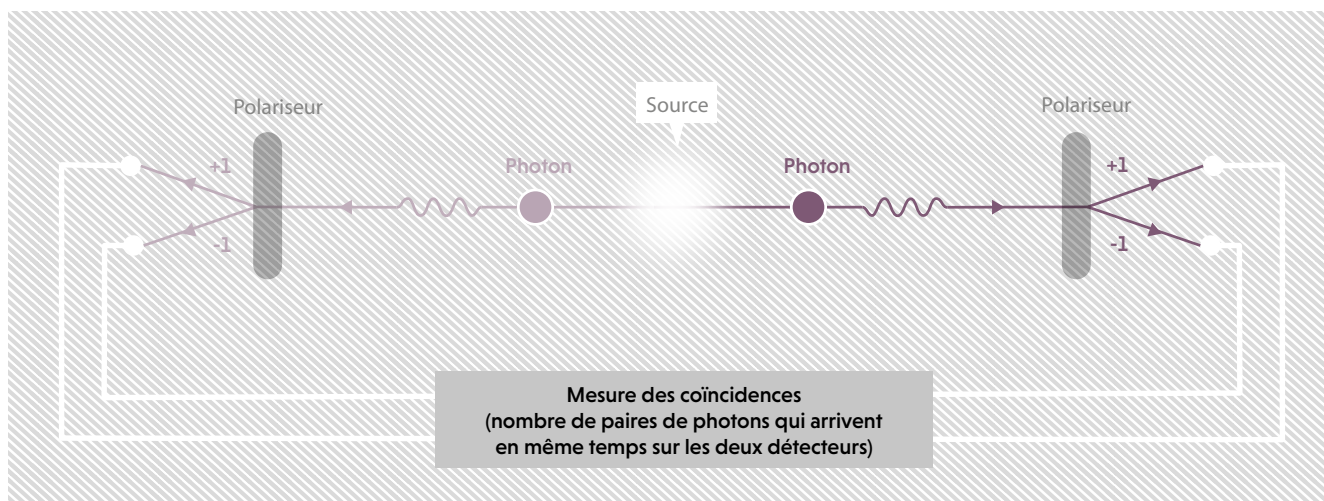




Dans les expériences de 1982 de l'équipe d'Alain Aspect, une source émet des paires de photons intriqués. Chaque photon est dirigé vers un dispositif qui en mesure la polarisation selon des directions qui sont modifiées pendant la propagation des photons. Les résultats des mesures simultanées (en coïncidence)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

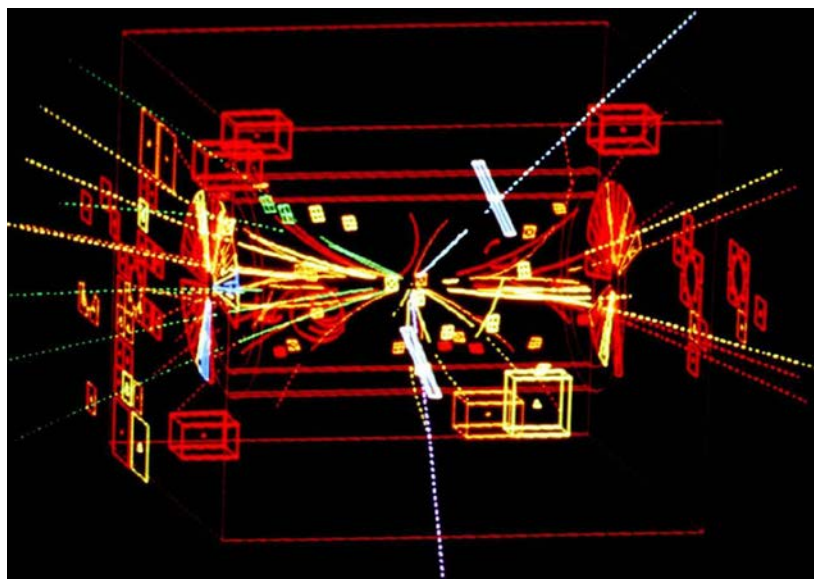
LES BOSONS W ET Z MIS EN ÉVIDENCE

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

DÉCOUVERTE DE L'HOMÉOBOÎTE

Comment, lors du développement d'un embryon, une cellule au départ unique donne-t-elle naissance à un organisme entier? Qui ordonne à tel ou tel groupe de cellules de former un membre ou un œil? On a découvert progressivement au xx^e siècle que certains gènes «architectes» provoquent l'activation en cascade d'autres gènes subordonnés afin de former des structures spécifiques. Mais il y a plus.

En 1983, de façon indépendante, Matthew Scott et Amy Weiner, à l'université de l'Indiana, et William McGinnis, alors à l'université de Bâle, en Suisse, sous la direction de Walter Gehring, ont mis en évidence que ces gènes du développement

ont tous un point commun: une séquence de 184 nucléotides, nommée homéoboîte ou boîte homéotique. Cette séquence code un morceau de protéine particulier: une sorte de «tête de lecture» capable d'agir sur l'ADN en activant un gène cible. Grâce à cette observation, les généticiens ont commencé à comprendre comment les gènes du développement agissent à l'échelle moléculaire.

Les chercheurs ont ensuite montré que cette séquence est conservée à travers le règne animal (on la retrouve chez les vertébrés, les arthropodes et les échinodermes). L'universalité de l'homéoboîte dans un même organisme et à travers les espèces suggère que ces gènes

sont apparentés: ce sont tous les copies mutées et recollées d'un même gène ancestral probablement apparu chez les eucaryotes il y a environ un milliard d'années. Sachant qu'une seule mutation d'un de ces gènes chez la mouche, par exemple, la dote de deux paires d'ailes au lieu d'une, on comprend que ces mutations et répliquations ont permis à l'évolution de produire des plans d'organisation très variés à partir d'un petit nombre de mutations. Reconstituer cette histoire est désormais le sujet d'une nouvelle discipline, la biologie évolutive du développement ou évo-dévo. ■

R. C.

W. McGinnis et al., *Nature*, vol. 308, pp. 428-433, 1983

LE VIRUS DU SIDA IDENTIFIÉ

En 1981, la recrudescence d'infections associées à l'effondrement des défenses immunitaires alerta les autorités sanitaires américaines: l'épidémie de sida venait de commencer. Dès juin 1982, l'étude de 19 cas dans la communauté homosexuelle du sud de la Californie – communauté où les pratiques sexuelles sont discutées ouvertement – permit de déterminer, par une série d'interviews, que la cause de la

maladie était probablement un agent transmis sexuellement.

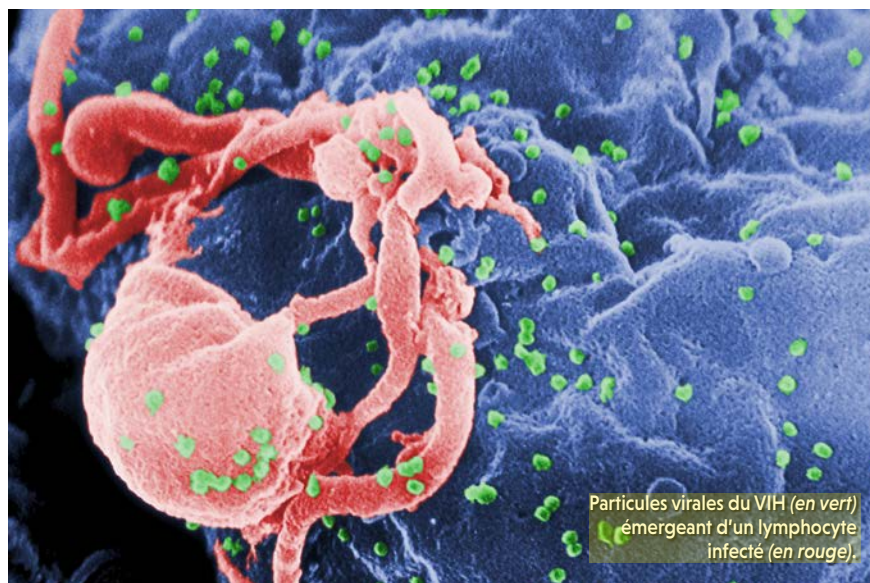
Robert Gallo, découvreur du premier rétrovirus humain (HTLV-1) en 1974, suggéra alors qu'il s'agissait d'un rétrovirus. Le matériel génétique d'un rétrovirus est porté par des brins d'ARN qui doivent être «traduits» en ADN avant d'être lus par la cellule infectée. Certains de ces pathogènes (les lentivirus) ont une période d'incubation très longue, ce qui

semblait correspondre à l'agent recherché. Mais persuadé qu'il s'agissait d'une version mutée de HTLV-1, Robert Gallo ne parvint pas à l'isoler.

À partir de l'identification des premiers cas en France, Luc Montagnier, Françoise Barré-Sinoussi et Jean-Claude Chermann, de l'institut Pasteur, eurent l'idée d'étudier des prélèvements effectués sur des patients en phase pré-sida (de façon à ne pas détecter un virus opportuniste arrivé après l'effondrement des défenses du patient) dans les ganglions lymphatiques (puisque l'agent semblait s'attaquer aux lymphocytes du système immunitaire). En janvier 1983, ils détectèrent une activité de traduction d'ARN en ADN et, en février, ils observèrent le rétrovirus. En 2008, le prix Nobel de médecine fut attribué à Luc Montagnier et Françoise Barré-Sinoussi pour l'identification du VIH, le virus de l'immunodéficience humaine. À partir de l'identification du virus, les chercheurs ont pu étudier comment combattre la maladie. Aujourd'hui, il existe de nombreux antirétroviraux qui agissent à différentes étapes du cycle de réplication du VIH. Les trithérapies contrôlent l'infection sans pour autant éradiquer le virus. Elles prolongent l'espérance de vie des malades. ■

R. C.

F. Barré-Sinoussi et al., *Science*, vol. 4599, n° 220, pp. 868-871, 1983



Particules virales du VIH (en vert) émergeant d'un lymphocyte infecté (en rouge).

1985

Les fullerènes, nouvelle forme du carbone

La découverte de la molécule C_{60} , le « footballène », a donné le coup d'envoi à tout un champ des nanosciences. Avec une riche moisson dont font aujourd'hui partie les nanotubes et le graphène.

Dans la nature, le carbone existe à l'état solide sous deux formes cristallines bien connues de tous : le graphite et le diamant. Le graphite est un minéral noir friable utilisé depuis des siècles pour l'écriture (encre de Chine, crayon à mine). Le diamant est au contraire un minéral transparent, le plus dur des matériaux naturels.

Cette situation a été bouleversée en 1985 : avec leurs collègues, le Britannique Harold Kroto et les Américains Richard Smalley et Robert Curl découvraient cette année-là une nouvelle forme d'organisation du carbone, la molécule C_{60} , ce qui leur a valu le prix Nobel de chimie en 1996. C'était l'aboutissement de recherches entamées au début des années 1980 pour mieux comprendre les mécanismes de formation de longues chaînes de carbone dans l'espace interstellaire.

Ces études les ont conduits à vaporiser du graphite à l'aide d'un laser et à identifier, dans la suie formée, des molécules très stables et constituées de 60 atomes de carbone, disposés aux sommets d'un polyèdre régulier de 0,7 nanomètre de diamètre et dont les facettes sont 20 hexagones et 12 pentagones (*voir la figure page ci-contre*). Cette molécule rappelle irrésistiblement un ballon de football et a été nommée footballène, ou buckminsterfullerène par référence au dôme construit par l'architecte américain Buckminster Fuller pour une exposition universelle au Canada.

Des molécules cages plus grosses ont également été identifiées : C_{70} , puis C_{76} , C_{78} , etc. Elles sont toujours constituées de 12 pentagones,

mais d'un nombre supérieur d'hexagones. Toutes ces molécules inauguraient la famille dite des fullerènes.

À la suite de ces expériences, des fullerènes ont été mis en évidence en 1997 dans un minéral naturel, la shungite, et en 2010 dans une nébuleuse planétaire, validant ainsi la démarche expérimentale entamée dans les années 1980. Aujourd'hui, les fullerènes sont étudiés et utilisés pour leurs propriétés chimiques, de conduction électrique et de lubrification, notamment dans les domaines de la pharmacie, de la cosmétique ou de l'électronique.

À ce stade, on pourrait penser l'histoire achevée. En réalité, comme on va le voir, elle ne fait que commencer, car la découverte des fullerènes a ouvert la voie à de nouvelles classes de matériaux à base de carbone et de basse dimensionnalité, d'un grand intérêt pour les nanosciences.

À la suite des expériences initiales de Kroto et ses collègues, l'Allemand Wolfgang Krätschmer et l'Américain Donald Huffman ont mis au point en 1990 un procédé de synthèse du C_{60} simple à mettre en œuvre, ce qui a permis de produire rapidement les quantités nécessaires à l'étude des propriétés physico-chimiques du matériau.

Le procédé avait cependant une bien plus grande portée que cet objectif. En effet, en 1991, le physicien japonais Sumio Iijima a eu la curiosité d'observer au microscope électronique un sous-produit de synthèse qui se présentait comme un dépôt noirâtre dur et filamenteux. Il découvrit ainsi les nanotubes de carbone, des objets tubulaires fermés à leurs

L'AUTEURE



ANNICK LOISEAU
physicienne au
Laboratoire d'étude
des microstructures,
unité mixte
CNRS-Onera,
Châtillon