



La question qui tue !

Le neutron est-il « neutre » ?

La réponse qui achève

Comme son nom l'indique, le neutron est une particule neutre, c'est à dire sans charge électrique. Cependant, ce n'est pas une particule élémentaire : il est en fait composé d'autres particules dont certaines, les quarks, sont chargées. Si on observe un neutron de très près, on s'aperçoit qu'il n'est pas uniformément neutre, mais que les charges qui le composent sont distribuées dans l'espace (voir figure 1). De la même manière, un atome, qui est globalement neutre, est en fait composé d'un noyau de charge positive en son centre, entouré par un nuage d'électrons de charge négative. Comme pour l'atome, les charges électriques des constituants du neutron s'annulent pour en faire un objet globalement neutre.

Mais comment cette neutralité se manifeste-t-elle en pratique ? Eh bien, contrairement au cas d'une particule chargée, comme le proton, la trajectoire d'un neutron n'est pas modifiée par la présence de champs électrique ou magnétique uniformes. Il ne faut cependant pas en conclure que le neutron est complètement insensible à l'effet de tels champs. Par exemple, le neutron possède un moment magnétique intrinsèque non nul aligné avec son spin. Ce dernier est comme une petite boussole personnelle du neutron, que l'on représente par un vecteur – c'est à dire une flèche – donnant la direction de cette boussole. De ce fait, le neutron se comporte comme un dipôle magnétique : si on le place dans une région où règne un champ magnétique uniforme, son spin – s'il n'est pas aligné avec le champ – effectue un mouvement de rotation autour de l'axe de ce dernier, comme indiqué sur la figure 2 : c'est le mouvement de précession de Larmor. On parle alors d'interaction « dipolaire magnétique » (remarquez que cette interaction fait tourner le spin du neutron mais ne modifie pas sa trajectoire). On voit donc que le neutron... n'est pas si neutre que ça.

Les choses se compliquent-elles ? Disons plutôt qu'elles se nuancent : la notion de neutralité d'une particule n'est pas absolue, mais est définie par rapport à un type d'interaction bien précis. Par exemple, le pion chargé positivement π^+ possède une charge électrique non nulle et peut donc être accéléré ou dévié par des champs électromagnétiques uniformes. Cependant, il ne possède pas de spin et ne subit donc pas de mouvement de précession en présence d'un champ magnétique. On pourrait dire qu'il est « neutre » par rapport à l'interaction dipolaire magnétique. Un autre exemple intéressant est le pion neutre π^0 qui n'a ni charge électrique ni spin et est donc insensible aux champs électromagnétiques uniformes. Cependant, comme le π^+ et tous les autres **hadrons**, il est sensible aux interactions nucléaires fortes et n'est donc pas « neutre » par rapport à celles-ci. De façon générale, les particules peuvent être sensibles à plusieurs types d'interactions, qui se classent en quatre catégories : les interactions électromagnétiques, les interactions fortes, les interactions faibles, et les interactions gravitationnelles. Toutes les particules connues sont sensibles aux interactions gravitationnelles, mais elles peuvent être neutres (ou quasi-neutres) par rapport aux autres types d'interaction. Un exemple célèbre est le neutrino ν qui, à une excellente

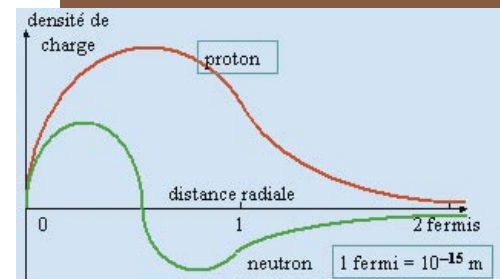


figure 1 : Distributions de la charge dans le neutron et dans le proton.

Le neutron composite

Le neutron n'est pas une particule élémentaire, mais est composé de quarks et d'anti-quarks – qui sont des particules chargées – ainsi que de gluons – qui sont électriquement neutres.

Seuls trois quarks, dits quarks de valence, apparaissent sans leur anti-quark et contribuent à la charge totale. Les quarks de valence du neutron sont deux quarks « d », de charge $-e/3$ (où e est la charge élémentaire) et un quark « u », de charge $+2e/3$. Au total, le neutron est bien neutre. Pour comparaison, le proton est composé des quarks « uud ». Les autres quarks et anti-quarks, dits de « la mer », sont présents en paires de charges égales et opposées ; leur contribution à la charge du neutron est donc nulle.

Étant composé de particules chargées, le neutron n'est pas uniformément neutre. La figure 1 illustre comment sont réparties les charges qui le composent.

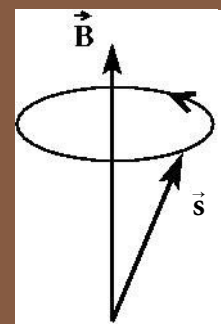


figure 2 : Mouvement de précession de Larmor d'un spin s interagissant avec un champ magnétique uniforme.



Le neutron est-il « neutre » ?

approximation, n'est sensible qu'aux interactions faible et gravitationnelle – ce qui le rend d'ailleurs extrêmement difficile à détecter.

Le fait qu'une particule donnée ne soit pas exactement neutre par rapport à un certain type d'interaction donne généralement lieu à des effets très fins, dont la mesure peut fournir des informations cruciales sur la nature des lois qui régissent le monde des particules élémentaires. En particulier, ce type de mesure permet de mieux connaître les différentes interactions répertoriées à ce jour et, éventuellement, de mettre en évidence de nouveaux types d'interactions. Pour illustrer cette idée, revenons à nos neutrons. Si leur spin peut précesser, c'est-à-dire tourner, dans un champ magnétique uniforme, il peut a priori interagir de manière similaire avec un champ électrique : on parle alors de couplage dipolaire électrique. Possibilité diablement intéressante ! Au cas où un tel couplage existerait, il nous renseignerait sur certaines propriétés de symétrie des lois de la physique. Voyons cela plus en détail et considérons l'opération qui consiste à inverser le sens du temps. Cette opération, que l'on note T , revient à visionner le film de la physique en appuyant sur la touche « retour arrière » de notre magnétoscope.

Comment les protagonistes de notre histoire, à savoir le spin et les champs électriques et magnétiques, sont-ils modifiés après cette opération T ? Considérons d'abord un champ électrique généré par deux charges opposées (figure 3). Les deux charges ne sont pas affectées si l'on inverse le sens du temps, et il en va donc de même pour le champ électrique qu'elles créent. À l'inverse, un champ magnétique est inversé si on change le sens du temps. Pourquoi donc ? Prenons une petite boucle dans laquelle circule un courant électrique. Ce courant engendre un champ magnétique orienté dans la direction perpendiculaire au plan de la boucle (figure 3). Si on regarde la boucle d'en haut, le champ magnétique créé pointe dans notre direction si le courant tourne dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, et dans la direction opposée dans le cas contraire. À présent, inversons le sens du temps... Le courant qui tourne dans la boucle change de sens et le champ magnétique associé est donc inversé. De même on peut montrer que le spin d'une particule est inversé quand on lui applique T .

Après ces petits tours de boucle, attaquons-nous aux deux interactions dipolaires, magnétique et électrique : que leur arrive-t-il si on change le sens du temps ? Prenons d'abord un spin interagissant avec un champ magnétique uniforme, comme représenté sur la figure 4. Sous l'opération T , l'un et l'autre changent de sens, mais leur orientation relative reste la même. Le système résultant est donc physiquement indiscernable du système initial : l'interaction dipolaire magnétique est invariante, c'est-à-dire qu'elle reste identique à elle-même, après renversement du temps. Mais les choses ne se passent pas aussi bien pour l'interaction dipolaire électrique. En effet, un spin dans un champ électrique (figure 4) forme après renversement du temps un système physiquement distinct du système initial : l'interaction de type dipolaire électrique n'est donc pas invariante sous T . Un raisonnement similaire montre que cette interaction

Hadrons : On classe les différents types de particules selon leur propriétés intrinsèques (masse, charge, spin, etc.), mais aussi selon le type d'interactions auxquelles elles sont sensibles. Ainsi, on appelle « hadrons » les particules qui sont sensibles à l'interaction nucléaire forte, comme le neutron ou le proton, et « leptons » celles qui ne le sont pas, comme l'électron ou le neutrino.

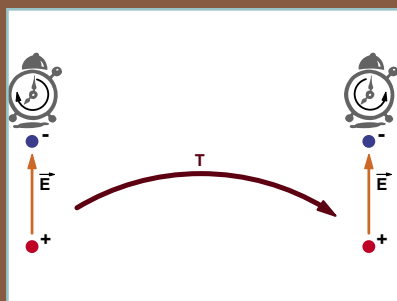
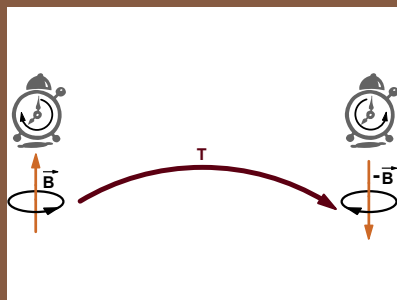


figure 3 : Transformation des champs électrique (haut) et magnétique (bas) sous l'opération T de renversement du sens du temps. Si le premier reste inchangé, le second, en revanche, est inversé.



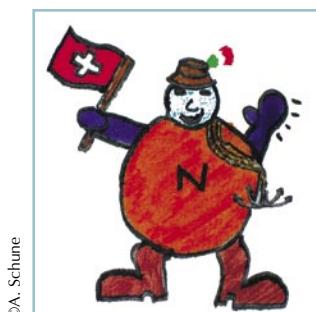


Le neutron est-il « neutre » ?

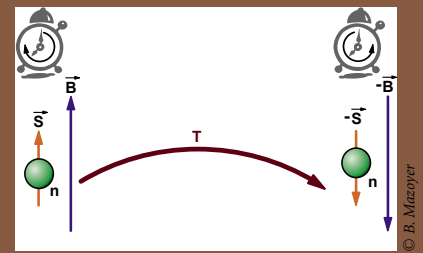
n'est pas non plus invariante sous l'opération dite de parité – notée P – qui consiste à renverser les trois axes de coordonnées spatiales. L'existence d'un couplage dipolaire électrique nous renseignerait donc directement sur les propriétés de symétrie des lois de la physique sous les opérations de renversement de l'espace (P) et du temps (T).

On sait aujourd'hui que P et T ne sont pas des symétries exactes des lois de la physique. En particulier, les interactions faibles sont différentes si on les regarde dans un miroir (P) ou si on passe le film à l'envers (T). Les mesures de l'intensité du couplage dipolaire électrique du neutron permettent de contraindre d'autres sources possibles de violation des symétries P et T. Par exemple, elles fournissent les meilleures limites à l'heure actuelle concernant la violation de P et T par les interactions fortes. Ces mesures pourraient aussi permettre de découvrir d'autres sources de violation de P et T dues à de nouveaux types d'interaction non encore découvertes. On voit donc que la « non-neutralité » du neutron par rapport à l'interaction dipolaire électrique peut s'avérer un outil crucial dans l'étude des interactions fondamentales.

Moralité : la notion de neutralité d'une particule est d'une simplicité trompeuse... Elle est en fait définie vis-à-vis d'un type d'interaction bien précis. Remarquons en passant qu'une particule qui serait totalement neutre par rapport à toutes les interactions n'offrirait guère d'attrait, car elle serait parfaitement indétectable et n'aurait aucun effet physique observable ! Au contraire, les écarts à la neutralité présentent un grand intérêt car ils permettent de quantifier précisément certaines propriétés fines des interactions fondamentales. Mais attention ! Il ne faut pas croire que ces propriétés soient des points annexes. En effet, elles peuvent avoir des conséquences extrêmement importantes. Un exemple des plus célèbres concerne le problème de l'anti-matière, ou plutôt le problème de l'absence d'anti-matière, dans l'Univers. En effet, on observe essentiellement de la matière et très peu d'anti-matière... ce qui est une chance, car s'il existait de grandes quantités d'anti-matière, toute la matière existante disparaîtrait à son contact, et nous avec ! On pense aujourd'hui que cette asymétrie matière—anti-matière dans l'Univers est intimement liée à la violation de T par les lois fondamentales de la physique. Cet effet, minuscule à l'échelle microscopique, serait responsable de l'existence de toute la matière que nous observons actuellement. La « non-neutralité » du neutron pourrait-elle nous aider à comprendre nos origines ?

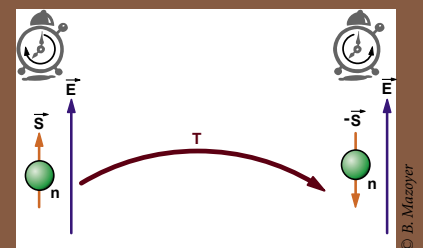


©A. Schume



© B. Mazoyer

figure 4 : Transformation d'un système (spin+champ magnétique) (haut) et (spin+champ électrique) (bas) sous l'opération de renversement du temps T. Dans le premier cas, le système résultant de la transformation est physiquement indiscernable du système initial, tandis que, dans le second cas, l'orientation relative du spin et du champ est modifiée et le système résultant est différent de l'original. L'interaction de type dipolaire entre le spin et un champ électrique est donc sensible au comportement des lois microscopiques de la physique sous le renversement du sens du temps.



© B. Mazoyer

Couplage dipolaire électrique

Pour un objet composé de particules chargées, comme le neutron, le couplage dipolaire a un champ électrique peut, en principe, être de deux types : il peut être dû à une asymétrie dans les distributions de charges positives et négatives de ses constituants, ou bien à un couplage direct de son spin avec le champ électrique. Le premier cas correspond au moment dipolaire électrique habituel et respecte les symétries P et T, tandis que le second, dont il est question dans cet article, les viole.