



Les conséquences de cet impact, cependant, allaient bien au-delà de l'anomalie géochimique, car la limite Crétacé-Tertiaire coïncide avec une extinction majeure: c'est à cette époque que disparaissent les dinosaures et bien d'autres organismes (on estime que près de 70% des espèces qui existaient à la fin du Crétacé se sont éteintes). Selon le groupe de chercheurs de Berkeley, l'impact météoritique était la cause de cette extinction massive, principalement parce que l'énorme quantité de poussière injectée dans la stratosphère aurait bloqué les rayons du soleil pendant plusieurs années. La surface du globe étant alors plongée dans l'obscurité, l'absence de photosynthèse aurait entraîné un effondrement des chaînes alimentaires, d'où l'extinction de nombreuses espèces, tant terrestres que marines.

© Mark Garlick / Gettyimages.com

BIBLIOGRAPHIE

E. Buffetaut, Sommes-nous tous voués à disparaître ? Idées reçues sur l'extinction des espèces, Le Cavalier Bleu, 2012.

Le monde des dinosaures, Dossier Pour la Science, n° 48, juillet-sept. 2005.

L. W. Alvarez et al., Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction, *Science*, vol. 208, pp. 1095-1108, 1980.

Cette hypothèse proposait ainsi une explication plausible à ce vieux mystère qu'était la disparition des dinosaures. Pourtant, les réactions de la communauté scientifique furent très contrastées. Si beaucoup d'astronomes et de physiciens accueillirent favorablement cette explication étayée par des données concrètes et qui tenait compte du fait que les traces d'impacts météoritiques sont légion dans le Système solaire (l'exemple le plus parlant étant sans doute la surface de la Lune), beaucoup de géologues et de paléontologues se montrèrent sceptiques, voire hostiles.

En effet, l'idée d'un cataclysme d'origine extraterrestre allait à l'encontre du dogme régnant sur les sciences de la Terre depuis le XIX^e siècle, en réaction notamment aux idées de Cuvier sur les «révolutions du globe», dogme suivant lequel tout événement catastrophique devait être banni des tentatives d'explications des phénomènes géologiques et biologiques survenant à la surface de notre planète. Un phénomène extraterrestre paraissait particulièrement inacceptable à certains chercheurs.

Toutes les explications imaginables furent alors proposées, parfois avec une certaine mauvaise foi, pour trouver des causes purement terrestres à l'enrichissement en iridium. Dans la décennie 1980, la controverse battit son plein, avec une profusion d'articles contradictoires.

L'IMPACT LOCALISÉ AU MEXIQUE

Alors que les indices géochimiques et minéralogiques en faveur d'un impact d'astéroïde s'accumulaient, un point d'interrogation demeurait: une aussi gigantesque collision aurait dû laisser un énorme cratère à la surface du globe. Il fallut un peu plus de dix ans pour que celui-ci fût localisé, à cheval sur la côte nord de la péninsule du Yucatán et sur le golfe du Mexique.

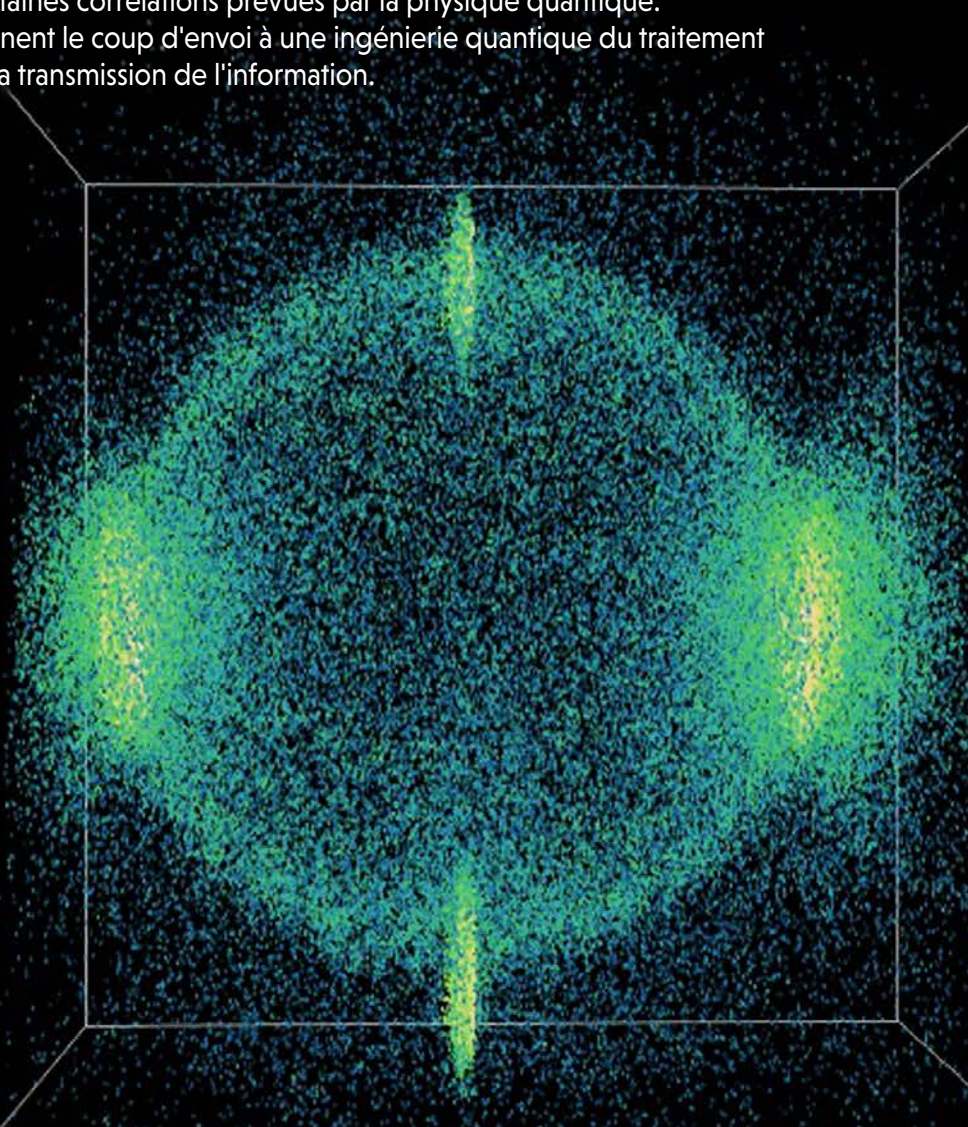
Cette immense structure géologique, dont le centre est comblé de sédiments et les bords arasés par l'érosion, n'a pu être découverte que grâce à des sondages et des études géophysiques (notamment sur les variations de la gravité), qui ont révélé un vaste cratère circulaire. Les études géologiques ont montré la présence de roches broyées typiques d'un impact météoritique et les datations indiquent que la formation du cratère est bien contemporaine de la couche enrichie en iridium et des extinctions de la limite Crétacé-Tertiaire.

Le cratère de Chicxulub, ainsi nommé d'après le nom maya d'une localité du Yucatán, est donc la trace laissée par la collision de l'astéroïde avec la Terre, qui provoqua il y a quelque 66 millions d'années une dévastation globale des écosystèmes et fut ainsi la cause de l'extinction en masse de la fin du Crétacé. La majorité des géologues et des paléontologues est désormais acquise à cette explication. ■

1982 Intrication quantique

Le débat Bohr-Einstein tranché par l'expérience

Des tests expérimentaux démontrent en 1982 la nature non locale de certaines corrélations prévues par la physique quantique. Et donnent le coup d'envoi à une ingénierie quantique du traitement et de la transmission de l'information.



À l'Institut d'optique, l'équipe d'optique quantique atomique prépare un test des inégalités de Bell avec des atomes et non plus des photons. Les expériences portent sur des paires d'atomes d'hélium métastables intriqués et émis dans des directions opposées. Les corrélations sont déterminées à partir des distributions de vitesse des atomes, comme celle visualisée sur cette image informatique des atomes individuels dans l'espace des vitesses.

Albert Einstein joua un rôle majeur dans la naissance de la physique quantique au tout début du xx^e siècle. Mais il n'adhéra jamais à l'interprétation du formalisme quantique développée vers 1925 à Copenhague par Niels Bohr et ses disciples.

Einstein essaya d'abord de trouver une contradiction dans les relations d'incertitude de Heisenberg, qui concernaient le comportement de particules quantiques individuelles. Après les échecs de ces tentatives, contrées par Niels Bohr au congrès Solvay de 1927, il souleva en 1935 une nouvelle objection concernant cette fois des paires de particules. Avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il écrivit un article mettant en cause le caractère complet de la mécanique quantique.

Cet article se fondait sur le cas de deux particules dans un état quantique qualifié aujourd'hui d'intriqué, une situation dont Einstein et ses coauteurs venaient de découvrir la possibilité théorique. Dans cet état, le formalisme quantique prédit de fortes corrélations entre les résultats des mesures effectuées sur chacune des deux particules. Ces corrélations persistent même à des distances suffisamment grandes pour que les mesures ne puissent s'influencer mutuellement, sauf si cette influence s'exerce à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

DES VARIABLES CACHÉES ?

Einstein ne pouvait accepter une telle «mystérieuse action à distance» («*spooky action at a distance*», en anglais), et il conclut que la seule interprétation raisonnable de ces corrélations consistait à admettre que chaque particule transporte avec elle, localement, les propriétés qui vont déterminer le résultat des mesures. Les deux particules ayant été préparées dans la même source, ces propriétés sont corrélées dès l'émission, et on ne s'étonne pas que les mesures soient elles-mêmes corrélées.

Pour raisonnable qu'elle soit, cette interprétation n'a aucune contrepartie dans le formalisme quantique, qui ne laisse pas de place pour des propriétés individuelles des particules intriquées, et Einstein conclut son article en suggérant qu'il faut donc compléter le formalisme quantique. Bohr s'opposa à cette conclusion, convaincu que le formalisme quantique perdrait sa cohérence interne si on lui ajoutait de nouveaux paramètres (nommés parfois «variables cachées»).

À ce stade, le conflit ne portait que sur l'interprétation des prédictions quantiques et ne remettait pas celles-ci en cause. La situation changea radicalement en 1964 lorsque le physicien John Stewart Bell, de la division théorique du Cern, à Genève, découvrit que

certaines prédictions de la mécanique quantique sont en contradiction avec la conception réaliste locale du monde défendue par Einstein, dans laquelle chaque particule porte, localement, un ensemble de paramètres définissant sa réalité physique. Il devenait alors possible de trancher entre les deux visions du monde à partir de mesures expérimentales.

Dans une telle expérience, deux photons sont émis par la même source et partent dans des directions opposées vers deux polariseurs éloignés l'un de l'autre (voir la figure page 33). Pour un état intriqué en polarisation, la mécanique quantique prédit que les résultats des mesures de polarisation sur les deux photons sont fortement corrélés. Dans l'esprit du réalisme local, il existe donc une propriété commune aux deux photons, attribuée lors de l'émission de la paire, et déterminant le résultat des mesures. Par un calcul élémentaire, Bell montra alors qu'il existe des contraintes sur les corrélations prévues par n'importe quel modèle réaliste local. Or ces contraintes, explicitées dans les fameuses «inégalités de Bell», ne sont pas respectées par les prédictions quantiques pour certains jeux d'orientations des polariseurs.

La découverte de Bell a déplacé le débat du domaine de l'épistémologie vers celui de la physique expérimentale: il suffit de mesurer les corrélations observées dans des orientations bien choisies pour savoir si elles sont en accord avec les prédictions quantiques, ou si au contraire elles respectent les inégalités de Bell et confirment le caractère réaliste local de la nature.

Il ne fallut que quelques années pour que soit conçu un schéma pratique de test des inégalités de Bell avec des photons. Entre 1972 et 1976, trois expériences furent menées dans les universités de Berkeley, Harvard et Texas A&M. Après quelques résultats contradictoires, les résultats convergèrent sur un accord avec la mécanique quantique, et une violation significative des inégalités de Bell. Mais ces expériences étaient loin du schéma idéal, et plusieurs échappatoires restaient ouvertes pour interpréter ces résultats par un modèle réaliste local, dans l'esprit des idées d'Einstein.

La première de ces failles, et, comme Bell l'a écrit, la plus fondamentale, est «l'échappatoire de localité». Il faut, pour démontrer les inégalités de Bell, supposer que la mesure par un polariseur n'est pas influencée par l'orientation de l'autre polariseur, éloigné du premier. Cette condition de localité est raisonnable, mais dans un débat où l'on envisage des phénomènes nouveaux, il serait préférable de fonder cette hypothèse sur une loi fondamentale. C'est ce que Bell avait proposé dès 1964, en faisant remarquer que si l'orientation de chaque polariseur était modifiée rapidement pendant que >

L'AUTEUR



ALAIN ASPECT
directeur
de recherche
émérite au CNRS
et professeur
à l'Institut d'optique
et à l'École
polytechnique,
à Palaiseau

> les photons se propageaient de la source aux polariseurs, alors la causalité relativiste – le fait qu’aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière – empêcherait qu’un polariseur puisse « connaître » l’orientation de l’autre au moment de la mesure.

LE VERDICT DE L'EXPÉRIENCE

C’est ce schéma que Philippe Grangier, Gérard Roger, Jean Dalibard et moi avons mis en œuvre à l’Institut d’optique en 1981-1982.

L'Europe va investir des centaines de millions d'euros dans les technologies quantiques

Une première expérience, avec des polariseurs fixes, a conduit à une violation sans précédent des inégalités de Bell (par plus de 40 écarts-types). Puis nous avons développé des commutateurs optiques permettant de modifier toutes les 10 nanosecondes la direction de mesure de polarisation, alors que le temps de vol des photons entre la source et les polariseurs, séparés de 6 mètres, était de 20 nanosecondes. L’expérience donna des résultats sans ambiguïté : les inégalités de Bell étaient violées

même lorsque les orientations des polariseurs étaient modifiées pendant le temps de propagation des photons.

Ce résultat fut confirmé en 1998 par l’équipe de Greg Weihs et Anton Zeilinger, à Innsbruck, en Autriche. En utilisant des photons intriqués injectés dans des fibres optiques, ils purent placer les polariseurs à 400 mètres de la source, et choisir l’orientation du polariseur avec un générateur de nombres aléatoires, pendant le temps de vol des photons.

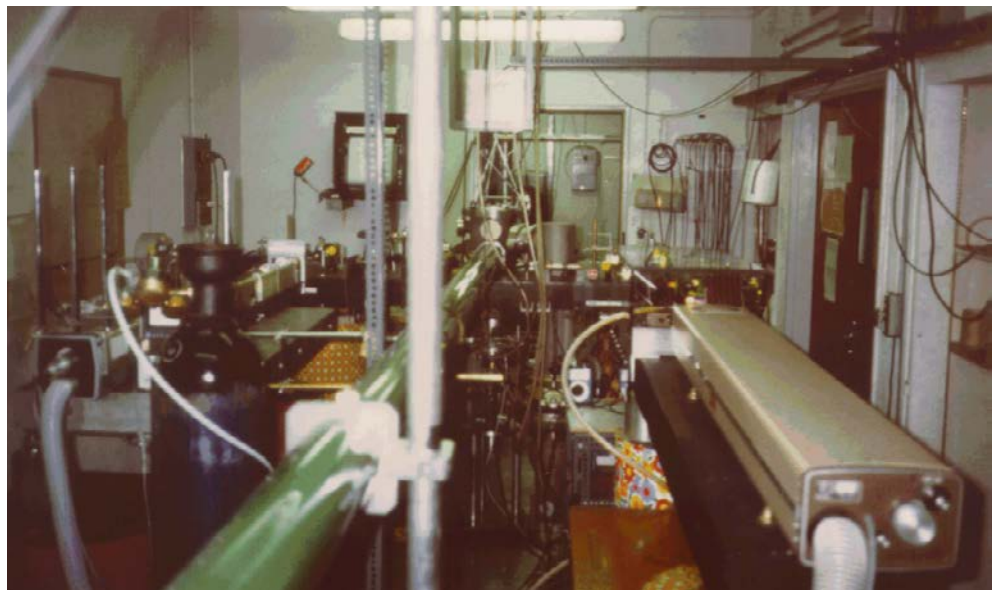
Au même moment, l’équipe de Nicolas Gisin, à Genève, utilisait le réseau commercial de fibres optiques de Swiss Telecom pour montrer que les photons restaient intriqués à plusieurs dizaines de kilomètres l’un de l’autre.

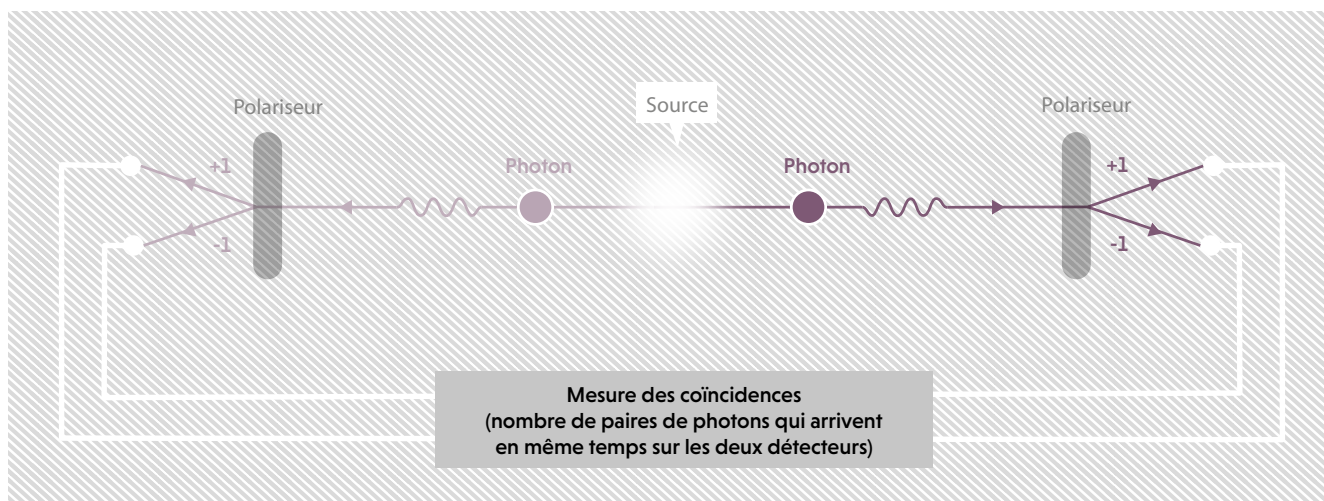
Mais il restait une échappatoire, moins fondamentale selon Bell, mais logiquement acceptable ; elle était liée au fait que, dans toutes ces expériences, les détecteurs n’enregistraient qu’une petite fraction des photons. L’interprétation des expériences exigeait alors d’admettre l’hypothèse de « l’échantillonnage représentatif », c’est-à-dire que l’ensemble des photons détectés donnait une représentation non biaisée de la totalité des photons. Le développement de détecteurs ayant des rendements proches de 100% a permis de clore sans ambiguïté cette échappatoire, en 2013.

Enfin, en 2015, trois équipes (celles de Ronald Hanson, à l’université de Delft, aux Pays-Bas, d’Anton Zeilinger, à l’université de Vienne, en Autriche, et de Lynden Shalm, au NIST de Boulder, aux États-Unis) ont réussi à fermer simultanément les deux échappatoires, mettant un point final au débat. La mécanique quantique sort victorieuse, et l’on doit renoncer à la vision réaliste locale du monde défendue par Einstein.

L’observation expérimentale de la violation des inégalités de Bell a eu deux conséquences

Cette photo d’époque montre le dispositif de l’expérience de 1982. On distingue les trois lasers utilisés pour exciter des atomes qui vont réémettre les paires de photons intriqués. Chaque photon se propage dans un tuyau destiné à éviter les perturbations dues aux turbulences de l’air, avant d’être soumis à la mesure de polarisation. On voit ici l’un de ces tuyaux (en vert), long de 6 mètres.





Dans les expériences de 1982 de l'équipe d'Alain Aspect, une source émet des paires de photons intriqués. Chaque photon est dirigé vers un dispositif qui en mesure la polarisation selon des directions qui sont modifiées pendant la propagation des photons. Les résultats des mesures simultanées (en coïncidence) sur les deux photons sont enregistrés et soumis au test de Bell.

importantes sur la physique des trois dernières décennies. L'une est conceptuelle: nous avons dû accepter la révolution quantique dans son aspect le plus contre-intuitif, la non-localité quantique. L'autre est plus concrète: nous avons assisté au développement de technologies quantiques fondées sur l'intrication, au cœur de la seconde révolution quantique.

C'est à Einstein lui-même, à son corps défendant, que nous devons l'idée de non-localité quantique. En 1949, dans sa réponse à Bohr dans le livre *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Einstein revient sur le raisonnement EPR. Il conclut que les seules façons de réfuter sa conclusion (que chaque particule, ou système – notés ici S1 et S2 –, a sa propre réalité physique locale) seraient «soit de supposer que la mesure sur S1 change (par télépathie [ce sont les mots écrits par Einstein, pour discréditer cette possibilité]) la situation réelle de S2, soit de refuser l'indépendance des situations réelles de deux systèmes séparés l'un de l'autre spatialement». Einstein raisonne ici par l'absurde et écrit que «les deux alternatives [lui] semblent inacceptables».

Mais après la violation expérimentale des inégalités de Bell, c'est à la conclusion d'Einstein qu'il faut renoncer, et on doit admettre l'une ou l'autre des deux hypothèses qu'il considèrerait absurdes, qui sont en fait deux façons de voir la non-localité quantique: (i) il peut y avoir une influence instantanée de la mesure en S1 sur le système séparé S2; (ii) les systèmes S1 et S2, bien que séparés spatialement, n'ont pas des situations réelles indépendantes. (Quand Einstein parle de séparation spatiale, il faut le comprendre au sens relativiste: aucun signal voyageant à une vitesse inférieure à celle de la lumière ne peut relier deux événements séparés spatialement.)

On peut faire remonter les premières idées sur les technologies quantiques à un article de Richard Feynman, au début des années 1980.

Prenant conscience du caractère extraordinaire de l'intrication, révélé par la violation des inégalités de Bell, il a suggéré qu'un ordinateur quantique, formé de bits quantiques intriqués, serait exponentiellement plus puissant que les ordinateurs classiques. Avec le développement de techniques expérimentales de plus en plus élaborées visant à maîtriser l'intrication, les premières démonstrations de calcul quantique élémentaire ont déjà été publiées.

L'ÈRE DE L'INFORMATION QUANTIQUE

Par ailleurs, l'utilisation de sources de photons uniques ou intriqués, initialement développées pour tester les fondements de la mécanique quantique, a permis des démonstrations spectaculaires de transmission d'information dont la sécurité repose sur les fondements de la mécanique quantique: c'est la fameuse cryptographie quantique.

Aujourd'hui, la communauté européenne a décidé d'investir des centaines de millions d'euros dans le développement des technologies quantiques, en stimulant la collaboration entre laboratoires académiques et industriels, tandis que la Chine fait un effort analogue, voire plus important. Aux États-Unis, cette recherche est menée grâce aux sommes considérables investies par les compagnies privées Google, Intel, Microsoft, donnant l'exemple à des sociétés européennes, comme Atos, qui viennent de se lancer dans la course.

Quand on se retourne sur cette histoire, on voit une discussion sur les fondements être tranchée par des expériences, dont les succès ont stimulé les idées sur l'information, le calcul et la métrologie quantiques. Saurons-nous leur donner une forme utilisable pour des applications qui pourraient changer la société? La réponse sera expérimentale. Fondamentale ou appliquée, la science a besoin des expériences pour progresser. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Aspect, **Le débat Einstein-Bohr est clos**, *Dossier Pour la Science*, n° 93, oct.-déc. 2016.

A. Aspect *et al.*, **Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 91-94, 1982.

A. Aspect *et al.*, **Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 1804-1807, 1982.

N. Bohr, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 48, pp. 696-702, 1935.

A. Einstein *et al.*, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777-780, 1935.

1983

GRAND SUCCÈS POUR LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

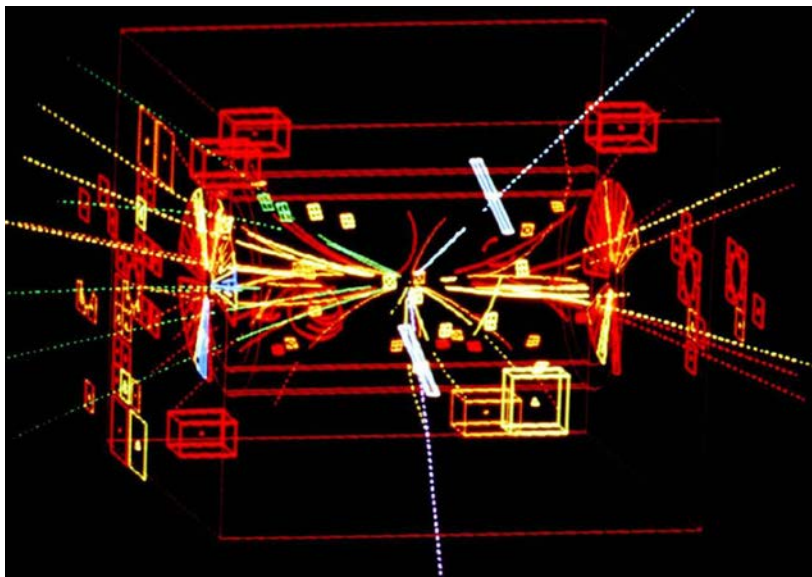
LES BOSONS W ET Z MIS EN ÉVIDENCE

Depuis l'unification de l'électricité et du magnétisme par Maxwell en 1861, l'idée que les forces de la nature n'en font qu'une anime les physiciens. En outre, à partir des années 1940, on a commencé à comprendre que les particules fondamentales constituant la matière – les «fermions» – s'attirent et se repoussent en échangeant des particules nommées «bosons» qui véhiculent les forces de la nature: l'électromagnétisme, la gravitation, l'«interaction forte», qui lie les composants des noyaux atomiques, et l'«interaction faible», responsable de certaines désintégrations radioactives.

En vertu des principes de la physique quantique, les bosons qui véhiculent les forces ont une durée de vie inversement proportionnelle à leur masse, et seuls ceux de masse nulle (comme le photon, médiateur de la force électromagnétique) vivent assez longtemps pour transmettre une force à longue portée. L'interaction faible ayant une portée limitée, on devait supposer que ses bosons associés étaient au contraire «lourds».

Par ailleurs, à partir de 1950, une élégante théorie fondée sur des symétries dites de jauge promettait de déterminer les autres propriétés des bosons. L'idée est la suivante. Le monde physique obéit à des symétries globales – des opérations qui, si on les applique à l'Univers tout entier, ne le changent pas (comme de le translater entièrement de trois mètres vers la gauche, par exemple). En revanche, la même opération appliquée différemment en chaque point provoque des changements notables. Les bosons apparaissent comme les ingrédients nécessaires pour qu'une symétrie globale donnée soit aussi locale [dans le cas de l'électromagnétisme, par exemple, il s'agit d'une symétrie associée à une structure mathématique, le groupe noté $U(1)$]. Seul bémol, comme ces bosons ont pour rôle de compenser partout les effets d'un changement local, la théorie leur attribuait à tous une masse nulle, en contradiction avec ce que l'on savait de la force faible, par exemple.

Dans les années 1960, reprenant les travaux du Brésilien José Leite Lopes, le Pakistanais Abdus Salam et les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg ont proposé que les forces faible et électromagnétique n'en forment qu'une: la force électrofaible, issue d'une symétrie de



Reconstruction numérique de la désintégration d'un boson Z en un électron et un positron enregistrée par les détecteurs de l'équipe UA1 le 30 avril 1983. Il s'agit là de la première détection d'un Z par UA1.

10

C'EST LE NOMBRE DE BOSONS W QUI AVAIENT ÉTÉ DÉTECTÉS PAR LES ÉQUIPES UA1 ET UA2 LORS DE L'ANNONCE OFFICIELLE DE LEUR DÉCOUVERTE LE 25 JANVIER 1983. LA MISE EN ÉVIDENCE DU BOSON Z SERA COMMUNIQUÉE LE 1^{ER} JUIN DE LA MÊME ANNÉE.

jauge fondée sur le groupe noté $SU(2) \times U(1)$. Elle était transmise par quatre bosons: le photon et trois autres particules de masse nulle. Steven Weinberg a alors ajouté à ce modèle un mécanisme proposé en 1964 par plusieurs physiciens, dont le Britannique Peter Higgs: en supposant l'existence d'un champ (le champ dit de Higgs) qui encombre le vide et «gêne» le déplacement des trois bosons, ceux-ci acquièrent une masse. En 1973, l'expérience Gargamelle au Cern donna un premier indice de l'existence du boson Z. Suivi d'autres observations, ce résultat persuada les physiciens de la validité du modèle standard.

En 1983, ces indices, en faveur de la description unifiée des forces fondamentales, furent confirmés par la production et la détection des bosons W^+ , W^- et Z lors de collisions proton-antiproton au Cern. Ce succès éclatant du «modèle standard» de la physique des particules a été récompensé l'année suivante par le prix Nobel, attribué à Carlo Rubbia et Simon van der Meer. Cependant, le mécanisme de Higgs prévoyait l'existence d'une particule – le boson de Higgs – qui restait encore à découvrir (voir l'article de Pierre Fayet pages 90-91)... ■

R. C.

Collaboration UA1, *Physics Letters B*, vol. 122(1), pp. 103-116, 1983; Collaboration UA2, *Physics Letters B*, vol. 122 (5-6), pp. 476-485, 1983