

Hideki Yukawa, de l'Université d'Osaka au Japon, s'intéressait alors à la cohésion des nucléons dans le noyau. L'interaction nucléaire diffère des interactions gravitationnelle et électromagnétique : elle n'agit qu'à très courte portée. Pour rendre compte de cette interaction, Yukawa supposa l'existence d'une nouvelle famille de particules, les mésons, parcourant les très petites distances qui séparent les nucléons pour assurer leur cohésion. Bien que le premier méson, le pion, n'ait été observé qu'une dizaine d'années plus tard, d'éminents physiciens comme Werner Heisenberg et Enrico Fermi, convaincus par le raisonnement de Yukawa, ont conçu une « théorie des champs de mésons » complète. Ainsi, dans les années 1950, il était admis que les nucléons sont entourés d'un nuage de pions, sans cesse créés puis absorbés par les neutrons et les protons du noyau.

On a longtemps utilisé des sources radioactives pour étudier protons et neutrons, et les premiers pions ont été observés dans les rayons cosmiques. Après la Seconde Guerre mondiale, un nouvel outil a été développé pour sonder la matière : l'accélérateur de particules. Les particules, propulsées à grande vitesse grâce à d'intenses champs électromagnétiques, sont confinées dans un faisceau étroit, dont l'énergie est directement reliée au pouvoir de résolution de l'accélérateur.

Ainsi, un accélérateur produisant un faisceau d'électrons de un mégaelectronvolt peut sonder des détails de la matière 1 000 fois plus petits qu'un atome. Pour un faisceau de un gigaelectronvolt, 1 000 fois plus énergétique, on parvient à scruter des longueurs de un fermi environ. En 1951, l'accélérateur de l'Université Stanford réussit à produire un faisceau

d'électrons de 600 mégaelectronvolts, permettant d'atteindre une résolution suffisante pour « voir » pour la première fois les neutrons et les protons.

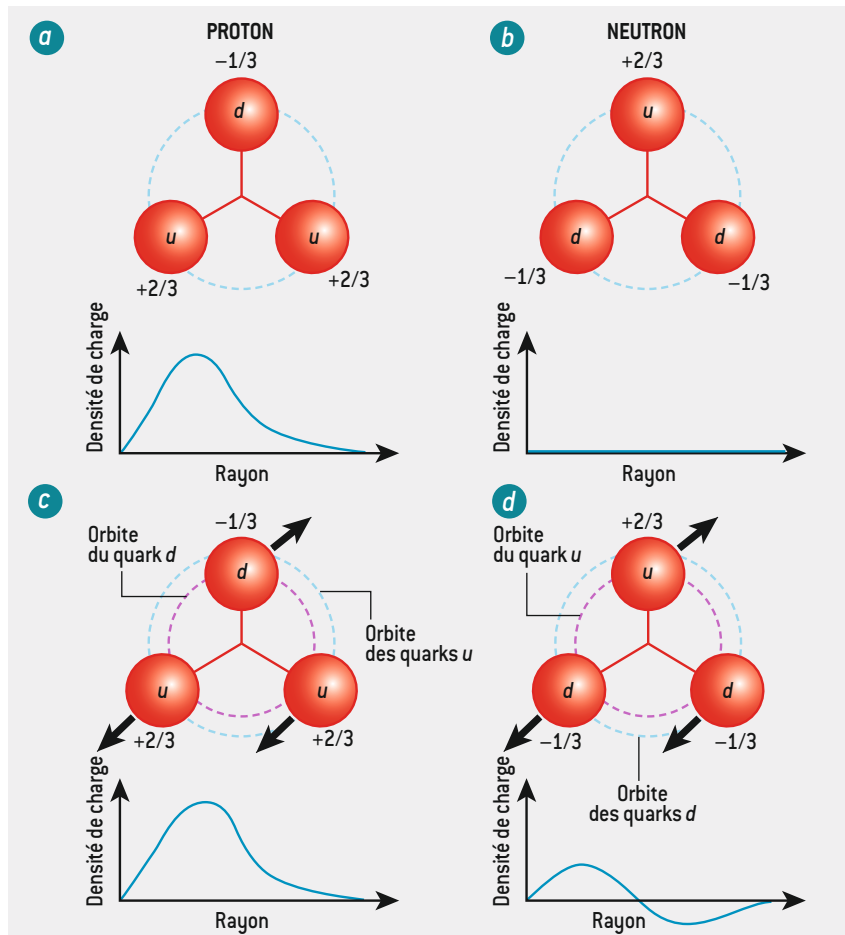
Un accélérateur ne « voit » pas vraiment le nucléon : il permet de mesurer la section efficace de la réaction électron-nucléon, c'est-à-dire la probabilité que l'électron propulsé par l'accélérateur interagisse avec le nucléon cible, l'électron incident étant renvoyé avec un angle et une énergie donnés. Simultanément, des physiciens théoriciens ont calculé les probabilités de diffusion de l'électron par le nucléon. En comparant ces prévisions théoriques aux résultats expérimentaux, ils ont pu déterminer la théorie la mieux adaptée aux données obtenues grâce à l'accélérateur de particules.

L'expression mathématique de la section efficace fait intervenir deux grandeurs distinctes : la diffusion électrique et la diffusion magnétique. En effet, les électrons du faisceau diffusent électriquement, à cause de leur charge, mais aussi magnétiquement, en raison de leur spin (ils peuvent interagir comme deux petites barres aimantées). On nomme ces deux grandeurs facteur de forme électrique et facteur de forme magnétique. En jouant sur les énergies du faisceau et les angles de détection, les physiciens parviennent à distinguer les deux phénomènes et à démêler la structure du nucléon.

Premières mesures

Au milieu des années 1950, Robert Hofstadter utilisa l'accélérateur de l'Université Stanford pour diriger son faisceau d'électrons sur une cible d'hydrogène. À des énergies de quelques centaines de mégaelectronvolts, les électrons interagissent peu avec les électrons des atomes d'hydrogène, lesquels se comportent donc quasiment comme des protons. Hofstadter parvint à déterminer les facteurs de forme du proton et évalua les rayons électrique et magnétique du proton à environ 0,8 fermi. Ces rayons correspondent à la distance en deçà de laquelle les interactions électrique et magnétique deviennent fortes : ils définissent la surface de diffusion des électrons par le proton.

Les mesures sur le neutron sont plus difficiles à réaliser, car nous ne disposons pas de cibles composées uniquement de neutrons. Cependant, nous pouvons mesurer la section efficace d'un deutéron, le noyau d'un atome de deutérium, isotope



2. DANS LE MODÈLE DES QUARKS le plus simple (en haut), les charges des quarks u et des quarks d du proton (a) s'additionnent pour donner $+1$, et la particule a un rayon électrique de 0,8 fermi. Pour le neutron, la somme des charges des quarks vaut zéro (b), et la densité de charge est nulle partout. En prenant en compte leurs spins (en bas, flèches noires), on introduit une répulsion entre les quarks dont les spins sont parallèles, si bien que ceux-ci ont des orbites légèrement modifiées. Dans le cas du proton, l'effet sur le rayon électrique (c) n'est pas sensible. Pour le neutron, cela conduit à une périphérie légèrement négative et un cœur légèrement positif (d).

de l'hydrogène. Le deutéron contient un proton et un neutron, assez peu liés. En mesurant la section efficace du deutéron et en soustrayant la section efficace du proton, on déduit la section efficace d'un neutron, à quelques ajustements près.

De cette façon, Hofstadter a également déterminé le rayon magnétique du neutron : 0,8 fermi, quasi identique à celui du proton. L'expérience donna un rayon électrique nul, résultat en accord avec le fait que le neutron est dépourvu de charge.

Notre vision de l'intérieur des protons, neutrons et autres pions a radicalement changé en 1964, année où Murray Gell-Mann, de l'Institut de technologie de Californie, et George Zweig, de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (le CERN), ont chacun proposé un modèle faisant intervenir de nouvelles particules : les quarks. Dans ce cadre, des particules lourdes (protons, neutrons, et d'autres particules exotiques), regroupées dans la famille des baryons, sont constituées de trois quarks. Les mésons (les particules de masses intermédiaires, tels les pions) sont formés d'une paire quark-antiquark (les antiquarks sont des particules d'antimatière qui ont les mêmes propriétés que les quarks, telles que leur charge ou leur couleur, mais de signe opposé). Les particules légères, comme les électrons, sont des particules fondamentales qui ne sont pas composées de quarks : ce sont des leptons.

Saveurs et couleurs des quarks

Il existe six types de quarks, six « saveurs ». La plupart des particules (en particulier les plus courantes, évoquées ici) sont composées des deux saveurs de quarks les plus légères : les quarks *u* ou *up* (haut) et *d* ou *down* (bas). Ce modèle, qui présente l'intérêt de pouvoir décrire une multitude de particules avec seulement six types de particules, est au cœur de la chromodynamique quantique. Le terme fait référence aux « couleurs » des quarks, une autre de leurs propriétés. C'est aujourd'hui la meilleure théorie pour décrire les particules à l'échelle du nucléon et en deçà.

Le proton est composé de deux quarks *u* et de un quark *d* (on le note souvent *uud*), tandis que le neutron est constitué de deux quarks *d* et de un quark *u* (noté *udd*). Ces quarks *u* et *d* sont dits quarks de valence : ils confèrent aux particules leurs propriétés, telle la charge. Des gluons

participent à la cohésion des quarks, comme le font les pions pour les nucléons : ils sont une sorte de glu à quarks. À l'intérieur du nucléon existe une mer de quarks où se forment d'éphémères paires quark-antiquark. Le tableau complet de la chromodynamique quantique, décri-

LES EFFETS CONJUGUÉS DES SPINS et des charges de couleur modifient les orbites des quarks, qui ne sont pas répartis uniformément dans le neutron.

vant ce qui se passe à l'intérieur du nucléon, est difficile à dresser ; c'est pourquoi les physiciens se concentrent sur les quarks de valence pour décrire les nucléons dans le cadre du modèle des quarks constituants (CQM pour *Constituent Quark Model*).

Étant donné que les protons ont une charge +1 (l'unité étant la charge du proton) et les neutrons une charge nulle, on en déduit que les quarks *u* ont une charge égale à +2/3 et les quarks *d* à -1/3. Dans le modèle CQM, les trois quarks formant le nucléon sont en orbite à la même distance du centre du groupe. Pour le proton, les rayons électrique et magnétique, qui dépendent des orbites des quarks *uud* et de leurs spins, sont en accord avec les résultats obtenus par Hofstadter. La situation du neutron est différente. Son rayon magnétique, déterminé par la position moyenne des quarks, est non nul. Quant à son rayon électrique, il devrait s'annuler : les charges des quarks *u* et *d* devraient s'équilibrer quelle que soit la distance au centre du groupe puisque la charge du neutron est nulle. Mais...

Les quarks, comme les électrons, portent un spin. Cette propriété quantique fait ressembler ces particules à des balles en rotation autour de leur axe. Assimilons le quark à une boule de billard : lorsque celle-ci touche la bande, elle est déviée, et cette déviation dépend de l'effet (du spin) que l'on donne à la boule (au quark). Les mathématiques décrivant l'interaction de boules en rotation aident à décrire les particules dotées d'un spin. L'orientation du spin a son importance : les particules interagissent différemment selon les orientations de leurs spins.

Les quarks ont également une *charge de couleur*. L'interaction forte qui en résulte est bien supérieure (de deux ordres de grandeur) à la force électrique qui s'exerce entre les charges électriques des quarks. D'après le principe d'exclusion de Pauli, si deux

Glossaire

✓ **Baryon** : les neutrons et les protons appartiennent à la famille des baryons, particules constituées de trois quarks.

✓ **Quarks** : ces particules sont des constituants élémentaires de la matière, et ne peuvent être scindées en particules plus petites.

✓ **Saveur** : les quarks se classent en six types, nommés saveurs. Les neutrons sont constitués de deux quarks *d* et d'un quark *u*.

✓ **Charge** : les quarks ont une charge électrique (+ 2/3 pour le quark *u* et - 1/3 pour le quark *d*), et confèrent leur charge globale au proton (+ 1) et au neutron (nulle).

✓ **Couleur** : chaque quark porte une « couleur », une propriété de l'interaction forte responsable de la cohésion du baryon. Les quarks ont trois couleurs possibles, les gluons huit, et tout assemblage de quarks ou gluons est « incolore ».

✓ **Spin** : les quarks sont des particules magnétiques, caractérisées par un spin. L'orientation relative des spins des quarks du neutron influe sur leurs orbites : deux spins parallèles se repoussent, comme deux aimants.