

le centre de masse), soit une énergie dix fois supérieure à celle qui fut accessible au CERN. Deux faisceaux de noyaux d'or sont accélérés en sens opposé sur une trajectoire annulaire de 3,83 kilomètres de longueur. Constitués de paquets successifs d'environ un milliard d'ions, ces deux faisceaux sont précipités l'un contre l'autre dès qu'ils ont atteint 0,99995 pour cent de la vitesse de la lumière. Au cours d'une collision, environ 10 000 particules sont émises dans toutes les directions.

Les expérimentateurs ont commencé par vérifier que la densité d'énergie atteinte dans la matière nucléaire est bien supérieure à la valeur critique. L'opération, complexe, nécessite de résoudre plusieurs problèmes inverses, c'est-à-dire de déduire des données enregistrées par les détecteurs (et qui correspondent aux particules formées lors de la collision), les propriétés physiques de la matière.

A-t-on obtenu d'autres preuves indirectes de la formation d'un plasma de quarks et de gluons? Les quelques centaines de physiciens de la collaboration STAR ont d'abord observé que les particules produites lors de la collision ne sont pas réparties uniformément dans l'espace : elles semblent s'écouler dans des directions privilégiées. Ce caractère anisotrope ne correspond pas à ce que l'on attend si l'on tient seulement compte de la géométrie de la collision. La réorientation des flux de particules sortantes – leur anisotropie – s'explique par les interactions fortes intenses qui se déroulent au sein du milieu, et qui sont sans doute dues à la formation d'un plasma en équilibre thermodynamique.

Les distributions spectrales obtenues au RHIC ont confirmé l'existence d'un équilibre thermodynamique. En effet, quand un gaz est en équilibre thermique, toutes ses particules ont un comportement identique, c'est-à-dire, notamment, que toutes les quantités de mouvement ont la même répartition. Les observations au RHIC confirment que c'est bien le cas.

Fragmentation et jets de particules

La collaboration PHENIX au RHIC a aussi mis en évidence un phénomène nouveau, sans doute dû à la présence du plasma de quarks et de gluons. On a observé que la production de particules ayant la plus grande quantité de mouvement transverse est atténuée dans les collisions frontales. Aux énergies mises en jeu au RHIC, une collision d'ions lourds est, en première approximation, un choc de quarks et de gluons. Lors de la collision, ces derniers sont diffusés à des angles d'autant plus grands que le choc est violent. La composante transverse de la quantité de mouvement (perpendiculaire à l'axe) est évaluée à partir des angles de diffusion. Une fois qu'il s'est échappé de la zone d'interaction (le volume de collision), un quark ou un gluon donne naissance, par un mécanisme de «fragmentation», à un jet de particules. En effet, les quarks qui quittent le volume de collision ne peuvent rester isolés (un quark n'est jamais observé seul) : ils «s'hadronisent», c'est-à-dire qu'ils donnent naissance à des hadrons. L'énergie des hadrons du jet reflète celle des quarks et des gluons initiaux, et elle est observée par les détecteurs. Cependant, avant de s'échapper de la zone d'interaction, les quarks et les gluons de grande impulsion rencontrent sur leur chemin la matière nucléaire chaude et dense (le plasma?) formée par la collision. Or, un quark qui traverse une telle matière perd d'autant plus d'énergie que le milieu traversé est coloré. En d'autres termes, il est bien plus freiné dans la matière de quarks que dans la matière hadronique. Dans les détecteurs, cela se traduit par un affaiblissement de



5. L'ANNEAU DU COLLISIONNEUR du Laboratoire de Brookhaven, nommé RHIC, est enfoui dans un tunnel à quatre mètres de profondeur. Des paquets d'ions d'or s'y déplacent à une vitesse très proche de celle de la lumière, en suivant un anneau de près de quatre kilomètres de circonférence.

l'énergie des particules sortantes : c'est précisément le phénomène nouveau que les physiciens ont observé.

Le plasma de quarks et de gluons a-t-il, pour autant, été découvert? La matière déconfinée existe-t-elle? En 2001, les expériences du RHIC ont accumulé dix fois plus de données qu'en 2000, et la récolte continue. Les résultats du RHIC semblent indiquer que la matière confinée existe bel et bien, mais demandent à être renforcés. L'étape suivante de la quête du plasma de quarks et de gluons aura lieu au CERN. Un grand détecteur est d'ores et déjà en cours de réalisation, et sera employé sur le faisceau d'ions lourds du grand collisionneur LHC en construction au CERN. Les noyaux de plomb seront accélérés dans deux anneaux de 27 kilomètres de circonférence, qui permettront d'atteindre une vitesse égale à 0,99999993 pour cent de celle de la lumière!

Chacune des collisions libérera une énergie de 1 100 téraélectronvolts (1 téraélectronvolt vaut 10^{12} électronvolts), suffisante pour porter la matière nucléaire concentrée à quelque 1 000 milliards de kelvins. Cette énergie correspond à 0,2 millijoule, soit l'énergie d'un moustique en vol, mais elle est concentrée dans un volume de quelques milliers de fermis cubes seulement : elle est considérable. Le millier de physiciens et d'ingénieurs de 27 pays qui préparent cette nouvelle campagne expérimentale sera alors en mesure d'explorer le domaine d'existence du plasma de quarks et de gluons, d'autant plus qu'au grand collisionneur, le phénomène observable durera dix fois plus longtemps qu'au RHIC. Gageons que cela suffira pour révéler, sans contestation possible, le déconfinement et pour l'étudier sous toutes ses facettes.

Yves SCHUTZ et Hugues DELAGRANGE sont directeurs de recherche au Laboratoire SUBATECH de Nantes, une unité mixte de recherche du CNRS (IN2P3), de l'Université de Nantes et de l'École des mines de Nantes. Ils collaborent aux expériences PHENIX au RHIC et ALICE au CERN.

Madhusree MUKERJEE, *Un Big Bang miniature*, Pour la Science, n° 259, mai 1999.

K. H. ACKERMANN et col., *Elliptic Flow in Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV*, Collaboration STAR, in *Phys. Rev. Lett.* 86, 402, 2001.

K. ADCOX et col., *Suppression of Hadrons with Large Transverse Momentum in Central Au+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 130$ GeV*, Collaboration PHENIX, in *Phys. Rev. Lett.* 88, 022301, 2002.