Le plasma de quarks et de gluons

À l'aube des collisions du LHC

Raphaël Granier de Cassagnac* (raphael@in2p3.fr)

Laboratoire Leprince-Ringuet, École polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex

*Membre des expériences PHENIX et CMS

Le plasma de quarks et de gluons est un état prédit de la matière, dans lequel notre univers devait se trouver pendant les premières microsecondes après le *big bang*. Des collisions violentes d'ions lourds sont susceptibles de le recréer en laboratoire. De nombreuses signatures de son apparition fugace ont été observées au collisionneur d'ions lourds relativistes (RHIC) de Brookhaven, aux USA, et révèlent les propriétés de cette nouvelle phase de la matière nucléaire.

Actuellement, le grand collisionneur de hadrons (LHC, pour Large Hadron Collider) de l'Organisation européenne de recherche nucléaire (CERN) produit ses premières collisions de protons, atteignant déjà des énergies jamais égalées, en route vers son énergie nominale de 14 téraélectronvolts ($\text{TeV} \equiv 10^{12} \text{ eV}$). Ses buts ultimes sont d'observer le chaînon manquant du modèle standard de la physique des particules (le boson de Higgs) et – qui sait ? – de découvrir des physiques nouvelles (supersymétrie, dimensions supplémentaires...). Le LHC opérera également des collisions de noyaux de plomb jusqu'à un maximum de 5,5 TeV par paire de nucléons. L'objectif de ces collisions d'ions lourds n'est pas d'observer des processus élémentaires, de plus en plus rares à des énergies de plus en plus élevées, mais plutôt d'obtenir une densité maximale d'énergie sur un volume relativement étendu (quelques centaines de fermis cube, c'est-à-dire quelques 10^{-43} mètre cube) ; ceci dans le but de recréer un état de la matière qui prévalait pendant les premières microsecondes du *big bang* et pourrait exister au cœur des étoiles à neutrons : le *plasma de quarks et de gluons* (PQG). Trois des expériences du LHC ont un programme d'étude du PQG et l'une d'elles, ALICE, a été spécialement conçue à cette fin.

D'ordinaire, quarks et gluons restent confinés dans les *hadrons*, et en particulier dans les protons et les neutrons qui forment les noyaux des atomes (encadré 1). La chromodynamique quantique, théorie qui rend compte de l'interaction forte, prédit que si ces noyaux sont suffisamment comprimés ou chauffés, quarks et gluons peuvent se libérer et former une sorte de plasma, aux propriétés thermodynamiques mal connues.

Un tel changement d'état aurait lieu à des températures de l'ordre de $2 \times 10^{12} \text{ K}$, soit 20 000 fois plus élevées que celle du Soleil, et à des densités de l'ordre d'un gigaélectronvolt par fermi cube ($1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$), soit six fois la densité des noyaux.

Avant le LHC, plusieurs machines, comme le SPS (pour Super Proton Synchrotron) du CERN, ont tâché de produire et de mettre en évidence le PQG, en réalisant des collisions d'ions lourds. La dernière, le RHIC (pour Relativistic Heavy Ion Collider), se trouve au laboratoire de Brookhaven dans l'État de New York, et elle fonctionne aujourd'hui encore, à une énergie maximale de 200 gigaélectronvolts ($\text{GeV} \equiv 10^9 \text{ eV}$) par paire de nucléons, trente fois moindre qu'au futur LHC. Elle a permis d'amasser de nombreux indices de la création du PQG et d'amorcer l'étude de ses propriétés.

La suite de l'article donne les caractéristiques saillantes de la matière créée au RHIC, telles qu'elles ont été étudiées par les quatre expériences : BRAHMS, PHENIX (fig.1), PHOBOS et STAR.

Une matière saturée en gluons

L'indice le plus immédiat de la violence d'une collision d'ions lourds est donné par le nombre de particules produites. Au RHIC, dans les collisions les plus violentes, près de 6000 particules (essentiellement les hadrons les plus légers, des *pions*) sont produites. La figure de la page 8 donne un aperçu de cette multiplicité, vue par l'expérience STAR. Ce nombre peut paraître élevé, mais il est inférieur aux attentes théoriques et aux extrapolations des expériences précédentes, de moindre énergie. Il suggère qu'à ces énergies, l'état initial du système commence

1. Au RHIC, l'expérience PHENIX, partiellement ouverte.

à être formé, non pas d'une superposition de nucléons incohérents, mais d'un condensat de gluons, étendu à la surface du noyau et nommé « verre de couleur ». En d'autres termes, les gluons de différents nucléons se chevauchent et se recombinent, saturant la densité de gluons, et ainsi le nombre de particules produites.

L'énergie de cette multitude de particules permet également d'estimer la densité d'énergie produite dans la collision. En restant prudents, nous estimons qu'une densité d'au moins 5 GeV/fm^3 a été atteinte, bien supérieure à la densité critique (environ 1 GeV/fm^3) prédite pour l'apparition du PQG. Bien entendu, cela ne suffit pas à démontrer qu'il a été créé. D'autant que s'il est effectivement produit, le PQG doit s'étendre et se refroidir rapidement, n'existant approximativement que le temps nécessaire à la lumière pour traverser quelques fermis, soit quelque 10^{-23} seconde. Cette apparition fugace ne peut donc être observée directement, et les physiciens cherchent dans la myriade de particules finalement produites des modifications de leur comportement qui signent *a posteriori* l'apparition du nouvel état de la matière.

Une matière dense et opaque

Au RHIC, la première et plus frappante de ces signatures est l'atténuation des gerbes de particules. Un quark (ou un gluon) créé lors d'un processus élémentaire ne peut s'échapper seul de la zone de collision (car il est coloré), et s'habille d'autres quarks et gluons pour constituer plusieurs hadrons (blancs), formant une *gerbe hadronique*, ou un *jet* (ce phénomène est appelé *fragmentation*). Si ce quark est créé dans un PQG, donc libre, il se propage au travers et en ressent l'influence.

“ La chromodynamique quantique prédit qu'en comprimant ou en chauffant des noyaux, il est possible de créer un plasma de quarks et de gluons.,,

Quarks, gluons, et autres particules Encadré 1

Un atome est constitué d'un noyau chargé positivement et d'un nuage d'électrons. Si les atomes ont un rayon caractéristique de l'ordre de l'ångström (10^{-10} mètre), leurs noyaux sont concentrés dans quelques fermis (10^{-15} mètre). Les noyaux sont eux-mêmes constitués de *protons* et de *neutrons* que l'on regroupe sous le terme de *nucléons*. Depuis les années soixante, nous savons qu'il existe de nouvelles particules à l'intérieur des nucléons : les *partons*. Même si les partons ont de petites probabilités d'être tout et n'importe quoi (y compris des électrons), ce sont majoritairement des *quarks* et des *gluons*.

Les quarks existent en six variétés, six *saveurs*, et ont une charge fractionnaire de la charge élémentaire ($1,6 \times 10^{-19}$ coulomb). Trois quarks sont de charge $+2/3$ (*up*, *charm* et *top*) et trois de charge $-1/3$ (*down*, *strange* et *bottom*). Leurs masses sont très différentes, de quelques pourcents de (pour le *up* et le *down*) à 185 fois (pour le *top*) la masse d'un proton.

L'interaction qui lie les quarks ensemble, mais également protons et neutrons au sein des noyaux atomiques, est dite *forte*, car elle l'est suffisamment pour surpasser la répulsion électromagnétique qui s'opère entre protons. Elle est régie par la théorie de la *chromodynamique quantique*, qui attribue à chaque particule une propriété appelée *couleur* du fait de cette analogie : si les quarks sont colorés (indépendamment de leur saveur, ils peuvent être rouges, verts ou bleus), les particules libres doivent être « blanches ». De fait, les quarks ne sont jamais observés seuls, mais toujours collés ensemble par des gluons pour former des *hadrons* : soit des *mésons* formés d'un quark et d'un antiquark (rouge + antirouge = blanc), soit des *baryons*, formés de trois quarks (rouge + vert + bleu = blanc).

Par exemple, les protons (resp. neutrons) sont essentiellement formés par deux quarks *up* et un *down* (resp. deux *down* et un *up*), un rouge, un vert et un bleu, collés ensemble par des gluons.

La chromodynamique quantique prédit néanmoins qu'en comprimant et/ou en chauffant des hadrons, il est possible de les « fondre » et de créer un *plasma de quarks et de gluons*.

2. Au RHIC, les hadrons (ici des pions π^0 en triangles orange ou des mésons η en ronds rouges) **de grande impulsion transverse P_T sont violemment supprimés par le milieu dense qu'ils traversent, alors que les photons** (carrés bleus), **insensibles à l'interaction forte, ne le sont pas.** Techniquement, la quantité portée en ordonnée s'appelle facteur de modification nucléaire, se note R_{AA} , et est formée du taux de particules vues en collisions d'ions lourds, divisé par le même taux mesuré en collisions proton+proton et par le nombre de collisions nucléon+nucléon correspondantes. L'abscisse est l'impulsion transverse des particules considérées.

>>>

C'est ce qui est observé sur la figure 2. Les hadrons de grande impulsion transverse reflètent bien les propriétés des quarks élémentaires à l'origine de leur jet. Au RHIC, nous observons que leur nombre est réduit par un facteur de l'ordre de cinq (triangles orange ou ronds rouges), alors que celui des photons reste constant (carrés bleus). Ces derniers traversent le milieu sans le voir, car ils sont insensibles à l'interaction forte. Ils forment ainsi une bonne référence de ce qui devrait se passer en l'absence de plasma et il est clair, par comparaison, que les jets sont atténués. L'interprétation de ce résultat est que les quarks ont à traverser un milieu dense susceptible de les freiner. Le calcul théorique (la ligne orange sur la figure) montre que la densité de ce milieu est si élevée qu'il ne peut pas être constitué de hadrons, mais bien de partons.

Une autre façon d'observer ce phénomène est de chercher des jets dos-à-dos. La conservation de l'impulsion implique en effet qu'un jet doit être contrebalancé par d'autres particules, souvent un unique autre jet dans la direction opposée. Cet effet s'observe bien dans les collisions entre protons, comme le montre l'histogramme noir de la figure 3. Elle représente la distribution azimutale (perpendiculaire à l'axe des faisceaux) des particules autour d'une particule énergétique et nous retrouvons bien des particules appartenant au même jet ($\Delta\phi = 0$), et d'autres appartenant au jet opposé ($\Delta\phi = \pi$ radians). Il en va de même

3. Distribution azimutale (dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation des faisceaux d'ions) **des particules créées lors de collisions ion-ion, autour d'une particule de référence ($\Delta\phi = 0$), montrant leur regroupement en jets.** Les jets sont émis dos-à-dos ($\Delta\phi = 0$ et $\Delta\phi = \pi$) dans les collisions proton-proton (histogramme noir) et deuton-or (ronds rouges), mais pas dans les collisions frontales or-or (étoiles bleues), où le jet à $\Delta\phi = \pi$ est absorbé par un plasma de quarks et de gluons.

de collisions où nous n'attendons pas production du PQG : entre un noyau léger et un lourd (ronds rouges), mais aussi dans des collisions *périphériques* entre ions lourds (non représentées). En revanche, le jet émis dans la direction opposée disparaît dans les collisions *frontales* d'ions lourds (étoiles bleues) : ce jet est, en première approximation, invisible car absorbé par une matière opaque. Des études extensives de ce phénomène montrent que les jets qui survivent sont essentiellement produits à la périphérie des collisions, ceux ayant à traverser la zone de collision étant fortement absorbés. En cherchant des particules moins énergétiques, le jet opposé a également été retrouvé, sous la forme d'un cône de particules qui suggère un freinage similaire à celui d'un objet se déplaçant au-dessus de la vitesse du son dans ce milieu, vitesse que nous estimons à environ la moitié de celle de la lumière.

L'effet dramatique qu'a la matière produite au RHIC sur les jets montre ainsi qu'elle est extrêmement dense et opaque aux hadrons.

Une matière liquide en forte interaction

Un autre champ d'investigation est celui des comportements collectifs des particules produites. Il est remarquable que lors d'une collision, ni parfaitement frontale ni

parfaitement rasante, les ions lourds ont une surface de recouvrement transverse initiale en forme d'amande (voir la figure de l'encadré 2). Si les particules qui y sont créées interagissent fortement entre elles, nous pouvons nous attendre à une anisotropie azimutale de leur distribution. Un tel « flot elliptique » est observé au-delà de toute attente au RHIC, avec pour certaines particules une augmentation de 50 % du taux de production le long du petit côté de l'amande. De fait, cette asymétrie azimutale ainsi que d'autres observables (le flot radial, la dépendance du flot elliptique avec l'excentricité ou l'énergie cinétique transverse, etc.) sont bien reproduites par des modèles théoriques supposant une évolution hydrodynamique idéale (sans viscosité) du milieu.

C'est ce qui vaut à la matière créée au RHIC les surnoms de *liquide parfait* ou de *sQGP* où le *s* signifie *strongly interacting* (en *interaction forte*). Ce comportement inattendu récuse l'idée préconçue d'un PQG se comportant comme un gaz idéal dans lequel quarks et gluons évolueraient librement. Même s'ils ne sont pas confinés dans des hadrons, quarks et gluons n'en restent donc pas moins sensibles à l'interaction forte et interagissent étroitement *entre eux*. Notons qu'il n'est pas exclu qu'à plus haute énergie (au LHC par exemple), ces interactions s'amenuisent et que la matière créée s'apparente davantage à un gaz parfait.

4. Comportement universel du flot elliptique des hadrons en fonction de l'énergie cinétique transverse, une fois qu'il est divisé par le nombre de quarks constituants. Techniquement, la quantité portée en ordonnée traduit l'augmentation d'émission de particules le long du petit axe de la surface de collision.

π^+ , π^- , π^0 : mésons pi (pions) ; K^+ , K^- , K_S^0 : mésons ka (kaons) ; ϕ : mésons phi ; p : protons ; Λ : baryons lambda ; Ξ^- , Ξ^+ : baryons xi ; d : deutons.

5. Le taux de production des mésons J/ψ est fortement réduit à mesure que la violence des collisions augmente, au RHIC (en cercles rouges et carrés bleus) comme à plus basse énergie au SPS (en croix noires, les résultats de l'expérience NA50 du SPS). En ordonnée est porté leur facteur de modification nucléaire, tel qu'il est défini pour la figure 2, et en abscisse, la violence de la collision, traduite par le nombre de nucléons y participant.

Une matière partonique

Ceci dit, il n'est pas interdit au sceptique d'imaginer un monde de hadrons en forte interaction, liquide, dense et opaque, même si cela paraît théoriquement et quantitativement peu probable. En d'autres termes, les phénomènes décrits jusqu'ici n'ont rien d'intrinsèquement lié à la nature partonique de la matière créée au RHIC. Un premier indice du fait que nous avons bien affaire à des partons réside dans d'étonnants comportements universels des hadrons produits, une fois que nous divisons les quantités observées par le nombre de quarks dont ils sont constitués. C'est en particulier le cas du flot elliptique, comme l'illustre la figure 4 sur laquelle est portée, pour de nombreux hadrons, l'asymétrie azimutale en fonction de l'énergie cinétique transverse, toutes deux divisées par le nombre de quarks constituants (deux pour les mésons, trois pour les baryons ou même six pour les deutons constitués d'un proton et d'un neutron). Le comportement universel observé n'apparaît qu'une fois les quantités ramenées au nombre de quarks constituants, ce qui suggère que les hadrons sont bien créés par fusion de quarks ayant développé leur propre flot elliptique. *A fortiori*, cela montre que la matière dans laquelle s'est développé ce flot est partonique.

Des études détaillées de l'atténuation des plus légers des mésons (les pions) et des baryons (les protons) d'énergie intermédiaire

Collisions à géométrie variable

Encadré 2

Dans l'étude des collisions d'ions lourds, il est important de caractériser leur violence, c'est-à-dire l'énergie dégagée lors de la collision. Celle-ci dépend essentiellement du *paramètre d'impact* (distance transverse entre les centres des ions). Plus cette distance est petite, plus la zone de recouvrement des ions est grande et plus le nombre de nucléons impliqués dans la collision sera élevé. On parle de *nombre de participants* (en violet et bleu sur la figure), par opposition aux nucléons spectateurs (en verts, clair et foncé) qui ne participent pas à la collision. Le paramètre d'impact ne peut être fixé expérimentalement – il faudrait ajuster des distances de l'ordre du fermi (10^{-15} mètre) – mais la mesure du nombre et de l'énergie des particules produites permet *a posteriori* d'estimer la violence d'une collision, par exemple traduite par le nombre de participants. C'est en fonction de ce dernier que la suppression du J/ψ est portée sur la figure 5.

Vision naïve d'une collision d'ions lourds. À gauche, les ions foncent l'un vers l'autre à une vitesse proche de celle de la lumière (ce qui a pour effet de les contracter dans la direction de propagation, conformément aux lois de la relativité restreinte). À droite, dans le plan transverse, la surface de recouvrement est en forme d'amande.

>>>

suggèrent également qu'ils sont créés par association de quarks indépendants (*recombinaison*), et non lors de la formation d'un jet (*fragmentation*). Cela ne saurait advenir qu'au terme de l'évolution du PQG, au moment de la transition de phase retour d'une matière partonique vers le monde hadronique.

Une matière déconfinante

Au terme de l'existence du plasma, il semblerait donc que les quarks se regroupent pour former des hadrons. Mais imaginons que certains hadrons traversent ce plasma. Que se passerait-il ? Seraient-ils cassés eux aussi ?

Un tel phénomène est en principe observable grâce au J/ψ , un méson lourd (comme environ trois protons), *a priori* créé avant le milieu, et formé d'un quark *charm* et de son antiquark. Cette signature, la *suppression du J/ψ* , revêt un intérêt historique certain puisqu'elle a été observée avant les expériences effectuées au RHIC, en l'occurrence auprès du SPS (Super Proton Synchrotron) du CERN (les croix noires de la figure 5). Au RHIC, elle est également observée, mais son interprétation est délicate. En effet, si les J/ψ produits dans le plan transversal à la collision (cercles rouges) semblent autant supprimés qu'au SPS, ceux produits vers l'avant (les carrés bleus), là où la densité d'énergie est *a priori* la plus faible (car elle se dilue plus vite), le sont davantage. Or, si les J/ψ « fondaient » dans le PQG, ce devrait être l'inverse.

Aujourd'hui, deux hypothèses existent pour expliquer ce phénomène : soit les J/ψ sont absorbés avant la formation du PQG de façon différente vers l'avant et dans le plan transverse, soit ils sont recréés par fusion de quarks, à la manière des mésons plus légers. Cette seconde possibilité pourrait donner un effet spectaculaire au LHC (où plus de quarks *charm* seront disponibles), d'une augmentation du nombre de J/ψ avec la violence de la collision.

En attendant, il semble que, dans l'un comme l'autre de ces scénarios, des J/ψ manquent à l'appel au RHIC et qu'ils fondent dans une matière qui ne peut être que déconfinante.

Une matière chaude

Enfin, une matière thermalisée telle que celle que suggère la force du flot elliptique mentionnée ci-dessus pourrait émettre sa propre radiation. Si les photons de grande

Vue axiale de la collision de deux faisceaux d'ions Au dans le détecteur STAR au RHIC (Brookhaven National Laboratory). Chaque trait représente une particule chargée produite lors de la collision. Avant la collision, les faisceaux foncent l'un vers l'autre dans la direction perpendiculaire à la figure, à une vitesse proche de celle de la lumière.

énergie (à droite de la figure 2) ne sont pas perturbés par le PQG, nous devinons un excès de photons de basse impulsion (à gauche). Cette augmentation, confirmée par des résultats récents, peut être attribuée à une radiation de la matière créée et elle permet d'en extraire une température. Les incertitudes sont grandes, et dépendent fortement de l'échelle de temps considérée pour l'obtention de l'équilibre thermique (typiquement de 0,15 à 0,6 fermi parcouru à la vitesse de la lumière), mais des températures initiales de deux à quatre fois la température critique prédite pour la transition de phase sont extraites des données.

La matière produite est ainsi indéniablement chaude.

Avant le grand saut

Nous venons de passer en revue un ensemble d'indices qui laisse globalement envisager qu'un état nouveau de la matière a été produit en laboratoire. Il est initialement saturé en gluons, dense et opaque aux hadrons, liquide et en forte interaction, composé de partons, déconfinant et chaud. À n'en pas douter, il s'agit d'un plasma de quarks et de gluons dont nous commençons à déterminer les propriétés thermodynamiques. Le LHC permettra de poursuivre cette étude, sur une matière *a priori* plus chaude et plus dense. De nouvelles observables

seront accessibles, comme la reconstruction complète des jets, étude difficile et balbutiante au RHIC. En plus d'ALICE, l'expérience dédiée à l'étude des collisions d'ions lourds, les deux expériences généralistes du LHC, ATLAS et CMS disposent de nouvelles capacités d'étude de certains aspects du plasma de quarks et de gluons. Toutes trois devraient apporter leurs lots de résultats sur ce nouvel état de la matière nucléaire... ■

Remerciements

L'auteur remercie Christelle Roy pour des discussions préliminaires à l'écriture de cet article, et pour sa relecture attentive.

Pour en savoir plus

- Le site internet de RHIC : <http://www.bnl.gov/rhic/>
- M. Riordan et W. Zajc, « Les premières microsecondes de l'Univers », *Pour la Science*, n°344 (juin 2006).
- P. Braun-Munzinger et J. Stachel, "The quest for the quark-gluon plasma", *Nature* **448** (2007) 302.
- R.C. Hwa et X.N. Wang, *Quark-Gluon Plasma 3*, World Scientific Publishing (2004).
- R. Granier de Cassagnac, "What's the matter at RHIC?", *International Journal of Modern Physics*, **A22** (2008) 6043.
- Sur « le LHC, grand collisionneur de hadrons », voir l'article de B. Mansoulié dans *Reflets de la Physique* **14** (mai 2009) 5-9.
- Sur « la recherche du boson de Higgs au Tevatron », voir l'article de G. Bernardi dans *Reflets de la Physique* **14** (mai 2009) 10-14.