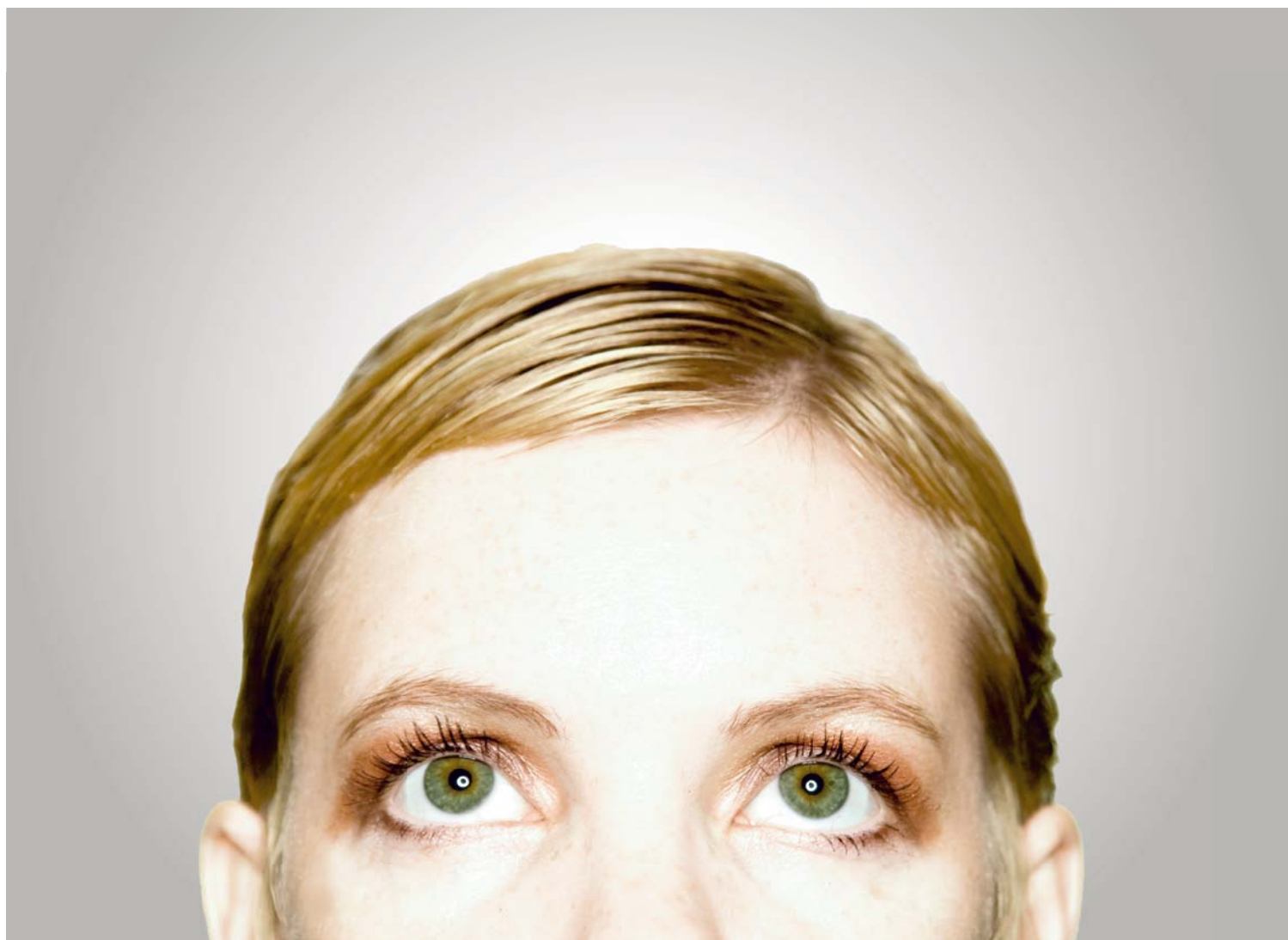




AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

AcademiaNet, base de données regroupant toutes les femmes scientifiques d'exception, offre:

- Le profil des femmes scientifiques les plus qualifiées dans chaque discipline – et distinguées par des organisations de scientifiques ou des associations d'industriels renommées
- Des moteurs de recherche adaptés à des requêtes par discipline ou par domaine d'expertise
- Des reportages réguliers sur le thème «Women in Science»

Robert Bosch **Stiftung**

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

nature

Une initiative de la Fondation Robert Bosch en association avec
Spektrum der Wissenschaft et Nature Publishing Group

www.academia-net.org

Le **proton**, un problème de taille

Jan Bernauer et Randolph Pohl

**Quel volume la charge électrique
du proton occupe-t-elle ?
Deux expériences récentes,
fondées sur des méthodes distinctes,
livrent des valeurs précises...
mais différentes ! Une anomalie
intrigante, qui annonce peut-être
de futures découvertes.**

Le proton est si familier qu'il pourrait sembler dépourvu de tout mystère. Cette particule est le principal constituant de l'Univers observable et alimente les fournaies que sont les étoiles. Par son étude, ou du moins par celle de l'atome d'hydrogène, où le proton, de charge positive, est lié à un électron de charge négative, les physiciens sont parvenus à la révolution quantique, au début du XX^e siècle. Et aujourd'hui, au CERN près de Genève, les chercheurs utilisent d'intenses faisceaux de protons fortement accélérés pour faire naître, par le biais de collisions frontales, des particules exotiques telles que le boson de Higgs.

La familiarité du proton est trompeuse. Des études récentes portant sur cette particule ont donné lieu à des résultats surprenants. Dans le cadre de deux expériences complémentaires, nos équipes respectives ont effectué les mesures les plus précises à ce jour du rayon du proton. Lorsque ces travaux ont débuté, nous anticipions que nos résultats permettraient d'ajouter

L'ESSENTIEL

- Récemment, deux mesures précises du rayon du proton ont livré des valeurs bien différentes.
- Cette différence n'a pas pu être attribuée à des erreurs.
- Elle résulte peut-être d'une compréhension imparfaite du proton ou de l'électrodynamique quantique, une théorie pourtant bien établie.
- L'anomalie pourrait être une porte d'entrée à de nouvelles découvertes fondamentales en physique.

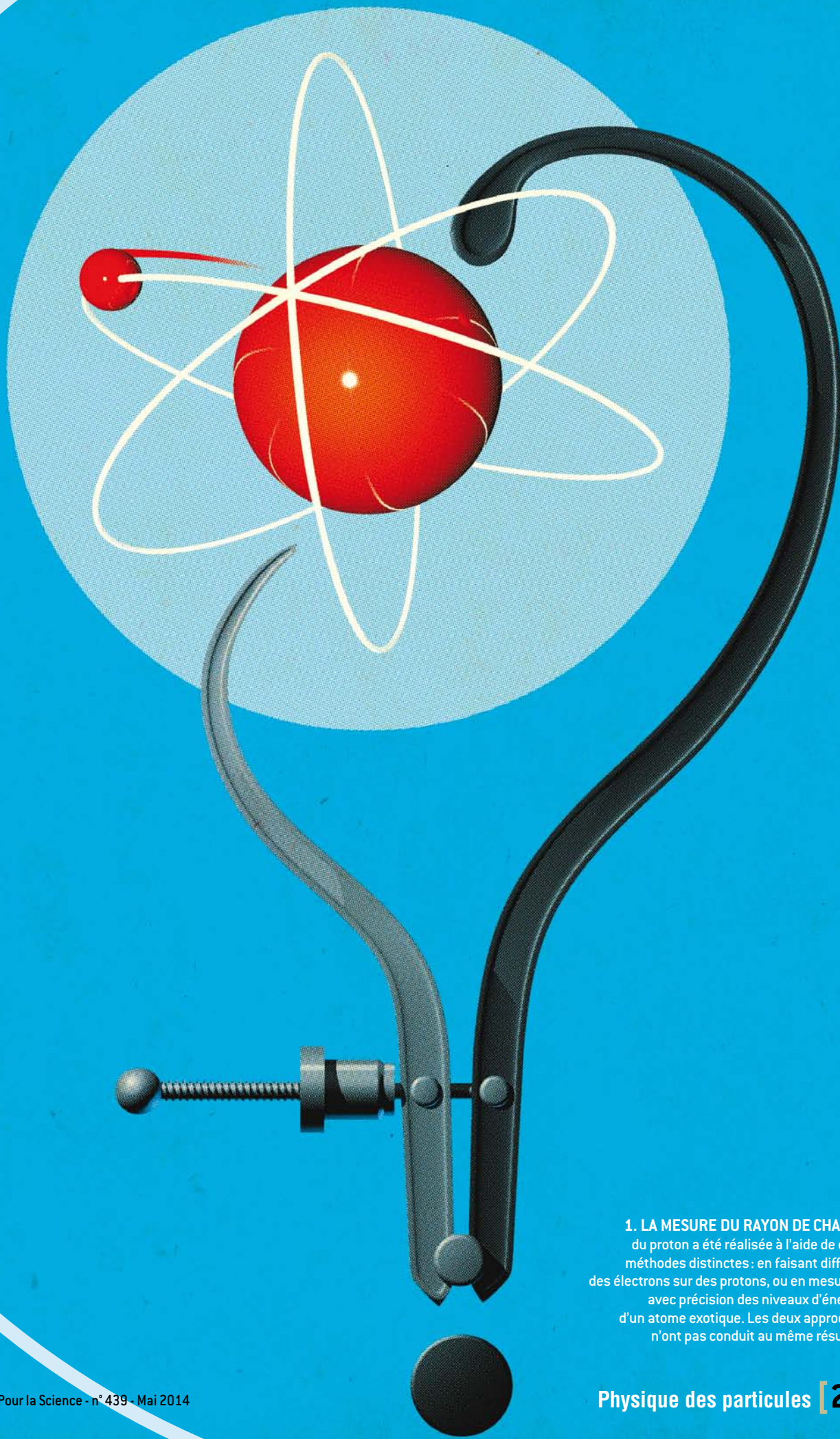
Tavis Coburn

quelques degrés de précision à la taille connue du proton. Nous avons tort : un grand fossé sépare les résultats des deux expériences (voir l'encadré page 31). La différence entre les deux valeurs obtenues pour le rayon du proton est égale à plus de cinq fois l'incertitude sur l'une ou l'autre valeur ; cela signifie que la probabilité que ce désaccord soit le fruit du hasard est inférieure à un sur un million.

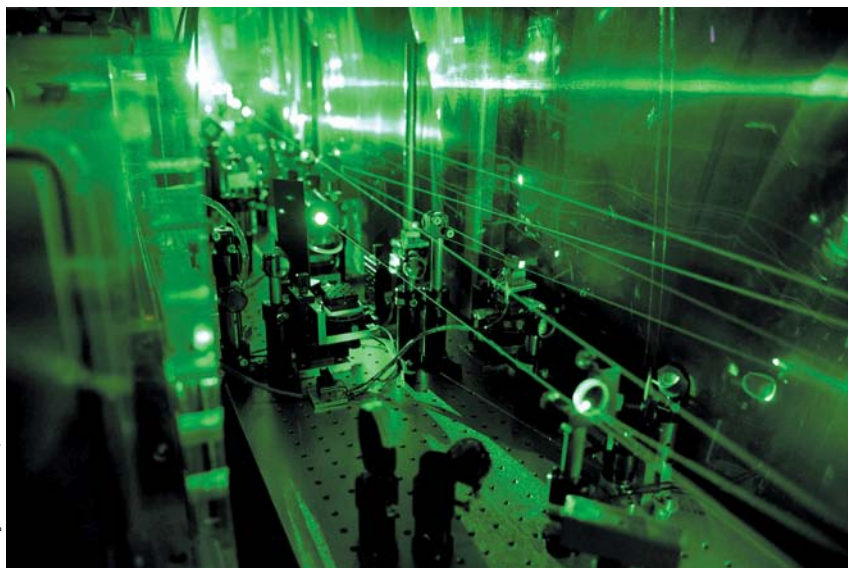
Erreur ou physique mal comprise ?

Il est donc clair que nous sommes confrontés à une anomalie. Soit nous ne comprenons pas complètement le proton, soit nous ne comprenons pas la physique qui intervient dans les mesures de précision du proton. Autrement dit, le problème de la taille du proton nous offre peut-être l'occasion d'apprendre quelque chose de nouveau en physique fondamentale.

Notre histoire débute sur l'île italienne de San Servolo, à dix minutes de la place



1. LA MESURE DU RAYON DE CHARGE
du proton a été réalisée à l'aide de deux méthodes distinctes : en faisant diffuser des électrons sur des protons, ou en mesurant avec précision des niveaux d'énergie d'un atome exotique. Les deux approches n'ont pas conduit au même résultat.



2. L'UNE DES MÉTHODES pour mesurer le rayon du proton utilise ce laser, dont la longueur d'onde est précisément réglée et que l'on dirige sur un échantillon d'hydrogène dit muonique (ses atomes sont formés d'un proton et d'un muon, un cousin lourd de l'électron).

Saint-Marc de Venise par vedette rapide. L'île abritait un hôpital psychiatrique jusqu'à la fin des années 1970. Trois décennies après sa fermeture et sa transformation en un centre à caractère culturel, quelques dizaines de physiciens ont commencé à s'y rencontrer pour discuter de tests encore plus contraignants de la théorie la mieux comprise de toute la physique, si ce n'est de toute la science : l'électrodynamique quantique, ou QED en abrégé (pour *Quantum Electrodynamics*).

Les débuts de l'électrodynamique quantique remontent à 1928, époque où le théoricien britannique Paul Dirac parvint, pour la première fois, à combiner la mécanique quantique et la théorie de la relativité restreinte, obtenant une équation qui porte depuis son nom et qui représente correctement une particule telle que l'électron. L'électrodynamique quantique, la théorie qui a été depuis développée sur cette base, décrit très bien l'interaction électromagnétique, qui met en jeu les photons (la lumière) et les particules chargées telles que l'électron.

Cette théorie explique, entre bien d'autres choses, la structure détaillée des niveaux d'énergie électronique de l'atome, c'est-à-dire les énergies que peuvent avoir les électrons de l'atome. C'est pourquoi les physiciens font appel à des atomes simples comme l'hydrogène pour tester l'électrodynamique quantique. Dans le domaine d'application de cette théorie, ils sont capables de prédire les résultats des expériences avec une incertitude de 0,000 000 000 1 pour cent (soit 10^{-10} pour

cent). Et les résultats expérimentaux sont en accord avec cette précision phénoménale.

C'est sur San Servolo que nous nous sommes rencontrés tous les deux pour la première fois. À ce moment, nous nous lançons l'un comme l'autre dans des mesures du proton censées contribuer à affiner notre connaissance de l'électrodynamique quantique.

L'expérience de l'un d'entre nous (J. Bernauer) et ses collègues, à l'Institut de physique nucléaire de l'Université de Mayence, en Allemagne, avait pour objectif d'explorer la structure interne du proton en utilisant une version améliorée d'une technique qui avait déjà produit les mesures les plus précises de l'époque.

À l'Institut Paul Scherrer (PSI), à Villigen en Suisse, l'équipe de R. Pohl adoptait, elle, une nouvelle approche. Elle portait sur de subtils décalages des niveaux d'énergie d'une forme exotique d'hydrogène, où l'électron est remplacé par une particule analogue, nommée muon.

Du déplacement de Lamb au rayon du proton

Or ces décalages par rapport à ce que prévoient les descriptions atomiques plus simples, ne faisant pas appel à l'électrodynamique quantique, dépendent de la taille du proton (l'électron, lui, semble être une particule ponctuelle, de taille nulle). Ils ont été détectés pour la première fois pour l'atome d'hydrogène ordinaire en 1947 par l'Américain Willis Lamb Jr. (voir l'encart page 35).

Même si les physiciens désignent ce phénomène sous le nom unique de « déplacement de Lamb », ils ont fini par comprendre qu'il met en jeu deux effets distincts. La première contribution au déplacement de Lamb est due aux particules dites virtuelles, des particules fantômes qui naissent spontanément et retournent au néant très rapidement. Les physiciens savent manier les équations de l'électrodynamique quantique pour calculer avec une grande précision la modification que les particules virtuelles apportent aux niveaux d'énergie atomiques.

Mais depuis quelques années, les incertitudes relatives à la seconde contribution au déplacement de Lamb ont commencé à limiter le pouvoir prédictif des physiciens. Ce second facteur est lié à la taille non nulle du proton et à la nature quantique de l'électron.

■ LES AUTEURS



Jan BERNAUER est chercheur postdoctorant au Laboratoire de science nucléaire du MIT (l'Institut de technologie du Massachusetts), aux États-Unis.



Randolf POHL travaille sur la spectroscopie laser de l'hydrogène et des atomes exotiques de type hydrogène à l'Institut Max Planck d'optique quantique de Garching, en Allemagne.

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.

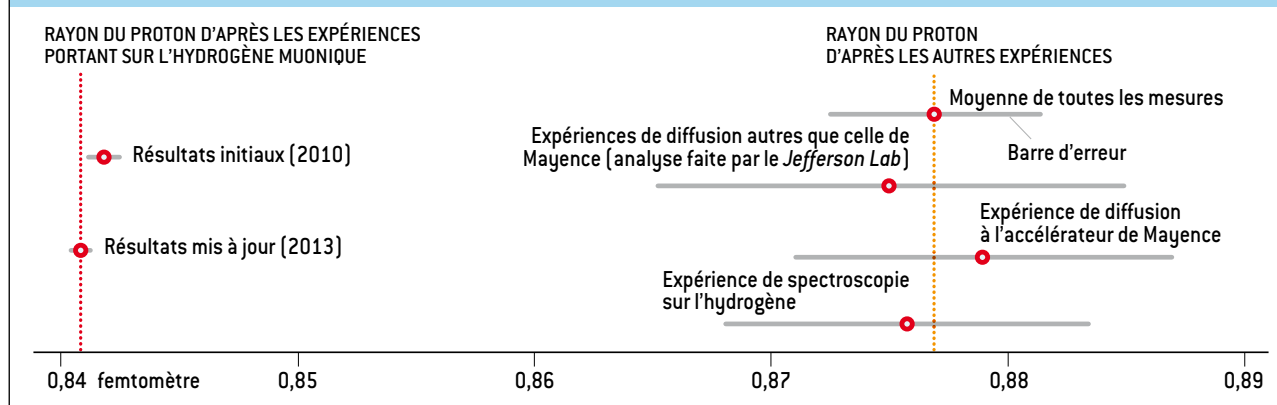
Le transfert d'une quantité de mouvement plus élevée signifie que le photon virtuel échangé a une longueur d'onde plus courte. Or, comme avec un microscope optique, si l'on veut sonder les structures les plus petites, on doit utiliser les longueurs d'onde les plus courtes possibles (ce qui nécessite 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 Randolf 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.

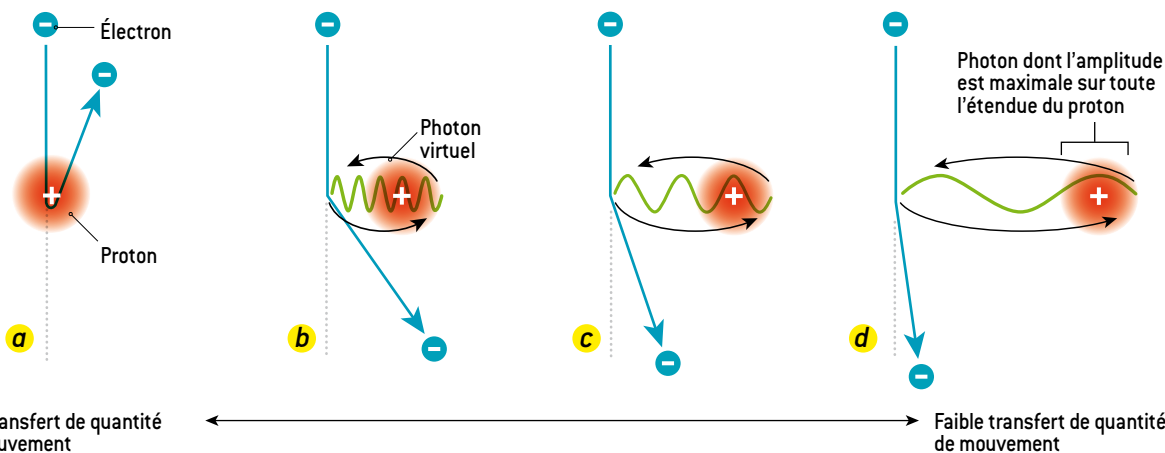
À son entrée dans la cible d'hydrogène, chaque muon déclenche un signal de mise en route d'un laser, qui émet une impulsion environ une microseconde plus tard. Si les photons de cette impulsion laser ont exactement la bonne énergie (l'énergie des photons est inversement proportionnelle à la longueur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

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

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

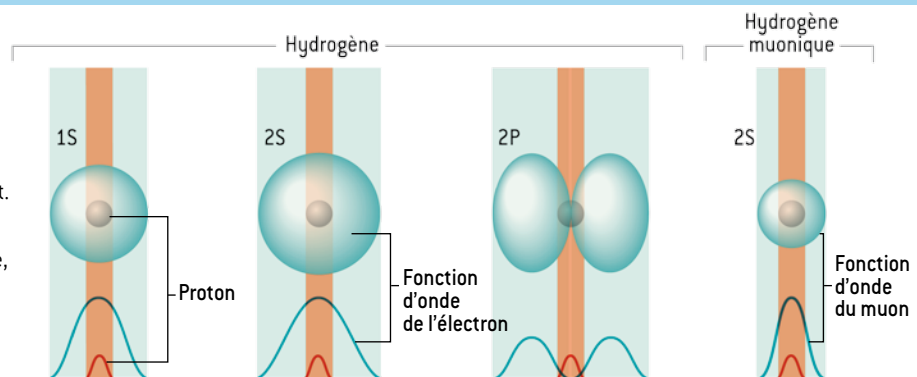
MESURER LE RAYON DU PROTON AVEC L'HYDROGÈNE MUONIQUE

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

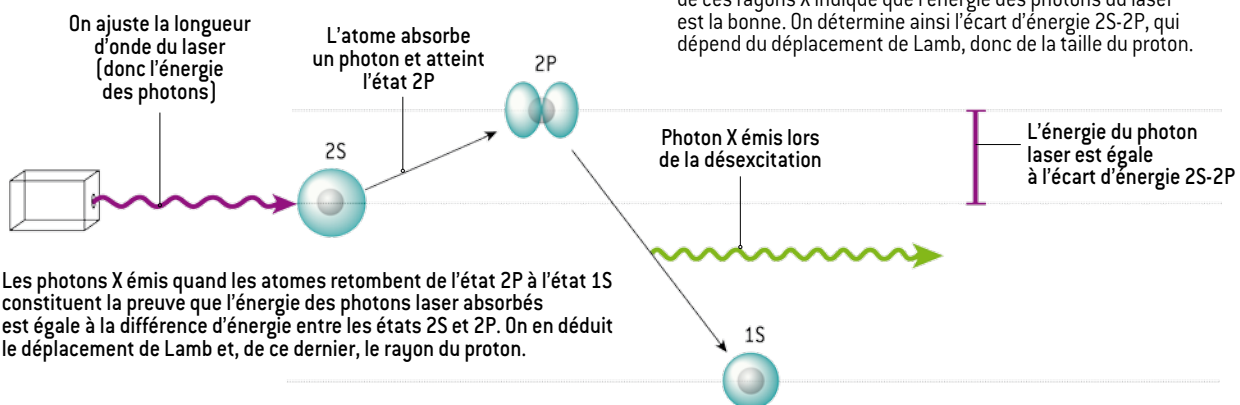
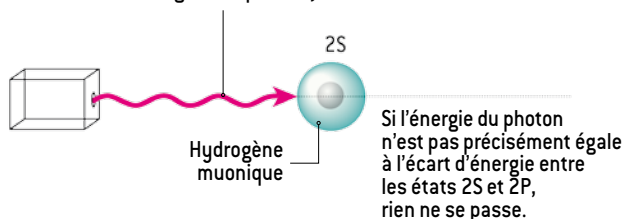
rapport à un atome où le proton serait ponctuel. On peut déduire la taille du proton de ce « déplacement de Lamb » de l'énergie. L'effet est amplifié lorsque l'électron de l'atome est remplacé par un muon. En effet, en raison de sa plus grande masse, le muon a une fonction d'onde moins étendue; comparé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



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.

Les pérégrinations du pommier domestique

Héloïse Giraud, Amandine Cornille et Tatiana Giraud

Issu d'un pommier sauvage des montagnes du Kazakhstan, le pommier domestique s'est répandu le long de la route de la soie jusqu'en Europe. Sa diversité est en partie due aux échanges de gènes avec les pommiers sauvages des régions traversées.

Reinette étoilée, Chantecler, Antarès, Belle de Pontoise, Richard, Choupette, Cabassou, Pomme d'api... Rien qu'en France, plus de 300 variétés de pommes sont autorisées à la culture. Elles sont plus de 11 000 à être cultivées dans le monde.

Malgré l'immense diversité des variétés domestiques, ou « cultivars », disponibles, la production de pommes à l'échelle industrielle dans le monde n'est plus fondée que sur la culture de quelques dizaines de cultivars d'ornement ou comestibles. Cette perte de diversité est d'autant plus inquiétante que, simultanément, la consommation de ces fruits augmente (la pomme est le troisième fruit le plus consommé au monde, après les agrumes et les bananes) et, avec elle, le nombre de leurs exploitations agricoles, avec une conséquence préoccupante : on a récemment découvert des gènes de pommiers domestiques dans le génome de pommiers sauvages. Or ces derniers sont une source de diversité importante pour l'amélioration variétale du pommier domestique, car ils sont naturellement résistants à nombre de maladies. Cette hybridation pourrait faire disparaître ce réservoir naturel de gènes.

Pour mieux comprendre comment favoriser la diversité des pommiers domestiques et maintenir celle des pommiers sauvages, les biologistes étudient l'histoire de la domestication du pommier. En décryptant, *via* la comparaison des génomes des pommiers domestiques et sauvages, les différentes étapes de cette domestication, ils espèrent mieux saisir leurs liens et en déduire des méthodes pour améliorer les variétés cultivées tout en protégeant le réservoir génétique sauvage.

Domestiqué dans les montagnes du Kazakhstan

De façon plus générale, l'histoire de la domestication du pommier constitue un modèle intéressant pour comprendre la domestication des plantes ligneuses et pérennes, c'est-à-dire des plantes qui, tels les arbres fruitiers, synthétisent du bois et vivent plusieurs années. Jusqu'à présent, les études sur la domestication ont surtout porté sur les plantes herbacées annuelles

L'ESSENTIEL

- La diversité des pommiers domestiques est menacée.
- Pour comprendre comment contrer cette tendance, les biologistes étudient l'histoire de la domestication du pommier.
- En comparant le génome de différentes variétés de pommiers cultivés et de pommiers sauvages, ils établissent leur histoire évolutive.
- Domestiqué en Asie il y a plus de 4 000 ans, le pommier se serait hybridé plusieurs fois avec des pommiers sauvages au gré de son périple jusqu'en Europe.

© Nithira Olga/Shutterstock.com