

Collisions d'ions lourds avec ALICE au LHC : les trois premières années

Philippe Crochet (Philippe.Crochet@clermont.in2p3.fr)

Laboratoire de Physique Corpusculaire, Université Blaise Pascal/CNRS, 63171 Aubière Cedex

À des températures extrêmement élevées, la matière ordinaire subit une transition de phase vers un plasma formé de ses constituants élémentaires : les quarks et les gluons. Cet état de la matière aurait été celui de l'univers une infime fraction de seconde après le Big Bang.

Des gouttes de plasma de quarks et de gluons peuvent être produites en laboratoire, en projetant les uns contre les autres des noyaux atomiques accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière.

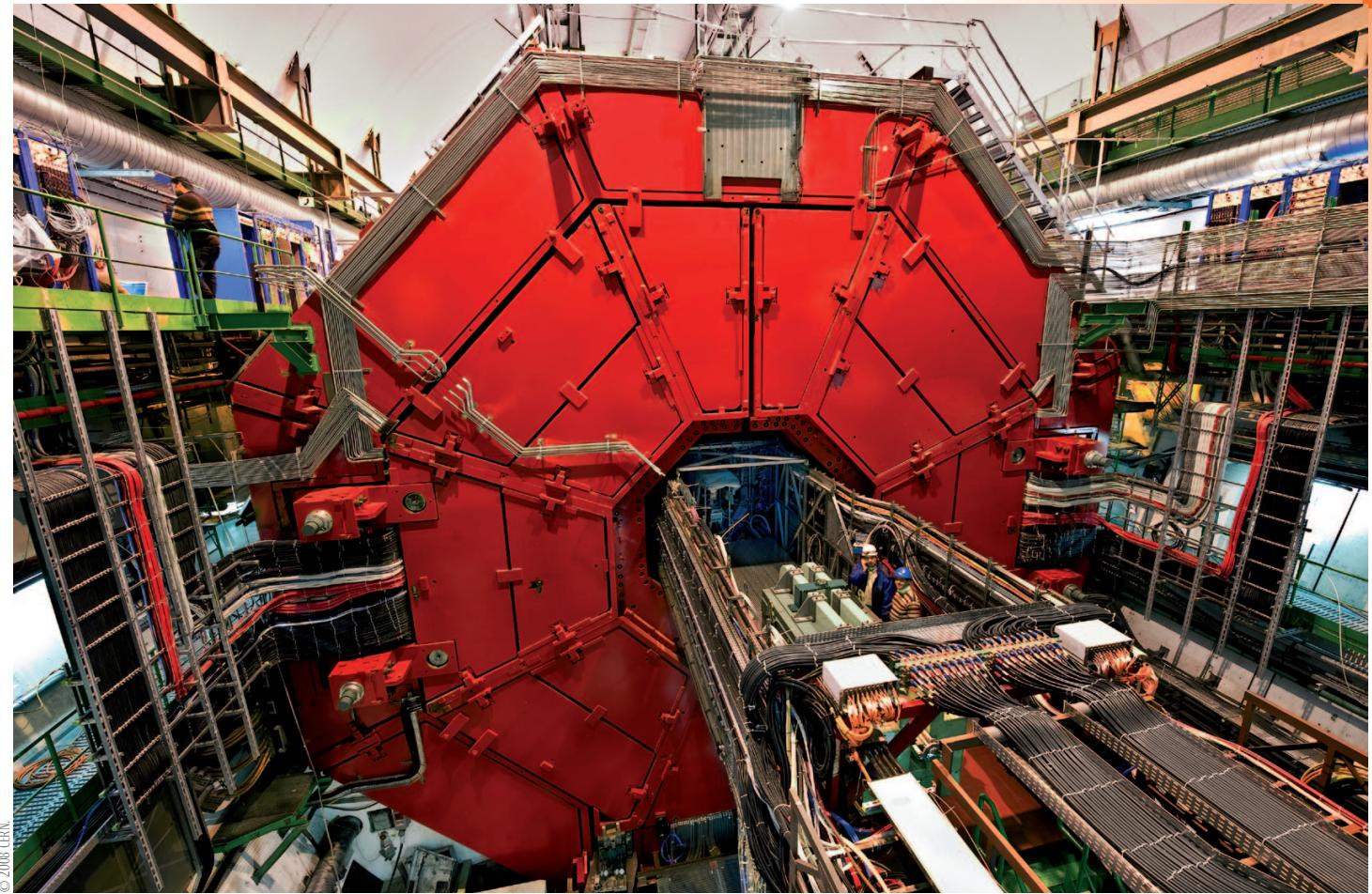
Les mesures effectuées depuis 2009 par l'expérience ALICE au CERN montrent que le plasma de quarks et de gluons a une densité d'énergie 100 fois supérieure à celle de la matière ordinaire, qu'il est 250 000 fois plus chaud que le cœur du soleil et qu'il se comporte comme un liquide parfait.

La théorie de l'interaction forte, la chromodynamique quantique (QCD), indique qu'au vu des températures extrêmes de l'univers quelques microsecondes après le Big Bang, la matière devait s'y trouver sous la forme d'un plasma de ses constituants élémentaires, les quarks et les gluons. Dans cet état de la matière, appelé "quark-gluon plasma" (QGP), les quarks et les gluons ne sont plus prisonniers des particules qui composent la matière ordinaire actuelle (les hadrons), mais peuvent au contraire se mouvoir librement dans un volume plus grand que celui des hadrons [1, 2]. Le QGP se manifesterait pour des températures supérieures à la température dite « critique » d'environ 160 MeV (2000 milliards de degrés environ⁽¹⁾). Il est possible de le créer et de l'étudier en laboratoire, en accélérant des ions lourds (tels que des ions d'or ou de plomb) à des vitesses proches de celle de la lumière avant de les faire entrer en collision. La goutte de matière obtenue après la collision a une taille inférieure à 5000 fm³ (= 5 10⁻³³ millimètre cube) et une durée de vie de l'ordre de 10 fm/c (\approx 10⁻²² seconde). Il va sans dire que cette taille et cette durée de vie imposent l'utilisation d'appareils de mesure extrêmement performants.

La physique des collisions d'ions lourds est apparue à la fin des années 80 avec la mise en service d'accélérateurs dédiés en Europe et aux États-Unis. Elle s'est poursuivie dans les années 1990-2000 auprès d'accélérateurs délivrant des faisceaux d'ions lourds à des énergies de plus en plus élevées, qui permettaient ainsi de créer

une goutte de matière toujours plus chaude. Ces machines se situaient principalement en Suisse : le SPS (Super Proton Synchrotron) au CERN (Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire), et aux États-Unis : le RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) au BNL (Brookhaven National Laboratory). L'année 2009 marque un nouveau tournant avec l'avènement au CERN du LHC (Large Hadron Collider), qui est l'accélérateur le plus puissant du monde [3]. Il permet actuellement d'accélérer des ions lourds et de les faire entrer en collision à des énergies dans le centre de masse de la collision quatorze fois supérieures à celles de son prédécesseur (le RHIC). Dans ces conditions, la goutte de matière créée dans les collisions atteint une température et une densité d'énergie bien supérieures à celles qui sont nécessaires pour la création du QGP⁽²⁾. L'augmentation significative de la valeur d'autres paramètres caractéristiques du système (volume et temps de vie notamment) facilite également son étude expérimentale au LHC par rapport au RHIC.

L'expérience ALICE (encadré 1 et fig. E1) est la seule des quatre grandes expériences du LHC dont la conception a été optimisée pour l'étude des collisions d'ions lourds. Après quelques généralités sur l'étude expérimentale du QGP, nous présentons une sélection de résultats obtenus par ALICE depuis le début des prises de données en 2009. Ces résultats proviennent de l'analyse de collisions proton-proton (p-p), plomb-plomb (Pb-Pb) et proton-plomb (p-Pb), à des énergies dans le centre de masse de 7, 2,76 et 5 TeV respectivement.



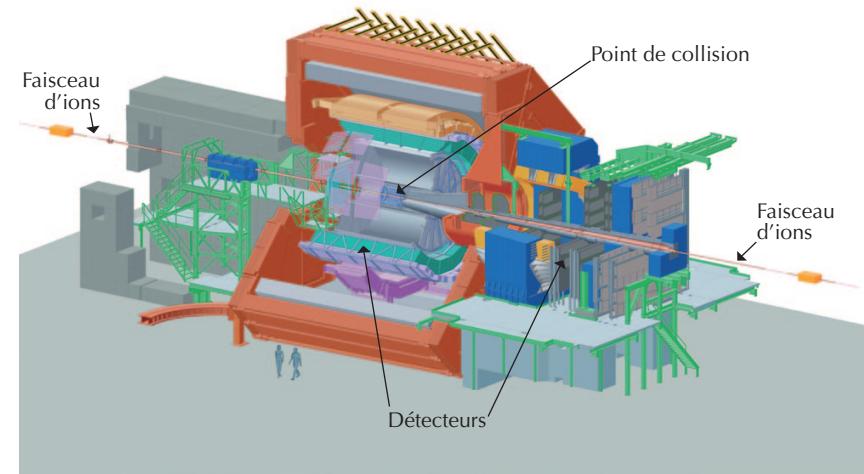
© 2008 CERN

Vue du détecteur d'ALICE.

► L'expérience ALICE

encadré 1

La collaboration ALICE (A Large Ion Collider Experiment) compte plus de 1200 physiciens venant de 132 laboratoires répartis dans 36 pays. Le détecteur est spécialement conçu pour effectuer des mesures de précision de l'ensemble des signatures connues du QGP dans l'environnement de haute multiplicité des collisions d'ions lourds au LHC. ALICE a la tâche particulièrement délicate de regrouper dans une unique expérience l'ensemble des mesures effectuées par plusieurs expériences auprès des accélérateurs précédents. En plus du programme de physique avec des ions lourds, ALICE enregistre également des collisions proton-proton et proton-ion qui fournissent les références pour les collisions d'ions lourds. L'expérience est constituée de 18 sous-détecteurs. Elle utilise la quasi-totalité des techniques connues pour l'identification des particules. L'appareillage mesure 16 mètres de hauteur et 26 mètres de longueur, pour un poids total de 10 000 tonnes.



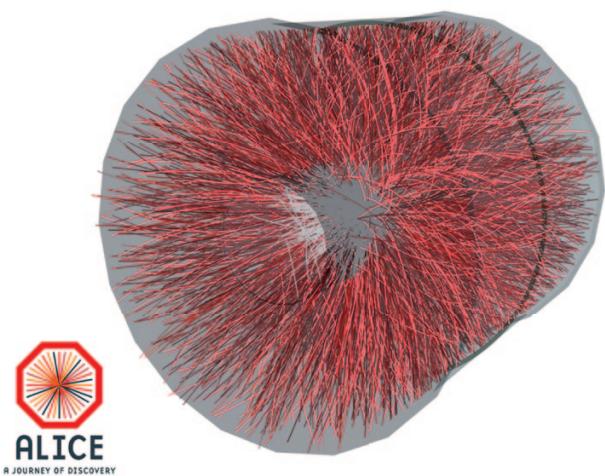
E1. Vue schématique de l'expérience ALICE.

Des collisions d'ions lourds au plasma de quarks et de gluons

Le déroulement spatio-temporel d'une collision entre ions lourds à haute énergie peut se décomposer en trois phases, comme suit :

- Les deux ions se traversent et produisent, dans le centre de masse de la collision, un volume de matière énergétique rempli d'une multitude de quarks et de gluons en forte interaction. En moins de 1 fm/c ($\sim 10^{-23}$ s), ces interactions conduisent à la formation du QGP : un système en équilibre thermodynamique, avec une température supérieure à la température critique et dont les degrés de liberté sont les quarks et les gluons.
- Le QGP se refroidit et se dilate. Les quarks et les gluons se regroupent pour former des hadrons, qui interagissent entre eux par collisions inélastiques et élastiques.
- Le système continue de se refroidir et de se dilater pour finalement se désagréger. Après la fin des interactions entre les hadrons, ceux-ci suivent sans contrainte leurs trajectoires et atteignent les détecteurs. L'étude expérimentale du QGP consiste à mesurer ses propriétés thermodynamiques, qui peuvent être calculées *ab initio* par la

>>>

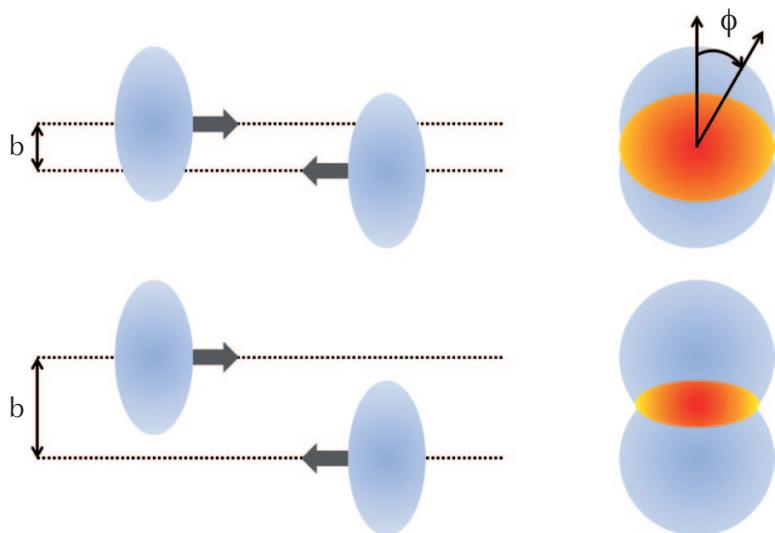


1. Collision Pb-Pb dans la partie centrale d'ALICE. Énergie dans le centre de masse : 2,76 TeV. Chaque trace représente une particule chargée produite lors de la collision.

► Centralité des collisions d'ions lourds et écoulement elliptique

encadré 2

Les collisions d'ions lourds sont répertoriées selon leur degré de centralité au moyen du paramètre d'impact (b) qui est la distance entre les trajectoires (rectilignes) des centres des ions incidents, comme illustré sur la figure E2 (gauche). Une collision centrale (haut) a un petit paramètre d'impact. Une collision périphérique (bas) a un grand paramètre d'impact. Dans le plan longitudinal (à gauche de la figure), les ions en approche, à des vitesses avoisinant celle de la lumière, sont aplatis dans la direction de propagation par la contraction relativiste de Lorentz. Dans le plan transverse (à droite de la figure), la zone de recouvrement entre les deux ions a une forme d'amande dont le rapport d'aspect change avec la centralité de la collision. L'angle ϕ d'émission des particules dans le plan transverse (angle azimutal) est utilisé pour quantifier l'écoulement elliptique (fig. 3). Il est représenté sur la partie en haut à droite de la figure. Les collisions produisent d'autant plus de particules dans la zone de recouvrement entre les deux ions qu'elles sont centrales, c'est-à-dire que le paramètre d'impact est petit. Ainsi, le nombre moyen de particules ($\langle N_{\text{part}} \rangle$) produites par collision est utilisé pour estimer la centralité de la collision (fig. 5).



E2. Illustration schématique d'une collision centrale (haut) et périphérique (bas) dans le plan longitudinal (gauche) et dans le plan transverse (droite) à l'axe des faisceaux.

»»

QCD. Ces propriétés sont reconstituées *a posteriori*, à la manière d'un puzzle, à partir des particules produites et détectées au cours de la collision. La tâche est particulièrement ardue pour plusieurs raisons ; la principale étant que jusqu'à 30 000 particules sont produites par collision dans les collisions les plus violentes (fig. 1).

Les particules véhiculant l'information sur le QGP sont souvent rares et noyées dans l'ensemble des particules produites qui, vu la durée extrêmement courte de la collision, vont atteindre simultanément les détecteurs. Les mesures sont donc non seulement indirectes, mais aussi moyennées sur le temps. De plus, pour accroître la significativité des mesures, l'accélérateur provoque 4000 collisions Pb-Pb par seconde. La rapidité, l'efficacité et la précision des détecteurs à reconnaître, sélectionner et enregistrer les collisions intéressantes sont donc des éléments clefs pour réaliser des études pertinentes.

Caractéristiques globales des collisions

Nous caractérisons ici le système formé dans les collisions d'ions lourds par sa densité d'énergie, sa taille et son temps de vie, et donnons certaines de ses propriétés. Ces informations sont obtenues, pour la plupart, à partir des particules produites avec une impulsions relativement faible dans la direction transverse aux faisceaux. Ces particules, qualifiées de particules molles, constituent 95% environ de l'ensemble des particules produites dans la collision.

Le formalisme de Bjorken permet d'estimer la densité d'énergie ϵ accumulée dans le système. Elle est définie comme le rapport de la somme des composantes transverses de l'énergie des particules produites dans la collision (E_T) sur le volume de la collision. Pour une collision centrale, $\epsilon = E_T / \tau_0 \pi R^2$. R est le rayon du noyau. τ_0 est le temps nécessaire pour que le système atteigne l'équilibre thermodynamique : c'est un paramètre des modèles hydrodynamiques, qui est généralement choisi égal à $1 \text{ fm}/c$ ($\sim 10^{-23} \text{ s}$).

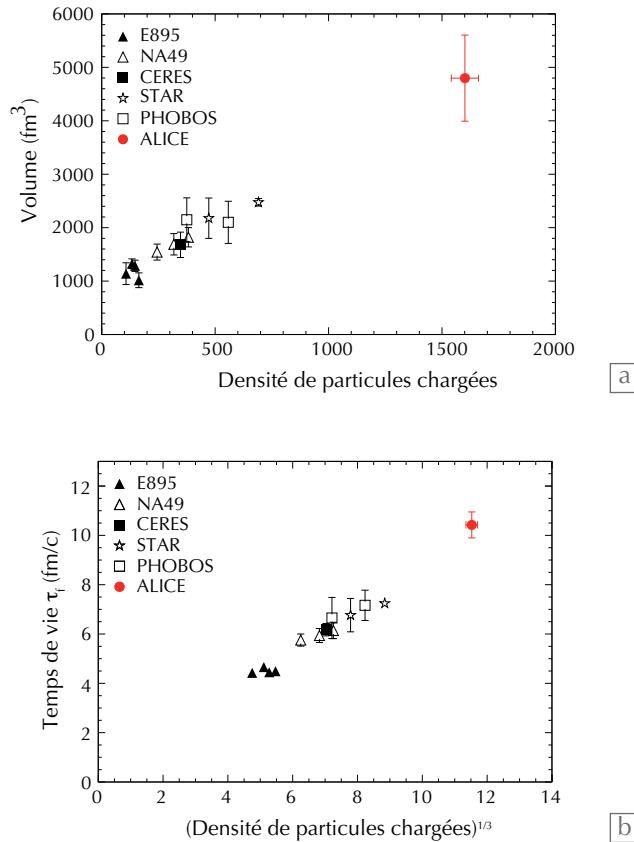
Dans les collisions Pb-Pb centrales, les mesures indiquent que la densité d'énergie est de $15 \text{ GeV}/\text{fm}^3$. Elle est trois fois supérieure à la densité atteinte au RHIC, soit près de 100 fois supérieure à la densité normale de la matière nucléaire⁽³⁾ et 20 fois supérieure à la densité critique correspondant à la transition vers le QGP.

La taille et le temps de vie du système au moment où les hadrons cessent d'interagir entre eux peuvent être estimés au moyen de mesures d'interférométrie, qui renseignent sur les valeurs caractéristiques de son volume de cohérence. L'ensemble du système peut être plus étendu s'il n'est pas uniforme en densité. La figure 2 présente les résultats obtenus pour des collisions Pb-Pb centrales au LHC, comparés à ceux provenant d'autres accélérateurs à des énergies de faisceau moindres. On observe que le volume du système augmente linéairement avec le nombre de particules chargées produites. Du RHIC au LHC, ce volume double et atteint 5000 fm^3 . Le temps de vie du système est proportionnel à la racine cubique du nombre de particules chargées produites. Il est de $10 \text{ fm}/c$ au LHC et 30% supérieur à celui du système créé au RHIC.

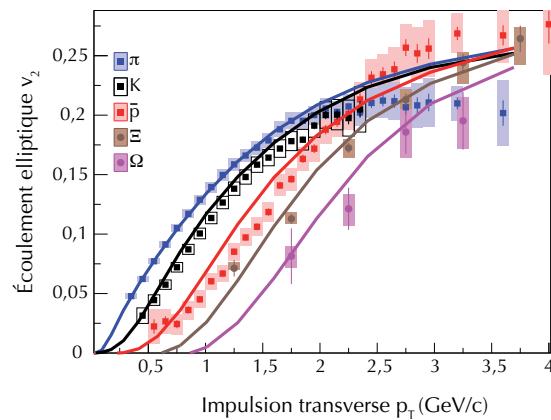
Comme illustré dans la figure de l'encadré 2, la zone de recouvrement des deux ions incidents a une forme d'amande dans le plan transverse aux faisceaux. Elle est le siège de gradients de pression qui vont transférer l'asymétrie spatiale initiale en une asymétrie dans l'espace des impulsions des particules produites. On décrit généralement cette asymétrie en décomposant les distributions azimutales $dN/d\phi$ des particules produites en série de Fourier. ϕ est l'angle d'émission des particules dans le plan transverse par rapport à l'orientation du paramètre d'impact (b). Le second coefficient de Fourier, v_2 , est appelé écoulement elliptique. Il correspond au rapport du nombre de particules émises dans la direction du petit axe de l'amande sur le nombre de particules émises dans la direction du grand axe. L'écoulement elliptique renseigne sur la nature du QGP. En effet, v_2 mesure la capacité du système à transférer une asymétrie géométrique initiale en une asymétrie d'impulsions finale. Un tel transfert requiert une viscosité faible, c'est-à-dire une forte interaction entre constituants pour propager une perturbation.

La dépendance en impulsion transverse et en masse de l'écoulement elliptique (fig. 3) est bien reproduite par des calculs hydrodynamiques modélisant un fluide à très faible viscosité. Cette observation conforte les résultats obtenus au RHIC et démontre que le QGP créé au LHC se comporte, non pas comme un gaz parfait, tel qu'on l'imaginait il y a quelques années, mais comme un fluide dont les constituants sont en forte interaction, c'est-à-dire qu'il a les propriétés d'un

>>>



2. Volume (a) et temps de vie (b) du système produit dans des collisions d'ions lourds pour plusieurs énergies de faisceau, en fonction de la densité de particules chargées produites (c'est-à-dire du nombre de particules chargées produites par collision et par unité de rapidité, l'équivalent de la vitesse en régime relativiste). Les mesures effectuées par ALICE sont représentées en rouge. Les carrés ouverts et les étoiles représentent les mesures effectuées au RHIC, les carrés pleins et triangles ouverts celles réalisées au SPS. Les triangles pleins représentent les mesures effectuées à plus basse énergie. Extrait de K. Aamodt *et al.* (ALICE collaboration), *Phys. Lett. B* **696** (2011) 328.



3. Écoulement elliptique en fonction de l'impulsion transverse pour différents types de particules de différentes masses, produites dans des collisions Pb-Pb semi-centrales. Les mesures expérimentales (symboles) sont comparées aux prédictions de calculs hydrodynamiques faisant l'hypothèse d'une faible viscosité (courbes). Extrait de Y. Zhou for the ALICE Collaboration, arXiv:1309.3237, à paraître dans *Journal of Physics: Conference Series* (2014).

>>>

liquide. Étant donné sa très faible viscosité, ce liquide s'apparente à un liquide parfait, comme l'hélium qui devient superfluide à des températures inférieures à 2,17 K. Des interprétations théoriques indiquent que le QGP aurait une viscosité proche de la viscosité limite calculée pour un fluide quantique, ce qui en ferait le liquide le plus parfait jamais observé.

Sondre le QGP

Une des quantités les plus couramment utilisées pour mettre en évidence les propriétés de transport du QGP produit dans les collisions d'ions lourds est le facteur de modification nucléaire $R_{AA} = N_{AA}/(N_{coll.} \times N_{pp})$, où N_{AA} (N_{pp}) est le nombre de particules mesurées en collisions d'ions lourds (proton-proton) et $N_{coll.}$ est le nombre de collisions nucléon-nucléon⁽⁴⁾ correspondant à la collision d'ions lourds pour une centralité donnée. Ainsi, le dénominateur dans le rapport ci-dessus représente la mesure de référence. Tout écart de R_{AA} par rapport à l'unité indique que la collision d'ions lourds ne se comporte pas comme une superposition de collisions nucléon-nucléon et traduit la modification du comportement des nucléons dans le noyau et l'influence du milieu sur les particules mesurées.

La figure 4 présente le facteur de modification nucléaire en fonction de l'impulsion transverse des particules chargées pour des collisions Pb-Pb périphériques et centrales, et des collisions p-Pb. On peut constater qu'au-delà d'une certaine impulsion transverse, $R_{p-Pb} \sim 1$, ce qui indique qu'une collision proton-noyau (où les conditions thermodynamiques ne sont, *a priori*, pas réunies pour la formation d'un QGP) se comporte comme une superposition de collisions nucléon-nucléon. En revanche, dans les collisions Pb-Pb périphériques, R_{Pb-Pb} est inférieur à l'unité. Le taux de production de particules est donc réduit dans les collisions Pb-Pb par rapport aux collisions proton-proton. Ceci s'explique par la perte d'énergie que subissent les quarks et les gluons traversant le milieu produit dans la collision avant de se fragmenter en hadrons, à l'image de la perte d'énergie que subit une balle tirée dans l'eau. Dans les collisions Pb-Pb centrales, où la densité du milieu est présumée plus grande que dans les collisions périphériques, l'absorption des particules l'est aussi comme le montre la figure.

Cet effet peut être approfondi en étudiant le comportement des particules dites « lourdes », car constituées de quarks lourds. La relation masse - énergie ($E = mc^2$) implique que les quarks lourds ne peuvent être produits que dans les interactions les plus violentes entre les quarks et les gluons des ions au tout début de la collision. Les particules lourdes vont ensuite traverser le milieu produit simultanément dans la collision et subir son influence tout au long de la collision.

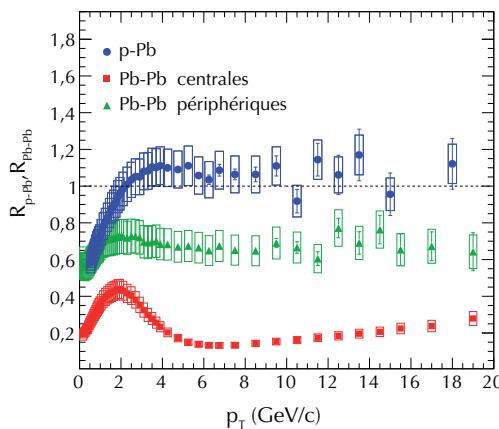
Parmi ces particules, les quarkonia, constitués d'une paire de quark-antiquark lourds, sont particulièrement sensibles aux effets du milieu. Leur taux de production est considéré depuis plusieurs années comme l'une des signatures les plus pertinentes du QGP. En effet, pour des températures supérieures à l'énergie de liaison de la paire, l'état quark-antiquark est dissous dans le QGP. Le quark et l'antiquark lourds vont alors se regrouper indépendamment l'un de l'autre avec des quarks légers, en grande abondance dans le QGP, pour être finalement détectés sous la forme de particules contenant un seul quark (ou un seul antiquark) lourd. Les états excités des quarkonia ayant des énergies de liaison inférieures à celle de l'état fondamental, le taux de production de l'ensemble des états pourrait jouer un rôle de thermomètre pour le QGP. Cependant, aux énergies du LHC, d'autres mécanismes de production des quarkonia sont présents dans le QGP. Puisqu'à ces énergies, une centaine de quarks-antiquarks lourds peut être produite dans les premiers instants des collisions les plus centrales, certains modèles prédisent que ces quarks et antiquarks pourraient se recombiner à des instants ultérieurs de la collision pour former d'autres quarkonia. Un tel mécanisme devrait donc conduire à une augmentation de la production de quarkonia dans les collisions les plus centrales.

Ceci est illustré sur la figure 5, qui montre le facteur de modification nucléaire des particules J/ψ (état lié d'une paire de quark-antiquark lourds de saveur charme) en fonction de la centralité des collisions. Le facteur de modification nucléaire étant inférieur à l'unité, on peut conclure que, comme dans le cas des particules chargées (fig. 4), les J/ψ sont dissous, ou absorbés, par le milieu. Les prédictions théoriques faisant l'hypothèse que tous les J/ψ sont produits dans les premiers instants de la collision, puis dissous en partie dans

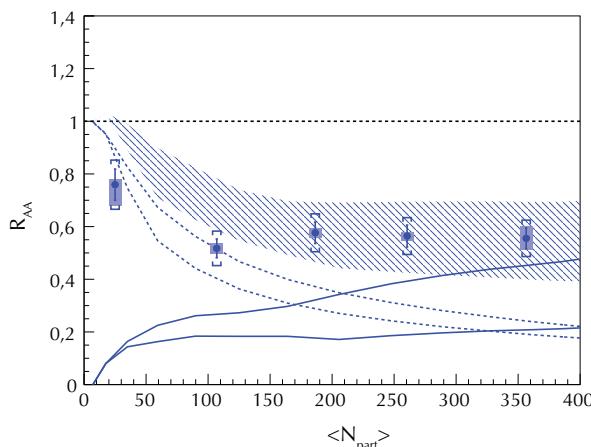
le QGP (courbes en pointillés), surestiment la suppression observée notamment dans les collisions les plus centrales. L'ajout de la composante de J/ψ produits par recombinaison (courbes en traits pleins) permet au modèle de décrire correctement les mesures. Dans le cadre de ce modèle, 50% des J/ψ observés dans les collisions Pb-Pb centrales proviennent de la recombinaison de quarks-antiquarks dans le QGP.

Comme tout système en équilibre thermique, le QGP doit émettre un rayonnement électromagnétique sous la forme de photons produits par interaction entre ses constituants, ici par diffusion Compton quark-gluon et par annihilation quark-antiquark. Les photons sont une sonde de choix du QGP car, contrairement aux hadrons, ils interagissent très faiblement avec le système et véhiculent donc une information propre et directement représentative de sa température. La mesure de ces photons dits « thermiques » est cependant difficile car d'autres photons sont produits tout au long de la collision, notamment dans les premiers instants et dans la phase finale, par désintégration de certaines particules instables. La première composante résulte des interactions les plus violentes entre quarks et gluons et domine donc la production de photons à grande impulsion transverse. Elle peut être calculée de façon précise avec un formalisme théorique de premiers principes. La seconde composante (annihilation quark-antiquark) domine la production à petite impulsion transverse. Elle est soustraite du nombre total de photons détectés après estimation du taux de particules susceptibles de se désintégrer en photons. Les résultats sont présentés sur la figure 6. On peut constater que dans la région des grandes impulsions transverses, le formalisme théorique reproduit correctement les mesures. Dans la région des faibles impulsions transverses, le spectre a une forme exponentielle caractéristique d'un rayonnement thermique. La température effective associée est de 300 MeV environ⁽⁵⁾.

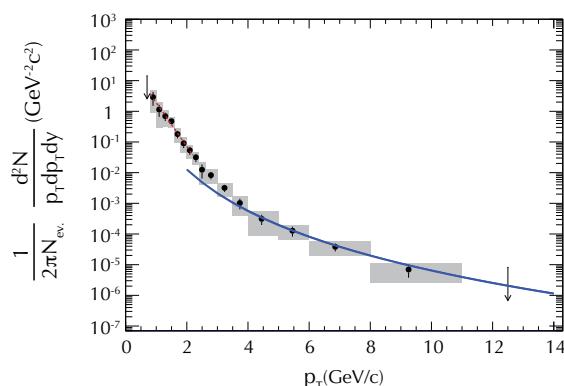
Cette température effective est deux fois supérieure à la température critique au-delà de laquelle on s'attend à la formation du QGP. Elle est également plus de 30% supérieure à la température du QGP produit au RHIC, et détrône donc ce dernier qui détenait jusqu'à maintenant le record de l'objet le plus chaud créé par l'homme sur Terre.



4. Facteur de modification nucléaire des particules chargées en fonction de leur impulsion transverse pour des collisions Pb-Pb périphériques (vert), des collisions Pb-Pb centrales (rouge) et des collisions p-Pb (bleu). Extrait de B. Abelev *et al.* (ALICE Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **110** (2013) 082302.



5. Facteur de modification nucléaire des J/ψ en fonction du nombre moyen de particules <N_{part}> produites dans la zone de recouvrement entre les deux ions de plomb. Comme indiqué dans l'encadré 2, les collisions périphériques et centrales correspondent respectivement aux petits et grands <N_{part}>. Les mesures expérimentales (points) sont comparées aux prédictions d'un modèle (zone hachurée). Les contributions au R_{AA} des J/ψ produits dans les interactions primordiales et ceux produits par recombinaison de quark-antiquark lourds dans le QGP sont représentées respectivement par les bandes encadrées par les courbes en pointillés et en traits pleins. Extrait de I. Das for the ALICE Collaboration, à paraître dans *Eur. Phys. Jour. Web of Conf.* **71** (2014).



6. Taux de production de photons en fonction de leur impulsion transverse dans des collisions Pb-Pb centrales, après soustraction de la composante issue de la désintégration des particules. À grande impulsion transverse ($p_T > 2$ GeV/c), les données sont comparées avec le résultat d'un calcul théorique de premiers principes (courbe bleue). À petite impulsion transverse ($p_T < 2$ GeV/c), les données sont ajustées avec une fonction exponentielle (courbe rouge). Extrait de M. Wilde for the ALICE Collaboration, *Nucl. Phys. A* **904-905** (2013) 573c.

Conclusions et perspectives

Les premiers résultats obtenus par ALICE au LHC confirment qualitativement les observations faites au RHIC sur la création en laboratoire d'un nouvel état de la matière qui constituait l'univers quelques microsecondes après le Big Bang. Cet état présente les caractéristiques d'un plasma de quarks et de gluons et se comporte comme un liquide parfait. Quantitativement, le QGP produit au LHC est plus dense, plus chaud, plus étendu et a une durée de vie plus longue que celui produit au RHIC, mais il conserve les propriétés du liquide quasi parfait observées au RHIC. L'étude de ces propriétés ne fait que commencer. En 2018, l'énergie et l'intensité des faisceaux d'ions lourds du LHC vont être augmentées. Parallèlement, les performances d'ALICE pour l'identification des particules vont être améliorées, avec la modernisation de l'appareillage existant et l'apport de nouveaux détecteurs afin de réaliser des mesures de précision des propriétés fondamentales du QGP. ■

L'auteur remercie Yves Schutz pour sa relecture attentive et ses commentaires.

(1) En suivant $T = 1/k_B E$, où E est l'énergie, T la température et $k_B = 8,6 \cdot 10^{-5}$ eV.K⁻¹ la constante de Boltzmann.

(2) Une collision frontale Pb-Pb au LHC, dépasse une énergie de 574 TeV dans un volume de 10^{-14} mètres de diamètre, c'est-à-dire une énergie macroscopique (574 TeV = 0,09 mJ) dans un volume femtoscopique.

(3) La densité normale de la matière nucléaire dans le cœur des noyaux lourds au repos est de 0,17 GeV/fm³.

(4) Les noyaux sont constitués de protons et neutrons, appelés nucléons.

(5) Cette valeur correspond à la température intégrée sur la durée d'émission du rayonnement. Elle est donc logiquement inférieure à la température maximale du système, qui pourrait être deux fois supérieure.

En savoir plus

1• J.Y. Grossiord, « Le plasma de quarks et de gluons en laboratoire », *Images de la physique* (2002) 98-103.

2• R. Granier de Cassagnac, « Le plasma de quarks et de gluons – À l'aube des collisions du LHC », *Reflets de la physique* **19** (2010) 4-8.

3• B. Mousoulié, « Le LHC, grand collisionneur de hadrons », *Reflets de la physique* **14** (2009) 5-9.

K. Safarik, « ALICE on duty », *Nuclear Physics News International*, **22**, 2 (2012) 5-12.

B. Müller, J. Schukraft et B. Wyslouch, « First Results from Pb+Pb Collisions at the LHC », *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, **62** (2012) 361-386.

P. Braun-Munzinger et J. Stachel, « The Quest for the Quark-Gluon Plasma », *Nature*, **448** (2007) 302-309.

M. Riordan, W. Zajc, « Les premières microsecondes de l'univers », *Pour la Science*, **344** (2006) 30-37.