

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.

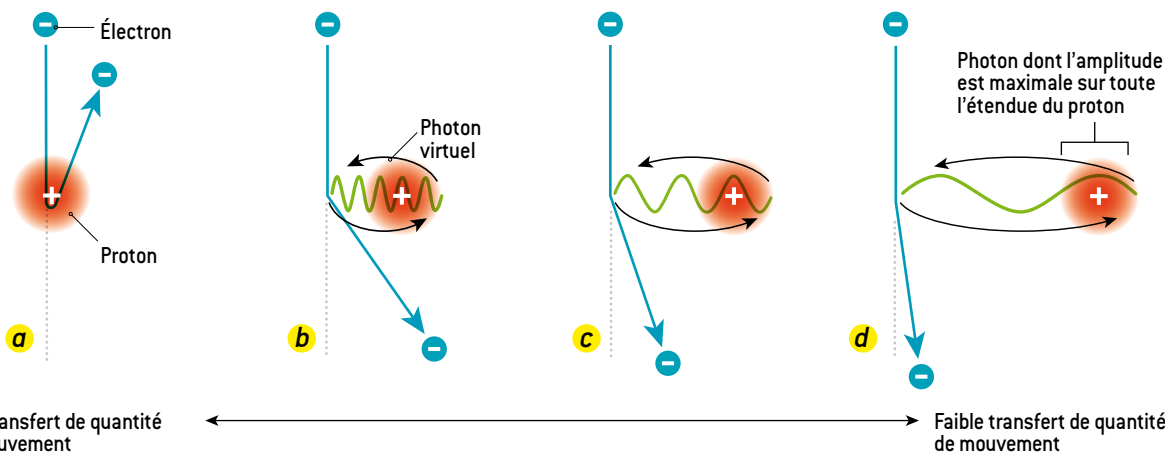
À son entrée dans la cible d'hydrogène, chaque muon déclenche un signal de mise en route d'un laser, qui émet une impulsion environ une microseconde plus tard. Si les photons de cette impulsion laser ont exactement la bonne énergie (l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur 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].



Jen Christensen