

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.