

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

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.

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.

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

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'émotion 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

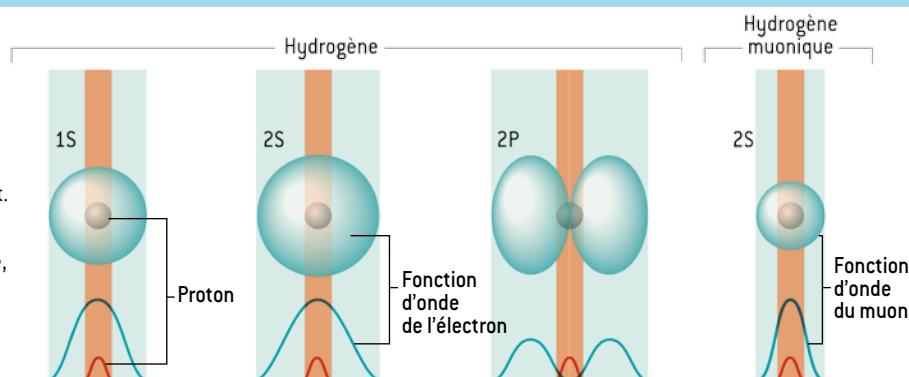
MESURER LE RAYON DU PROTON AVEC L'HYDROGÈNE MUONIQUE

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

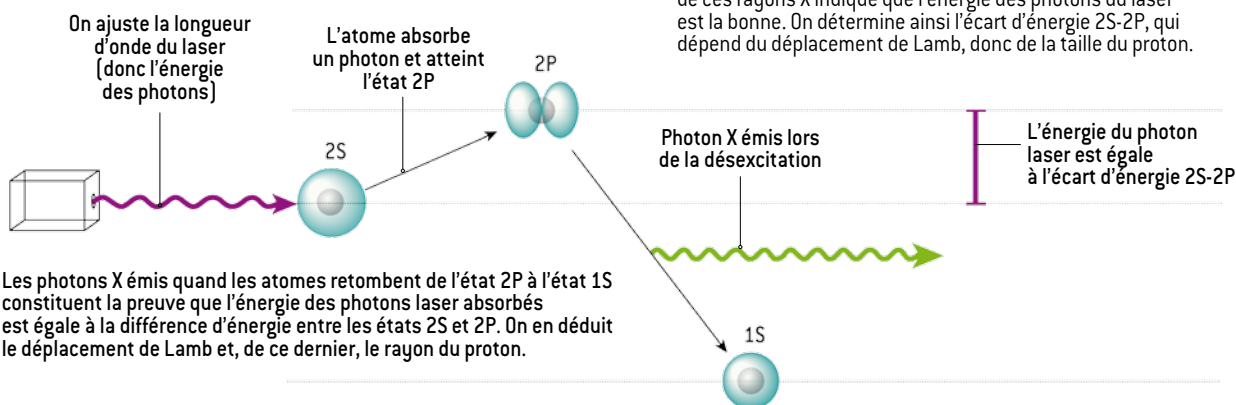
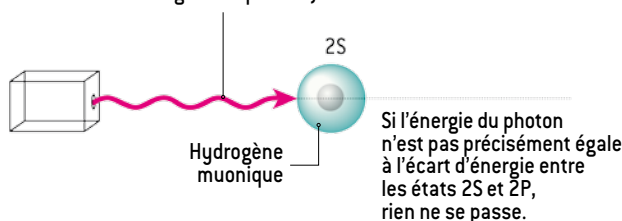
rapport à un atome où le proton serait ponctuel. On peut déduire la taille du proton de ce « déplacement de Lamb » de l'énergie. L'effet est amplifié lorsque l'électron de l'atome est remplacé par un muon. En effet, en raison de sa plus grande masse, le muon a une fonction d'onde moins étendue; comparé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



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.