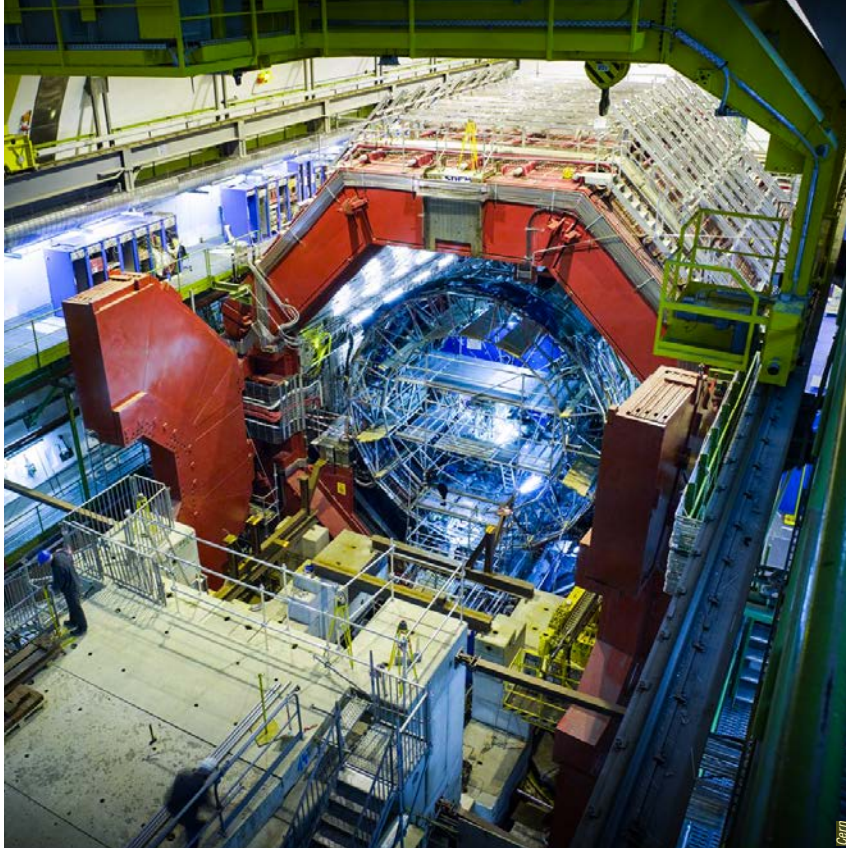




LE DÉTECTEUR ALICE AU LHC est dédié à l'étude du plasma de quarks et de gluons qui se forme lors de collisions d'ions lourds de plomb.

plus énergétiques. Le proton atteindrait un état d'équilibre, entre les divisions et les recombinaisons des gluons, qui ramènerait la machine à pop-corn sous contrôle.

Les physiciens n'ont que des indices de l'existence de cet hypothétique état saturé en gluons – aussi nommé « condensat de verre de couleur » – et ses propriétés ne sont pas complètement comprises. En sondant les protons par des expériences de diffusion profondément inélastique plus puissantes que celles actuellement à notre portée, les physiciens seront en mesure d'examiner les gluons de près dans leur forme la plus dense. Une question est, par exemple, de savoir si le phénomène qui limite la quantité de gluons s'accumulant au sein du condensat de verre de couleur est le même que celui qui assure le confinement. Si oui, l'observation du même phénomène dans des contextes différents apporterait de nouveaux éclairages sur le comportement des gluons.

Une autre question intrigue encore les chercheurs, celle du spin. En principe, le spin du proton provient de l'ensemble des spins des quarks et des gluons qui le composent. On s'attendait à ce que les quarks contribuent le plus mais, dans les années 1980 et 1990, grâce à des expériences de diffusion profondément inélastique, les physiciens ont estimé cette part à environ 30 % seulement du spin total. La détermination de

la part des gluons, plus difficile à mesurer, a exigé des expériences de diffusion plus précises. En 2014, les résultats obtenus par les expériences au RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider* ou Collisionneur d'ions lourds relativistes), aux États-Unis, et ceux de l'expérience Compass, au Cern, ont conduit à l'estimation que les spins des gluons représentent quelques dizaines de pour cent du spin du proton, mais avec des incertitudes importantes.

Spin du proton : le compte n'y est pas

Une autre contribution au spin pourrait venir du moment cinétique orbital des quarks et des gluons. Une analogie céleste illustre cette possibilité. Le moment cinétique du Système solaire est dû à la rotation des planètes sur leur axe auquel s'ajoute leur mouvement orbital autour du Soleil. Les quarks, antiquarks et gluons confinés au sein des protons bougent et sont donc associés à un mouvement orbital. Pour comprendre l'importance de ce mouvement orbital, nous devons cartographier les vitesses et les positions des quarks et des gluons au sein d'un proton. L'un de nous (Rolf Ent) travaille actuellement sur des expériences de diffusion profondément inélastique avec des faisceaux d'électrons de très haute intensité. La résolution atteinte devrait permettre

d'obtenir des images en trois dimensions de la matière au cœur des protons.

Les quarks et les gluons nous réservent encore des surprises et, pour approfondir notre compréhension de leurs interactions, nous devons les étudier non seulement dans les cas familiers des protons, neutrons et autres particules bien connues des physiciens, mais aussi dans des configurations plus exotiques.

En effet, la chromodynamique quantique prévoit l'existence d'états hadroniques très différents. Par exemple, des simulations suggèrent qu'il pourrait exister des « boules de gluons » contenant exclusivement des gluons, des « molécules » composées de quatre ou cinq quarks ou des entités hybrides répertoriées comme des états liés quark-antiquark-gluon. Mais les indices expérimentaux en faveur de l'existence de ces hadrons exotiques sont encore limités (voir l'encadré page 32). Cette situation pourrait changer grâce à des recherches expérimentales en cours. En particulier, une installation dédiée, GlueX, entre en service à l'accélérateur américain Thomas Jefferson (le « JLab ») de Newport, en Virginie.

Les physiciens étudient également un autre état extrême de la matière connu sous le nom de plasma de quarks et de gluons. Il se forme quand des noyaux atomiques entrent en collision à des vitesses proches de celle de la lumière. Les théoriciens soupçonnent que, dans ces conditions, les neutrons et les protons des deux noyaux voient leurs condensats de verre de couleur voler en éclats, cassant le confinement des quarks et des gluons et libérant l'énergie du condensat pour créer une « soupe » de quarks et de gluons. Ce plasma est la matière la plus chaude jamais créée sur Terre, avec une température de plus de 4000 milliards de degrés Celsius (voir l'entretien avec François Gelis page 36).

Le plasma de quarks et de gluons présente une forte ressemblance avec les conditions de l'Univers primordial. Les chercheurs des laboratoires qui créent ces plasmas (au RHIC américain et dans les expériences ALICE, ATLAS et CMS au LHC, voir la figure ci-dessus) analysent maintenant les fluides les plus petits et les plus parfaits au monde. En observant le refroidissement de ces plasmas, deux d'entre nous (Thomas Ullrich et Raju Venugopalan) et d'autres physiciens accèdent à de nouveaux éléments pour

comprendre comment l'Univers a évolué. En outre, en orchestrant précisément la destruction de protons et de neutrons en plasma, les chercheurs peuvent étudier à rebours le confinement, en espérant y découvrir les secrets de l'assemblage des quarks et des gluons.

Un avenir qui s'annonce riche en résultats

En plus des projets que nous avons cités, d'autres sont déjà à l'étude. Pour cartographier avec encore plus de précision la configuration des quarks et des gluons au sein des hadrons, il faudrait augmenter l'énergie des collisions. Ainsi, au lieu d'accélérer des électrons et les projeter contre des noyaux immobiles, les deux types de particules seraient accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière avant de subir une collision frontale. Des projets sont à l'étude au JLab et à Brookhaven pour atteindre une résolution de l'ordre d'un millièème du rayon du proton.

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration LHCb, **Observation of J/ψ resonances consistent with pentaquark states in $\Lambda_b^0 \rightarrow J/\psi K^- p$ decays**, soumis à *Phys. Rev. Lett.*, 2015.

M. Riordan et W. A. Zajc, **Les premières microsecondes de l'Univers**, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

H. D. Politzer, **Reliable perturbative results from strong interactions ?**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1346-1349, 1973.

D. J. Gross et F. Wilczek, **Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 30(26), pp. 1343-1346, 1973.

Un projet tel que le collisionneur électron-ion EIC (*Electron-Ion Collider*) atteindrait des intensités de faisceaux inégalées. Avec une plus grande densité de particules dans les faisceaux, les collisions de diffusion profondément inélastique seraient plus fréquentes que dans les expériences précédentes. Les chercheurs produiront alors de nombreux clichés révélant les entrailles des protons et des neutrons.

Durant les quatre décennies qui ont suivi la formulation de la chromodynamique quantique, les physiciens ont réalisé de nombreuses avancées pour expliquer pourquoi l'interaction forte se comporte comme elle le fait. Mais il manque encore quelques pièces pour créer un tableau simple et cohérent de la façon dont les gluons collent. Les dispositifs en cours de développement aujourd'hui nous donnent l'espoir que, d'ici une quarantaine d'autres années, nous aurons enfin percé le mystère de la constitution de la matière à son niveau le plus fondamental. ■



LES {Partagez les savoirs} RENDEZ-VOUS DU MUSÉUM

COURS PUBLICS

Cycle : « Préhistoire, préhistoriens, Préhistoriques : Naissance, pratiques et imaginaire de la Préhistoire au XIX^e siècle »

Jeudi 24 septembre - 18h : Préhistoire. La possibilité d'une Préhistoire. **Arnaud Hurel**, historien des sciences, ingénieur de recherche au Département de Préhistoire du Muséum, Membre associé du Centre Koyré en Histoire des sciences et des techniques.

Grand Amphithéâtre du Muséum 57 rue Cuvier, Paris 5^e

Entrée gratuite

Au Jardin des Plantes

Détails sur mnhn.fr, rubrique : "les rendez-vous du Muséum"

PROGRAMMATION AUDIOVISUELLE

Samedi 26 septembre - 15h30 : *La nuit des éléphants*
Réalisation : **Thierry Machado** (2014, 86')
En présence des producteurs **Jacques Perrin** et **Barthélémy Fougere**

MÉTIER DU MUSEUM

Dimanche 27 septembre - 15h : Primatologue, spécialiste des gorilles, **Shelly Masi**

UN CHERCHEUR / UN LIVRE

Lundi 28 septembre - 18h : *Une ethnologue au Jardin des Plantes, dix petits terrains*, Éditions Petit Génie / MNHN, 2015, 368p.
Avec **Bernadette Lizet**, ethnologue, Muséum

SCIENCE

POUR LA

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e

