

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

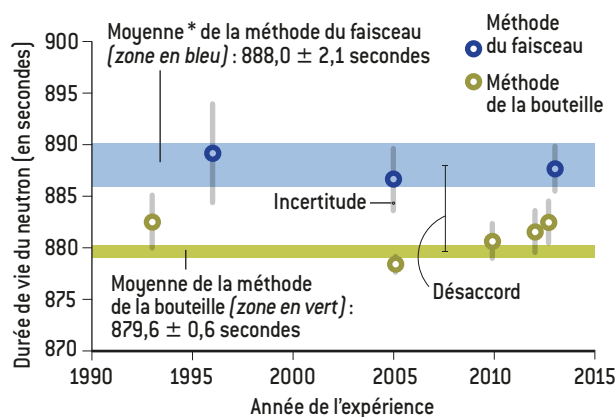
Toute mesure a, en général, deux sources d'incertitude. En premier lieu, des erreurs statistiques se produisent parce qu'une mesure expérimentale ne porte que sur un échantillon de taille finie – un nombre fini de désintégrations de neutrons dans notre cas. Plus l'échantillon est grand, plus la mesure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

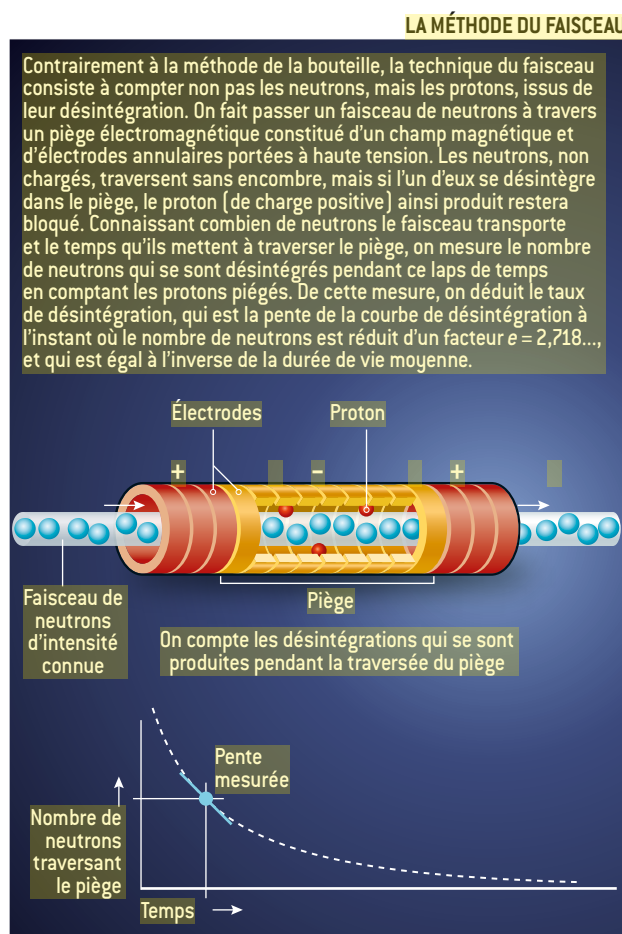
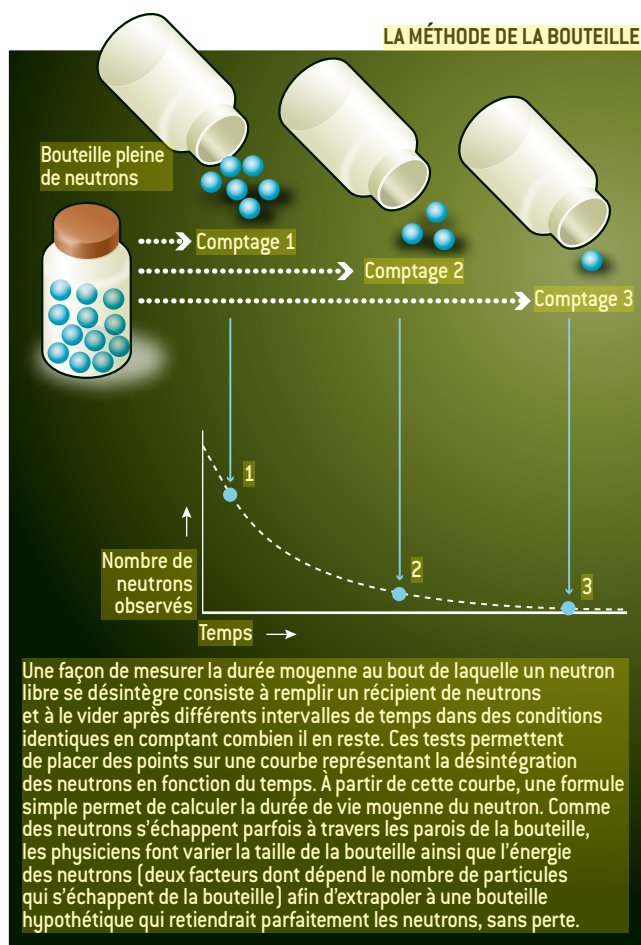
Bien sûr, la grande crainte est que l'on soit passé à côté d'une «inconnue inconnue» – un effet systématique, caché dans la procédure expérimentale, dont on ignore même l'existence. La seule façon de surmonter ce type d'erreur supplémentaire est d'effectuer une autre mesure complètement indépendante, 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



désaccord résulte d'une inconnue inconnue, c'est-à-dire que nous soyons passés à côté de quelque chose d'important.

Des phénomènes nouveaux en jeu ?

Il serait passionnant que la divergence entre les deux mesures traduise un phénomène physique qui reste à découvrir. Une raison de le penser est que, bien que les méthodes de la bouteille et du faisceau soient en désaccord, les différentes études effectuées à l'aide d'une même méthode concordent.

Imaginons par exemple qu'en plus de la désintégration bêta classique, les neutrons puissent se désintégrer par un processus inconnu ne créant pas de protons, ces particules que l'on compte dans les mesures par la méthode du faisceau. Les expériences utilisant la méthode de la bouteille, où l'on compte le nombre total de neutrons « perdus », dénombreraient

à la fois les neutrons qui ont disparu par désintégration bêta et ceux qui ont subi ce second processus. On obtiendrait une durée de vie plus brève que si le neutron était soumis à la seule désintégration bêta. Parallèlement, les expériences par la méthode du faisceau n'enregistreraient que les désintégrations bêta produisant des protons et fourniraient donc une valeur plus élevée de la durée de vie. Jusqu'à présent, comme nous l'avons vu, les expériences par faisceau mesurent effectivement une durée de vie légèrement plus longue que celles par bouteille.

Quelques théoriciens ont pris cette idée au sérieux. Zurab Berezhiani, de l'université de L'Aquila, en Italie, et ses collègues ont proposé que le neutron libre se transformerait parfois en un hypothétique « neutron miroir » qui n'interagirait plus avec la matière ordinaire et qui semblerait donc disparaître. Cette matière miroir pourrait contribuer à la quantité totale de matière noire de l'Univers.

Bien que cette idée soit séduisante, elle reste hautement spéculative. Avant que les physiciens n'acceptent un concept aussi radical que celui de matière miroir, il faudra une confirmation plus catégorique de la divergence entre les mesures de la durée de vie du neutron par les deux méthodes.

Il nous paraît beaucoup plus probable que l'une des expériences (voire les deux) ait sous-estimé l'un des effets systématiques ou omis d'en prendre en compte un. Une telle possibilité est toujours présente quand on travaille sur des dispositifs expérimentaux très fins et sensibles.

Certes, les expérimentateurs que nous sommes seront plus tranquilles quand nous aurons déterminé l'origine du désaccord entre les deux mesures. Mais surtout, si nous parvenons à mesurer avec précision la durée de vie moyenne du neutron, nous serons en mesure de régler plusieurs questions fondamentales sur l'Univers qui taraudent les physiciens.

Tout d'abord, une évaluation précise de l'échelle temporelle de la désintégration du neutron nous renseignera sur l'interaction faible en général. Cette force est responsable de la plupart des désintégrations radioactives et la désintégration bêta du neutron en est l'une des expressions les plus simples et les plus pures. Pour calculer les détails de processus nucléaires plus complexes faisant intervenir l'interaction faible, il nous faut d'abord comprendre comment elle opère dans la désintégration du neutron.

Pourquoi la durée de vie du neutron importe

Déterminer avec précision le rythme de désintégration des neutrons nous aiderait également à tester la description des débuts de l'Univers qu'en donne la théorie du Big Bang.

Selon cette dernière, quand l'Univers n'était âgé que d'environ une seconde, il était constitué d'un mélange chaud et dense de particules : protons, neutrons, électrons et quelques autres... À cette époque, la température de l'Univers s'élevait à environ 10 milliards de degrés, une température telle que ces particules étaient trop énergétiques pour qu'elles puissent se lier et former des

La durée de vie du neutron

est l'un des paramètres qui déterminent l'évolution de l'Univers depuis le Big Bang

noyaux ou des atomes. Au bout de trois minutes environ, l'Univers s'est dilaté et refroidi, atteignant une température à laquelle les protons et les neutrons ont pu se lier et former les noyaux atomiques les plus simples : du deutérium, l'isotope lourd de l'hydrogène.

À partir de là, d'autres noyaux simples ont pu se former. Ainsi, en capturant un proton, le deutérium produit un isotope de l'hélium (^3He); en se liant, deux noyaux de deutérium donnent naissance à un isotope plus lourd de l'hélium (^4He); et des noyaux plus lourds se sont formés en petit nombre, jusqu'à l'élément lithium (quant aux éléments plus lourds, on pense qu'ils ont été produits dans les étoiles, un grand nombre de millions d'années plus tard).

Ce processus est connu sous le nom de nucléosynthèse primordiale. Si, pendant que l'Univers se refroidissait, les neutrons s'étaient désintégrés trop vite, il ne serait plus resté aucun neutron quand la température a diminué suffisamment pour que se forment des noyaux atomiques : il ne serait resté que des protons, et nous aurions un cosmos presque entièrement constitué d'hydrogène.

En revanche, si la durée de vie du neutron avait été trop longue par rapport au temps nécessaire pour que l'Univers se refroidisse et que la nucléosynthèse primordiale soit possible, l'hélium aurait été surabondant, ce qui aurait perturbé la formation des éléments plus lourds intervenant dans l'évolution des étoiles et, à terme, dans l'apparition de la vie. Ainsi, l'équilibre entre la vitesse de refroidissement de l'Univers et la durée de vie du neutron était critique pour que se créent les éléments dont sont composés notre planète et tout ce qui y vit.

À partir des données astronomiques, on peut mesurer le rapport entre les abondances cosmiques d'hélium et d'hydrogène, ainsi que les abondances de deutérium et d'autres éléments lourds. Nous aimerions savoir si ces mesures sont en accord avec les valeurs prédites par la théorie du Big Bang. Mais la prédiction théorique dépend de la valeur précise de la durée moyenne de vie du neutron. En l'absence d'une valeur précise et exacte, notre capacité à effectuer des comparaisons est limitée.