

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.

© Nilitina Olga/Shutterstock.com



(sans bois et se reproduisant sur une année), telles que le maïs, le blé ou l'orge.

Or la domestication des plantes ligneuses n'a rien à voir avec celle des plantes herbacées. Les arbres présentent de longs temps moyens entre deux générations : la période juvénile (qui précède la première floraison) est par exemple de dix ans en moyenne au sein du genre *Malus*, qui regroupe les espèces de pommiers dans la classification des plantes. De plus, une grande partie des plantes ligneuses doivent s'interféconder : des mécanismes empêchent l'autopollinisation d'un arbre ou favorisent la fécondation croisée – et par là même le brassage génétique.

En raison de ces caractéristiques, il est difficile de sélectionner des caractères intéressants pour l'homme. Le développement des techniques de greffage, bouturage ou drageonnage (reproduction à partir de pousses nées sur une plante) a eu un rôle critique dans la propagation du pommier cultivé à travers le monde, en permettant de répliquer à l'identique l'information génétique (le génotype) de certains pommiers individuels. Mieux comprendre les mécanismes mis en œuvre lors

de ces pratiques devrait aider à améliorer la culture d'autres plantes ligneuses telles que la vigne ou l'olivier.

Le genre *Malus* comprend entre 10 et 100 espèces dont la plupart ne sont pas consommées. Leur nombre est incertain, car, jusque récemment, les espèces étaient identifiées à partir de leurs seuls caractères morphologiques. Aujourd'hui, ces critères sont de plus en plus complétés par des considérations génétiques. Une seule espèce du genre *Malus* est domestiquée, nommée *Malus domestica*. Absente du milieu naturel, elle est produite partout dans le monde, notamment en Europe, en Russie, au Japon, au Maghreb et au Canada.

D'où provient-elle ? La domestication est un processus continu et dynamique : on commence par exploiter des individus sauvages, puis on cultive des individus sélectionnés en environnement naturel, mais non encore différenciés des sauvages. Ce processus s'achève par la fixation, sous l'action de la sélection par l'homme, d'un « syndrome de domestication » – des changements génétiques, physiologiques, morphologiques et développementaux

pérennes par rapport aux formes sauvages. Les caractères sélectionnés par l'homme sont souvent liés aux conditions de récolte, à la production des graines ou de fruits plus gros ou plus nombreux.

Malgré l'intérêt économique et culturel du pommier, l'histoire de sa domestication a longtemps été mal connue. Et pour cause : son lieu d'origine supposé a été inaccessible jusqu'à la fin de la guerre froide. Dès 1929, Nikolai Vavilov, botaniste et généticien russe, avait émis l'hypothèse que les formes domestiquées du pommier étaient toutes issues d'une même espèce sauvage des montagnes du Tian Shan, au Kazakhstan en Asie centrale, le pommier *Malus sieversii*. Il avait observé que, dans cette région, les fruits de cette espèce présentent une impressionnante diversité morphologique et gustative, allant de grosses pommes juteuses (type Golden Delicious) à de petites pommes vertes amères. Or selon une idée qu'il avait exposée trois ans plus tôt, une telle diversité au sein d'une même espèce sauvage dans une région est souvent un indice que cette région est le lieu où la domestication de la plante