

Par chance pour la vie sur Terre, la plus grande partie de la matière n'est pas radioactive. Cela nous semble aller de soi, mais ce fait est étonnant. En effet, le neutron, l'un des deux constituants du noyau atomique (l'autre étant le proton), est sujet à désintégration radioactive. Au sein du noyau atomique, un neutron peut subsister très longtemps sans jamais se désintégrer. En revanche, lorsqu'il est à l'état libre, il se transforme en un proton par désintégration radioactive au bout d'une durée moyenne égale à un quart d'heure environ. Cet «environ» traduit une lacune dans la compréhension de cette particule par les physiciens. En effet, malgré tous nos efforts, nous ne sommes pas parvenus à mesurer précisément la durée de vie moyenne du neutron libre.

Cette incertitude sur la valeur de la durée de vie du neutron n'est pas simplement embarrassante pour nous autres expérimentateurs ; elle l'est aussi pour les scientifiques qui cherchent à comprendre l'Univers. La désintégration du neutron est l'un des exemples les plus simples d'«interaction faible», l'une des quatre interactions fondamentales (avec la gravitation, l'électromagnétisme et l'interaction forte). Pour vraiment comprendre l'interaction faible, il nous faut connaître avec précision la durée de vie moyenne du neutron. De plus, la valeur de cette durée de vie fut déterminante dans la formation des éléments chimiques les plus légers juste après le Big Bang. Les cosmologistes voudraient calculer les abondances attendues des différents éléments et les comparer aux mesures astrophysiques : un accord confirmerait notre tableau théorique, et un désaccord suggérerait que des phénomènes non encore découverts ont joué. Or établir une telle comparaison nécessite de connaître la durée de vie du neutron.

Il y a plus de dix ans, deux groupes indépendants d'expérimentateurs, l'un en France, sous une direction russe, et l'autre aux États-Unis, ont tenté de la mesurer précisément. L'un de nous (Peter Geltenbort) faisait partie de la première équipe, et l'autre (Geoffrey Greene) était membre de la seconde. Comme nos collègues, nous avons été étonnés et un peu déconcertés de constater que nos résultats divergeaient nettement.

Certains théoriciens ont suggéré que la différence était due à l'existence d'une physique exotique, c'est-à-dire que certains

neutrons des expériences se seraient transformés en des particules inconnues à ce jour, et que cela aurait eu des effets divergents sur les résultats des différentes expériences. Quant à nous, nous soupçonnions une explication plus terre à terre : l'un des groupes, ou les deux, avait simplement pu commettre une erreur ou, plus vraisemblablement, avait surestimé l'exactitude de son expérience.

Dans l'espoir de résoudre ce désaccord, l'équipe américaine a récemment achevé une longue étude méticuleuse de la source dominante d'incertitude dans son expérience. Mais, loin de régler le problème, ces travaux ont confirmé le résultat initial. Qui plus est, d'autres chercheurs ont ultérieurement confirmé les résultats de l'équipe de Peter Geltenbort. Cette divergence a encore accru notre perplexité.

Une désintégration due à l'interaction faible

En théorie, mesurer la durée de vie du neutron devrait être simple. La physique de la désintégration correspondante est bien comprise, et nous disposons de techniques perfectionnées pour étudier le processus. Nous savons par exemple que si une particule a la possibilité de se transformer en une ou plusieurs particules de masse inférieure tout en conservant des caractéristiques telles que charge électrique et moment cinétique de spin, elle le fera. Les neutrons libres présentent une telle instabilité. Lors du processus, une «désintégration bêta», le neutron se transforme en un proton, avec l'émission d'un électron et un antineutrino (l'homologue du neutrino pour l'antimatière). La masse totale des particules produites est légèrement inférieure à celle du neutron initial, mais la charge, le moment cinétique et d'autres propriétés restent inchangés. C'est notamment le cas de l'énergie : le défaut de masse se retrouve sous la forme d'énergie cinétique des particules filles.

On ne peut pas prédire exactement quand un neutron donné va se désintégrer, car le processus est un phénomène quantique fondamentalement aléatoire. On peut seulement dire combien de temps les neutrons vivent en moyenne. Ainsi, pour mesurer la durée de vie moyenne du neutron, il faut observer la désintégration de nombreux neutrons.

À cette fin, les chercheurs ont fait appel à deux méthodes expérimentales : la technique de la «bouteille» et celle du «faisceau». Dans

L'ESSENTIEL

■ Le neutron est, à l'état libre, instable : il se désintègre à un instant aléatoire, en moyenne au bout d'un temps égal à près de 15 minutes.

■ Les résultats expérimentaux obtenus par deux méthodes différentes sont en conflit sur la durée de vie moyenne du neutron, dont la valeur précise importe pour diverses questions de physique et de cosmologie.

■ Ce désaccord pourrait être dû à des incertitudes expérimentales mal évaluées ou, plus intrigant, à l'existence de phénomènes physiques non prévus.

les expériences de bouteille, on confine les neutrons dans un récipient, et on compte combien il en reste au bout d'un temps donné. Dans la méthode du faisceau, on mesure non pas la disparition des neutrons eux-mêmes, mais l'apparition de particules en lesquelles ils se désintègrent.

L'approche de la bouteille est particulièrement délicate parce que les neutrons traversent facilement la matière, donc les parois des récipients. Comme l'avait suggéré en 1959 le physicien soviétique Iakov Zeldovitch, les expérimentateurs qui utilisent l'approche de la bouteille (tels que Peter Geltenbort et ses collègues en France) contournent la difficulté en piégeant des neutrons extrêmement « froids » (c'est-à-dire dont l'énergie cinétique est très faible) dans un récipient aux parois faites d'un matériau approprié (voir l'encadré pages 68-69). Si tous les neutrons sont suffisamment lents et si les parois sont de qualité suffisamment bonne, celles-ci réfléchissent les neutrons, qui restent donc dans la bouteille. Pour ce faire, les neutrons doivent se déplacer à des vitesses ne dépassant pas quelques mètres par seconde, très inférieures aux 10 millions de mètres par seconde environ des neutrons émis lors d'une fission nucléaire, par exemple. Ces neutrons « ultrafroids » sont si lents que vous pourriez les dépasser à la course. L'expérience de bouteille la plus précise en date a été effectuée à l'institut Laue-Langevin (ILL), à Grenoble.

Malheureusement, aucune bouteille n'est parfaite. Si des neutrons fuient occasionnellement hors du récipient, nous risquons d'attribuer cette perte aux désintégrations bêta et de commettre ainsi une

erreur sur la durée de vie. Nous devons donc nous assurer d'effectuer les corrections nécessaires pour que nos calculs prennent en compte uniquement les particules qui ont effectivement subi une désintégration bêta.

Pour faire cette correction, nous avons recours à une astuce. Le nombre de neutrons s'échappant à travers les parois de la bouteille dépend de la fréquence à laquelle les neutrons rebondissent sur les parois. Si les neutrons sont plus lents ou si la bouteille est plus grosse, la fréquence des rebonds (et donc le taux de perte) diminue. En faisant varier à la fois la taille de la bouteille et l'énergie (la vitesse) des neutrons dans des tests successifs, nous pouvons extrapoler les résultats à une bouteille hypothétique où il n'y aurait pas de collisions, et donc pas de pertes au niveau des parois. Bien sûr, cette extrapolation n'est pas parfaite, mais nous faisons tout notre possible pour prendre en compte les éventuelles erreurs introduites par ce calcul.

Dans la méthode du faisceau, utilisée par Geoffrey Greene et d'autres au Centre de recherche sur les neutrons du NIST (*National Institute of Standards and Technology*, l'Institut américain des normes et de la technologie), on envoie un faisceau de neutrons froids à travers un piège électromagnétique constitué d'un champ magnétique et d'électrodes à haute tension en forme d'anneau. Ce dispositif piège les particules de charge positive (voir l'encadré pages 68-69). Les neutrons étant électriquement neutres, ils le traversent sans encombre. Mais si un neutron se désintègre dans le piège, le proton (de charge positive) qui en résulte reste prisonnier. On ouvre périodiquement le piège, on en fait sortir

LES AUTEURS

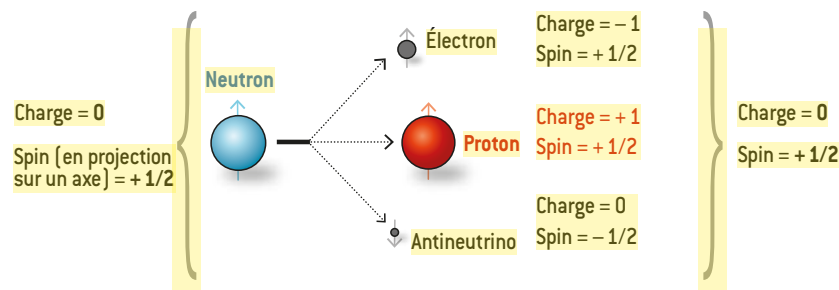


Geoffrey L. GREENE est professeur de physique à l'université du Tennessee, aux États-Unis, et travaille aussi à l'accélérateur SNS (*Spallation Neutron Source*) du Laboratoire américain d'Oak Ridge.

Peter GELTENBORT est chercheur membre de l'institut Laue-Langevin, à Grenoble.

COMMENT LES NEUTRONS SE DÉSINTÈGRENT

Le neutron libre (non lié au sein d'un noyau atomique) se désintègre spontanément au bout d'un temps qui, en moyenne, est égal à un peu plus de 14 minutes. Bien que cette durée de vie moyenne ne soit pas connue avec une assez bonne précision, on sait que le neutron se transforme par désintégration bêta, un processus dû à l'interaction faible,



l'une des quatre interactions fondamentales. Le neutron se transforme alors en un proton, avec émission d'un électron et d'un antineutrino (l'antiparticule du neutrino). Dans ce processus, la charge électrique totale du système et la composante de son spin (moment cinétique intrinsèque) selon un axe quelconque restent inchangées.

les protons et on les compte. En principe, le piégeage et la détection des protons sont presque parfaits, et on n'a que quelques légères corrections à apporter pour prendre en compte les éventuelles désintégrations que l'on aurait manquées.

Pour être utile, le résultat d'une mesure doit être accompagné d'une estimation fiable de son exactitude. Une mesure de la taille d'une personne avec une incertitude de un décimètre, par exemple, est bien moins significative qu'une mesure dont l'incertitude est de un millimètre. C'est pourquoi on indique toujours l'incertitude expérimentale quand on fait des mesures de précision. Une incertitude de une seconde, par exemple, signifie que notre mesure a une forte probabilité de ne pas être plus d'une seconde plus courte ou plus longue que la valeur réelle.

Erreurs statistiques et erreurs systématiques

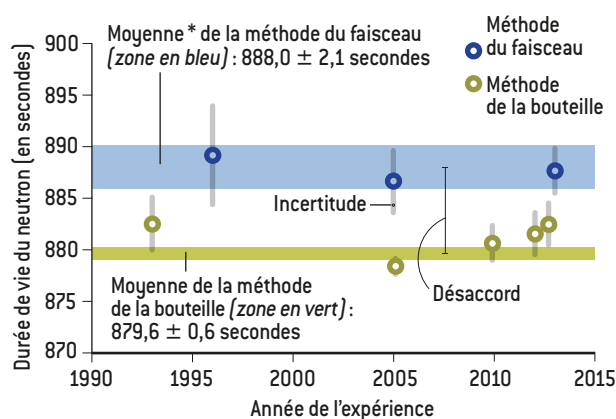
Toute mesure a, en général, deux sources d'incertitude. En premier lieu, des erreurs statistiques se produisent parce qu'une mesure expérimentale ne porte que sur un échantillon de taille finie – un nombre fini de désintégrations de neutrons dans notre cas. Plus l'échantillon est grand, plus la mesure est fiable et plus l'erreur statistique est faible.

La seconde source d'incertitude, l'«erreur systématique», est beaucoup plus difficile à estimer parce qu'elle découle d'imperfections dans le processus de mesure. Ces dernières peuvent être simples (comme une mauvaise calibration de la toise qui mesure la taille d'une personne). Elles peuvent aussi être plus subtiles, par exemple un biais d'échantillonnage : ainsi, dans un sondage téléphonique, le sondeur tend à composer des numéros sur ligne fixe plutôt que sur ligne mobile, ce qui risque de constituer un échantillon non représentatif de la population visée.

Les expérimentateurs se donnent beaucoup de mal pour réduire ces erreurs systématiques, mais elles sont impossibles à éliminer complètement. Le mieux que l'on puisse faire est de réaliser une étude détaillée de toutes les sources d'erreur imaginables, et ensuite estimer l'effet que chacune peut avoir sur le résultat final. On additionne ensuite cette erreur systématique avec l'erreur statistique afin de donner une meilleure estimation de la fiabilité globale de la mesure. En d'autres termes, on se donne beaucoup de mal afin d'estimer les «inconnues connues».

TECHNIQUES DIFFÉRENTES, RÉSULTATS DIFFÉRENTS

Les chercheurs ont recouru à deux principales techniques pour mesurer la durée de vie moyenne des neutrons : la méthode de la « bouteille », et celle du « faisceau ». Les diverses mesures par la méthode de la bouteille sont en accord les unes avec les autres compte tenu de leurs marges d'erreur, comme le sont entre elles les mesures par la méthode du faisceau. L'ennui est que les résultats obtenus par les deux techniques divergent de plus de 8 secondes. L'écart peut sembler minime, mais il est d'amplitude bien plus grande que l'incertitude des mesures, ce qui signifie que cette divergence constitue un véritable problème. Soit les chercheurs ont sous-estimé les incertitudes de leurs résultats, soit, hypothèse plus passionnante, la différence résulte d'un phénomène physique inconnu.



* La moyenne de la méthode du faisceau ne tient pas compte de la mesure de 2005, supplantée par celle de 2013.

PLUSIEURS EXPÉRIENCES PORTANT SUR LA DURÉE DE VIE DU NEUTRON ont été réalisées au cours des vingt-cinq dernières années. La moyenne des résultats obtenus par une méthode diffère nettement de la moyenne des résultats donnés par l'autre méthode.

Bien sûr, la grande crainte est que l'on soit passé à côté d'une «inconnue inconnue» – un effet systématique, caché dans la procédure expérimentale, dont on ignore même l'existence. La seule façon de surmonter ce type d'erreur supplémentaire est d'effectuer une autre mesure complètement indépendante, par une méthode complètement différente qui ne partage pas les mêmes effets systématiques. Si ces deux mesures indépendantes sont en accord compte tenu de leurs incertitudes associées, on peut avoir confiance dans les résultats. Si, en revanche, elles sont en désaccord, c'est qu'il y a un problème.

Pour la durée moyenne de vie du neutron, nous disposons bien de deux mesures indépendantes, par le faisceau et par la bouteille. Le résultat le plus récent de l'expérience réalisée au NIST donne une valeur de 887,7 secondes pour la durée de vie du neutron. L'incertitude statistique est estimée à 1,2 seconde, et l'incertitude systématique

à 1,9 seconde. Leur combinaison (qui n'est pas une simple addition) donne une incertitude totale de 2,2 secondes. Cela signifie que la valeur réelle de la durée de vie moyenne du neutron a une probabilité de 68 % de différer de moins de 2,2 secondes de la valeur mesurée.

L'expérience de la bouteille à l'ILL, en revanche, a livré une durée de vie moyenne égale à 878,5 secondes avec une incertitude statistique de 0,7 seconde, une incertitude systématique de 0,3 seconde et une incertitude totale de 0,8 seconde.

Il s'agit là des deux expériences les plus précises du monde pour les deux méthodes de mesure, et leurs résultats diffèrent de plus de 8 secondes. Cet écart peut paraître faible, mais il est nettement supérieur aux incertitudes évaluées pour chacune des deux expériences : la probabilité d'obtenir une telle différence par le seul fait du hasard est inférieure à 1/10000. Nous devons donc sérieusement envisager la possibilité que ce