

De quoi s'agit-il ? En mécanique quantique, l'électron est décrit par une fonction d'onde, une fonction de la position et du temps que l'on peut représenter par un nuage dont la taille correspond à celle de l'atome. La fonction d'onde (plus exactement, le carré de son module) détermine la probabilité de trouver l'électron en un endroit donné, et elle ne peut prendre qu'un certain nombre de formes, qu'on appelle les états atomiques.

Certains des états atomiques, étiquetés « S » pour des raisons historiques, ont une fonction d'onde qui atteint son maximum au centre de l'atome, là où se trouve le noyau atomique. En d'autres termes, il existe une probabilité non nulle de trouver l'électron à l'intérieur du proton lui-même, probabilité qui croît avec le rayon du proton (il s'agit plus précisément du « rayon de charge », le rayon qui mesure la répartition volumique de la charge électrique du proton). Or quand l'électron se trouve à l'intérieur du proton, il est moins soumis à l'influence de la charge électrique de cette particule. La présence partielle de l'électron au centre de l'atome diminue ainsi la force globale de liaison entre le proton et l'électron.

Cette réduction de la force de liaison modifie de 0,02 pour cent le déplacement de Lamb de l'état de plus basse énergie, l'état noté 1S. Cette fraction peut sembler insignifiante. Mais l'écart d'énergie entre l'état fondamental 1S et le premier état excité, l'état 2S, a été mesuré avec une incroyable précision de quelques unités

sur 10^{15} . Par conséquent, même s'il est minuscule, l'effet de la taille du proton doit être inclus si l'on veut confronter l'électrodynamique quantique à des mesures expérimentales précises.

L'équipe de R. Pohl tentait depuis huit ans de déterminer la taille précise du proton. Mais à l'époque de cette première conférence sur l'île de San Servolo, son expérience ne semblait pas fonctionner, ce qui laissait tout le monde perplexe.

Entre-temps, J. Bernauer et ses collègues étaient sur le point d'entamer une étude complémentaire du rayon du proton. Il ne s'agissait pas ici de s'appuyer sur les niveaux d'énergie de l'hydrogène. L'expérience consistait plutôt à envoyer des électrons sur une cible d'hydrogène et à étudier leur diffusion pour en déduire la taille du proton (voir l'encadré page 32).

Des électrons diffusés

L'hydrogène gazeux constitue, pour l'essentiel, un essaim de protons. Si l'on dirige sur lui un faisceau d'électrons, particules de charge négative, certains des électrons seront diffusés par des protons, c'est-à-dire déviés de la direction initiale du faisceau. De plus, cette diffusion dépend fortement de la structure interne du proton, particule qui est formée de composants plus élémentaires (trois quarks, liés entre eux par une force véhiculée par des gluons).

Examinons de plus près comment un électron et un proton interagissent

quand le premier est diffusé par le second. Lorsque l'électron est diffusé, il transmet une partie de sa quantité de mouvement au proton. En électrodynamique quantique, cette interaction se décrit en première approximation par l'échange d'un photon virtuel entre l'électron et le proton. Si l'électron n'est dévié que légèrement, il ne transfère qu'une petite partie de sa quantité de mouvement. S'il est dévié de près de 180 degrés, on peut imaginer que l'électron a heurté le proton de plein fouet, transférant ainsi une bonne fraction de sa quantité de mouvement.

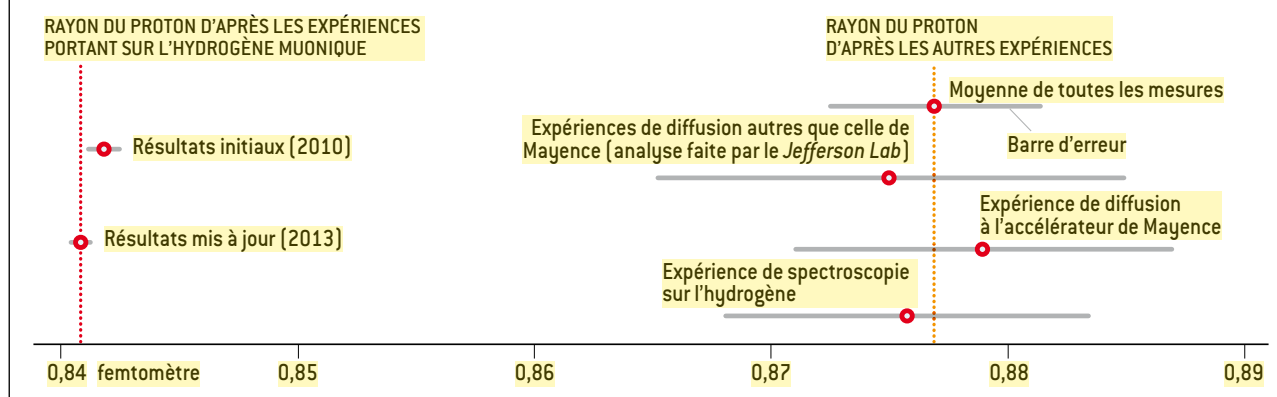
Le transfert d'une quantité de mouvement plus élevée signifie que le photon virtuel échangé a une longueur d'onde plus courte. Or, comme avec un microscope optique, si l'on veut sonder les structures les plus petites, on doit utiliser les longueurs d'onde les plus courtes possibles (ce qui nécessite des électrons incidents d'énergie maximale). Les travaux de J. Bernauer et de ses collègues consistaient en partie à faire appel aux très courtes longueurs d'onde afin d'étudier la répartition des charges électriques (celles portées par les quarks) au sein du proton.

Toutefois, quand J. Bernauer s'est rendu à la conférence de San Servolo, les autres scientifiques présents lui ont suggéré d'étendre son expérience. Les courtes longueurs d'onde conviennent bien pour sonder la structure interne du proton, mais si l'on veut examiner le proton dans sa globalité, on doit faire appel à de grandes longueurs d'onde. En fait, si l'on veut mesurer l'étendue

DES MESURES AUX RÉSULTATS INCOMPATIBLES

La taille du proton devrait être la même, quelle que soit la façon de la mesurer. Plusieurs équipes ont déduit le rayon du proton à partir d'expériences de diffusion [voir l'encadré page 32] ou en mesurant certains niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène dans des expériences de spectroscopie. Les résultats étaient tous cohérents, compte tenu des

marges d'erreur expérimentales. Cependant, en 2010, à l'Institut Paul Scherrer, en Suisse, une mesure des niveaux d'énergie de l'hydrogène dit muonique [voir l'encadré page 34] a livré une valeur du rayon du proton notablement inférieure. Les tentatives d'explication de cette anomalie ont jusqu'à présent toutes échoué.



D'après Randolph Pohl

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.

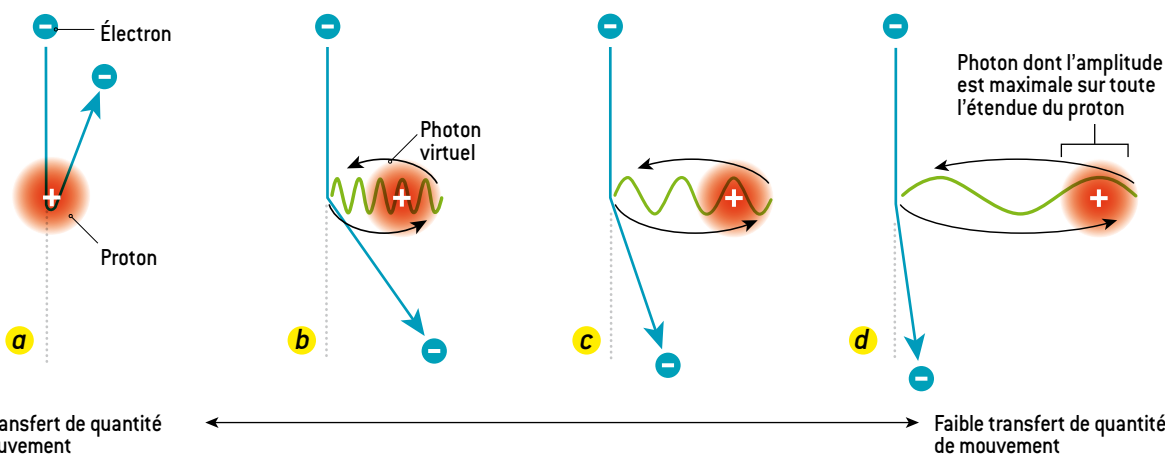
À son entrée dans la cible d'hydrogène, chaque muon déclenche un signal de mise en route d'un laser, qui émet une impulsion environ une microseconde plus tard. Si les photons de cette impulsion laser ont exactement la bonne énergie (l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur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