accélérateur de Stanford (Friedman, Kendall et Taylor, prix Nobel en 1990). Les constituants du proton, chargés électriquement, se comportent comme des particules libres lorsqu'ils sont percutés si fort qu'ils reçoivent une énergie élevée. En estimant la quantité de mouvement

du proton correspondant à ses constituants chargés (les quarks), il est également devenu évident qu'environ la moitié de la quantité de mouvement du proton était constituée d'autre chose : des gluons !

Les forces de la nature peuvent-elles être unifiées ?

L'effet le plus séduisant de la liberté asymptotique de la chromodynamique quantique est peut-être qu'elle ouvre la possibilité d'une description unifiée des forces de la nature. Lorsqu'on examine la dépendance par rapport à l'énergie des constantes de couplage pour l'interaction électromagnétique, l'interaction faible et l'interaction forte, il est évident qu'elles se rejoignent presque, mais pas tout à fait, en un point et qu'elles ont la même valeur à une énergie très élevée. Si elles se rejoignent effectivement en un point, on peut supposer que les trois interactions peuvent être unifiées, un vieux rêve des physiciens, qui souhaitent décrire les lois de la nature dans le langage le plus simple possible (fig. 38).

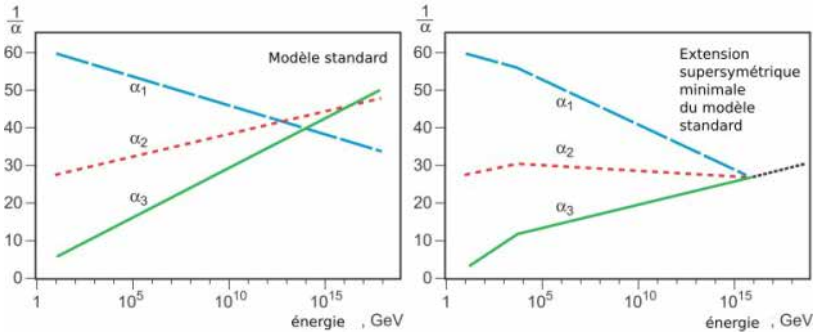


FIG. 38 – *Constantes de couplage courantes dans le modèle standard (à gauche) et avec l'introduction de la supersymétrie (à droite). Dans le modèle standard, les trois droites, qui représentent l'inverse de la constante de couplage pour les trois forces fondamentales, ne se rejoignent pas en un point. Mais avec l'introduction de la supersymétrie et en supposant que les particules supersymétriques ne sont pas plus lourdes qu'environ 1* $\mathrm{TeV/c^2}$*, elles se rejoignent en un point. Cela indique-t-il que la supersymétrie sera découverte dans le prochain accélérateur du CERN, le grand collisionneur de hadrons, ou s'agit-il simplement d'une coïncidence ?*

Le modèle standard doit cependant être modifié si l'on veut réaliser le rêve de l'unification des forces de la nature. L'une des possibilités consiste à introduire un nouvel ensemble de particules, les particules supersymétriques, qui pourraient avoir une masse suffisamment faible pour être étudiées dans l'accélérateur LHC actuellement en construction au CERN à Genève.

Si l'on découvre la supersymétrie, les théories des cordes s'en trouveront renforcées et la gravitation pourrait même être unifiée avec les trois autres interactions. Le modèle standard doit également être modifié pour intégrer les propriétés récemment découvertes des neutrinos, à savoir qu'ils ont une masse différente de zéro. En outre, cela permettrait peut-être d'expliquer un certain nombre d'autres énigmes cosmologiques, telles que la matière noire qui semble dominer l'espace. Quoi qu'il en soit, il est clair que la découverte fantastique et inattendue de la liberté asymptotique dans la chromodynamique quantique (fig. 39) a profondément modifié notre compréhension du fonctionnement des forces fondamentales de la nature.

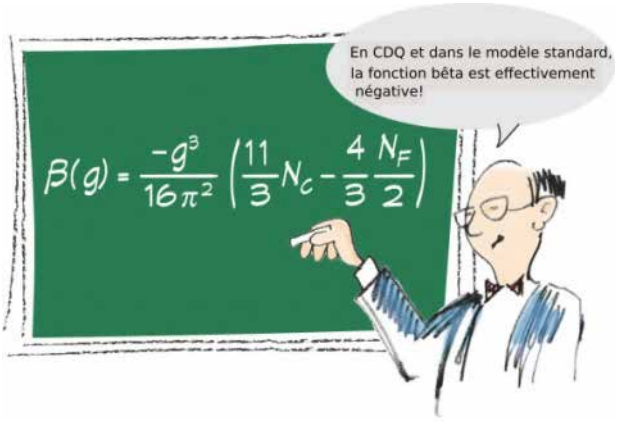


FIG. 39 – *La formule qui décrit la découverte. Ici, g est la constante de couplage,* N_c *le nombre de couleurs (= 3 en chromodynamique quantique [CDQ]),* N_F *le nombre de quarks (= 6 dans le modèle standard).*

Les lauréats

— David J. Gross, né en 1941 à Washington, docteur en physique en 1966 de l'université de Californie à Berkeley, professeur à l'institut Kavli de physique théorique de l'université de Californie à Santa Barbara ;
— H. David Politzer, né en 1949, docteur en physique en 1974 de l'université Harvard, professeur au département de physique de l'institut de technologie de Californie à Pasadena ;
— Frank A. Wilczek, né en 1951 à Queens dans l'État de New York, docteur en physique en 1974 de l'université de Princeton, professeur au département de physique de l'institut de technologie du Massachusetts.

Quelles sont les limites du mesurable ?

Le prix Nobel de physique 2005 a été attribué pour moitié à Roy J. Glauber

> « pour sa contribution à la théorie quantique de la cohérence optique ».

L'autre moitié du prix est attribuée conjointement à John L. Hall et Theodor W. Hänsch

> « pour leurs contributions au développement de la spectroscopie laser de précision, y compris la technique du peigne de fréquences optiques ».

Ce prix a été décerné à trois scientifiques dans le domaine de l'optique. Roy Glauber reçoit la moitié du prix pour sa description théorique du comportement des particules de lumière. John Hall et Theodor Hänsch se partagent l'autre moitié du prix pour leur développement de la spectroscopie laser de précision, c'est-à-dire la détermination de la couleur de la lumière des atomes et des molécules avec une extrême précision.

Ondes ou particules ?

La lumière, composée d'ondes électromagnétiques, nous permet d'acquérir la plupart de nos connaissances sur le monde qui nous entoure. Grâce à la lumière, nous pouvons nous orienter dans notre vie quotidienne ou observer les galaxies les plus lointaines de l'Univers. L'optique est devenue l'outil du physicien pour traiter les phénomènes lumineux. Mais qu'est-ce que la lumière et en quoi les différents types de lumière diffèrent-ils les uns des autres ? En quoi la lumière émise par une bougie diffère-t-elle du faisceau produit par un laser dans un lecteur de CD ? Selon Albert Einstein, la vitesse de la lumière dans le vide est constante. Est-il possible d'utiliser la lumière pour mesurer le temps avec une plus grande précision qu'avec les horloges atomiques d'aujourd'hui ? C'est à ce genre de questions que les lauréats du prix Nobel de physique 2005 ont répondu.

À la fin du XIX^{e} siècle, on pensait que les phénomènes électromagnétiques pouvaient être expliqués au moyen de la théorie présentée par

le physicien écossais James Clerk Maxwell, qui considérait la lumière comme des ondes. Mais un problème inattendu s'est posé lorsque l'on a essayé de comprendre le rayonnement de la matière incandescente, comme le Soleil par exemple. La répartition de l'intensité des couleurs ne correspondait pas du tout aux théories élaborées sur la base des travaux de Maxwell. Le rayonnement violet et ultraviolet du Soleil aurait dû être beaucoup plus important que ce qui était observé.

Ce dilemme a été résolu en 1900 par Max Planck (prix Nobel 1918), qui a découvert une formule correspondant parfaitement à la distribution spectrale observée. Planck a décrit cette distribution comme le résultat de l'état vibratoire interne de la matière chauffée. Dans l'un de ses célèbres articles publiés en 1905, Einstein a proposé que l'énergie de rayonnement, c'est-à-dire la lumière, se présente également sous la forme de paquets d'énergie individuels, appelés quanta. Lorsqu'un tel paquet d'énergie pénètre la surface d'un métal, son énergie est transférée à un électron, qui est libéré et quitte le matériau : c'est l'effet photoélectrique, dont l'interprétation a été récompensée par le prix Nobel d'Einstein en 1921.

L'hypothèse d'Einstein signifie qu'un seul paquet d'énergie, appelé plus tard photon, donne toute son énergie à un seul électron. Nous pouvons donc compter les quanta dans le rayonnement en observant et en comptant le nombre d'électrons, c'est-à-dire le courant électrique provenant de la surface du métal. Presque tous les détecteurs de lumière ultérieurs sont basés sur cet effet.

Lorsque la théorie quantique a été développée dans les années 1920, elle a rencontré des difficultés sous la forme d'expressions infinies et dépourvues de sens. Ce problème n'a été résolu qu'après la seconde guerre mondiale avec le développement de l'électrodynamique quantique (prix Nobel de physique 1965 à Tomonaga, Schwinger et Feynman). L'électrodynamique quantique est devenue la théorie la plus précise de la physique et a joué un rôle central dans le développement de la physique des particules. Cependant, au début, il a été jugé inutile d'appliquer l'électrodynamique quantique à la lumière visible. Celle-ci devait être traitée comme un mouvement ondulatoire ordinaire avec un certain nombre de variations aléatoires d'intensité. Une description quantique détaillée n'a pas été jugée nécessaire.

La lumière organisée et la lumière aléatoire

Jusqu'au développement du laser et de dispositifs similaires, la plupart des phénomènes lumineux pouvaient être compris à l'aide de la théorie classique de Maxwell. Un exemple est illustré à la figure 40a, où la lumière qui tombe à travers deux fentes produit une figure périodique en intensité sur un écran. Si la lumière est constituée d'une seule longueur d'onde et si elle est cohérente (figure 40b), son intensité est généralement nulle dans les zones d'intensité minimale.

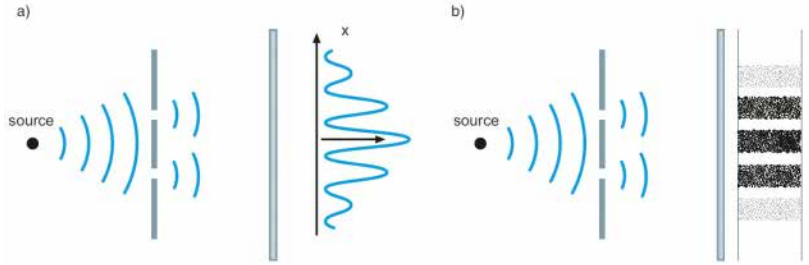


FIG. 40 – *La différence entre une observation classique et une observation quantique de la lumière. Le passage de la lumière à travers deux fentes lorsqu'elle est observée comme a) une onde électromagnétique et b) un flux de particules. Notez que la même figure d'interférence se produit en tant qu'interaction entre deux ondes dans le premier cas ou en tant que distribution de particules individuelles dans le second cas.*

Une description plus réaliste s'impose lorsque l'on considère la lumière d'une ampoule. Ses ondes lumineuses ont des fréquences et des longueurs d'onde différentes ; elles sont de plus déphasées les unes par rapport aux autres. On considère que la source est affectée par un bruit aléatoire. Cette lumière incohérente peut être décrite comme dans la figure 41b. Ainsi, l'incohérence rend la figure d'interférence de la figure 40a moins distincte.

Auparavant, la plupart des sources de lumière étaient basées sur le rayonnement thermique : des dispositifs spéciaux étaient nécessaires pour observer la figure d'interférence. Cette situation a changé lorsque le laser, avec sa lumière parfaitement cohérente, a été mis au point. Les rayonnements avec une phase et une fréquence bien définies étaient bien connus de la technologie radio. Mais il semblait étrange de considérer la lumière provenant d'une source de lumière thermique comme un

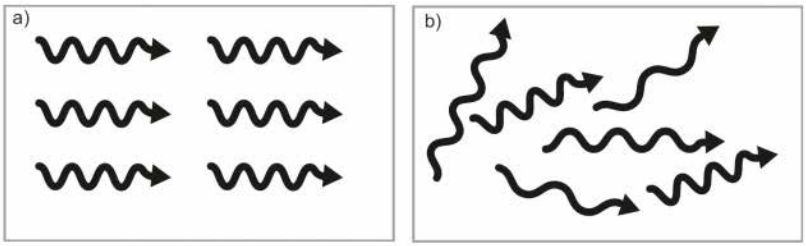


FIG. 41 – *La différence entre a) un rayonnement cohérent et b) un rayonnement incohérent. Dans une lumière cohérente, les rayons ont la même phase, la même longueur d'onde et la même direction.*

mouvement ondulatoire ; il semblait plus facile de décrire le désordre qui en découlait comme des photons distribués de manière aléatoire.

La naissance de l'optique quantique

La moitié du prix Nobel de physique de 2005 a été attribuée à Roy J. Glauber pour son travail novateur dans l'application de la physique quantique aux phénomènes optiques. En 1963, il a présenté ses résultats. Il a développé une méthode permettant d'utiliser la quantification électromagnétique pour comprendre les observations optiques. Il a proposé une description cohérente de la détection photoélectrique à l'aide de la théorie quantique des champs. On est maintenant en mesure de montrer que le « groupement » découvert par R. Hanbury Brown et R. Twiss est une conséquence naturelle de la nature aléatoire du rayonnement thermique. Un faisceau laser cohérent idéal ne présente pas du tout le même effet.

Mais comment un flux de photons, particules indépendantes, peut-il donner lieu à des figures d'interférence ? Voilà un exemple de la double nature de la lumière. L'énergie électromagnétique est transmise selon des figures déterminées par l'optique classique. De telles distributions d'énergie forment le paysage dans lequel les photons peuvent être répartis. Ceux-ci sont des individus distincts, mais ils doivent suivre les chemins prescrits par l'optique. C'est ce qui explique le terme d'optique quantique. Pour les faibles intensités lumineuses, l'état ne sera décrit que par quelques photons. Les observations des particules individuelles construiront les motifs de l'optique après qu'un nombre suffisant de photoélectrons auront été observés. Au lieu de la figure 40a, la physique

quantique décrirait la formation du modèle comme dans la figure 40b.

Une caractéristique essentielle de la description quantique des observations optiques est que, lorsqu'un photoélectron est observé, un photon a été absorbé et l'état du champ de photons a subi un changement. Lorsque plusieurs détecteurs sont corrélés, le système devient sensible aux effets quantiques, qui seront plus évidents si seuls quelques photons sont présents dans le champ. Des expériences impliquant plusieurs photo-détecteurs ont été réalisées par la suite ; elles sont toutes décrites par la théorie de Glauber.

Les travaux de Glauber en 1963 ont jeté les bases des développements ultérieurs dans le nouveau domaine de l'optique quantique. Il est rapidement devenu évident que les développements techniques rendaient nécessaire l'utilisation de la nouvelle description quantique des phénomènes.

Un effet observable de la nature quantique de la lumière est l'opposé du « groupement » susmentionné que présentent les photons. C'est ce qu'on appelle « le dégroupement ». Le fait est que, dans certaines situations, les photons apparaissent plus rarement par paires que dans un signal purement aléatoire. Ces photons proviennent d'un état quantique qui ne peut en aucun cas être décrit comme des ondes classiques. En effet, un processus quantique peut aboutir à un état où les photons sont bien séparés, contrairement aux résultats d'un processus purement aléatoire.

La physique quantique fixe les limites ultimes et promet de nouvelles applications

Dans les applications techniques, les effets quantiques sont souvent très faibles. L'état du champ est choisi de manière à pouvoir lui attribuer des propriétés de phase et d'amplitude bien définies. Dans les mesures de laboratoire également, l'incertitude de la physique quantique fixe rarement la limite. Mais l'incertitude qui existe néanmoins apparaît comme une variation aléatoire dans les observations. Ce « bruit quantique » fixe la limite ultime de la précision des observations optiques. Dans les mesures de fréquence à haute résolution, les amplificateurs quantiques et les étalons de fréquence, c'est finalement la nature quantique de la lumière qui fixe une limite à la précision de nos appareils.

Nos connaissances sur les états quantiques peuvent également être utilisées directement. Nous pouvons obtenir des applications techniques

entièrement nouvelles des phénomènes quantiques, par exemple pour permettre un cryptage sûr des messages dans le cadre des technologies de l'information et de la communication.

Spectroscopie laser de précision

L'histoire nous apprend que de nouveaux phénomènes sont régulièrement découverts grâce à l'amélioration de la précision des mesures. La spectroscopie atomique, qui étudie la structure des niveaux d'énergie dans les atomes, en est un excellent exemple. L'amélioration de la résolution nous a permis de mieux comprendre la structure fine des atomes et les propriétés du noyau atomique. L'autre moitié du prix Nobel de physique 2005, décerné à John L. Hall et Theodor W. Hänsch, récompense la recherche et le développement dans le domaine de la spectroscopie laser de précision, où la technique du peigne de fréquences optiques présente un intérêt particulier. Les progrès réalisés dans ce domaine scientifique peuvent nous permettre d'étudier des constantes de la nature, de découvrir la différence entre la matière et l'antimatière et de mesurer le temps avec une précision inégalée. La spectroscopie de précision a été développée en essayant de résoudre des problèmes clairs et simples, comme indiqué ci-dessous.

Quelle est la longueur d'un mètre ?

Le problème de la détermination de la longueur exacte d'un mètre illustre l'un des défis posés par la spectroscopie laser. La Conférence générale des poids et mesures, qui a le droit de décider des définitions exactes depuis 1889, a abandonné en 1960 la barre de mesure purement matérielle, qui était conservée sous clé à Paris et dont la longueur ne pouvait que difficilement être distribuée dans le monde entier.

En utilisant des mesures de spectres, on a introduit une définition basée sur l'atome : un mètre a été défini comme un certain nombre de longueurs d'onde d'une certaine raie spectrale dans le krypton, un gaz inerte. Quelques années plus tard, on a également introduit une définition de la seconde basée sur l'atome : le durée d'un certain nombre d'oscillations liées à la fréquence de résonance d'une transition particulière dans le césium, qui pouvait être lue sur les horloges atomiques au césium. Ces définitions ont permis de déterminer la vitesse de la lumière, qui est le produit de la longueur d'onde et de la fréquence.

John Hall a joué un rôle de premier plan dans les efforts visant à mesurer la vitesse de la lumière en utilisant des lasers avec une fréquence extrêmement stable. La précision de cette mesure était toutefois limitée par la définition du mètre qui avait été choisie. En 1983, la vitesse de la lumière a donc été définie comme étant exactement de 299 792 458 m/s, en accord avec les meilleures mesures, mais désormais avec une erreur nulle ! En conséquence, un mètre est la distance parcourue par la lumière en 1/299 792 458 s.

Cependant, la mesure de fréquences optiques de l'ordre de 10^{15} Hz s'est avérée extrêmement difficile, car l'horloge au césium présente des oscillations environ 10^5 fois plus lentes. Une longue chaîne de lasers et de sources micro-ondes hautement stabilisés a dû être utilisée pour surmonter ce problème. L'utilisation pratique de la nouvelle définition du mètre sous la forme de longueurs d'onde précises reste problématique. Le besoin d'une méthode simplifiée de mesure de la fréquence est évident.

Parallèlement à ces événements, le laser a connu un développement rapide en tant qu'instrument spectroscopique standard. Des méthodes ont également été mises au point pour éliminer l'effet Doppler qui, s'il n'est pas traité, entraîne des pics plus larges et mal identifiables dans un spectre. En 1981, N. Bloembergen et A. L. Schawlow ont reçu le prix Nobel de physique pour leur contribution au développement de la spectroscopie laser. Cette dernière devient particulièrement intéressante lorsqu'un niveau de précision extrême peut être atteint, ce qui permet d'aborder des questions fondamentales sur la nature. Hall et Hänsch ont joué un rôle déterminant dans ce processus, en développant des systèmes laser extrêmement stables en fréquence et des techniques de mesure avancées qui permettent d'approfondir notre connaissance des propriétés de la matière, de l'espace et du temps.

Le peigne de fréquences, un nouveau dispositif de mesure

La mesure des fréquences avec une très grande précision nécessite un laser qui émet un grand nombre d'oscillations de fréquences cohérentes. Si de telles oscillations de fréquences différentes sont reliées entre elles, il en résulte des impulsions extrêmement courtes causées par des interférences. Toutefois, cela ne se produit que si les différentes oscillations (modes) sont verrouillées l'une par rapport à l'autre dans ce que l'on appelle le verrouillage de mode (figure 42). Plus il y a d'oscillations différentes qui peuvent être verrouillées, plus les impulsions sont

courtes. Une impulsion de 5 fs (une femtoseconde vaut 10^{-15} s, soit un millionième de milliardième de seconde) verrouille environ un million de fréquences différentes, qui doivent couvrir une grande partie de la gamme des fréquences visibles. Aujourd'hui, cela est possible grâce à des supports laser tels que des colorants ou des cristaux de saphir dopés au titane. Une minuscule « boule de lumière » rebondit entre les miroirs du laser parce qu'un grand nombre de modes de fréquence nets et uniformément répartis brillent en permanence ! Une partie de la lumière est libérée sous la forme d'un train d'impulsions laser à travers le miroir partiellement transparent situé à l'une des extrémités. Comme les lasers pulsés transmettent également des fréquences nettes, ils peuvent être utilisés pour la spectroscopie laser à haute résolution. Hänsch l'a compris dès la fin des années 1970 et a réussi à le montrer expérimentalement. À Novosibirsk, V. P. Chebotayev (mort en 1992) est également parvenu à une conclusion similaire.

La véritable percée n'a toutefois eu lieu que vers 1999, lorsque Hänsch a compris que les lasers à impulsions extrêmement courtes disponibles à l'époque pouvaient être utilisés pour mesurer les fréquences optiques directement par rapport à l'horloge au césium. En effet, ces lasers disposent d'un peigne de fréquences couvrant l'ensemble du domaine visible. La technique du peigne de fréquences optiques, comme on l'a appelée par la suite, est donc basée sur une gamme de fréquences uniformément réparties, un peu comme les dents d'un peigne ou les marques d'une règle. Une fréquence inconnue à déterminer peut être reliée à l'une des fréquences le long du « bâton de mesure ». Hänsch et ses collègues ont démontré de manière convaincante que les marques de fréquence étaient réellement réparties uniformément avec une extrême précision. Un problème se pose toutefois : comment déterminer la valeur absolue de la fréquence ? Même si la séparation est très bien définie entre les dents du peigne, il se produit un déplacement inconnu de la fréquence commune. Cet écart doit être déterminé avec précision si l'on veut mesurer une fréquence inconnue. Hänsch a mis au point une technique permettant de stabiliser la fréquence, mais le problème n'a pas été résolu de manière pratique et simple jusqu'à ce que Hall et ses collaborateurs présentent une solution aux alentours de l'an 2000. Si le peigne de fréquences peut être rendu si large que les fréquences les plus élevées sont plus de deux fois plus élevées que les plus basses (une octave d'oscillations), le déplacement de la fréquence, f_0, peut être calculé par une simple soustraction impliquant les fréquences

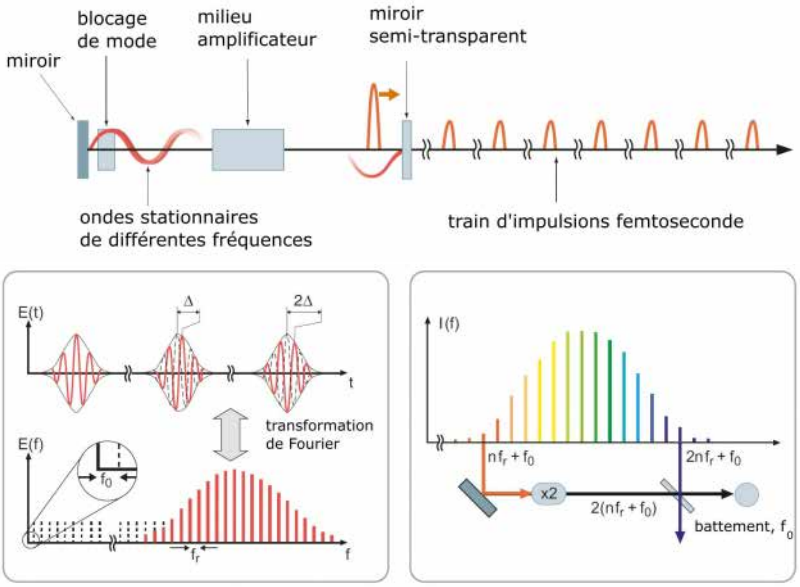


FIG. 42 – *Principes de la technique du peigne de fréquences. La partie supérieure du diagramme montre schématiquement comment les impulsions laser sont créées. Le diagramme inférieur, à gauche, montre à la fois la dépendance des impulsions par rapport au temps, où chaque impulsion ne contient que quelques vibrations, et la façon dont les modes sont répartis entre différentes fréquences. La distribution spectrale consiste en un peigne de fréquences dont la séparation est extrêmement bien définie. Le point zéro du spectre est cependant inconnu et représente un déplacement f_0. Grâce à des techniques optiques non linéaires, les fréquences du spectre peuvent être doublées, comme le montre le diagramme inférieur droit. Sa fréquence la plus basse peut alors être comparée à sa fréquence la plus élevée d'origine et le déplacement f_0 peut être déterminé.*

aux extrémités de l'octave (fig. 42) :

$$2f_n - f_{2n} = 2(nf_r + f_0) - (2nf_r + f_0) = f_0.$$

Il est possible de créer des impulsions de ce type avec une gamme de fréquences suffisamment large dans ce que l'on appelle les fibres à cristaux photoniques, dans lesquelles le matériau est partiellement remplacé par des canaux remplis d'air. Dans ces fibres, un large spectre de fréquences peut être généré par la lumière elle-même. Hänsch, Hall et leurs collègues ont ensuite, en partie dans le cadre d'une collaboration, affiné ces techniques pour en faire un instrument simple qui est déjà largement utilisé et disponible dans le commerce. Une fréquence laser précise inconnue peut désormais être mesurée en observant le battement entre cette fréquence et la dent la plus proche dans le peigne de fréquences. Ce battement se situera dans une gamme de radiofréquences facilement gérable. Ceci est analogue au fait que le battement entre deux diapasons peut être entendu à une fréquence beaucoup plus basse que les sons individuels.

Les techniques de peigne de fréquences ont récemment été étendues à l'ultraviolet extrême, qui peut être atteint en générant des harmoniques à partir d'impulsions courtes. Cela pourrait signifier qu'une précision extrême peut être atteinte à des fréquences très élevées, ce qui permettrait de créer des horloges encore plus précises aux fréquences des rayons X.

Un autre aspect de la technique du peigne de fréquences est que le contrôle de la phase optique qu'elle permet est également de la plus haute importance dans les expériences avec des impulsions femtosecondes ultra-courtes et dans l'interaction entre la matière et un laser ultra-intense. Les harmoniques élevées, réparties uniformément en fréquence, peuvent être verrouillées en phase les unes par rapport aux autres, ce qui permet de générer des impulsions attosecondes individuelles d'une longueur d'environ 100 as (1 as = 10^{-18} s) par interférence, de la même manière que dans le verrouillage de mode décrit ci-dessus. Cette technique est donc extrêmement importante pour les mesures de précision à la fois en fréquence et en temps.

Perspectives d'avenir

Il semble désormais possible, grâce à la technique du peigne de fréquences, de réaliser à l'avenir des mesures de fréquence avec une précision proche d'un sur 10^{18}. Cela conduira bientôt à l'introduction

d'une nouvelle horloge optique standard. Quels sont les phénomènes et les problèmes de mesure qui peuvent tirer parti de cette précision extrême ?

Cette précision rendra les systèmes de navigation par satellite (GPS) plus exacts. La précision sera nécessaire, par exemple, pour la navigation lors de longs voyages dans l'espace et pour les réseaux de télescopes basés dans l'espace qui recherchent les ondes gravitationnelles ou effectuent des tests de précision de la théorie de la relativité. Des applications dans le domaine des télécommunications pourraient également voir le jour.

Cette amélioration de la précision des mesures peut également être utilisée pour étudier la relation entre l'antimatière et la matière ordinaire. L'hydrogène présente un intérêt particulier. Lorsque l'antihydrogène pourra être étudié expérimentalement comme l'hydrogène ordinaire, il sera possible de comparer leurs propriétés spectroscopiques fondamentales.

Enfin, on peut utiliser une plus grande précision dans les mesures fondamentales pour tester d'éventuels changements dans les constantes de la nature au fil du temps. De telles mesures ont déjà commencé à être effectuées, mais jusqu'à présent aucune déviation n'a été enregistrée. Toutefois, l'amélioration de la précision permettra de tirer des conclusions de plus en plus précises sur cette question fondamentale.

Les lauréats

— Roy J. Glauber, né en 1925 à New York, docteur en physique en 1949 de l'université Harvard, professeur de physique dans cette même université,
— John L. Hall, né en 1934 à Denver dans le Colorado, docteur en physique en 1961 à l'institut de technologie Carnegie à Pittsburgh, chercheur principal à l'Institut national des normes et de la technologie et membre de l'institut commun d'astrophysique de laboratoire à l'université du Colorado à Boulder,
— Theodor W. Hänsch, né en 1941 à Heidelberg, docteur en physique en 1969 de l'université de Heidelberg, directeur de l'institut Max-Planck pour l'optique quantique à Garching et professeur de physique à l'université Louis-et-Maximilien de Munich.

L'anisotropie du fond diffus cosmologique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2006 à

— John C. Mather, du centre de vol spatial Goddard de la NASA à Greenbelt dans le Maryland,

— George F. Smoot, de l'université de Californie à Berkeley,

« pour leur découverte de la forme en corps noir du spectre et de l'anisotropie du fond diffus cosmologique ».

Les lauréats ont découvert la forme de base du fond diffus cosmologique et ses petites variations dans différentes directions. Les observations très détaillées qu'ils ont effectuées à partir du satellite COBE ont joué un rôle majeur dans le développement de la cosmologie moderne en tant que science de précision.

Du bruit imprévu à la science de précision

Le fond diffus cosmologique a été enregistré pour la première fois en 1964. Arno Penzias et Robert Wilson, qui ont reçu le prix Nobel de physique en 1978 pour cette découverte, ont d'abord pris ce rayonnement pour un bruit sans importance dans leurs récepteurs radio. En fait, le fond diffus cosmologique fait partie de ce bruit semblable au crépitement que nous recevons tous sur nos téléviseurs lorsque la transmission normale est interrompue. Cependant, une théorie prédisant le fond diffus cosmologique avait déjà été développée dans les années 1940 par Alpher, Gamow et Herman. La découverte a donc apporté une contribution importante à la discussion sur les origines de l'Univers.

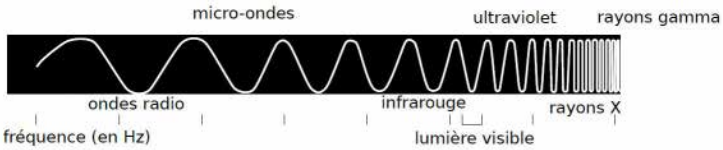
Deux théories cosmologiques concurrentes étaient alors à l'ordre du jour : soit l'Univers avait été créé lors d'un *Big Bang* initial et avait ensuite continué à s'étendre, soit il avait toujours existé dans un état stable. Le scénario du *Big Bang* prédit l'existence du fond diffus cosmologique, de sorte que la découverte de Penzias et Wilson a naturellement conféré une crédibilité supplémentaire à cette théorie.

L'origine de l'Univers en tant que corps noir

Selon le scénario du *Big Bang*, notre Univers s'est développé à partir d'un état de chaleur intense. Il n'existe pas encore de théorie bien éta-

blie pour cet état primordial de l'Univers, mais il semble qu'immédiatement après, il ait été rempli d'un rayonnement incroyablement intense. Le rayonnement émis par un tel « corps » incandescent est réparti entre différentes longueurs d'onde (couleurs de la lumière) d'une manière spécifique, la forme du spectre ne dépendant que de la température. Sans rien connaître du rayonnement, hormis sa température, il est possible de prédire exactement à quoi ressemblera le spectre. Le terme quelque peu contradictoire utilisé pour décrire ce type de rayonnement est « rayonnement du corps noir ». De tels spectres peuvent également être créés en laboratoire. L'Allemand Max Planck, qui a reçu le prix Nobel de physique en 1918, a été le premier à décrire leur forme particulière. Notre propre Soleil est en fait un « corps noir », même si son spectre est moins parfait que celui du fond diffus cosmologique.

Selon le scénario du *Big Bang*, le fond diffus se refroidit progressivement au fur et à mesure de l'expansion de l'Univers. La forme originale du spectre, celle d'un corps noir, a cependant été conservée. Au moment où le rayonnement a été émis, la masse chaotique qui constituait alors notre Univers était encore très chaude, aux alentours de 3 000 degrés. Le fond diffus que nous mesurons aujourd'hui s'est toutefois considérablement refroidi et correspond désormais au rayonnement émis par un corps dont la température ne serait que de 2,7 degrés au-dessus du zéro absolu. Cela signifie que les longueurs d'onde du rayonnement ont augmenté : une règle empirique pour le rayonnement du corps noir est que plus la température est basse, plus la longueur d'onde est grande. C'est pourquoi le fond diffus se trouve aujourd'hui dans la zone des micro-ondes. La lumière visible a des longueurs d'onde beaucoup plus courtes.



Quitter la terre

Les premières mesures du fond diffus cosmologique ont été effectuées à partir de sommets montagneux, de fusées et de ballons. L'atmosphère terrestre absorbe une grande partie du rayonnement. C'est pourquoi

les mesures doivent être effectuées à haute altitude. Mais même à ces altitudes élevées, seule une petite partie du spectre appartenant au fond diffus peut être mesurée. Une grande partie des longueurs d'onde incluses dans le spectre sont si efficacement absorbées par l'air qu'il est nécessaire d'effectuer les mesures en dehors de l'atmosphère terrestre. Les premières mesures effectuées sur Terre, y compris celles de Penzias et Wilson, n'ont donc jamais réussi à mettre en évidence la qualité de corps noir du rayonnement. Il était donc difficile de savoir si le fond diffus était réellement du type prédit par le scénario du *Big Bang*. En outre, les instruments terrestres ne peuvent pas facilement étudier toutes les directions de l'Univers, de sorte qu'il était difficile de montrer que le rayonnement était bien un véritable fond diffus, similaire dans toutes les directions. Les mesures effectuées à partir d'un satellite résolvent ces deux problèmes : les instruments peuvent être placés au-dessus de l'atmosphère et les mesures peuvent facilement être effectuées dans toutes les directions.

En 1974, l'administration spatiale américaine, la NASA, a invité les astronomes et les cosmologistes à soumettre des propositions pour de nouvelles expériences spatiales. C'est ainsi qu'a été lancé le projet COBE (*COsmic Background Explorer*). John Mather a été la véritable force motrice de cette gigantesque collaboration à laquelle ont participé plus de 1 000 personnes, scientifiques, ingénieurs et autres.

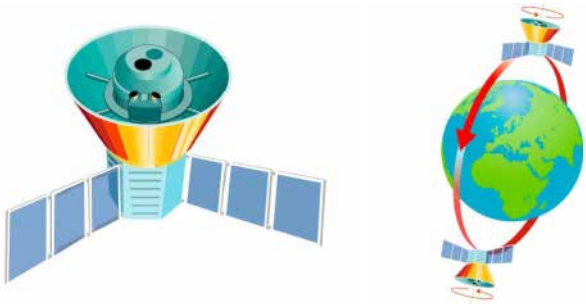


FIG. 43 – *Le satellite COBE a permis de mesurer le fond diffus cosmologique dans toutes les directions.*

John Mather était également responsable de l'un des instruments embarqués, utilisé pour étudier le spectre de corps noir du fond diffus. George Smoot était responsable de l'autre instrument déterminant, qui devait rechercher de petites variations du fond diffus dans différentes

directions.

L'idée initiale de la NASA était de lancer COBE dans l'espace par l'une des navettes spatiales. Cependant, après le tragique accident survenu en 1986 lorsque la navette *Challenger* a explosé avec son équipage à bord, les opérations avec la navette ont été interrompues pendant plusieurs années. L'avenir de COBE était donc menacé. D'habiles négociations ont finalement permis à John Mather et à ses collaborateurs d'obtenir leur propre fusée pour COBE. Le satellite a finalement été lancé le 18 novembre 1989.

Les premiers résultats sont arrivés après seulement neuf minutes d'observation : COBE avait enregistré un spectre de corps noir parfait ! Lorsque la courbe a été montrée lors d'une conférence en janvier 1990, elle a été accueillie par des ovations. La courbe de COBE s'est avérée être l'un des spectres de corps noir les plus parfaits jamais mesurés (fig. 44)

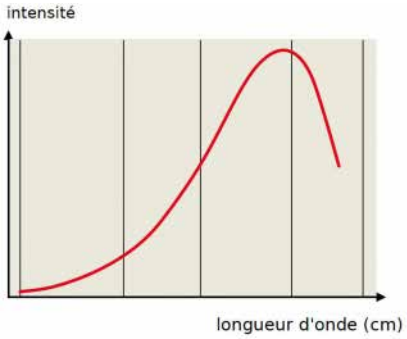


FIG. 44 – *La distribution des longueurs d'onde du fond diffus cosmologique, mesurée par COBE, correspond à un spectre de corps noir parfait. La forme d'un tel spectre ne dépend que de la température du corps émetteur. Les longueurs d'onde du fond diffus cosmologique se situent dans la gamme des millimètres. Ce spectre particulier correspond à une température de 2,7 degrés au-dessus du zéro absolu.*

La naissance des galaxies

Mais ce n'était qu'une partie des résultats de COBE. L'expérience dont George Smoot était responsable était conçue pour rechercher de petites variations du fond diffus dans différentes directions. De minus-

cules variations de la température du fond diffus dans différentes parties de l'Univers pourraient fournir de nouveaux indices sur la façon dont les galaxies et les étoiles sont apparues et sur la raison pour laquelle la matière s'est concentrée dans des endroits spécifiques de l'Univers au lieu de se répandre comme une boue uniforme. D'infimes variations de température pourraient montrer où la matière a commencé à s'agréger. Une fois ce processus enclenché, la gravitation se charge du reste : la matière attire la matière, ce qui entraîne la formation d'étoiles et de galaxies. Mais sans mécanisme de départ, ni la Voie lactée, ni le Soleil, ni la Terre n'existeraient.

La théorie qui tente d'expliquer comment l'agrégation de la matière est initiée traite des fluctuations quantiques dans l'Univers au cours des tout premiers moments de l'expansion. Le même type de fluctuations quantiques entraîne en permanence la création et l'annihilation de particules de matière et d'antimatière dans ce que nous considérons normalement comme de l'espace vide. Il s'agit toutefois d'un des aspects de la physique qui ne peut être compris sans faire appel aux mathématiques. Contentons-nous donc d'affirmer que les variations de température mesurées dans l'Univers actuel seraient le résultat de ces fluctuations quantiques et que, selon la théorie du *Big Bang*, c'est aussi grâce à elles que les étoiles, les planètes et finalement la vie ont pu se développer. Sans elles, la matière dont nous sommes constitués se trouverait plutôt sous une forme totalement différente, répartie uniformément dans l'Univers.

Matière visible et matière noire

Lorsque les expériences de COBE ont été planifiées, on a d'abord pensé que la variation de température du fond diffus nécessaire pour expliquer l'apparition des galaxies serait d'environ un millième de degré. C'est peu, mais les choses allaient se révéler encore pires : alors que COBE était encore en cours de construction, d'autres chercheurs ont signalé que l'influence de la matière noire (une grande partie de la matière de l'Univers que nous ne pouvons pas voir) conduisait à chercher des variations de température plutôt de l'ordre d'un cent-millième de degré. La matière noire en elle-même est en effet un agent important de l'agrégation de la matière, ce qui signifie que les variations de température nécessaires pour expliquer le déclenchement de ce processus sont encore plus faibles qu'on ne le pensait.

Trouver des variations de température aussi minimes représentait

un défi de taille. Même si l'instrument a été modifié, les résultats de COBE sont devenus beaucoup plus incertains et difficiles à interpréter que prévu. Les variations étaient si faibles qu'il était difficile de les distinguer d'un bruit sans importance. Alors comment savoir si elles étaient bien réelles ? Lorsque les résultats ont finalement été publiés, en 1992, il s'est avéré qu'ils pouvaient être corrélés à des mesures au sol, bien que celles-ci soient encore plus incertaines que les mesures de COBE. Les directions de l'espace dans lesquelles COBE avait enregistré des variations de température se sont avérées être exactement les mêmes que celles dans lesquelles des variations semblaient avoir été détectées depuis la Terre et à l'aide de ballons.

Le 29 avril 1992, le physicien anglais Stephen Hawking a déclaré dans une interview au *Times* que les résultats de COBE constituaient « la plus grande découverte du siècle, voire de tous les temps ».

La spéculation se transforme en précision

Sur le satellite COBE, le fond diffus cosmologique a été recueilli dans six grands entonnoirs, ou cornets, qui balayent constamment l'espace dans toutes les directions. En utilisant plusieurs entonnoirs à la fois, il était possible d'effectuer des mesures dans plusieurs directions et longueurs d'onde simultanément, ce qui permettait de corriger d'éventuelles perturbations temporaires. Chaque entonnoir recueillait le rayonnement d'une section de sept degrés du ciel. La température du rayonnement dans cette section était ensuite comparée à la température dans l'autre entonnoir d'une paire et à la température moyenne pour l'ensemble du ciel. Une carte des variations de température dans l'espace a ainsi été obtenue (fig. 45).

Des entonnoirs avec des angles plus petits, qui offrent une meilleure résolution, ont été utilisés dans des mesures ultérieures comme celles effectuées par la sonde d'anisotropie micro-onde Wilkinson (WMAP), nommée d'après David Wilkinson, décédé en 2002, qui a pendant très longtemps joué un rôle important pour les mesures du fond diffus et qui a été une source d'inspiration pour l'équipe de COBE.

En comparant la variation de la température mesurée sous différents angles, il a également été possible de calculer la relation entre la densité de la matière visible, celle de la matière noire et, en combinaison avec d'autres mesures, celle de l'énergie noire de l'Univers. Dans ce contexte, « noir » signifie que nous ne pouvons pas voir et mesurer ce type de matière ou d'énergie. C'est pourquoi les mesures des varia-

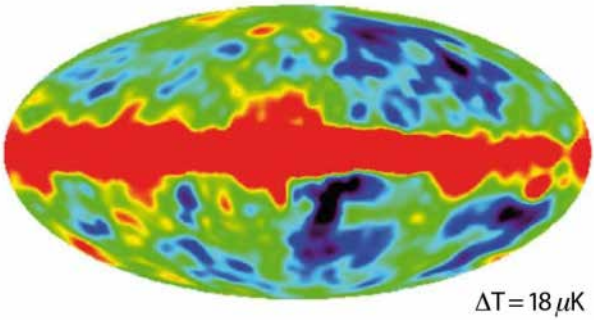


FIG. 45 – *Carte du ciel avec les variations de température mesurées par COBE. Le rouge correspond à une température plus élevée et le bleu à une température plus basse. Les variations sont minuscules, de l'ordre du cent-millième de degré.*

tions de température sont particulièrement importantes, car elles permettent de déterminer indirectement la densité de ce type de matière et d'énergie. C'est pourquoi le projet COBE peut également être considéré comme le point de départ de la cosmologie en tant que science de précision : pour la première fois, on a pu comparer les calculs cosmologiques, comme ceux concernant la relation entre la matière noire et la matière ordinaire visible, à des données provenant de mesures réelles. Cela fait de la cosmologie moderne une véritable science, plutôt qu'une sorte de spéculation philosophique, comme la cosmologie antérieure.

Ainsi, les mesures de COBE et de WMAP ont également servi de base à des calculs concernant la forme de l'Univers. La conclusion semble être que l'Univers est euclidien, c'est-à-dire que notre géométrie quotidienne, qui nous dit que deux lignes parallèles ne se croisent jamais, semble se maintenir même à l'échelle cosmologique. Il s'agit d'un résultat important, car on peut imaginer d'autres géométries, bien qu'elles défient notre expérience quotidienne.

Une idée intéressante, à savoir que l'Univers s'est gonflé très rapidement dans ses premiers stades, pourrait expliquer cette découverte ainsi que plusieurs autres réalisées à l'aide des nouvelles mesures de précision.

L'expérience COBE a également ouvert plusieurs nouveaux domaines de recherche en cosmologie et en physique des particules.

De nouvelles mesures cosmologiques visent à mieux comprendre ce

qui s'est passé avant l'émission du fond diffus. L'étude encore plus détaillée du fond diffus cosmologique devrait apporter de nouvelles réponses.

En physique des particules, l'objectif est de comprendre ce qui constitue la matière noire. C'est l'une des tâches du nouvel accélérateur LHC (Grand collisionneur de hadrons), qui sera bientôt utilisé au CERN, le Centre européen de recherche nucléaire.

Les lauréats

— John C. Mather, né en 1946, docteur en physique en 1974 de l'université de Californie à Berkeley, astrophysicien au centre de vol spatial Goddard de la NASA à Greenbelt dans le Maryland ;
— George F. Smoot, né en 1945 à Yukon en Floride, docteur en physique en 1970 de l'institut de technologie du Massachusetts, professeur de physique à l'université de Californie à Berkeley.

Bibliographie

— Smoot (George F.), *Les rides du temps* (trad. É. et A. Bouquet), Paris, Flammarion, 1994.

De meilleures têtes de lecture pour les appareils de poche

Le prix Nobel de physique 2007 a été décerné à Albert Fert et Peter Grünberg

> « pour la découverte de la magnétorésistance géante ».

Les applications de ce phénomène ont révolutionné les techniques de récupération des données sur les disques durs. Cette découverte joue également un rôle majeur dans divers capteurs magnétiques ainsi que dans le développement d'une nouvelle génération d'appareils électroniques. L'utilisation de la magnétorésistance géante peut être considérée comme l'une des premières applications majeures des nanotechnologies.

La diminution constante de la taille des appareils électroniques est devenue une évidence dans le monde de l'informatique d'aujourd'hui. L'arrivée chaque année sur le marché d'ordinateurs toujours plus puissants et plus légers est une chose que nous commençons tous à considérer comme acquise. Les disques durs, en particulier, ont rétréci : le boîtier encombrant qui se trouvait sous votre bureau n'est plus qu'un souvenir, car la même quantité de données peut être stockée tout aussi facilement dans un ordinateur portable de petite taille. Et avec un lecteur de musique dans la poche de chacun, peu de gens s'arrêtent encore pour penser au nombre de CD de musique que son minuscule disque dur peut réellement contenir. La capacité de stockage maximale des disques durs à usage domestique est récemment passée à un téraoctet (mille milliards d'octets).

Les diagrammes qui montrent le rythme accéléré de la miniaturisation peuvent donner une fausse impression de simplicité, comme si cette évolution suivait une loi de la nature. En réalité, la révolution informatique en cours dépend d'une interaction complexe entre le progrès scientifique fondamental et la mise au point technique. C'est précisément l'objet du prix Nobel de physique pour l'année 2007.

Les ordinateurs portables, les lecteurs de musique et les moteurs de recherche puissants nécessitent tous des disques durs où les informations sont très densément stockées. L'information sur un disque dur est stockée sous la forme de zones magnétisées différemment. Une certaine

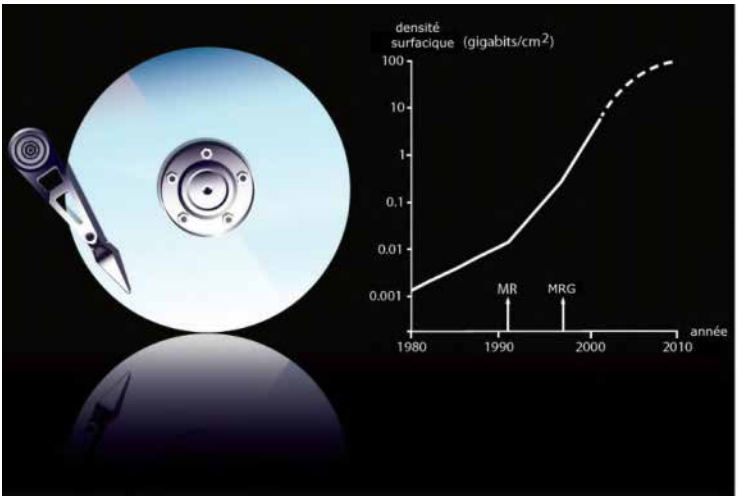


FIG. 46 – *MR : magnétorésistance. MRG : magnétorésistance géante.*

direction de magnétisation correspond à la valeur binaire zéro, une autre direction à la valeur binaire un. Pour accéder à l'information, une tête de lecture parcourt le disque dur et enregistre les différents champs de magnétisation. Lorsque les disques durs deviennent plus petits, chaque zone magnétique doit également se réduire. Cela signifie que le champ magnétique de chaque multiplet devient plus faible et plus difficile à lire. Un disque dur plus compact nécessite donc une technique de lecture plus sensible.

Vers la fin des années 1990, une technologie totalement nouvelle est devenue la norme pour les têtes de lecture des disques durs. Cette technologie est d'une importance cruciale pour l'accélération de la tendance à la miniaturisation des disques durs que nous avons observée ces dernières années. La technologie de lecture actuelle est basée sur un effet physique que les deux lauréats du prix Nobel de physique de 2007 ont observé pour la première fois vingt ans plus tôt. Le Français Albert Fert et l'Allemand Peter Grünberg ont découvert simultanément et indépendamment ce que l'on appelle la magnétorésistance géante. C'est pour cette découverte qu'ils se partagent le prix Nobel de physique 2007.

De Lord Kelvin aux nanotechnologies

À l'origine, des bobines d'induction étaient utilisées dans les têtes de lecture, exploitant le fait qu'un champ magnétique variable induit un courant dans une bobine électrique. Bien que cette technologie n'ait pas été en mesure de répondre aux exigences des disques durs de plus en plus petits, les bobines d'induction sont toujours utilisées pour l'écriture d'informations sur le disque. Pour la lecture cependant, la magnétorésistance s'est rapidement avérée mieux adaptée.

On sait depuis longtemps que la résistance électrique de matériaux tels que le fer peut être influencée par un champ magnétique. En 1857, le physicien britannique Lord Kelvin avait déjà publié un article qui montrait que la résistance diminue le long des lignes d'aimantation lorsqu'un champ magnétique est appliqué à un conducteur magnétique. Si le champ magnétique est appliqué en travers du conducteur, la résistance augmente. Cette magnétorésistance (anisotrope) était le prédécesseur direct de la magnétorésistance géante en tant que technologie standard dans les têtes de lecture. La magnétorésistance géante a pris le relais à un moment où une technologie encore plus sensible était devenue nécessaire.

La découverte de la magnétorésistance géante a été rendue possible par les nouvelles possibilités de production de fines couches de métaux à l'échelle du nanomètre, qui ont commencé à se développer dans les années 1970. Un nanomètre est un milliardième de mètre et les nanotechnologies s'intéressent aux couches constituées de quelques strates individuelles d'atomes. Au niveau atomique, la matière se comporte différemment et, par conséquent, les structures de taille nanométrique présentent souvent des propriétés matérielles totalement nouvelles. Cela vaut non seulement pour le magnétisme et la conductivité électrique, mais aussi pour des propriétés telles que la résistance ou les propriétés chimiques et optiques d'un matériau. En ce sens, la technologie de la magnétorésistance géante peut également être considérée comme l'une des premières applications majeures des nanotechnologies, qui sont aujourd'hui très populaires dans une gamme très variée de domaines.

Résistance et aimantation

Dans un conducteur métallique, l'électricité est transportée sous forme d'électrons qui peuvent se déplacer librement dans le matériau.

Le courant est conduit par le mouvement des électrons dans une direction spécifique. Plus le chemin des électrons est droit, plus la conductance du matériau est grande. La résistance électrique est due au fait que les électrons s'écartent de leur trajectoire droite lorsqu'ils se dispersent sur les irrégularités et les impuretés du matériau. Plus les électrons se dispersent, plus la résistance est élevée.

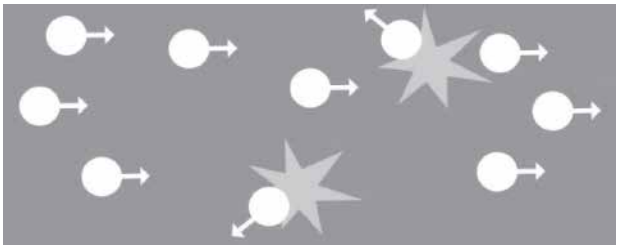


FIG. 47 – *La résistance électrique d'un conducteur résulte de la dispersion des électrons contre les irrégularités du matériau, ce qui entrave leur mouvement vers l'avant.*

Dans un matériau magnétique, la diffusion des électrons est influencée par la direction de l'aimantation. Le lien très fort entre l'aimantation et la résistance que l'on trouve dans la magnétorésistance géante est dû à la rotation intrinsèque de l'électron qui induit un moment magnétique (la propriété quantique appelée spin), qui peut s'orienter dans deux directions opposées. Dans un matériau magnétique, la plupart des spins pointent dans la même sens et sont parallèles (fig. 48). Un petit nombre de spins pointent cependant toujours dans le sens opposé à l'aimantation générale. Ce déséquilibre n'est pas seulement à l'origine de l'aimantation en tant que telle mais aussi du fait que les électrons ayant des spins différents sont plus ou moins dispersés en fonction des irrégularités et des impuretés, en particulier dans les interfaces entre les matériaux. Les propriétés des matériaux déterminent le type d'électron le plus dispersé.

La magnétorésistance géante

Nous décrivons ci-après un exemple de système simple dans lequel la magnétorésistance géante peut apparaître : il s'agit d'une couche de métal non magnétique prise en sandwich entre deux couches de métal magnétique (fig. 49). Dans le matériau magnétique, et en particulier à

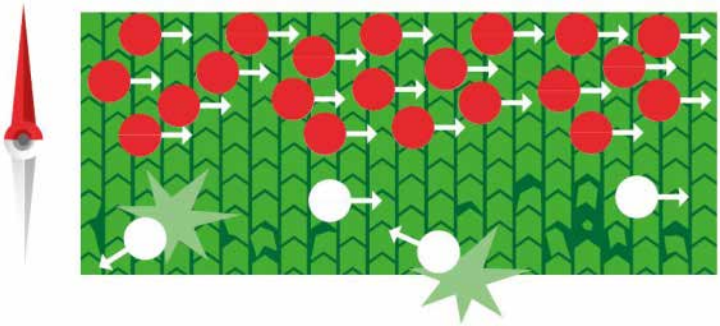


FIG. 48 – *Dans un conducteur magnétique, la direction du spin de la plupart des électrons est dans le même sens que l'aimantation (en rouge). Une minorité d'électrons ont un spin en sens opposé (en blanc). Dans cet exemple, les électrons dont le spin est en sens opposé sont davantage dispersés.*

l'interface entre le matériau magnétique et le matériau non magnétique, les électrons ayant des spins différents sont dispersés différemment (1). Nous nous intéresserons ici au cas où les électrons se dispersent davantage si leur spin est dans le sens opposé à la direction générale de l'aimantation. Cela implique que la résistance sera plus grande pour ces électrons que pour ceux dont le spin est dans le même sens que l'aimantation. Lorsque les électrons pénètrent dans le matériau non magnétique, ils se dispersent tous au même degré, indépendamment de la direction de leur spin (2). À la deuxième interface et dans la dernière couche de matériau magnétique, les électrons de spin en sens opposé se dispersent à nouveau davantage que les électrons dont le spin est dans le même sens (3).

Lorsque les deux couches magnétiques sont aimantées dans le même sens, la plupart des électrons ont un spin de même sens et se déplacent facilement dans la structure. La résistance totale sera donc faible (cas A dans la figure 49). En revanche, si les aimantations des deux couches sont en sens opposés, tous les électrons seront dans l'état de spin opposé dans l'une des deux couches. Cela signifie qu'aucun électron ne peut se déplacer facilement dans le système et que la résistance totale sera donc élevée (cas B). Imaginons maintenant que cette structure soit utilisée dans une tête de lecture qui balaie un disque dur. L'aimantation de la couche (1) est fixée, tandis que l'aimantation de la couche (3) est

libre de varier et peut donc être influencée par les champs magnétiques variables du disque dur. L'aimantation des deux couches magnétiques dans la tête de lecture sera alors alternativement de même sens et de sens opposé. Cela entraîne une variation de la résistance et du courant à travers la tête de lecture. Si le courant est le signal quittant la tête de lecture, un courant élevé peut signifier un 1 binaire et un courant faible peut signifier un 0.

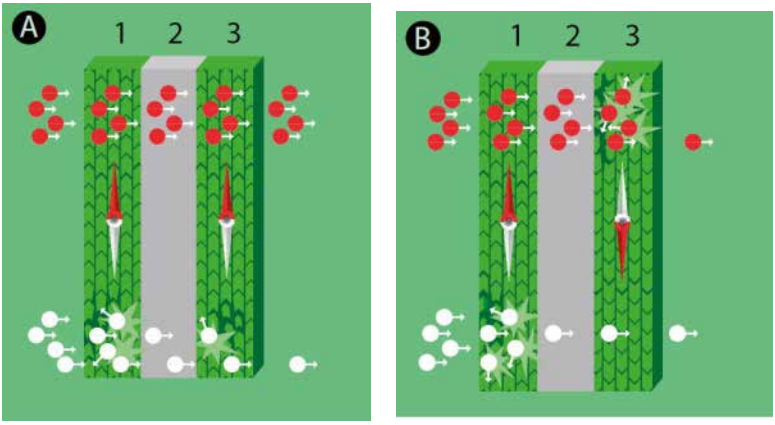


Fig. 49 – *(A) Si le sens de l'aimantation est le même dans les deux couches magnétiques, les électrons à spin de même sens (en rouge) peuvent traverser tout le système sans se disperser. La résistance totale du système est donc faible.*
(B) Si le sens de l'aimantation dans les deux couches magnétiques est opposé, tous les électrons ont un spin en sens opposé dans l'une des couches et se dispersent donc beaucoup. La résistance totale est donc élevée.

La magnétorésistance géante est rapidement devenue la norme

C'est au milieu des années 1980 que les spécialistes du magnétisme ont pris conscience des nouvelles possibilités offertes par les couches de taille nanométrique. Albert Fert et ses collègues ont créé une trentaine de couches alternées de fer et de chrome, composées de quelques strates d'atomes chacune. Pour y parvenir, ils ont été contraints de travailler dans un environnement proche du vide et d'utiliser des gaz de fer et de

chrome à très basse pression. Dans une telle configuration, les atomes se fixent progressivement à la surface, ce qui permet à la couche de se constituer strate après strate. De la même manière, le groupe de Peter Grünberg a créé un système un peu plus simple, composé de deux ou trois couches de fer et d'une couche de chrome intercalée entre les deux.

C'est en partie parce qu'il a utilisé beaucoup plus de couches que Fert a enregistré une magnétorésistance plus importante que Grünberg. Le groupe français a constaté une modification de la résistance en fonction de l'aimantation pouvant aller jusqu'à 50 %, alors que le groupe allemand n'a constaté qu'une différence de 10 % au maximum. L'effet de base et la physique qui le sous-tend sont cependant identiques dans les deux cas. Les deux groupes ont réalisé qu'ils avaient observé un phénomène totalement nouveau. Avec la magnétorésistance traditionnelle, personne n'avait enregistré plus d'un pour cent environ de changement de résistance. C'est Albert Fert qui a inventé le terme de « magnétorésistance géante » pour décrire ce nouvel effet. Dans sa première publication sur le sujet, il a souligné que cette découverte pourrait déboucher sur d'importantes applications. Peter Grünberg a également compris le potentiel pratique du phénomène et a déposé un brevet en même temps qu'il rédigeait une première publication scientifique.

Pour que la nouvelle technologie soit commercialisée, il fallait cependant trouver un procédé industriel pour créer les couches. La méthode utilisée par Grünberg et Fert (connue sous le nom d'épitaxie) était laborieuse et coûteuse, mieux adaptée à un laboratoire de recherche qu'à un processus technologique à grande échelle. C'est pourquoi Stuart Parkin, un Anglais travaillant aux États-Unis, a franchi une étape importante en démontrant qu'il était possible d'obtenir le même effet à l'aide d'une technologie beaucoup plus simple, la pulvérisation cathodique. Il s'est avéré que la magnétorésistance géante ne dépendait pas de couches parfaites. Cela signifiait que les systèmes à magnétorésistance géante pouvaient désormais être produits à l'échelle industrielle. Le processus industriel, combiné à la grande sensibilité des têtes à magnétorésistance géante, a permis à la nouvelle technologie de devenir la norme dans les disques durs très peu de temps après la production commerciale de la première tête à magnétorésistance géante en 1997.

Une nouvelle électronique : la spintronique

La magnétorésistance géante n'a pas seulement représenté une avancée pour la lecture d'informations compactes sur les disques durs et pour

les capteurs magnétiques dans d'autres applications. Il est également intéressant de noter que cette technologie peut être considérée comme la première étape du développement d'un type d'électronique entièrement nouveau, appelé « spintronique ». C'est l'utilisation du spin de l'électron qui caractérise la spintronique, pas seulement de sa charge électrique comme dans l'électronique traditionnelle. Les petites dimensions créées par les nanotechnologies constituent une condition préalable générale à la spintronique. La direction du spin de l'électron ne peut être maintenue que sur de très courtes distances. Dans les couches plus épaisses, la direction du spin change avant que l'on ait le temps d'utiliser les propriétés distinctes des électrons ayant un spin différent (comme une résistance plus élevée ou plus faible).

Dans le sillage de la magnétorésistance géante, un système similaire a été construit en utilisant un matériau électriquement isolant, au lieu d'un métal non magnétique, pris en sandwich entre deux couches d'un métal magnétique. Aucun courant électrique ne devrait pouvoir traverser la couche isolante, mais si elle est suffisamment fine, des électrons peuvent s'y faufiler, grâce à un effet quantique appelé effet tunnel. C'est pourquoi ce nouveau système est appelé « magnétorésistance à effet tunnel ». Avec elle, une différence de résistance encore plus importante peut être créée par des champs magnétiques très faibles. La dernière génération de têtes de lecture utilise cette technologie.

Vers une mémoire universelle

Une autre application de la spintronique qui a déjà commencé à voir le jour est la « mémoire vive magnétique ». Pour compléter le disque dur, où les informations sont stockées de manière permanente, les ordinateurs ont besoin d'une mémoire vive plus rapide. Dans sa mémoire vive, l'ordinateur stocke toutes les informations dont il a besoin pour pouvoir traiter les informations pendant qu'il travaille. L'inconvénient des mémoires vives standard utilisées aujourd'hui est qu'elles sont incapables de stocker des informations de manière permanente. Au moment où ce texte est écrit, il n'est stocké que dans la mémoire vive de l'ordinateur. En cas de coupure de courant ou si quelqu'un éteint l'ordinateur sans sauvegarder, le texte est perdu. Ce n'est qu'en appuyant sur le bouton « enregistrer » que le texte sera stocké en toute sécurité sur le disque dur.

L'intérêt de la mémoire vive magnétique est qu'il est possible d'utiliser la magnétorésistance à effet tunnel à la fois pour lire et pour écrire

des informations et de créer ainsi une mémoire informatique magnétique rapide et facilement accessible. La mémoire vive magnétique pourrait donc être utilisée comme mémoire vive, contrairement au disque dur plus lent, mais elle serait aussi une mémoire permanente qui ne dépendrait pas de l'énergie électrique. Cela signifie que la mémoire vive magnétique pourrait devenir une mémoire universelle qui remplacerait à la fois la mémoire vive traditionnelle et le disque dur. La compacité d'un tel système pourrait s'avérer particulièrement utile dans les petits systèmes informatiques embarqués, des cuisinières aux automobiles.

La découverte de la magnétorésistance géante a ouvert la voie à un tout nouveau domaine technologique, la spintronique, qui utilise à la fois la charge et le spin de l'électron. L'émergence des nanotechnologies était autrefois une condition préalable à la découverte de la magnétorésistance géante. Aujourd'hui, la spintronique est à son tour un moteur du développement rapide des nanotechnologies. Ce domaine de recherche est un exemple exceptionnellement clair de la manière dont la science fondamentale et les nouvelles technologies s'entrelacent et se renforcent mutuellement.

Les lauréats

Les lauréats :

— Albert Fert, né en 1938 à Carcassonne, docteur en 1970 de l'université Paris-Sud à Orsay, professeur dans cette même université depuis 1976, directeur scientifique de l'unité mixte de physique CNRS/Thales à Orsay depuis 1995 ;

— Peter Grünberg, né en 1939 à Pilsen (dans l'actuelle République tchèque), docteur en 1969 de l'université technique de Darmstadt en Allemagne, professeur à l'Institut de physique du solide dans le centre de recherche de Jülich depuis 1972.

Découvrir les symétries cachées de la nature

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2008 pour moitié à Yoichiro Nambu, de l'institut Enrico Fermi de l'université de Chicago,

> « pour la découverte du mécanisme de brisure spontanée de symétrie en physique subatomique ».

L'autre moitié du prix revient conjointement à Makoto Kobayashi, de l'Organisation de recherche sur les accélérateurs de haute énergie à Tsukuba au Japon, et à Toshihide Maskawa, de l'institut Yukawa de physique théorique de l'université de Kyoto et de l'université de Kyoto Sangyo,

> « pour la découverte des origines de la brisure de symétrie brisée qui prédit l'existence d'au moins trois familles de quarks dans la nature ».

Pourquoi y a-t-il quelque chose au lieu de rien ? Pourquoi existe-t-il autant de particules élémentaires différentes ? Les lauréats du prix Nobel de physique 2008 ont présenté des idées théoriques qui nous permettent de mieux comprendre ce qui se passe à l'intérieur des plus petits éléments constitutifs de la matière.

Les lois de la symétrie de la nature sont au cœur de ce sujet, ou plutôt les symétries brisées, à la fois celles qui semblent avoir existé dans notre Univers depuis le tout début et celles qui ont spontanément perdu leur symétrie d'origine en cours de route.

En fait, nous sommes tous les enfants d'une symétrie brisée. Elle a dû se produire immédiatement après le *Big Bang*, il y a environ 14 milliards d'années, lorsque autant d'antimatière que de matière ont été créées. La rencontre entre les deux est fatale : elles s'annihilent l'une l'autre et il ne reste plus que des rayonnements. Il est évident que la matière a gagné contre l'antimatière, sinon nous ne serions pas là. Il semblerait qu'une infime déviation de la symétrie parfaite, avec une particule de matière supplémentaire pour dix milliards de particules d'antimatière, ait suffi à assurer la survie de notre monde. Cet excès de matière est à l'origine de notre Univers, qui s'est rempli de galaxies, d'étoiles et de planètes, et finalement de vie. Mais ce qui se cache derrière cette violation de symétrie dans le cosmos reste un grand mystère et un champ de recherche actif.

FIG. 50 – *Une brisure de symétrie inexpliquée à la naissance de l'Univers.*

De l'autre côté du miroir

Pendant de nombreuses années, la physique s'est attachée à trouver les lois de la nature qui se cachent au cœur du large éventail de phénomènes que nous observons autour de nous. Les lois de la nature devraient être parfaitement symétriques et absolues. Elles devraient être valables dans l'ensemble de l'Univers. Cette approche semble vraie dans la plupart des situations, mais pas toujours. C'est pourquoi les symétries brisées sont devenues un sujet de recherche en physique au même titre que les symétries elles-mêmes, ce qui n'est pas si étonnant si l'on considère notre monde déséquilibré, où la symétrie parfaite est un idéal rare.

Différents types de symétries et de symétries brisées font partie de notre vie quotidienne. La lettre A ne change pas lorsque nous la regardons dans un miroir, alors que la lettre Z brise cette symétrie. En revanche, la lettre Z est la même lorsqu'on la retourne. Mais si l'on fait de même avec la lettre A, la symétrie est brisée.

La théorie fondamentale des particules élémentaires décrit trois principes de symétrie différents : la symétrie miroir (appelée « symétrie P » pour « parité »), la symétrie de charge (« symétrie C ») et la symétrie par renversement du temps (« symétrie T »).

Dans la symétrie miroir, tous les événements doivent se produire exactement de la même manière, qu'ils soient vus directement ou dans un miroir. Il ne devrait pas y avoir de différence entre la gauche et la droite et personne ne devrait pouvoir décider s'il se trouve dans

son propre monde ou dans un monde miroir. La symétrie de charge stipule que les particules doivent se comporter exactement comme leurs *alter ego*, les antiparticules, qui ont exactement les mêmes propriétés mais la charge opposée. Selon la symétrie par renversement du temps, les événements physiques au niveau microscopique ne devraient pas dépendre de ce qu'ils se produisent en avant ou en arrière dans le temps.

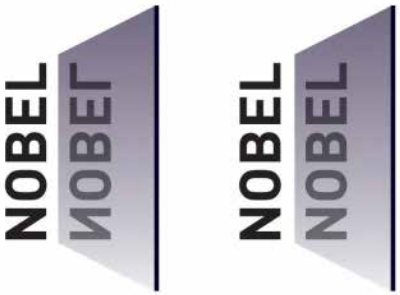


FIG. 51 – Symétrie miroir. *Elle est brisée dans l'image de gauche et conservée dans l'image de droite, où il est impossible de décider si l'on se trouve dans son propre monde ou dans le monde miroir.*

Les symétries n'ont pas seulement une valeur esthétique en physique. Elles simplifient de nombreux calculs difficiles et jouent donc un rôle décisif dans la description mathématique du monde microscopique. Plus important encore, ces symétries impliquent un grand nombre de lois de conservation au niveau des particules. Par exemple, il existe une loi selon laquelle l'énergie ne peut pas être perdue lors de collisions entre particules élémentaires, elle doit rester la même avant et après la collision, ce qui est évident dans la symétrie des équations qui décrivent les collisions entre particules. Il y a aussi la loi de conservation des charges électriques qui est liée à la symétrie dans la théorie électromagnétique.

Le schéma apparaît plus clairement

C'est vers le milieu du XX^{e} siècle que la symétrie brisée est apparue pour la première fois dans les études sur les principes fondamentaux de la matière. À cette époque, la physique s'efforçait de réaliser son plus grand rêve : réunir tous les éléments constitutifs les plus petits de la nature et toutes les forces en une seule théorie unifiée. Au début, la

physique des particules est devenue de plus en plus compliquée. Les nouveaux accélérateurs construits après la seconde guerre mondiale produisaient un flux constant de particules qui n'avaient jamais été observées auparavant. La plupart d'entre elles ne cadraient pas avec les modèles que les physiciens avaient à l'époque, à savoir que la matière était constituée d'atomes avec des neutrons et des protons dans le noyau et des électrons autour. Des recherches plus approfondies dans les régions les plus profondes de la matière ont révélé que les protons et les neutrons cachaient chacun un trio de quarks. Les particules déjà découvertes se sont également révélées être composées de quarks.

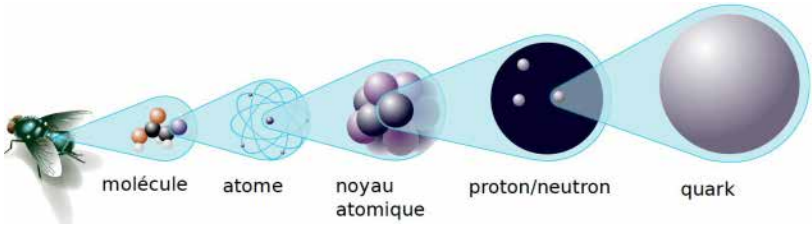


FIG. 52 – Au cœur de la matière. *Les électrons et les quarks sont les plus petits éléments constitutifs de la matière.*

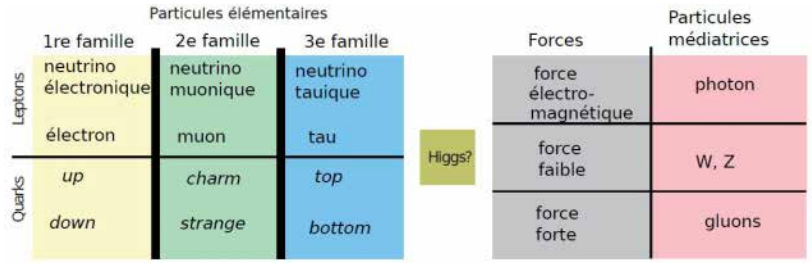


FIG. 53 – Le modèle standard aujourd'hui. *Il unifie tous les éléments fondamentaux de la matière et trois des quatre forces fondamentales. Alors que toute la matière connue est constituée de particules de la première famille, les autres particules n'existent que pendant des périodes extrêmement courtes. Pour compléter le modèle, une nouvelle particule est nécessaire, le boson de Higgs, que la communauté des physiciens espère trouver dans le nouvel accélérateur LHC construit au CERN à Genève.*

Aujourd'hui, presque toutes les pièces du puzzle se sont mises en place : un modèle standard des parties indivisibles de la matière comprend trois familles de particules (figure 53). Ces familles se ressemblent, mais seules les particules de la première famille, les plus légères, sont suffisamment stables pour construire le cosmos. Les particules des deux familles les plus lourdes vivent dans des conditions très instables et se désintègrent immédiatement en particules plus légères.

Tout est contrôlé par des forces. Le modèle standard, du moins pour l'instant, comprend trois des quatre forces fondamentales de la nature ainsi que leurs médiateurs, des particules qui transmettent l'interaction entre les particules élémentaires. Le médiateur de la force électromagnétique est le photon de masse nulle. La force faible, qui explique la désintégration radioactive et fait briller le Soleil et les étoiles, est véhiculée par les particules lourdes que sont les bosons W et Z. La force forte est véhiculée par les gluons, qui assurent la cohésion des noyaux atomiques. La gravité, la quatrième force, qui nous permet de garder les pieds sur Terre, n'a pas encore été intégrée au modèle et représente un défi colossal pour les physiciens d'aujourd'hui.

Le miroir est brisé

Le modèle standard est une synthèse de toutes les connaissances sur les parties les plus profondes de la matière que la physique a acquises au cours du siècle dernier. Il repose solidement sur une base théorique constituée des principes de symétrie de la physique quantique et de la théorie de la relativité, et a résisté à d'innombrables tests. Mais avant que le modèle ne soit tout à fait clair, un certain nombre de crises sont survenues qui ont menacé cette construction bien équilibrée. Ces crises étaient liées au fait que les physiciens avaient supposé que les lois de la symétrie s'appliquaient au monde lilliputien des particules élémentaires. Or il s'est avéré que ce n'était pas tout à fait le cas.

La première surprise est survenue en 1956 lorsque deux théoriciens sino-américains, Tsung-Dao Lee et Chen-Ning Yang (qui ont reçu le prix Nobel l'année suivante, en 1957) ont remis en question la symétrie miroir (symétrie P) dans la force faible. Le fait que la nature respecte la symétrie miroir, c'est-à-dire la symétrie entre la gauche et la droite, était considéré, comme d'autres principes de symétrie, comme un fait bien établi.

Selon Lee et Yang, nous devons réévaluer les anciens principes dans le monde quantique, où existent les particules élémentaires. Ils ont pro-

posé une série d'expériences pour tester cette symétrie miroir. Quelques mois plus tard, la désintégration du noyau du cobalt 60, un atome radioactif, a révélé qu'il ne suivait pas les principes de la symétrie miroir. La symétrie était rompue lorsque les électrons qui quittaient le noyau du cobalt préféraient une direction plutôt qu'une autre. C'est comme si vous vous teniez devant la gare centrale de Stockholm et que vous voyiez la plupart des gens tourner à gauche en sortant de la gare.

L'asymétrie inhérente détermine notre destin

Il se peut que la symétrie de charge et la symétrie miroir soient brisées séparément, mais les deux ne sont certainement pas brisées en même temps : on parle de « symétrie CP ». La communauté des physiciens s'est consolée en pensant que cette symétrie restait intacte. Les lois de la nature, pensaient-ils, ne changeraient pas si l'on entrait dans un monde miroir où toute la matière serait remplacée par de l'antimatière.

Cela signifie également que si vous rencontriez un extraterrestre, il ne serait pas possible de déterminer si l'extraterrestre vient de notre monde ou de l'antimonde. Une accolade de bienvenue pourrait alors avoir des conséquences désastreuses. Il ne resterait qu'une bouffée d'énergie, la matière et l'antimatière s'annihilant lors du premier contact.

C'est donc à juste titre que la force faible est revenue sur le devant de la scène en 1964. Une nouvelle violation des lois de symétrie est apparue lors de la désintégration radioactive d'une particule étrange, appelée kaon (prix Nobel décerné à James Cronin et Val Fitch en 1980). Une petite fraction des kaons ne suivait pas les symétries de miroir et de charge admises ; ils brisaient la double symétrie CP et remettaient en question toute la structure de la théorie.

Si l'on pense à la rencontre avec des extraterrestres, cette découverte offre une planche de salut. Il suffirait peut-être de demander à un extraterrestre, avant qu'il ne vous étreigne, d'examiner attentivement la désintégration du kaon chez lui et de vérifier s'il est composé de la même matière que nous ou d'antimatière.

Le physicien russe Andreï Sakharov, lauréat du prix Nobel de la paix, a été le premier à souligner l'importance décisive de la symétrie brisée pour la genèse du cosmos. En 1967, il a établi trois conditions pour créer un monde comme le nôtre, vide d'antimatière : premièrement, les lois de la physique doivent faire la distinction entre la matière

Fig. 54 – *Un câlin ? Attendez que la symétrie soit clarifiée ! Si l'extraterrestre est fait d'antimatière, une étreinte vous fera disparaître tous les deux dans une bouffée d'énergie.*

et l'antimatière, ce qui a été découvert avec la brisure de la symétrie CP ; deuxièmement, le cosmos doit être né dans la chaleur du *Big Bang* ; troisièmement, les protons de chaque noyau atomique doivent finir par se désintégrer. La dernière condition pourrait conduire à la fin du monde, puisqu'elle implique que toute la matière peut finir par disparaître. Jusqu'à présent, cela ne s'est pas produit et des expériences ont montré que les protons restent stables pendant 10^{33} années, soit 10 000 milliards de fois plus que l'âge de l'Univers, qui est d'un peu plus de 10^{10} années. Et personne ne sait encore comment la chaîne d'événements de Sakharov s'est déroulée dans l'Univers primitif.

Résoudre le mystère de la brisure de symétrie

Il se peut que les conditions de Sakharov soient finalement intégrées dans le modèle standard de la physique. Le surplus de matière créé à la naissance de l'Univers serait alors expliqué. Toutefois, cela nécessite une violation de symétrie beaucoup plus importante que la symétrie doublement brisée, que Fitch et Cronin ont trouvée dans leur expérience.

Cependant, même une brisure de symétrie beaucoup plus petite que celle dont les kaons se sont rendus coupables nécessitait une interprétation, faute de quoi l'ensemble du modèle standard aurait été menacé. La question de savoir pourquoi les symétries ont été brisées est restée un mystère jusqu'en 1972, lorsque deux jeunes chercheurs de l'université de Kyoto, Makoto Kobayashi et Toshihide Maskawa, qui connaissaient bien les calculs de physique quantique, ont trouvé la solution dans une matrice 3×3.

Comment cette double brisure de symétrie se produit-elle ? Chaque

kaon est constitué d'un quark et d'un antiquark. La force faible leur fait changer d'identité à plusieurs reprises : le quark devient un antiquark tandis que l'antiquark devient un quark, transformant ainsi le kaon en son antikaon. Le kaon oscille ainsi entre lui-même et son anti-soi. Mais si les conditions sont réunies, la symétrie entre la matière et l'antimatière sera brisée. La matrice de calcul de Kobayashi et Maskawa contient des probabilités pour décrire comment la transformation des quarks a lieu.

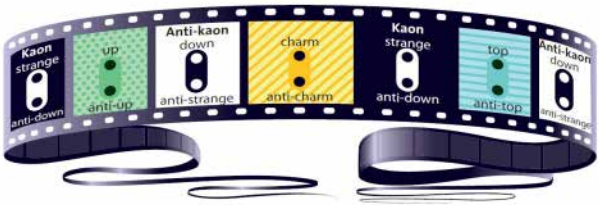


Fig. 55 – *La physique quantique est à l'origine d'une étrange transformation. Un kaon peut passer de l'état de kaon à celui d'antikaon et inversement. Toutes les familles de quarks connues aujourd'hui doivent contribuer à ce processus qui, dans quelques cas, brise la symétrie. L'explication de ce phénomène a valu à Kobayashi et Maskawa le prix Nobel de physique en 2008.*

Il s'est avéré que les quarks et les antiquarks échangeaient leur identité au sein de leur propre famille. Si cet échange d'identité avec double brisure de symétrie devait avoir lieu entre la matière et l'antimatière, une autre famille de quarks serait nécessaire en plus des deux autres (fig. 53). Il s'agissait d'un concept audacieux. Le modèle standard a reçu ces nouveaux quarks spéculatifs, qui sont apparus comme prévu lors d'expériences ultérieures. Le quark c (*charm*, « charme ») a été découvert dès 1974, le quark b (*bottom*, « dessous ») en 1977 et le dernier, le quark t (*top*, « dessus »), en 1994.

Des usines à mésons apportent la réponse

Il se pourrait bien que l'explication de la brisure de la symétrie CP fournisse également une raison d'être à la deuxième et à la troisième famille de particules. Celles-ci ressemblent à la première famille à bien des égards, mais leur durée de vie est si courte qu'elles ne peuvent rien former de durable dans notre monde. Il est possible que ces particules capricieuses aient rempli leur fonction la plus importante au début des

temps, lorsque leur présence a garanti la brisure de symétrie qui a permis à la matière de l'emporter sur l'antimatière. Comme nous l'avons déjà mentionné, nous ne savons pas encore en détail comment la nature a résolu ce problème. La brisure de symétrie doit se produire un très grand nombre de fois pour créer toute la matière qui nous donne notre ciel parsemé d'étoiles.

La théorie de Kobayashi et Maskawa indiquait également qu'il devrait être possible d'étudier une violation majeure de la symétrie dans les particules appelées mésons B, qui sont dix fois plus lourdes que leurs cousins les kaons. Cependant, les brisures de symétrie sont extrêmement rares dans les mésons B : il faut d'immenses quantités de ces particules pour en trouver quelques-unes qui brisent la symétrie. Deux gigantesques constructions, abritant le détecteur de particules *BaBar* à l'accélérateur *SLAC* de Stanford en Californie et le détecteur *Belle* à l'accélérateur *KEK* de Tsukuba au Japon, ont produit plus d'un million de mésons B par jour afin de suivre leur désintégration en détail. Dès 2001, les deux expériences indépendantes ont confirmé la violation de symétrie des mésons B, exactement comme le modèle de Kobayashi et Maskawa l'avait prédit près de 30 ans plus tôt.

Cela signifiait l'achèvement du modèle standard, qui avait bien fonctionné pendant de nombreuses années. Presque toutes les pièces manquantes du puzzle se sont mises en place conformément aux prévisions les plus audacieuses. Pourtant, les physiciens n'étaient toujours pas satisfaits.

La symétrie se cache sous les violations spontanées

Comme nous l'avons déjà expliqué, le modèle standard comprend toutes les particules élémentaires connues et trois des quatre forces fondamentales. Mais pourquoi ces forces sont-elles si différentes ? Et pourquoi les particules ont-elles des masses si différentes ? La plus lourde, le quark t, est plus de trois cent mille fois plus lourde que l'électron. Pourquoi ont-elles une masse ? La force faible se distingue à nouveau à cet égard : ses particules médiatrices, W et Z, sont beaucoup plus lourdes, tandis que son allié, le photon, qui véhicule la force électromagnétique, n'a pas de masse du tout.

La plupart des physiciens pensent qu'une autre brisure de symétrie spontanée, appelée mécanisme de Higgs, a détruit la symétrie originelle entre les forces et a donné leur masse aux particules dans les toutes premières phases de l'Univers.

La voie vers cette découverte a été tracée par Yoichiro Nambu lorsque, en 1960, il a été le premier à introduire la violation spontanée de la symétrie dans la physique des particules élémentaires. C'est pour cette découverte qu'il reçoit en 2008 le prix Nobel de physique. Au départ, Nambu travaillait sur les calculs théoriques d'un autre phénomène remarquable de la physique, la supraconductivité, lorsque des courants électriques s'écoulent soudainement sans aucune résistance. La violation spontanée de la symétrie décrivant la supraconductivité a ensuite été transposée par Nambu dans le monde des particules élémentaires. Ses outils mathématiques imprègnent aujourd'hui toutes les théories relatives au modèle standard.

Des violations spontanées de la symétrie plus banales peuvent être observées dans la vie de tous les jours. Un crayon posé sur sa pointe mène une existence totalement symétrique dans laquelle toutes les directions sont égales. Mais cette symétrie disparaît lorsqu'il tombe : désormais, une seule direction compte. D'un autre côté, son état est devenu plus stable, le crayon ne peut plus tomber, il a atteint son niveau d'énergie le plus bas.

Fig. 56 – La brisure de symétrie spontanée. *Le monde de ce crayon est complètement symétrique. Toutes les directions sont exactement égales. Mais cette symétrie est perdue lorsque le crayon tombe. Désormais, une seule direction est maintenue. La symétrie qui existait auparavant se cache derrière le crayon tombé.*

Le vide est le niveau d'énergie le plus bas possible dans le cosmos. En physique, le vide est précisément un état ayant l'énergie la plus basse possible. Mais il n'est en aucun cas complètement vide. Depuis l'avènement de la physique quantique, le vide est défini comme étant rempli d'une soupe bouillonnante de particules qui surgissent pour disparaître immédiatement dans des champs quantiques omniprésents mais invisibles. Nous sommes entourés de nombreux champs quantiques différents dans l'espace. Les quatre forces fondamentales de la nature sont

également décrites comme des champs. L'un d'entre eux, le champ gravitationnel, est connu de tous. C'est lui qui nous maintient sur Terre et qui détermine ce qui est en haut et ce qui est en bas.

Nambu a compris très tôt que les propriétés du vide étaient intéressantes pour l'étude des brisures spontanées de symétrie. Le vide, c'est-à-dire l'état d'énergie le plus bas, ne correspond pas à l'état le plus symétrique. Comme dans le cas du crayon tombé, la symétrie du champ quantique a été brisée et une seule des nombreuses directions possibles du champ a été choisie. Au cours des dernières décennies, les méthodes de Nambu pour traiter la violation spontanée de la symétrie dans le modèle standard ont été affinées. Elles sont fréquemment utilisées aujourd'hui pour calculer les effets de la force forte.

Le boson de Higgs fournit la masse

La question de la masse des particules élémentaires a également trouvé une réponse dans la brisure spontanée de symétrie de l'hypothétique champ de Higgs. On pense qu'au moment du *Big Bang*, le champ était parfaitement symétrique et que toutes les particules avaient une masse nulle. Mais le champ de Higgs, comme un crayon posé sur sa pointe, n'était pas stable. Lorsque l'Univers s'est refroidi, le champ est tombé à son niveau d'énergie le plus bas, son propre vide selon la définition quantique. Sa symétrie a disparu et le champ de Higgs est devenu une sorte de sirop pour les particules élémentaires ; celles-ci ont absorbé des quantités différentes du champ et ont obtenu des masses différentes. Certaines, comme les photons, n'ont pas été attirées et sont restées sans masse. Mais la raison pour laquelle les électrons ont acquis une masse est une question tout à fait différente à laquelle personne n'a encore répondu.

Comme les autres champs quantiques, le champ de Higgs a son propre représentant, le boson de Higgs. Les physiciens sont impatients de trouver bientôt cette particule dans l'accélérateur de particules le plus puissant du monde, le tout nouveau LHC du CERN à Genève. Il est possible que plusieurs bosons de Higgs différents soient détectés, voire aucun. Les physiciens sont prêts : une théorie dite supersymétrique est la préférée de beaucoup pour étendre le modèle standard. D'autres théories existent, certaines plus exotiques, d'autres moins. Dans tous les cas, elles sont susceptibles d'être symétriques, même si la symétrie n'est pas évidente au premier abord. Mais elle est là, cachée dans l'apparence désordonnée.

Les lauréats

— Yoichiro Nambu, né en 1921 à Tokyo, docteur ès sciences en 1952 de l'université de Tokyo, professeur émérite à l'institut Enrico Fermi de l'université de Chicago ;
— Makoto Kobayashi, né en 1944 à Nagoya au Japon, docteur en 1972 de l'université de Nagoya, professeur émérite à l'Organisation de recherche avec des accélérateurs de haute énergie (KEK) à Tsukuba ;
— Toshihide Masukawa, né en 1940, docteur en 1967 de l'université de Nagoya, professeur émérite à l'institut Yukawa de physique théorique à l'université de Kyoto et professeur à l'université de Kyoto Sangyo.

Les maîtres de la lumière

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2009 pour moitié à Charles K. Kao, des laboratoires de télécommunication de la société STC à Harlow au Royaume-Uni et de l'université chinoise de Hong Kong,

> « pour des réalisations révolutionnaires concernant la transmission de la lumière dans des fibres pour la communication optique ».

L'autre moitié du prix revient conjointement à Willard S. Boyle et George E. Smith, des laboratoires Bell à Murray Hill dans le New Jersey,

> « pour l'invention d'un circuit semi-conducteur utilisé pour l'imagerie, le capteur DCC ».

Ce prix récompense trois scientifiques qui ont joué un rôle important dans le développement des technologies modernes de l'information. Les découvertes de Kao ont ouvert la voie à la technologie de la fibre optique, qui est aujourd'hui utilisée pour la quasi-totalité de la téléphonie et de la communication de données. Boyle et Smith ont inventé un capteur photographique numérique, le capteur DCC ou « dispositif à couplage de charge », qui est aujourd'hui devenu un œil électronique dans presque tous les domaines de la photographie.

Lorsque le prix Nobel de physique est annoncé à Stockholm, une grande partie du monde reçoit le message presque instantanément. À une vitesse proche de celle de la lumière, la plus élevée des vitesses, le message est diffusé dans le monde entier. Le texte, l'image, le son et la vidéo circulent dans les fibres optiques et dans l'espace, et sont reçus instantanément dans des appareils petits et pratiques. C'est une chose que beaucoup de gens considèrent comme allant de soi. La fibre optique a été une condition préalable à cette évolution extrêmement rapide dans le domaine des communications, une évolution que Charles Kao avait prédite il y a plus de 40 ans.

Quelques années plus tard, Willard Boyle et George Smith ont radicalement changé le domaine de la photographie, car la pellicule n'est plus nécessaire dans les appareils photo. Les images peuvent être enregistrées électroniquement à l'aide d'un capteur photographique. L'œil

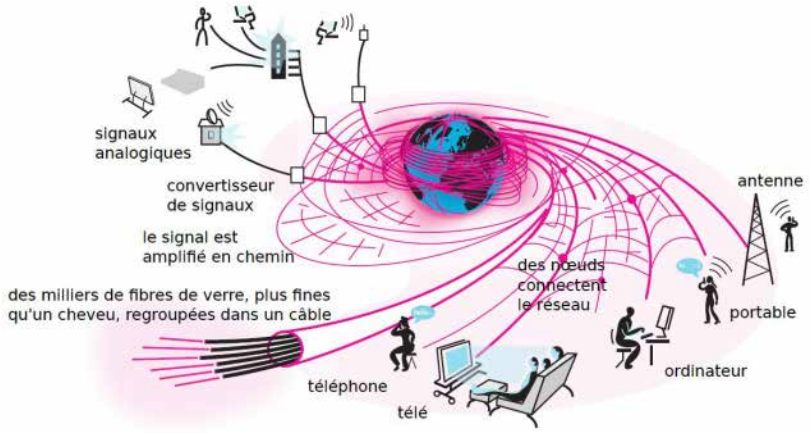


FIG. 57 – *Les fibres optiques en verre constituent le système circulatoire de notre société de communication. Il y a suffisamment de fibres pour faire plus de 25 000 fois le tour de la Terre.*

électronique, le capteur DCC, est devenu la première technologie véritablement réussie pour le transfert numérique d'images. Il a ouvert la voie à un flux quotidien d'images, qui remplit les câbles de fibre optique. Seule la fibre optique est capable de transférer des quantités de données aussi importantes que celles produites par la technologie des capteurs photographiques électroniques.

L'arrivée de la lumière

C'est grâce à la lumière du soleil que nous voyons le monde. Cependant, il faudra attendre longtemps avant que l'homme ne sache contrôler la lumière et la diriger dans un guide d'ondes. De cette manière, des messages codés peuvent être transmis à plusieurs personnes simultanément.

Cette évolution a nécessité de nombreuses inventions, petites et grandes, qui constituent les fondements de la société moderne de l'information. La fibre optique a nécessité la technologie moderne du verre pour être développée et fabriquée. Il fallait également une source de lumière fiable, qui a été fournie par la technologie des semi-conducteurs. Enfin, il fallait assembler et étendre un réseau ingénieux composé de transistors, d'amplificateurs, de commutateurs, d'émetteurs et de récep-

teurs, ainsi que d'autres unités fonctionnant ensemble. La révolution des télécommunications a été rendue possible par le travail de milliers de scientifiques et d'inventeurs du monde entier.

Des jeux de lumière

L'exposition universelle de 1889 à Paris célébra le centenaire de la Révolution française. La tour Eiffel allait devenir l'un des monuments les plus connus de cette exposition. Cependant, un remarquable jeu de lumières s'est avéré un spectacle moins mémorable. Il s'agissait de fontaines d'eau remplies de faisceaux lumineux colorés. Ce spectacle a été rendu possible grâce à l'électricité. Une source d'inspiration a également été fournie par des tentatives antérieures, au milieu du XIX^{e} siècle, de créer des faisceaux de lumière guidés par l'eau. Ces essais avaient montré que lorsqu'un faisceau d'eau est exposé à la lumière du soleil, la lumière traverse le faisceau et suit sa forme incurvée.

Bien entendu, les effets de la lumière dans le verre ou l'eau ont été découverts bien avant cela. Il y a 4 500 ans déjà, le verre était fabriqué en Mésopotamie et en Égypte. Les maîtres verriers vénitiens ne pouvaient ignorer les magnifiques jeux de lumière qui se produisaient dans leurs décorations tourbillonnantes. Le verre taillé était utilisé dans les candélabres et les lustres en cristal. Le mystère insaisissable de l'arc-en-ciel a défié l'imagination de nombreux hommes et femmes bien avant que les lois de l'optique n'en apportent l'explication au XVII^{e} siècle. Cependant, ce n'est qu'il y a une centaine d'années que ces idées ont refait surface et que les gens ont essayé de capter les faisceaux de lumière.

Capter la lumière

Un rayon de soleil qui tombe dans l'eau se courbe lorsqu'il traverse la surface, car l'indice de réfraction de l'eau est plus élevé que celui de l'air. Si la direction du faisceau lumineux est inversée, passant de l'eau à l'air, il est possible qu'il ne pénètre pas du tout dans l'air, mais qu'il soit réfléchi dans l'eau. Ce phénomène est à la base de la technologie des guides d'ondes optiques, où la lumière est capturée à l'intérieur d'une fibre dont l'indice de réfraction est plus élevé que celui de son environnement. Un rayon de lumière dirigé vers une fibre rebondit contre la paroi de verre et se déplace vers l'avant, car l'indice de réfraction du verre est plus élevé que celui de l'air environnant (figure 58).

FIG. 58 – *La fibre optique mesure environ 125 micromètres. Le cœur a généralement un diamètre d'environ 10 micromètres, soit moins qu'un cheveu. La lumière infrarouge, d'une longueur d'onde de 1,55 micromètre, présente les pertes les plus faibles. Elle est aujourd'hui utilisée pour les communications optiques.*

Le corps médical utilise des fibres optiques courtes et simples depuis les années 1930. Avec un faisceau de fines tiges de verre, ils pouvaient voir l'intérieur de l'estomac des patients ou mettre en évidence des dents lors d'opérations. Cependant, lorsque les fibres se touchaient, elles laissaient échapper de la lumière et s'usaient facilement. Le revêtement de la fibre nue par une gaine de verre ayant un indice de réfraction plus faible a permis des améliorations considérables qui, dans les années 1960, ont ouvert la voie à la fabrication industrielle d'instruments pour la gastroscopie et d'autres utilisations médicales.

Pour les communications à longue distance cependant, ces fibres de verre étaient inutiles. De plus, la lumière optique n'intéressait pas grand monde, c'était l'époque de l'électronique et de la radio. En 1956, le premier câble transatlantique fut déployé, avec une capacité de 36 appels téléphoniques simultanés. Peu après, les satellites commencèrent à couvrir les besoins croissants en matière de communication : la téléphonie augmenta considérablement et la télédiffusion exigea des capacités de transfert de plus en plus élevées. Par rapport aux ondes radio, la lumière infrarouge ou visible transporte des dizaines de milliers de fois plus d'information, de sorte que le potentiel des ondes lumineuses ne pouvait plus être négligé.

Transmission de la lumière

L'invention du laser au début des années 1960 a constitué une avancée décisive pour les fibres optiques. Le laser est une source de lumière

stable, qui émet un faisceau lumineux intense et très focalisé, et qui peut être conduite dans une fibre optique fine. Les premiers lasers émettaient de la lumière infrarouge et nécessitaient un refroidissement. Vers 1970, on a mis au point des lasers plus pratiques, capables de fonctionner en continu à température ambiante. C'est une avancée technologique qui a facilité la communication optique.

Toutes les informations pouvaient désormais être codées dans une lumière clignotante extrêmement rapide, représentant des uns et des zéros numériques. Cependant, on ne savait pas encore comment ces signaux pouvaient être transmis sur de plus longues distances : après seulement 20 mètres, il ne restait plus que 1 % de la lumière qui avait pénétré dans la fibre de verre.

Réduire cette perte de lumière est devenu un défi pour un visionnaire comme Charles Kuen Kao. Né en 1933 à Shanghai, il s'est installé à Hong Kong avec sa famille en 1948. Ingénieur en électronique de formation, il a soutenu sa thèse de doctorat en 1965 à Londres. À cette époque, il travaillait déjà aux laboratoires de télécommunication de la société STC, où il étudiait méticuleusement les fibres de verre avec son jeune collègue George A. Hockham. Leur objectif était qu'au moins 1 % de la lumière pénétrant dans une fibre de verre y reste après avoir parcouru un kilomètre.

En janvier 1966, Kao présenta ses conclusions. Ce n'étaient pas les imperfections des fils de la fibre qui constituaient le principal problème, mais le verre qui devait être purifié. Il reconnut que c'était faisable mais très difficile. L'objectif était de fabriquer un verre d'une transparence jamais atteinte auparavant. L'enthousiasme de Kao a incité d'autres chercheurs à partager sa vision du potentiel futur de la fibre optique.

Le verre est fabriqué à partir de quartz, le minéral le plus abondant sur Terre. Lors de sa production, on utilise différents additifs tels que la soude et la chaux afin de simplifier le processus. Cependant, pour produire le verre le plus pur au monde, Kao a indiqué qu'il était possible d'utiliser du quartz fondu, c'est-à-dire de la silice fondue. La silice fond à près de 2 000 °C, une température difficilement contrôlable mais à partir de laquelle on pourrait tirer des fils de fibres ultra-minces.

Au bout de quatre ans, en 1971, les scientifiques de la société *Corning Glass Works* aux États-Unis, un fabricant de verre ayant plus de cent ans d'expérience, ont produit une fibre optique d'un kilomètre de long en utilisant des procédés chimiques.

Rempli de lumière

Les fibres très fines en verre peuvent sembler très fragiles. Cependant, lorsque le verre est correctement étiré en un long fil, ses propriétés changent. Il devient solide, léger et flexible, ce qui est une condition préalable si la fibre doit être enterrée, tirée sous l'eau ou pliée dans les coins. Contrairement aux câbles en cuivre, la fibre de verre n'est pas sensible à la foudre. Contrairement aux communications radio, elle n'est pas affectée par les intempéries.

Il a fallu pas mal de temps pour enrouler la Terre dans la fibre. En 1988, le premier câble optique a été posé au fond de l'océan Atlantique entre les États-Unis et l'Europe. Il mesurait 6 000 km de long. Aujourd'hui, les communications téléphoniques et de données circulent dans un réseau de fibres optiques en verre, dont la longueur totale dépasse le milliard de kilomètres. Si cette quantité de fibre optique était enroulée autour du globe, elle ferait le tour du monde plus de 25 000 fois et la quantité de fibre augmente d'heure en heure (figure 57).

Même dans une fibre de verre de grande pureté, le signal est légèrement atténué en cours de route et doit être renforcé lorsqu'il est transmis sur de plus longues distances. Cette tâche, qui nécessitait auparavant de l'électronique, est aujourd'hui réalisée par des amplificateurs optiques. Cela a mis fin aux pertes inutiles qui se produisaient lorsque la lumière était transformée en signaux électroniques et vice-versa.

Aujourd'hui, 95 % de la lumière est conservée après avoir été transmise sur un kilomètre, un chiffre à comparer à l'ambition de Kao, qui était de conserver 1 % de la lumière sur la même distance. Par ailleurs, il n'est pas possible de parler d'un seul type de fibre. Le choix de la fibre à utiliser dépend d'un grand nombre de considérations techniques, de besoins de communication et de coûts.

Les fibres sont caractérisées par une interaction sophistiquée entre la taille, les propriétés des matériaux et la longueur d'onde de la lumière. Les lasers à semi-conducteurs et les diodes lumineuses de la taille d'un grain de sable remplissent les réseaux de fibres optiques de lumière qui achemine la quasi-totalité des communications téléphoniques et de données dans le monde. La lumière infrarouge, d'une longueur d'onde de 1,55 micromètre, est aujourd'hui utilisée pour toutes les communications à longue distance, pour que les pertes soient les plus faibles.

La capacité des réseaux de câbles optiques continue de croître à une vitesse stupéfiante. Le transfert de milliers de *gigabits* par seconde n'est plus un rêve. Le développement technologique va dans le sens

d'une communication de plus en plus interactive, où les câbles à fibres optiques sont conçus pour aller jusqu'au domicile de chacun d'entre nous. La technologie existe déjà. Ce que nous en ferons est une toute autre question.

L'œil électronique

Il arrive que des inventions soient totalement imprévues. Le capteur photographique DCC, ou dispositif à couplage de charge, est une de ces inventions. Sans le capteur DCC, le développement des appareils photo numériques aurait été plus lent. Sans le capteur DCC, nous n'aurions pas vu les étonnantes images de l'espace prises par le télescope spatial Hubble, ni les images du désert rouge de notre planète voisine Mars.

Ce n'est pas ce que les inventeurs du capteur DCC, Willard Boyle et George Smith, avaient imaginé lorsqu'ils ont commencé leurs travaux. Un jour de septembre 1969, ils ont tracé les grandes lignes d'un capteur photographique sur un tableau noir dans le bureau de Boyle. À l'époque, ils n'avaient pas d'images photographiques en tête. Leur objectif avec le capteur DCC était de créer une meilleure mémoire électronique. En tant que dispositif de mémoire, il est aujourd'hui oublié. Cependant, ils ont mis au point un élément indispensable à la technologie moderne de l'image. Le capteur DCC est une autre réussite de notre ère électronique.

Les images deviennent numériques

Comme beaucoup d'autres appareils de l'industrie électronique, les capteurs DCC sont fabriqués en silicium. De la taille d'un timbre, la plaque de silicium contient des millions de cellules photoélectriques sensibles à la lumière. La technique d'imagerie utilise l'effet photoélectrique, théorisé pour la première fois par Albert Einstein et qui lui a valu le prix Nobel en 1921. L'effet se produit lorsque la lumière frappe la plaque de silicium et fait tomber des électrons dans les cellules photoélectriques. Les électrons libérés sont rassemblés dans les cellules qui deviennent comme de petits puits. Plus la quantité de lumière est importante, plus le nombre d'électrons qui remplissent ces puits est élevé.

Lorsqu'on applique une tension à la matrice DCC, le contenu des puits peut être lu progressivement. Rangée par rangée, les électrons glissent de la matrice sur une sorte de tapis roulant (figure 59). Ainsi,

par exemple, une matrice de 10×10 points est transformée en une chaîne de 100 points. De cette manière, le capteur DCC transforme l'image optique en signaux électriques qui sont ensuite traduits en uns et zéros numériques. Chaque cellule peut alors être recréée comme un point de l'image, un pixel. Lorsque l'on multiplie la largeur d'un capteur DCC, exprimée en pixels, par sa hauteur, on obtient la capacité photographique du capteur. Ainsi, un capteur DCC de $1\,280 \times 1\,024$ pixels a une capacité de 1,3 mégapixels (1,3 million de pixels).

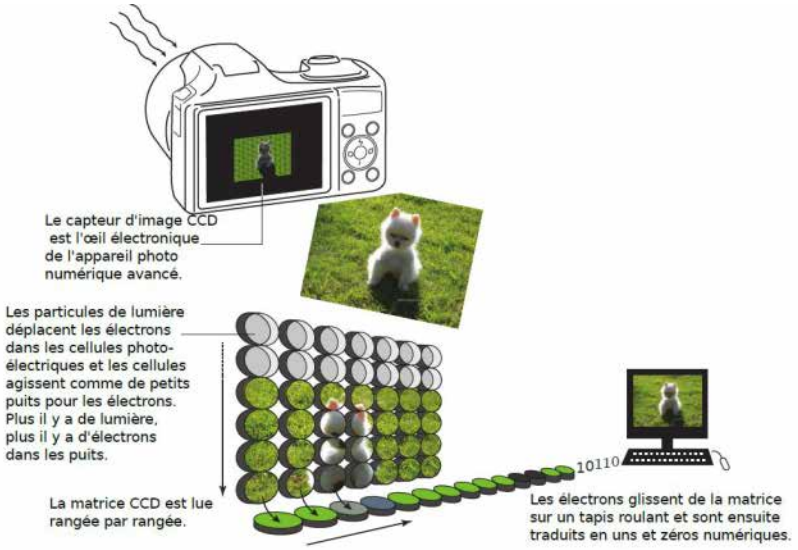


Fig. 59 – Images numériques. *Le capteur DCC, le capteur photographique électronique, convertit l'image optique en signaux électroniques qui sont traduits en uns et zéros numériques.*

Le capteur DCC restitue une image en noir et blanc, de sorte que divers filtres doivent être utilisés pour obtenir les couleurs de la lumière. Un type de filtre contenant l'une des couleurs de base (rouge, vert ou bleu) est placé sur chaque cellule du capteur photographique. En raison de la sensibilité de l'œil humain, le nombre de pixels verts doit être deux fois plus élevé que celui des pixels bleus ou rouges. Pour une imagerie plus avancée, on peut utiliser plusieurs filtres.

Les défis au travail

Le fait que Boyle et Smith aient eu l'idée du capteur DCC au cours de leur brève séance de remue-méninges il y a quarante ans peut être attribué à la politique interne de leur employeur. Leur patron aux laboratoires Bell, près de New York, les a encouragés à relever un défi et à participer à un concours portant sur l'amélioration des mémoires à bulles, une autre invention des laboratoires Bell. Lorsque la conception de base du capteur DCC a été achevée, il n'a fallu qu'une semaine aux techniciens pour assembler le premier prototype. La mémoire est oubliée depuis longtemps, mais le capteur DCC est devenu le centre de nombreuses techniques d'imagerie numérique.

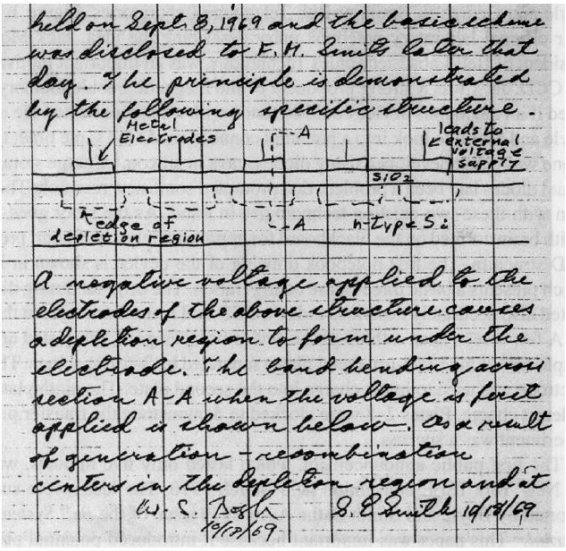

held on Sept. 8, 1969 and the basic scheme was disclosed to E. H. Smith later that day. The principle is demonstrated by the following specific structure.
Metal Electrodes
A
Leads to external voltage supply
SiO_2
A
n-Type Si
edge of depletion region
A negative voltage applied to the electrodes of the above structure causes a depletion region to form under the electrodes. The band bending across section A-A when the voltage is first applied is shown below. As a result of generation-recombination centers in the depletion region and at
W. S. Boyle 9/8/69
G. E. Smith 9/8/69

FIG. 60 – *Notes originales de la réunion de remue-méninges du 8 septembre 1969 entre Boyle et Smith, au cours de laquelle ils ont réalisé la première esquisse d'un capteur DCC.*

L'Américain George Smith a été embauché par les laboratoires Bell en 1959 et a déposé 30 brevets au cours de sa carrière dans l'entreprise. Lorsqu'il a pris sa retraite en 1986, il a enfin pu se consacrer pleinement à sa passion de toujours, la navigation en haute mer, qui l'a amené à faire plusieurs fois le tour du monde.

En 1969, Willard Boyle avait déjà fait de nombreuses découvertes importantes, notamment en ce qui concerne le développement du premier laser à lumière rouge continue. Né dans une région reculée de la Nouvelle-Écosse au Canada et éduqué à la maison par sa mère jusqu'à l'âge de 15 ans, Willard Boyle a commencé à travailler aux laboratoires Bell en 1953. Dans les années 1960, il a rejoint les 400 000 scientifiques américains dont les efforts ont permis d'envoyer le premier homme sur la Lune, le 20 juillet 1969.

Un appareil photo pour tous

Les avantages du capteur photographique électronique sont rapidement devenus évidents. En 1970, à peine un an après l'invention, Smith et Boyle ont pu mettre pour la première fois un capteur DCC dans leur caméra vidéo. En 1972, l'entreprise américaine Fairchild a construit le premier capteur photographique de 100×100 pixels, qui est entré en production quelques années plus tard. En 1975, Boyle et Smith ont construit eux-mêmes une caméra vidéo numérique d'une résolution suffisamment élevée pour gérer les émissions de télévision.

Il faudra attendre 1981 pour voir apparaître sur le marché le premier appareil photo avec capteur DCC intégré. Malgré ses caractéristiques encombrantes et primitives par rapport aux appareils photo contemporains, il a initié une numérisation plus commerciale dans le domaine de la photographie. Cinq ans plus tard, en 1986, le premier capteur photographique de 1,4 mégapixel (1,4 million de pixels) est apparu. Neuf ans plus tard, en 1995, le premier appareil photo entièrement numérique a vu le jour. Les fabricants d'appareils photo du monde entier ont rapidement pris le train en marche et le marché a été inondé de produits de plus en plus petits et de moins en moins chers.

Avec des appareils photo équipés de capteurs photographiques au lieu de pellicules, une ère de l'histoire de la photographie s'est achevée. Elle avait commencé en 1839, lorsque Louis Daguerre avait présenté son invention de la pellicule photographique devant l'Académie des sciences à Paris.

En ce qui concerne la photographie de tous les jours, les appareils photo numériques se sont révélés être un succès commercial. Le capteur DCC a été récemment concurrencé par une autre technologie, la technologie CMOS (« semi-conducteur à oxyde de métal complémentaire »), inventée à peu près en même temps que le capteur DCC. Les deux utilisent l'effet photoélectrique, mais alors que les électrons ras-

semblés dans un capteur DCC marchent en ligne pour être lus, chaque cellule photoélectrique d'un dispositif CMOS est lue sur place.

Les dispositifs CMOS consomment moins d'énergie, de sorte que les piles durent plus longtemps. Pendant longtemps, ils ont également été moins chers. Cependant, il faut également tenir compte des niveaux de bruit plus élevés et de la perte de qualité de l'image. Par conséquent, le dispositif CMOS n'est pas suffisamment sensible pour de nombreuses applications avancées. Actuellement, le dispositif CMOS est souvent utilisé pour la photographie quotidienne sur téléphone portable et pour d'autres types de photographie. Les deux technologies sont toutefois en constante évolution et sont interchangeables pour de nombreuses applications.

En 2006, le capteur DCC a franchi la limite des 100 mégapixels et, bien que la qualité de l'image ne dépende pas uniquement du nombre de pixels, le dépassement de cette limite est considéré comme un pas de plus vers l'avenir pour la photographie numérique. Certains prédisent que l'avenir appartient à la technologie CMOS plutôt qu'au capteur DCC. D'autres encore affirment que les deux technologies continueront à se compléter pendant longtemps.

Des pixels sensibles à la lumière

Personne ne prévoyait au départ que le capteur DCC deviendrait indispensable au domaine de l'astronomie. C'est pourtant précisément grâce à la technologie numérique que l'appareil grand angle du télescope spatial Hubble peut renvoyer sur Terre les images les plus étonnantes (figure 61). Le capteur de l'appareil ne comportait à l'origine que 0,64 mégapixel. Cependant, l'interconnexion de quatre capteurs a permis d'obtenir un total de 2,56 mégapixels. Il s'agissait d'une grande avancée dans les années 1980, au moment de la conception du télescope spatial. Aujourd'hui, le satellite Kepler a été équipé d'un capteur mosaïque de 95 mégapixels. On espère qu'il découvrira des planètes semblables à la Terre autour d'étoiles autres que le Soleil.

Les astronomes ont très tôt compris les avantages du capteur photographique numérique. Il couvre l'ensemble du spectre lumineux, des rayons X aux infrarouges. Il est mille fois plus sensible qu'un film photographique. Sur 100 particules de lumière entrantes, un capteur DCC en capte jusqu'à 90, alors qu'une plaque photographique ou l'œil humain n'en capte qu'une. En quelques secondes, on recueille la lumière provenant d'objets éloignés, un processus qui aurait auparavant pris plusieurs

Fig. 61 – *Le capteur DCC a ouvert les yeux de la science sur ce qui n'avait jamais été vu auparavant. Une des nombreuses photos prises par le télescope spatial Hubble. Photo : NASA, ESA et STScI*

heures. L'effet est également directement proportionnel à l'intensité de la lumière : plus la quantité de lumière est importante, plus le nombre d'électrons est élevé.

En 1974, un premier capteur photographique avait déjà été utilisé pour prendre des photos de la Lune, les premières images astronomiques jamais prises avec un appareil photo numérique. Les astronomes ont adopté cette nouvelle technologie à la vitesse de l'éclair. En 1979, un appareil photo numérique d'une résolution de 320×512 pixels a été montée sur l'un des télescopes de Kitt Peak, dans l'Arizona aux États-Unis.

De nos jours, chaque fois qu'on utilise une photo, une vidéo ou une télévision, des capteurs photographiques numériques sont généralement impliqués dans le processus. Ils sont utiles à des fins de surveillance sur Terre et dans l'espace. En outre, la technologie DCC est utilisée dans une multitude d'applications médicales, par exemple pour l'imagerie de l'intérieur du corps humain, tant pour les diagnostics que pour les opérations chirurgicales. Le capteur photographique numérique est devenu un instrument largement utilisé au service de la science, tant au fond des océans que dans l'espace. Il peut révéler de fins détails dans des objets très éloignés et extrêmement petits. Ainsi, les avancées technologiques et scientifiques s'entremêlent.

Les lauréats

— Charles Kuen Kao, né en 1933 à Shanghai, docteur en génie électrique en 1965 de l'université de Londres, directeur de l'ingénierie des laboratoires de télécommunication de la société STC à

Harlow au Royaume-Uni, vice-chancelier de l'université chinoise de Hong Kong, retraité depuis 1996 ;

— Willard Sterling Boyle, né en 1924 à Amherst en Nouvelle-Écosse au Canada, docteur en physique en 1950 de l'université McGill au Québec, directeur exécutif de la division des sciences de la communication aux laboratoires Bell à Murray Hill dans le New Jersey, retraité depuis 1979 ;

— George Elwood Smith, né en 1930 à White Plains, dans l'État de New York, docteur en physique en 1959 de l'université de Chicago, chef du département des dispositifs d'intégration à très grande échelle des laboratoires Bell, retraité depuis 1986.

Le graphène : un réseau atomique parfait

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2010 à Andre Geim et à Konstantin Novoselov, de l'université de Manchester au Royaume-Uni,

> « pour des expériences révolutionnaires concernant le matériau bidimensionnel qu'est le graphène ».

Un mince flocon de carbone ordinaire, d'une épaisseur d'un atome seulement, est à l'origine du prix Nobel de physique 2010. Andre Geim et Konstantin Novoselov ont montré que le carbone, sous une forme aussi plate, possède des propriétés exceptionnelles qui trouvent leur origine dans le monde remarquable de la physique quantique.

Le graphène est une forme de carbone. En tant que matériau, il est totalement nouveau : il est non seulement le plus fin, mais aussi le plus résistant. En tant que conducteur d'électricité, il est aussi performant que le cuivre. En tant que conducteur de chaleur, il surpasse tous les autres matériaux connus. Il est presque totalement transparent, mais si dense que même l'hélium, le plus petit atome de gaz, ne peut le traverser.

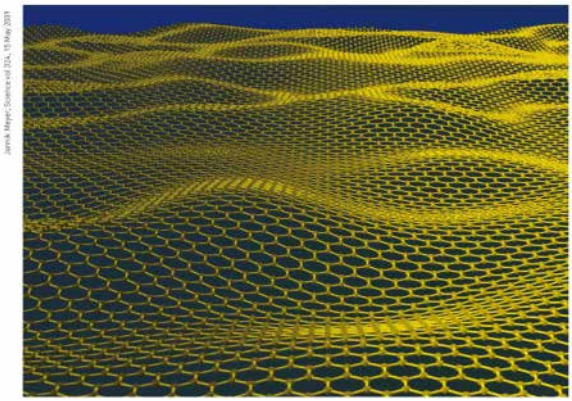


FIG. 62 – Le graphène. *Cette toile presque parfaite n'a qu'un atome d'épaisseur. Elle est constituée d'atomes de carbone reliés entre eux selon un schéma hexagonal semblable à celui d'un grillage à poule.*

L'article sur le graphène publié dans la revue *Science* en octobre 2004 a donc suscité beaucoup d'émoi dans le monde entier. D'une part, les propriétés exotiques du graphène permettent aux scientifiques de tester les fondements théoriques de la physique. D'autre part, une grande variété d'applications pratiques semblent désormais possibles, notamment la création de nouveaux matériaux et la fabrication d'appareils électroniques innovants.

Le carbone, qui est à la base de toute la vie connue sur Terre, nous a surpris une fois de plus.

Crayon, papier et ruban adhésif

Rien de plus facile que d'obtenir du graphène, ce matériau miraculeux issu du graphite ordinaire que l'on trouve dans les crayons. Cependant, les choses les plus simples et les plus évidentes nous échappent souvent.

Le graphène est constitué d'atomes de carbone assemblés en un réseau plat, semblable à une structure en nid d'abeille, mais d'une épaisseur d'un seul atome. Un millimètre de graphite est en fait constitué de trois millions de couches de graphène empilées les unes sur les autres. Les couches sont faiblement liées entre elles. Il est donc assez facile de les arracher et de les séparer. Quiconque a écrit quelque chose avec un crayon ordinaire en a fait l'expérience. Il est possible qu'une seule couche d'atomes, du graphène, se soit retrouvée sur le papier.

C'est ce qui s'est passé lorsque Andre Geim et Konstantin Novoselov ont utilisé du ruban adhésif pour arracher de manière plus méthodique de fines lamelles d'un morceau de graphite plus grand. Au début, ils ont obtenu des flocons constitués de plusieurs couches de graphène. Mais lorsqu'ils ont répété l'opération dix à vingt fois, les flocons sont devenus de plus en plus fins. L'étape suivante consistait à trouver les minuscules fragments de graphène parmi les couches plus épaisses de graphite et d'autres déchets de carbone. C'est alors qu'ils ont eu leur deuxième idée géniale : pour voir le résultat de leur travail méticuleux, les scientifiques de Manchester ont décidé de fixer les flocons sur une plaque de silicium oxydé, le matériau de travail standard dans l'industrie des semi-conducteurs.

En plaçant la plaque sous un microscope standard, on peut observer un arc-en-ciel de couleurs, semblable à ce que l'on voit lorsqu'on verse de l'huile sur de l'eau, et ainsi déterminer le nombre de couches de graphène dans les flocons. L'épaisseur de la couche de dioxyde de

silicium sous-jacente était à son tour cruciale pour révéler le graphène. Le microscope a révélé le graphène, un matériau cristallin véritablement bidimensionnel qui existe à température ambiante. Le graphène est un réseau de carbone parfaitement régulier qui ne comporte que deux dimensions, la largeur et la longueur. L'unité de base de ce réseau est constituée de six atomes de carbone reliés chimiquement. Le graphène, ainsi que d'autres formes de carbone que nous connaissons, est constitué de milliards d'atomes de carbone assemblés selon un schéma hexagonal.

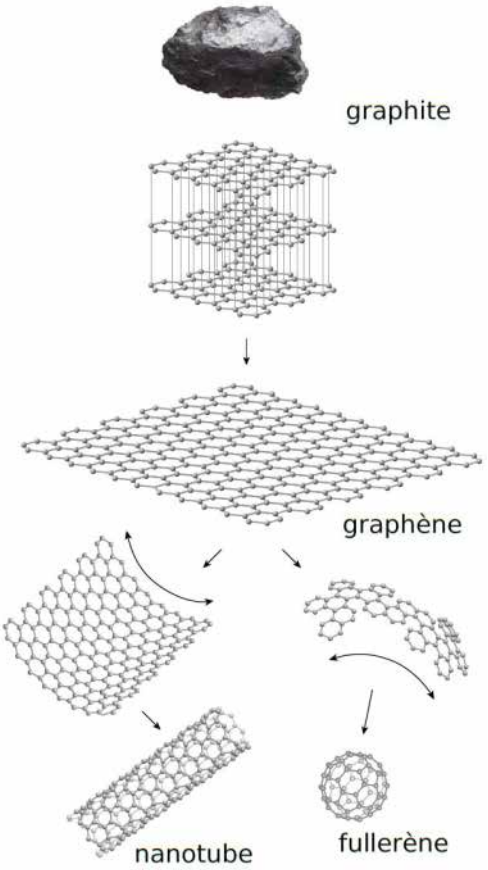


Fig. 63 – Le graphène issu du graphite. *Le graphite est un matériau de base présent dans la nature. Lorsqu'on les sépare, les feuilles de graphite se transforment en graphène. Une couche de graphène enroulée forme un nanotube de carbone. Pliée en deux, elle devient un petit ballon de football, le fullerène. Caché dans le graphite, le graphène attendait d'être découvert.*

En attendant la découverte

Le graphène a bien sûr toujours existé. L'essentiel était de savoir le repérer. De même, d'autres formes naturelles de carbone sont apparues aux scientifiques lorsqu'ils les ont observées de la bonne manière : d'abord les nanotubes, puis les boules creuses de carbone, les fullerènes (prix Nobel de chimie en 1996). Piégé dans le graphite, le graphène attendait d'être libéré (fig. 63). Personne ne pensait vraiment que c'était possible.

De nombreux scientifiques pensaient qu'il serait impossible d'isoler des matériaux aussi minces : ils se froisseraient ou s'enrouleraient à température ambiante, voire disparaîtraient tout simplement. Malgré cela, certains ont essayé, même si les tentatives précédentes d'obtenir du graphène avaient échoué. Auparavant, il était possible d'obtenir des films d'une épaisseur inférieure à 100 atomes. Certains étaient même si minces qu'ils étaient transparents.

Une façon d'obtenir du graphène à partir du graphite consiste à introduire des substances chimiques entre les couches d'atomes afin d'affaiblir le lien qui les unit, puis de séparer les couches. Une autre méthode consiste à gratter les couches de graphite. On a également essayé, avec succès, de « brûler » le silicium des cristaux de carbure de silicium. À des températures très élevées, il restait de fines couches de carbone. Les différentes techniques de croissance épitaxiale, utilisées pour créer divers matériaux semi-conducteurs, sont les plus prometteuses pour la production de graphène destiné à l'industrie électronique. Les rouleaux de feuilles de graphène de 70 centimètres de large sont les plus grands produits à ce jour.

Dans un monde de paradoxes

Andre Geim et Konstantin Novoselov n'ont pu obtenir que des micro-flocons du nouveau matériau. Malgré cette taille minuscule, ils ont pu commencer à étudier les deux caractéristiques les plus remarquables du graphène, qui influencent toutes deux ses propriétés électriques.

La première est la composition presque parfaite du graphène. L'ordre sans erreur est dû à la forte liaison des atomes de carbone. En même temps, les liaisons sont suffisamment souples pour permettre à la bande de s'étirer jusqu'à 20 % de sa taille d'origine. Le réseau permet également aux électrons de parcourir de longues distances dans le

Fig. 64 – Comme un drap de soie. *Feuilles de graphène pliées sur une plaque de silicium. L'image a été prise au microscope électronique à balayage, avec un grossissement d'environ 5 000.*

graphène sans être perturbés. Dans les conducteurs normaux, les électrons rebondissent souvent comme la balle d'un flipper. Ces rebonds affaiblissent les performances du conducteur.

L'autre caractéristique unique du graphène est que ses électrons se comportent comme des particules de lumière, des photons sans masse, qui avancent dans le vide inexorablement à une vitesse de 300 millions de mètres par seconde. De même, les électrons qui se déplacent dans le graphène se comportent comme s'ils n'avaient pas de masse et avancent à une vitesse constante d'un million de mètres par seconde. Cela ouvre la possibilité d'étudier plus facilement certains phénomènes à plus petite échelle, c'est-à-dire sans avoir recours à un grand accélérateur de particules.

Le graphène permet également aux scientifiques de tester certains des effets quantiques les plus fantomatiques, qui n'ont fait jusqu'à présent l'objet que de discussions théoriques. L'un de ces phénomènes est une variante de l'effet tunnel de Klein, formulé par le physicien suédois Oskar Klein en 1929. L'effet tunnel en physique quantique décrit comment les particules peuvent parfois passer à travers une barrière qui les bloquerait normalement. Plus la barrière est grande, moins les particules quantiques ont de chances de la traverser. Toutefois, cela ne s'applique pas aux électrons qui se déplacent dans le graphène : dans certaines circonstances, ils avancent comme si la barrière n'existait pas.

Des mondes de rêve

Les applications pratiques possibles du graphène ont fait l'objet d'une grande attention. Jusqu'à présent, la plupart d'entre elles n'existent que dans nos fantasmes, mais beaucoup sont déjà testées, y compris par Geim et Novoselov eux-mêmes.

La capacité conductrice du graphène a suscité beaucoup d'intérêt. On prévoit que les transistors en graphène seront nettement plus rapides que ceux fabriqués aujourd'hui en silicium. Pour que les puces informatiques deviennent plus rapides et plus économes en énergie, elles doivent être plus petites. Le silicium atteint une limite de taille où le matériau cesse de fonctionner. La limite pour le graphène est encore plus basse, de sorte que les composants en graphène pourraient être placés sur une puce de manière plus serrée qu'aujourd'hui.

Une étape a été franchie il y a quelques années lorsqu'un composant clé, un transistor en graphène, a été présenté comme étant aussi rapide que son homologue en silicium. Nous sommes peut-être à l'aube d'une nouvelle miniaturisation de l'électronique qui permettra aux ordinateurs d'être encore plus performants à l'avenir. Pour l'instant, les ordinateurs en graphène ne sont qu'un rêve lointain, bien que des écrans d'ordinateur transparents, minces comme du papier, qui peuvent être enroulés et transportés dans un sac à main, soient déjà apparus dans des publicités pour l'électronique grand public de demain.

En attendant, nous ne pouvons que spéculer sur certaines applications plus ou moins réalistes, qui nécessitent toutes des initiatives importantes et dont les résultats sont encore incertains.

Le graphène étant pratiquement transparent (jusqu'à près de 98 %) tout en étant capable de conduire l'électricité, il conviendrait à la production d'écrans tactiles transparents, de panneaux lumineux et peut-être même de cellules photovoltaïques. Les plastiques pourraient éga-

lement être transformés en conducteurs si on y mélangeait seulement 1 % de graphène. De même, en incorporant une quantité de graphène de l'ordre du millième, la résistance à la chaleur des plastiques augmenterait de 30 °C, tout en les rendant plus robustes sur le plan mécanique. Cette résilience pourrait être utilisée dans de nouveaux matériaux très résistants, mais aussi minces, élastiques et légers. À l'avenir, des satellites, des avions et des voitures pourraient être fabriqués à partir de ces nouveaux matériaux composites.

La structure parfaite du graphène le rend également adapté à la production de capteurs extrêmement sensibles qui pourraient enregistrer même les plus petits niveaux de pollution. Même une seule molécule adsorbée à la surface du graphène serait découverte.

Un jeu sérieux

La liste des applications possibles du graphène est longue. L'activité incessante qui a débuté après sa découverte finira très probablement par porter ses fruits. Personne ne peut prédire ce que l'avenir nous réserve, pas même les lauréats du prix Nobel 2010. Ils se sont laissés guider dans les labyrinthes du hasard et ont eu la chance et les connaissances nécessaires pour saisir les occasions qui se présentaient. Comme nous le savons tous, le hasard ne favorise que les esprits préparés.

Les deux lauréats pensent que la recherche doit être un plaisir. Ils travaillent ensemble depuis longtemps. Konstantin Novoselov, 36 ans, a commencé à travailler pour Andre Geim, 51 ans, en tant que doctorant aux Pays-Bas. Il a ensuite suivi Geim au Royaume-Uni. Tous deux ont étudié et commencé leur carrière de physiciens en Russie. Aujourd'hui, ils sont tous deux professeurs à l'université de Manchester.

Le jeu est l'une de leurs caractéristiques. Avec les éléments de construction dont ils disposent, ils tentent de créer quelque chose de nouveau, parfois même en laissant leur cerveau vagabonder sans but. On apprend toujours quelque chose au cours de ce processus et, qui sait, on peut même toucher le gros lot. C'est ce qui s'est passé il y a sept ans, lorsqu'ils ont créé un ruban adhésif extrêmement collant inspiré de la capacité du gecko à adhérer aux surfaces les plus lisses. Avant cela, en 1997, Andre Geim avait réussi à faire léviter une grenouille dans un champ magnétique, une manière ingénieuse d'illustrer les principes de la physique. La grenouille en lévitation lui a valu en l'an 2000 le prix Ig-Nobel destiné à « faire rire les gens d'abord et les faire réfléchir ensuite ».

Aujourd'hui, avec le graphène, Andre Geim et Konstantin Novoselov sont entrés dans les annales de la science.

Les lauréats

— Andre Geim, né en 1958 à Sotchi en Russie, docteur en 1987 de l'institut de physique des solides de l'Académie des sciences de Russie à Chernogolovka, directeur du centre pour la mésoscience et les nanotechnologies à Manchester, professeur de physique à l'université de Manchester et « professeur de recherche » à l'occasion de l'anniversaire en 2010 de la *Royal Society* ;
— Konstantin Novoselov, né en 1974 à Nijni Taguil en Russie, docteur en 2004 de l'université Radboud de Nimègue aux Pays-Bas, professeur à l'université de Manchester avec une bourse de recherche de la *Royal Society*.

L'accélération de l'expansion de l'Univers

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2011 pour moitié à

— Saul Perlmutter, du projet de cosmologie des supernovae au laboratoire national Lawrence Berkeley et de l'université de Californie à Berkeley,

l'autre moitié revenant conjointement à

— Brian P. Schmidt, de l'équipe de recherche des supernovae avec un z élevé et de l'Université nationale australienne à Weston Creek,

— Adam G. Riess, de l'équipe de recherche des supernovae avec un z élevé, de l'université Johns Hopkins et de l'Institut des sciences du télescope spatial à Baltimore dans le Maryland,

« pour la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers grâce à l'observation de supernovae lointaines ».

« Certains disent que le monde finira dans le feu, d'autres disent dans la glace... » (Robert Frost, *Feu et Glace*, 1920). Quel est le destin de l'Univers ? Il finira probablement dans la glace si l'on en croit les lauréats du prix Nobel 2011. Ils ont étudié attentivement plusieurs dizaines d'étoiles qui ont explosé, appelées supernovae, dans des galaxies lointaines et ont conclu que l'expansion de l'Univers s'accélérait.

Cette découverte a surpris les lauréats eux-mêmes. Ce qu'ils ont vu, c'est comme si on lançait une balle en l'air et qu'au lieu de la voir redescendre, on la voyait disparaître de plus en plus rapidement dans le ciel, comme si la gravité ne parvenait pas à inverser la trajectoire de la balle. Il semble que quelque chose de similaire se produise dans l'ensemble de l'Univers.

La vitesse croissante de l'expansion implique que l'Univers est poussé par une forme inconnue d'énergie intégrée dans le tissu de l'espace. Cette « énergie noire » [7] représente une grande partie de l'Univers, plus de 70 %, et constitue une énigme, peut-être la plus grande de la physique actuelle. Il n'est donc pas étonnant que la cosmologie ait été ébranlée dans ses fondements lorsque deux groupes de recherche différents ont présenté des résultats similaires en 1998.

7. Ou « énergie sombre ».

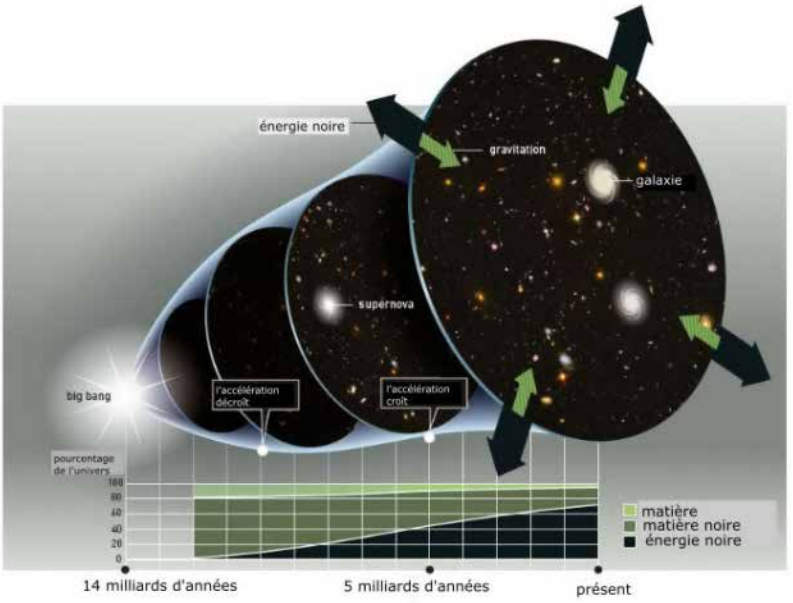


FIG. 65 – *L'expansion de l'Univers a commencé avec le* Big Bang *il y a 14 milliards d'années, mais s'est ralentie pendant les premiers milliards d'années. Elle a ensuite commencé à accélérer. On pense que cette accélération est due à l'énergie noire qui, au début, ne constituait qu'une petite partie de l'Univers. Mais au fur et à mesure que la matière se diluait dans l'expansion, l'énergie noire est devenue plus dominante.*

Saul Perlmutter dirigeait l'une des deux équipes de recherche, le « projet de cosmologie des supernovae », lancé dix ans plus tôt en 1988. Brian Schmidt était à la tête d'une autre équipe de scientifiques, qui a lancé vers la fin de l'année 1994 un projet concurrent, « l'équipe de recherche des supernovae avec un z élevé », dans lequel Adam Riess devait jouer un rôle crucial.

Les deux équipes de recherche ont fait la course pour cartographier l'Univers et trouver dans l'espace les supernovae, c'est-à-dire les explosions d'étoiles, les plus lointaines. En déterminant la distance des supernovae et la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous, les scientifiques espéraient révéler notre destin cosmique. Ils s'attendaient à trouver des signes de ralentissement de l'expansion de l'Univers, ce qui aurait

conduit à un équilibre entre le feu et la glace. C'est l'inverse qui est vrai : l'expansion accélère.

FIG. 66 – *Brille, brille, petite étoile*
Comme j'aimerais savoir ce que tu es...
(Paroles d'une chanson enfantine anglaise)

L'expansion de l'Univers

Ce n'est pas la première fois qu'une découverte astronomique révolutionne nos idées sur l'Univers. Il y a seulement une centaine d'années, l'Univers était considéré comme un endroit calme et paisible, pas plus grand que notre propre galaxie, la Voie lactée. L'horloge cosmologique tournait de manière fiable et régulière, et l'Univers semblait éternel. Peu après, un changement radical allait néanmoins bouleverser cette image.

Au début du XX^{e} siècle, l'astronome américaine Henrietta Swan Leavitt a trouvé un moyen de mesurer les distances entre les étoiles lointaines. À l'époque, les femmes astronomes n'avaient pas accès aux grands télescopes, mais elles étaient souvent employées à la lourde tâche d'analyser les plaques photographiques. Henrietta Leavitt a étudié des milliers d'étoiles variables, appelées céphéides, et a constaté que les étoiles les plus brillantes avaient des périodes de pulsation plus longues. Grâce à cette information, Leavitt a pu calculer la luminosité intrinsèque des céphéides.

Si l'on connaît la distance d'une seule céphéide, on peut déterminer la distance des autres céphéides : plus la lumière est faible, plus l'étoile est éloignée. Une bougie étalon fiable était née, une première marque sur l'étalon cosmique qui est toujours utilisée aujourd'hui. Grâce aux

céphéides, les astronomes conclurent peu après que la Voie lactée n'est qu'une galaxie parmi d'autres dans l'Univers. Dans les années 1920, des astronomes utilisèrent le plus grand télescope du monde de l'époque, celui du mont Wilson en Californie, ce qui leur permit de montrer que presque toutes les galaxies s'éloignent de nous. Ils étudièrent le décalage vers le rouge qui se produit lorsqu'une source de lumière s'éloigne de nous. La longueur d'onde de la lumière s'étire : plus la longueur d'onde est grande, plus sa couleur est rouge. La conclusion fut que les galaxies s'éloignent rapidement de nous et les unes des autres, et que plus elles sont éloignées, plus elles se déplacent rapidement. C'est ce que l'on appelle la loi de Hubble. L'Univers est en expansion.

Fig. 67 – *De la lumière standard de luminosité constante est nécessaire pour mesurer la distance aux étoiles.*

Le va-et-vient de la constante cosmologique

Ce qui a été observé dans l'espace avait déjà été suggéré par des calculs théoriques. En 1915, Albert Einstein publia sa théorie de la relativité générale, qui constitue depuis lors le fondement de notre compréhension de l'Univers. La théorie décrit un univers qui doit se contracter ou se dilater.

Cette conclusion troublante fut obtenue une dizaine d'années avant la découverte des galaxies qui s'éloignent sans cesse. Même Einstein ne parvenait pas à se faire à l'idée que l'Univers n'était pas statique. Afin d'arrêter cette expansion cosmique indésirable, Einstein ajouta donc une constante à ses équations, qu'il appela la constante cosmologique. Plus tard, Einstein considéra l'insertion de la constante cosmologique comme une grave erreur. Toutefois, grâce aux observations réalisées en 1997-1998 et récompensées par le prix Nobel de 2011, nous pouvons conclure que la constante cosmologique d'Einstein, insérée pour de mauvaises raisons, était en fait une brillante idée.

La découverte de l'expansion de l'Univers a constitué un premier pas décisif vers la vision désormais standard selon laquelle l'Univers a été créé lors du *Big Bang*, il y a près de 14 milliards d'années. C'est à ce moment-là que le temps et l'espace ont commencé à exister. Depuis lors, l'Univers est en expansion. Comme les raisins dans un gâteau qui gonfle dans le four, les galaxies s'éloignent les unes des autres en raison de l'expansion cosmologique. Mais vers quoi nous dirigeons-nous ?

Les supernovae, la nouvelle mesure de l'Univers

Lorsque Einstein s'est débarrassé de la constante cosmologique et s'est rendu à l'idée d'un univers non statique, il a établi un lien entre la forme géométrique de l'Univers et son destin. Est-il ouvert ou fermé, ou se situe-t-il entre les deux, un univers plat ?

Un univers ouvert est un univers où la force gravitationnelle de la matière n'est pas assez importante pour empêcher l'expansion de l'univers. Toute la matière est alors diluée dans un espace de plus en plus grand, de plus en plus froid et de plus en plus vide. Dans un univers fermé, en revanche, la force gravitationnelle est suffisamment forte pour arrêter et même inverser l'expansion. Cet univers finirait donc par cesser de s'étendre et se contracterait dans une fin violente et brûlante, un effondrement terminal (*Big Crunch*). La plupart des cosmologistes préfèrent cependant vivre dans l'univers le plus simple et le plus élégant sur le plan mathématique : un univers plat, où l'on pense que l'expansion ralentit. L'Univers ne finirait ainsi ni dans le feu ni dans la glace. Mais il n'y a pas le choix. S'il existe une constante cosmologique, l'expansion continuera à s'accélérer, même si l'Univers est plat.

Les lauréats du prix Nobel 2011 comptaient mesurer la décélération cosmique, c'est-à-dire le ralentissement de l'expansion de l'Univers. Leur méthode était au fond la même que celle utilisée par les astronomes plus de soixante ans auparavant : localiser les étoiles lointaines et mesurer leur mouvement. Mais c'est plus facile à dire qu'à faire. Depuis l'époque de Henrietta Leavitt, on a découvert de nombreuses autres céphéides encore plus éloignées. Mais aux distances dont les astronomes ont besoin, à savoir des milliards d'années-lumière, les céphéides ne sont plus visibles. L'étalon cosmique avait besoin d'être élargi.

Les supernovae, des explosions d'étoiles, sont devenues les nouvelles bougies étalons. Des télescopes plus sophistiqués au sol et dans l'espace

ainsi que des ordinateurs plus puissants ont permis dans les années 1990 d'ajouter de nouvelles pièces au puzzle cosmologique. Les capteurs photographiques numériques sensibles à la lumière, les dispositifs à couplage de charge ou DCC, inventés par Willard Boyle et George Smith (qui ont reçu le prix Nobel de physique en 2009), ont joué un rôle crucial.

Explosions de naines blanches

L'outil le plus récent dans la boîte à outils de l'astronome est un type particulier d'explosion d'étoile, la supernova de type Ia. Pendant quelques semaines, une seule supernova de ce type peut émettre autant de lumière qu'une galaxie entière. Ce type de supernova est l'explosion d'une vieille étoile extrêmement compacte, aussi lourde que le Soleil mais aussi petite que la Terre : une naine blanche. L'explosion est la dernière étape du cycle de vie de la naine blanche.

Les naines blanches se forment lorsqu'une étoile n'a plus d'énergie en son cœur, l'hydrogène et l'hélium ayant été brûlés dans les réactions nucléaires. Il ne reste plus que du carbone et de l'oxygène. De la même manière, dans un avenir lointain, notre Soleil s'éteindra et se refroidira lorsqu'il atteindra sa fin en tant que naine blanche.

Une naine blanche faisant partie d'un système stellaire binaire, ce qui est assez courant, connaît une fin bien plus excitante. Dans ce cas, la forte gravité de la naine blanche prive l'étoile compagnon de son gaz. Cependant, lorsque la naine blanche atteint 1,4 masse solaire, elle ne parvient plus à se maintenir en place. L'intérieur de la naine devient alors suffisamment chaud pour que les réactions de fusion s'emballent et l'étoile explose en quelques secondes.

Les produits de la fusion nucléaire émettent de forts rayonnements qui augmentent rapidement au cours des premières semaines qui suivent l'explosion, puis diminuent au cours des mois suivants. Les supernovae sont donc très recherchées, car leurs explosions violentes sont brèves. Dans l'Univers visible, environ dix supernovae de type Ia se produisent chaque minute. Mais l'Univers est immense. Dans une galaxie typique, il ne se produit qu'une ou deux explosions de supernova en mille ans. En septembre 2011, nous avons eu la chance d'observer une supernova de ce type dans une galaxie proche de la Grande Ourse, visible à travers une paire de jumelles ordinaires. Mais la plupart des supernovae sont beaucoup plus éloignées et donc moins lumineuses. Alors, où et quand regarder sur la voûte céleste ?

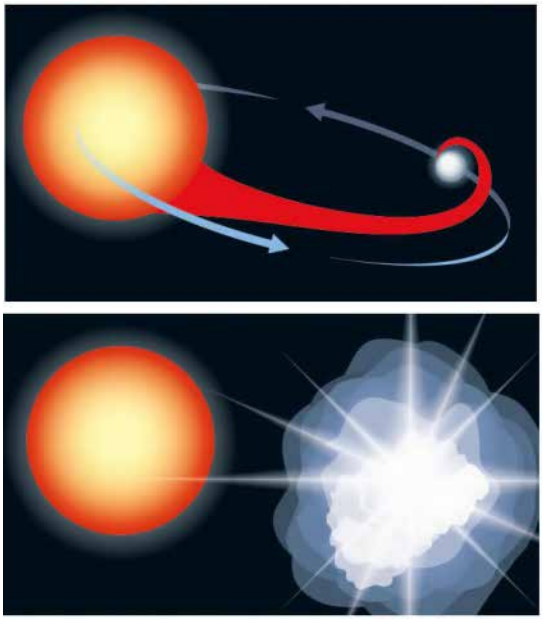


FIG. 68 – Explosion d'une supernova. *Une naine blanche vole du gaz à sa voisine grâce à sa gravité (première image). Lorsque la naine blanche atteint 1,4 masse solaire, elle explose sous la forme d'une supernova de type Ia (deuxième image).*

Une conclusion étonnante

Les deux équipes en compétition savaient qu'elles devaient passer le ciel au peigne fin à la recherche de supernovae lointaines. L'astuce consistait à comparer deux images du même petit morceau de ciel, correspondant à un ongle de pouce à bout de bras. La première image doit être prise juste après la nouvelle lune et la seconde trois semaines plus tard, avant que la lumière de la Lune ne supplante celle des étoiles. Les deux images peuvent ensuite être comparées dans l'espoir de découvrir un petit point lumineux, un pixel parmi d'autres dans l'image du capteur DCC, qui pourrait être le signe d'une supernova dans une galaxie lointaine. Seules les supernovae situées à une distance supérieure à un tiers de la taille de l'Univers visible ont été utilisées, afin d'éliminer les distorsions locales.

Les chercheurs ont dû faire face à de nombreux autres problèmes. Les supernovae de type Ia ne sont pas aussi fiables qu'elles le paraissaient à l'origine : les explosions les plus brillantes s'éteignent plus lentement. En outre, la lumière des supernovae devait être extraite de la lumière de fond de leurs galaxies hôtes. Une autre tâche importante consistait à obtenir une luminosité correcte. La poussière intergalactique qui nous sépare des étoiles modifie la lumière de ces dernières. Cela affecte les résultats lors du calcul de la luminosité maximale des supernovae.

La chasse aux supernovae a non seulement repoussé les limites de la science et de la technologie, mais aussi celles de la logistique. Tout d'abord, il fallait trouver le bon type de supernova. Ensuite, il fallait mesurer son décalage vers le rouge et sa luminosité. La courbe de luminosité devait être analysée au fil du temps afin de pouvoir la comparer à d'autres supernovae du même type à des distances connues. Pour ce faire, il fallait un réseau de scientifiques capables de décider rapidement si une étoile donnée méritait d'être observée. Ils devaient pouvoir passer d'un télescope à l'autre et obtenir sans délai du temps d'observation dans un télescope, une procédure qui prend habituellement des mois. Ils devaient agir vite, car une supernova s'éteint rapidement. Les deux équipes de recherche concurrentes se sont parfois croisées discrètement.

Les écueils potentiels étaient nombreux. Les scientifiques ont été rassurés par le fait qu'ils sont parvenus aux mêmes résultats étonnants : au total, ils ont trouvé une cinquantaine de supernovae lointaines dont la lumière semblait plus faible que prévu. Si l'expansion cosmique avait perdu de la vitesse, les supernovae auraient dû paraître plus lumineuses. Or les supernovae s'estompaient au fur et à mesure qu'elles étaient emportées de plus en plus vite, enchâssées dans leurs galaxies. La conclusion surprenante est que l'expansion de l'Univers ne ralentit pas, bien au contraire, elle accélère.

D'ici à l'éternité

Qu'est-ce qui accélère l'Univers ? C'est l'énergie noire, un défi pour la physique, une énigme que personne n'a encore réussi à résoudre. Plusieurs idées ont été proposées. La plus simple consiste à réintroduire la constante cosmologique d'Einstein, qu'il avait autrefois rejetée. À l'époque, il avait inséré la constante cosmologique comme une force antigravitationnelle pour contrer la force gravitationnelle de la matière et créer ainsi un univers statique. Aujourd'hui, la constante cosmologique

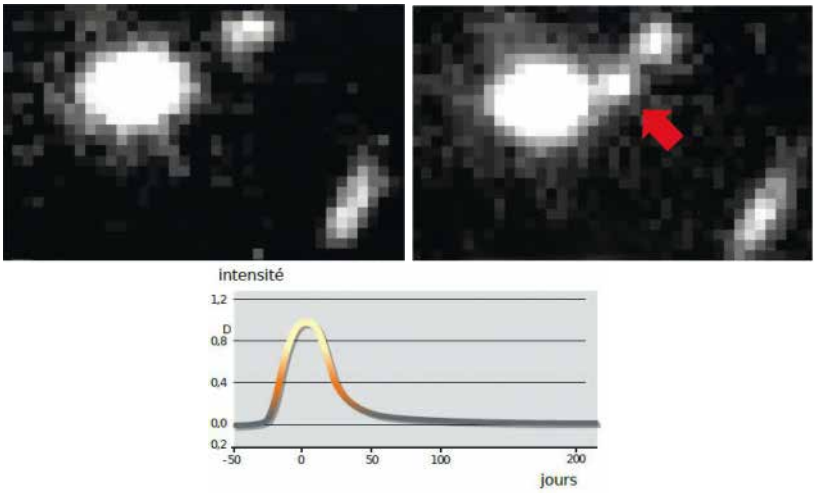


FIG. 69 – La supernova 1995ar. *Deux images du même petit morceau de ciel prises à trois semaines d'intervalle sont comparées. Sur la seconde image, on a découvert un petit point lumineux ! On a confirmé son statut de supernova de type Ia après d'autres observations de sa courbe de luminosité. Une supernova de type Ia peut émettre autant de lumière qu'une galaxie entière. La courbe de luminosité est la même pour toutes les supernovae de type Ia. La majeure partie de la lumière est émise au cours des premières semaines (voir le diagramme du bas).*

semble au contraire accélérer l'expansion de l'Univers.

La constante cosmologique est bien entendu constante et ne change pas au fil du temps. L'énergie noire devient donc dominante lorsque la matière, et donc sa gravité, se dilue en raison de l'expansion de l'Univers sur des milliards d'années. Selon les scientifiques, cela expliquerait pourquoi la constante cosmologique est entrée en scène si tard dans l'histoire de l'Univers, il y a seulement cinq à six milliards d'années. À cette époque, la force gravitationnelle de la matière s'est suffisamment affaiblie par rapport à la constante cosmologique. Jusque-là, l'expansion de l'Univers ralentissait.

La constante cosmologique pourrait trouver sa source dans le vide, un espace qui selon la physique quantique n'est jamais complètement vide. Au contraire, le vide est une soupe quantique bouillonnante, où des particules virtuelles de matière et d'antimatière apparaissent et dis-

paraissent et donnent naissance à de l'énergie. Cependant, l'estimation la plus simple de la quantité d'énergie noire ne correspond pas du tout à la quantité mesurée dans l'espace, qui est environ 10^{120} fois plus grande (un 1 suivi de 120 zéros). Cela constitue un écart gigantesque et encore inexpliqué entre la théorie et l'observation. Sur toutes les plages du monde, il n'y a pas plus de 10^{20} grains de sable !

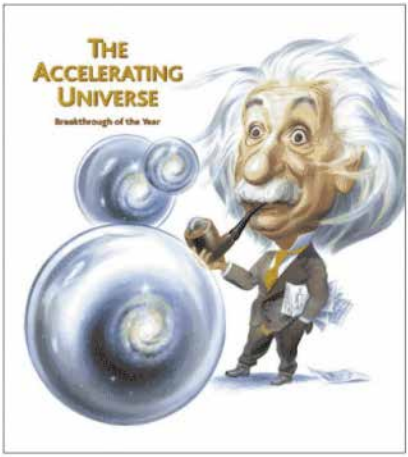


Fig. 70 – La découverte. *L'accélération de l'expansion de l'Univers a été choisie comme « découverte de l'année » dans le numéro de décembre 1998 de la revue* Science. *Sur la couverture, Albert Einstein contemple sa constante cosmologique, qui est revenue au premier plan de la cosmologie.*

Il se peut que l'énergie noire ne soit pas constante après tout. Peut-être change-t-elle au fil du temps. Peut-être qu'un champ de force inconnu ne génère qu'occasionnellement de l'énergie noire. En physique, il existe de nombreux champs de force de ce type qui sont collectivement appelés « quintessence », d'après le nom grec du cinquième élément. La quintessence pourrait accélérer l'Univers, mais seulement de temps en temps. Il serait alors impossible de prévoir le destin de l'Univers.

Quelle que soit l'énergie noire, elle semble être là pour rester. Elle s'intègre très bien dans le puzzle cosmologique sur lequel les physiciens et les astronomes travaillent depuis longtemps. Selon le consensus actuel, environ les trois quarts de l'Univers sont constitués d'énergie noire. Le reste est constitué de matière. Mais la matière ordinaire, celle dont sont faites les galaxies, les étoiles, les hommes et les fleurs, ne représente que cinq pour cent de l'Univers. La matière restante est appelée matière noire et nous est jusqu'à présent cachée.

La matière noire est un mystère de plus dans notre cosmos largement méconnu. Tout comme l'énergie noire, la matière noire est invisible. Nous ne les connaissons donc que par leurs effets : l'une pousse, l'autre

Fig. 71 – L'Univers. *Cette découverte implique que les trois quarts de l'Univers sont constitués d'une forme d'énergie inconnue, appelée énergie noire. Avec la matière noire également inconnue, l'énergie noire constitue 95 % de l'Univers. Seuls les 5 % restants sont de la matière ordinaire qui compose les galaxies, les étoiles, les fleurs et les êtres humains.*

tire. Elles n'ont en commun que l'adjectif « noire ».

Les découvertes des lauréats du prix Nobel de physique 2011 ont donc contribué à dévoiler un univers jusqu'à présent inconnu de la science. Tout redevient possible.

Les lauréats

— Saul Perlmutter, né en 1959 à Champaign-Urbana dans l'Illinois, docteur en 1986 de l'université de Californie à Berkeley, chef du projet sur la cosmologie des supernovae, professeur d'astrophysique au laboratoire national Lawrence Berkeley et à l'université de Californie à Berkeley ;
— Brian P. Schmidt, né en 1967 à Missoula dans le Montana, docteur en 1993 de l'université Harvard, chef de l'équipe de recherche des supernovae avec un z élevé, professeur à l'Université nationale australienne à Weston Creek ;
— Adam G. Riess, né en 1969 à Washington, docteur en 1996 de l'université Harvard, professeur d'astronomie et de physique à l'université Johns Hopkins et à l'institut des sciences du télescope spatial à Baltimore.

Contrôle des particules dans un monde quantique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2012 à

— Serge Haroche, du Collège de France et de l'École normale supérieure à Paris,

— David J. Wineland, de l'Institut national des normes et de la technologie et de l'université du Colorado à Boulder,

« pour des méthodes expérimentales révolutionnaires qui ont permis de mesurer et de manipuler des systèmes quantiques individuels ».

Les lauréats ont ouvert la voie à une nouvelle ère d'expérimentation en physique quantique en proposant l'observation directe de systèmes quantiques individuels sans les détruire. Grâce à leurs ingénieuses méthodes de laboratoire, ils sont parvenus à mesurer et à contrôler des états quantiques très fragiles, permettant ainsi à leur domaine de recherche de faire les premiers pas vers la construction d'un nouveau type d'ordinateur ultrarapide, basé sur la physique quantique. Ces méthodes ont également permis de construire des horloges extrêmement précises qui pourraient devenir la base d'un nouvel étalon de temps, avec une précision plus de cent fois supérieure à celle des horloges à césium actuelles.

Fig. 72 – *Le prix Nobel 2012 récompense la maîtrise des particules. Les lauréats ont réussi à faire en sorte que des particules individuelles piégées se comportent selon les règles de la physique quantique.*

Pour les particules uniques de lumière ou de matière, les lois de la physique classique cessent de s'appliquer et la physique quantique prend le relais. Mais les particules uniques ne sont pas facilement isolées

de leur environnement et elles perdent leurs mystérieuses propriétés quantiques dès qu'elles interagissent avec le monde extérieur. Ainsi, de nombreux phénomènes apparemment étranges prédits par la mécanique quantique n'ont pas pu être observés directement. Les chercheurs n'ont pu qu'imaginer des « expériences de pensée » qui pourraient en principe rendre manifestes ces phénomènes bizarres.

Les deux lauréats travaillent dans le domaine de l'optique quantique, qui étudie l'interaction fondamentale entre la lumière et la matière, un domaine qui a connu des progrès considérables depuis le milieu des années 1980. Leurs méthodes ont de nombreux points communs. David Wineland piège des atomes chargés électriquement (des ions), les contrôle et les mesure avec de la lumière (des photons). Serge Haroche adopte l'approche inverse : il contrôle et mesure les photons piégés en faisant passer des atomes dans un piège.

Contrôle d'ions uniques dans un piège

Dans le laboratoire de David Wineland à Boulder dans le Colorado, des atomes ou des ions chargés électriquement sont maintenus dans un piège en les entourant de champs électriques. Les particules sont isolées de la chaleur et des rayonnements de leur environnement en réalisant les expériences sous vide à des températures extrêmement basses.

L'un des secrets de la percée de Wineland a été la maîtrise de l'art d'utiliser des faisceaux laser et de créer des impulsions laser. Un laser est utilisé pour supprimer l'agitation thermique de l'ion dans le piège, plaçant l'ion dans son état d'énergie le plus bas et permettant ainsi l'étude des phénomènes quantiques avec l'ion piégé. Une impulsion laser soigneusement réglée peut être utilisée pour placer l'ion dans un état de *superposition*, c'est-à-dire avec l'existence simultanée de deux états distincts. Par exemple, l'ion peut être préparé à occuper simultanément deux niveaux d'énergie différents. Il commence à un niveau d'énergie inférieur et l'impulsion laser ne le pousse qu'à moitié vers un niveau d'énergie supérieur, de sorte qu'il reste entre les deux niveaux, dans une superposition d'états d'énergie, avec une probabilité égale de se retrouver dans l'un ou l'autre d'entre eux. Il est ainsi possible d'étudier une superposition quantique des états d'énergie de l'ion.

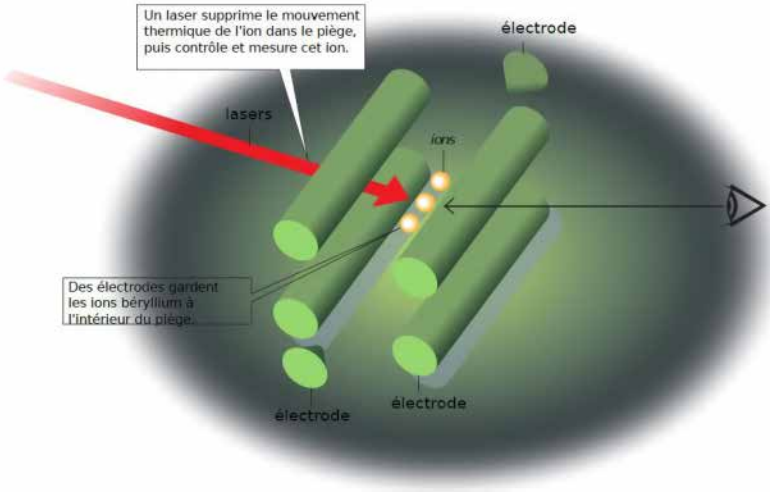


FIG. 73 – *Dans le laboratoire de David Wineland à Boulder dans le Colorado, des atomes ou des ions chargés électriquement sont maintenus à l'intérieur d'un piège par des champs électriques environnants. L'un des secrets de la percée de Wineland est la maîtrise de l'art d'utiliser des faisceaux laser et de créer des impulsions laser. Le laser est utilisé pour placer l'ion dans son état d'énergie le plus bas, ce qui permet d'étudier les phénomènes quantiques avec l'ion piégé.*

Contrôle de photons uniques dans un piège

Serge Haroche et son groupe de recherche utilisent une méthode différente pour révéler les mystères du monde quantique. Dans son laboratoire à Paris, des photons micro-ondes rebondissent à l'intérieur d'une petite cavité située entre deux miroirs, à environ trois centimètres l'un de l'autre. Les miroirs sont constitués d'un matériau supraconducteur et sont refroidis à une température légèrement supérieure au zéro absolu. Ces miroirs supraconducteurs sont les plus brillants du monde. Ils sont si réfléchissants qu'un seul photon peut rebondir à l'intérieur de la cavité pendant près d'un dixième de seconde avant d'être perdu ou absorbé. Cette durée de vie record signifie que le photon aura parcouru 40 000 kilomètres, soit l'équivalent d'un tour de la Terre.

Pendant sa longue durée de vie, de nombreuses manipulations quantiques peuvent être effectuées avec le photon piégé. Haroche utilise des

atomes spécialement préparés, appelés atomes de Rydberg (d'après le physicien suédois Johannes Rydberg), pour contrôler et mesurer le photon micro-onde dans la cavité. Un atome de Rydberg a un rayon d'environ 125 nanomètres, ce qui est environ 1 000 fois plus grand que les atomes ordinaires. Ces gigantesques atomes de Rydberg en forme de beignet sont envoyés dans la cavité un par un à une vitesse soigneusement choisie, afin que l'interaction avec le photon micro-onde se produise de manière bien contrôlée.

L'atome de Rydberg traverse la cavité et en sort, laissant derrière lui le photon micro-onde. Mais l'interaction entre le photon et l'atome crée un changement dans la phase de l'état quantique de l'atome : si l'on considère l'état quantique de l'atome comme une onde, les pics et les creux de l'onde sont décalés. Ce déphasage peut être mesuré lorsque l'atome sort de la cavité, révélant ainsi la présence ou l'absence d'un photon à l'intérieur de la cavité. En l'absence de photon, il n'y a pas de déphasage. Haroche peut donc mesurer un seul photon sans le détruire.

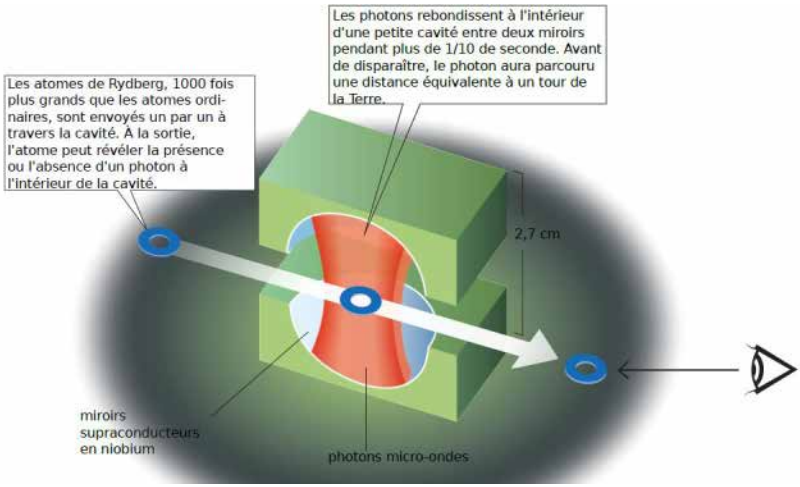


FIG. 74 – *Dans le laboratoire de Serge Haroche à Paris, dans le vide et à une température proche du zéro absolu, les photons micro-ondes rebondissent à l'intérieur d'une petite cavité entre deux miroirs. Les miroirs sont si efficaces qu'un seul photon y reste plus d'un dixième de seconde avant d'être perdu. Pendant sa longue durée de vie, de nombreuses manipulations quantiques peuvent être effectuées avec le photon piégé sans le détruire.*

Avec une méthode similaire, Haroche et son groupe ont pu compter les photons à l'intérieur de la cavité, comme un enfant compte des billes dans un bol. Cela peut sembler facile mais nécessite une dextérité et une habileté extraordinaires, car les photons, contrairement aux billes ordinaires, sont détruits immédiatement par le contact avec le monde extérieur. S'appuyant sur ses méthodes de comptage des photons, Haroche et ses collaborateurs ont mis au point des méthodes permettant de suivre l'évolution d'un état quantique individuel, étape par étape, en temps réel.

Les paradoxes de la mécanique quantique

La mécanique quantique décrit un monde microscopique invisible à l'œil nu, où des événements se produisent contrairement à nos attentes et à notre expérience des phénomènes physiques dans le monde macroscopique classique. La physique dans le monde quantique comporte une part d'incertitude ou d'aléatoire inhérente. Un exemple de ce comportement contraire est la superposition, où une particule quantique peut se trouver simultanément dans plusieurs états différents. Nous ne pensons généralement pas qu'une bille puisse être à la fois « ici » et « là », mais c'est pourtant le cas s'il s'agit d'une bille quantique. L'état de superposition de cette bille nous indique exactement la probabilité qu'elle a d'être ici ou là, si nous devions mesurer exactement l'endroit où elle se trouve.

Pourquoi ne prenons-nous jamais conscience de ces étranges facettes de notre monde ? Pourquoi ne pouvons-nous pas observer une superposition de billes quantiques dans notre vie quotidienne ? Le physicien autrichien Erwin Schrödinger, lauréat du prix Nobel de physique en 1933, s'est penché sur cette question. Comme beaucoup d'autres pionniers de la théorie quantique, il s'est efforcé de comprendre et d'interpréter ses implications. En 1952, il écrivait encore : « Nous n'expérimentons jamais avec un seul électron, un seul atome ou une seule (petite) molécule. Dans les expériences de pensée, nous supposons parfois que nous le faisons ; cela entraîne invariablement des conséquences ridicules... »

Afin d'illustrer les conséquences absurdes du passage entre le monde microscopique de la physique quantique et notre monde macroscopique quotidien, Schrödinger a décrit une expérience de pensée avec un chat. Le chat de Schrödinger est complètement isolé du monde extérieur à l'intérieur d'une boîte. La boîte contient également une bouteille de cyanure mortel qui n'est libérée qu'après la désintégration d'un atome

radioactif, également à l'intérieur de la boîte.

Fig. 75 – Le chat de Schrödinger. *En 1935, le physicien autrichien et lauréat du prix Nobel Erwin Schrödinger a décrit une expérience de pensée avec un chat dans une boîte afin d'illustrer les conséquences absurdes du passage entre le monde microscopique de la physique quantique et notre monde macroscopique quotidien. Un système quantique, particule, atome ou autre élément du monde microscopique, peut se trouver simultanément dans deux états, ce que les physiciens appellent une superposition d'états. Dans l'expérience de pensée de Schrödinger, le chat dans la boîte est dans une superposition, et donc à la fois mort et vivant. Si vous jetez un coup d'œil à l'intérieur de la boîte, vous risquez de tuer le chat, car la superposition quantique est tellement sensible à l'interaction avec l'environnement que la moindre tentative d'observation du chat ferait immédiatement « s'effondrer l'état du chat » vers l'une des deux issues possibles : la mort ou la vie.*

La désintégration radioactive est régie par les lois de la mécanique quantique, selon lesquelles la matière radioactive se trouve dans un état de superposition où elle est à la fois désintégrée et non encore désintégrée. Par conséquent, le chat doit également se trouver dans un état de superposition, où il est à la fois mort et vivant. Si vous jetez un coup d'œil à l'intérieur de la boîte, vous risquez de tuer le chat, car la superposition quantique est tellement sensible à l'interaction avec l'environnement que la moindre tentative d'observation du chat ferait immédiatement « s'effondrer l'état du chat » vers l'une des deux issues possibles, la mort ou la vie. Pour Schrödinger, cette expérience de pen-

sée menait à une conclusion absurde. On dit qu'il a essayé plus tard de s'excuser d'avoir contribué à la confusion autour de la mécanique quantique.

Les deux lauréats du prix Nobel 2012 ont réussi à étudier l'état du chat quantique lorsqu'il rencontre le monde extérieur. Ils ont conçu des expériences originales et sont parvenus à montrer de manière très détaillée comment l'acte de mesurer provoque l'effondrement de l'état quantique et lui fait perdre son caractère de superposition. Au lieu du chat de Schrödinger, Haroche et Wineland piègent des particules quantiques et les placent dans des états de superposition semblables à ceux d'un chat. Ces objets quantiques ne sont pas vraiment macroscopiques comme un chat, mais ils sont tout de même assez grands par rapport aux normes quantiques.

Dans la cavité d'Haroche, les photons micro-ondes sont placés dans des états comme celui du chat, avec des phases opposées simultanées, comme un chronomètre dont l'aiguille tourne simultanément dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens inverse. Le champ de micro-ondes à l'intérieur de la cavité est ensuite sondé avec des atomes de Rydberg. Il en résulte un autre effet quantique difficile à comprendre appelé « intrication ». L'intrication a également été décrite par Erwin Schrödinger et peut se produire entre deux ou plusieurs particules quantiques qui n'ont pas de contact direct mais qui peuvent néanmoins lire et affecter les propriétés de l'autre. L'intrication du champ de micro-ondes et des atomes de Rydberg a permis à Haroche d'étudier la vie et la mort de l'état semblable à celui du chat à l'intérieur de sa cavité, en le suivant pas à pas, atome par atome, alors qu'il subissait une transition de la superposition quantique d'états à un état bien défini de la physique classique.

À l'aube d'une nouvelle révolution informatique

L'ordinateur quantique est une application possible des pièges à ions dont rêvent de nombreux scientifiques. Dans les ordinateurs classiques actuels, la plus petite unité d'information est un *bit* qui prend la valeur 1 ou 0. Dans un ordinateur quantique, cependant, l'unité d'information de base, un *bit* quantique ou *qubit*, peut être 1 et 0 en même temps. Deux *bits* quantiques peuvent prendre simultanément quatre valeurs (00, 01, 10 et 11) et chaque *qubit* supplémentaire double le nombre d'états possibles. Pour n *bits* quantiques, il y a 2^n états possibles, et un ordinateur quantique de seulement 300 *qubits* pourrait contenir 2^{300}

valeurs simultanément, soit plus que le nombre d'atomes dans l'univers.

Le groupe de Wineland a été le premier au monde à mettre en évidence une opération quantique avec deux *bits* quantiques. Puisque des opérations de contrôle ont déjà été réalisées avec quelques *qubits*, il n'y a en principe aucune raison de penser qu'il ne serait pas possible de réaliser de telles opérations avec beaucoup plus de *qubits*. Cependant, la construction d'un pareil ordinateur quantique représente un énorme défi pratique. Il faut satisfaire deux exigences opposées : les *qubits* doivent être suffisamment isolés de leur environnement pour ne pas détruire leurs propriétés quantiques, mais ils doivent aussi être capables de communiquer avec le monde extérieur pour transmettre les résultats de leurs calculs. L'ordinateur quantique sera peut-être construit au cours de ce siècle. Si c'est le cas, il changera nos vies de la même manière radicale que l'ordinateur classique a transformé la vie au siècle dernier.

Nouvelles horloges

David Wineland et son équipe de chercheurs ont également utilisé des ions dans un piège pour construire une horloge cent fois plus précise que les horloges atomiques à base de césium qui constituent actuellement la norme pour la mesure du temps. Le temps est mesuré en réglant ou en synchronisant toutes les horloges par rapport à un étalon. Les horloges à césium fonctionnent dans le domaine des micro-ondes, tandis que les horloges ioniques de Wineland utilisent la lumière visible, d'où leur nom d'horloges optiques. Une horloge optique peut être constituée d'un seul ion ou de deux ions dans un piège. Avec deux ions, l'un est utilisé comme horloge et l'autre est utilisé pour lire l'horloge sans détruire son état ou lui faire manquer un tic-tac. La précision d'une horloge optique est meilleure qu'une partie sur 10^{17}, ce qui signifie que si l'on avait commencé à mesurer le temps au début de l'Univers, lors du *Big Bang*, il y a environ 14 milliards d'années, l'horloge optique ne se serait trompée que d'environ cinq secondes aujourd'hui.

Cette mesure précise du temps a permis d'observer des phénomènes naturels extrêmement subtils et magnifiques, tels que des changements dans l'écoulement du temps ou d'infimes variations de la gravité, la trame de l'espace-temps. Selon la théorie de la relativité d'Einstein, le temps est affecté par le mouvement et la gravité. Plus la vitesse est élevée et plus la gravité est forte, plus le temps passe lentement. Nous ne sommes peut-être pas conscients de ces effets, mais ils font en fait partie de notre vie quotidienne. Lorsque nous naviguons avec le

Fig. 76 – Horloge optique. *Une utilisation pratique des ions dans un piège consiste à construire une horloge cent fois plus précise que les horloges atomiques à base de césium qui constituent actuellement la norme pour la mesure du temps. Avec deux ions, l'un est utilisé comme horloge et l'autre est utilisé pour lire l'horloge sans détruire son état ou lui faire manquer un tic-tac.*

GPS, nous nous appuyons sur les signaux émis par des satellites dotés d'horloges régulièrement étalonnées, car la gravité est un peu plus faible à plusieurs centaines de kilomètres d'altitude. Avec une horloge optique, il est possible de mesurer une différence dans l'écoulement du temps lorsque la vitesse de l'horloge est modifiée de moins de 10 mètres par seconde, ou lorsque la gravité est modifiée en raison d'une différence de hauteur de seulement 30 centimètres.

Les lauréats

— Serge Haroche, né en 1944 à Casablanca au Maroc, docteur en 1971 de l'université Pierre et Marie Curie à Paris, professeur au Collège de France et à l'École normale supérieure ;
— David J. Wineland, né en 1944 à Milwaukee dans le Wisconsin, docteur en 1970 de l'université Harvard, chef de groupe à l'Institut national des normes et de la technologie et à l'université du Colorado à Boulder.

Bibliographie

— Haroche (Serge), *Physique quantique : leçon inaugurale*, Paris, Collège de France, 2004.
— Haroche (Serge), *La Lumière révélée*, Paris, Odile Jacob, 2020.

Le boson de Higgs

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2013 à

— François Englert, de l'Université libre de Bruxelles,

— Peter W. Higgs, de l'université d'Édimbourg,

« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui contribue à notre compréhension de l'origine de la masse des particules subatomiques et qui a été récemment confirmé avec la découverte de la particule fondamentale prédite par les expériences ATLAS et CMS dans le Grand collisionneur de hadrons du CERN ».

Les lauréats ont reçu ce prix pour la théorie de l'acquisition de la masse par les particules. En 1964, ils ont proposé cette théorie indépendamment l'un de l'autre (Englert avec son collègue Robert Brout, décédé depuis). En 2012, leurs idées ont été confirmées par la découverte du boson dit de Higgs au laboratoire du CERN, près de Genève.

Le mécanisme récompensé est un élément central du modèle standard de la physique des particules, qui décrit comment le monde est construit. Selon le modèle standard, tout, des fleurs aux personnes en passant par les étoiles et les planètes, est constitué de quelques éléments de base : les particules de matière. Ces particules sont régies par des forces transmises par des particules de force qui veillent à ce que tout fonctionne comme il se doit.

L'ensemble du modèle standard repose également sur l'existence d'une particule d'un genre particulier : le boson de Higgs. Il est relié à un champ invisible qui remplit tout l'espace. Même lorsque notre Univers semble vide, ce champ est présent. S'il n'existait pas, les électrons et les quarks seraient sans masse, tout comme les photons, les particules de lumière. Et comme les photons, ils se déplaceraient dans l'espace à la vitesse de la lumière, comme le prévoit la théorie d'Einstein, sans pouvoir s'accrocher aux atomes ou aux molécules. Rien de ce que nous connaissons, pas même nous, n'existerait.

François Englert et Peter Higgs étaient tous deux de jeunes scientifiques lorsqu'en 1964, indépendamment l'un de l'autre, ils ont proposé une théorie qui a sauvé le modèle standard. Près d'un demi-siècle plus tard, le mercredi 4 juillet 2012, ils étaient tous deux dans l'auditoire du Laboratoire européen de physique des particules (CERN), près de

Fig. 77 – *Le boson de Higgs, noté* H*, complète le modèle standard de la physique des particules qui décrit les éléments constitutifs de l'Univers.*

Genève, lorsque la découverte du boson de Higgs a été annoncée au monde entier, confirmant enfin la théorie.

Le modèle qui a créé l'ordre

L'idée que le monde peut être expliqué en termes de quelques éléments constitutifs est ancienne. Vers 400 avant J.-C., le philosophe Démocrite postulait déjà que tout était constitué d'atomes, « átomos » signifiant indivisible en grec. Aujourd'hui, nous savons que les atomes ne sont pas indivisibles. Ils sont constitués d'électrons qui gravitent autour d'un noyau atomique composé de neutrons et de protons. Les neutrons et les protons sont à leur tour constitués de particules plus petites appelées quarks. En fait, seuls les électrons et les quarks sont indivisibles selon le modèle standard.

Le noyau atomique est constitué de deux types de quarks, les quarks u (*up*, « haut ») et les quarks d (*down*, « bas »). En fait, trois particules élémentaires sont nécessaires à l'existence de la matière : les électrons, les quarks u et les quarks d. Mais au cours des années 1950 et 1960, de nouvelles particules ont été observées de manière inattendue dans le rayonnement cosmique et dans les accélérateurs nouvellement construits, de sorte que le modèle standard a dû inclure de nouveaux frères et sœurs des électrons et des quarks.

Outre les particules de matière, il existe également des particules

Fig. 78 – *François Englert et Peter Higgs se rencontrent pour la première fois au CERN lors de l'annonce au monde entier, le 4 juillet 2012, de la découverte du boson de Higgs. Photo : CERN,* http://cds.cern.ch/record/1459503.

de force pour chacune des quatre forces de la nature : la gravitation, l'électromagnétisme, la force nucléaire faible et la force nucléaire forte. La gravitation et l'électromagnétisme sont les forces les plus connues : elles attirent ou repoussent et nous pouvons en voir les effets de nos propres yeux. La force nucléaire forte agit sur les quarks et maintient les protons et les neutrons ensemble dans le noyau, tandis que la force faible est responsable de la désintégration radioactive, qui est nécessaire par exemple pour les processus nucléaires à l'intérieur du Soleil.

Le modèle standard de la physique des particules réunit les éléments fondamentaux de la nature et trois des quatre forces connues. La quatrième, la gravitation, reste en dehors du modèle. Pendant longtemps, le fonctionnement de ces forces est resté une énigme. Par exemple, comment le morceau de métal attiré par l'aimant sait-il que l'aimant se trouve là, un peu plus loin ? Et comment la Lune ressent-elle la gravité de la Terre ?

Des champs invisibles remplissent l'espace

L'explication proposée par la physique est que l'espace est rempli de nombreux champs invisibles. Le champ gravitationnel, le champ électromagnétique, le champ de quarks et tous les autres champs remplissent l'espace, ou plutôt l'espace-temps quadridimensionnel, un espace abstrait où se déroule la théorie. Le modèle standard est une théorie quan-

tique des champs dans laquelle les champs et les particules sont les éléments essentiels de l'Univers.

En physique quantique, tout est considéré comme un ensemble de vibrations dans des champs quantiques. Ces vibrations sont transportées à travers le champ sous forme de petits paquets, les quanta, qui nous apparaissent comme des particules. Il existe deux types de champs : les champs de matière avec les particules de matière et les champs de force avec les particules de force (les médiateurs des forces). Le boson de Higgs est lui aussi une vibration de son champ, souvent appelé champ de Higgs.

Sans ce champ, le modèle standard s'effondrerait comme un château de cartes, car la théorie quantique des champs apporte des termes infinis qu'il faut contenir et des symétries qu'on ne peut pas voir. Ce n'est que lorsque François Englert, Robert Brout et Peter Higgs, et plus tard plusieurs autres, ont montré que le champ de Higgs peut briser la symétrie du modèle standard sans détruire la théorie que le modèle a été accepté.

En effet, le modèle standard ne fonctionnerait que si les particules n'avaient pas de masse. En ce qui concerne la force électromagnétique, avec ses photons sans masse comme médiateurs, il n'y avait pas de problème. La force faible, en revanche, est transmise par trois particules massives : deux particules W chargées électriquement et une particule Z. Ces particules ne s'accordaient pas avec le photon au pied léger. Comment la force électrofaible, qui unifie les forces électromagnétique et faible, a-t-elle pu voir le jour ? Le modèle standard était menacé. C'est alors qu'Englert, Brout et Higgs sont entrés en scène avec un mécanisme ingénieux d'acquisition de masse par les particules qui a permis de sauver le modèle standard.

Le champ de Higgs fantôme

Le champ de Higgs n'est pas comme les autres champs de la physique. Tous les autres champs varient en force et deviennent nuls à leur niveau d'énergie le plus bas. Pas le champ de Higgs. Même si l'espace était complètement vide, il serait toujours rempli par un champ fantôme qui refuse de s'éteindre : le champ de Higgs. Nous ne le remarquons pas. Le champ de Higgs est comme l'air pour nous, comme l'eau pour les poissons. Mais sans lui, nous n'existerions pas, car les particules n'acquièrent une masse qu'au contact du champ de Higgs. Les particules qui ne prêtent pas attention au champ de Higgs n'acquièrent

pas de masse, celles qui interagissent faiblement deviennent légères et celles qui interagissent intensément deviennent lourdes. Par exemple, les électrons, qui acquièrent une masse grâce au champ, jouent un rôle crucial dans la création et la cohésion des atomes et des molécules. Si le champ de Higgs disparaissait soudainement, toute la matière s'effondrerait, les électrons soudainement dépourvus de masse se dispersant à la vitesse de la lumière.

Qu'est-ce qui rend le champ de Higgs si particulier ? Il brise la symétrie intrinsèque du monde. Dans la nature, la symétrie est omniprésente : les visages ont des formes régulières, les fleurs et les flocons de neige présentent différents types de symétries géométriques. La physique dévoile d'autres types de symétries qui décrivent notre monde, mais à un niveau plus profond. L'une de ces symétries, relativement simple, stipule qu'il importe peu, pour les résultats, qu'une expérience de laboratoire soit réalisée à Stockholm ou à Paris. Le moment où l'expérience est réalisée n'a pas non plus d'importance. La théorie de la relativité restreinte d'Einstein traite des symétries dans l'espace et le temps et est devenue un modèle pour de nombreuses autres théories, telles que le modèle standard de la physique des particules. Les équations du modèle standard sont symétriques. De la même manière qu'une balle a la même apparence quel que soit l'angle sous lequel on la regarde, les équations du modèle standard restent inchangées même si l'on change la perspective qui les définit.

Les principes de symétrie produisent également d'autres résultats quelque peu inattendus. Dès 1918, la mathématicienne allemande Emmy Noether a pu montrer que les lois de conservation de la physique, telles que les lois de conservation de l'énergie et de conservation de la charge électrique, trouvent également leur origine dans la symétrie.

La symétrie impose toutefois de respecter certaines conditions. Une balle doit être parfaitement ronde. La moindre bosse rompt la symétrie. D'autres critères s'appliquent aux équations. L'une des symétries du modèle standard interdit aux particules d'avoir une masse. Or ce n'est apparemment pas le cas dans notre monde. Les particules doivent donc avoir acquis leur masse quelque part. C'est là que le mécanisme récompensé par le prix a permis à la symétrie d'exister et d'être cachée.

La symétrie est cachée mais toujours présente

Notre Univers est probablement né symétrique. Au moment du *Big Bang*, aucune particule n'avait de masse et toutes les forces étaient

réunies en une seule force primordiale. Cet ordre originel n'existe plus : sa symétrie nous est cachée. Il s'est passé quelque chose 10^{-11} secondes après le *Big Bang*. Le champ de Higgs a perdu son équilibre initial. Comment cela s'est-il produit ?

Tout a commencé de manière symétrique. Cet état peut être décrit comme la position d'une balle au milieu d'un bol rond, dans son état d'énergie le plus bas. Si on la pousse, la boule commence à rouler, mais au bout d'un certain temps, elle revient au point le plus bas.

Toutefois, si une bosse apparaît au centre du bol, qui ressemble alors davantage à un chapeau mexicain, la position au centre sera toujours symétrique, mais elle est également devenue instable. La balle roule vers le bas dans n'importe quelle direction. Le chapeau est toujours symétrique, mais une fois que la balle a roulé vers le bas, sa position éloignée du centre cache la symétrie. De la même manière, le champ de Higgs a brisé sa symétrie et a trouvé un niveau d'énergie stable dans le vide, loin de la position symétrique zéro. Cette rupture spontanée de symétrie est également appelée transition de phase du champ de Higgs. C'est comme lorsque l'eau gèle et devient de la glace.

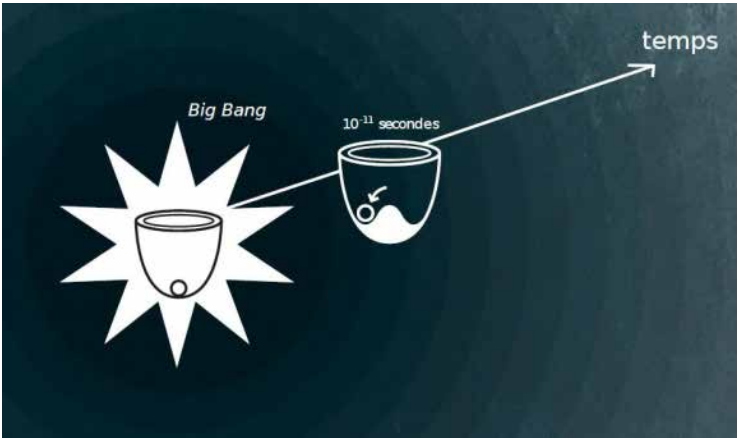


Fig. 79 – *L'Univers a probablement été créé de manière symétrique. Le champ de Higgs invisible avait une symétrie qui correspond à la position stable d'une balle au milieu d'un bol rond. Mais* 10^{-11} *seconde après le* Big Bang*, le champ de Higgs a brisé la symétrie en éloignant son niveau d'énergie le plus bas du point central symétrique.*

Pour que la transition de phase se produise, quatre particules étaient

nécessaires, mais une seule, le boson de Higgs, a survécu. Les trois autres ont été consommées par les médiateurs de la force faible, deux particules W chargées électriquement et une particule Z, qui ont ainsi obtenu leur masse. La symétrie entre les trois particules lourdes de la force faible et le photon sans masse de la force électromagnétique demeure, mais elle est cachée.

Des machines extrêmes pour une physique extrême

Les lauréats du prix Nobel n'imaginaient probablement pas qu'ils verraient leur théorie confirmée de leur vivant. Il a fallu un énorme effort de la part de physiciens du monde entier. Pendant longtemps, deux laboratoires, le laboratoire Fermi près de Chicago et le CERN à la frontière franco-suisse ont rivalisé pour tenter de découvrir le boson de Higgs. Mais lorsque l'accélérateur TeVatron du laboratoire Fermi a fermé en 2011, le CERN est devenu le seul endroit au monde où la recherche du boson de Higgs s'est poursuivie.

Le CERN a été créé en 1954 pour tenter de reconstruire la recherche européenne et les relations entre les pays européens après la seconde guerre mondiale. Il compte actuellement vingt États membres et une centaine de pays du monde entier collaborent à ses projets.

La plus grande réalisation du CERN, le Grand collisionneur de hadrons, est probablement la machine la plus grande et la plus complexe jamais construite par l'homme. Deux groupes de recherche composés de quelque 3 000 scientifiques traquent les particules à l'aide d'énormes détecteurs, ATLAS et CMS. Les détecteurs sont situés à 100 mètres sous terre et peuvent observer 40 millions de collisions de particules par seconde. C'est la fréquence à laquelle les particules peuvent entrer en collision lorsqu'elles sont injectées dans des directions opposées dans le tunnel circulaire du collisionneur, long de 27 kilomètres.

Des protons sont injectés dans le collisionneur toutes les dix heures, à raison d'un rayon dans chaque direction. Cent mille milliards de protons sont rassemblés et comprimés dans un rayon très fin, ce qui n'est pas une mince affaire puisque les protons, avec leur charge électrique positive, ont plutôt tendance à se repousser les uns les autres. Ils se déplacent à 99,999 99 % de la vitesse de la lumière et entrent en collision avec une énergie d'environ 4 TeV chacun et 8 TeV ensemble (un téraélectronvolt = mille milliards d'électronvolts). Un TeV ne représente peut-être pas beaucoup d'énergie, c'est plus ou moins celle d'un moustique qui vole, mais lorsque l'énergie est concentrée dans un seul

proton et que cinq cent mille milliards de protons se précipitent autour de l'accélérateur, l'énergie du rayon équivaut à celle d'un train lancé à pleine vitesse. En 2015, l'énergie était presque le double dans le collisionneur.

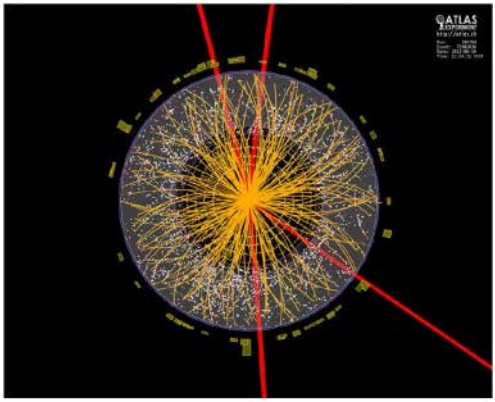


FIG. 80 – *Une découverte éventuelle dans le détecteur ATLAS montre des traces de quatre muons (en rouge) créés par la désintégration du boson de Higgs à courte durée de vie.*

Un puzzle dans le puzzle

Les expériences sur les particules sont parfois comparées à l'acte de frapper deux montres suisses l'une contre l'autre afin d'examiner comment elles sont construites. Mais c'est en réalité beaucoup plus difficile, car les particules recherchées par les scientifiques sont entièrement nouvelles : elles sont créées à partir de l'énergie libérée lors de la collision.

Selon la formule bien connue d'Einstein $E = mc^2$, la masse est une sorte d'énergie. C'est la magie de cette équation qui permet, même pour les particules sans masse, de créer quelque chose de nouveau lorsqu'elles entrent en collision, comme lorsque deux photons entrent en collision et créent un électron et son antiparticule, le positron, ou lorsqu'un boson de Higgs est créé lors de la collision de deux gluons si l'énergie est suffisamment élevée.

Les protons sont comme de petits sacs remplis de particules : quarks, antiquarks et gluons. La majorité d'entre elles se croisent sans trop de problème. En moyenne, chaque fois que deux essaims de particules

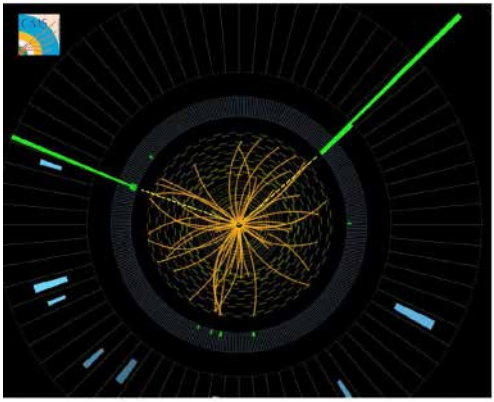


FIG. 81 – *Un boson de Higgs peut avoir été créé et se désintégrer presque instantanément en deux photons. Leurs traces (en vert) sont visibles ici dans le détecteur CMS. Image du CERN,* http ://cds.cern.ch/record/1459459

entrent en collision, il ne se produit que vingt collisions frontales complètes. Moins d'une collision sur un milliard pourrait valoir la peine d'être suivie. Cela peut sembler peu, mais chacune de ces collisions donne lieu à une explosion étincelante d'un millier de particules. À 125 GeV, le boson de Higgs s'est avéré être plus de cent fois plus lourd qu'un proton. C'est l'une des raisons pour lesquelles il a été si difficile à produire.

Cependant, l'expérience est loin d'être terminée. Les scientifiques du CERN espèrent faire d'autres découvertes révolutionnaires dans les années à venir. Même si la découverte du boson de Higgs, la pièce manquante du modèle standard, est une grande réussite, le modèle standard n'est pas la dernière pièce du puzzle cosmique.

L'une des raisons est que le modèle standard considère certaines particules, les neutrinos, comme dépourvues de masse, alors que des études récentes montrent qu'elles en ont une. Une autre raison est que le modèle ne décrit que la matière visible, qui ne représente qu'un cinquième de toute la matière de l'Univers. Le reste est de la matière noire d'une nature inconnue. Elle n'est pas immédiatement visible, mais peut être observée par son attraction gravitationnelle qui maintient les galaxies ensemble et les empêche de se déchirer.

Pour le reste, la matière noire évite de se mêler à la matière visible.

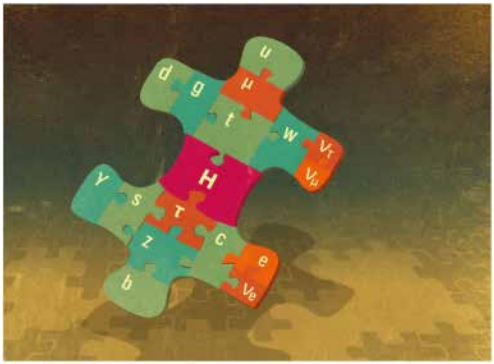


Fig. 82 – *Même si le boson de Higgs a complété le puzzle du modèle standard, ce dernier n'est pas la dernière pièce du grand puzzle cosmique.*

Toutefois, le boson de Higgs est particulier ; peut-être pourrait-il établir un contact avec l'énigmatique matière noire. Les scientifiques espèrent être en mesure d'apercevoir la matière noire, ne serait-ce qu'en partie, lorsqu'ils poursuivront la chasse aux particules inconnues dans le Grand collisionneur de hadrons au cours des prochaines décennies.

Les lauréats

— François Englert, né en 1932 à Etterbeek en Belgique, docteur en 1959 de l'Université libre de Bruxelles, professeur émérite dans cette même université ;
— Peter W. Higgs, né en 1929 à Newcastle upon Tyne au Royaume-Uni, docteur en 1954 du *King's College* de l'université de Londres, professeur émérite à l'université d'Édimbourg.

Les DEL bleues, une nouvelle lumière dans le monde

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2014 à

— Isamu Akasaki, de l'université Meijo à Nagoya et de l'université de Nagoya,
— Hiroshi Amano, de l'université de Nagoya,
— Shuji Nakamura, de l'université de Californie à Santa Barbara,

« pour l'invention de diodes électroluminescentes bleues efficaces qui ont permis d'obtenir des sources de lumière blanche brillantes et économes en énergie ».

Les lauréats ont été récompensés pour avoir inventé une nouvelle source lumineuse économe en énergie et respectueuse de l'environnement : la diode électroluminescente (DEL) bleue. Dans l'esprit d'Alfred Nobel, le prix récompense une invention qui a apporté un grand bénéfice à l'humanité. En utilisant des DEL bleues, il est possible de créer de la lumière blanche d'une nouvelle manière. Avec l'avènement des lampes électroluminescentes, nous disposons désormais d'alternatives plus durables et plus efficaces aux anciennes sources lumineuses.

Lorsque Akasaki, Amano et Nakamura arrivèrent à Stockholm début décembre 2014 pour assister à la cérémonie de remise du prix Nobel, ils ne manquèrent pas de remarquer la lumière de leur invention qui brillait à presque toutes les fenêtres de la ville. Les lampes DEL blanches sont économes en énergie, ont une longue durée de vie et émettent une lumière blanche brillante. De plus, contrairement aux tubes fluorescents, elles ne contiennent pas de mercure.

Les diodes électroluminescentes rouges et vertes nous accompagnent depuis près d'un demi-siècle, mais il fallait la lumière bleue pour révolutionner véritablement la technologie de l'éclairage. Seule la triade

rouge, vert et bleu peut produire la lumière blanche qui nous éclaire. Malgré les enjeux importants et les efforts considérables déployés par la communauté des chercheurs et par l'industrie, la lumière bleue est restée un défi pendant trois décennies.

Akasaki travaillait avec Amano à l'université de Nagoya, tandis que Nakamura était employé par la société Nichia, une petite entreprise située à Tokushima sur l'île de Shikoku. Lorsqu'ils ont obtenu des faisceaux de lumière bleue à partir de leurs semi-conducteurs, les portes se sont ouvertes à une transformation fondamentale de la technologie de l'éclairage. Les ampoules à incandescence avaient éclairé le XX^{e} siècle. Le XXI^{e} siècle sera éclairé par les lampes DEL.

Économiser l'énergie et les ressources

Une diode électroluminescente est constituée d'un certain nombre de couches de matériaux semi-conducteurs. Dans la DEL, l'électricité est directement convertie en particules de lumière, en photons, ce qui permet de gagner en efficacité par rapport à d'autres sources de lumière, où la majeure partie de l'électricité est convertie en chaleur et une petite partie seulement en lumière. Dans les ampoules à incandescence ainsi que dans les lampes halogènes, le courant électrique est utilisé pour chauffer un filament métallique et le faire briller. Dans les tubes fluorescents (autrefois appelées lampes basse consommation, mais avec l'avènement des lampes DEL, cette appellation a perdu de son sens), on produit une décharge dans un gaz, ce qui crée à la fois de la chaleur et de la lumière.

Ainsi, les nouvelles DEL nécessitent moins d'énergie pour émettre de la lumière que les anciennes sources lumineuses. En outre, elles sont constamment améliorées, devenant plus efficaces avec un flux lumineux plus élevé (mesuré en lumen) par unité de puissance électrique d'entrée (mesurée en watt). Le record le plus récent est d'un peu plus de 300 lumens/watt, à comparer avec 16 pour les ampoules ordinaires et près de 70 pour les tubes fluorescents. Étant donné qu'environ un quart de la consommation mondiale d'électricité est utilisé à des fins d'éclairage, les DEL à haut rendement énergétique contribuent à préserver les ressources de la planète.

Les DEL ont également une durée de vie plus longue que les autres lampes. Les ampoules à incandescence ont une durée de vie de 1 000 heures, car la chaleur détruit le filament, tandis que les tubes fluorescents ont une durée de vie d'environ 10 000 heures. Les DEL peuvent

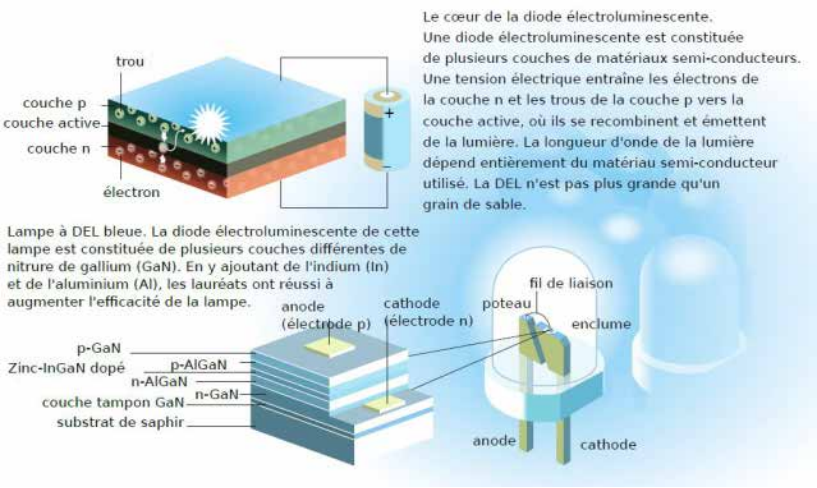


FIG. 83 – *Le principe d'une diode électroluminescente ou DEL (en haut à gauche) et un exemple de lampe DEL bleue.*

durer 100 000 heures, ce qui réduit considérablement la consommation de matériaux.

Créer de la lumière dans un semi-conducteur

La technologie à DEL trouve son origine dans le même art de l'ingénierie qui nous a donné les téléphones portables, les ordinateurs et tous les équipements électroniques modernes basés sur des phénomènes quantiques. Une diode électroluminescente se compose de plusieurs couches : une couche de type n avec un surplus d'électrons négatifs et une couche de type p avec une quantité insuffisante d'électrons, également appelée couche avec un surplus de trous positifs.

Entre les deux se trouve une couche active, vers laquelle les électrons négatifs et les trous positifs sont attirés lorsqu'on applique une tension électrique au semi-conducteur. Lorsque les électrons et les trous se rencontrent, ils se recombinent et créent de la lumière. La longueur d'onde de la lumière dépend entièrement du semi-conducteur. La lumière bleue apparaît à l'extrémité des ondes courtes de l'arc-en-ciel et ne peut être produite que dans certains matériaux.

Le premier rapport faisant état de l'émission de lumière par un semi-

conducteur a été rédigé en 1907 par Henry J. Round, un collaborateur de Guglielmo Marconi, lauréat du prix Nobel en 1909. Plus tard, dans les années 1920 et 1930, en Union soviétique, Oleg V. Losev a entrepris des études plus approfondies sur l'émission de lumière. Cependant, Round et Losev ne disposaient pas des connaissances nécessaires pour comprendre véritablement le phénomène. Il faudra attendre quelques décennies pour que les conditions préalables à une description théorique de ce qu'on appelle l'électroluminescence soient réunies.

La diode électroluminescente rouge a été inventée à la fin des années 1950. Elles étaient utilisées par exemple dans les montres numériques et les calculatrices, ou comme indicateurs de l'état de marche ou d'arrêt de divers appareils. Très tôt, il est apparu qu'une diode électroluminescente de courte longueur d'onde, composée de photons très énergétiques, une diode bleue, était nécessaire pour créer de la lumière blanche. De nombreux laboratoires s'y sont essayés, mais sans succès.

Remise en cause des idées établies

Les lauréats ont remis en question des idées établies. Ils ont travaillé dur et pris des risques considérables. Ils ont construit leur équipement eux-mêmes, appris la technologie et réalisé des milliers d'expériences. La plupart du temps, ils ont échoué, mais ils n'ont pas désespéré : c'était de l'art de laboratoire au plus haut niveau.

Le nitrure de gallium était le matériau de prédilection d'Akasaki et d'Amano, ainsi que de Nakamura. Ils ont fini par réussir dans leurs efforts, même si d'autres avaient échoué avant eux. Très tôt, ce matériau a été considéré comme approprié pour produire de la lumière bleue, mais les difficultés pratiques se sont avérées énormes. Personne n'était en mesure de produire des cristaux de nitrure de gallium d'une qualité suffisante, car on considérait la production d'une surface adaptée à la croissance des cristaux de nitrure de gallium comme une entreprise sans espoir. En outre, il était pratiquement impossible de créer des couches de type p dans ce matériau.

Akasaki était néanmoins convaincu par l'expérience acquise que le choix du matériau était correct et a continué à travailler avec Amano, qui était étudiant en doctorat à l'université de Nagoya. Dans l'entreprise Nichia, Nakamura a également choisi le nitrure de gallium plutôt que l'alternative, le séléniure de zinc, que d'autres considéraient comme un matériau plus prometteur.

Fiat lux : que la lumière soit !

En 1986, Akasaki et Amano ont été les premiers à réussir à créer un cristal de nitrure de gallium de haute qualité en plaçant une couche de nitrure d'aluminium sur un substrat de saphir, puis en faisant croître le nitrure de gallium de haute qualité par-dessus. Quelques années plus tard, à la fin des années 1980, ils ont réussi à créer une couche de type p. De plus, Akasaki et Amano ont découvert que leur matériau brillait plus intensément lorsqu'il était étudié au microscope électronique à balayage. Cela suggérait que le faisceau électronique du microscope rend la couche de type p plus efficace. En 1992, ils ont pu présenter leur première diode émettant une lumière bleue intense.

Nakamura a commencé à développer sa DEL bleue en 1988. Deux ans plus tard, il a réussi lui aussi à créer du nitrure de gallium de haute qualité. Il a trouvé sa propre façon de créer le cristal en faisant d'abord croître une fine couche de nitrure de gallium à basse température, puis en faisant croître les couches suivantes à une température plus élevée.

Nakamura a également pu expliquer pourquoi Akasaki et Amano avaient réussi à obtenir une couche de type p : le faisceau d'électrons a éliminé l'hydrogène qui empêchait la couche de type p de se former. Pour sa part, Nakamura a remplacé le faisceau d'électrons par une méthode plus simple et moins coûteuse : en chauffant le matériau, il a réussi à créer une couche de type p fonctionnelle en 1992. Les solutions de Nakamura étaient donc différentes de celles d'Akasaki et d'Amano.

Au cours des années 1990, les deux groupes de recherche ont réussi à améliorer leurs DEL bleues et à les rendre plus efficaces. Ils ont créé différents alliages de nitrure de gallium en utilisant de l'aluminium ou de l'indium. La structure de la DEL est devenue de plus en plus complexe.

Akasaki et Amano, ainsi que Nakamura, ont également inventé un laser bleu dans lequel la DEL bleue, de la taille d'un grain de sable, est un élément crucial. Contrairement à la lumière dispersée de la DEL, le laser bleu émet un faisceau très fin. La lumière bleue ayant une longueur d'onde très courte, elle peut être concentrée beaucoup plus précisément. Avec la lumière bleue, la même surface peut stocker quatre fois plus d'informations qu'avec la lumière infrarouge. Cette augmentation de la capacité de stockage a rapidement conduit au développement de disques *Blu-ray* avec des temps de lecture plus longs, ainsi qu'à des imprimantes laser plus performantes.

De nombreux appareils ménagers sont également équipés de DEL. Elles éclairent les écrans à cristaux liquides des téléviseurs, des ordina-

teurs et des téléphones portables, pour lesquels elles servent également de torche et de flash pour l'appareil photo.

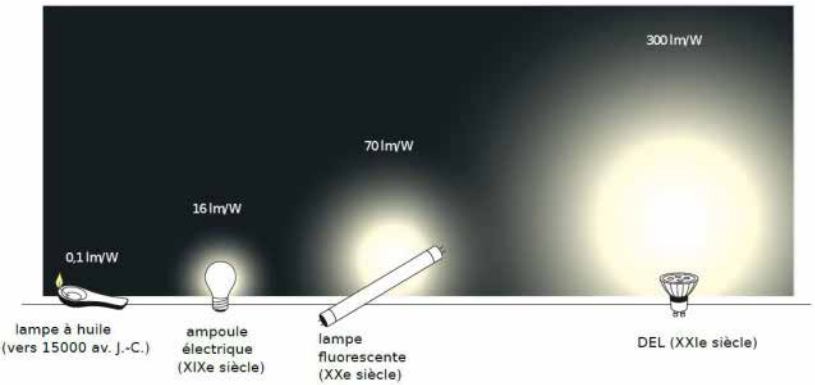


FIG. 84 – *Les lampes DEL nécessitent moins d'énergie pour émettre de la lumière que les anciennes sources lumineuses. L'efficacité est exprimée en flux lumineux (mesuré en lumen) par unité de puissance ajoutée (mesurée en watt). Étant donné qu'environ un quart de la consommation mondiale d'électricité est utilisé à des fins d'éclairage, les lampes DEL très économes en énergie contribuent à préserver les ressources de la planète.*

Une révolution lumineuse

Les inventions des lauréats ont révolutionné la technologie de l'éclairage. De nouvelles lampes plus efficaces, moins chères et plus intelligentes sont développées en permanence. Les lampes DEL blanches peuvent être créées de deux manières différentes. La première consiste à utiliser la lumière bleue pour exciter du phosphore qui brille alors en rouge et en vert. Lorsque toutes les couleurs sont réunies, la lumière blanche est produite. L'autre méthode consiste à construire la lampe à partir de trois DEL, une rouge, une verte et une bleue, et à laisser l'œil faire le travail de combinaison des trois couleurs pour obtenir du blanc.

Les lampes DEL sont donc des sources de lumière flexibles, qui ont déjà plusieurs applications dans le domaine de l'éclairage : des millions de couleurs différentes peuvent être produites. On peut modifier les couleurs et l'intensité selon les besoins. Des panneaux lumineux colorés

de plusieurs centaines de mètres carrés clignotent, changent de couleur et de motif. Le tout peut être contrôlé par ordinateur. La possibilité de contrôler la couleur de la lumière implique également que les lampes DEL peuvent reproduire les variations de la lumière naturelle et suivre notre horloge biologique. La culture en serre à l'aide de la lumière artificielle est déjà une réalité.

La lampe DEL est également très prometteuse pour améliorer la qualité de vie de plus de 1,5 milliard de personnes qui n'ont actuellement pas accès aux réseaux électriques, car ses faibles besoins en énergie signifient qu'elle peut être alimentée par de l'énergie solaire locale bon marché. En outre, les eaux polluées peuvent être stérilisées à l'aide de DEL ultraviolettes, une évolution ultérieure de la DEL bleue.

L'invention de la DEL bleue efficace n'a que vingt ans, mais elle a déjà contribué à créer de la lumière blanche d'une manière entièrement nouvelle, pour notre plus grand bénéfice à tous.

Fig. 85 – *Panneaux lumineux blancs pour les cyclistes à Stockholm.*

Les lauréats

Les lauréats :

— Isamu Akasaki, né en 1929 à Chiran au Japon, docteur en 1964 de l'université de Nagoya, professeur à l'université Meijo à Nagoya et professeur émérite à l'université de Nagoya ;

— Hiroshi Amano, né en 1960 à Hamamatsu, docteur en 1989 de l'université de Nagoya, professeur dans cette même université ;

— Shuji Nakamura, né en 1954 à Ikata, docteur en 1994 de l'université de Tokushima, professeur à l'université de Californie à Santa Barbara.

Les neutrinos ont une masse

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2015 à

— Takaaki Kajita, de l'observatoire *Super-Kamiokande* de l'université de Tokyo, à Kashiwa,

— Arthur B. McDonald, de l'observatoire de neutrinos de Sudbury de l'université Queen's, à Kingston au Canada,

« pour la découverte des oscillations de neutrinos, qui montre que les neutrinos ont une masse ».

Ils ont résolu l'énigme des neutrinos et ouvert un nouveau domaine de la physique des particules. Takaaki Kajita et Arthur B. McDonald ont été des scientifiques clés de deux grands groupes de recherche, *Super-Kamiokande* et l'observatoire de neutrinos de Sudbury, qui ont découvert la métamorphose des neutrinos en plein vol.

La chasse était ouverte au plus profond de la Terre, dans des installations gigantesques, où des milliers d'yeux artificiels attendaient le bon moment pour percer les secrets des neutrinos. En 1998, Takaaki Kajita a découvert que les neutrinos semblent se métamorphoser. Ils changent d'identité sur leur chemin vers le détecteur *Super-Kamiokande* au Japon. Les neutrinos qui y sont détectés proviennent de réactions entre les rayons cosmiques et l'atmosphère terrestre.

FIG. 86 – *Tiraillé entre plusieurs identités : neutrino tauique, neutrino électronique ou neutrino muonique ?*

Pendant ce temps, de l'autre côté du globe, les scientifiques de l'ob-

servatoire de neutrinos de Sudbury au Canada étudiaient les neutrinos provenant du Soleil. En 2001, le groupe de recherche dirigé par Arthur B. McDonald a montré que ces neutrinos changeaient eux aussi d'identité.

Ensemble, les deux expériences ont découvert un nouveau phénomène : les oscillations de neutrinos. L'une des conclusions les plus importantes de ces expériences est que le neutrino, longtemps considéré comme sans masse, doit avoir une masse. Cette découverte est d'une importance capitale pour la physique des particules et pour notre compréhension de l'Univers.

Des héros réticents

Nous vivons dans un monde de neutrinos. Des milliers de milliards de neutrinos traversent votre corps à chaque seconde. Vous ne les voyez pas et vous ne les sentez pas. Les neutrinos traversent l'espace presque à la vitesse de la lumière et n'interagissent pratiquement jamais avec la matière. D'où viennent-ils ?

Certains ont été créés dès le *Big Bang*, d'autres sont constamment créés lors de divers processus dans l'espace et sur Terre, depuis l'explosion de supernovae, la mort d'étoiles massives, les réactions dans les centrales nucléaires et les désintégrations radioactives naturelles. Même à l'intérieur de notre corps, une moyenne de 5 000 neutrinos par seconde est libérée lors de la désintégration d'un isotope du potassium. La majorité de ceux qui atteignent la Terre proviennent de réactions nucléaires à l'intérieur du Soleil. Après les particules de lumière (les photons), les neutrinos sont les particules les plus nombreuses de tout l'Univers.

Pourtant, pendant longtemps, leur existence n'était même pas certaine. Bien au contraire, lorsque l'existence de la particule a été proposée par l'Autrichien Wolfgang Pauli (lauréat du prix Nobel en 1945), c'était principalement dans une tentative désespérée d'expliquer la conservation de l'énergie dans la désintégration bêta, un type de désintégration radioactive dans les noyaux atomiques. En décembre 1930, Pauli a écrit une lettre à ses collègues physiciens qui commençait par « Mesdames et Messieurs radioactifs ». Dans cette lettre, il suggérait qu'une partie de l'énergie était emportée par une particule électriquement neutre, faiblement interactive et très légère. Pauli lui-même ne croyait guère à l'existence de cette particule. Il aurait déclaré : « J'ai fait une chose terrible, j'ai postulé une particule qui ne peut pas être

détectée. »

Peu de temps après, l'Italien Enrico Fermi (lauréat du prix Nobel en 1938) a pu proposer une théorie élégante qui incluait la particule légère et neutre de Pauli. On l'appela le neutrino. Personne ne pouvait prédire que cette minuscule particule révolutionnerait à la fois la physique des particules et la cosmologie.

Il faudra attendre un quart de siècle pour que le neutrino soit réellement découvert. L'occasion s'est présentée dans les années 1950, lorsque les neutrinos ont commencé à affluer en grand nombre des centrales nucléaires alors en construction. En juin 1956, deux physiciens américains, Frederick Reines (lauréat du prix Nobel en 1995) et Clyde Cowan, ont envoyé un télégramme à Wolfgang Pauli : les neutrinos avaient laissé des traces dans leur détecteur. Cette découverte montrait que le neutrino fantôme, ou *Poltergeist* comme on l'appelait, était une particule réelle.

Un trio singulier

Le prix Nobel de physique de l'année 2015 récompense une découverte qui a permis de résoudre une énigme ancienne concernant les neutrinos. Depuis les années 1960, les scientifiques avaient calculé théoriquement le nombre de neutrinos créés lors des réactions nucléaires qui font briller le Soleil. Mais lors des mesures effectuées sur Terre, jusqu'à deux tiers de la quantité calculée manquaient à l'appel. Où étaient passés les neutrinos ?

Les suggestions ne manquaient pas. Peut-être y avait-il un problème dans les calculs théoriques sur la façon dont les neutrinos sont produits dans le Soleil ? L'une des autres suggestions pour résoudre l'énigme des neutrinos solaires était que les neutrinos changent d'identité. Selon le modèle standard de la physique des particules, il existe trois types de neutrinos : les neutrinos électroniques, les neutrinos muoniques et les neutrinos tauiques. Chacun a son partenaire chargé, l'électron, et ses deux parents beaucoup plus lourds et de courte durée de vie, le muon et le tau. Le Soleil ne produit que des neutrinos électroniques. Mais s'ils étaient transformés en neutrinos muoniques ou en neutrinos tauiques sur leur chemin vers la Terre, le déficit en neutrinos électroniques détectés deviendrait compréhensible.

La chasse aux neutrinos sous terre

Les spéculations sur le changement d'identité du neutrino sont restées des spéculations jusqu'à ce que des installations plus grandes et plus sophistiquées soient mises en service. Jour et nuit, on est parti à la chasse des neutrinos dans des détecteurs colossaux construits profondément sous terre, afin de les protéger du bruit des rayonnements cosmiques provenant de l'espace et des désintégrations radioactives spontanées dans l'environnement. Pourtant, c'est un art difficile que de séparer quelques vrais signaux de neutrinos de milliards de faux. Même l'air des mines et le matériau des détecteurs contiennent des traces d'éléments qui se désintègrent et interfèrent avec les mesures.

Super-Kamiokande est devenu opérationnel en 1996 dans une mine de zinc à 250 kilomètres au nord-ouest de Tokyo, tandis que l'observatoire de neutrinos de Sudbury, construit dans une mine de nickel dans l'Ontario, a commencé ses observations en 1999. Ensemble, ils allaient dévoiler le côté caméléon du neutrino, découverte récompensée par le prix Nobel de physique en 2015.

Super-Kamiokande est un gigantesque détecteur construit à 1 000 mètres sous la surface de la Terre. Il s'agit d'un réservoir de 40 mètres de haut et autant de large, rempli de 50 000 tonnes d'eau. L'eau est si pure que les rayons lumineux peuvent parcourir 70 mètres avant que leur intensité ne soit réduite de moitié, alors qu'ils ne parcourent que quelques mètres dans une piscine ordinaire. Plus de 11 000 détecteurs de lumière ont été placés en haut, sur les côtés et au fond de la cuve, avec pour mission de découvrir, d'amplifier et de mesurer les très faibles éclairs de lumière dans l'eau extrêmement pure.

La grande majorité des neutrinos traversent la cuve, mais un neutrino entre de temps en temps en collision avec un noyau atomique ou un électron dans l'eau. Ces collisions créent des particules chargées : des muons à partir des neutrinos muoniques et des électrons à partir des neutrinos électroniques. Autour des particules chargées surgissent de faibles éclairs de lumière bleue. Il s'agit de l'effet Tcherenkov, qui apparaît lorsqu'une particule se déplace à une vitesse supérieure à celle de la lumière. Cela n'est pas en contradiction avec la théorie de la relativité d'Einstein, qui stipule que rien ne peut se déplacer plus vite que la lumière dans le vide. Dans l'eau, la lumière est ralentie à 75 % de sa vitesse maximale et peut être « dépassée » par les particules chargées. La forme et l'intensité de la lumière Tcherenkov révèlent le type de neutrino à l'origine de la lumière et sa provenance.

Une solution à l'énigme

Au cours de ses deux premières années de fonctionnement, *Super-Kamiokande* a passé au crible environ 5 000 signaux de neutrinos. C'était beaucoup plus que lors des expériences précédentes, mais c'était encore moins que ce qui était attendu lorsque les scientifiques ont estimé la quantité de neutrinos créés par le rayonnement cosmique. Les particules du rayonnement cosmique proviennent de toutes les directions de l'espace. Lorsqu'elles entrent en collision à pleine vitesse avec les molécules de l'atmosphère terrestre, des pluies de neutrinos sont produites.

Super-Kamiokande a détecté des neutrinos muoniques provenant directement de l'atmosphère supérieure, ainsi que ceux qui frappent le détecteur par le bas après avoir traversé toute la Terre. Les neutrinos provenant des deux directions devraient être en nombre égal, car la Terre ne constitue pas un obstacle considérable pour eux. Or les neutrinos muoniques qui sont descendus directement sur *Super-Kamiokande* étaient plus nombreux que ceux qui avaient d'abord traversé la Terre.

Cela indiquait que les neutrinos muoniques qui avaient voyagé plus longtemps avaient eu le temps de subir un changement d'identité, contrairement aux neutrinos muoniques qui venaient directement d'en haut et qui n'avaient parcouru que quelques dizaines de kilomètres. Comme le nombre de neutrinos électroniques arrivant de différentes directions était conforme aux attentes, les neutrinos muoniques avaient dû se transformer en neutrinos tauiques, le troisième type de neutrinos. Cependant, leur passage n'avait pas pu être observé dans le détecteur.

Une pièce décisive du puzzle s'est mise en place lorsque l'observatoire de neutrinos de Sudbury a effectué ses mesures des neutrinos en provenance du Soleil, où les processus nucléaires ne donnent lieu qu'à des neutrinos électroniques. À deux kilomètres sous la surface de la Terre, les neutrinos électroniques rapides ont été surveillés par 9 500 détecteurs de lumière dans un réservoir rempli de 1 000 tonnes d'eau lourde. L'eau lourde se distingue de l'eau ordinaire par le fait que chaque atome d'hydrogène des molécules d'eau possède un neutron supplémentaire dans son noyau, formant ainsi un isotope de l'hydrogène, le deutérium.

Le noyau de deutérium offre des possibilités supplémentaires de collision pour les neutrinos dans le détecteur. Pour certaines réactions, seule la quantité de neutrinos électroniques a pu être déterminée, tandis que d'autres ont permis aux scientifiques de mesurer la quantité des trois types de neutrinos ensemble, sans les distinguer les uns des autres.

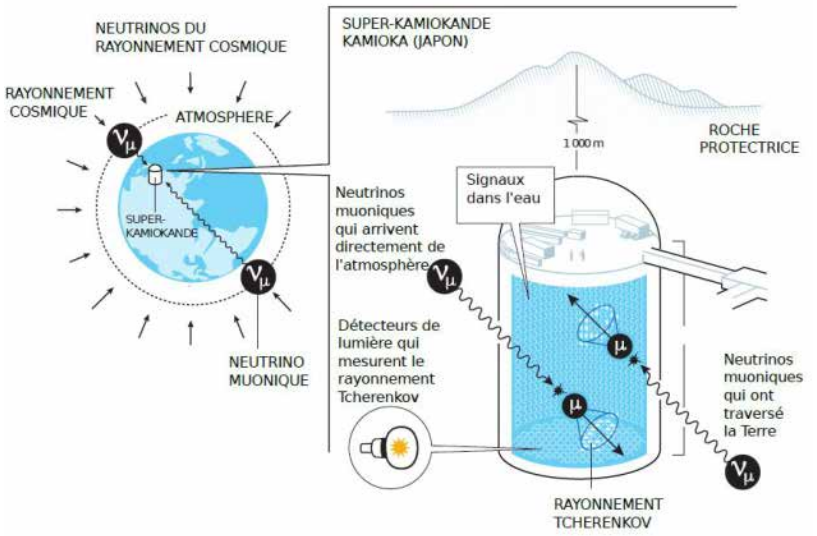


FIG. 87 – Super-Kamiokande *détecte les neutrinos atmosphériques. Lorsqu'un neutrino entre en collision avec une molécule d'eau dans le réservoir, une particule rapide chargée électriquement est créée. Cette particule génère un rayonnement Tcherenkov qui est mesuré par les capteurs de lumière. La forme et l'intensité du rayonnement Tcherenkov révèlent le type de neutrino qui en est à l'origine et sa provenance. Les neutrinos muoniques qui sont arrivés à* Super-Kamiokande *par le haut étaient plus nombreux que ceux qui ont traversé la Terre entière. Cela indique que les neutrinos muoniques qui ont voyagé plus longtemps ont eu le temps de changer d'identité en cours de route.*

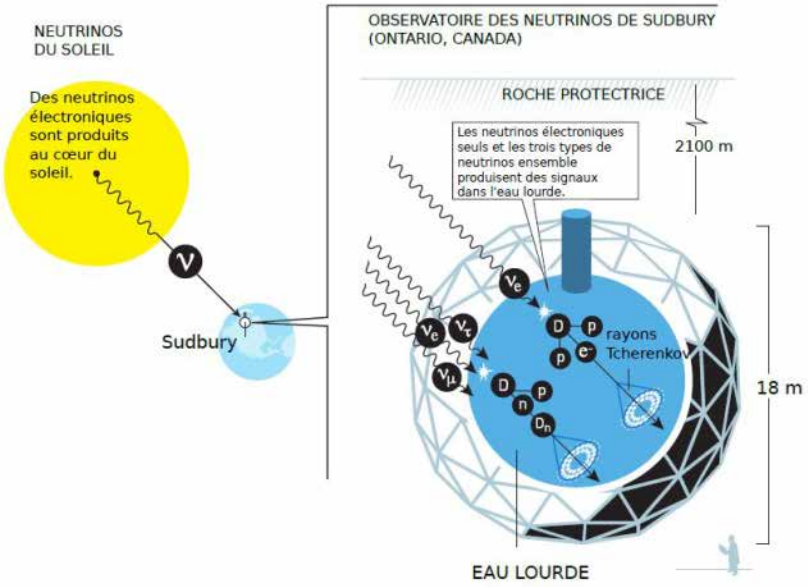


FIG. 88 – *L'observatoire de neutrinos de Sudbury détecte les neutrinos provenant du Soleil, qui ne produit que des neutrinos électroniques. Les réactions entre les neutrinos et l'eau lourde dans le réservoir ont permis de mesurer les neutrinos électroniques et les trois types de neutrinos combinés. On a découvert que les neutrinos électroniques étaient moins nombreux que prévu, alors que le nombre total des trois types de neutrinos combinés correspondait toujours aux attentes. On en a conclu que certains neutrinos électroniques avaient changé d'identité.*

Étant donné que seuls les neutrinos électroniques sont censés provenir du Soleil, les deux manières de mesurer le nombre de neutrinos devraient donner le même résultat. Par conséquent, si les neutrinos électroniques détectés étaient moins nombreux que les trois types de neutrinos réunis, cela indiquerait que quelque chose arrive aux neutrinos électroniques au cours de leur voyage de 150 millions de kilomètres depuis le Soleil.

Sur les 60 milliards de neutrinos par centimètre carré qui, chaque seconde, atteignent la Terre en provenance du Soleil, l'observatoire de neutrinos de Sudbury n'en a capté que trois par jour au cours de ses deux premières années d'activité. Cela correspond à un tiers du nombre

attendu de neutrinos électroniques qui auraient dû être captés par le détecteur. Les deux tiers avaient disparu. La somme des trois types de neutrinos correspondait toutefois au nombre de neutrinos attendu. La conclusion était que les neutrinos électroniques avaient dû changer d'identité en cours de route.

Métamorphose dans le monde quantique

Les deux expériences ont confirmé le soupçon selon lequel les neutrinos peuvent passer d'une identité à l'autre. Cette découverte a donné lieu à de nombreuses nouvelles expériences et a forcé les physiciens des particules à adopter de nouvelles méthodes de réflexion.

Ensemble, ces deux expériences ont abouti à une conclusion révolutionnaire : la métamorphose des neutrinos nécessite que les neutrinos aient une masse. Sinon, ils ne pourraient pas se transformer. Comment cette métamorphose se produit-elle ?

La physique quantique est nécessaire pour expliquer cette magie. Dans le monde quantique, les particules et les ondes sont des aspects différents d'un même état physique. Une particule dotée d'une certaine énergie est décrite par une onde correspondante d'une certaine fréquence. En physique quantique, les neutrinos électroniques, muoniques et tauiques sont représentés par des ondes superposées qui correspondent à des états de neutrinos de masses différentes.

Lorsque les ondes sont en phase, il n'est pas possible de distinguer les différents états des neutrinos les uns des autres. Mais lorsque les neutrinos se déplacent dans l'espace, les ondes sont déphasées. En cours de route, les ondes se superposent de différentes manières. La superposition à un endroit donné donne la probabilité du type de neutrino qui a le plus de chances de s'y trouver. Les probabilités varient d'un endroit à l'autre, elles oscillent et les neutrinos apparaissent sous leurs différentes identités.

Ce comportement particulier est donc dû aux différences de masse des neutrinos. Les expériences indiquent que ces différences sont extrêmement faibles. On estime que la masse du neutrino est également très petite, bien qu'elle n'ait jamais été mesurée directement. Néanmoins, comme les neutrinos existent en très grandes quantités dans l'Univers, la somme de leurs très petites masses devient significative. On estime que le poids combiné des neutrinos est à peu près égal au poids de toutes les étoiles visibles de l'Univers prises ensemble.

La porte de la nouvelle physique

La découverte de la masse du neutrino a été une véritable révolution pour la physique des particules. Son modèle standard des parties les plus profondes de la matière avait connu un immense succès. Pendant plus de vingt ans, il avait résisté à tous les défis expérimentaux. Mais le modèle exige que les neutrinos n'aient pas de masse. Les expériences ont donc révélé la première fissure apparente dans le modèle standard. Il est devenu évident que le modèle standard ne peut pas être la théorie complète du fonctionnement des constituants fondamentaux de l'Univers.

Plusieurs questions clés sur la nature du neutrino doivent être résolues avant que de nouvelles théories au-delà du modèle standard puissent être pleinement développées. Quelle est la masse des neutrinos ? Pourquoi sont-ils si légers ? Existe-t-il d'autres types de neutrinos que les trois actuellement connus ? Les neutrinos sont-ils leurs propres antiparticules ? Pourquoi sont-ils si différents des autres particules élémentaires ?

Les découvertes récompensées par le prix Nobel de physique 2015 ont permis d'obtenir des informations cruciales sur le monde presque entièrement caché du neutrino. Les expériences se poursuivent et une intense activité est en cours dans le monde entier pour détecter les neutrinos et examiner leurs propriétés. De nouvelles découvertes sur les secrets bien gardés du neutrino devraient modifier notre compréhension de l'histoire, de la structure et du destin de l'Univers.

Les lauréats

— Takaaki Kajita, né en 1959 à Higashimatsuyama au Japon, docteur en 1986 de l'université de Tokyo, directeur de l'Institut de recherche sur les rayons cosmiques et professeur à l'université de Tokyo à Kashiwa ;
— Arthur B. McDonald, né en 1943 à Sydney au Canada, docteur en 1969 de l'institut de technologie de Californie à Pasadena, professeur émérite de l'université Queen's à Kingston au Canada.

Des phénomènes étranges dans la matière en deux dimensions

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2016

> « pour la découverte théorique des transitions de phase topologiques et des phases topologiques de la matière ».

Une moitié du prix revient à

— David J. Thouless, de l'université de Washington à Seattle,

tandis que l'autre moitié du prix revient conjointement à

— F. Duncan M. Haldane, de l'université de Princeton,

— J. Michael Kosterlitz, de l'université Brown à Providence.

Les lauréats ont ouvert la porte à un monde inconnu, où la matière existe dans des états étranges. Leurs découvertes ont permis des avancées dans la compréhension théorique des mystères de la matière et créé de nouvelles perspectives pour le développement de matériaux innovants.

David Thouless, Duncan Haldane et Michael Kosterlitz ont utilisé des méthodes mathématiques avancées pour expliquer des phénomènes étranges dans des phases (ou états) inhabituels de la matière, tels que les supraconducteurs, les superfluides ou les couches magnétiques minces. Kosterlitz et Thouless ont étudié des phénomènes qui se produisent dans un monde plat, sur des surfaces ou à l'intérieur de couches extrêmement fines qui peuvent être considérées comme bidimensionnelles par rapport aux trois dimensions (longueur, largeur et hauteur) avec lesquelles la réalité est habituellement décrite. Haldane a également étudié la matière qui forme des fils si fins qu'ils peuvent être considérés comme unidimensionnels.

La physique qui se déroule dans les « mondes plats » [8] est très différente de celle que nous connaissons dans le monde qui nous entoure. Même si la matière très finement distribuée est constituée de millions d'atomes, et même si le comportement de chaque atome peut être expliqué par la physique quantique, les atomes présentent des propriétés

8. NDT. Le texte fait référence à un livre d'Edwin Abbott publié en anglais en 1884, traduit en 1968 en français sous le titre « *Flatland* : une aventure à plusieurs dimensions ».

complètement différentes lorsqu'ils sont nombreux à se rassembler. De nouveaux phénomènes collectifs sont continuellement découverts dans ces mondes plats. La physique de la matière condensée est aujourd'hui l'un des domaines les plus dynamiques de la physique.

L'utilisation par les trois lauréats de concepts topologiques en physique a été déterminante pour leurs découvertes. La topologie est une branche des mathématiques qui décrit les propriétés qui changent par paliers. Avec la topologie moderne comme outil, les lauréats ont présenté des résultats surprenants, qui ont ouvert de nouveaux champs de recherche et conduit à la création de concepts nouveaux et importants dans plusieurs domaines de la physique.

La physique quantique devient visible dans le froid

Au fond, toute matière est régie par les lois de la physique quantique. Les gaz, les liquides et les solides sont les phases habituelles de la matière, dans lesquelles les effets quantiques sont souvent cachés par des mouvements atomiques aléatoires. Mais dans le froid extrême, proche du zéro absolu (−273 degrés Celsius), la matière adopte de nouvelles phases étranges et se comporte de manière inattendue. La physique quantique, qui ne fonctionne par ailleurs qu'à l'échelle microscopique, devient soudain visible (fig. 89).

Les phases ordinaires de la matière passent également d'une phase à l'autre lorsque la température change. Par exemple, une telle transition de phase se produit lorsque la glace, composée de cristaux bien ordonnés, est chauffée et fond pour donner de l'eau liquide, une phase plus chaotique de la matière. Lorsque nous examinons les mondes plats méconnus, nous découvrons des phases de la matière qui n'ont pas encore été entièrement explorées.

Des choses étranges peuvent se produire dans le froid. Par exemple, la résistance à laquelle se heurtent toutes les particules en mouvement cesse soudainement. C'est le cas lorsque le courant électrique circule sans résistance dans un supraconducteur ou lorsqu'un tourbillon dans un superfluide tourne indéfiniment sans ralentir.

Le premier à avoir étudié systématiquement les superfluides a été le Russe Piotr Kapitsa dans les années 1930. Il a refroidi de l'hélium 4, présent dans l'air, à −271 degrés Celsius et l'a fait ramper le long des parois de son support. En d'autres termes, l'hélium 4 s'est comporté de manière tout à fait étrange, comme le ferait un superfluide dont la viscosité a complètement disparu. Kapitsa a reçu le prix Nobel de physique

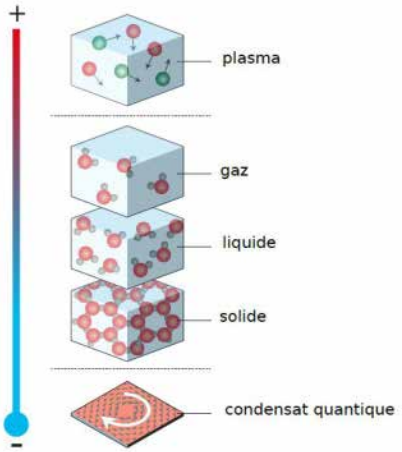


FIG. 89 – Phases de la matière. *Les phases les plus courantes sont les phases gazeuse, liquide et solide. Cependant, à des températures extrêmement élevées ou basses, la matière prend d'autres états plus exotiques.*

en 1978. Depuis, plusieurs types de superfluides ont été créés en laboratoire. L'hélium superfluide, les couches minces de supraconducteurs, les couches minces de matériaux magnétiques et les nanofils conducteurs d'électricité ne sont que quelques-unes des nombreuses nouvelles phases de la matière qui font actuellement l'objet d'études intensives.

Les paires de tourbillons fournissent la solution

Les chercheurs ont longtemps cru que les fluctuations thermiques détruisaient tout ordre dans la matière dans un monde plat et bidimensionnel, même au zéro absolu. S'il n'y a pas de phases ordonnées, il ne peut y avoir de transitions de phase. Mais au début des années 1970, David Thouless et Michael Kosterlitz se sont rencontrés à Birmingham, en Grande-Bretagne, et ont remis en question la théorie alors en vigueur. Ils se sont attaqués ensemble au problème des transitions de phase dans les mondes plats, le premier par curiosité, le second par ignorance, affirment-ils eux-mêmes. Cette coopération a débouché sur une compréhension entièrement nouvelle des transitions de phase, qui est considérée comme l'une des découvertes les plus importantes du

XX^{e} siècle en physique de la matière condensée. On l'appelle « transition KT » (transition Kosterlitz-Thouless) ou « transition BKT », où le B désigne Vadim Berezinskii, un physicien théoricien moscovite décédé depuis qui avait présenté des idées similaires.

La transition de phase topologique n'est pas une transition de phase ordinaire, comme celle entre la glace et l'eau. Le rôle principal dans une transition topologique est joué par de petits tourbillons dans le matériau plat. À basse température, ils forment des paires serrées. Lorsque la température augmente, une transition de phase se produit : les tourbillons s'éloignent soudainement les uns des autres et naviguent seuls dans le matériau (fig. 90).

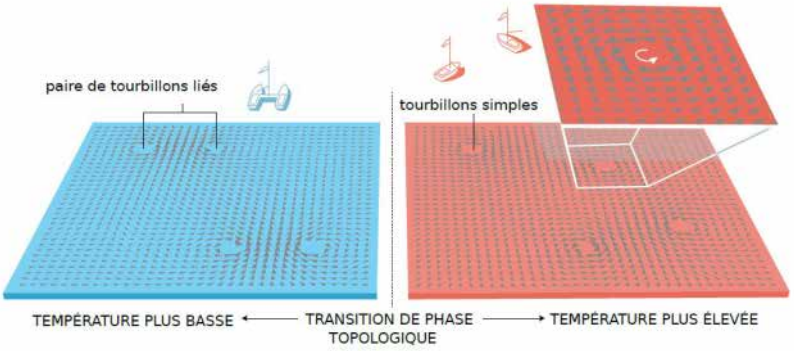


FIG. 90 – La transition de phase. *Elle se produit lorsque des phases de la matière passent de l'une à l'autre, comme lorsque la glace fond et devient de l'eau liquide. En utilisant la topologie, Kosterlitz et Thouless ont décrit une transition de phase topologique dans une fine couche de matière très froide. Dans le froid, des paires de tourbillons se forment et se séparent soudainement à la température de la transition de phase. Il s'agit de l'une des découvertes les plus importantes du* XX^{e} *siècle dans le domaine de la physique de la matière condensée.*

L'avantage de cette théorie est qu'elle peut être utilisée pour différents types de matériaux en petite dimension : la transition KT est universelle. Elle est devenue un outil utile, qui n'est pas seulement appliqué dans le monde de la matière condensée, mais aussi dans d'autres domaines de la physique tels que la physique atomique ou la mécanique statistique. La théorie qui sous-tend la transition KT a également été

développée par ses auteurs et par d'autres, et confirmée expérimentalement.

Les mystérieux sauts quantiques

Les développements expérimentaux ont fini par faire apparaître un certain nombre de nouveaux états de la matière qui nécessitaient une explication. Dans les années 1980, David Thouless et Duncan Haldane ont présenté de nouveaux travaux théoriques révolutionnaires qui remettaient en question les théories antérieures, notamment celles qui utlisaient la mécanique quantique pour déterminer quels matériaux conduisent l'électricité. Cette théorie avait été élaborée dans les années 1930. Quelques décennies plus tard, ce domaine de la physique était considéré comme bien compris.

La surprise fut donc grande lorsque David Thouless montra en 1983 que l'image antérieure était incomplète et qu'à basse température et dans des champs magnétiques intenses, un nouveau type de théorie était nécessaire, où les concepts topologiques intervenaient de manière décisive. À peu près au même moment, Duncan Haldane est arrivé à une conclusion similaire et tout aussi inattendue en analysant des chaînes atomiques magnétiques. Leurs travaux ont joué un rôle déterminant dans les développements spectaculaires qui ont suivi dans la théorie des nouvelles phases de la matière.

Le phénomène mystérieux que David Thouless a décrit théoriquement en utilisant la topologie est l'effet Hall quantique. Cet effet avait été découvert en 1980 par le physicien allemand Klaus von Klitzing, qui a reçu pour cela le prix Nobel en 1985. Ce dernier avait étudié une fine couche conductrice entre deux semi-conducteurs, où les électrons étaient refroidis à quelques degrés au-dessus du zéro absolu et soumis à un fort champ magnétique.

En physique, il n'est pas rare que des phénomènes extrêmes se produisent lorsque la température est abaissée. Par exemple, de nombreux matériaux deviennent magnétiques. Cela est dû au fait que tous les petits aimants atomiques du matériau pointent soudainement dans la même direction, ce qui crée un champ magnétique puissant, qui peut également être mesuré.

L'effet Hall quantique est en revanche plus difficile à comprendre : la conductance électrique de la couche semble ne pouvoir prendre que des valeurs particulières, qui sont en outre extrêmement précises, ce qui est inhabituel en physique. Les mesures donnent exactement les

mêmes résultats même si la température, le champ magnétique ou la quantité d'impuretés dans le semi-conducteur varient. Lorsque le champ magnétique varie suffisamment, la conductance de la couche change également, mais uniquement par paliers : en réduisant l'intensité du champ magnétique, la conductance électrique est d'abord exactement doublée, puis triplée, quadruplée, et ainsi de suite. Ces étapes avec des nombres entiers ne pouvaient pas être expliquées par la physique connue à l'époque, mais David Thouless a trouvé la solution à cette énigme en utilisant la topologie.

La solution par la topologie

La topologie décrit les propriétés qui restent intactes lorsqu'un objet est étiré, tordu ou déformé, mais sans être déchiré. D'un point de vue topologique, une sphère et un bol appartiennent à la même catégorie, car un morceau d'argile sphérique peut être transformé en bol. Par contre, un gâteau avec un trou au milieu et une tasse à café avec un trou dans l'anse appartiennent à une autre catégorie. Ils peuvent également être remodelés pour prendre la forme l'un de l'autre. Les objets topologiques peuvent donc contenir un trou, ou deux, ou trois, ou quatre... Mais ce nombre doit être un entier. Cela s'est avéré utile pour décrire la conductance électrique trouvée dans l'effet Hall quantique, qui ne change que par des sauts qui sont des multiples d'un nombre entier (fig. 91).

Dans l'effet Hall quantique, les électrons se déplacent relativement librement dans la couche entre les semi-conducteurs et forment ce que l'on appelle un fluide quantique topologique. De la même manière que de nouvelles propriétés apparaissent souvent lorsque plusieurs particules se rencontrent, les électrons du fluide quantique topologique présentent également des caractéristiques surprenantes. Tout comme il est impossible de déterminer s'il y a un trou dans une tasse à café en n'en observant qu'une petite partie, il est impossible de déterminer si des électrons ont formé un fluide quantique topologique si l'on n'observe que ce qui arrive à certains d'entre eux. En revanche, la conductance décrit le mouvement collectif des électrons et, du fait de la topologie, elle varie par paliers. Elle est quantifiée. Une autre caractéristique du fluide quantique topologique est que ses frontières ont des propriétés inhabituelles. Celles-ci ont été prédites par la théorie et ont été confirmées expérimentalement par la suite.

Une autre étape importante a été franchie en 1988, lorsque Duncan

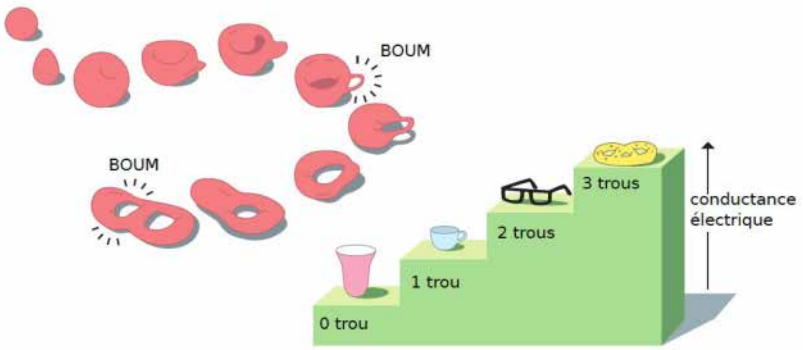


FIG. 91 – La topologie. *Cette branche des mathématiques s'intéresse aux propriétés qui changent par paliers, comme le nombre de trous dans les objets ci-dessus. La topologie a été la clé des découvertes des lauréats du prix Nobel. Elle explique pourquoi la conductivité électrique à l'intérieur de couches minces change par pas entiers.*

Haldane a découvert que les fluides quantiques topologiques, comme celui de l'effet Hall quantique, peuvent se former dans de minces couches de semi-conducteurs, même en l'absence de champ magnétique. Il a déclaré qu'il n'avait jamais imaginé que son modèle théorique puisse être réalisé expérimentalement, mais pas plus tard qu'en 2014, ce modèle a été validé lors d'une expérience utilisant des atomes refroidis à un niveau proche du zéro absolu.

Nouveaux matériaux topologiques en préparation

Dans des travaux beaucoup plus anciens, datant de 1982, Duncan Haldane a fait une prédiction qui a étonné même les experts du domaine. Lors d'études théoriques sur les chaînes d'atomes magnétiques présentes dans certains matériaux, il a découvert que les chaînes avaient des propriétés fondamentalement différentes en fonction de la nature des aimants atomiques. En physique quantique, il existe deux types d'aimants atomiques, pairs et impairs. Haldane a démontré qu'une chaîne formée d'aimants pairs est topologique, alors qu'une chaîne d'aimants impairs ne l'est pas. Comme pour le fluide quantique topologique, il n'est pas possible de déterminer si une chaîne atomique est topologique ou non en examinant simplement une petite partie de celle-ci.

Comme dans le cas du fluide quantique, les propriétés topologiques se révèlent sur les bords. Dans ce cas, c'est aux extrémités de la chaîne, car la propriété quantique connue sous le nom de *spin* vaut 1/2 aux extrémités d'une chaîne topologique.

Au départ, personne n'a cru au raisonnement de Haldane sur les chaînes atomiques. Les chercheurs étaient convaincus qu'ils les comprenaient déjà parfaitement. Mais il s'est avéré que Haldane avait découvert le premier exemple d'un nouveau type de matériau topologique, qui constitue aujourd'hui un domaine de recherche très actif en physique de la matière condensée.

Ce nouveau groupe d'états topologiques comprend aussi bien des fluides de Hall quantiques que des chaînes atomiques magnétiques. Plus tard, les chercheurs ont découvert plusieurs autres états topologiques inattendus de la matière, non seulement dans les chaînes et les couches minces, mais aussi dans les matériaux tridimensionnels ordinaires.

On parle désormais d'isolants topologiques, de supraconducteurs topologiques et de métaux topologiques. Ce sont des exemples de domaines qui, au cours de la dernière décennie, ont défini la recherche de pointe en physique de la matière condensée, notamment parce que l'on espère que les matériaux topologiques seront utiles pour les nouvelles générations d'électronique et de supraconducteurs, ou dans les futurs ordinateurs quantiques. La recherche actuelle révèle maintenant les secrets de la matière dans les mondes plats exotiques découverts par les lauréats du prix Nobel 2016.

Les lauréats

Les lauréats :

— David J. Thouless, né en 1934 à Bearsden au Royaume-Uni, docteur en 1958 de l'université Cornell aux États-Unis, professeur émérite à l'université de Washington à Seattle ;

— F. Duncan M. Haldane, né en 1951 à Londres, docteur en 1978 de l'université de Cambridge, professeur de physique à l'université de Princeton ;

— J. Michael Kosterlitz, né en 1942 à Aberdeen au Royaume-Uni, docteur en 1969 de l'université d'Oxford, professeur de physique à l'université Brown aux États-Unis.

Les ondes gravitationnelles

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2017

> « pour des contributions décisives au détecteur LIGO et à l'observation des ondes gravitationnelles ».

Une moitié du prix revient à Rainer Weiss (collaboration LIGO/VIRGO). L'autre moitié revient conjointement à Barry C. Barish et à Kip S. Thorne (collaboration LIGO/VIRGO).

Le 14 septembre 2015, les détecteurs LIGO aux États-Unis ont vu l'espace vibrer d'ondes gravitationnelles pour la toute première fois. Bien que le signal ait été extrêmement faible lorsqu'il a atteint la Terre, il promet déjà une révolution dans le domaine de l'astrophysique. Les ondes gravitationnelles sont une toute nouvelle façon de suivre les événements les plus violents de l'espace et de tester les limites de nos connaissances.

Les ondes gravitationnelles observées ont été créées lors d'une collision féroce entre deux trous noirs, il y a plus d'un milliard d'années. Albert Einstein avait encore raison. Un siècle s'est écoulé depuis que les ondes gravitationnelles ont été prédites par sa théorie de la relativité générale, mais il a toujours douté qu'elles puissent un jour être détectées.

FIG. 92 – *La première onde gravitationnelle jamais détectée.*

LIGO, l'observatoire d'ondes gravitationnelles par interféromètrie laser, est un projet collaboratif auquel participent plus d'un millier de chercheurs de plus de vingt pays. Ensemble, ils ont concrétisé une vision vieille de près de cinquante ans. Les lauréats du prix Nobel 2017 ont par leur enthousiasme et leur détermination joué un rôle inestimable dans la réussite de LIGO. Les pionniers Rainer Weiss et Kip S. Thorne, ainsi que Barry C. Barish, le scientifique en chef qui a mené le projet à son terme, ont fait en sorte que plus de quatre décennies d'efforts aboutissent enfin à l'observation des ondes gravitationnelles.

Des rumeurs ont commencé à circuler environ cinq mois avant que le groupe de recherche international n'ait fini d'affiner ses calculs, mais ils n'ont osé annoncer leurs résultats que le 11 février 2016. Les chercheurs de LIGO ont établi plusieurs records avec leur toute première découverte. Outre la première observation d'ondes gravitationnelles, l'ensemble des événements a constitué la première indication que l'espace contient des trous noirs de taille moyenne, de 30 à 60 masses solaires, et qu'ils peuvent fusionner. Pendant un court instant, le rayonnement gravitationnel des trous noirs en collision a été plusieurs fois plus puissant que la lumière collectée de toutes les étoiles de l'Univers visible.

L'espace-temps vibre

Il faisait complètement noir. Mais tout n'était pas complètement immobile. Les secousses provoquées par la collision de deux trous noirs ont ébranlé tout l'espace-temps. Comme les ondulations d'un caillou jeté dans l'eau, les ondes gravitationnelles de l'impact se sont propagées dans le cosmos. Il a fallu du temps pour qu'elles nous parviennent. Bien qu'elles se déplacent à la vitesse de la lumière, la plus rapide possible, il a fallu plus d'un milliard d'années pour que ces ondes arrivent sur Terre. Le 14 septembre 2015, à 11 h 51 (heure normale d'Europe centrale), une légère oscillation de la lumière dans les deux laboratoires américains LIGO a révélé le drame qui s'est déroulé il y a très longtemps, à 1,3 milliard d'années-lumière de la Terre.

LIGO n'est pas un télescope ordinaire destiné à détecter la lumière et d'autres rayonnements électromagnétiques provenant de l'espace. Il s'agit d'un instrument permettant d'écouter les ondes gravitationnelles de l'espace. Même si les ondes gravitationnelles sont des secousses de l'espace-temps lui-même et non des ondes sonores, leur fréquence est équivalente à celles que nous pouvons entendre avec nos oreilles

humaines.

Depuis des décennies, les physiciens tentent de détecter ces ondes gravitationnelles qui secouent l'Univers, telles qu'Albert Einstein les a décrites il y a cent ans. Il a expliqué que l'espace et le temps sont malléables et que l'espace-temps à quatre dimensions vibre avec des ondes gravitationnelles qui sont créées lorsqu'une masse accélère, comme lorsqu'un patineur sur glace fait une pirouette, qu'une étoile explose dans une galaxie lointaine ou qu'une paire de trous noirs tournent l'un autour de l'autre.

Comme les ondes gravitationnelles, les trous noirs sont également décrits par la théorie de la relativité générale d'Einstein de 1915. Pendant plus de cinquante ans, la plupart des chercheurs sont restés convaincus que les trous noirs n'existaient qu'en tant que solutions aux équations d'Einstein et qu'ils ne se trouvaient pas réellement dans l'espace. La théorie de la relativité explique la gravité comme une courbure de l'espace-temps. Lorsque la gravité est extrêmement forte, la courbure peut devenir si importante qu'un trou noir se forme. Les trous noirs sont les objets les plus étranges de l'espace-temps : rien ne peut leur échapper, pas même la lumière. Ils sont donc une source constante de mystère en physique.

Les ondes gravitationnelles apportent l'espoir d'observer quelque chose d'inimaginable, mais il a longtemps été difficile de savoir si les mystères de l'espace-temps seraient un jour résolus. Pendant de nombreuses années, Albert Einstein est resté convaincu qu'il ne serait jamais possible de mesurer les ondes gravitationnelles. Il n'était pas certain que les ondes fussent réelles ou simplement une illusion mathématique. Son collègue et contemporain Arthur Eddington était encore plus sceptique et soulignait que les ondes gravitationnelles semblaient « se propager à la vitesse de la pensée ».

L'existence des ondes gravitationnelles a été mieux acceptée vers la fin des années 1950, lorsque de nouveaux calculs ont démontré qu'elles transportaient effectivement de l'énergie et devaient donc, en principe, être mesurables. Une preuve indirecte a été apportée dans les années 1970, lorsque les astronomes américains Joseph Taylor et Russell Hulse ont observé, à l'aide d'un grand radiotélescope, une paire d'étoiles extrêmement denses, un pulsar double. Ils ont pu montrer que les étoiles tournaient l'une autour de l'autre à une vitesse croissante, tout en perdant de l'énergie et en se rapprochant l'une de l'autre. La quantité d'énergie perdue correspondait aux calculs théoriques des ondes gravitationnelles. Joseph Taylor et Russell Hulse ont reçu le prix Nobel de

physique en 1993.

Cependant, pour obtenir des preuves directes de l'existence des ondes gravitationnelles, il fallait les observer directement. Mais l'espace-temps est rigide et il n'est pas facile de le secouer, de sorte que seuls les processus cosmiques les plus violents peuvent provoquer des ondes gravitationnelles suffisamment importantes pour être mesurées. Or leur amplitude est infime : les détecter revient à mesurer la distance d'une étoile située à dix années-lumière avec une précision équivalente au diamètre d'une mèche de cheveux. De plus, même si l'Univers entier vibre en permanence d'ondes gravitationnelles, les événements les plus explosifs se produisent rarement dans notre propre galaxie. Il faut aller chercher plus loin.

Des ondes gravitationnelles révèlent le passé

C'est désormais chose faite : LIGO a détecté des ondes gravitationnelles. Les deux trous noirs qui sont finalement entrés en collision avaient tourné en rond l'un autour de l'autre depuis leur création, au début de l'histoire de l'Univers. À chaque cycle, ils entraînaient l'espace-temps dans une spirale, une perturbation de l'espace-temps qui se propageait de plus en plus loin dans l'espace sous la forme d'ondes gravitationnelles.

Ces ondes ont emporté de l'énergie, ce qui a rapproché les trous noirs l'un de l'autre. Plus leur mouvement en spirale les rapprochait, plus les trous noirs tournaient rapidement et plus l'énergie était envoyée dans une danse accélérée qui s'est poursuivie pendant plusieurs millions d'années. À la toute fin, en une fraction de seconde, les horizons des trous noirs se sont touchés et les trous ont basculé vers leur fin fatidique à une vitesse proche de celle de la lumière. Lorsqu'ils ont fusionné, toutes les vibrations se sont éteintes, laissant derrière elles un seul trou noir en rotation, sans aucune trace visible de sa création spectaculaire.

Mais la mémoire de cette union n'est pas complètement perdue : son histoire demeure dans les ondulations de l'espace-temps. Les ondes gravitationnelles, qui étirent et compriment l'espace de façon rythmique, changent de tonalité à mesure que leur message se modifie. Si nous pouvions entendre toutes les ondes et pas seulement les plus fortes, l'Univers entier serait plein de musique, comme le chant des oiseaux dans une forêt, avec un ton plus fort ici et un ton plus faible là. Après des milliards d'années, alors que le duo de trous noirs accélère vers leur collision chaotique finale, il y a un crescendo avant que les tonalités ne

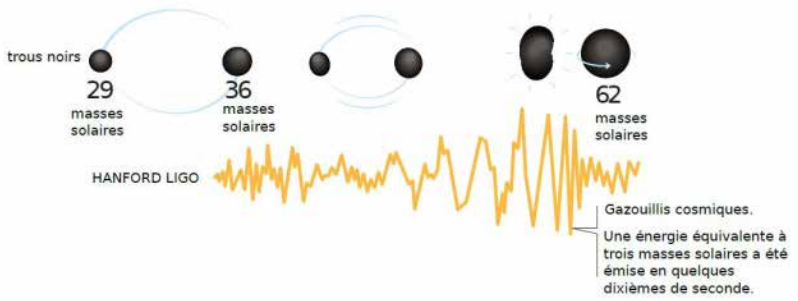


FIG. 93 – Des ondes gravitationnelles provenant de la collision de trous noirs. *Les deux trous noirs ont émis des ondes gravitationnelles pendant plusieurs millions d'années alors qu'ils tournaient l'un autour de l'autre. Ils se sont rapprochés de plus en plus, avant de fusionner pour devenir un seul trou noir en quelques dixièmes de seconde. Les ondes ont alors atteint un crescendo qui, pour nous sur Terre, à 1,3 milliard d'années-lumière de distance, ressemblait à des gazouillis cosmiques qui se sont arrêtés brusquement.*

s'estompent pour laisser place à un silence qui ne révèle rien.

Seuls les derniers gazouillis peuvent être entendus dans l'espace. Pourquoi sont-ils si silencieux ? Parce que leur source était très éloignée et que les ondes gravitationnelles, comme les ondes lumineuses, s'affaiblissent avec la distance. Ainsi, lorsque les ondes gravitationnelles arrivent ici, leur force a considérablement diminué. L'étirement du tissu de l'espace-temps que le détecteur LIGO a dû capter lorsque l'onde est passée devant la Terre était des milliers de fois plus petit qu'un noyau atomique.

LIGO, un gigantesque interféromètre

Le rêve existait depuis plus de cinquante ans et le chemin vers le succès a été long, sinueux et parfois difficile pour les nombreux chercheurs impliqués. L'un des premiers détecteurs d'ondes gravitationnelles ressemblait à un diapason, sensible aux ondes d'une fréquence particulière. Mais Joseph Weber, de l'université du Maryland près de Washington, ne pouvait que deviner la fréquence à laquelle les trous noirs chanteraient leur chant du cygne. Il a construit le tout premier détecteur dans les années 1960. Mais à l'époque, de nombreuses personnes doutaient

de l'existence même des ondes gravitationnelles et des trous noirs. C'est pourquoi Weber a fait sensation dans les années 1970 en affirmant avoir entendu ces tonalités. Cependant, personne n'a pu répéter les résultats de Weber et ses observations sont considérées comme de fausses alertes.

Au milieu des années 1970, malgré un scepticisme généralisé, Kip Thorne et Rainer Weiss étaient tous deux fermement convaincus qu'on pouvait détecter les ondes gravitationnelles et que cela entraînerait une révolution dans notre connaissance de l'Univers. Rainer Weiss avait déjà analysé les sources possibles de bruit de fond susceptibles de perturber les mesures. Il avait également conçu un détecteur, un interféromètre à laser, qui permettait de s'affranchir de ce bruit.

Alors que Rainer Weiss développait ses détecteurs à l'institut de technologie du Massachusetts, à Cambridge près de Boston, Kip Thorne commençait à travailler avec Ronald Drever, qui avait construit ses premiers prototypes à Glasgow en Écosse. Drever a fini par rejoindre Thorne à l'institut de technologie de Californie à Los Angeles. Ensemble, Weiss, Thorne et Drever ont formé un trio qui a été à la pointe du développement pendant de nombreuses années. Drever s'est finalement retrouvé en dehors de la voie principale du projet, mais il a pu assister à la première découverte avant de décéder chez lui en Écosse en mars 2017.

Au lieu du diapason de Weber, Weiss, Thorne et Drever ont mis au point un autre instrument, un interféromètre à laser. Le principe est connu depuis longtemps : un interféromètre se compose de deux bras qui forment un L. Au coin et aux extrémités du L, des miroirs massifs sont suspendus dans un dispositif sophistiqué. Une onde gravitationnelle qui passe affecte différemment les bras de l'interféromètre : lorsqu'un bras est comprimé, l'autre est étiré.

Un rayon laser qui rebondit entre les miroirs mesure le changement de longueur des bras. Si rien ne se produit, les faisceaux de lumière rebondissants du laser s'annulent lorsqu'ils se rencontrent au coin du L. Cependant, si l'un des bras de l'interféromètre change de longueur, la lumière parcourt des distances différentes, les ondes lumineuses perdent leur synchronisation et l'intensité de la lumière résultante change à l'endroit où les faisceaux se rencontrent.

L'idée était assez simple, mais le diable se cachait dans les détails. Il a fallu plus de quarante ans pour la réaliser. Des instruments à grande échelle sont nécessaires pour mesurer des changements microscopiques d'une longueur inférieure à celle du noyau d'un atome. Le projet consistait à construire deux interféromètres dotés chacun d'un bras de quatre

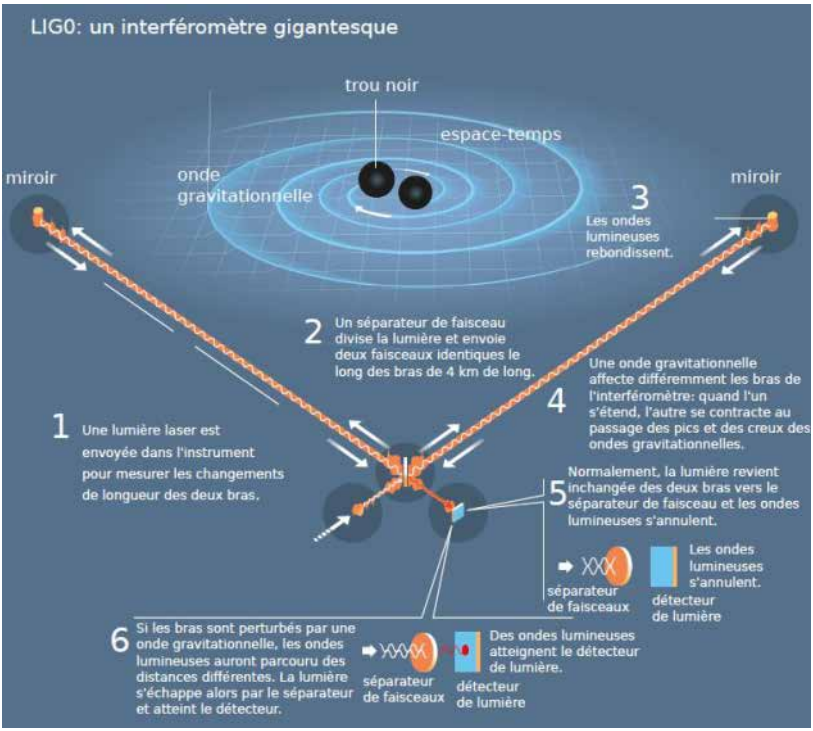


FIG. 94 – Comment détecter une onde gravitationnelle ? *Les premières ondes gravitationnelles détectées au monde ont été créées lors d'une violente collision entre deux trous noirs, à 1,3 milliard d'années-lumière. Lorsque ces ondes sont passées devant la Terre, 1,3 milliard d'années plus tard, elles s'étaient considérablement affaiblies : la perturbation de l'espace-temps mesurée par LIGO était des milliers de fois plus petite qu'un noyau atomique.*

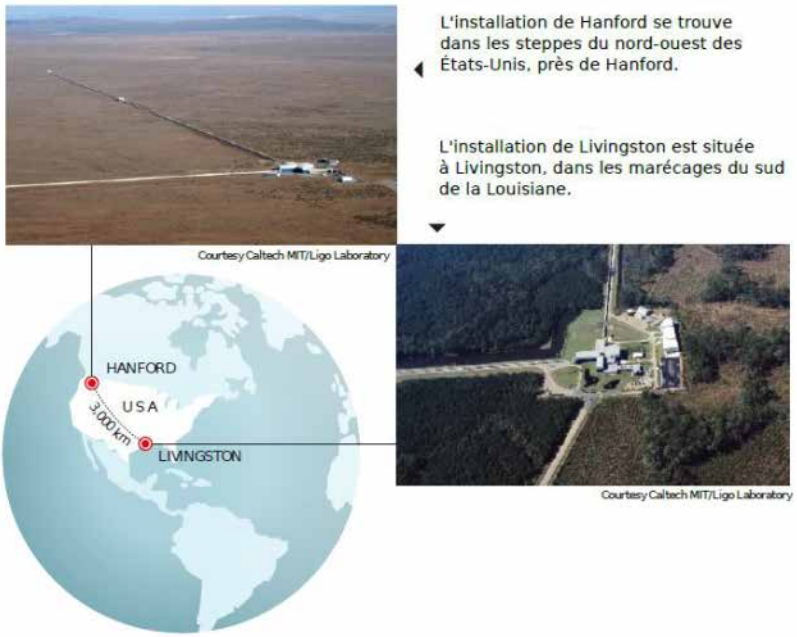


FIG. 95 – *LIGO est constitué de deux gigantesques interféromètres identiques. L'onde gravitationnelle a d'abord touché l'interféromètre de Livingston, puis son jumeau de Hanford, situé à un peu plus de 3 000 km de là, 7 millisecondes plus tard. Les signaux étaient presque identiques et correspondaient bien au signal prédit pour une onde gravitationnelle. Les signaux ont également permis d'identifier la zone du ciel d'où provenaient les ondes.*

kilomètres de long, le long duquel le faisceau laser rebondit plusieurs fois, prolongeant ainsi le trajet de la lumière et augmentant les chances de détecter de minuscules étirements de l'espace-temps. LIGO est situé dans les steppes du Nord-Ouest des États-Unis, près de Hanford dans l'État de Washington, avec une installation jumelle à trois mille kilomètres au sud, dans les marécages de Livingston en Louisiane.

Il a fallu des années pour mettre au point l'instrument le plus sensible jamais conçu pour distinguer les ondes gravitationnelles de tout le bruit de fond. Cela a nécessité une analyse sophistiquée et une théorie avancée dont Kip Thorne était l'expert. Mais les plus hauts niveaux d'ingénierie créative sont nécessaires pour construire de pareils instruments. Cela a été la contribution de Rainer Weiss. La longueur d'onde et l'intensité de la lumière laser doivent être aussi stables que possible et le faisceau doit toucher les miroirs suspendus avec précision. Ceux-ci ne doivent pratiquement pas trembler, même lorsque des feuilles tombent des arbres voisins, qu'un enfant court ou qu'un camion passe sur une route éloignée. En même temps, ces miroirs suspendus doivent être libres de se balancer au passage des ondes gravitationnelles. Le mouvement thermique des atomes à la surface des miroirs doit être compensé, de même que les effets quantiques dans le laser. Il a fallu développer une nouvelle technologie laser, inventer de nouveaux matériaux, construire de gigantesques tubes à vide, isoler les ondes sismiques et mettre en œuvre d'autres technologies vitales bien au-delà de ce qui avait été réalisé jusque-là.

Il n'était plus possible de mener un pareil projet à petite échelle et une nouvelle approche s'imposait. En 1994, lorsque Barry Barish a pris la direction de LIGO, il a transformé le petit groupe de recherche d'environ 40 personnes en une collaboration internationale à grande échelle avec plus d'un millier de participants. Il a recherché l'expertise nécessaire et a fait appel à de nombreux groupes de recherche de plusieurs pays. Le rêve impossible ne pouvait devenir réalité que grâce aux efforts de collaboration de la mégascience.

Le signal est arrivé immédiatement

En septembre 2015, LIGO était sur le point de redémarrer après une mise à niveau qui avait duré plusieurs années. Désormais équipé de lasers dix fois plus puissants, de miroirs pesant 40 kilos, d'un filtrage du bruit très avancé et de l'un des plus grands systèmes de vide au monde, il a détecté le signal d'une onde quelques jours avant le début officiel

de l'expérience. L'onde a d'abord traversé l'installation de Livingston. Puis 7 millisecondes plus tard, se déplaçant à la vitesse de la lumière, elle est apparue à Hanford, à trois mille kilomètres de là.

Un message du système informatique a été envoyé tôt le matin du 14 septembre 2015. Aux États-Unis, tout le monde dormait. Mais à Hanovre, en Allemagne, il était 11 h 51 et Marco Drago, un jeune physicien à l'institut Max-Planck de physique gravitationnelle, se préparait à déjeuner. Les courbes qu'il aperçut ressemblaient exactement à celles qu'il s'était entraîné à reconnaître tant de fois. Serait-il vraiment la première personne au monde à voir des ondes gravitationnelles ? Ou n'était-ce qu'une fausse alerte, l'un de ces tests à l'aveugle occasionnels dont seules quelques personnes étaient au courant ?

La forme de l'onde correspondait exactement à ce qui avait été prédit et il ne s'agissait pas d'un test. Tout concordait parfaitement. Les pionniers, alors octogénaires, et leurs collègues de LIGO ont enfin pu entendre la musique de leurs rêves, comme un *glissando* ou un oiseau solitaire qui chante sa chanson. C'était presque trop beau pour être vrai. Mais ce n'est qu'en février de l'année suivante qu'ils ont été autorisés à révéler la nouvelle à tout le monde, même à leur famille.

Le secret bien gardé, appelé GW 150914, a répondu à toutes leurs attentes. Grâce au signal, les chercheurs ont pu déterminer que les trous noirs étaient respectivement 29 et 36 fois plus lourds que le Soleil, mais qu'ils ne dépassaient pas 200 kilomètres de diamètre. Ils ont fusionné pour former un trou noir d'environ 62 masses solaires, de sorte que pendant quelques dixièmes de seconde, ils ont pu émettre de l'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles qui équivalaient à trois masses solaires. GW 150914 est ainsi devenu l'objet rayonnant le plus puissant de l'Univers pendant ce court instant. Le signal indiquait également la zone du ciel austral où l'événement violent s'était produit, à 1,3 milliard d'années-lumière. Cela signifiait que la collision s'était produite il y a 1,3 milliard d'années, au moment où la vie sur Terre passait du stade d'organisme unicellulaire à celui d'organisme multicellulaire.

LIGO a observé deux autres événements similaires depuis la première découverte. L'installation européenne sœur, VIRGO, située près de Pise en Italie, a rejoint LIGO en août 2017 et a annoncé sa première découverte collaborative le 27 septembre. Les trois détecteurs ont observé les mêmes ondes gravitationnelles cosmiques le 14 août 2017. Elles provenaient de deux trous noirs de taille moyenne qui sont entrés en collision il y a 1,8 milliard d'années.

Les détecteurs ont maintenant vu l'Univers trembler quatre fois et

de nombreuses autres découvertes sont attendues. L'Inde et le Japon construisent également de nouveaux observatoires d'ondes gravitationnelles. Grâce à plusieurs expériences éloignées les unes des autres, les chercheurs devraient être en mesure d'identifier avec précision l'origine des signaux. Les observations des ondes gravitationnelles peuvent ensuite être suivies par des études utilisant des télescopes optiques, des télescopes à rayons X ou d'autres types de télescopes.

Jusqu'à présent, toutes sortes de rayonnements électromagnétiques et de particules, comme les rayons cosmiques ou les neutrinos, nous ont permis d'acquérir des connaissances sur l'Univers. Les ondes gravitationnelles, quant à elles, témoignent directement des perturbations de l'espace-temps lui-même. C'est quelque chose de complètement nouveau et différent, qui nous ouvre des mondes inconnus. De nombreuses découvertes attendent ceux qui parviendront à détecter les ondes gravitationnelles et à interpréter leur message.

Les lauréats

— Rainer Weiss, né en 1932 à Berlin, docteur en 1962 de l'institut de technologie du Massachusetts, professeur de physique dans ce même institut ;
— Barry C. Barish, né en 1936 à Omaha dans le Nebraska, docteur en 1962 de l'université de Californie à Berkeley, professeur de physique à l'institut de technologie de Californie à Pasadena ;
— Kip S. Thorne, né en 1940 à Logan dans l'Utah, docteur en 1965 de l'université de Princeton, professeur de physique théorique à l'institut de technologie de Californie à Pasadena.

Des outils faits de lumière

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé de décerner le prix Nobel de physique 2018

> « pour des inventions révolutionnaires dans le domaine de la physique des lasers ».

Une moitié revient à Arthur Ashkin, des laboratoires Bell à Holmdel aux États-Unis,

> « pour les pinces optiques et leur application aux systèmes biologiques ».

L'autre moitié revient conjointement à Gérard Mourou, de l'École Polytechnique à Palaiseau et de l'université du Michigan à Ann Arbor, et à Donna Strickland, de l'université de Waterloo au Canada,

> « pour leur méthode de production d'impulsions lumineuses ultra-brèves et de forte intensité ».

Les inventions récompensées en 2018 ont révolutionné la physique des lasers. Des objets extrêmement petits et des processus incroyablement rapides apparaissent désormais sous un jour nouveau. La physique, mais aussi la chimie, la biologie et la médecine ont bénéficié d'instruments de précision pour la recherche fondamentale et les applications pratiques.

Arthur Ashkin a inventé des pinces optiques qui saisissent les particules, les atomes et les molécules avec leurs doigts à rayon laser. Les virus, les bactéries et les autres cellules vivantes peuvent également être saisis, examinés et manipulés sans être endommagés. Les pinces optiques d'Ashkin ont créé de toutes nouvelles possibilités d'observation et de contrôle des mécanismes de la vie.

Gérard Mourou et Donna Strickland ont ouvert la voie aux impulsions laser les plus courtes et les plus intenses créées par l'homme. La technique qu'ils ont mise au point a ouvert de nouveaux domaines de recherche et a débouché sur de vastes applications industrielles et médicales. Par exemple, des millions d'opérations de l'œil sont réalisées chaque année à l'aide des faisceaux laser les plus concentrés.

Voyager dans des faisceaux de lumière

Arthur Ashkin a fait un rêve. Il a imaginé qu'il pouvait utiliser des faisceaux de lumière pour déplacer des objets. Dans la série culte *Star Trek*, qui date du milieu des années 1960, un rayon tracteur permet de récupérer dans l'espace des objets, voire des astéroïdes, sans les toucher. Ce n'est bien sûr que de la science-fiction. Nous pouvons sentir que les rayons du soleil transportent de l'énergie — nous avons chaud au soleil — mais la pression exercée par le rayon est trop faible pour que nous puissions ressentir ne serait-ce qu'une légère secousse. Mais sa force pourrait-elle être suffisante pour pousser des particules et des atomes extrêmement minuscules ?

Immédiatement après l'invention du premier laser en 1960, Ashkin a commencé à essayer ce nouvel instrument aux laboratoires Bell, près de New York. Dans un laser, les ondes lumineuses se déplacent de manière cohérente, contrairement à la lumière blanche ordinaire dans laquelle les faisceaux sont mélangés dans toutes les couleurs de l'arc-en-ciel et dispersés dans toutes les directions.

Ashkin a compris qu'un laser serait l'outil idéal pour faire bouger de petites particules à l'aide de faisceaux lumineux. Il a éclairé des sphères transparentes de la taille d'un micromètre. Comme on pouvait s'y attendre, les sphères se sont immédiatement mises à bouger. En même temps, Ashkin a été surpris de constater que les sphères étaient attirées vers le milieu du faisceau, là où il était le plus intense. L'explication est la suivante : quelle que soit la netteté d'un faisceau laser, son intensité diminue du centre vers les côtés. Par conséquent, la pression de radiation que la lumière laser exerce sur les particules varie également. Elle les pousse vers le milieu du faisceau et les y maintient.

Pour maintenir également les particules dans la direction du faisceau, Ashkin a ajouté une lentille puissante pour focaliser la lumière laser. Les particules sont alors attirées vers le point où l'intensité lumineuse est la plus forte. Un piège à lumière était né, connu sous le nom de « pince optique ».

Des bactéries vivantes capturées par la lumière

Après plusieurs années et de nombreux échecs, des atomes individuels ont pu être pris dans le piège. Les difficultés étaient nombreuses. D'une part, des forces plus importantes étaient nécessaires pour que les pinces optiques puissent saisir les atomes. D'autre part, il y avait

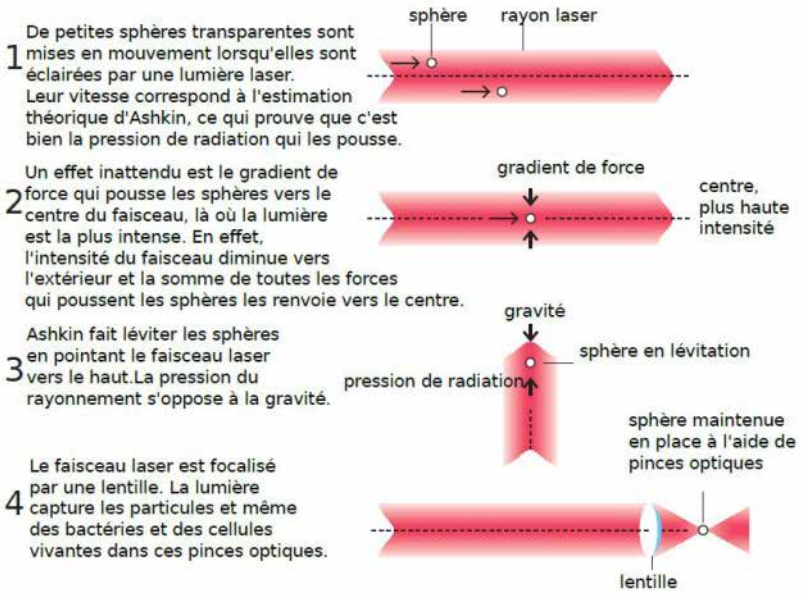


FIG. 96 – *Ashkin crée un piège lumineux connu sous le nom de « pince optique ».*

les vibrations thermiques des atomes. Il fallait trouver un moyen de ralentir les atomes et de les entasser dans une zone plus petite que le point à la fin de cette phrase. Tout s'est mis en place en 1986, lorsque les pinces optiques ont pu être combinées à d'autres méthodes pour arrêter les atomes et les piéger.

Alors que le ralentissement des atomes devenait un domaine de recherche en soi, Arthur Ashkin a découvert une toute nouvelle utilisation pour ses pinces optiques : l'étude des systèmes biologiques. C'est le hasard qui l'a conduit là. Pour tenter de capturer des particules de plus en plus petites, il a utilisé des échantillons de petits virus de mosaïques. Après les avoir laissés ouverts pendant la nuit, il s'est aperçu que les échantillons étaient remplis de grosses particules qui se déplaçaient d'un côté à l'autre. À l'aide d'un microscope, il a découvert que ces particules étaient des bactéries qui ne se contentaient pas de nager librement : lorsqu'elles s'approchaient du faisceau laser, elles étaient prises dans le piège lumineux. Cependant, son faisceau laser vert

tuait les bactéries. Un faisceau plus faible était nécessaire pour leur permettre de survivre. Dans la lumière infrarouge invisible, les bactéries sont restées indemnes et ont pu se multiplier dans le piège.

Par la suite, les études d'Ashkin se sont concentrées sur de nombreuses bactéries, sur des virus et sur d'autres cellules vivantes. Il a même démontré qu'il était possible de pénétrer dans les cellules sans détruire la membrane cellulaire. Avec ses pinces optiques, Ashkin a ouvert la voie à toute une série de nouvelles applications. Une avancée importante a été la possibilité d'étudier les propriétés mécaniques des moteurs moléculaires, de grosses molécules qui effectuent un travail vital à l'intérieur des cellules. La première à avoir été étudiée en détail à l'aide de pinces optiques a été une protéine motrice, la kinésine. On a pu analyser son mouvement progressif le long des microtubules, qui font partie du squelette de la cellule.

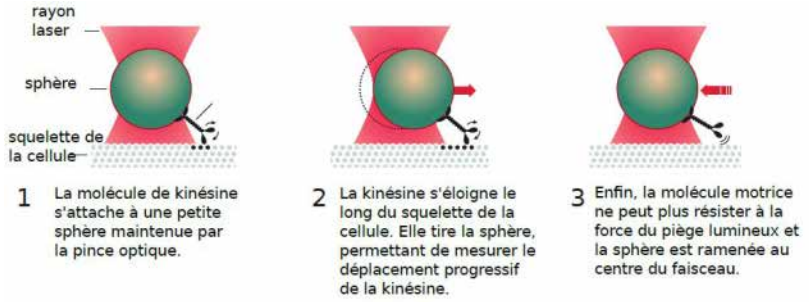


FIG. 97 – Un moteur moléculaire entre dans le piège à lumière. *Les pinces optiques cartographient le moteur moléculaire de la kinésine lorsqu'il se déplace le long du squelette de la cellule.*

De la science-fiction aux applications pratiques

Au cours des dernières années, de nombreux autres chercheurs se sont inspirés des méthodes d'Ashkin et les ont affinées. Le développement d'innombrables applications est aujourd'hui stimulé par les pinces optiques qui permettent d'observer, de tourner, de couper, de pousser et de tirer sans toucher les objets étudiés. Dans de nombreux laboratoires, les pinces laser sont donc un équipement standard pour l'étude des processus biologiques, des protéines, des moteurs moléculaires, de l'ADN ou de la vie interne des cellules. L'holographie optique fait par-

tie des développements les plus récents : des milliers de pinces peuvent être utilisées simultanément, par exemple pour séparer les cellules sanguines saines des cellules infectées, ce qui pourrait être appliqué dans la lutte contre le paludisme.

Arthur Ashkin ne cesse de s'étonner du développement de ses pinces optiques, une idée de science-fiction qui est aujourd'hui notre réalité. La deuxième partie du prix de 2018, l'invention d'impulsions laser ultra-brèves et très puissantes, a également fait partie des rêves des chercheurs.

Une nouvelle technologie pour les faisceaux ultra-brefs de haute intensité

L'inspiration est venue d'un article de vulgarisation scientifique qui décrivait le radar et ses longues ondes radio. Il était toutefois difficile de transposer cette idée aux ondes optiques plus courtes, tant en théorie qu'en pratique. La percée est décrite dans l'article publié en décembre 1985, qui constitue la première publication scientifique de Donna Strickland. Elle avait quitté le Canada pour s'installer à l'université de Rochester aux États-Unis, où elle a été attirée par la physique des lasers grâce aux faisceaux verts et rouges qui illuminaient le laboratoire comme un arbre de Noël et surtout grâce aux visions de son directeur de thèse, Gérard Mourou. L'une de ces visions s'est maintenant concrétisée : l'idée d'amplifier de brèves impulsions laser à des niveaux sans précédent.

La lumière laser est créée par une réaction en chaîne dans laquelle les particules de lumière, les photons, produisent encore plus de photons. Ceux-ci peuvent être émis sous forme d'impulsions. Depuis l'invention des lasers, il y a près de 60 ans, les chercheurs se sont efforcés de créer des impulsions plus intenses. Cependant, au milieu des années 1980, on est arrivé au bout du chemin. Pour les impulsions brèves, il n'était pratiquement plus possible d'augmenter l'intensité de la lumière sans détruire le matériau amplificateur.

La nouvelle technique de Strickland et Mourou, connue sous le nom d'amplification à dérive de fréquence (en anglais CPA), est à la fois simple et élégante. Il s'agit de prendre une brève impulsion laser, de l'étirer dans le temps, de l'amplifier et de la comprimer à nouveau. Lorsqu'une impulsion est étirée dans le temps, sa puissance de crête est beaucoup plus faible, de sorte qu'elle peut être fortement amplifiée sans endommager l'amplificateur. L'impulsion est ensuite comprimée dans

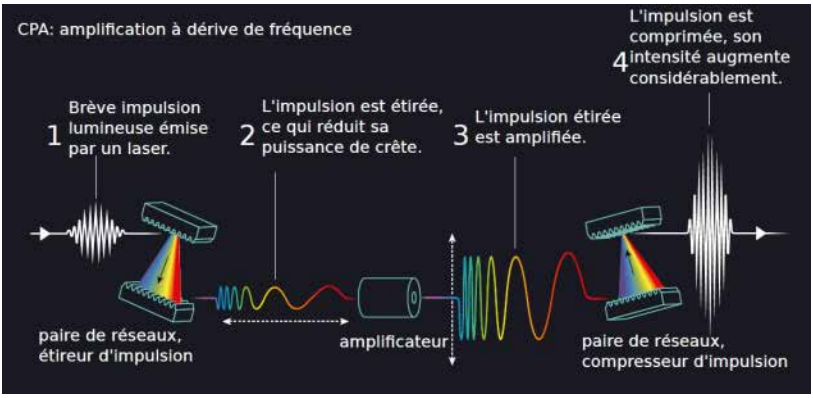


FIG. 98 – L'amplification à dérive de fréquence. *Cette technique a révolutionné la technologie des lasers. Elle a permis l'émission d'impulsions lumineuses très intenses et très brèves en utilisant une méthode complexe pour éviter le risque de destruction du matériau amplificateur. Au lieu d'amplifier directement l'impulsion lumineuse, on l'étire d'abord dans le temps, ce qui réduit sa puissance de crête. L'impulsion est ensuite amplifiée. Lorsqu'elle est comprimée, davantage de lumière est recueillie au même endroit : l'impulsion lumineuse devient extrêmement intense.*

le temps, ce qui signifie qu'une plus grande quantité de lumière est concentrée dans un espace minuscule. L'intensité de l'impulsion augmente alors de façon spectaculaire.

Il a fallu quelques années à Strickland et à Mourou pour réussir à tout combiner. Comme d'habitude, une multitude de détails pratiques et conceptuels ont posé des difficultés. Par exemple, l'impulsion devait être étirée à l'aide d'un câble en fibre optique de 2,5 km de long nouvellement acquis. Mais aucune lumière n'en sortait : le câble s'était rompu quelque part au milieu. Après bien des péripéties, il a fallu se contenter de 1,4 km. L'un des principaux défis consistait à synchroniser les différentes étapes de l'équipement, c'est-à-dire à faire en sorte que l'étireur de faisceau soit en phase avec le compresseur. Ce problème a également été résolu. En 1985, Strickland et Mourou ont pu démontrer pour la première fois que leurs idées nouvelles fonctionnaient également dans la pratique.

La technique d'amplification à dérive de fréquence inventée par Stri-

ckland et Mourou a révolutionné la physique des lasers. Elle est devenue la norme pour tous les lasers à haute intensité ultérieurs et une porte d'entrée vers des domaines et des applications entièrement nouveaux en physique, en chimie et en médecine. Les impulsions laser les plus brèves et les plus intenses jamais produites pouvaient désormais être créées en laboratoire.

L'appareil photo le plus rapide du monde

Comment ces impulsions ultra-brèves et intenses sont-elles utilisées ? L'un des premiers domaines d'utilisation a été l'éclairage rapide de ce qui se passe entre les molécules et les atomes dans le monde microscopique en constante évolution. Les choses se produisent rapidement, si rapidement que pendant longtemps, il n'était possible de décrire que l'avant et l'après. Mais avec des impulsions aussi brèves qu'une femtoseconde, soit un millionième de milliardième de seconde, il est possible de voir des événements qui semblaient auparavant instantanés.

L'intensité extrêmement élevée d'un laser fait également de sa lumière un outil permettant de modifier les propriétés de la matière : les isolants électriques peuvent être transformés en conducteurs et les faisceaux laser très fins permettent de découper ou de percer des trous dans divers matériaux avec une extrême précision, y compris dans la matière vivante.

Par exemple, les lasers peuvent être utilisés pour créer un stockage de données plus efficace, car le stockage n'est pas seulement construit à la surface du matériau, mais aussi dans de minuscules trous percés profondément dans le support de stockage. La technologie est également utilisée pour fabriquer des endoprothèses chirurgicales, des cylindres micrométriques de métal étiré qui élargissent et renforcent les vaisseaux sanguins, les voies urinaires et d'autres passages à l'intérieur du corps.

Il existe d'innombrables domaines d'utilisation qui n'ont pas encore été pleinement explorés. Chaque pas en avant permet aux chercheurs de découvrir de nouveaux mondes, modifiant à la fois la recherche fondamentale et les applications pratiques.

L'un des nouveaux domaines de recherche apparus ces dernières années est la physique de l'attoseconde. Les impulsions laser d'une durée inférieure à cent attosecondes (une attoseconde correspond à un milliardième de milliardième de seconde) révèlent le monde spectaculaire des électrons. Les électrons sont les bêtes de somme de la chimie. Ils sont responsables des propriétés optiques et électriques de toute la

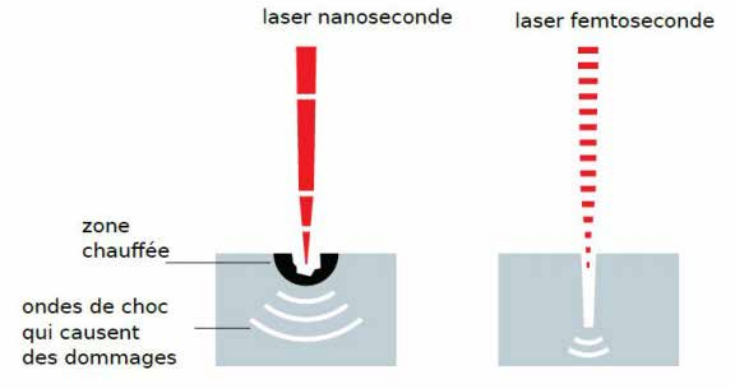


FIG. 99 – *Les impulsions brèves d'un laser femtoseconde (à droite) endommagent moins le matériau que les impulsions un million de fois plus longues d'un laser nanoseconde (à gauche). Les impulsions laser ultra-brèves et intenses sont utilisées en chirurgie oculaire, pour le stockage de données et pour la fabrication d'endoprothèses médicales pour les opérations dans les vaisseaux du corps.*

matière et des liaisons chimiques. Aujourd'hui, ils sont non seulement observables, mais aussi contrôlables.

Vers une lumière encore plus extrême

De nombreuses applications de ces nouvelles techniques laser sont à l'horizon : électronique plus rapide, cellules photovoltaïques plus efficaces, meilleurs catalyseurs, accélérateurs plus puissants, nouvelles sources d'énergie ou produits pharmaceutiques de synthèse. Il n'est donc pas étonnant que la concurrence soit rude dans le domaine de la physique des lasers.

Donna Strickland poursuit désormais sa carrière de chercheuse au Canada, tandis que Gérard Mourou, qui est rentré en France, participe à une initiative paneuropéenne dans le domaine de la technologie des lasers, entre autres projets. Il a initié et dirigé les premiers développements du programme *Extreme Light Infrastructure*. Trois sites en République tchèque, en Hongrie et en Roumanie seront achevés dans quelques années. La puissance de pointe prévue est de 10 pétawatts, ce qui équivaut à un flash incroyablement court de cent mille milliards

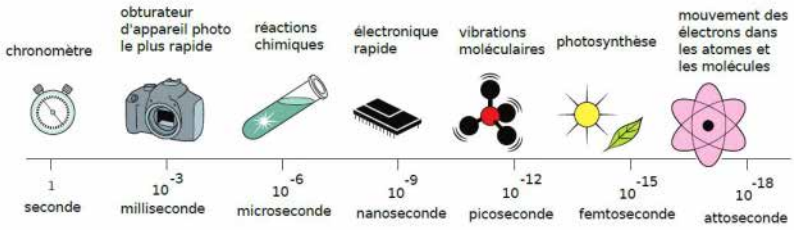


FIG. 100 – *Plus les impulsions lumineuses sont brèves, plus les mouvements observés sont rapides. Les impulsions laser, d'une brièveté presque inconcevable, sont aussi rapides que quelques femtosecondes et peuvent même être mille fois plus rapides, soit quelques attosecondes. Il est ainsi possible de filmer des séquences d'événements que l'on ne pouvait autrefois que deviner : le mouvement des électrons autour d'un noyau atomique peut désormais être observé à l'aide d'une caméra attoseconde.*

d'ampoules électriques.

Ces sites seront spécialisés dans différents domaines : la recherche sur l'attoseconde en Hongrie, la physique nucléaire en Roumanie et les faisceaux de particules à haute énergie en République tchèque. De nouvelles installations encore plus puissantes sont prévues en Chine, au Japon, aux États-Unis et en Russie.

On spécule déjà sur la prochaine étape : une puissance décuplée pour atteindre 100 pétawatts. Les visions d'avenir de la technologie laser ne s'arrêtent pas là. Pourquoi pas la puissance d'un zettawatt (un million de pétawatts, 10^{21} watts) ou des impulsions allant jusqu'à la zeptoseconde, soit une infime durée presque inconcevable de 10^{-21} seconde ? De nouveaux horizons s'ouvrent, de l'étude de la physique quantique dans le vide à la production de faisceaux de protons intenses permettant d'éradiquer les cellules cancéreuses dans l'organisme. Cependant, les inventions récompensées nous permettent déjà de fouiller le monde microscopique dans le meilleur esprit d'Alfred Nobel et pour le plus grand bénéfice de l'humanité.

Les lauréats

— Arthur Ashkin, né en 1922 à New York, docteur en 1952 de l'université Cornell ;

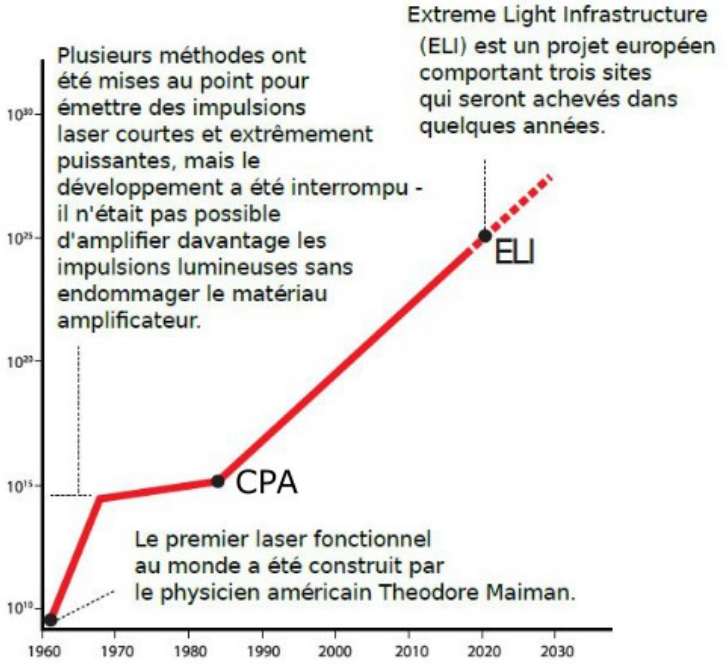


FIG. 101 – Vers des intensités de plus en plus élevées. *La technique d'amplification à dérive de fréquence récompensée en 2018 est à la base du développement rapide d'impulsions laser de plus en plus intenses.*

— Gérard Mourou, né en 1944 à Albertville en France, docteur en 1973 [9] ;
— Donna Strickland, née en 1959 à Guelph au Canada, docteur en 1989 de l'université de Rochester aux États-Unis.

9. NDT. Docteur de l'université Pierre-et-Marie-Curie.

De nouvelles perspectives sur notre place dans l'Univers

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé de décerner le prix Nobel de physique 2019

> « pour des contributions à la compréhension de l'évolution de l'Univers et de la place de la Terre dans le cosmos ».

Une moitié revient à James Peebles, de l'université de Princeton,

> « pour des découvertes théoriques en cosmologie physique ».

L'autre moitié revient conjointement à Michel Mayor, de l'université de Genève, et à Didier Queloz, des universités de Genève et de Cambridge,

> « pour la découverte d'une exoplanète en orbite autour d'une étoile de type solaire ».

Ce prix récompense une nouvelle compréhension de la structure et de l'histoire de l'Univers, ainsi que la première découverte d'une planète en orbite autour d'une étoile de type solaire en dehors de notre système solaire. Les lauréats ont contribué à répondre à des questions fondamentales sur notre existence. Que s'est-il passé dans les premiers temps de l'Univers et que s'est-il passé ensuite ? Existe-t-il d'autres planètes en orbite autour d'autres soleils ?

James Peebles s'est attaqué au cosmos, avec ses milliards de galaxies et d'amas de galaxies. Le cadre théorique qu'il a élaboré pendant deux décennies, à partir du milieu des années 1960, est à la base de notre compréhension moderne de l'histoire de l'Univers, depuis le *Big Bang* jusqu'à aujourd'hui. Les découvertes de Peebles ont permis de mieux comprendre notre environnement cosmique, dans lequel la matière connue ne représente que 5 % de l'ensemble de la matière et de l'énergie contenues dans l'Univers. Les 95 % restants nous sont cachés. C'est un mystère et un défi pour la physique moderne.

Michel Mayor et Didier Queloz ont exploré notre galaxie, la Voie lactée, à la recherche de mondes inconnus. En 1995, ils ont fait la toute première découverte d'une planète en dehors de notre système solaire, une exoplanète en orbite autour d'une étoile de type solaire. Cette découverte a remis en question nos idées sur ces mondes étranges et a

entraîné une révolution dans le domaine de l'astronomie. Les quelque 4 000 exoplanètes désormais connues surprennent par la richesse de leurs formes, car la plupart de ces systèmes planétaires ne ressemblent en rien au nôtre, avec le Soleil et ses planètes. Ces découvertes ont conduit les chercheurs à élaborer de nouvelles théories sur les processus physiques responsables de la naissance des planètes.

Le début de la cosmologie du *Big Bang*

Les cinq dernières décennies ont été un âge d'or pour la cosmologie, l'étude de l'origine et de l'évolution de l'Univers. Dans les années 1960, on a jeté les bases pour que la cosmologie passe de la spéculation à la science. La personne clé de cette transition a été James Peebles, dont les découvertes décisives ont fermement placé la cosmologie sur la carte scientifique et enrichi tout un champ de recherche. Son premier livre, *Physical Cosmology* (1971), a incité toute une nouvelle génération de physiciens à contribuer au développement du sujet, non seulement par des considérations théoriques, mais aussi par des observations et des mesures. La science, et rien d'autre, répondra aux questions éternelles sur notre origine et sur notre destin. La cosmologie est libérée des concepts humains tels que la foi et le sens. Cela fait écho aux propos tenus par Albert Einstein au début du siècle dernier, selon lesquels le mystère du monde est sa compréhensibilité.

L'histoire de l'Univers, un récit scientifique de l'évolution du cosmos, n'est connue que depuis une centaine d'années. Auparavant, l'Univers était considéré comme stationnaire et éternel. Mais dans les années 1920, les astronomes ont découvert que toutes les galaxies s'éloignaient les unes des autres et de nous. L'Univers est en expansion. Nous savons maintenant que l'Univers d'aujourd'hui est différent de celui d'hier et qu'il sera différent demain.

Ce que les astronomes ont vu dans le ciel avait déjà été prédit par la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein en 1916, celle qui est aujourd'hui à la base de tous les calculs à grande échelle sur l'Univers. Lorsque Einstein a découvert que sa théorie conduisait à la conclusion que l'Univers s'effondrerait, il a ajouté une constante à ses équations (la constante cosmologique) qui devait contrebalancer les effets de la gravité et faire en sorte que l'Univers s'immobilise. Plus d'une décennie plus tard, une fois l'expansion de l'Univers observée, cette constante n'était plus nécessaire. Einstein considérait cela comme la plus grande erreur de sa vie. Il était loin de se douter que la constante cosmo-

logique ferait un magnifique retour en cosmologie dans les années 1980, notamment grâce aux contributions de James Peebles.

Les premiers rayons de l'Univers les révèlent tous

L'expansion de l'Univers signifie qu'il était autrefois beaucoup plus dense et chaud. Au milieu du XX^{e} siècle, sa naissance a été baptisée *Big Bang* (« Grand Boum »). Personne ne sait ce qui s'est réellement passé au tout début, mais l'univers primitif était rempli d'une soupe de particules compacte, chaude et opaque dans laquelle les particules de lumière, les photons, rebondissaient dans tous les sens.

Il a fallu près de 400 000 ans pour que l'expansion refroidisse cette soupe primordiale à quelques milliers de degrés Celsius. Les particules initiales ont pu se combiner pour former un gaz transparent composé principalement d'atomes d'hydrogène et d'hélium. Les photons ont alors commencé à se déplacer librement et la lumière a pu voyager dans l'espace. Ces premiers rayons remplissent toujours le cosmos. L'expansion de l'espace a étiré les ondes lumineuses visibles, qui se sont retrouvées dans le domaine des micro-ondes invisibles, d'une longueur d'onde de quelques millimètres.

La lueur de la naissance de l'Univers a été détectée par hasard en 1964 par deux radioastronomes américains : Arno Penzias et Robert Wilson, lauréats du prix Nobel 1978. N'arrivant pas à se débarrasser du « bruit » constant que leur antenne captait de partout dans l'espace, ils ont cherché une explication dans les travaux d'autres chercheurs, notamment dans ceux de James Peebles, qui avaient effectué des calculs théoriques sur ce fond diffus omniprésent. Après près de 14 milliards d'années, sa température s'est rapprochée du zéro absolu (−273 °C). L'avancée majeure a eu lieu lorsque Peebles a compris que la température du rayonnement pouvait fournir des informations sur la quantité de matière créée lors du *Big Bang* et que la libération de cette lumière jouait un rôle décisif dans la manière dont la matière pouvait ensuite s'agglomérer pour former les galaxies et les amas de galaxies que l'on voit aujourd'hui dans l'espace.

La découverte de ce rayonnement micro-onde a marqué le début de la nouvelle ère de la cosmologie moderne. L'ancien rayonnement de l'enfance de l'Univers est devenu une mine d'or qui contient les réponses à presque tout ce que les cosmologistes veulent savoir. Quel est l'âge de l'Univers ? Quel est son destin ? Quelle quantité de matière et d'énergie y a-t-il ?

Les scientifiques peuvent trouver des traces des tout premiers instants de l'Univers dans cette lueur froide, de minuscules variations se propageant comme des ondes sonores à travers cette soupe primordiale. Sans ces petites variations, le cosmos se serait refroidi en passant d'une boule de feu à un vide froid et uniforme. Nous savons que cela ne s'est pas produit ainsi, que l'espace est rempli de galaxies, souvent rassemblées en amas de galaxies. Le fond diffus est lisse, de la même manière que la surface de l'océan est lisse. Des vagues sont visibles de près, des rides qui révèlent les variations de l'Univers primitif.

À plusieurs reprises, James Peebles a dirigé l'interprétation de ces traces fossiles des premières époques de l'Univers. Avec une précision stupéfiante, les cosmologistes ont pu prédire les variations du fond diffus et montrer comment elles affectent la matière et l'énergie dans l'Univers.

La première grande avancée observationnelle a eu lieu en avril 1992, lorsque les principaux chercheurs du projet de satellite américain COBE ont présenté une image des premiers rayons de lumière dans l'Univers (prix Nobel de physique 2006 à John Mather et George Smoot). D'autres satellites, l'américain WMAP et l'européen Planck, ont progressivement affiné ce portrait du jeune Univers. Exactement comme prévu, la température du fond diffus, par ailleurs uniforme, peut varier d'un cent-millième de degré. Avec une précision croissante, les calculs théoriques de la matière et de l'énergie contenues dans l'Univers ont été confirmés, la majorité (95 %) étant invisible pour nous.

Matière noire et énergie noire : les plus grands mystères de la cosmologie

Depuis les années 1930, nous savons que tout ce que nous pouvons voir n'est pas tout ce qu'il y a. Les mesures de la vitesse de rotation des galaxies indiquaient qu'elles devaient être maintenues ensemble par la gravité d'une matière invisible, faute de quoi elles se seraient déchirées. On pensait également que cette matière noire jouait un rôle important dans l'origine des galaxies, bien avant que la soupe primordiale ne relâche son emprise sur les photons.

La composition de la matière noire reste l'un des plus grands mystères de la cosmologie. Les scientifiques ont longtemps pensé que les neutrinos déjà connus pourraient constituer cette matière noire, mais les quantités inimaginables de neutrinos de faible masse qui traversent l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière sont bien trop rapides pour contribuer à la cohésion de la matière. En 1982, Peebles a donc

proposé que des particules lourdes et lentes de matière noire froide fassent l'affaire. Nous sommes toujours à la recherche de ces particules inconnues de matière noire froide, qui évitent d'interagir avec la matière déjà connue et représentent 26 % du cosmos.

Selon la théorie de la relativité générale d'Einstein, la géométrie de l'espace est liée à la gravité : plus l'Univers contient de masse et d'énergie, plus l'espace devient courbe. À une certaine valeur critique de masse et d'énergie, l'Univers ne se courbe pas. Ce type d'univers, dans lequel deux lignes parallèles ne se croisent jamais, est généralement appelé « plat ». Les deux autres options sont un univers avec trop peu de matière, qui conduit à un univers ouvert dans lequel les lignes parallèles finissent par diverger, ou un univers fermé avec trop de matière, dans lequel les lignes parallèles finissent par se croiser.

Les mesures du fond diffus cosmologique, ainsi que des considérations théoriques, ont fourni une réponse claire : l'Univers est plat. Cependant, la matière qu'il contient ne correspond qu'à 31 % de la valeur critique, dont 5 % de matière ordinaire et 26 % de matière noire. La majeure partie de cette matière, soit 69 %, est manquante. James Peebles a une fois de plus apporté une solution radicale. En 1984, il a contribué à faire revivre la constante cosmologique d'Einstein, qui est l'énergie de l'espace vide. Celle-ci a été baptisée « énergie noire » et remplit 69 % du cosmos. Avec la matière noire froide et la matière ordinaire, elle suffit à étayer l'idée d'un univers plat.

L'énergie noire est restée au stade de théorie spéculative pendant quatorze ans, jusqu'à la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers en 1998 (prix Nobel de physique en 2011 à Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess). Quelque chose d'autre que la matière doit être responsable de l'expansion de plus en plus rapide : une énergie noire inconnue la pousse. Soudain, cet ajout théorique est devenu une réalité observable dans le ciel.

La matière noire et l'énergie noire font désormais partie des plus grands mystères de la cosmologie. Elles ne se font connaître que par l'impact qu'elles ont sur leur environnement : l'une tire, l'autre pousse. Autrement, on ne sait pas grand-chose à leur sujet. Quels secrets recèle cette face cachée de l'Univers ? Quelle nouvelle physique se cache derrière l'inconnu ? Que découvrirons-nous encore en tentant de percer les mystères de l'espace ?

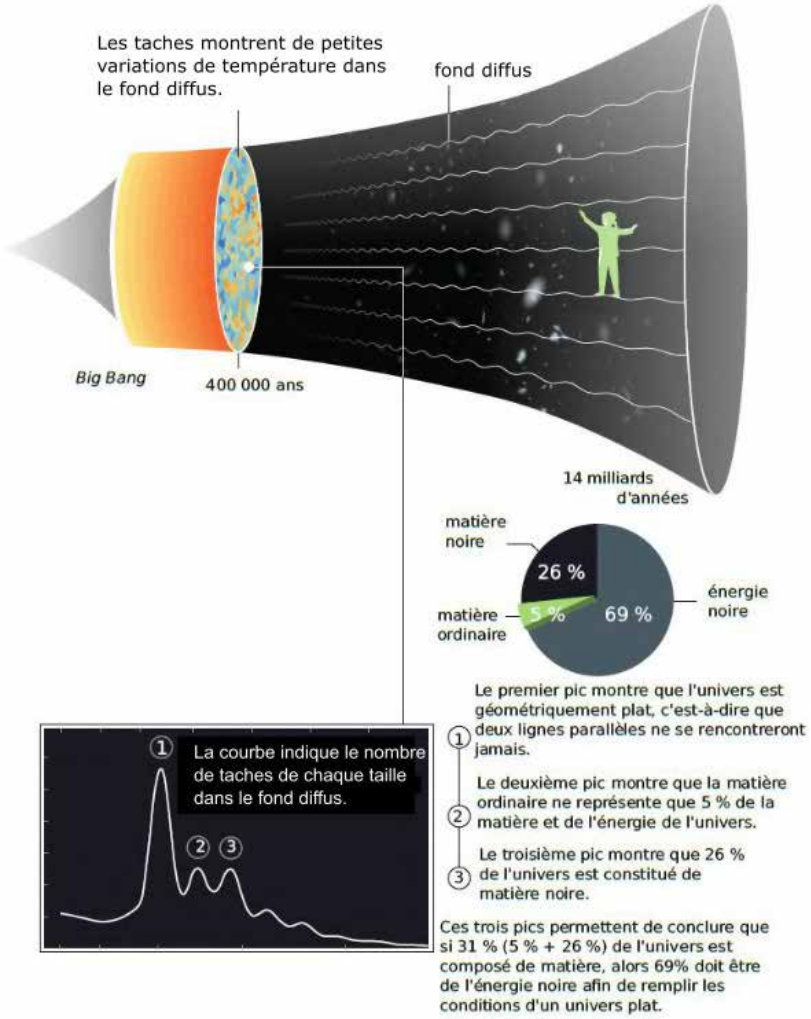


Fig. 102 – Les secrets du fond diffus. *L'Univers était extrêmement chaud et dense à ses débuts, pendant le* Big Bang. *Depuis lors, l'Univers est en expansion. Il devient plus grand et plus froid. Près de 400 000 ans après le* Big Bang, *le rayonnement initial a commencé à voyager dans l'espace. Ce rayonnement remplit toujours le cosmos et c'est en lui que se cachent de nombreux secrets de l'Univers. Grâce à ses modèles théoriques, James Peebles a pu prédire la forme de l'Univers ainsi que la matière et l'énergie qu'il contient (courbe ci-dessus). Ses calculs correspondaient bien aux mesures ultérieures du fond diffus.*

La première planète en orbite autour d'un autre soleil

La plupart des cosmologistes s'accordent aujourd'hui à dire que le modèle du *Big Bang* est la véritable histoire de l'origine et du développement du cosmos, bien que l'on ne connaisse aujourd'hui que cinq pour cent de sa matière et de son énergie. Cette minuscule tranche de matière s'est finalement agglomérée pour donner naissance à tout ce que nous voyons autour de nous : étoiles, planètes, arbres et fleurs, mais aussi êtres humains. Sommes-nous les seuls à contempler le cosmos ? Y a-t-il de la vie ailleurs dans l'espace, sur une planète en orbite autour d'un autre soleil ? Nul ne le sait. Mais nous savons aujourd'hui que notre Soleil n'est pas le seul à posséder des planètes et que la plupart des centaines de milliards d'étoiles de la Voie lactée devraient également avoir des planètes. Les astronomes connaissent aujourd'hui plus de 4 000 exoplanètes. On a découvert d'étranges nouveaux mondes, qui ne ressemblent en rien à notre propre système planétaire. La première découverte était si particulière que presque personne n'y a cru : la planète était trop grosse pour être aussi proche de son étoile hôte.

Michel Mayor et Didier Queloz ont annoncé leur découverte sensationnelle lors d'une conférence d'astronomie à Florence en Italie le 6 octobre 1995. Il s'agissait de la première planète pour laquelle on a montré qu'elle orbite autour d'une étoile de type solaire. La planète, 51 Pegasi b, se déplace rapidement autour de son étoile, 51 Pegasi, qui se trouve à 50 années-lumière de la Terre. Il lui faut quatre jours pour parcourir son orbite, ce qui signifie que sa trajectoire est proche de l'étoile, à seulement huit millions de kilomètres. L'étoile chauffe la planète à plus de 1 000 °C. La situation est nettement plus calme sur la Terre, dont l'orbite autour du Soleil dure un an et se trouve à une distance de 150 millions de kilomètres.

La planète découverte s'est également révélée étonnamment grande : une boule gazeuse comparable à la plus grande géante gazeuse du système solaire, Jupiter. Par rapport à la Terre, le volume de Jupiter est 1 300 fois plus important et son poids 300 fois plus élevé. Selon les idées reçues sur la formation des systèmes planétaires, les planètes de la taille de Jupiter auraient dû être créées loin de leur étoile hôte et, par conséquent, mettre beaucoup de temps à orbiter autour d'elle. Il faut près de 12 ans à Jupiter pour faire le tour du Soleil. La courte période orbitale de 51 Pegasi b a donc été une surprise totale pour les chasseurs d'exoplanètes. Ils n'avaient pas cherché au bon endroit.

Presque immédiatement après cette annonce, deux astronomes amé-

ricains, Paul Butler et Geoffrey Marcy, ont tourné leur télescope vers l'étoile 51 Pegasi et ont rapidement pu confirmer la découverte révolutionnaire de Mayor et Queloz. Quelques mois plus tard, ils ont découvert deux nouvelles exoplanètes en orbite autour d'étoiles de type solaire. Leurs courtes périodes orbitales étaient pratiques pour les astronomes qui n'avaient pas besoin d'attendre des mois ou des années pour voir une exoplanète tourner autour de son soleil. Ils avaient désormais le temps d'observer les planètes faire un tour de piste après l'autre.

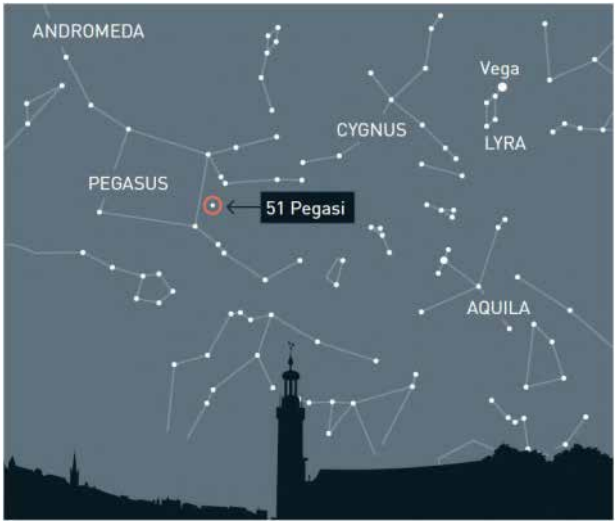


Fig. 103 – *Ciel étoilé au-dessus de Stockholm en octobre. La première planète en orbite autour d'une étoile de type solaire trouvée en dehors de notre système solaire se trouve dans la constellation de Pégase. Elle orbite autour d'une étoile appelée 51 Pegasi, qui n'est visible à l'œil nu que lorsqu'il fait vraiment noir. Cependant, les quatre étoiles qui forment le Grand carré de Pégase sont faciles à identifier.*

Comment ces planètes sont-elles arrivées si près de leur étoile ? Cette question a remis en question les théories existantes sur l'origine des planètes et a conduit à de nouvelles théories pour décrire comment de grosses boules de gaz ont été créées à la périphérie de leurs systèmes solaires, puis ont spiralé pour se rapprocher de l'étoile hôte.

Des méthodes affinées ont permis la découverte

Des méthodes sophistiquées sont nécessaires pour repérer une exoplanète. Les planètes ne brillent pas d'elles-mêmes, elles reflètent simplement la lumière de l'étoile, mais si faiblement que leur lueur est étouffée par la lumière brillante de l'étoile hôte. La méthode utilisée par les groupes de recherche pour trouver une planète s'appelle la méthode des vitesses radiales. Elle mesure le mouvement de l'étoile hôte sous l'effet de la gravité de sa planète. Lorsque la planète tourne autour de son étoile, l'étoile se déplace également légèrement. Elles se déplacent toutes deux autour de leur centre de gravité commun. Depuis le point d'observation sur Terre, l'étoile oscille d'avant en arrière dans la ligne de visée.

La vitesse de ce mouvement, la vitesse radiale, peut être mesurée à l'aide de l'effet Doppler bien connu : les rayons lumineux provenant d'un objet qui se rapproche de nous sont plus bleus ; si l'objet s'éloigne de nous, les rayons sont plus rouges. C'est le même effet que nous entendons lorsque la hauteur du son d'une ambulance augmente à mesure qu'elle se rapproche de nous et diminue lorsque l'ambulance s'éloigne.

L'effet de la planète modifie donc alternativement la couleur de la lumière de l'étoile vers le bleu ou le rouge. Ce sont ces modifications de la longueur d'onde de la lumière que les astronomes captent avec leurs instruments. Les changements de couleur peuvent être déterminés avec précision en mesurant les longueurs d'onde de la lumière de l'étoile, ce qui permet de mesurer directement sa vitesse dans la ligne de visée.

La principale difficulté réside dans le fait que les vitesses radiales sont extrêmement faibles. Par exemple, la gravité de Jupiter fait que le Soleil se déplace à environ 12 m/s autour du centre de gravité du système solaire. La Terre n'y contribue qu'à hauteur de 0,09 m/s, ce qui impose des exigences extraordinaires à la sensibilité de l'équipement si l'on veut découvrir des planètes semblables à la Terre. Pour plus de précision, les astronomes mesurent simultanément plusieurs milliers de longueurs d'onde. La lumière est divisée en différentes longueurs d'onde à l'aide d'un spectrographe, qui est au cœur de ces mesures.

Au début des années 1990, lorsque Didier Queloz a commencé sa carrière à l'université de Genève, Michel Mayor avait déjà passé de nombreuses années à étudier le mouvement des étoiles et à construire ses propres instruments de mesure avec l'aide d'autres chercheurs. En 1977, Mayor a pu monter son tout premier spectrographe sur un télescope de l'observatoire de Haute-Provence, à 100 km au nord-est de Marseille.

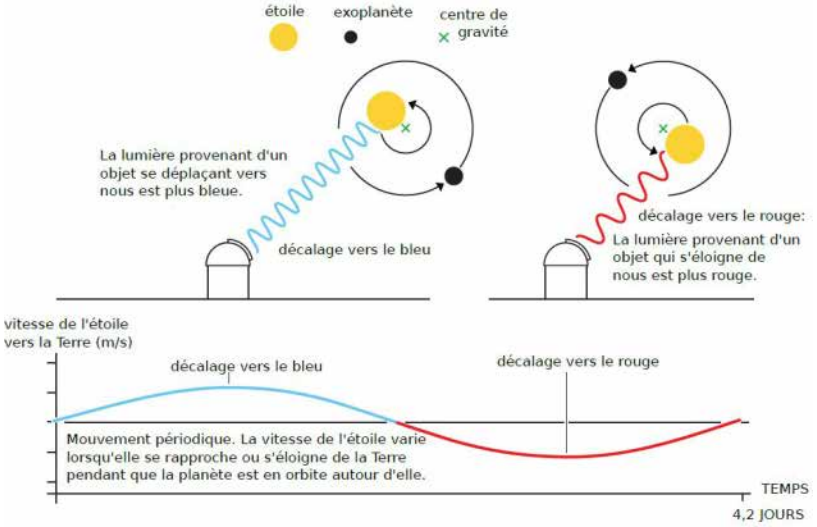


FIG. 104 – Recherche de planètes par la méthode de la vitesse radiale. *L'étoile se déplace sous l'effet de la gravité de sa planète. Vue de la Terre, l'étoile oscille d'avant en arrière dans la ligne de visée. La vitesse de ce mouvement, sa vitesse radiale, peut être déterminée grâce à l'effet Doppler, car la lumière d'un objet en mouvement change de couleur.*

Cela a permis de fixer une limite inférieure pour la vitesse autour de 300 m/s, mais c'était encore trop pour voir une planète tirer son étoile.

Dans le groupe de recherche, le doctorant Didier Queloz était chargé de développer de nouvelles méthodes pour des mesures plus précises. De nouvelles technologies ont été utilisées pour observer rapidement de nombreuses étoiles et analyser les résultats sur place. Les fibres optiques peuvent transporter la lumière des étoiles jusqu'au spectrographe sans la déformer et de meilleurs capteurs photographiques numériques, les capteurs DCC, augmentent la sensibilité à la lumière (prix Nobel de physique 2009 à Charles Kao, Willard Boyle et George Smith). Des ordinateurs plus puissants ont permis aux scientifiques de développer des logiciels sur mesure pour le traitement numérique des images et des données.

Lorsque le nouveau spectrographe a été achevé au printemps 1994, la vitesse nécessaire est tombée entre 10 et 15 m/s. La première découverte d'une exoplanète approchait à grands pas. À l'époque, la recherche

d'exoplanètes ne faisait pas partie du courant dominant de l'astronomie, mais Mayor et Queloz avaient décidé d'annoncer leur découverte. Ils ont passé plusieurs mois à affiner leurs résultats. En octobre 1995, ils étaient prêts à présenter leur toute première planète au monde.

Révélation d'une multitude de mondes

Des milliers de nouveaux mondes inconnus ont été révélés. De nouveaux systèmes planétaires sont désormais découverts non seulement par les télescopes terrestres, mais aussi par les satellites. Le télescope spatial américain TESS scrute actuellement les 200 000 étoiles les plus proches de nous, à la recherche de planètes semblables à la Terre. Auparavant, le télescope spatial Kepler avait permis de découvrir plus de 2 300 exoplanètes.

Outre les variations de la vitesse radiale, la recherche d'exoplanètes fait désormais appel à la photométrie de transit. Cette méthode mesure les changements d'intensité de la lumière de l'étoile lorsqu'une planète passe devant elle, si cela se produit dans notre ligne de mire. La photométrie de transit permet également aux astronomes d'observer l'atmosphère de l'exoplanète lorsque la lumière de l'étoile la traverse en direction de la Terre. On peut parfois utiliser les deux méthodes : la photométrie de transit fournit la taille de l'exoplanète, tandis que sa masse peut être déterminée à l'aide de la méthode de la vitesse radiale. Il est alors possible de calculer la densité de l'exoplanète et donc de déterminer sa structure.

Les exoplanètes découvertes à ce jour nous ont surpris par leur étonnante variété de formes, de tailles et d'orbites. Elles ont remis en question nos idées préconçues sur les systèmes planétaires et forcé les chercheurs à revoir leurs théories sur les processus physiques responsables de la naissance des planètes. Grâce aux nombreux projets prévus pour rechercher des exoplanètes, nous pourrons peut-être trouver une réponse à l'éternelle question de savoir s'il existe d'autres formes de vie.

Les lauréats ont transformé nos idées sur le cosmos. Alors que les découvertes théoriques de James Peebles ont contribué à notre compréhension de l'évolution de l'Univers après le *Big Bang*, Michel Mayor et Didier Queloz ont exploré notre voisinage cosmique à la recherche de planètes inconnues. Leurs découvertes ont changé à jamais notre conception du monde.

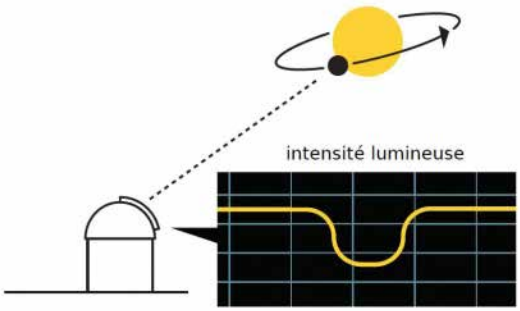


FIG. 105 – La recherche de planètes à l'aide de la photométrie de transit. *L'intensité lumineuse de l'étoile diminue lorsque la planète passe entre l'étoile et notre ligne de mire. Cet effet est observé par les télescopes sur Terre.*

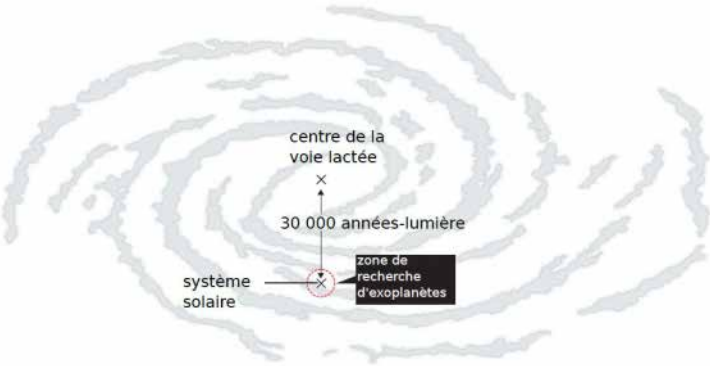


FIG. 106 – *Le Soleil est l'une des centaines de milliards d'étoiles de notre galaxie, la Voie lactée. Des planètes devraient être en orbite autour de la plupart d'entre elles. Jusqu'à présent, les astronomes ont découvert plus de 4 000 planètes autour d'autres étoiles. Ils poursuivent leurs recherches dans la zone de l'espace la plus proche de nous.*

Les lauréats

— James Peebles, né en 1935 à Winnipeg au Canada, docteur en 1962 de l'université de Princeton, professeur dans cette même université ;
— Michel Mayor, né en 1942 à Lausanne, docteur en 1971 de l'université de Genève, professeur dans cette même université ;
— Didier Queloz, né en 1966 à Genève, docteur en 1995 de l'université de Genève, professeur dans cette université et aussi à l'université de Cambridge au Royaume-Uni.

Bibliographie

— Peebles (P. J. E.), *Cosmologie moderne*, Malakoff, Dunod, 2022.

Les trous noirs

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2020 pour moitié à Roger Penrose, de l'université d'Oxford,

> « pour avoir découvert que la formation des trous noirs est une conséquence certaine de la théorie de la relativité générale ».

L'autre moitié du prix revient conjointement à Reinhard Genzel, de l'institut Max-Planck de physique extraterrestre à Garching et de l'université Berkeley en Californie, et à Andrea Ghez, de l'université de Californie à Los Angeles,

> « pour la découverte d'un objet compact supermassif au centre de notre galaxie ».

Les trois lauréats se partagent le prix pour leurs découvertes sur l'un des phénomènes les plus exotiques de l'Univers, les trous noirs. Roger Penrose a montré que les trous noirs sont une conséquence directe de la théorie de la relativité générale. Reinhard Genzel et Andrea Ghez ont découvert qu'un objet invisible et extrêmement lourd gouverne les orbites des étoiles au centre de notre galaxie, la Voie lactée. Un trou noir supermassif est la seule explication actuellement connue.

Roger Penrose a inventé des méthodes mathématiques ingénieuses pour explorer la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Il a montré que cette théorie conduit à la formation de trous noirs, ces monstres du temps et de l'espace qui capturent tout ce qui y pénètre. Rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.

Reinhard Genzel et Andrea Ghez dirigent chacun un groupe d'astronomes qui s'intéressent depuis le début des années 1990 à une région située au centre de la Voie lactée. Avec une précision croissante, ils ont cartographié les orbites des étoiles les plus brillantes qui sont les plus proches du centre. Les deux groupes ont découvert un élément à la fois invisible et lourd, qui force cet amas d'étoiles à tourbillonner. Cette masse invisible regroupe environ quatre millions de masses solaires dans une région qui n'est pas plus grande que notre système solaire. Qu'est-ce qui fait que les étoiles au cœur de la Voie lactée tourbillonnent à des

vitesses aussi étonnantes ? Selon la théorie actuelle de la gravitation, il n'y a qu'un seul candidat : un trou noir supermassif.

Une avancée au-delà d'Einstein

Même Albert Einstein, le père de la relativité générale, ne pensait pas que les trous noirs pouvaient exister. Cependant, dix ans après la mort d'Einstein, le théoricien britannique Roger Penrose a démontré que des trous noirs peuvent se former et a décrit leurs propriétés. Au cœur des trous noirs se trouve une singularité, une frontière où toutes les lois de la nature connues s'effondrent.

Pour démontrer que la formation des trous noirs est un processus stable, Penrose a dû élargir les méthodes utilisées pour étudier la théorie de la relativité, en abordant les problèmes de la théorie avec de nouveaux concepts mathématiques. L'article révolutionnaire de Penrose a été publié en janvier 1965. Il est toujours considéré comme la contribution la plus importante à la théorie de la relativité générale depuis Einstein.

La gravité enserre l'Univers

Les trous noirs sont peut-être la conséquence la plus étrange de la théorie de la relativité générale. Lorsque Albert Einstein a présenté sa théorie en novembre 1915, il a bouleversé tous les concepts antérieurs de l'espace et du temps. La théorie a fourni une base entièrement nouvelle pour comprendre la gravité, qui façonne l'Univers à la plus grande échelle. Depuis lors, cette théorie est à la base de toutes les études sur l'Univers et trouve également une utilisation pratique dans les assistants de navigation les plus courants.

La théorie d'Einstein décrit comment tout dans l'Univers est sous l'emprise de la gravitation. La gravité nous retient sur Terre, elle régit les orbites des planètes autour du Soleil et l'orbite du Soleil autour du centre de la Voie lactée. Elle conduit à la naissance d'étoiles à partir de nuages interstellaires, et finalement à leur mort dans un effondrement gravitationnel. La gravitation donne une forme à l'espace et influence le passage du temps. Une masse lourde courbe l'espace et ralentit le temps. Une masse extrêmement lourde peut même couper et encapsuler une partie de l'espace pour former un trou noir.

La première description théorique de ce que nous appelons aujourd'hui un trou noir est apparue quelques semaines seulement après la

publication de la théorie de la relativité générale. Malgré les équations mathématiques extrêmement compliquées de la théorie, l'astrophysicien allemand Karl Schwarzschild a pu fournir à Einstein une solution qui décrit comment des masses lourdes peuvent courber l'espace et le temps.

Des études ultérieures ont montré qu'une fois formé, le trou noir est entouré d'un « horizon des événements », qui enveloppe la masse en son centre comme un voile. Le trou noir reste à jamais caché à l'intérieur de son horizon des événements. Plus la masse est importante, plus le trou noir et son horizon sont grands. Pour une masse équivalente à celle du Soleil, l'horizon des événements a un diamètre de près de trois kilomètres. Pour une masse comme celle de la Terre, son diamètre n'est que de neuf millimètres.

Une solution au-delà de la perfection

Le concept de « trou noir » a trouvé une nouvelle signification dans de nombreuses formes d'expression culturelle. Mais pour les physiciens, les trous noirs sont le point final naturel de l'évolution des étoiles géantes. Le premier calcul de l'effondrement spectaculaire d'une étoile massive a été effectué à la fin des années 1930 par le physicien Robert Oppenheimer, qui a ensuite dirigé le projet Manhattan à l'origine de la première bombe atomique. Lorsque les étoiles géantes, plusieurs fois plus lourdes que le Soleil, n'ont plus de combustible, elles explosent d'abord sous forme de supernovae, puis s'effondrent pour donner des vestiges extrêmement denses, si lourds que la gravité attire tout à l'intérieur, même la lumière.

L'idée des « étoiles noires » a été envisagée dès la fin du XVIII^{e} siècle dans les travaux du philosophe et mathématicien britannique John Michell et du célèbre scientifique français Pierre-Simon de Laplace. Tous deux avaient deviné que les corps célestes pouvaient devenir si denses qu'ils seraient invisibles : même la vitesse de la lumière ne serait pas suffisante pour échapper à leur gravité.

Un peu plus d'un siècle plus tard, lorsque Albert Einstein a publié sa théorie de la relativité générale, certaines solutions des équations notoirement difficiles de la théorie décrivaient précisément de telles étoiles noires. Jusque dans les années 1960, ces solutions étaient considérées comme des spéculations purement théoriques, qui décrivaient des situations idéales dans lesquelles les étoiles et leurs trous noirs étaient parfaitement ronds et symétriques. Mais rien n'est parfait dans l'Univers. Roger Penrose a été le premier à trouver une solution réaliste pour toute

la matière qui s'effondre, avec ses creux, ses fossettes et ses imperfections naturelles.

Le mystère des quasars

La question de l'existence des trous noirs a refait surface en 1963 avec la découverte des quasars, les objets les plus brillants de l'Univers. Pendant près d'une décennie, les astronomes ont été intrigués par les ondes radio provenant de sources mystérieuses, telles que 3C273 dans la constellation de la Vierge. Le rayonnement en lumière visible a finalement révélé sa véritable position : 3C273 est si éloigné que les rayons voyagent vers la Terre pendant plus d'un milliard d'années.

Si la source lumineuse est si éloignée, elle doit avoir une intensité égale à la lumière de plusieurs centaines de galaxies. On lui a donné le nom de « quasar ». Les astronomes ont rapidement trouvé des quasars si éloignés qu'ils avaient émis leur rayonnement dans la première enfance de l'Univers. D'où vient cet incroyable rayonnement ? Il n'y a qu'une seule façon d'obtenir autant d'énergie dans le volume limité d'un quasar : de la matière qui tombe dans un trou noir massif.

Les surfaces piégées ont résolu l'énigme

Roger Penrose se demandait si les trous noirs pouvaient se former dans des conditions réalistes. La réponse, comme il s'en souviendra plus tard, est apparue à l'automne 1964 lors d'une promenade avec un collègue à Londres, où Penrose était professeur de mathématiques au *Birkbeck College*. Alors qu'il s'arrêtait de parler pour traverser une rue secondaire, une idée a surgi dans son esprit. Plus tard dans l'après-midi, il l'a cherchée dans sa mémoire. Cette idée, qu'il a appelée « surface piégée », était la clé qu'il cherchait inconsciemment, un outil mathématique crucial pour décrire un trou noir.

Une surface piégée oblige tous les rayons à pointer vers un centre, que la surface soit incurvée vers l'extérieur ou vers l'intérieur. En utilisant les surfaces piégées, Penrose a pu démontrer qu'un trou noir cache toujours une singularité, une frontière où le temps et l'espace s'arrêtent. Sa densité est infinie. À ce jour, il n'existe aucune théorie sur la manière d'aborder ce phénomène le plus étrange de la physique.

Les surfaces piégées sont devenues un concept central dans la démonstration de Penrose du théorème de la singularité. Les méthodes

topologiques qu'il a introduites sont aujourd'hui inestimables pour l'étude de notre Univers courbe.

Une voie à sens unique vers la fin des temps

Une fois que la matière commence à s'effondrer et qu'une surface piégée se forme, rien ne peut empêcher l'effondrement de se poursuivre. Il n'y a pas de retour possible, comme dans l'histoire racontée par le physicien et lauréat du prix Nobel Subrahmanyan Chandrasekhar, une histoire qui vient de son enfance en Inde. Elle concerne les libellules et leurs larves, qui vivent sous l'eau. Lorsqu'une larve est prête à déployer ses ailes, elle promet de raconter à ses congénères ce qu'est la vie de l'autre côté de la surface de l'eau. Mais une fois que la larve a traversé la surface et s'est envolée comme une libellule, il n'y a pas de retour possible. Les larves dans l'eau n'entendront jamais l'histoire de la vie de l'autre côté.

De même, toute matière ne peut franchir l'horizon des événements d'un trou noir que dans une seule direction. Le temps remplace alors l'espace et tous les chemins possibles se dirigent vers l'intérieur, le flux du temps emportant tout vers une fin inéluctable à la singularité (figure 107). Vous ne sentirez rien si vous tombez à travers l'horizon des événements d'un trou noir supermassif. De l'extérieur, personne ne peut vous voir tomber et votre voyage vers l'horizon se poursuit à jamais. Les lois de la physique ne permettent pas de pénétrer à l'intérieur d'un trou noir. Les trous noirs cachent tous leurs secrets derrière leur horizon des événements.

Les trous noirs régissent la trajectoire des étoiles

Même si nous ne pouvons pas voir le trou noir, il est possible d'établir ses propriétés en observant comment sa gravité colossale oriente les mouvements des étoiles environnantes.

Reinhard Genzel et Andrea Ghez dirigent chacun un groupe de recherche qui explore le centre de notre galaxie, la Voie lactée. En forme de disque plat d'environ 100 000 années-lumière de diamètre, elle est constituée de gaz et de poussières et de quelques centaines de milliards d'étoiles, dont notre Soleil (figure 108). Depuis notre point d'observation sur Terre, d'énormes nuages de gaz et de poussières interstellaires masquent la majeure partie de la lumière visible provenant du centre de la galaxie. Ce sont les télescopes infrarouges et les ondes radio qui

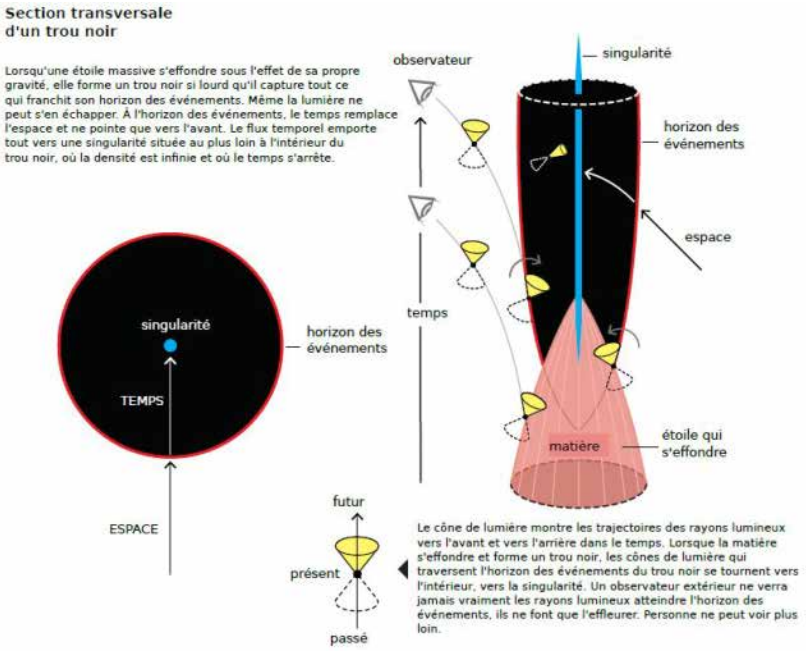


FIG. 107 – *Un trou noir se forme.*

ont permis aux astronomes de voir à travers le disque de la galaxie et d'obtenir des images des étoiles du centre.

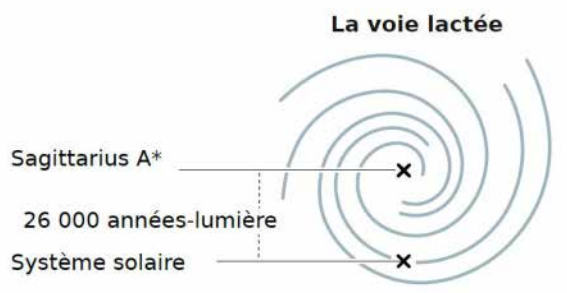


FIG. 108 – *La Voie lactée, notre galaxie, vue d'en haut. Elle a la forme d'un disque plat d'environ 100 000 années-lumière de diamètre. Ses bras spiraux sont faits de gaz et de poussière et de quelques centaines de milliards d'étoiles. L'une de ces étoiles est notre Soleil.*

En utilisant les orbites des étoiles comme guides, Genzel et Ghez ont obtenu la preuve la plus convaincante à ce jour de l'existence d'un objet supermassif invisible qui se cache au centre de la galaxie. Un trou noir est la seule explication possible.

Mise au point sur le centre

Depuis plus de cinquante ans, les physiciens soupçonnent la présence d'un trou noir au centre de la Voie lactée. Depuis la découverte des quasars au début des années 1960, les physiciens pensaient que des trous noirs supermassifs pouvaient se trouver à l'intérieur de la plupart des grandes galaxies, y compris la Voie lactée. Cependant, personne ne peut actuellement expliquer comment les galaxies et leurs trous noirs, dont la masse varie entre quelques millions et plusieurs milliards de masses solaires, se sont formés.

Il y a cent ans, l'astronome américain Harlow Shapley a été le premier à identifier le centre de la Voie lactée, dans la direction de la constellation du Sagittaire. Des observations ultérieures ont permis aux astronomes de découvrir une forte source d'ondes radio à cet endroit, qui a été baptisée Sagittarius A*. Vers la fin des années 1960, il est devenu évident que Sagittarius A* occupe le centre de la Voie lactée, autour duquel gravitent toutes les étoiles de la galaxie.

Ce n'est que dans les années 1990 que des télescopes plus grands et un meilleur équipement ont permis des études plus systématiques de Sagittarius A*. Reinhard Genzel et Andrea Ghez ont tous deux lancé des projets pour tenter de voir à travers les nuages de poussière jusqu'au cœur de la Voie lactée. Avec leurs groupes de recherche, ils ont développé et affiné leurs techniques, en construisant des instruments uniques et en s'engageant dans des recherches à long terme.

Seuls les plus grands télescopes du monde peuvent observer les étoiles lointaines. « Plus c'est grand, mieux c'est » est absolument vrai en astronomie. L'astronome allemand Reinhard Genzel et son groupe ont d'abord utilisé le téléscope NTT (*New Technology Telescope*) situé sur la montagne La Silla au Chili. Ils ont ensuite transféré leurs observations au VLT (*Very Large Telescope*) situé sur le mont Paranal, également au Chili. Avec quatre télescopes géants deux fois plus grands que le NTT, le VLT possède les plus grands miroirs monolithiques du monde, chacun ayant un diamètre de plus de 8 mètres.

Aux États-Unis, Andrea Ghez et son équipe de recherche utilisent l'observatoire Keck, situé à Hawaï sur le volcan Mauna Kea. Ses miroirs ont un diamètre de près de 10 mètres et sont actuellement parmi les plus grands au monde. Chaque miroir est comme un nid d'abeille, composé de 36 morceaux hexagonaux qui peuvent être contrôlés séparément pour mieux focaliser la lumière des étoiles.

Les étoiles montrent le chemin

Quelle que soit la taille des télescopes, il y a toujours une limite aux détails qu'ils peuvent distinguer, car nous vivons au fond d'une sorte de mer atmosphérique de près de 100 kilomètres de profondeur. Les grandes bulles d'air au-dessus du télescope, plus chaudes ou plus froides que leur environnement, agissent comme des lentilles et réfractent la lumière sur son chemin vers le miroir du télescope, déformant ainsi les ondes lumineuses. C'est pourquoi les étoiles scintillent, mais aussi pourquoi leurs images sont floues.

L'avènement de l'optique adaptative a été déterminant pour l'amélioration des observations. Les télescopes sont désormais équipés d'un mince miroir supplémentaire qui compense les turbulences de l'air et corrige l'image déformée.

Depuis près de trente ans, Reinhard Genzel et Andrea Ghez suivent leurs étoiles dans le lointain fouillis stellaire au centre de notre galaxie. Ils continuent de développer et d'affiner la technologie, avec des cap-

teurs photographiques numériques plus sensibles et une meilleure optique adaptative, de sorte que la résolution des images a été multipliée par plus de mille. Ils sont désormais en mesure de déterminer plus précisément la position des étoiles, en les suivant nuit après nuit.

Les chercheurs suivent une trentaine d'étoiles parmi les plus brillantes. Les étoiles les plus rapides se déplacent dans un rayon d'un mois-lumière autour du centre, à l'intérieur duquel elles exécutent une danse agitée comme celle d'un essaim d'abeilles. Les étoiles situées en dehors de cette zone en revanche suivent leur orbite elliptique de manière plus ordonnée (figure 109).

Une étoile, appelée S2 ou S-O2, effectue une orbite autour du centre de la galaxie en moins de seize ans. C'est un temps relativement court. Les astronomes ont donc pu cartographier l'ensemble de son orbite. On peut comparer cette durée à celle du Soleil, qui met plus de 200 millions d'années à faire un tour complet du centre de la Voie lactée. Les dinosaures marchaient encore sur la Terre lorsque nous avons entamé notre tour actuel.

Théorie et observations concordent

La concordance entre les mesures des deux équipes était excellente, ce qui a permis de conclure que le trou noir au centre de notre galaxie devrait être équivalent à environ 4 millions de masses solaires, concentrées dans une région de la taille de notre système solaire.

Nous pourrons bientôt observer directement Sagittarius A*. C'est la prochaine étape, car le réseau de téléscopes EHT a réussi il y a un peu plus d'un an à faire une image de l'environnement le plus proche d'un trou noir supermassif. Très loin, dans la galaxie Messier 87 (M87), à 55 millions d'années-lumière de nous, se trouve un œil plus noir que noir, entouré d'un anneau de feu.

Le noyau noir de M87 est gigantesque, plus de mille fois plus lourd que Sagittarius A*. Les trous noirs en collision à l'origine des ondes gravitationnelles récemment découvertes étaient beaucoup plus légers. Comme les trous noirs, les ondes gravitationnelles n'existaient que sous la forme de calculs issus de la théorie de la relativité générale d'Einstein, avant d'être détectées pour la première fois à l'automne 2015 par le détecteur LIGO aux États-Unis (prix Nobel de physique en 2017).

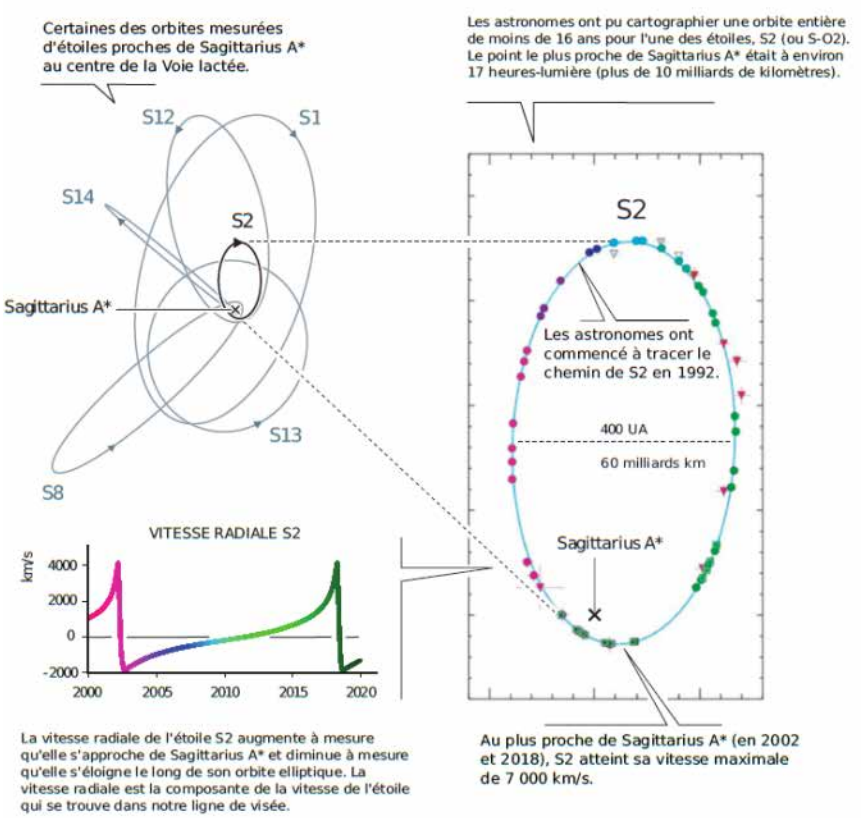


FIG. 109 – Étoiles les plus proches du centre de la Voie lactée. *Les orbites des étoiles constituent la preuve la plus convaincante à ce jour qu'un trou noir supermassif se cache dans Sagittarius A*. On estime que ce trou noir pèse environ 4 millions de masses solaires, comprimées dans une région qui n'est pas plus grande que notre système solaire.*

Ce que nous ne savons pas

Roger Penrose a montré que les trous noirs sont une conséquence directe de la théorie de la relativité générale, mais que cette théorie cesse de s'appliquer dans la gravité infiniment forte de la singularité. Des travaux intensifs sont menés dans le domaine de la physique théorique pour créer une nouvelle théorie de la gravité quantique. Celle-ci doit réunir les deux piliers de la physique, la théorie de la relativité et la mécanique quantique, qui se rencontrent à l'intérieur des trous noirs.

Parallèlement, les observations se rapprochent des trous noirs. Les travaux pionniers de Reinhard Genzel et d'Andrea Ghez ont ouvert la voie à de nouvelles générations de tests précis de la théorie de la relativité générale et de ses prédictions les plus étranges. Il est fort probable que ces mesures puissent également fournir des indices pour de nouvelles découvertes théoriques. L'Univers a encore bien des secrets et des surprises à livrer.

Les lauréats

— Roger Penrose, né en 1931 à Colchester au Royaume-Uni, docteur en 1957 de l'université de Cambridge, professeur à l'université d'Oxford ;
— Reinhard Genzel, né en 1952 à Bad Homburg vor der Höhe en Allemagne, docteur en 1978 de l'université de Bonn, directeur de l'institut Max-Planck de physique extraterrestre à Garching et professeur à l'université Berkeley en Californie ;
— Andrea Ghez, née en 1965 à New York, docteur en 1992 de l'institut de technologie de Californie à Pasadena, professeur à l'université de Californie à Los Angeles.

Bibliographie

— Penrose (Roger), *À la découverte des lois de l'univers* (trad. C. Laroche), Paris, Odile Jacob, 2007.
— Penrose (Roger), *Les cycles du temps* (trad. M. Filoche), Paris, Odile Jacob, 2013.
— Penrose (Roger), *La nouvelle physique de l'Univers* (trad. M. Filoche), Paris, Odile Jacob, 2018.

Des motifs cachés dans le climat et dans d'autres phénomènes complexes

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé de décerner le prix Nobel de physique 2021

> « pour des contributions révolutionnaires à notre compréhension des systèmes physiques complexes ».

Une moitié est attribuée conjointement à Syukuro Manabe, de l'université de Princeton, et à Klaus Hasselmann, de l'institut Max-Planck de météorologie à Hambourg,

> « pour la modélisation physique du climat de la Terre, la quantification de la variabilité et la prévision fiable du réchauffement climatique ».

L'autre moitié du prix revient à Giorgio Parisi, de l'université de Rome *La Sapienza*,

> « pour la découverte de l'interaction entre le désordre et les fluctuations dans les systèmes physiques, de l'échelle atomique à l'échelle planétaire ».

Les trois lauréats se partagent le prix pour leurs études de phénomènes complexes. Syukuro Manabe et Klaus Hasselmann ont jeté les bases de notre connaissance du climat de la Terre et de l'influence de l'homme sur celui-ci. Giorgio Parisi est récompensé pour ses contributions révolutionnaires à la théorie des phénomènes désordonnés et aléatoires.

Tous les systèmes complexes sont constitués d'un grand nombre d'éléments différents en interaction. Ils sont étudiés par les physiciens depuis quelques siècles et peuvent être difficiles à décrire mathématiquement. Ils peuvent avoir un très grand nombre de composants ou être régis par le hasard. Ils peuvent également être chaotiques, comme la météo : de petits écarts dans les valeurs initiales entraînent d'énormes différences à un stade ultérieur. Les lauréats de cette année ont tous contribué à une meilleure connaissance de ces systèmes et de leur évolution à long terme.

Le climat de la Terre est l'un des nombreux exemples de systèmes complexes. Manabe et Hasselmann reçoivent le prix Nobel pour leur

travail novateur dans le développement de modèles climatiques. Parisi est récompensé pour les solutions théoriques qu'il a apportées à un large éventail de problèmes dans le domaine de la théorie des systèmes complexes.

Syukuro Manabe a montré comment l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère entraîne une hausse des températures à la surface de la Terre. Dans les années 1960, il a dirigé le développement de modèles physiques du climat de la Terre et a été le premier à explorer l'interaction entre le bilan radiatif et le transport vertical des masses d'air. Ses travaux ont jeté les bases du développement des modèles climatiques.

Une dizaine d'années plus tard, Klaus Hasselmann a créé un modèle qui relie la météo et le climat, répondant ainsi à la question de savoir pourquoi les modèles climatiques peuvent être fiables alors que le temps est changeant et chaotique. Il a également mis au point des méthodes permettant d'identifier les signaux spécifiques, les empreintes, que les phénomènes naturels et les activités humaines impriment au climat. Ses méthodes ont été utilisées pour montrer que l'augmentation de la température de l'atmosphère est due aux émissions humaines de dioxyde de carbone.

Vers 1980, Giorgio Parisi a découvert des motifs cachés dans des matériaux complexes désordonnés. Ses découvertes comptent parmi les contributions les plus importantes à la théorie des systèmes complexes. Elles permettent de comprendre et de décrire de nombreux matériaux et phénomènes complexes différents et apparemment totalement aléatoires, non seulement en physique, mais aussi dans d'autres domaines très différents tels que les mathématiques, la biologie, les neurosciences et l'apprentissage automatique.

L'effet de serre est indispensable à la vie

Il y a deux cents ans, le physicien français Joseph Fourier a étudié l'équilibre énergétique entre le rayonnement solaire vers le sol et le rayonnement provenant du sol. Il a compris le rôle de l'atmosphère dans cet équilibre. À la surface de la Terre, le rayonnement solaire entrant est transformé en rayonnement sortant (la « chaleur obscure »). Ce dernier est absorbé par l'atmosphère, qui se réchauffe ainsi. Le rôle protecteur de l'atmosphère est appelé de nos jours « effet de serre ». Ce nom vient de sa ressemblance avec les vitres d'une serre, qui laissent passer les rayons chauffants du Soleil, mais retiennent la chaleur à l'intérieur. Les

processus radiatifs dans l'atmosphère sont néanmoins beaucoup plus complexes.

La tâche reste la même que celle entreprise par Fourier : étudier l'équilibre entre le rayonnement solaire à ondes courtes qui arrive sur notre planète et le rayonnement infrarouge à ondes longues émis par la Terre. De nombreux climatologues ont ajouté des détails au cours des deux derniers siècles. Les modèles climatiques contemporains sont des outils incroyablement puissants, non seulement pour comprendre le climat, mais aussi pour comprendre le réchauffement planétaire dont l'homme est responsable.

Ces modèles sont basés sur les lois de la physique et ont été développés à partir de modèles utilisés pour prédire la météo. La météo est décrite par des quantités telles que la température, les précipitations, le vent ou les nuages. Elle est influencée par ce qui se passe dans les océans et sur la terre ferme. Les modèles climatiques sont basés sur les propriétés statistiques calculées pour la météo, telles que les valeurs moyennes, les écarts types, les valeurs mesurées les plus élevées et les plus basses, etc. Ils ne peuvent pas nous dire quel temps il fera à Stockholm le 10 décembre de l'année prochaine, mais nous pouvons avoir une idée de la température ou de la quantité de précipitations auxquelles nous pouvons nous attendre en moyenne à Stockholm en décembre.

Établir le rôle du dioxyde de carbone

L'effet de serre est essentiel à la vie sur Terre. Il régit la température parce que les gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère (dioxyde de carbone, méthane, vapeur d'eau et autres gaz) absorbent d'abord le rayonnement infrarouge de la Terre et libèrent ensuite cette énergie absorbée, réchauffant ainsi l'air environnant et le sol en dessous.

Les gaz à effet de serre ne représentent en fait qu'une très faible proportion de l'atmosphère sèche de la Terre, qui se compose essentiellement d'azote et d'oxygène (99 % en volume). Le dioxyde de carbone ne représente que 0,04 % en volume. Le gaz à effet de serre le plus puissant est la vapeur d'eau, mais nous ne pouvons pas contrôler la concentration de vapeur d'eau dans l'atmosphère, alors que nous pouvons contrôler celle du dioxyde de carbone.

La quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère dépend fortement de la température, ce qui entraîne un mécanisme de rétroaction. Plus il y a de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, plus il fait chaud, plus la vapeur d'eau est retenue dans l'air, ce qui accroît l'effet de serre et fait

encore grimper les températures. Si le niveau de dioxyde de carbone diminue, une partie de la vapeur d'eau se condense et la température baisse.

C'est le chercheur suédois Svante Arrhenius, lauréat du prix Nobel, qui a apporté la première pièce du puzzle concernant l'impact du dioxyde de carbone. C'est d'ailleurs son collègue, le météorologue Nils Ekholm, qui en 1901 a été le premier à utiliser le mot « serre » pour décrire le stockage et la réémission de la chaleur dans l'atmosphère.

Arrhenius a compris la physique responsable de l'effet de serre à la fin du XIX^{e} siècle : le rayonnement sortant est proportionnel à la température absolue T du corps rayonnant à la puissance quatre (T^4). Plus la source de rayonnement est chaude, plus la longueur d'onde des rayons est courte. Le Soleil a une température de surface de 6 000 °C et émet principalement des rayons dans le spectre visible. La Terre, dont la température de surface n'est que de 15 °C, réémet un rayonnement infrarouge qui nous est invisible. Si l'atmosphère n'absorbait pas ce rayonnement, la température de surface ne dépasserait pas −18 °C.

Arrhenius cherchait en fait à déterminer les causes du phénomène découvert peu auparavant des périodes glaciaires. Il est arrivé à la conclusion que si la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère diminuait de moitié, cela suffirait pour que la Terre entre dans une nouvelle période glaciaire. Inversement, un doublement de la quantité de dioxyde de carbone augmenterait la température de 5 à 6 °C, un résultat qui par chance est étonnamment proche des estimations actuelles.

Un modèle novateur pour l'effet du dioxyde de carbone

Dans les années 1950, le physicien de l'atmosphère japonais Syukuro Manabe faisait partie des jeunes et talentueux chercheurs à Tokyo qui ont quitté le Japon, dévasté par la guerre, pour poursuivre leur carrière aux États-Unis. L'objectif des recherches de Manabe, comme celles d'Arrhenius environ soixante-dix ans plus tôt, était de comprendre comment l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone pouvait entraîner une hausse des températures. Cependant, alors qu'Arrhenius s'était concentré sur le bilan radiatif, Manabe a dirigé dans les années 1960 des travaux sur le développement de modèles physiques permettant d'intégrer le transport vertical des masses d'air dû à la convection, ainsi que la chaleur latente de la vapeur d'eau.

Pour rendre ces calculs gérables, il a choisi de réduire le modèle à une seule dimension : une colonne verticale de 40 kilomètres de haut

dans l'atmosphère. Malgré cela, des centaines d'heures de calcul ont été nécessaires pour tester le modèle en faisant varier les niveaux de gaz dans l'atmosphère. L'oxygène et l'azote avaient des effets négligeables sur la température de surface, tandis que le dioxyde de carbone avait un impact évident : lorsque la concentration de dioxyde de carbone doublait, la température mondiale augmentait de plus de 2 °C.

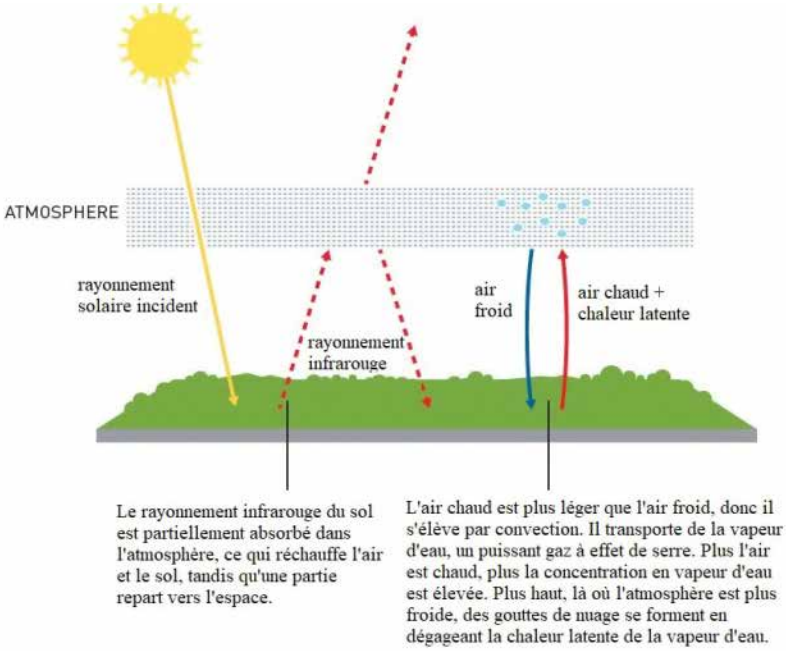


Fig. 110 – Le modèle climatique de Manabe. *Syukuro Manabe a été le premier chercheur à explorer l'interaction entre le bilan radiatif et le transport vertical des masses d'air dû à la convection, en tenant compte également de la chaleur apportée par le cycle de l'eau.*

Le modèle a confirmé que ce réchauffement était bien dû à l'augmentation du dioxyde de carbone, car il prévoyait une augmentation des températures plus proches du sol mais un refroidissement dans la haute atmosphère. Si les variations du rayonnement solaire étaient responsables de l'augmentation de la température, l'ensemble de l'atmosphère aurait dû se réchauffer en même temps.

Il y a soixante ans, les ordinateurs étaient des centaines de milliers

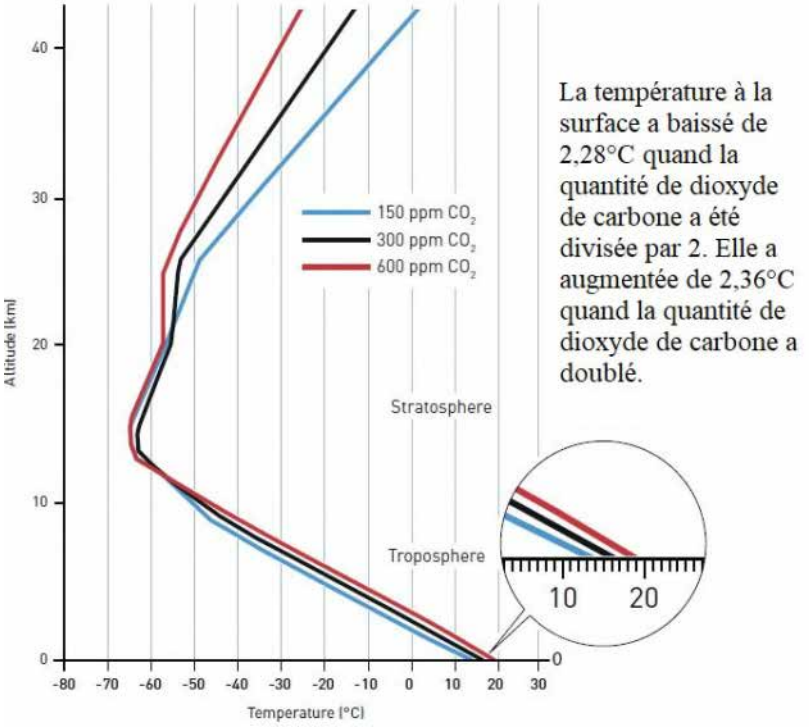


FIG. 111 – Le dioxyde de carbone réchauffe l'atmosphère. *L'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone entraîne une hausse des températures dans la basse atmosphère, tandis que la haute atmosphère se refroidit. Manabe confirme ainsi que la variation de température est due à l'augmentation des niveaux de dioxyde de carbone. Si elle était due à l'augmentation du rayonnement solaire, l'atmosphère entière aurait dû se réchauffer.*

de fois plus lents qu'aujourd'hui, de sorte que ce modèle était relativement simple. Mais Manabe en a bien saisi les principales caractéristiques. Il faut toujours simplifier, dit-il. On ne peut pas rivaliser avec la complexité de la nature : chaque goutte de pluie implique tellement de physique qu'il ne serait jamais possible de tout calculer. Les enseignements tirés du modèle unidimensionnel ont conduit à un modèle climatique en trois dimensions, que Manabe a publié en 1975. Il s'agissait là d'une nouvelle étape sur la voie de la compréhension des secrets du climat.

La météo est chaotique

Une dizaine d'années après Manabe, Klaus Hasselmann a réussi à relier la météo et le climat en trouvant un moyen de déjouer les changements météorologiques rapides et chaotiques qui gênaient tant les calculs. Notre planète connaît d'importants changements météorologiques parce que le rayonnement solaire est réparti de manière très inégale, à la fois géographiquement et dans le temps. La Terre étant ronde, moins de rayons solaires atteignent les hautes latitudes que les basses latitudes autour de l'équateur. De plus, l'axe de la Terre est incliné, ce qui entraîne des différences saisonnières pour le rayonnement entrant. Les différences de densité entre l'air chaud et l'air froid provoquent des transports de chaleur colossaux entre les différentes latitudes, entre l'océan et la terre, entre les masses d'air supérieures et inférieures, qui déterminent le temps qu'il fait sur notre planète.

Comme nous le savons tous, il est difficile de faire des prévisions fiables sur le temps qu'il fera au-delà des dix prochains jours. Il y a deux cents ans, le célèbre scientifique français Pierre-Simon de Laplace a écrit que si nous connaissions la position et la vitesse de toutes les particules de l'Univers, il devrait être possible de calculer tout ce qui s'est passé et tout ce qui se passera dans notre monde. En principe, cela devrait être vrai. Les lois du mouvement de Newton, vieilles de trois siècles, qui décrivent également les phénomènes de transport dans l'atmosphère, sont entièrement déterministes : elles ne sont pas régies par le hasard.

Pourtant, rien n'est plus faux lorsqu'il s'agit du temps qu'il fait. Cela s'explique en partie par le fait que, dans la pratique, il est impossible d'être suffisamment précis, d'indiquer la température de l'air, la pression, l'humidité ou les conditions de vent pour chaque point de l'atmosphère. De plus, les équations ne sont pas linéaires. De petits écarts

dans les valeurs initiales peuvent faire évoluer un système météorologique de manière totalement différente. La question de savoir si un papillon battant des ailes au Brésil pouvait provoquer une tornade au Texas a donné au phénomène le nom d'« effet papillon ». En pratique, cela signifie qu'il est impossible d'établir des prévisions météorologiques à long terme : le temps est chaotique. Cette découverte a été faite dans les années 1960 par le météorologue américain Edward Lorenz, qui a jeté les bases de l'actuelle théorie du chaos.

Donner du sens à des données bruyantes

Comment pouvons-nous produire des modèles climatiques fiables pour plusieurs décennies ou des centaines d'années à venir, alors que la météo est un exemple classique de système chaotique ? Vers 1980, Klaus Hasselmann a montré que les phénomènes météorologiques à évolution chaotique peuvent être décrits comme des bruits à évolution rapide, ce qui a permis de fonder les prévisions climatiques à long terme sur une base scientifique solide. En outre, il a mis au point des méthodes permettant d'identifier l'impact de l'homme sur la température globale observée.

Jeune doctorant en physique à Hambourg en Allemagne dans les années 1950, Hasselmann a travaillé sur la dynamique des fluides, puis a commencé à développer des observations et des modèles théoriques pour les vagues et les courants océaniques. Il s'est installé en Californie et a poursuivi ses travaux en océanographie, rencontrant des collègues tels que Charles David Keeling, avec qui les Hasselmann ont créé une chorale de madrigaux. Keeling est bien connu pour avoir commencé en 1958 ce qui est aujourd'hui la plus longue série de mesures du dioxyde de carbone atmosphérique, à l'observatoire de Mauna Loa de Hawaï. Hasselmann était loin de se douter que, dans ses travaux ultérieurs, il utiliserait régulièrement la courbe de Keeling, qui indique les variations de la concentration en dioxyde de carbone.

L'obtention d'un modèle climatique à partir de données météorologiques bruitées peut être illustrée en promenant un chien : le chien court sans laisse, d'avant en arrière, d'un côté à l'autre et autour de vos jambes. Comment pouvez-vous utiliser les traces du chien pour savoir si vous marchez ou si vous restez immobile ? Ou si vous marchez rapidement ou lentement ? Les traces du chien sont les changements du temps, votre marche est le climat calculé. Est-il possible de tirer des conclusions sur les tendances à long terme du climat à partir de données

météorologiques chaotiques et bruyantes ?

Une difficulté supplémentaire réside dans le fait que les fluctuations qui influencent le climat sont extrêmement variables dans le temps : elles peuvent être rapides, comme la force du vent ou la température de l'air, ou très lentes, comme la fonte des calottes glaciaires et le réchauffement des océans. Par exemple, un réchauffement uniforme d'un seul degré peut prendre un millier d'années pour l'océan, mais seulement quelques semaines pour l'atmosphère. L'astuce décisive a consisté à intégrer les changements météorologiques rapides dans les calculs en tant que bruit et à montrer comment ce bruit affecte le climat.

Hasselmann a créé un modèle climatique stochastique, ce qui signifie que le hasard est intégré au modèle. Il s'est inspiré de la théorie du mouvement brownien d'Albert Einstein, également appelée « marche aléatoire ». En utilisant cette théorie, Hasselmann a montré que l'évolution rapide de l'atmosphère peut en fait provoquer de lentes variations dans l'océan.

Discerner les traces de l'impact humain

Une fois le modèle des variations climatiques achevé, Hasselmann a développé des méthodes pour identifier l'impact de l'homme sur le système climatique. Il a constaté que les modèles, ainsi que les observations et les considérations théoriques, contiennent des informations adéquates sur les propriétés du bruit et des signaux. Par exemple, les variations du rayonnement solaire, des particules volcaniques ou des niveaux de gaz à effet de serre laissent des signaux uniques, des empreintes, qui peuvent être distinguées. Cette méthode d'identification des empreintes peut également être appliquée à l'effet de l'homme sur le système climatique. Hasselman a ainsi ouvert la voie à d'autres études sur le changement climatique, qui ont mis en évidence les traces de l'impact humain sur le climat à l'aide d'un grand nombre d'observations indépendantes.

Les modèles climatiques se sont affinés au fur et à mesure que les processus inclus dans les interactions complexes du climat ont été étudiés de manière plus approfondie, notamment grâce à des mesures par satellite et à des observations météorologiques. Les modèles montrent clairement une accélération de l'effet de serre. Depuis le milieu du XIX^{e} siècle, les niveaux de dioxyde de carbone dans l'atmosphère ont augmenté de 40 %. L'atmosphère terrestre n'a pas contenu autant de dioxyde de carbone depuis des centaines de milliers d'années. En conséquence, les mesures de température montrent que la planète s'est

réchauffée de 1 °C au cours des 150 dernières années.

Syukuro Manabe et Klaus Hasselmann ont contribué au plus grand bénéfice de l'humanité, dans l'esprit d'Alfred Nobel, en fournissant une base physique solide à notre connaissance du climat de la Terre. Nous ne pouvons plus dire que nous ne savions pas : les modèles climatiques sont sans équivoque. La Terre se réchauffe-t-elle ? Oui. La cause en est-elle l'augmentation des quantités de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ? Oui. Peut-on l'expliquer uniquement par des facteurs naturels ? Non. Les émissions de l'humanité sont-elles à l'origine de l'augmentation de la température ? Oui.

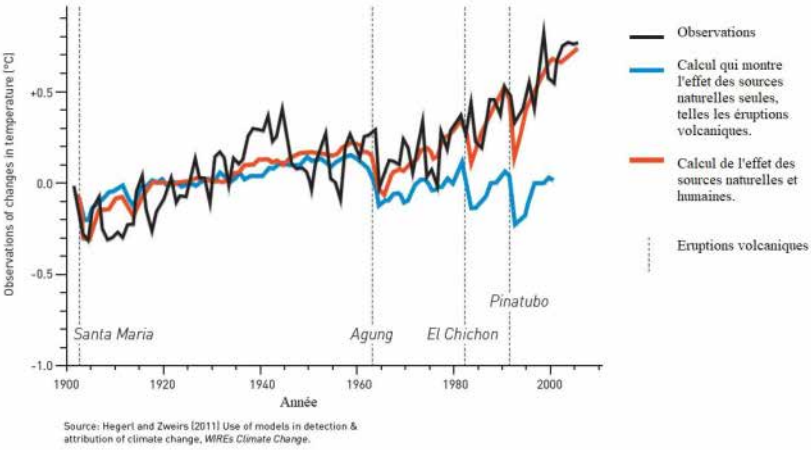


Fig. 112 – Identifier les empreintes dans le climat. *Klaus Hasselmann a développé des méthodes qui permettent de distinguer les causes naturelles et humaines (les empreintes) du réchauffement atmosphérique. Comparaison entre les changements de la température moyenne par rapport à la moyenne de 1901-1950 (°C).*

Des méthodes pour les systèmes désordonnés

Vers 1980, Giorgio Parisi a présenté ses découvertes sur la façon dont certains phénomènes apparemment aléatoires sont régis par des règles cachées. Son travail est aujourd'hui considéré comme l'une des plus importantes contributions à la théorie des systèmes complexes.

Les études modernes des systèmes complexes trouvent leur origine

dans la « mécanique statistique » développée dans la seconde moitié du XIX^e siècle par James C. Maxwell, Ludwig Boltzmann et J. Willard Gibbs. C'est ce dernier qui a donné son nom à ce domaine en 1884. La mécanique statistique est née de l'idée qu'un nouveau type de méthode était nécessaire pour décrire les systèmes composés d'un grand nombre de particules, tels que les gaz ou les liquides. Cette méthode devait prendre en compte les mouvements aléatoires des particules. L'idée de base était donc de calculer l'effet moyen des particules au lieu d'étudier chaque particule individuellement. Par exemple, la température d'un gaz est une mesure de la valeur moyenne de l'énergie des particules du gaz. La mécanique statistique a été un grand succès, car elle a fourni une explication microscopique aux propriétés macroscopiques des gaz et des liquides, telles que la température et la pression.

Les particules d'un gaz peuvent être considérées comme de minuscules billes, qui volent à des vitesses qui augmentent avec la température. Lorsque la température baisse ou que la pression augmente, les billes se condensent d'abord en liquide, puis en solide. Ce solide est souvent un cristal, où les billes sont organisées de manière régulière. Toutefois, si ce changement se produit rapidement, les billes peuvent former un motif irrégulier qui ne change pas, même si le liquide est refroidi ou comprimé. Si l'expérience est répétée, les billes prendront une nouvelle forme, bien que le changement se soit produit exactement de la même manière. Pourquoi les résultats sont-ils différents ?

Comprendre la complexité

Ces billes comprimées constituent un modèle simple pour le verre ordinaire et pour les matériaux granuleux, tels que le sable ou le gravier. Cependant, le sujet du travail original de Parisi était un autre type de système : le verre de *spin*. Il s'agit d'un type particulier d'alliage métallique, dans lequel par exemple des atomes de fer sont mélangés de manière aléatoire à un réseau d'atomes de cuivre. Même si les atomes de fer sont peu nombreux, ils modifient les propriétés magnétiques du matériau de manière radicale et très surprenante. Chaque atome de fer se comporte comme un petit aimant, ou spin, qui est affecté par les autres atomes de fer qui lui sont proches. Dans un aimant ordinaire, tous les spins pointent dans la même direction, mais dans un verre de spin, ils sont frustrés. Certaines paires de spins veulent pointer dans la même direction et d'autres dans des directions opposées. Comment trouvent-elles alors une orientation optimale ?

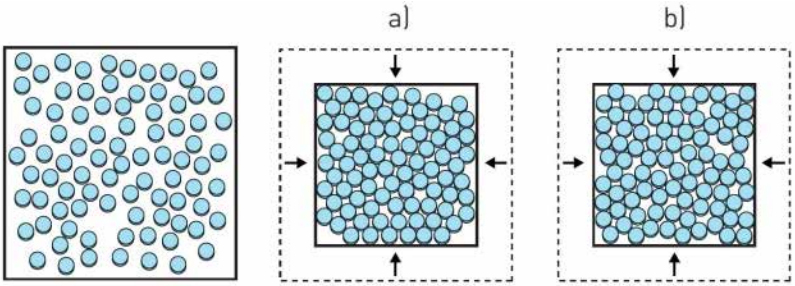


Fig. 113 – Les mathématiques des systèmes complexes désordonnés. *Chaque fois que plusieurs billes identiques sont pressées ensemble, un nouveau motif irrégulier se forme bien qu'elles aient été pressées exactement de la même manière. Qu'est-ce qui régit ce résultat ? Giorgio Parisi a découvert une structure cachée dans les systèmes désordonnés complexes, comme ces billes, et a trouvé un moyen de les décrire mathématiquement.*

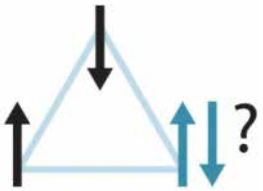


Fig. 114 – Frustration. *Lorsqu'un spin pointe vers le haut et l'autre vers le bas, le troisième ne peut pas les satisfaire tous les deux en même temps, car les spins voisins veulent pointer dans des directions différentes. Comment les spins trouvent-ils une orientation optimale ? Giorgio Parisi est passé maître dans l'art de répondre à ces questions pour un grand nombre de matériaux et de phénomènes différents.*

Dans l'introduction de son livre sur les verres de spin, Parisi écrit que l'étude des verres de spin est semblable aux tragédies de Shakespeare. Si vous ressentez de la sympathie pour deux personnages qui se détestent mutuellement, cela peut être frustrant. C'est encore plus vrai dans une tragédie classique, où des amis et des ennemis fortement émotifs se rencontrent sur scène. Comment minimiser la tension dans la salle ?

Les verres de spin et leurs propriétés exotiques constituent un modèle pour les systèmes complexes. Dans les années 1970, de nombreux physiciens, dont plusieurs lauréats du prix Nobel, ont cherché un moyen de décrire les mystérieux verres de spin. L'une des méthodes qu'ils ont utilisées est la « méthode des répliques », une technique mathématique dans laquelle de nombreuses copies ou répliques du système sont traitées en même temps. Cependant, d'un point de vue physique, les résultats des calculs initiaux n'étaient pas possibles.

En 1979, Parisi a fait une percée décisive en montrant comment la méthode des répliques pouvait être ingénieusement utilisée pour résoudre un problème de verre de spin. Il a découvert une structure cachée dans les répliques et a trouvé un moyen de la décrire mathématiquement. Il a fallu de nombreuses années pour que la solution de Parisi soit démontrée mathématiquement. Depuis, sa méthode a été utilisée dans de nombreux systèmes désordonnés et est devenue une pierre angulaire de la théorie des systèmes complexes.

Les fruits de la frustration sont nombreux et variés

Les verres de spin et les matériaux granulaires sont tous deux des exemples de systèmes frustrés, dans lesquels les différents constituants doivent s'arranger d'une manière qui est un compromis entre des forces qui s'opposent. La question est de savoir comment ils se comportent et quels sont les résultats. Parisi est passé maître dans l'art de répondre à ces questions pour de nombreux matériaux et phénomènes différents. Ses découvertes fondamentales sur la structure des verres de spin ont été si profondes qu'elles ont influencé non seulement la physique, mais aussi les mathématiques, la biologie, les neurosciences et l'apprentissage automatique, car tous ces domaines comportent des problèmes directement liés à la frustration.

Parisi a également étudié de nombreux autres phénomènes dans lesquels les processus aléatoires jouent un rôle décisif dans la façon dont les structures sont créées et se développent. Il a abordé des questions

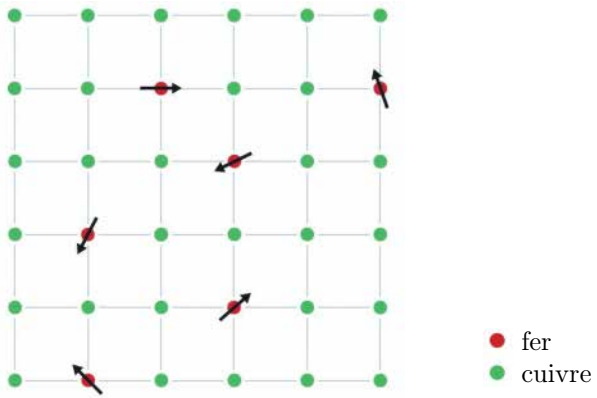


FIG. 115 – Un verre de spin. *Un verre de spin est un alliage métallique dans lequel par exemple des atomes de fer sont mélangés de manière aléatoire à un réseau d'atomes de cuivre. Chaque atome de fer se comporte comme un petit aimant, ou spin, qui est influencé par les autres aimants qui l'entourent. Cependant, dans un verre de spin, ils sont frustrés et ont du mal à choisir la direction dans laquelle ils doivent s'orienter. Grâce à ses études sur les verres de spin, Parisi a développé une théorie des phénomènes désordonnés et aléatoires qui s'applique à de nombreux autres systèmes complexes.*

telles que

— pourquoi les périodes glaciaires reviennent-elles périodiquement ?
— existe-t-il une description mathématique plus générale du chaos et des systèmes turbulents ?
— comment des motifs apparaissent-ils dans un murmure de milliers d'étourneaux ?

Cette dernière question peut sembler très éloignée du verre de spin. Cependant, Parisi a déclaré que la plupart de ses recherches ont porté sur la manière dont des comportements individuels simples donnent lieu à des comportements collectifs complexes. Cela s'applique aussi bien aux verres de spin qu'aux étourneaux.

Les lauréats

— Syukuro Manabe, né en 1931 à Shingu au Japon, docteur en 1958 de l'université de Tokyo, météorologue à l'université de Princeton aux États-Unis ;
— Klaus Hasselmann, né en 1931 à Hambourg en Allemagne, docteur en 1957 de l'université de Göttingen, professeur à l'institut Max-Planck de météorologie à Hambourg ;
— Giorgio Parisi, né en 1948 à Rome, docteur en 1970 de l'université de Rome *La Sapienza*, professeur dans cette même université.

Bibliographie

— Parisi (Giorgio), *Comme un vol d'étourneaux* (trad. S. Lem), Paris, Flammarion, 2022.

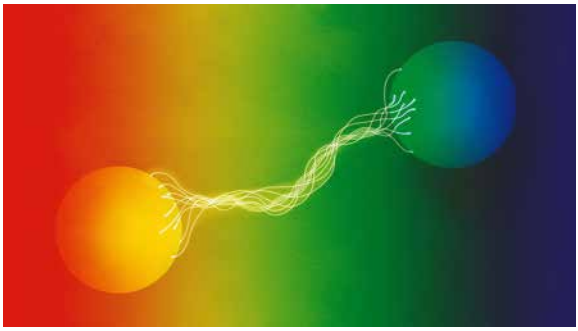
L'intrication quantique

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2022 à Alain Aspect, de l'université Paris-Saclay et de l'École polytechnique, à John F. Clauser, de la société J. F. Clauser & Assoc. en Californie, et à Anton Zeilinger, de l'université de Vienne et de l'Académie autrichienne des sciences,

> « pour leurs expériences avec des photons intriqués, qui établissent la violation des inégalités de Bell et ouvrent la voie à la science de l'information quantique ».

Grâce à des expériences révolutionnaires, les lauréats ont montré qu'il était possible d'étudier et de contrôler des particules qui se trouvent dans des états intriqués. Ce qui arrive à l'une des particules d'une paire intriquée détermine ce qui arrive à l'autre, même si elles sont vraiment trop éloignées l'une de l'autre pour s'influencer mutuellement. Le développement d'outils expérimentaux par les lauréats a jeté les bases d'une nouvelle ère de la technologie quantique.

Les fondements de la mécanique quantique ne sont pas seulement une question théorique ou philosophique. D'intenses travaux de recherche et de développement sont en cours pour utiliser les propriétés particulières des systèmes de particules afin de construire des ordinateurs quantiques, d'améliorer les mesures, de construire des réseaux quantiques et d'établir des communications cryptées sécurisées.



De nombreuses applications reposent sur la façon dont la mécanique quantique permet à deux particules ou plus d'exister dans un

état commun, quelle que soit la distance qui les sépare. C'est ce qu'on appelle l'intrication, qui a été l'un des éléments les plus débattus de la mécanique quantique depuis que la théorie a été formulée. Albert Einstein a parlé d'une « action à distance qui donne la chair de poule » et Erwin Schrödinger a déclaré qu'il s'agissait de la caractéristique la plus importante de la mécanique quantique.

Les lauréats de 2022 ont exploré ces états quantiques intriqués et leurs expériences ont jeté les bases de la révolution que connaît actuellement la technologie quantique.

Loin de l'expérience quotidienne

Lorsque deux particules se trouvent dans des états quantiques intriqués, une personne qui mesure une propriété d'une particule peut immédiatement déterminer le résultat d'une mesure équivalente sur l'autre particule, sans avoir besoin de vérifier.

La particularité de la mécanique quantique réside dans le fait que les équivalents des balles (fig. 116) n'ont pas d'état déterminé tant qu'ils ne sont pas mesurés. C'est comme si les deux balles étaient grises, jusqu'à ce que quelqu'un regarde l'une d'entre elles. Elle peut alors prendre au hasard tout le noir auquel la paire de balles a accès ou se montrer blanche. L'autre balle prend immédiatement la couleur opposée.

Mais comment peut-on savoir que les balles n'avaient pas chacune une couleur fixe au départ ? Même si elles semblaient grises, elles avaient peut-être une étiquette cachée à l'intérieur, indiquant la couleur qu'elles devaient prendre si quelqu'un les regardait.

Une partie importante de la recherche récompensée par le prix Nobel de physique 2022 est une connaissance théorique appelée « inégalités de Bell ». Les inégalités de Bell permettent de faire la différence entre l'indétermination de la mécanique quantique et une description alternative utilisant des instructions secrètes appelées « variables cachées ». Des expériences ont montré que la nature se comporte comme le prévoit la mécanique quantique. Les balles sont grises, sans information secrète, et c'est le hasard qui détermine laquelle devient noire et laquelle devient blanche au cours d'une expérience.

La ressource la plus importante de la mécanique quantique

Les états quantiques intriqués offrent de nouvelles possibilités de stockage, de transfert et de traitement de l'information.

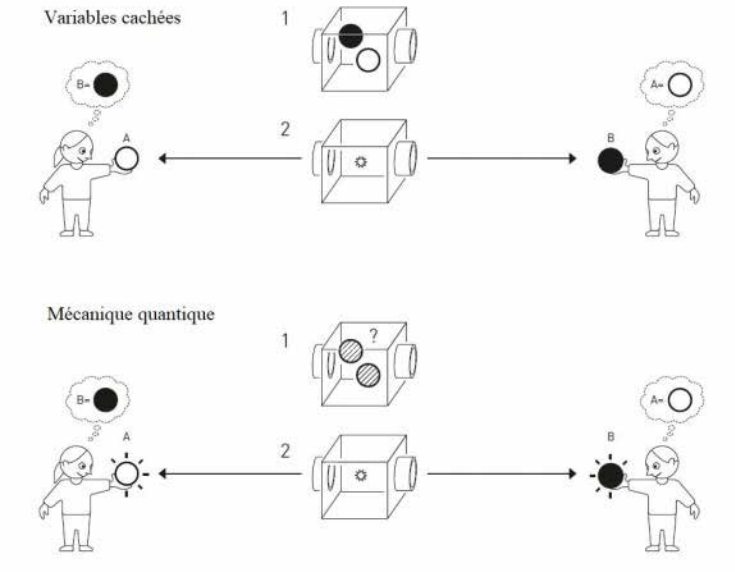


FIG. 116 – La couleur existe-t-elle quand personne ne regarde ? *Les paires intriquées de la mécanique quantique peuvent être comparées à une machine qui lance des balles de couleurs opposées dans des directions opposées. Lorsque Robert (à droite) attrape une balle et voit qu'elle est noire, il sait immédiatement qu'Alice (à gauche) a attrapé une balle blanche. Dans une théorie avec des variables cachées, les balles auraient toujours contenu une information cachée sur la couleur à montrer. Cependant, la mécanique quantique dit que les balles étaient grises jusqu'à ce que quelqu'un les regarde, l'une devenant alors aléatoirement blanche et l'autre noire. Les inégalités de Bell montrent qu'il existe des expériences qui peuvent faire la différence entre ces deux cas. Ces expériences ont montré que la description de la mécanique quantique était correcte.*

Des phénomènes intéressants se produisent lorsque les particules d'une paire intriquée voyagent dans des directions opposées et lorsque l'une d'entre elles rencontre une troisième particule de telle sorte qu'elles deviennent intriquées. Elles entrent alors dans un nouvel état partagé. La troisième particule perd son identité, mais ses propriétés originales ont été transférées à la particule de la paire originale. Cette façon de transférer un état quantique inconnu d'une particule à une autre est appelée « téléportation quantique ». Ce type d'expérience a été réalisé pour la première fois en 1997 par Anton Zeilinger et ses collègues.

De manière remarquable, la téléportation quantique est le seul moyen de transférer une information quantique d'un système à un autre sans en perdre une partie. Il est absolument impossible de mesurer toutes les propriétés d'un système quantique et d'envoyer ensuite les informations à un destinataire qui souhaite reconstruire le système. En effet, un système quantique peut contenir simultanément plusieurs versions de chaque propriété, chaque version ayant une certaine probabilité d'apparaître lors d'une mesure. Dès que la mesure est effectuée, il ne reste qu'une seule version, celle qui a été lue par l'instrument de mesure. Les autres ont disparu et il est impossible de savoir quoi que ce soit à leur sujet. Cependant, des propriétés quantiques totalement inconnues peuvent être transférées par téléportation quantique et apparaître intactes dans une autre particule, mais au prix de leur destruction dans la particule d'origine.

Une fois cette démonstration expérimentale faite, l'étape suivante a consisté à utiliser deux paires de particules intriquées. Si une particule de chaque paire est mise en contact d'une manière particulière, les particules non perturbées de chaque paire peuvent être intriquées bien qu'elles n'aient jamais été en contact l'une avec l'autre. Cette permutation de l'intrication a été démontrée pour la première fois en 1998 par le groupe de recherche d'Anton Zeilinger.

Des paires de photons intriquées peuvent être envoyées dans des directions opposées par des fibres optiques et fonctionner comme des signaux dans un réseau quantique. L'intrication entre deux paires permet d'allonger les distances entre les nœuds d'un tel réseau. Il existe une limite à la distance à laquelle les photons peuvent être envoyés à travers une fibre optique avant d'être absorbés ou de perdre leurs propriétés. Les signaux lumineux ordinaires peuvent être amplifiés en cours de route, mais cela ne fonctionne pas avec les paires intriquées. Un amplificateur doit capter et mesurer la lumière, ce qui rompt l'intrica-

tion. Cependant, l'échange d'intrication signifie qu'il est possible d'envoyer l'état d'origine plus loin, le transférant ainsi sur de plus longues distances que ce qui aurait été possible autrement.

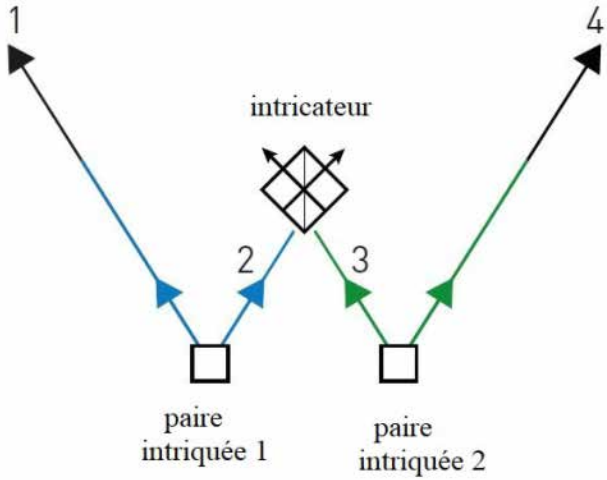


FIG. 117 – Des particules intriquées qui ne se sont jamais rencontrées. *Deux paires de particules intriquées sont émises par des sources différentes. Une particule de chaque paire est mise en contact d'une manière spéciale qui les rend intriquées. Les deux autres particules (1 et 4 dans le diagramme) sont alors également intriquées. De cette manière, deux particules qui n'ont jamais été en contact peuvent devenir intriquées.*

Du paradoxe à l'inégalité

Ces progrès reposent sur de nombreuses années de développement. Tout a commencé avec la découverte stupéfiante que la mécanique quantique permet de diviser un système quantique unique en plusieurs parties séparées les unes des autres, mais qui agissent toujours comme une seule unité.

Cela va à l'encontre de toutes les idées habituelles sur les causes et les effets et sur la nature de la réalité. Comment une chose peut-elle être influencée par un événement se produisant ailleurs sans être atteinte par une forme de signal provenant de cet événement ? Un signal ne peut pas voyager plus vite que la lumière. Mais en mécanique quantique, il ne

semble pas y avoir besoin d'un signal pour relier les différentes parties d'un système étendu.

Albert Einstein pensait que c'était irréalisable et s'est penché sur ce phénomène avec ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen. Ils présentèrent leur raisonnement en 1935 : la mécanique quantique ne leur semblait pas fournir une description complète de la réalité. C'est ce que l'on a appelé le « paradoxe EPR », d'après les initiales des chercheurs.

La question était de savoir s'il pouvait exister une description plus complète du monde, dont la mécanique quantique ne serait qu'une partie. Celle-ci pourrait, par exemple, fonctionner grâce à des particules toujours porteuses d'une information cachée sur ce qu'elles montreront à l'issue d'une expérience. Toutes les mesures montreraient alors les propriétés qui existent exactement à l'endroit où les mesures sont effectuées. Ce type d'information est souvent appelé « variable cachée locale ».

Le physicien nord-irlandais John Stewart Bell (1928-1990), qui travaillait au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, a examiné le problème de plus près. Il a découvert qu'il existe un type d'expérience qui permet de déterminer si le monde est purement quantique ou s'il peut exister une autre description avec des variables cachées. Si l'expérience est répétée plusieurs fois, toutes les théories avec des variables cachées présentent une corrélation entre les résultats qui doit être inférieure ou égale à une valeur spécifique. C'est ce qu'on appelle « l'inégalité de Bell ».

Cependant, la mécanique quantique peut violer cette inégalité. Elle prédit des valeurs plus élevées pour la corrélation entre les résultats que ne le permettent les variables cachées.

John Clauser s'est intéressé aux fondements de la mécanique quantique lorsqu'il était étudiant dans les années 1960. Il n'a pas pu se défaire de l'idée de John Bell une fois qu'il l'a lue. Finalement, avec trois autres chercheurs, il a pu proposer une expérience réaliste qui pouvait être utilisée pour tester une inégalité de Bell.

L'expérience consiste à envoyer une paire de particules intriquées dans des directions opposées. Dans la pratique, on utilise des photons qui ont une propriété appelée « polarisation ». Lorsque les particules sont émises, la direction de la polarisation est indéterminée. Tout ce qui est certain, c'est que les particules ont une polarisation parallèle. Ceci peut être étudié en utilisant un filtre qui laisse passer la polarisation orientée dans une direction particulière (figure 118). C'est l'effet utilisé dans de nombreuses lunettes de soleil, qui bloquent la lumière polarisée

dans un certain plan, par exemple par la réflexion sur l'eau.

Si les deux particules de l'expérience sont envoyées vers des filtres orientés dans le même plan, par exemple verticalement, et que l'une d'entre elles passe à travers, l'autre passera également à travers. Si elles sont perpendiculaires l'une à l'autre, l'une sera arrêtée tandis que l'autre passera. L'astuce consiste à faire les mesures avec les filtres placés dans des directions différentes, à des angles obliques, car les résultats peuvent alors varier : parfois les deux passent, parfois une seule, parfois aucune. La fréquence à laquelle les deux particules passent à travers le filtre dépend de l'angle entre les filtres.

La mécanique quantique conduit à une corrélation entre les mesures. La probabilité qu'une particule passe dépend de l'angle du filtre qui a testé la polarisation de sa partenaire du côté opposé du dispositif expérimental. Cela signifie que les résultats des deux mesures, à certains angles, violent une inégalité de Bell et présentent une corrélation plus forte que si les résultats étaient régis par des variables cachées et étaient déjà prédéterminés au moment de l'émission des particules.

Une inégalité violée

John Clauser s'est immédiatement attelé à la réalisation de cette expérience. Il a construit un appareil qui émet deux photons intriqués à la fois, chacun vers un filtre qui teste leur polarisation. En 1972, avec son doctorant Stuart Freedman (1944-2012), il a pu obtenir un résultat qui constituait une violation claire d'une inégalité de Bell et qui correspondait aux prédictions de la mécanique quantique.

Dans les années qui ont suivi, John Clauser et d'autres physiciens ont continué à discuter de l'expérience et de ses limites. L'une d'entre elles était que l'expérience était généralement inefficace, tant au niveau de la production que de la détection des particules. La mesure était également prédéfinie, les filtres étant placés à des angles fixes. Il y avait donc des failles qui permettaient à un observateur de remettre en question les résultats : et si le dispositif expérimental sélectionnait d'une manière ou d'une autre les particules qui présentaient une forte corrélation et ne détectait pas les autres ? Dans ce cas, les particules pourraient toujours être porteuses d'informations cachées.

Il était difficile d'éliminer cette faille particulière, car les états quantiques enchevêtrés sont très fragiles et difficiles à gérer. Il est nécessaire de traiter avec des photons individuels. Le physicien français Alain Aspect ne s'est pas laissé intimider et a construit une nouvelle version

de la configuration qu'il a affinée au cours de plusieurs itérations. Dans son expérience, il a pu enregistrer les photons qui traversaient le filtre et ceux qui ne le traversaient pas. Cela signifie que davantage de photons ont été détectés et que les mesures ont été meilleures.

Dans la dernière variante de ses tests, il a également pu orienter les photons vers deux filtres différents placés à des angles différents. La finesse résidait dans un mécanisme qui changeait la direction des photons intriqués après qu'ils ont été créés et émis à partir de leur source. Les filtres n'étant distants que de six mètres, la commutation devait se faire en quelques milliardièmes de seconde. Si l'information sur le filtre où le photon arriverait influençait la façon dont il était émis par la source, il n'arriverait pas à ce filtre. De même, l'information sur les filtres d'un côté de l'expérience ne pourrait pas atteindre l'autre côté et affecter le résultat de la mesure.

Alain Aspect a ainsi comblé une lacune importante et fourni un résultat très clair : la mécanique quantique est correcte et il n'y a pas de variables cachées.

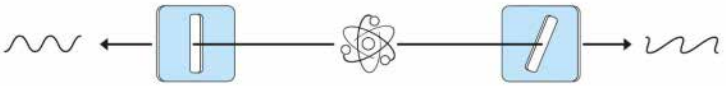
L'ère de l'information quantique

Ces expériences et d'autres similaires ont jeté les bases de l'intense recherche actuelle dans le domaine de la science de l'information quantique.

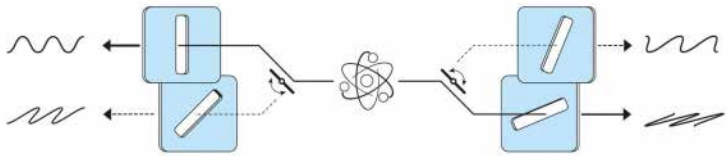
La possibilité de manipuler et de gérer les états quantiques et toutes leurs couches de propriétés nous donne accès à des outils au potentiel inattendu. C'est la base de l'informatique quantique, du transfert et du stockage d'informations quantiques et des algorithmes de cryptage quantique. Des systèmes comportant plus de deux particules, toutes intriquées, sont aujourd'hui utilisés. Anton Zeilinger et ses collègues ont été les premiers à les explorer.

Ces outils de plus en plus perfectionnés permettent de se rapprocher d'applications réalistes. Des états quantiques intriqués ont été mis en évidence entre des photons envoyés à travers des dizaines de kilomètres de fibre optique, et entre un satellite et une station au sol. En peu de temps, les chercheurs du monde entier ont trouvé de nombreuses nouvelles façons d'utiliser la propriété la plus puissante de la mécanique quantique.

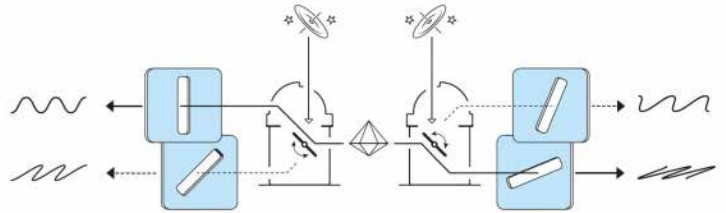
La première révolution quantique nous a donné les transistors et les lasers, mais nous entrons à présent dans une nouvelle ère grâce aux outils contemporains permettant de manipuler des systèmes de



John Clauser a utilisé des atomes de calcium capables d'émettre des photons intriqués après les avoir éclairés avec une lumière spéciale. Il a installé un filtre de chaque côté pour mesurer la polarisation des photons. Après une série de mesures, il a pu montrer qu'elles violaient une inégalité de Bell.



Alain Aspect a développé cette expérience en utilisant une nouvelle méthode d'excitation des atomes afin qu'ils émettent des photons intriqués à un taux plus élevé. Il pouvait également passer d'un réglage à l'autre, de sorte que le système ne contenait aucune information préalable susceptible d'affecter les résultats.



Anton Zeilinger a ensuite réalisé d'autres tests des inégalités de Bell. Il a créé des paires de photons intriqués en faisant briller un laser sur un cristal spécial et a utilisé des nombres aléatoires pour passer d'un paramètre de mesure à l'autre. Une expérience a utilisé des signaux provenant de galaxies lointaines pour contrôler les filtres et s'assurer que les signaux ne pouvaient pas s'influencer mutuellement.

FIG. 118 – *Expériences autour des inégalités de Bell.*

particules intriquées.

Les lauréats

— Alain Aspect, né en 1947 à Agen, docteur en 1983 de l'université Paris-Sud à Orsay, professeur à l'institut d'optique théorique et appliquée de l'université Paris-Saclay et à l'École polytechnique à Palaiseau ;
— John F. Clauser, né en 1942 à Pasadena en Californie, docteur en 1969 de l'université de Columbia à New York, chercheur en physique chez J. F. Clauser & Assoc. à Walnut Creek en Californie ;
— Anton Zeilinger, né en 1945 à Ried im Innkreis en Autriche, docteur en 1971 de l'université de Vienne, professeur dans cette même université et chercheur à l'Académie autrichienne des sciences.

Bibliographie

— Aspect (Alain), *Einstein et les révolutions quantiques*, Paris, CNRS, 2019.
— Zeilinger (Anton), *Le Bal des photons* (trad. E. Roques et O. Courcelle), Paris, Flammarion, 2023.

Des impulsions lumineuses attosecondes

L'Académie royale des sciences de Suède a décidé d'attribuer le prix Nobel de physique 2023 à

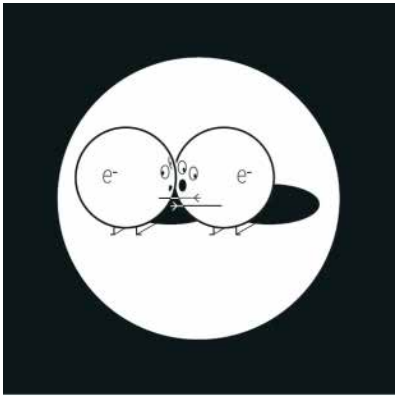
— Pierre Agostini, de l'université d'État de l'Ohio à Columbus,
— Ferenc Krausz, de l'institut Max-Planck d'optique quantique à Garching et de l'université Louis-et-Maximilien à Munich en Allemagne,
— Anne L'Huillier, de l'université de Lund en Suède,

« pour des méthodes expérimentales qui produisent des impulsions lumineuses attosecondes pour l'étude de la dynamique des électrons dans la matière ».

Grâce à leurs expériences, les lauréats ont créé des éclairs de lumière suffisamment courts pour prendre des clichés des mouvements extrêmement rapides des électrons. Anne L'Huillier a découvert un nouvel effet de l'interaction de la lumière laser avec les atomes d'un gaz. Pierre Agostini et Ferenc Krausz ont démontré que cet effet pouvait être utilisé pour créer des impulsions lumineuses plus courtes que ce qui était possible auparavant.

Des électrons dans des impulsions lumineuses

Un minuscule colibri peut battre des ailes 80 fois par seconde. Nous ne pouvons percevoir que le bruit d'un vrombissement et un mouvement flou. Pour les sens des humains, les mouvements rapides se confondent et il est impossible d'observer des événements extrêmement brefs. Nous devons recourir à des astuces technologiques pour capturer ou représenter ces instants très brefs.



La photographie à haute vitesse et l'éclairage stroboscopique permettent de capturer des images détaillées de phénomènes fugaces. Une photographie très précise d'un colibri en vol nécessite un temps d'exposition beaucoup plus court qu'un seul battement d'aile. Plus l'événement est rapide, plus la photo doit être prise rapidement pour capturer l'instant.

Le même principe s'applique à toutes les méthodes utilisées pour mesurer ou représenter des processus rapides : toute mesure doit être effectuée plus rapidement que le temps nécessaire pour que le système étudié subisse un changement notable, sinon le résultat est vague. Les lauréats de cette année ont mené des expériences qui mettent en évidence une méthode pour produire des impulsions lumineuses suffisamment brèves pour capturer des images de processus à l'intérieur des atomes et des molécules.

L'échelle de temps naturelle des atomes est incroyablement courte. Dans une molécule, les atomes peuvent se déplacer et tourner en quelques millionièmes de milliardième de seconde (femtosecondes). Ces mouvements peuvent être étudiés avec les impulsions les plus courtes que l'on puisse produire avec un laser. Mais lorsque des atomes entiers bougent, l'échelle de temps est déterminée par leurs noyaux lourds et de grande taille, qui sont extrêmement lents par rapport aux électrons légers et agiles. Lorsque les électrons bougent à l'intérieur des atomes ou des molécules, ils le font si rapidement que les mouvements apparaissent flous en l'espace d'une femtoseconde. Dans le monde des électrons, les positions et les énergies changent à des vitesses comprises entre une et quelques centaines d'attosecondes, une attoseconde étant un milliardième de milliardième de seconde.

Une attoseconde est si courte que le nombre d'attosecondes dans une seconde est le même que le nombre de secondes qui se sont écoulées depuis la naissance de l'Univers, il y a 13,8 milliards d'années. À une échelle plus proche, nous pouvons imaginer un éclair de lumière envoyé d'un bout à l'autre d'une pièce : cela prend dix milliards d'attosecondes.

La femtoseconde a longtemps été considérée comme la limite des éclats lumineux qu'il était possible de produire. Il ne suffisait pas d'améliorer la technologie existante pour observer les processus se déroulant sur les échelles de temps étonnamment brèves des électrons ; il fallait quelque chose d'entièrement nouveau. Les lauréats de l'année 2023 ont mené des expériences qui ont ouvert le nouveau champ de recherche de la physique de l'attoseconde.

FIG. 119 – *Les mouvements des électrons dans les atomes et les molécules sont si rapides qu'ils sont mesurés en attosecondes. Une attoseconde est à une seconde ce qu'une seconde est à l'âge de l'Univers.*

Des impulsions plus courtes grâce à des harmoniques élevées

La lumière est constituée d'ondes, des vibrations dans les champs électriques et magnétiques, qui se déplacent dans le vide plus rapidement que toute autre chose. Ces ondes ont des longueurs d'onde différentes, qui correspondent à des couleurs différentes. Par exemple, la lumière rouge a une longueur d'onde d'environ 700 nanomètres, soit un centième de la largeur d'un cheveu, et elle vibre environ quatre cent trente mille milliards de fois par seconde. Nous pouvons imaginer que l'impulsion lumineuse la plus courte possible corresponde à la durée d'une seule période de l'onde lumineuse, le cycle au cours duquel elle monte jusqu'à un pic, redescend jusqu'à un creux et revient à son point de départ. Dans ce cas, les longueurs d'onde utilisées dans les systèmes laser ordinaires ne peuvent jamais descendre en dessous d'une femtoseconde, de sorte que cette longueur d'onde était considérée dans les années 1980 comme une limite absolue pour les impulsions lumineuses les plus courtes possibles.

Les mathématiques qui décrivent les ondes démontrent que n'importe quelle forme d'onde peut être construite si l'on utilise suffisamment d'ondes de tailles, de longueurs d'onde et d'amplitudes (distances entre les pics et les creux) adéquates. L'astuce des impulsions attosecondes réside dans le fait qu'il est possible de produire des impulsions plus courtes en combinant des longueurs d'onde plus nombreuses et plus courtes.

L'observation des mouvements des électrons à l'échelle atomique nécessite des impulsions lumineuses suffisamment courtes, ce qui implique de combiner des ondes courtes de plusieurs longueurs d'onde

différentes.

Pour ajouter de nouvelles longueurs d'onde à la lumière, il faut plus qu'un simple laser. La clé de l'accès à l'instant le plus bref jamais étudié est un phénomène qui se produit lorsque la lumière laser traverse un gaz. La lumière interagit avec ses atomes et provoque des harmoniques, c'est-à-dire des ondes qui accomplissent un certain nombre de cycles entiers pour chaque cycle de l'onde d'origine. On peut comparer ce phénomène aux harmoniques qui donnent à un son son caractère particulier, nous permettant d'entendre la différence entre la même note jouée sur une guitare et sur un piano.

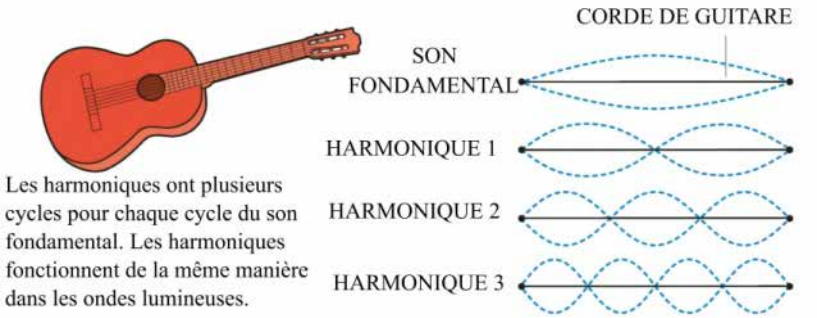


FIG. 120 – *Les harmoniques ont plusieurs cycles pour chaque cycle du son fondamental. Les harmoniques fonctionnent de la même manière dans les ondes lumineuses.*

En 1987, Anne L'Huillier et ses collègues d'un laboratoire français ont réussi à produire et à mettre en évidence des harmoniques à l'aide d'un faisceau laser infrarouge traversant un gaz noble. La lumière infrarouge a produit des harmoniques plus nombreuses et plus fortes que le laser de longueur d'onde plus courte utilisé dans les expériences précédentes. Dans cette expérience, de nombreuses harmoniques de même intensité lumineuse ont été observées.

Dans une série d'articles, L'Huillier a continué à explorer cet effet au cours des années 1990, y compris dans sa nouvelle base, l'université de Lund. Ses résultats ont contribué à la compréhension théorique de ce phénomène, ce qui a permis de jeter les fondements de la percée expérimentale suivante.

Les électrons échappés créent des harmoniques

Lorsque la lumière laser pénètre dans le gaz et affecte ses atomes, elle provoque des vibrations électromagnétiques qui déforment le champ électrique retenant les électrons autour du noyau atomique. Les électrons peuvent alors s'échapper des atomes. Cependant, le champ électrique de la lumière vibre continuellement. Lorsque le champ change de direction, un électron détaché peut se précipiter à nouveau vers le noyau de son atome. Au cours de cette excursion, l'électron a accumulé beaucoup d'énergie supplémentaire dans le champ électrique de la lumière laser. Pour se rattacher au noyau, l'électron doit libérer son énergie excédentaire sous la forme d'une impulsion lumineuse. Ce sont ces impulsions lumineuses émises par les électrons qui créent les harmoniques qui apparaissent dans les expériences.

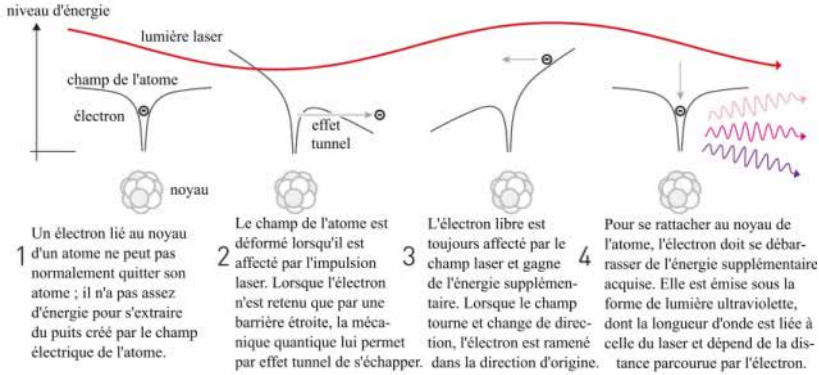


FIG. 121 – La lumière laser interagit avec les atomes d'un gaz. *Des expériences visant à créer des harmoniques dans la lumière laser ont permis de découvrir le mécanisme qui en est à l'origine.*

L'énergie de la lumière dépend de sa longueur d'onde. L'énergie des harmoniques émises est équivalente à celle de la lumière ultraviolette, qui a des longueurs d'onde plus courtes que la lumière visible par l'œil humain. Comme l'énergie provient des vibrations de la lumière laser, la vibration des harmoniques sera élégamment proportionnelle à la longueur d'onde de l'impulsion laser d'origine. Le résultat de l'interaction de la lumière avec de nombreux atomes différents est une onde lumineuse différente avec un ensemble de longueurs d'onde spécifiques.

Une fois que ces harmoniques existent, elles interagissent entre elles.

La lumière devient plus intense lorsque les crêtes des ondes lumineuses coïncident, mais elle devient moins intense lorsque la crête d'un cycle coïncide avec le creux d'un autre. Dans les bonnes circonstances, les harmoniques coïncident de sorte qu'une série d'impulsions de lumière ultraviolette se produit, chaque impulsion étant d'une durée de quelques centaines d'attosecondes. Les physiciens ont compris la théorie sous-jacente dans les années 1990, mais c'est en 2001 qu'ils ont réussi à identifier et à tester les impulsions.

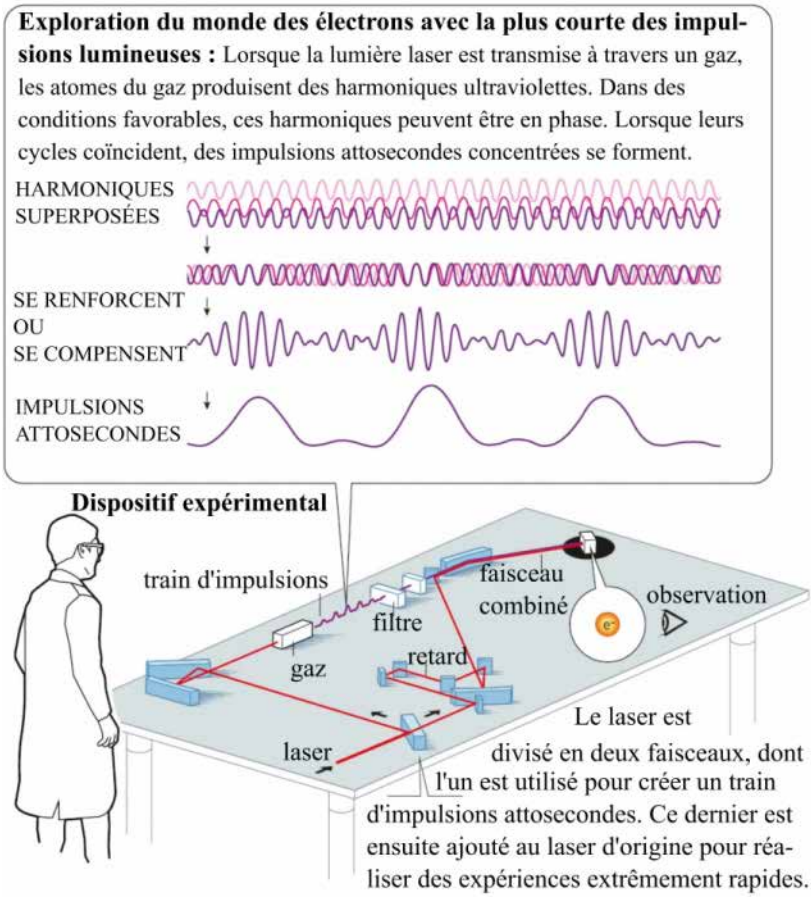


FIG. 122 – *Exemple de dispositif expérimental.*

Pierre Agostini et son groupe de recherche en France ont réussi à produire et à étudier une série d'impulsions lumineuses consécutives, comme un train avec des wagons. Ils ont utilisé une astuce spéciale, en associant le « train d'impulsions » à une partie retardée de l'impulsion laser originale, pour voir comment les harmoniques étaient en phase les unes avec les autres. Cette méthode leur a également permis de mesurer la durée des impulsions dans le train. Ils ont pu constater que chaque impulsion ne durait que 250 attosecondes.

Au même moment, Ferenc Krausz et son groupe de recherche en Autriche travaillaient sur une technique permettant de sélectionner une seule impulsion, comme un wagon que l'on détache d'un train et que l'on fait passer sur une autre voie. L'impulsion qu'ils ont réussi à isoler a duré 650 attosecondes et le groupe l'a utilisée pour suivre et étudier un processus au cours duquel les électrons sont arrachés à leurs atomes.

Ces expériences ont démontré que les impulsions attosecondes pouvaient être observées et mesurées, et qu'elles pouvaient également être utilisées dans de nouvelles expériences.

Depuis que l'univers de l'attoseconde est devenu accessible, ces brefs éclats de lumière peuvent être utilisés pour étudier les mouvements des électrons. Il est aujourd'hui possible de produire des impulsions de quelques dizaines d'attosecondes seulement, et cette technologie ne cesse de se développer.

Les mouvements des électrons sont devenus accessibles

Les impulsions attosecondes permettent de mesurer le temps nécessaire pour qu'un électron soit arraché à un atome et d'examiner comment ce temps dépend de l'étroitesse de la liaison entre l'électron et le noyau de l'atome. Il est possible de reconstituer la façon dont la distribution des électrons oscille d'un côté à l'autre ou d'un endroit à l'autre dans les molécules et les matériaux ; auparavant, leur position ne pouvait être mesurée qu'en moyenne.

Les impulsions attosecondes peuvent être utilisées pour tester les processus internes de la matière et pour identifier différents événements. Ces impulsions ont été utilisées pour explorer la physique détaillée des atomes et des molécules, et elles ont des applications potentielles dans des domaines allant de l'électronique à la médecine.

Par exemple, des impulsions attosecondes peuvent être utilisées pour pousser des molécules, qui émettent un signal mesurable. Le signal émis par les molécules a une structure particulière, une sorte d'em-

preinte digitale qui révèle de quelle molécule il s'agit. Parmi les applications possibles, il y a notamment le diagnostic médical.

Les lauréats

— Pierre Agostini [10], docteur en 1968 de l'université d'Aix-Marseille, professeur à l'université d'État de l'Ohio à Columbus ;
— Ferenc Krausz, né en 1962 à Mór en Hongrie, docteur en 1991 de l'université technique de Vienne en Autriche, directeur de l'institut Max-Planck d'optique quantique à Garching et professeur à l'université Louis-et-Maximilien de Munich en Allemagne ;
— Anne L'Huillier, née en 1958 à Paris, docteur en 1986 de l'université Pierre-et-Marie-Curie à Paris, professeur à l'université de Lund en Suède.

10. NDT. Né en 1941 à Tunis.

Ce livre présente la traduction en français des textes de vulgarisation scientifique publiés par l'Académie royale des sciences de Suède et la fondation Nobel depuis une cinquantaine d'années à l'occasion de la remise du prix Nobel de physique. Étant donné le décalage temporel entre la découverte scientifique et l'attribution du prix Nobel, ce livre donne donc un aperçu des principaux progrès en physique dans la deuxième moitié du XX^{e} siècle.

Cinquante ans de prix Nobel de physique