

complète du proton (donc sa taille), il faut utiliser une longueur d'onde infinie, qui permet aux photons virtuels de « voir » le proton dans son intégralité : c'est la limite à laquelle les électrons incidents ne subissent aucune diffusion.

Techniquement, bien sûr, ce n'est pas possible ; les électrons doivent être défléchis au moins un peu pour que l'on puisse mesurer quelque chose. C'est pourquoi le groupe de J. Bernauer a effectué des mesures correspondant au plus faible transfert de quantité de mouvement que lui permettait son dispositif expérimental, puis il a extrapolé les résultats pour obtenir ceux correspondant à une quantité de mouvement transférée nulle.

Par rapport aux expériences antérieures, cette équipe a réussi à diviser par presque deux l'écart entre la plus petite quantité de mouvement transférée précédemment mesurée et la valeur nulle, d'où une extrapolation beaucoup plus fiable. Finalement, l'expérience a recueilli à peu près deux fois plus de mesures que toutes les mesures précédentes combinées. Après avoir réalisé l'expérience en 2006 et 2007, J. Bernauer a eu besoin de trois années pour analyser toutes les données, travail qui lui valut son doctorat. Le rayon du proton, concluait-il, valait environ 0,879 femtomètre

($0,879 \times 10^{-15}$ mètre), soit environ un dix milliardième de la taille d'une gouttelette de brouillard, un résultat en accord avec les mesures précédentes.

Entre-temps, R. Pohl et son équipe continuaient à rencontrer des difficultés. Dans leur expérience, ils remplaçaient l'électron de l'atome d'hydrogène par un cousin plus lourd, le muon. Les muons sont pratiquement identiques aux électrons, si ce n'est que leur masse est environ 200 fois supérieure. En raison de cette différence, le muon de l'hydrogène muonique s'approche environ 200 fois plus près du proton que ne le fait un électron.

Un muon dans le proton

Or si le muon est 200 fois plus proche du proton, il devrait également passer considérablement plus de temps à l'intérieur de ce dernier (en effet, la probabilité de présence est augmentée d'un facteur 200^3 , soit 8 000 000). Par suite, l'effet de la taille du proton modifie de deux pour cent le déplacement de Lamb du niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène muonique, ce qui est suffisant pour être facilement repéré.

Dans l'expérience de l'équipe de R. Pohl, des muons produits par un accélérateur de l'Institut Paul Scherrer sont dirigés

sur une cible d'hydrogène gazeux (des molécules H_2). De temps en temps, un muon déloge un électron, ce qui dissocie la molécule H_2 , et le muon est capturé par le proton resté sans électron ; se forme ainsi un atome d'hydrogène muonique dans un état très excité. En quelques nanosecondes, cet atome muonique excité dégringole dans des états d'énergie de plus en plus basse. L'expérience a porté sur les atomes d'hydrogène muonique qui se retrouvaient dans le premier état excité, l'état 2S.

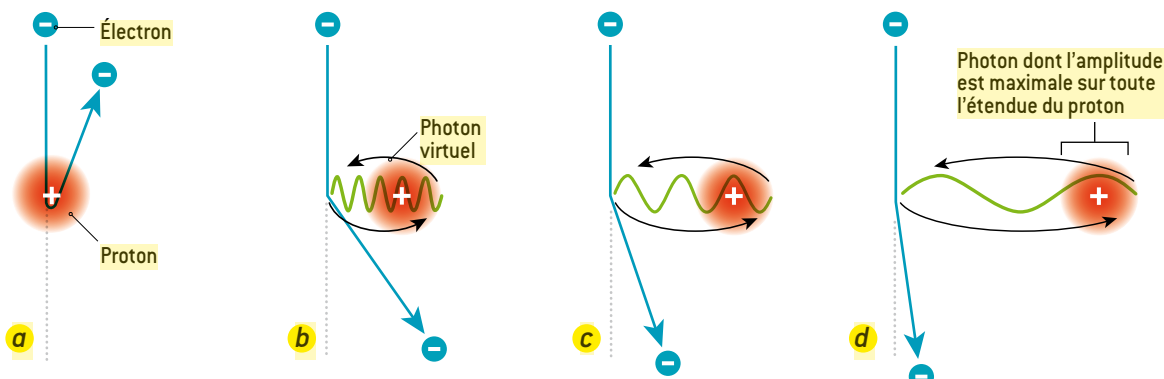
À son entrée dans la cible d'hydrogène, chaque muon déclenche un signal de mise en route d'un laser, qui émet une impulsion environ une microseconde plus tard. Si les photons de cette impulsion laser ont exactement la bonne énergie (l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur d'onde lumineuse), des atomes muoniques peuvent absorber un photon et passer de l'état 2S à l'état 2P.

La forme de la fonction d'onde correspondant à l'état 2P est telle que la probabilité que le muon soit à l'intérieur du proton est négligeable si l'atome est dans cet état (voir l'encadré page 34). Par conséquent, en mesurant l'écart d'énergie entre les états 2S et 2P, le premier étant sensible à la taille du proton mais pas le second, on peut déduire quel pourcentage du temps

MESURER LE RAYON DU PROTON PAR DIFFUSION D'ÉLECTRONS

Dans les expériences de diffusion d'électrons, on dirige un faisceau d'électrons sur de l'hydrogène gazeux, qui est pour l'essentiel constitué de protons. Parfois, un électron passe près d'un proton et est dévié. L'électrodynamique quantique décrit ces interactions en termes d'échange de photons « virtuels » qui véhiculent la force électromagnétique. Un électron qui heurte de plein fouet un proton échange un photon de très courte longueur d'onde [a]. Les courtes longueurs d'onde

équivalent à des énergies élevées, qui modifient fortement la trajectoire de l'électron. Lorsque l'électron incident et le proton sont plus éloignés, un photon de plus grande longueur d'onde est échangé et la déviation est moins marquée [b, c]. L'information sur le rayon du proton est codée dans les diffusions où le photon virtuel a les longueurs d'onde les plus grandes, situations où l'onde du photon virtuel est d'amplitude à peu près constante sur toute l'étendue du proton [d].



Fort transfert de quantité de mouvement

Faible transfert de quantité de mouvement

Jen Christensen

le muon passe à l'intérieur du proton, et ainsi déterminer le rayon de cette particule.

Mais la difficulté est d'ajuster le laser pour qu'il ait exactement la bonne longueur d'onde. L'atome ne grimpe dans l'état 2P que si l'énergie des photons est égale à l'écart d'énergie entre les états 2S et 2P. Si l'énergie des photons, donc leur longueur d'onde, est légèrement différente, il ne se passe rien. Comment savoir si les atomes effectuent bien ce saut d'énergie ? Tout atome porté dans l'état 2P se désexcite rapidement vers l'état fondamental 1S en émettant un photon X de basse énergie. La détection de ces rayons X signifierait donc que l'énergie des photons du laser est la bonne.

Cette étude paraît simple en théorie, mais elle ne l'est pas du tout en pratique. Des expériences de ce type avaient déjà été proposées dans les années 1960 pour tester avec précision l'électrodynamique quantique, qui était encore une théorie assez jeune. Mais cette expérience sur l'hydrogène muonique était plus difficile que les expériences complémentaires portant sur des atomes classiques, notamment parce que le muon est une particule instable, dont la durée de vie moyenne est de 2,2 microsecondes. Aussi, l'intérêt envers les expériences sur l'hydrogène muonique était retombé jusque dans les années 1990, quand on s'est aperçu que les autres tests sont limités par les incertitudes liées à la taille non nulle du proton.

C'est en 1997 que l'équipe de R. Pohl a proposé aux administrateurs de l'Institut Paul Scherrer de mesurer le déplacement de Lamb de l'hydrogène muonique. L'institut a approuvé le projet au début de 1999. Puis, trois années ont passé à la construction et à la mise au point d'un système laser, d'un faisceau de muons de basse énergie et des détecteurs de rayons X de faible énergie.

Une fois l'expérience assemblée, en 2002, l'équipe a dû faire face à plusieurs problèmes techniques. Le temps nécessaire pour les régler n'a laissé que quelques heures pour bombarder de photons l'hydrogène muonique, avant que la durée allouée à l'accélérateur pour cette expérience soit écoulée. Certains membres de l'équipe étaient très déçus, parce qu'ils avaient réellement cru que l'on déterminerait du premier coup l'écart d'énergie 2S-2P avec la précision nécessaire. Mais les physiciens plus agueris avaient des attentes plus réalistes. Ils



3. LES RÉCENTES EXPÉRIENCES DE DIFFUSION d'électrons ont été réalisées à l'Université Johannes Gutenberg de Mayence, en Allemagne, au moyen de l'accélérateur MAMI (Mainz Microtron). Cet accélérateur (ci-dessus, l'une des salles qu'il occupe) a fourni aux expérimentateurs des électrons d'énergie allant jusqu'à 855 mégaelectronvolts.

étaient déjà satisfaits que tout fonctionne et que seuls quelques problèmes techniques mineurs se soient présentés. Ces derniers pouvaient être réglés avant le démarrage de l'expérience, prévu pour 2003, phase durant laquelle on verrait sûrement le signal du déplacement de Lamb.

Le moment venu, après de nombreux mois de préparation et trois semaines de collecte réussie de données, l'analyse... n'a rien révélé. Pas le moindre indice de signal, même si le laser a balayé toute la

UN SIGNAL NET EST APPARU,
indiquant que le proton mesuré dans
l'hydrogène muonique est notablement plus
petit que tout ce que les physiciens avaient
supposé jusque-là.

plage de longueurs d'onde correspondant aux valeurs expérimentales connues du rayon du proton. Absolument rien.

Il fallait se rendre à l'évidence : quelque chose n'allait pas dans le dispositif. L'équipe de R. Pohl conclut à l'époque qu'il fallait améliorer le système laser. Elle s'est lancée dans une révision majeure de sa conception, une tâche achevée à la fin de 2006. Elle a recueilli des données pendant une nouvelle campagne de trois semaines en 2007, et là encore elle n'a rien détecté. Une dernière chance s'est présentée au premier semestre 2009. Et une fois de plus, après une semaine de collecte de données d'excellente qualité, aucune trace de signal n'a été obtenue.

Il ne restait qu'une semaine d'observations. Les chercheurs craignaient que si ces dernières échouaient, les administrateurs en concluent que l'équipe n'était pas à la hauteur. Au bout de plus d'une décennie, l'expérience serait définitivement interrompue et considérée comme un échec. Les physiciens commençaient à se demander s'il ne se passait pas quelque chose de plus profond. Et s'ils ne cherchaient pas le rayon du proton au bon endroit ? Ils ont décidé d'étendre la plage de longueurs d'onde recherchées.

L'équipe prit la décision collective de rechercher un rayon du proton plus grand. Cependant, tard le soir, Aldo Antognini, un collègue de R. Pohl, entra dans la salle de contrôle pour dire qu'il avait l'intuition qu'il fallait chercher un proton plus petit. Le temps pressant, R. Pohl et A. Antognini ont réorienté l'expérience pour rechercher un rayon plus petit que tout ce que l'on était en droit de supposer. Très rapidement, on détecta un soupçon de signal. Mais le jour suivant, l'accélérateur était fermé pour une opération de maintenance de quatre jours, prévue de longue date. Il fallut attendre.

Enfin, le soir du 4 juillet 2009, 12 ans après le lancement du projet, un signal net est apparu, indiquant que le proton mesuré dans l'hydrogène muonique est notablement plus petit que tout ce que les physiciens avaient supposé jusque-là. L'équipe de R. Pohl a passé quelques