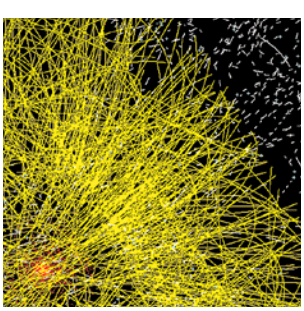
1

La soupe primordiale, 14 milliards d'années après

En reproduisant la mélasse de particules élémentaires qui emplissait l'Univers quelques microsecondes après le Big Bang, les physiciens font des découvertes étonnantes.

Rafaële Brillaud, envoyée spéciale à Kobe (Japon)

C'est un état de la matière, prédit par la théorie et encore méconnu, qui ne cesse de surprendre les physiciens. Le plasma de quarks et de gluons correspond à la mélasse de particules élémentaires qui existait quelques microsecondes seulement après le Big Bang, les débuts de l'Univers. Ce plasma échappe aux cosmologistes, pourtant habitués à remonter le temps en scrutant l'Univers à ses confins, car sa disparition n'a pas laissé de traces observables. Mais depuis une quinzaine d'années, les physiciens parviennent à le recréer en laboratoire et ne cessent d'accumuler des découvertes étonnantes. Réunis lors de la conférence internationale Quark Matter à Kobe début octobre, ils ont débattu autour de nouveaux phénomènes inattendus, qui questionnent encore cet état de la matière primitif d'il y a près de quatorze milliards d'années.



Au tout début, l'Univers était incommensurablement dense et chaud. Un point infime où régnait une température 100 000 fois supérieure à celle du centre du Soleil. *« La matière se présentait sous une forme très différente de sa forme actuelle : elle était sans structure, simplement composée de particules élémentaires qui n'avaient aucun lien entre elles »*, raconte Yves Schutz, de l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3-CNRS). *Les quarks, normalement regroupés par deux ou trois sous l'effet de l'échange des gluons, se déplaçaient quasi librement dans cette soupe primordiale. D'où le terme de plasma de quarks et de gluons »*. Puis l'Univers en expansion s'est refroidi, quarks et gluons se sont condensés pour former des particules nommées hadrons, en particulier les protons et les neutrons. Ces derniers se sont combinés en noyaux légers trois minutes plus tard. Les premiers atomes sont apparus au bout de 380 000 ans ; les étoiles et les galaxies, après 200 millions d'années.

« Si nous voulons comprendre l'état de la matière actuelle, souligne Yves Schutz, *il est préférable de connaître l'état de la matière qui l'a précédée. »* Certes, mais comment étudier en laboratoire un plasma dont l'existence n'est qu'une déduction théorique ? D'ordinaire, les gluons confinent les quarks dans les hadrons. C'est l'interaction nucléaire forte, l'une des grandes forces fondamentales, qui soude les noyaux des atomes. Cependant, si les noyaux sont suffisamment comprimés ou chauffés, prédit la théorie de la chromodynamique quantique, quarks et gluons peuvent se désolidariser. *« Un tel changement* •••

Repères

- **Le plasma de quarks et de gluons est un état de la matière qui a existé quelques microsecondes après les débuts de l'Univers.**
- **C'est le liquide le plus petit et le plus chaud créé en laboratoire, notamment au sein du LHC, au Cern.**
- **Il pourrait être produit à partir d'un nombre beaucoup plus restreint de particules qu'on ne pensait.**

◀ *Cette simulation d'une collision plomb-plomb dans le détecteur Alice pourrait produire des plasmas de quarks et de gluons.*

CERN

••• *d'état aurait lieu à des températures de l'ordre de 2000 milliards de kelvins, 100000 fois plus élevées que celle du Soleil, et à des densités de l'ordre d'un gigaélectronvolt par fermi cube (1 GeV/fm³), soit six fois la densité des noyaux »*, détaille Raphaël Granier de Cassagnac, de l'IN2P3. Des conditions extrêmes réunies juste après le Big Bang et peut-être dans les parties les plus denses des astres moribonds, ou étoiles à neutrons.

Recréer ce Big Bang se révèle excessivement complexe. C'est néanmoins devenu possible à partir des années 1980 grâce à l'utilisation des accélérateurs de particules. Des noyaux atomiques lourds, tel le plomb, sont lancés l'un contre l'autre à des vitesses proches de celle de la lumière – 300000 kilomètres par seconde. Dans ces chocs fulgurants, les particules élémentaires parviennent à se libérer brièvement. Installé près de Genève, le Grand Collisionneur de hadrons (ou LHC pour Large Hadron Collider), de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (Cern), est actuellement l'accélérateur de particules le plus puissant. Depuis juin 2015, il fournit des collisions à l'énergie record de 13 téraélectronvolts (TeV), contre 7 TeV auparavant. Un TeV représente à peu près l'énergie du mouvement d'un moustique en vol. Le tour de force du LHC est qu'il condense cette énergie dans un espace environ mille milliards de fois plus petit que l'insecte piqueur.

Le plasma produit en laboratoire est si minuscule et si éphémère que son observation demeure impossible !

Au LHC, des faisceaux constitués de « trains » de paquets de particules circulent en sens inverse dans un anneau de 27 kilomètres de circonférence, situé à 100 mètres sous terre, leur trajectoire étant guidée par de puissants aimants supraconducteurs. Ils entrent en collision en quatre points, où sont installés de grands détecteurs baptisés Atlas, CMS, Alice et LHCb.

Le LHC procède principalement à ces collisions de protons, qui ont notamment permis la découverte du boson de Higgs, en 2012. Mais l'expérience Alice (A Large Ion Collider Experiment), qui réunit plus de mille scientifiques de trente pays, est dédiée à l'étude du plasma de quarks et de gluons, autrement dit aux collisions d'ions lourds. *« Nous utilisons des paquets de plusieurs milliers d'ions plomb, dont les noyaux contiennent 208 protons et neutrons,* indique Philippe Crochet, chercheur au laboratoire de physique corpusculaire de Clermont-Ferrand. *Comme ils renferment plus de quarks et de gluons qu'un seul proton, ils provoquent forcément plus d'interactions entre ces particules élémentaires et permettent d'obtenir un milieu plus chaud. »*

UN LIQUIDE PARFAIT

Rapidement, les résultats sont positifs. Les accélérateurs de particules atteignent, et même dépassent, les conditions requises pour obtenir le plasma attendu. Le LHC engendre d'ailleurs à ce jour les températures les plus importantes jamais obtenues par l'homme, de l'ordre de 5500 milliards de degrés ! Mais le plasma, lui, demeure mystérieux. Produit en laboratoire, il est si minuscule (environ la taille d'un noyau d'atome) et si éphémère (il se refroidit et disparaît 10^{-23} seconde après la collision) que son observation demeure impossible ! Pour connaître sa nature exacte, les physiciens ne disposent que de traces : les débris de la collision enregistrés par les détecteurs. Ils étudient les propriétés des particules émises et essaient d'en deviner les propriétés du plasma dont elles sont issues. *« C'est comme si un archéologue trouvait un tesson et qu'il devait reconstituer l'amphore à laquelle il appartenait, mais aussi savoir comment l'objet s'est cassé ! »*, explique Yves Schutz, responsable pour la France de l'expérience Alice.

Première surprise, ces observations indirectes révèlent en 2005 que le plasma se comporte en réalité comme un liquide (1). Avant cette découverte du grand collisionneur d'ions lourds américain RHIC de Brookhaven, sur l'île de Long Island, on pensait avoir affaire à un gaz. *« Les quarks sont effectivement libres, dans le sens où ils se sont libérés du confinement dans les protons et des neutrons, mais, contre toute attente, ils continuent à interagir énormément entre eux ! »*, note Raphaël Granier de Cassagnac. *Ils interagissent même tellement que le liquide est dit "parfait", car sa viscosité est particulièrement faible. C'est le meilleur liquide qu'on connaisse. »* Les physiciens ne cachent pas leur étonnement. *« Les autres systèmes qui ont des viscosités faibles, tels l'hélium superfluide ou les gaz d'atomes froids, sont formés*

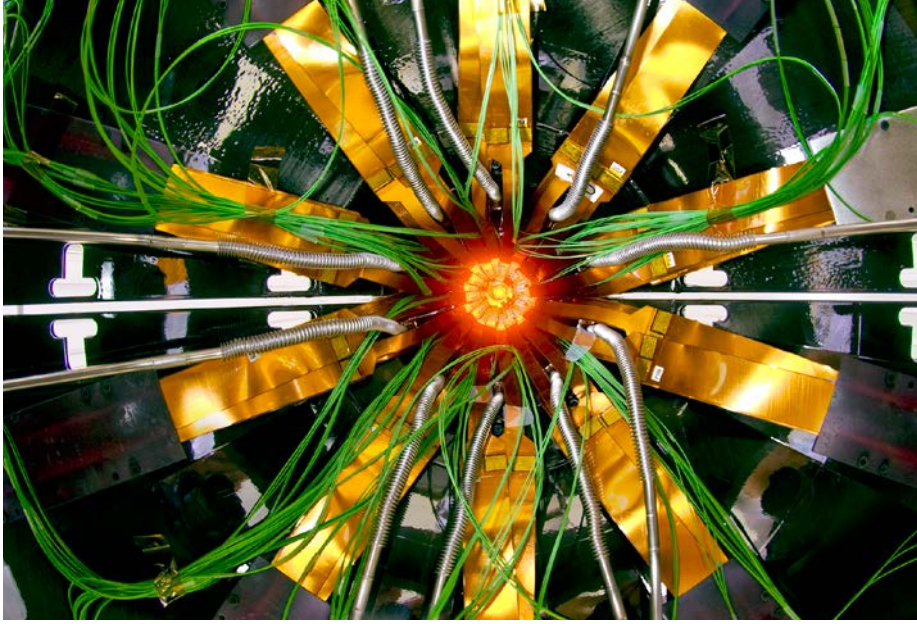
à des températures extrêmement basses, proches du zéro absolu, relate Yves Schutz. *Et là, pour la première fois, on chauffe de la matière à très haute température et on obtient un liquide suprafluide, avec une viscosité très faible ! »*

Le phénomène est plutôt « contre-intuitif ». Pour avoir une viscosité faible, les interactions entre les particules doivent être fortes. Et le plasma de quarks et de gluons a les interactions les plus fortes jamais vues dans la nature. Mais comment l'expliquer ? En effet, la force qui lie d'habitude les quarks entre eux fonctionne à l'opposé des autres, électromagnétiques ou gravitationnelles : plus la distance est courte, plus elle est faible. *« On peut avoir des interactions dans un système de deux manières,* reprend François Gelis, de l'Institut de physique théorique du CEA Saclay. *Soit parce que la force entre les constituants élémentaires est forte, soit parce que la densité est extrêmement grande. Dans le plasma, la distance entre les quarks est plus petite que dans les noyaux atomiques. En revanche, les particules ont une plus grande probabilité d'en rencontrer d'autres lorsqu'elles se déplacent car leur densité est bien plus élevée. »*

STRUCTURE DU PROTON

Cette fluidité se détecte en observant des comportements collectifs des particules produites. *« En classant des paires de particules en fonction de leurs angles relatifs, angle par rapport à l'axe de la collision et angle perpendiculaire à l'axe de la collision, on obtient une structure en trois dimensions très régulière, qui forme comme des vagues »,* précise Jean-Yves Ollitrault, de l'Institut de physique théorique du CEA Saclay. S'il s'agissait d'un gaz, les particules se déplaceraient de manière aléatoire. Mais là, elles vont toutes dans la même direction, formant une crête, un « ridge », disent les physiciens, qui est précisément la manifestation de l'aspect fluide du plasma. En 2012, nouvelle surprise (2) : des corrélations du même type sont observées par l'expérience CMS dans le cadre de collisions entre protons et noyaux de plomb. *« Les particules émises volent en quelque sorte dans la même direction, et la façon dont elles se communiquent leur direction n'est pas claire. Cela a surpris beaucoup de physiciens, à commencer par nous »,* avoue à l'époque Gunther Roland, professeur au MIT. On pensait en effet que les collisions plomb-proton, et a fortiori proton-proton, ne donnaient pas une densité suffisante pour former un plasma de quarks et de gluons. Puis cet été, dernière surprise (3) : l'expérience Atlas détecte des corrélations similaires dans des collisions proton-proton. La curiosité des physiciens est titillée. *« On ne s'attendait pas du tout à observer ce genre de comportement collectif dans des systèmes aussi petits »,* s'étonne Jean-Paul Blaizot, de l'Institut de physique théorique du CEA-Saclay.

Comment dès lors interpréter de tels résultats ? *« Depuis un an, il y a un consensus de plus en plus grand selon lequel on forme aussi, dans les collisions proton-noyau, un plasma de quarks et de gluons qui se comporte comme un petit fluide »,* déclare Jean-Yves Ollitrault. Le cas des collisions proton-proton, en revanche, n'est pas tranché. Il était au cœur des débats à la conférence de Kobe. Deux hypothèses sont actuellement en lice. *« Soit ces corrélations sont le reflet de corrélations présentes dans l'état du proton avant qu'il n'entre en collision et nous renseignent sur la structure du proton qui, bien que constitué de trois quarks, est particulièrement complexe »,* précise Jean-Paul Blaizot. Soit une petite quantité de plasma a été créée dans ces collisions proton-proton. *« En ce cas, cela signifie qu'on peut former une gouttelette qui a la taille d'un proton !* analyse François Gelis. *Alors qu'on a toujours pensé qu'un liquide était un objet macroscopique constitué d'un grand nombre de particules élémentaires… »* Autant dire que le plasma de quarks et de gluons a encore beaucoup de choses à nous apprendre. ■



▲ *Alice est un détecteur d'ions lourds installé sur l'anneau du Grand Collisionneur de hadrons (LHC). Il a été conçu pour étudier le plasma de quarks et de gluons.*

5 500

MILLIARDS DE DEGRÉS, c'est la température la plus élevée jamais obtenue par l'homme, atteinte par le LHC, au Cern.

(1) K. Adcox *et al.*, I. Arsene *et al.*, B. Back *et al.*, J. Adams *et al.*, *Nuclear Physics A, 757(1)*, 1, 2005.

(2) CMS Collaboration, arXiv preprint, arXiv:1210.5482, 2012.

(3) ATLAS Collaboration, arXiv preprint, arXiv:1509.04776, 2015.

CERN/MAXIMILIEN BRICE