

États quantiques du neutron dans le champ de pesanteur : un laboratoire pour l'étude de la gravitation



Konstantin Protasov
protasov@lpsc.in2p3.fr

Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie (LPSC), UMR 5821, Université Joseph Fourier/CNRS/Institut National Polytechnique, Grenoble

L'étude de la gravitation dans les systèmes microscopiques est un grand défi expérimental et un excellent laboratoire pour tester les théories quantiques modernes. La découverte récente des états liés du neutron dans le champ de pesanteur représente un pas important dans cette voie.

La gravitation est certainement, parmi toutes les interactions de la nature, la plus universelle, la plus évidente et, paradoxalement, la plus mal connue expérimentalement. Tous les corps matériels ainsi que les photons sont sensibles à cette force, mais si cette interaction est bien étudiée pour les objets macroscopiques, elle l'est beaucoup moins dans le monde microscopique. On le comprend assez facilement car cette interaction est très faible. Un exemple parlant de la faiblesse relative de la gravité pourrait être l'atome d'hydrogène, composé d'un proton et d'un électron, pour lesquels l'attraction due à la force électrique est 10^{40} fois plus forte que celle due à la gravitation. De plus, dans le monde microscopique elle est également concurrencée par deux autres interactions – forte et faible – qui sont des interactions à courte portée.

La deuxième raison de notre compréhension incomplète de la gravitation est plutôt d'ordre conceptuel : nous avons toujours beaucoup de mal à l'intégrer dans les théories quantiques modernes et à construire une théorie qui unifie les quatre interactions fondamentales. Nous ne sommes pas en mesure de donner une formulation parfaitement cohérente de la théorie quantique de la gravitation : la raison essentielle tient à ce que la géométrie de l'espace-temps tient lieu d'invariant structurel pour la théorie quantique des champs tandis qu'elle est la variable dynamique de la relativité générale. Au-delà des difficultés techniques de construction des modèles, le problème central se trouve donc dans une radicale divergence conceptuelle que les « astuces » usuellement employées en physique des hautes énergies ne permettent pas de lever. C'est pourquoi toute nouvelle expérience pouvant aborder la gravitation dans le monde microscopique – le monde de la mécanique quantique – suscite un intérêt particulier.

La signature la plus explicite d'un phénomène quantique est son caractère discret et, en particulier, un système quantique doit présenter des énergies ne pouvant prendre que des valeurs bien définies. La faiblesse de l'interaction

gravitationnelle rend la différence entre deux énergies quantiques permises très faible, et ainsi très difficilement détectable.

Dans la conception d'une expérience qui cherche à mettre en évidence des phénomènes quantiques pour un système gravitationnel, le problème majeur reste la nécessité de s'affranchir de l'interaction coulombienne. Cette condition impose d'utiliser des particules neutres. Aujourd'hui, les physiciens savent bien maîtriser et manipuler les atomes neutres et les neutrons, excellents candidats pour ce type d'études. Malheureusement, malgré leur neutralité électrique, les atomes demeurent sensibles à une interaction électromagnétique due à leur polarisabilité.

L'autre candidat, le neutron, est parfaitement neutre. De plus, sa durée de vie (de l'ordre de quinze minutes) est suffisamment longue pour permettre sa manipulation.

Cependant, sa neutralité crée un autre problème : un neutron issu d'une fission nucléaire a une fâcheuse tendance à s'échapper. Il possède une grande vitesse et pénètre ainsi facilement d'épaisses couches de matière. Pour l'appivoiser, il faut le « ralentir » et le « canaliser », afin de produire des neutrons de très basse énergie appelés neutrons ultra froids (UCN, voir encadré). Ces neutrons pouvant être confinés dans des pièges matériels, il est possible d'étudier leur comportement dans le champ gravitationnel.

Système expérimental

L'idée de faire rebondir des neutrons ultra froids au-dessus d'un miroir, pour étudier leur comportement dans le champ de pesanteur, a été suggérée par deux physiciens du Joint Institut for Nuclear Research de Dubna (JINR), Vladislav Louschikov et Alexander Frank, au début des années 70. Le mouvement du neutron sur un miroir parfait se sépare en deux mouvements indépendants : le mouvement horizontal le long du miroir et le



Encadré 1

Neutrons ultra froids

Le terme « neutrons ultra froids » (en anglais « ultra cold neutrons » – UCN) a été introduit au début des années 70 par Ilya Frank (physicien théoricien, prix Nobel pour l'explication de l'effet Cerenkov et directeur du laboratoire où la découverte des UCN a été faite) et Albert Steyerl (physicien expérimentateur, un des premiers à étudier les UCN) pour désigner une infime partie des neutrons produits dans un réacteur nucléaire. La caractéristique principale qui distingue ces neutrons de tous les autres est leur interaction avec la matière : ils sont tellement lents qu'ils ne peuvent pas pénétrer dans la matière. Ces neutrons sont réfléchis par la surface de la plupart des matériaux.

Les neutrons naissent dans un réacteur, lors d'une fission des noyaux d'uranium, avec de très grandes vitesses de l'ordre de 20 000 km/s. Mais ils entrent très rapidement en collision avec le milieu environnant composé, par exemple, de graphite ou d'eau. Le choix de ces matériaux (appelés modérateurs) est dicté surtout par leur capacité à ralentir les neutrons (modérer leurs vitesses). Comme une boule de billard sur une table de jeu couverte d'autres boules, un neutron issu d'une fission entre en collision élastique avec les noyaux de carbone (pour les réacteurs à graphite), perd son élan en quelques dizaines de collisions et continue sa course avec des vitesses beaucoup plus faibles. L'écrasante majorité des neutrons ont ainsi des vitesses de l'ordre de 2 km/s. Cependant, on trouve des neutrons des vitesses beaucoup plus petites ou beaucoup plus grandes que cette valeur. Les neutrons très lents (UCN) ont des vitesses extrêmement faibles (de l'ordre d'une dizaine de m/s) par rapport à la plupart de leurs confrères et ne représentent qu'une partie infime, de l'ordre de 10^{-11} , du nombre total des neutrons dans un réacteur. On peut dire que les neutrons avec des vitesses de l'ordre de 2 km/s ont une température ambiante de l'ordre de 30 °C ou 300 K tandis que les neutrons avec des vitesses de l'ordre de 10 m/s ont une température effective de l'ordre d'un millikelvin !

La propriété des UCN d'être réfléchis à la surface de la matière peut paraître étonnante, surtout que le neutron a été découvert en 1932 grâce à sa capacité à pénétrer de très épaisses couches de matière. C'est pourquoi le stockage des neutrons dans un volume, nécessaire pour augmenter la durée d'observation dans les expériences, paraissait alors inimaginable. C'est en 1959 que Yakov Zeldovich a supposé le contraire et qu'il a formulé les conditions pour que cela puisse être réalisé. Il a compris en particulier que, même si les surfaces de volume de stockage sont à température ambiante, les UCN stockés ne seront pas réchauffés lors des collisions contre les parois. Mais il a fallu attendre presque

une dizaine d'années avant que l'existence de ces neutrons soit mise en évidence en 1968 par un groupe de chercheurs du JINR de Dubna.

Cette expérience était très difficile à réaliser : le nombre total des UCN dans un réacteur n'est pas très grand, mais surtout il faut les « séparer » de tous les autres neutrons. Même aujourd'hui cette tâche n'est pas aisée. Dans le monde, il n'existe que peu de réacteurs auprès desquels on puisse faire des expériences avec des UCN. Le plus grand flux d'UCN est obtenu auprès du réacteur de l'Institut Laue Langevin (ILL) à Grenoble, qui garde la suprématie mondiale dans le domaine.

La propriété d'interaction des UCN avec la matière trouve son explication naturelle dans le cadre de la mécanique quantique qui décrit des particules comme des ondes. Comme la lumière, ils peuvent être caractérisés par une longueur d'onde dite de de Broglie. Cette longueur est inversement proportionnelle à la vitesse du neutron et définit « sa taille ». Un neutron qui s'approche de la surface de la matière avec une très faible vitesse possède une taille énorme – beaucoup plus grande que la distance entre les atomes voisins. Il ne voit pas d'atomes distincts, il interagit simultanément avec un grand nombre d'atomes et il est réfléchi à la surface de tous les matériaux (à quelques exceptions près). Nous pouvons ici considérer que cette diffusion est élastique. Ceci signifie qu'un UCN n'échange pas d'énergie avec la surface des matériaux. Il reste toujours à très basse température même si les murs du piège dans lequel il se trouve sont à la température ambiante.

Cette propriété est caractéristique des neutrons suffisamment lents. Dès que l'on augmente la vitesse du neutron, il pénètre dans la matière. On introduit la notion de vitesse limite d'un matériau, dépendant de la composition chimique et de la densité. Cette vitesse limite « sépare » les UCN des autres neutrons. Pour la plupart des matériaux, elle est de l'ordre de 5-10 m/s et elle correspond à une énergie cinétique du neutron de l'ordre de quelques dizaines de neV.

La possibilité pour les UCN d'être stockés dans un piège matériel ouvre la voie à toute une série de nouvelles expériences dans lesquelles le temps d'observation est de l'ordre de quelques centaines de secondes (proche de la durée de vie du neutron) par rapport à la fraction de seconde, caractéristique des expériences avec les neutrons plus rapides (le temps nécessaire à un neutron ayant une vitesse de quelques km/s pour traverser une installation expérimentale d'une longueur de quelques mètres). Parmi ces expériences, nous ne citerons que la plus fondamentale : la mesure la plus précise de la durée de vie du neutron est faite aujourd'hui avec les UCN.

mouvement vertical, selon l'axe z . Si le premier est un mouvement libre, le deuxième ne l'est pas : le neutron reste confiné entre le miroir d'un côté et le champ de pesanteur de l'autre, qui l'empêche de monter indéfiniment. Ce deuxième mouvement sera au centre de notre intérêt.

Cet exercice élémentaire d'une balle qui rebondit sur une surface est bien connu en physique : en fonction de

son énergie, la balle va monter à une hauteur plus ou moins grande.

La mécanique quantique prédit un résultat beaucoup moins trivial. Elle affirme que l'énergie d'un système confiné ne possède que des valeurs discrètes (quantifiées). Dans notre cas, cela veut dire que l'énergie du neutron ne possède que certaines valeurs bien définies correspondant au mouvement vertical. En particulier, la

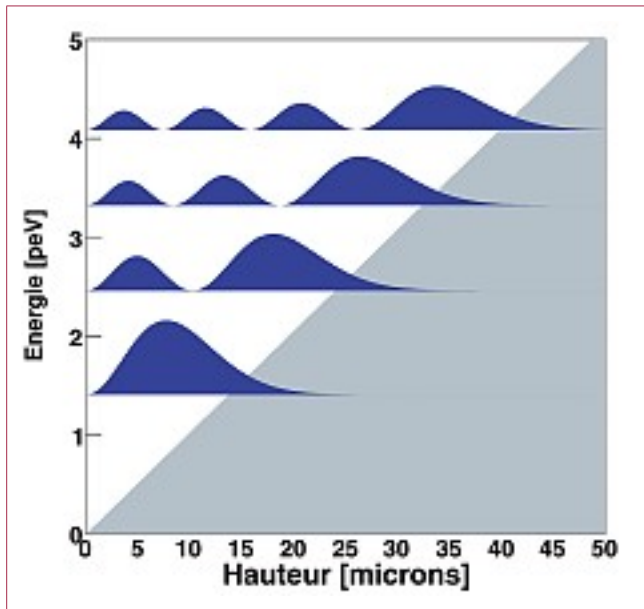


Figure 1 – Puits du potentiel où le neutron est confiné : infini en zéro à la surface du miroir et linéaire en z ($V = mgz$) pour z positif. On présente également les niveaux d'énergie permis et les carrés des fonctions d'onde $\psi^2(z)$ correspondantes qui donnent la probabilité de présence du neutron au point z .

mécanique quantique interdit au neutron d'avoir une énergie nulle : il lui est impossible de se reposer sur la surface sans bouger.

Les énergies discrètes permises peuvent être facilement calculées en utilisant l'équation de Schrödinger. Le potentiel au sein duquel le neutron est confiné est représenté sur la *figure 1*.

D'un côté ($z=0$), on voit le miroir qui représente un potentiel infini, un mur infranchissable. De l'autre, le champ de pesanteur crée le potentiel habituel $V(z)=mgz$, $g=9,8 \text{ m/s}^2$ étant l'accélération de la gravité. L'énergie minimale permise – l'énergie de l'état fondamental – est extrêmement faible, mais non nulle :

$$\begin{aligned} E_0 &= 2,34 \text{ } mgz_0 \approx 1,4 \text{ peV} \\ &= 1,4 \cdot 10^{-12} \text{ eV} = 1,4 \cdot 10^{-31} \text{ J} \end{aligned}$$

avec

$$z_0 = (\hbar^2 / (2m^2g))^{1/3} \approx 5,87 \mu\text{m}$$

où $\hbar = 6,67 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck et z_0 l'échelle de longueur caractéristique. La constante 2,34 est obtenue par la condition d'annulation de la fonction d'onde sur le miroir (les solutions analytiques de l'équation de Schrödinger de notre problème sont connues, ce sont des cas particuliers des fonctions de Bessel qui portent le nom de fonctions d'Airy).

Pour se rendre compte de la faiblesse de cette énergie E_0 , on peut rappeler que les neutrons « naissent » dans le réacteur avec des énergies de l'ordre de $2 \cdot 10^6 \text{ eV}$ et se « refroidissent » jusqu'à la température ambiante qui correspond à $0,025 \text{ eV}$. Mêmes les UCN ont des énergies beaucoup plus grandes (de l'ordre de 10^{-7} eV) que cette énergie

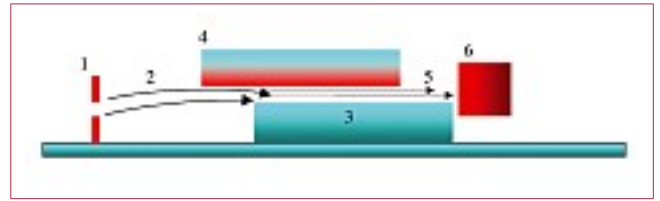


Figure 2 – Le schéma de principe de l'expérience. De gauche à droite : les lignes grasses verticales représentent le collimateur d'entrée (1) ; les flèches montrent des trajectoires classiques des neutrons (2) entre le collimateur et la fente formée par le miroir poli (3) et l'absorbeur (4). Les lignes (5) illustrent le mouvement quantique au-dessus du miroir et le carré rouge (6) représente le détecteur de neutrons.

quantique, et on comprend très facilement pourquoi le travail expérimental dans ces conditions représente un challenge considérable et nécessite une grande ingéniosité. En revanche, l'échelle spatiale du problème $z_0 \approx 5,87 \mu\text{m}$ se trouve très proche des échelles du monde macroscopique – et ceci est extraordinaire en mécanique quantique.

Sur la même figure, nous avons représenté les énergies E_n de quelques autres états (dits états excités) ainsi que les positions des points de rebroussement du système $\xi_n = E_n/mg$, qui correspondent à la hauteur maximale que peut atteindre une particule classique d'énergie E_n . Les hauteurs $z > \xi_n$ ne sont pas accessibles à une particule classique, mais une particule quantique peut y pénétrer par effet tunnel. Pour illustrer ce phénomène, sur la même figure, nous présentons les carrés des fonctions d'onde $\psi_n(z)$ du neutron pour les quatre états de plus basse énergie. Ils donnent directement la probabilité de présence des neutrons dans les différentes parties de l'espace. Entre 0 et ξ_n , la fonction d'onde possède des maxima et des minima et elle décroît rapidement pour $z > \xi_n$.

Les énergies des quatre premiers états sont égales respectivement à 1,4 ; 2,5 ; 3,3 et 4,1 peV. On peut voir que ces niveaux d'énergie se rapprochent entre eux (la différence d'énergie diminue) avec le numéro d'état. Pour les points de rebroussement, on obtient les valeurs 13,7 ; 24,0 ; 32,4 et 39,9 microns respectivement. Les niveaux se rapprochent et, dans la limite classique, établissent un continuum.

Cette forme de fonction d'onde a donné l'idée de la méthode qui a permis d'observer les états quantiques pour la première fois. Il faut mesurer la transmission des neutrons à travers une fente étroite formée par le miroir horizontal bien poli et un autre miroir pourvu d'une couche de gadolinium, l'absorbeur, capable d'absorber les neutrons avec une grande efficacité (*figure 2*). Ce deuxième miroir doit être parfaitement parallèle au premier et se situe à une distance variable Δz de celui-ci.

Si l'absorbeur se trouve plus haut que le point de rebroussement, alors il ne « touche » pas la fonction d'onde et les neutrons peuvent passer à travers la fente sans pertes. Si la distance entre le miroir et l'absorbeur Δz diminue, la fonction d'onde du neutron $\psi_n(z)$ commence à pénétrer l'absorbeur et la probabilité de perte augmente très rapidement. Si Δz devient plus petit que la taille caractéristique de la fonction d'onde de l'état fondamental, alors la fente devient non transparente pour les neutrons.



Le schéma de l'expérience réalisée auprès du réacteur de l'ILL à Grenoble par Valery Nesvizhevsky et ses collaborateurs est présenté sur la *figure 2*. L'expérience consistait en la mesure du flux d'UCN avec une vitesse horizontale de l'ordre de 5 à 10 m par seconde à travers la fente entre le miroir et l'absorbeur. Un système de collimation avant l'installation permet de préparer un « faisceau » de neutrons homogène en hauteur.

Soulignons les conditions particulièrement contraignantes auxquelles cette expérience doit satisfaire pour protéger ce système contre toute perturbation qui puisse détruire les états quantiques. Le flux d'UCN, comme nous le verrons plus tard, est très faible et impose une très forte protection de l'ensemble de l'installation contre les neutrons parasites qui, après multiples diffusions, peuvent donner un important bruit de fond.

Un autre type des contraintes fortes sont des contraintes optiques et mécaniques. Le miroir (d'une longueur de 10 cm) doit être de très bonne qualité – sinon la rugosité de la surface va créer des perturbations chaotiques introduisant des transitions entre les différents niveaux et les rendant inséparables. La distance entre le miroir et l'absorbeur doit être ajustée et mesurée avec une très grande précision, de l'ordre de 1 micron, pour toute la surface de l'absorbeur. Les variations des conditions extérieures représentent une source majeure de perturbations. D'une part, le système doit être protégé des vibrations (bruit sismique, activité humaine – mouvement du pont roulant dans la salle expérimentale, travail permanent des pompes à eau du réacteur ou tout simplement déplacement des expérimentateurs autour de l'installation). D'autre part, il faut concevoir un système de nivellement pour « suivre » en permanence la direction de l'accélération du champ gravitationnel afin que le miroir lui soit toujours perpendiculaire. Un expérimentateur qui s'approche de l'installation introduit, par exemple, une modification du champ gravitationnel nuisible pour le système étudié. Le soleil, qui se déplace au cours de la journée, chauffe le bâtiment du réacteur et introduit des variations permanentes du niveau du sol de la salle expérimentale.

L'expérience doit se dérouler sous vide car les interactions élastiques (diffusion sur les atomes de l'air) et inélastiques (absorption des neutrons par les atomes d'hydrogène de l'eau) font disparaître des UCN sur de très courtes distances. De plus, les champs magnétiques parasites (champ terrestre, champs créés par les moteurs des pompes à vide) avec lesquels les neutrons interagissent par l'intermédiaire de leur moment magnétique peuvent perturber le système quantique.

Découverte expérimentale et premières études du système

Comme nous l'avons dit, les mouvements horizontaux et verticaux du neutron peuvent être considérés comme indépendants. Le mouvement horizontal, avec une vitesse

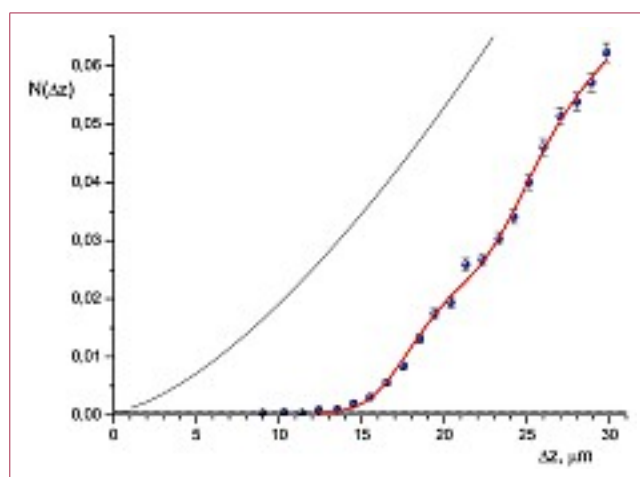


Figure 3 – Flux de neutrons obtenu lors de la première expérience à travers la fente entre le miroir et l'absorbeur en fonction de leur écart. La ligne rouge représente les calculs de mécanique quantique. La ligne noire donne le comportement classique.

moyenne de l'ordre de 5 à 10 m/s, obéit aux lois classiques tandis que le mouvement vertical avec des vitesses de l'ordre de quelques centimètres par seconde et des énergies de l'ordre de quelques peV est un mouvement quantique.

Ce mouvement quantique devrait se manifester dans le comptage du nombre de neutrons $N(\Delta z)$ qui passent à travers la fente en fonction de son ouverture. Sans même faire de calculs, on peut s'attendre, en raisonnant dans un cadre quantique, à détecter une fonction « en escalier ». Si la distance entre le miroir et l'absorbeur est inférieure à la taille de la fonction d'onde de l'état fondamental (égale, *grosso modo*, à la valeur de la position du point de rebroussement), aucun neutron ne passe à travers cette fente. En revanche, dès que l'absorbeur dépasse la hauteur du point de rebroussement, l'état peut « passer ». Ce raisonnement reste valable pour tout état quantique. Cette fonction $N(\Delta z)$ représente le nombre d'états permis par la mécanique quantique pour une ouverture de la fente donnée. Il est clair également que la fonction « en escalier » attendue sera lissée par la résolution spatiale qui n'est bien sûr jamais parfaite. Notons que la mécanique classique prévoit un tout autre comportement – sans aucun changement de régime.

Les résultats expérimentaux présentés sur la *figure 3* montrent clairement la différence entre le comportement prévu par la mécanique classique (ligne noire) et l'observation expérimentale qui suit fidèlement le comportement quantique escompté (ligne rouge). En particulier, on voit explicitement que la fente entre le miroir et l'absorbeur n'est absolument pas transparente (le flux est égal à zéro au bruit de fond près) tant que son ouverture est inférieure à approximativement 15 microns (la valeur prédite par la mécanique quantique – la position du premier point de rebroussement). Ces données montrent explicitement le comportement quantique du système et représentent ainsi la découverte de l'état fondamental.

Les états excités ne se manifestent pas d'une façon aussi spectaculaire que l'état fondamental : la fonction en



escalier est lissée par la résolution expérimentale. Soulignons que cette résolution est largement dominée par les propriétés quantiques du système lui-même. L'explication de ce phénomène nécessite un traitement quantique plus sophistiqué (courbe rouge) et elle est due à l'effet tunnel de la barrière gravitationnelle (l'explication détaillée de ce phénomène sort du cadre de cet article).

Pour mentionner encore une fois la difficulté d'une telle expérience, soulignons que le taux de comptage reste particulièrement faible : la *figure 3* représente une semaine de prise de données auprès du réacteur qui a le flux de neutrons le plus important au monde. Le problème de la statistique (nombre d'événements détectés) reste un des problèmes majeurs dans ce type d'études.

Cette « non visibilité » des états excités nous pousse à proposer d'autres méthodes pour étudier les propriétés des états quantiques et, en particulier, à profiter du fait que les dimensions spatiales des fonctions d'onde sont vraiment spectaculairement grandes par rapport aux systèmes atomiques.

La taille micrométrique des fonctions d'onde suggère de les photographier directement. Pour cela, on remplace dans le dispositif précédent le compteur d'UCN par un détecteur sensible à la position, obtenu de la manière suivante (*figures 4 et 5*) : on dépose une très fine couche d'uranium-235 enrichi sur une plaque de plastique. Quand un neutron ultra froid réagit avec le noyau d'uranium, il provoque sa fission. Un des produits de fission entre dans le plastique et y laisse une trace en détruisant la structure du matériau. Il reste à enlever la couche d'uranium et à développer « la photo » – l'immerger dans une solution chimique adaptée pour rendre les traces laissées par des produits de fission plus visibles. Une telle méthode permet d'obtenir une précision sur la position d'impact (la position où un neutron a provoqué une fission) de l'ordre du micromètre – une résolution suffisante pour permettre de voir les fonctions d'onde et surtout leur variation spatiale (rappelons que le carré de la fonction d'onde fournit directement la probabilité de présence du neutron à une hauteur donnée).

Le résultat d'une telle « photo », prise dans des conditions un peu particulières, est montré sur la *figure 6*. La spécificité de cette photo réside dans le choix des fonctions d'onde : on a préparé un mélange de plusieurs états quantiques de sorte que l'état fondamental soit fortement supprimé (l'idéal serait de ne sélectionner qu'un seul état, mais le flux de neutrons, même celui fourni par le réacteur de l'ILL, est tellement faible qu'il ne laisse pas beaucoup de chance de trouver le signal par rapport au bruit).

Pour supprimer le premier état quantique, on oblige les neutrons à descendre une marche d'escalier d'une hauteur de 15 microns – la taille de la fonction d'onde de l'état fondamental. Lors du passage d'un miroir à l'autre formant cette marche d'escalier, les neutrons ne peuvent pas peupler l'état fondamental en sortie. Cette suppression du premier état quantique permet de résoudre les variations de la fonction d'onde.

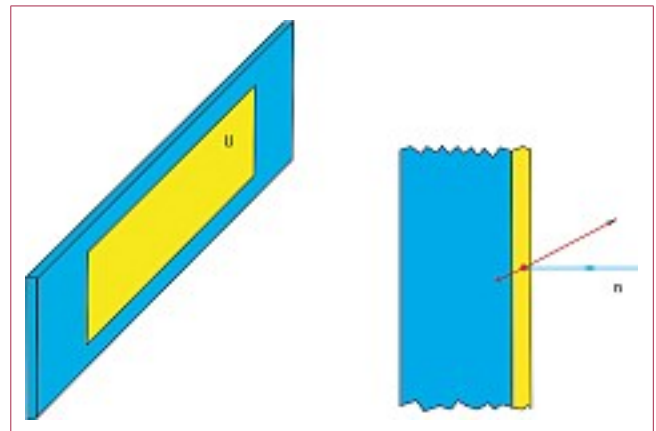


Figure 4 – Le détecteur de position de neutron. Il consiste en une couche d'uranium enrichi déposé sur une feuille de plastique.



Figure 5 – Les traces laissées par les produits de fission des noyaux d'uranium dans le plastique après développement.

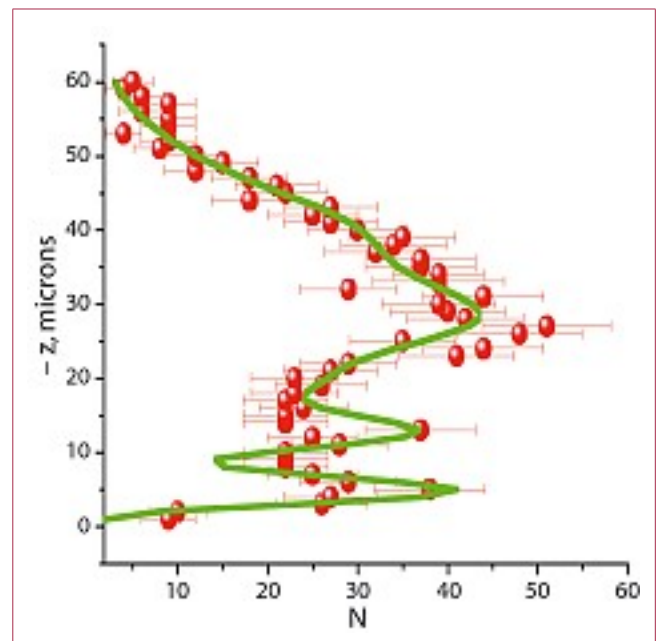


Figure 6 – La probabilité de présence de neutron dans le champ de pesanteur, mesurée par le détecteur sensible à la position de très haute résolution. La courbe théorique représente les calculs avec les nombres d'occupation des états quantiques mesurés directement par comptage des neutrons.



Même si les conditions expérimentales de formation du système quantique ne sont pas entièrement comprises (elles font actuellement le sujet de nouvelles études), il faut souligner que c'est la première fois que la fonction d'onde de neutrons a été mesurée dans l'espace de configuration. D'une façon plus générale, la mesure de la fonction d'onde dans l'espace de configuration reste très rare en mécanique quantique ; d'habitude, les systèmes quantiques sont étudiés par des expériences de diffusion, c'est-à-dire qu'on travaille avec la fonction d'onde dans l'espace de la quantité de mouvement.

Conclusions

La découverte des états quantiques du neutron dans le champ de pesanteur a ouvert une nouvelle voie dans l'étude de la gravitation dans les systèmes microscopiques décrits par la mécanique quantique. Les premières études ont montré, en particulier, qu'il n'y a pas de modification notable de la loi Newtonienne à l'échelle de quelques dizaines de micromètres. La recherche de déviations de la loi universelle de la gravitation aux courtes distances est un domaine très actif, puisque ces déviations pourraient signer l'existence de dimensions spatiales supplémentaires, prédites en particulier par les modèles d'unification dérivés de la théorie des cordes.

Pour aller plus loin, il faut d'une part améliorer et optimiser les méthodes déjà existantes. D'autre part, nous travaillons activement sur l'étape suivante dans l'étude de tout système quantique – la recherche des transitions résonantes entre états. Cette nouvelle étude, dans le cadre de l'expérience GRANIT (GRAVitational Neutron Induced Transitions), devrait permettre de mieux déterminer les paramètres des états quantiques et de mieux contraindre des paramètres des théories modernes qui prédisent une modification de la loi de Newton à petite échelle.

POUR EN SAVOIR PLUS

- V.V. Nesvizhevsky *et al.*, « Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field », *Nature*, 415, 2002, 297.
- V.V. Nesvizhevsky *et al.*, « Measurement of quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field », *Phys. Rev.*, D67, 2003, 102002.
- V.V. Nesvizhevsky *et al.*, « Study of the neutron quantum states in the gravity field », *Eur. Phys. J.*, C40, 2005, 479.
- V.V. Nesvizhevsky et K.V. Protasov, « Constraints on non-Newtonian gravity from the experiment on neutron quantum states in the Earth's gravitational field », *Class. Quantum Grav.*, 21, 2004, 4557.