

Un atome est constitué de trois types de particules. Les électrons, chargés négativement, orbitent autour du noyau atomique, rappelant les planètes du Système solaire ; ils évoluent à des vitesses de l'ordre de dix pour cent de la vitesse de la lumière, environ égale à 300 000 kilomètres par seconde. Les protons sont des particules du noyau, chargées positivement, près de 2 000 fois plus massives que les électrons. Ces deux types de particules déterminent la forme, la dynamique et les propriétés chimiques de l'atome. Enfin, les neutrons, eux aussi des constituants du noyau, ne portent aucune charge, et semblent être les spectateurs passifs de la mécanique atomique. Pourtant, ils ont bel et bien une vie propre. En témoigne l'effervescence qui règne à leurs surfaces, d'où jaillissent des particules, et dans leurs cœurs, qui contiennent des particules encore plus fondamentales : les quarks et les gluons.

Pour étudier les neutrons, il nous faut observer la matière à une échelle 100 000 fois plus petite que la taille de l'atome. Prenons un globule rouge, qui mesure 0,010 millimètre : il est environ 100 000 fois plus petit que l'être humain qui l'abrite. Chaque globule rouge est constitué d'atomes 100 000 fois plus petits, et les neutrons (comme les protons) sont encore 100 000 fois plus petits. Leur diamètre est de l'ordre du femtomètre (10^{-15} mètre, soit un milliardième de milliardième de mètre), ou fermi, du nom du physicien Enrico Fermi. Pour revenir à des dimensions plus habituelles, c'est comme si une orange – le noyau – était posée seule en plein Paris – l'atome –, quelques électrons se déplaçant sur le périphérique. L'essentiel d'un atome est ainsi constitué de vide.

Protons et neutrons sont nommés nucléons. Dans le noyau, ils sont très proches, arrangés un peu comme des oranges et des pommes sur un étal de marché. Ils ont de nombreuses caractéristiques similaires, notamment leur taille et leur masse. Un nucléon ayant un diamètre égal à 1,7 fermi, un gros noyau tel celui de l'uranium 238, contenant 238 nucléons, a un diamètre d'environ 15 fermis.

Dans l'atome le plus simple, l'hydrogène, un seul électron cohabite avec le noyau, constitué d'un seul proton : le neutron est en option. Après l'hydrogène, le type d'atome le plus simple est l'hélium 3, l'un des isotopes de l'hélium ;

il est constitué de deux électrons, deux protons et un neutron (deux isotopes ont le même nombre de protons, mais un nombre de neutrons différent). Sans le neutron, le noyau d'hélium 3 se désintégrerait sous l'effet de la répulsion électrostatique entre les deux protons de charge positive. En isolant les protons, les neutrons assurent la stabilité des noyaux des atomes.

Si on les retrouve dans presque tous les éléments – à l'exception de l'hydrogène –, les neutrons font pâle figure face aux protons. N'interagissant que dans un court rayon d'action, ils semblent ne pas servir à grand-chose. Alors que les deux protons de l'hélium 3 retiennent les électrons tout en se repoussant l'un l'autre, le neutron serait simplement posté entre les protons. Pourtant, contrairement aux apparences, le neutron n'est pas qu'un spectateur de la danse atomique : il joue, comme nous allons le voir, un rôle essentiel.

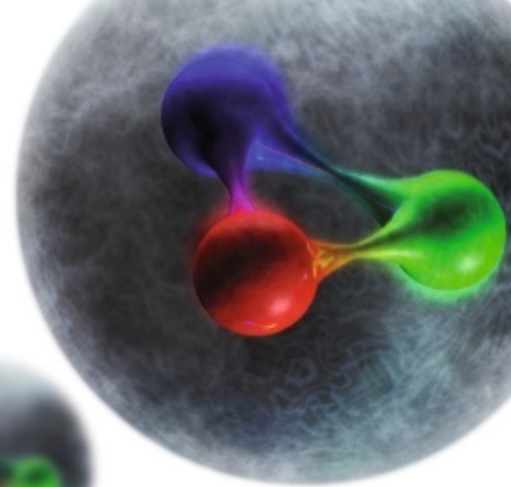
Plongée à l'intérieur du neutron

Depuis presque 60 ans, les physiciens sondent les protons et les neutrons, cherchant à mesurer leur taille et à caractériser l'interaction nucléaire à courte portée qui assure la cohésion du noyau. Il y a 45 ans a émergé l'idée que les nucléons sont constitués de petites particules nommées quarks et gluons. Reste à comprendre comment ces quarks s'assemblent au sein des nucléons. Forment-ils, comme les électrons dans un atome, des systèmes planétaires en orbite ? Ou s'associent-ils en un mélange amorphe ?

Pour compliquer le tout, personne n'a jamais observé un quark isolé, et personne n'espère en observer un. Malgré ces obstacles, les physiciens reconstruisent pièce par pièce l'anatomie du neutron.

Le mot « neutron » a été utilisé pour la première fois en 1899, afin de décrire la combinaison d'un électron négatif et d'un électron positif, dont on soupçonnait l'existence dans l'« éther ». Ce n'est qu'en 1932 que le physicien britannique James Chadwick identifie le neutron, libéré lors du bombardement d'un atome par des particules alpha (qui se révéleront plus tard être des noyaux d'hélium 4).

En 1935, la physique du neutron, particule électriquement neutre liée aux autres neutrons et aux protons par une force nucléaire à courte portée, se précise.



1. UN NOYAU ATOMIQUE est constitué de protons, de charge électrique positive, et de neutrons, neutres. Ils sont tous constitués de trois particules fondamentales nommées quarks. Ces quarks portent une charge électrique, ainsi qu'une charge de couleur à l'origine de l'interaction nucléaire forte, et un spin magnétique.

L'équilibre entre ces trois propriétés détermine la répartition des quarks au sein de la particule.

L'ESSENTIEL

- ✓ Le neutron est constitué de deux quarks *d* et de un quark *u*.
- ✓ Le quark *u* a une charge $+2/3$ et le quark *d* une charge $-1/3$.
- ✓ Bien que le neutron soit globalement neutre, sa densité de charge n'est pas uniforme.
- ✓ On étudie cette densité grâce à des collisions entre neutrons et électrons accélérés.

Didier Florentz

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.

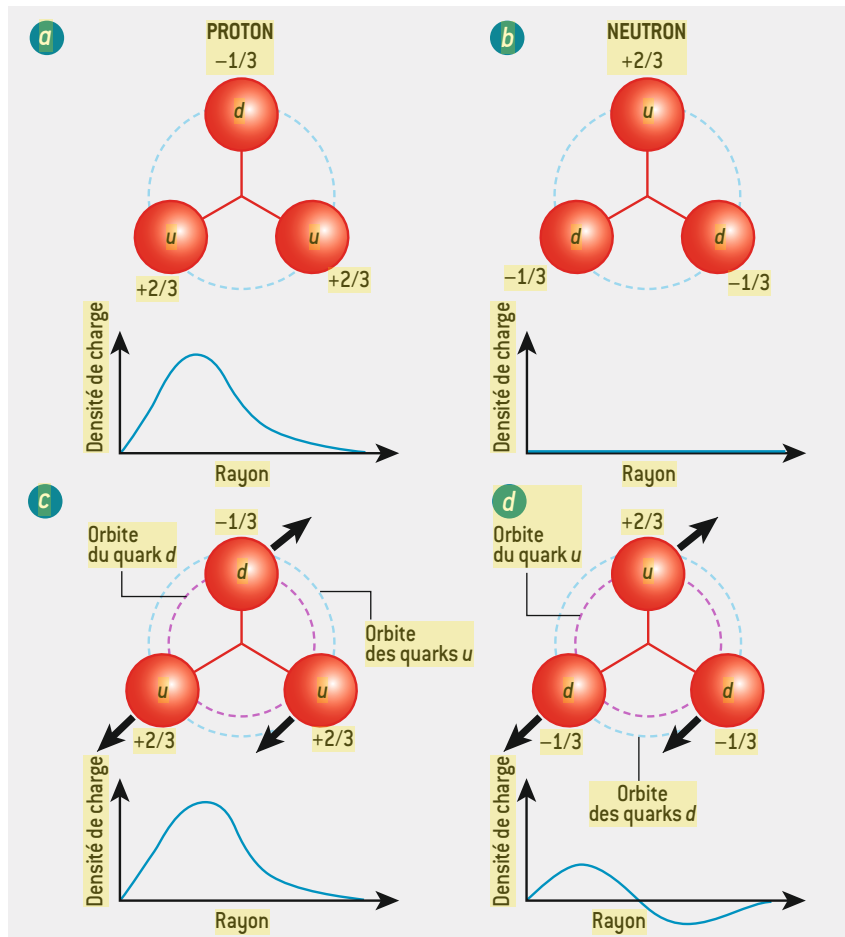
Un accélérateur ne « voit » pas vraiment le nucléon : il permet de mesurer la section efficace de la réaction électron-nucléon, c'est-à-dire la probabilité que l'électron propulsé par l'accélérateur interagisse avec le nucléon cible, l'électron incident étant renvoyé avec un angle et une énergie donnés. 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).