

Cent ans de particules

Jeremy Bernstein

La probable mise en évidence du boson de Higgs, au CERN, est une étape historique dans l'étude des particules élémentaires et de leurs interactions. Elle couronne un siècle de théories et de découvertes.

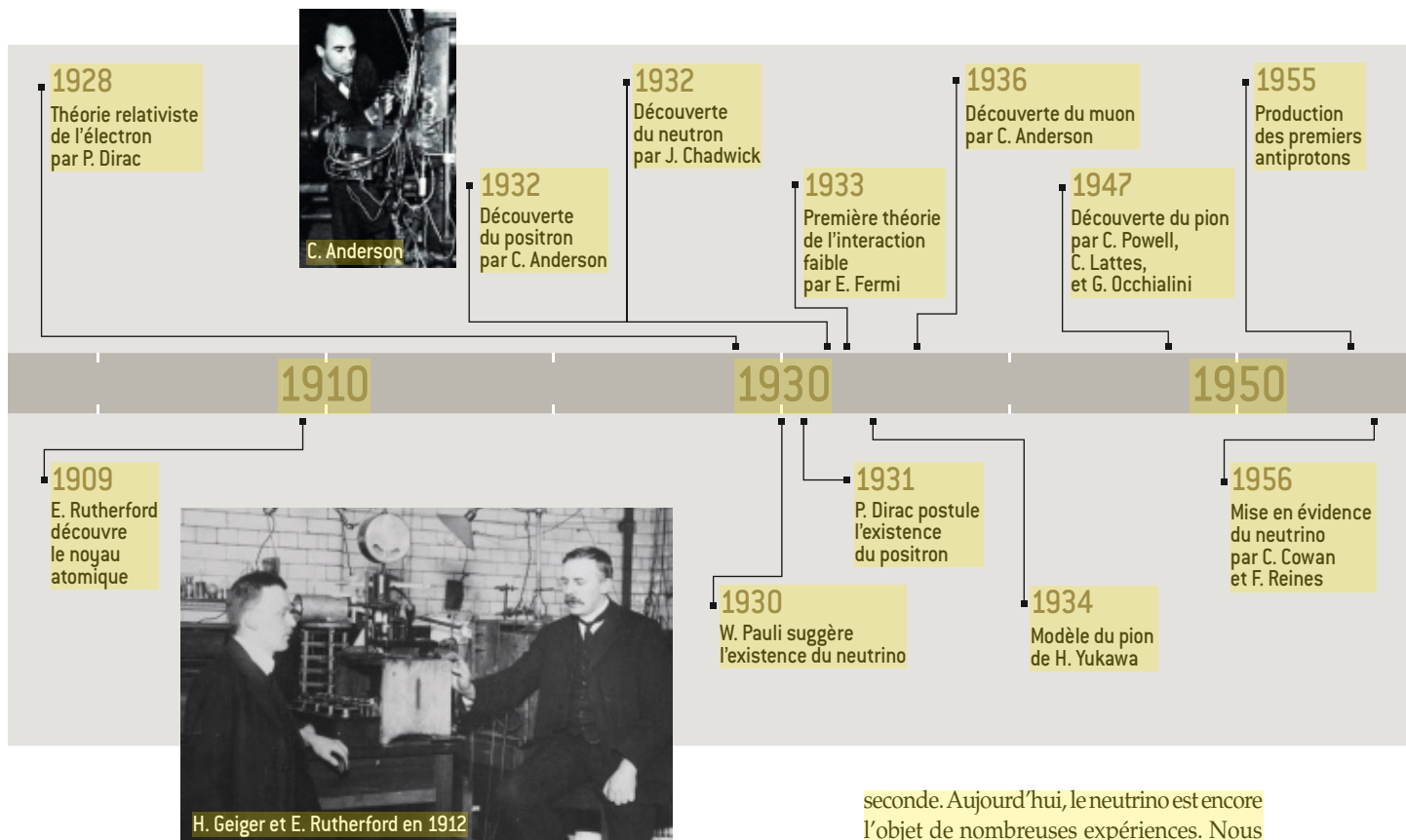


La physique des particules élémentaires au XX^e siècle a profondément changé la compréhension du monde. Les avancées ont été ponctuées par le développement de théories confirmées par l'expérience, mais aussi par la découverte inattendue de particules qui ont inspiré de nouveaux modèles. Dans cet article, je vais illustrer une centaine d'années de recherches en me focalisant sur cinq particules qui ont joué un rôle important dans cette histoire : le neutrino, le méson π , l'antiproton, le quark et le boson de Higgs.

Commençons par le neutrino. Son existence a été postulée dans des circonstances extravagantes. Le 4 décembre 1930, le physicien autrichien Wolfgang Pauli envoya une lettre à des collègues qui assistaient à une conférence de physique à Tübingen, en Allemagne. Le document commençait par ces termes : « Chers Mesdames et Messieurs radioactifs. » Pauli s'excusait de n'avoir pas pu venir à la conférence, car il allait à un bal à Zurich... Il y faisait aussi part d'un problème qui le préoccupait : une anomalie détectée dans les expériences sur la « désintégration bêta ».

Certains noyaux radioactifs se désintègrent en formant un nouveau noyau et en émettant un électron. Si l'énergie et la quantité de mouvement sont conservées dans cette désintégration dite bêta, alors l'électron devrait être émis avec une énergie bien déterminée. Or l'expérience montrait que l'énergie des électrons produits couvre un intervalle continu de valeurs. C'était une telle énigme que le Danois Niels Bohr avait même proposé

1. LA COLLISION D'UN ANTIPROTON ($\bar{p}$) avec un noyau de néon (Ne) produit plusieurs particules dont un pion (π^+), un muon (μ^+), un positron (e^+), ainsi que des neutrinos invisibles pour le détecteur. Ces particules ont toutes été découvertes au cours du XX^e siècle.



L'ESSENTIEL

■ La compréhension des interactions fondamentales de la matière a notablement progressé au cours du XX^e siècle grâce à l'effort conjoint des théoriciens et des expérimentateurs.

■ Des particules telles que le neutrino, le pion, l'antiproton ou le quark ont été prévues par les théoriciens avant d'être mises en évidence expérimentalement.

■ Le modèle standard décrit les interactions électrofaible et forte dans un ensemble cohérent. La découverte du boson de Higgs conforte cette théorie.

que l'énergie et la quantité de mouvement puissent ne pas être conservées au cours de la désintégration. Pauli trouvait cette idée absurde, et il fit, dans sa lettre, une contre-proposition. Il avança l'hypothèse qu'une autre particule, électriquement neutre et interagissant très peu avec la matière, donc difficile à détecter, était émise en même temps que l'électron. Cette particule emporterait une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement, et expliquerait le spectre continu de l'énergie des électrons émis dans les désintégrations bêta.

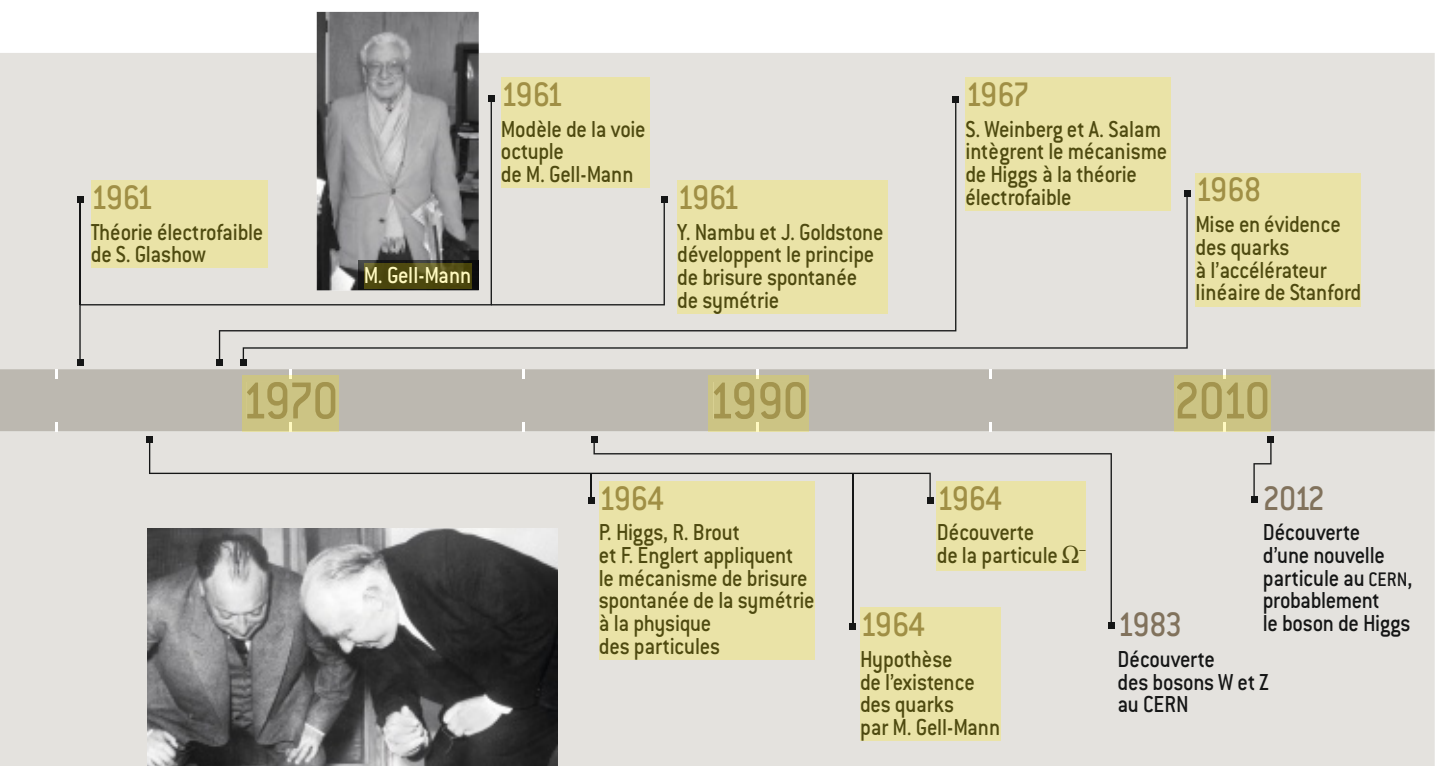
À Rome, Enrico Fermi prit cette suggestion au sérieux et développa la première théorie de la désintégration bêta. Il nomma la particule « neutrino », le petit neutre en italien, pour la distinguer du neutron, à savoir le composant électriquement neutre du noyau atomique, découvert en 1932 par le Britannique James Chadwick.

Le statut réel ou hypothétique du neutrino ne fut tranché qu'en 1956. Les physiciens américains Clyde Cowan et Frederick Reines installèrent un détecteur près de la centrale nucléaire à Savannah River, car une grande quantité de désintégrations bêta avaient lieu dans le cœur du réacteur. Ils mirent en évidence la présence de neutrinos, dans un flux de plus de 10 000 milliards de particules par centimètre carré et par

seconde. Aujourd'hui, le neutrino est encore l'objet de nombreuses expériences. Nous savons qu'il existe en trois types – ou saveurs –, de masses faibles mais non nulles, et que les neutrinos changent périodiquement de saveur au cours du temps, un phénomène nommé oscillation.

La radioactivité bêta avait été étudiée en particulier par Ernest Rutherford, physicien d'origine néo-zélandaise qui avait aussi travaillé sur les deux autres formes de radioactivité (alpha et gamma). En 1909, à Manchester, assisté de deux collègues, il utilisa des particules alpha (des noyaux d'hélium) pour sonder la structure de l'atome. Rutherford découvrit que l'essentiel de la masse de l'atome est concentré dans un tout petit volume chargé positivement : le noyau.

Mais il s'avéra bientôt que le noyau ne se résument pas à des particules de charge positive, que l'on nomma protons. En effet, le noyau d'hydrogène, avec une charge positive, est quatre fois plus léger que l'hélium, qui a seulement deux charges positives. Rutherford suggéra donc la présence d'objets neutres dans le noyau. Il supposa qu'il s'agissait de protons et d'électrons liés ensemble, mais, dès 1930, Pauli et d'autres établirent qu'un tel édifice ne correspondait pas aux données des spectres atomiques. La solution vint avec la découverte du neutron par Chadwick. Une question demeura



W. Pauli et N. Bohr en 1954, jouant avec une toupie.

rait : quelle force assure la cohésion du noyau, formé de protons et de neutrons ?

Pour maintenir ensemble les nucléons (les protons et les neutrons), il devait exister une interaction plus intense que la répulsion électrostatique entre les protons chargés positivement. Cette force devait aussi être de courte portée pour n'agir qu'au sein du noyau. Telles sont les données de l'énigme à laquelle s'est intéressé le Japonais Hideki Yukawa. Selon lui, le neutron était une particule élémentaire, et il utilisa cette hypothèse pour élaborer sa propre théorie des interactions nucléaires.

Yukawa imagina que la force assurant la cohésion du noyau était véhiculée par une particule de masse non nulle. Il détermina la valeur du couplage de cette particule avec les nucléons pour qu'elle domine la répulsion électrostatique entre les protons. De surcroît, la mécanique quantique indiquait que la portée de la force diminue quand la masse de la particule médiatrice augmente. La connaissance de la taille des noyaux permit donc à Yukawa d'estimer la portée de l'interaction. Il en déduisit que la masse de la par-

ticule devait être environ 200 fois celle de l'électron. En 1934, il publia, dans une prestigieuse revue scientifique japonaise, un article, dans un anglais parfait, mais qui est resté complètement ignoré.

Maintenir la cohésion du noyau

Le principe de véhiculer une interaction par l'échange de particules est bien représenté par les diagrammes inventés par l'Américain Richard Feynman dans les années 1940. Feynman a utilisé ces diagrammes et les expressions mathématiques qu'ils symbolisent pour décrire l'interaction de particules portant une charge électrique. Il a ainsi développé la théorie de l'électrodynamique quantique, où la force électromagnétique résulte de l'échange de photons (voir la figure 2a).

Comme dans la théorie électrostatique classique, l'intensité de la force décroît en proportion inverse du carré de la distance entre les deux corps chargés, propriété due à la masse nulle de la particule échangée (le photon). Pour la théorie de Yukawa, la portée de la force est beaucoup plus limitée, car la particule échangée entre le proton et le neutron a une masse non nulle (voir la figure 2b).

La particule de Yukawa a été découverte en 1947 dans les rayons cosmiques – les particules énergétiques circulant

dans l'espace. Elle a été nommée méson π , ou pion. Elle a une masse proche de celle prévue par Yukawa et existe en trois variétés, selon que sa charge électrique est positive, négative ou nulle. Les pions chargés se désintègrent rapidement en neutrinos et en muons (versions lourdes de l'électron).

Parallèlement à l'étude du noyau, les physiciens se sont aussi intéressés à l'électron. En 1925, l'Autrichien Erwin Schrödinger développa l'équation qui, en mécanique quantique, décrit l'évolution dans le temps de la particule. En 1928, le Britannique Paul Dirac chercha à étendre cette équation au cas d'électrons relativistes – animés de vitesses proches de celle de la lumière. Mais sa nouvelle équation présentait une difficulté. Pour chaque valeur de la quantité de mouvement, il obtenait quatre solutions : deux correspondaient à un électron d'énergie positive, les deux autres semblaient correspondre à une énergie négative, ce qui n'a pas de sens physique. Dirac comprit que ces dernières solutions ne correspondaient pas à un électron, mais à une particule ayant les mêmes propriétés, à part une charge électrique opposée, positive. Les énergies associées sont alors positives. Cet antiélectron – ou positron – fut découvert en 1932 par le physicien américain Carl Anderson dans les rayons cosmiques.

L'électron et le positron étaient le premier exemple d'une propriété générale : à toute particule, on peut associer