

semaines de plus à effectuer des mesures et calibrations complémentaires, et quelques mois à analyser les données. Le résultat final, qu'elle a depuis confirmé au moyen de mesures supplémentaires, est un rayon de charge du proton égal à 0,8409 femtomètre, à 0,0004 femtomètre près. Cette mesure est dix fois plus précise que toutes les mesures précédentes. Cependant, son résultat diffère de 4 pour cent des résultats de ces dernières... Une divergence énorme!

En 2010, nos deux équipes ont fait état de leurs résultats lors d'une conférence

aux Houches, en Haute-Savoie. R. Pohl présenta pour la première fois les résultats des expériences sur l'hydrogène muonique. L'après-midi, c'était au tour des résultats de l'expérience de J. Bernauer. L'équipe de R. Pohl s'attendait à ce que l'analyse de J. Bernauer conforte la nouvelle valeur, plus petite, du rayon du proton. Mais à la grande surprise des physiciens, les résultats de Mayence allaient dans le sens de l'ancienne valeur du rayon : 0,879 femtomètre.

Cette divergence a suscité l'émoi dans la communauté des spécialistes. Au début,

la plupart pensaient qu'il devait y avoir une simple erreur. Peut-être y avait-il quelque chose de mal réglé dans les expériences, ou bien peut-être les calculs théoriques pour extraire le rayon de charge du proton étaient-ils faux. Peu de temps après la conférence, divers physiciens ont ainsi proposé une multitude d'erreurs simples qui auraient pu se glisser.

Par exemple, avant l'expérience de R. Pohl, seules trois personnes avaient effectué les calculs complexes nécessaires pour passer de la valeur expérimentale

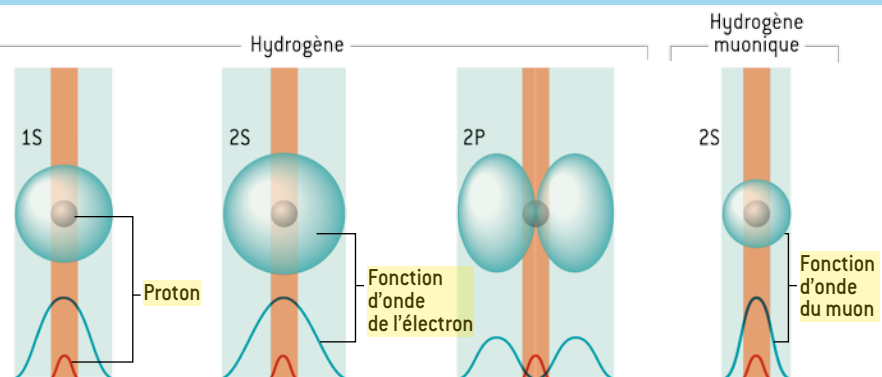
MESURER LE RAYON DU PROTON AVEC L'HYDROGÈNE MUONIQUE

Dans un atome d'hydrogène, la probabilité de présence de l'électron, décrite par une fonction d'onde, peut se représenter par un nuage. Parfois, la fonction d'onde électronique empiète sur le proton, ce qui signifie que l'électron passe une partie du temps à l'intérieur du proton, où il est moins sensible à la charge électrique de ce dernier. Cela modifie l'énergie de l'atome, par

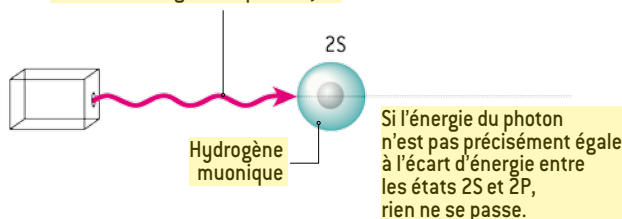
rapport à un atome où le proton serait ponctuel. On peut déduire la taille du proton de ce « déplacement de Lamb » de l'énergie. L'effet est amplifié lorsque l'électron de l'atome est remplacé par un muon. En effet, en raison de sa plus grande masse, le muon a une fonction d'onde moins étendue; comparé à l'électron, il passe donc plus de temps à l'intérieur du proton.

UN RECOUVREMENT CRUCIAL

Dans les « états S », de plus basse énergie, la fonction d'onde de l'électron recouvre partiellement le proton, ce qui contribue au déplacement de Lamb. Dans les « états P », d'énergie supérieure, il n'y a plus de recouvrement. Les physiciens remplacent l'électron par un muon, 200 fois plus lourd, pour réduire l'extension de la fonction d'onde, ce qui augmente le recouvrement entre le proton et la fonction d'onde. Le déplacement de Lamb est ainsi amplifié.

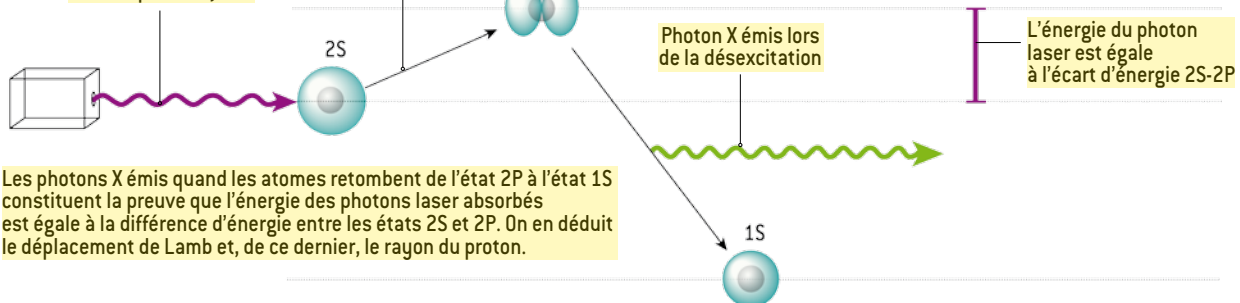


Faisceau laser (dont les photons ont une énergie bien précise)



On ajuste la longueur d'onde du laser (donc l'énergie des photons)

L'atome absorbe un photon et atteint l'état 2P



Les photons X émis quand les atomes retombent de l'état 2P à l'état 1S constituent la preuve que l'énergie des photons laser absorbés est égale à la différence d'énergie entre les états 2S et 2P. On en déduit le déplacement de Lamb et, de ce dernier, le rayon du proton.

L'EXPÉRIENCE

Il s'agit de mesurer avec précision l'écart d'énergie entre les états 2P et 2S de l'hydrogène muonique. On crée d'abord de l'hydrogène muonique en dirigeant un faisceau de muons sur de l'hydrogène gazeux (non représenté). Environ un pour cent des atomes résultants sont dans l'état 2S. On dirige sur eux un faisceau laser de longueur d'onde réglable. Si l'énergie de ses photons correspond exactement à l'écart d'énergie 2S-2P, les atomes dans l'état 2S pourront absorber un photon et atteindre l'état excité 2P. Quand un tel atome se désexcite vers l'état 1S, il émet un photon X. La détection de ces rayons X indique que l'énergie des photons du laser est la bonne. On détermine ainsi l'écart d'énergie 2S-2P, qui dépend du déplacement de Lamb, donc de la taille du proton.

de la longueur d'onde du laser au rayon du proton. Beaucoup de physiciens ont spéculé sur les erreurs ou omissions dans ces calculs. De nombreux théoriciens ont donc refait ces derniers et les ont étendus, mais n'ont pu y déceler d'erreur.

D'autres ont reconsidéré la façon dont J. Bernauer extrapolait le rayon à partir de ses données de diffusion d'électrons par les atomes d'hydrogène. Serait-il possible de concilier les données brutes avec le rayon plus faible donné par l'hydrogène muonique ? Il semble que cette solution ait également dû être écartée.

Pas d'explications...

À chaque échec d'une nouvelle explication, l'impact de la divergence se renforçait. Quatre ans après l'émergence de l'énigme du rayon du proton, les physiciens ont épuisé les explications simples, telles qu'erreurs de mesure ou de calcul. Nous nous prenons maintenant à rêver à des possibilités plus passionnantes.

Par exemple, comprenons-nous vraiment comment le proton réagit quand le muon l'attire ? La force électrostatique du muon déforme le proton, un peu comme la gravité de la Lune ou du Soleil entraîne les marées sur Terre. La déformation du proton modifie légèrement l'état 2S de l'hydrogène muonique. La plupart des physiciens pensent que cet effet est bien compris, mais le proton est un système tellement complexe qu'il se peut que nous soyons passés à côté de quelque phénomène.

La possibilité la plus intéressante est que les mesures discordantes du rayon du proton soient le signe d'une nouvelle physique, allant au-delà du Modèle standard de la physique des particules. Peut-être l'Univers contient-il une particule ayant jusqu'ici échappé à la détection et qui, pour une raison ou une autre, confère aux muons un comportement différent de celui des électrons ? Les scientifiques explorent cette option, mais ils ont bien du mal à modéliser une nouvelle particule qui ne produise pas, par ailleurs, des effets observables en désaccord avec les résultats d'autres expériences.

En outre, les physiciens ont déjà une autre énigme à résoudre concernant les muons. Les particules élémentaires telles que les muons et les électrons ont un « moment magnétique », grandeur qui caractérise leur comportement dans un champ magnétique. Or ce qui est aussi curieux qu'intéressant,

Le déplacement de Lamb

En 1947, à l'Université Columbia, Willis Lamb Jr. (prix Nobel en 1955) et son étudiant Robert Retherford ont mesuré que l'énergie de l'état électronique noté $2S_{1/2}$ de l'atome d'hydrogène est légèrement supérieure à celle de l'état $2P_{1/2}$ (pour l'hydrogène muonique, c'est l'inverse, et l'écart est plus grand). Or d'après l'équation de Dirac de la mécanique quantique relativiste, ces deux états devaient avoir strictement la même énergie.

Cet effet, le *Lamb shift* ou « déplacement de Lamb » du niveau $2S_{1/2}$, a été expliqué dans le cadre de l'électrodynamique quantique, où les calculs mettent en jeu des particules virtuelles échangées lors des interactions. Une contribution au déplacement de Lamb, identifiée plus tardivement, est due à la taille non nulle du proton.

c'est que la valeur expérimentale du moment magnétique du muon ne correspond pas tout à fait à celle calculée avec l'électrodynamique quantique. Peut-être de nouveaux phénomènes physiques expliqueront-ils tant les deux valeurs obtenues pour le rayon du proton que le moment magnétique anormal du muon.

Pour mettre fin à ces spéculations, plusieurs nouvelles expériences ont été proposées. Au moins deux d'entre elles (l'une à l'Accélérateur américain Thomas Jefferson de Newport News, en Virginie, et l'autre à l'accélérateur Mainz Microtron, ou MAMI, de l'Université Johannes Gutenberg de Mayence) visent à améliorer la précision des précédentes expériences de diffusion. Ces mesures fourniront une vérification indépendante, et testeront certaines des explications proposées.

L'équipe de R. Pohl comme celle de Mayence explorent l'idée de mesurer le rayon du deutéron (le noyau de deutérium, formé d'un proton et d'un neutron) pour voir si une différence apparaît là aussi. R. Pohl effectuera également des mesures sur l'hydrogène ordinaire avec une meilleure précision.

Diffusion de muons ?

En outre, de nombreux physiciens ont fait observer que l'on a effectué des mesures atomiques en utilisant à la fois des muons et des électrons, mais que les expériences de diffusion n'ont été réalisées qu'avec des électrons. Il manque donc des expériences de diffusion de muons par des protons. J. Bernauer est impliqué dans un projet visant à combler cette lacune. En utilisant un des faisceaux de muons de l'Institut Paul Scherrer (où l'équipe de R. Pohl a effectué son expérience), l'expérience MUSE (*Muon-Proton Scattering Experiment*, expérience de diffusion muon-proton) consistera à faire diffuser à la fois des électrons et des muons sur des protons, afin d'effectuer une comparaison directe. Avec les résultats de MUSE, les physiciens seront en mesure de vérifier certaines des explications les plus viables parmi celles proposées.

Le temps nous dira si l'énigme du rayon du proton est élucidée par la simple détection d'une erreur improbable, ou si elle ouvre la voie à une compréhension plus profonde du monde des particules. C'est peut-être juste le fil à tirer pour démêler le chapitre suivant du livre de la nature. Tirons-le. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Pohl et al., Muonic hydrogen and the proton radius puzzle, *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, vol. 63, pp. 175-204, octobre 2013.

J. C. Bernauer et al., High-precision determination of the electric and magnetic form factors of the proton, *Physical Review Letters*, vol. 105, article 242001, 2010.

R. Pohl et al., The size of the proton, *Nature*, vol. 466, pp. 213-216, 2010.