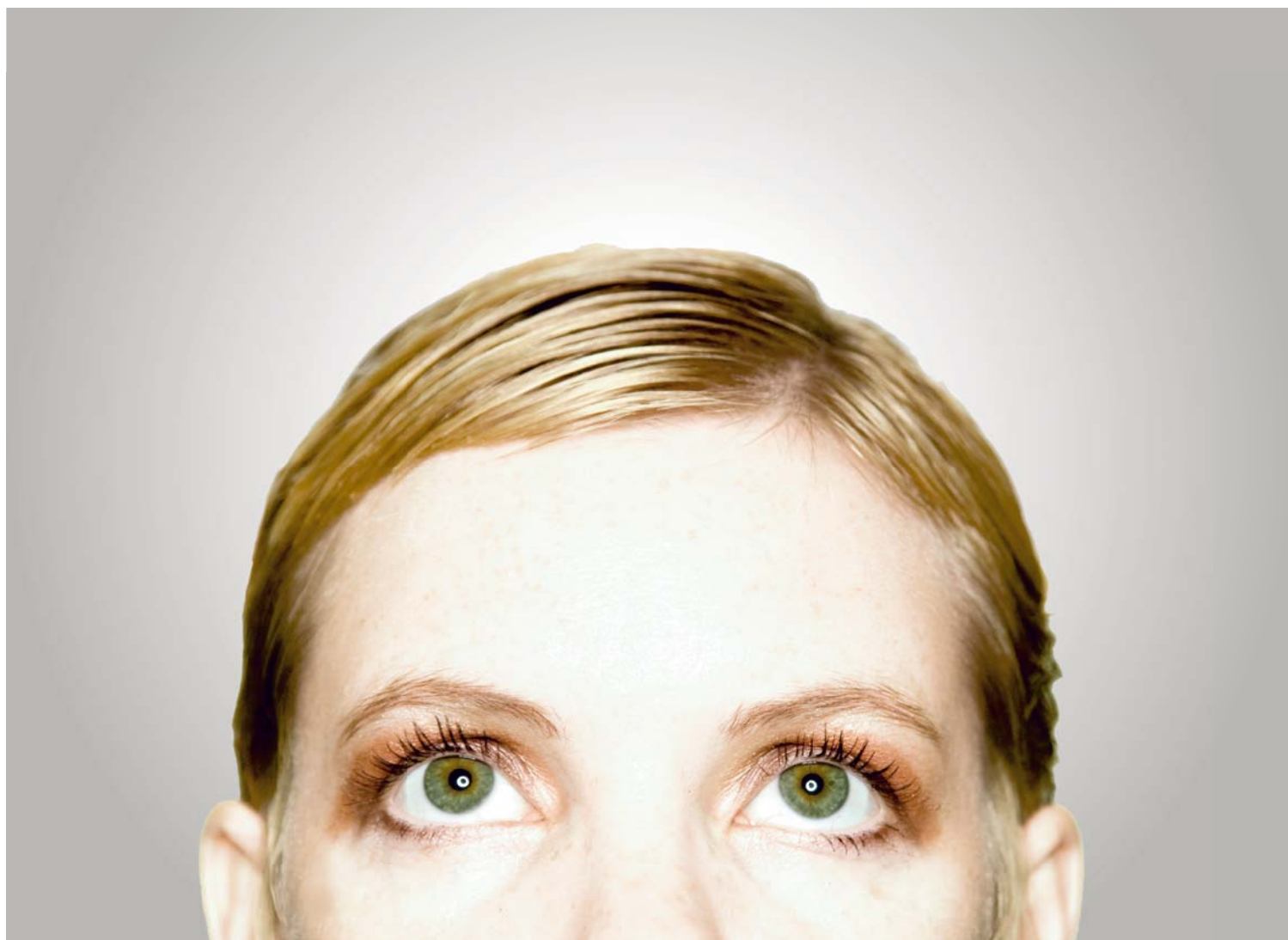




AcademiaNet offre un service unique aux instituts de recherche, aux journalistes et aux organisateurs de conférences qui recherchent des femmes d'exception dont l'expérience et les capacités de management complètent les compétences et la culture scientifique.

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.

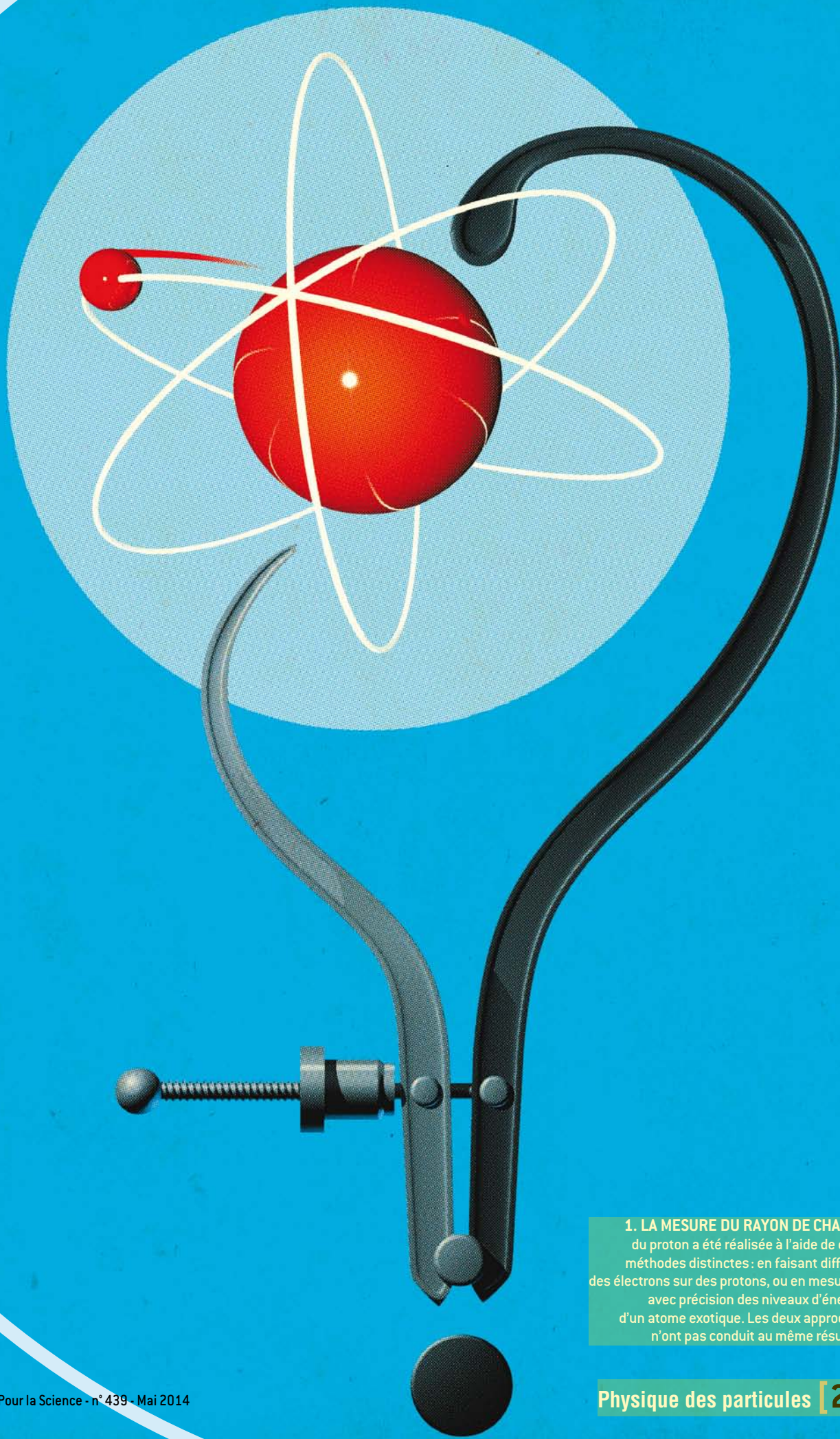
Tavis Coburn

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 ?

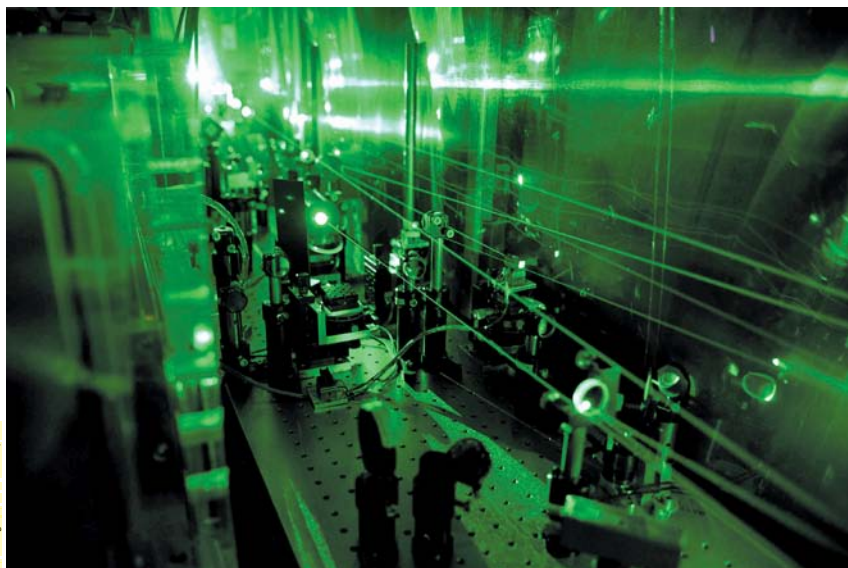
Il est donc clair que nous sommes confrontés à une anomalie. Soit nous ne comprenons pas complètement le proton, soit nous ne comprenons pas la physique qui intervient dans les mesures de précision du proton. Autrement dit, le problème de la taille du proton nous offre peut-être l'occasion d'apprendre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

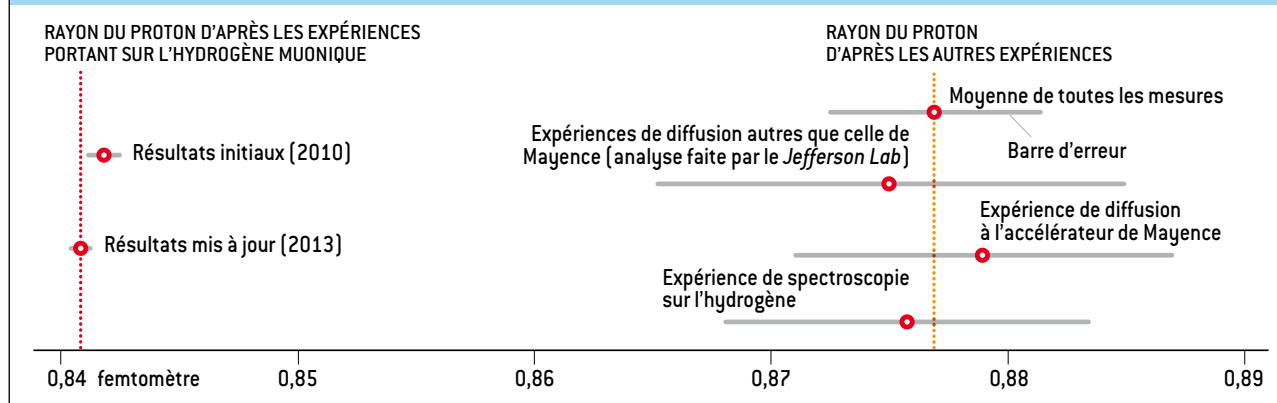
Le transfert d'une quantité de mouvement plus élevée signifie que le photon virtuel échangé a une longueur d'onde plus courte. Or, comme avec un microscope optique, si l'on veut sonder les structures les plus petites, on doit utiliser les longueurs d'onde les plus courtes possibles (ce qui nécessite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