

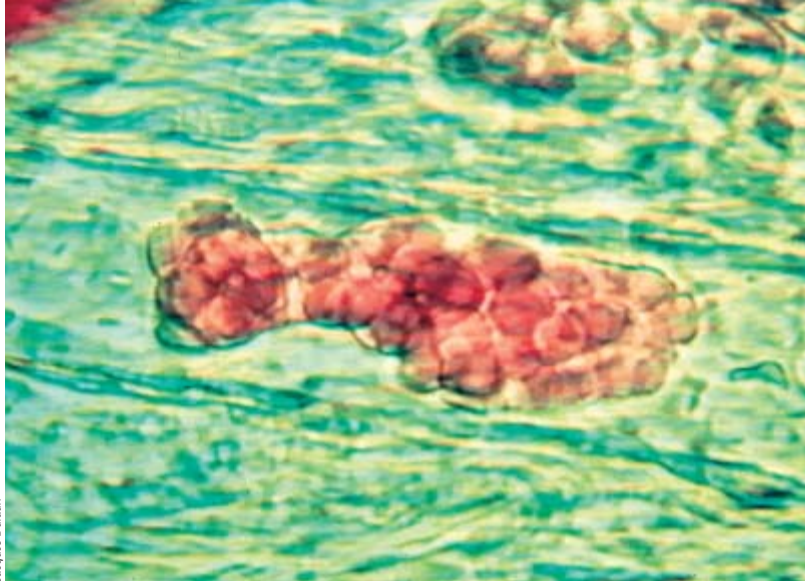
Les pathologies de la circulation

Quand surviennent des anomalies de l'agrégation ou de la déformabilité des globules, diverses pathologies apparaissent. Dans certains cas, notamment dans l'anémie falciforme, les globules sont moins déformables : une mutation sur le gène de l'hémoglobine entraîne la formation de cristaux d'hémoglobine dans les érythrocytes, et les globules prennent une forme de croissants rigides. La circulation sanguine peut être temporairement interrompue dans le réseau des capillaires de certains organes. En raison de l'abondance des capillaires, la situation n'est pas trop grave tant que le nombre de vaisseaux obstrués ne nuit pas à la bonne irrigation de l'organe affecté. Toutefois, la résistance hydraulique du réseau capillaire augmente et impose au cœur une surcharge de travail.

Dans d'autres situations pathologiques, une forte agrégation des globules rouges perturbe l'écoulement du sang. Excès de fibrinogène, hypertension, diabète, présence du virus VIH, mutations des gènes codant certaines protéines membranaires, concentration trop élevée en calcium dans les globules ou sang trop acide, sont autant de facteurs influant sur les interactions des érythrocytes et donnant lieu à une agrégation excessive. Face à ces perturbations qui peuvent menacer l'individu de troubles de la circulation et d'infections, des mécanismes de régulation se mettent en place. Aujourd'hui, l'agrégation est considérée comme un indicateur de l'état de santé de l'organisme, tout comme la température. Diverses « agressions » contre l'organisme peuvent nuire à la capacité naturelle d'agrégation des globules rouges. Ainsi, le tabac et une alimentation déséquilibrée augmentent les risques d'un excès d'agrégation érythrocytaire, pouvant occasionner un arrêt temporaire ou définitif de la circulation (voir la figure 7). Quand le sang ralentit, des lipides se déposent sur la paroi (voire dans la paroi) des vaisseaux sanguins et en rétrécissent le diamètre. Par leur action désagrégante, certains médicaments, telle l'aspirine, facilitent la circulation sanguine. Les vins riches en tanin et les produits alimentaires contenant de la vitamine E améliorent aussi la microcirculation, prescription plus agréable que la saignée qui fut longtemps l'unique remède !

Pour détecter une agrégation anormale des globules rouges, un examen de routine réalisé en laboratoire consiste à suivre la sédimentation du sang. La mesure de cette vitesse (définie comme la distance parcourue en une heure par les agrégats dans le plasma auquel on a ajouté un anticoagulant) est prise en compte dans le diagnostic des anémies et de nombreuses maladies infectieuses ou inflammatoires. Elle est considérée comme pathologique au-delà de 40 millimètres par heure. En cours de grossesse, la vitesse de sédimentation du sang peut atteindre 40 à 50 millimètres par heure, en raison d'une augmentation de la concentration en fibrinogène, qui serait nécessaire pour répondre aux nouvelles conditions d'écoulement dans les territoires très irrigués de la matrice utérine et du placenta.

Une deuxième méthode de mesure consiste à analyser la réflexion de la lumière par une suspension de globules rouges en écoulement. L'agrégation des globules rouges provoque une baisse de la « luminosité » du sang. Les méthodes optiques permettent ainsi de mesurer un seuil de désagrégation ou un temps de réagrégation des globules rouges, données plus fiables et plus précises que la mesure de la vitesse de sédimentation du sang. Dans un



Jacques Dufaix

7. UN GROS AGRÉGAT GLOBULAIRE peut se former dans une situation pathologique, tels le diabète ou le tabagisme. Un tel agrégat résiste aux écoulements et risque d'obstruer un vaisseau, entraînant une moindre oxygénation, voire la nécrose de certains tissus.

avenir proche, les techniques ultrasonores permettront sans doute d'établir un diagnostic du degré d'agrégation des globules rouges dans les vaisseaux d'un malade, car les agrégats réfléchissent davantage les ultrasons que les globules dissociés.

Aujourd'hui, personne n'a réussi à observer *in vivo*, les piles d'érythrocytes souvent synonymes de meilleur écoulement dans les artérioles ou dans les veinules. Le globe oculaire est le seul endroit de l'organisme où l'on peut observer le réseau microcirculatoire. Pour visualiser les piles d'érythrocytes, on espère pouvoir approcher un microscope tout près de l'œil, et observer des érythrocytes dans un des petits capillaires affleurant à la surface du globe oculaire. Les microscopes actuels doivent s'approcher trop près de l'œil pour rendre l'observation possible. La mise au point de microscopes à fort grossissement et à longue distance de travail devrait permettre de visualiser les agrégats de globules rouges dans des capillaires humains, rendant ainsi possible une visualisation directe de l'écoulement du sang dans les vaisseaux. Cette méthode deviendra-t-elle un examen de routine pour les patients présentant des risques cardio-vasculaires ?

Jacques DUFAUX et Gérard GUIFFANT sont professeurs à l'Université Paris 7 Denis Diderot, unité mixte de recherche CNRS 7057. Patrick SNABRE est directeur de recherches au CNRS, à l'Institut de science et génie des matériaux et procédés, UMR 8521, à Odeillo.

Patrick SNABRE, Michel BITOL et Pierre MILLS, *Cell disaggregation behavior in shear flow*, in *Biophysical Journal*, vol. 5, pp. 795-807, mai 1987.

L. HAIDER, P. SNABRE, et M. BOYNARD, *Rheo-acoustical study of the shear disruption of reversible aggregates. Ultrasound scattering from concentrated suspensions of red cell aggregates*, in *Journal of Acoustical Society of America*, vol. 107, n° 3, pp. 1715-1726, mars 2000.

Jacques DUFAUX, P. FLAUD, D. QUEMADA et Gérard GUIFFANT, *Comprendre la rhéologie : de la circulation du sang à la prise du béton*, EDP Science, GFR, 2002.

Marcos INTAGLIETTA, *Vasomotion et modulation du flux dans la microcirculation*, Karger, 1984.

La traque du plasma

YVES SCHUTZ • HUGUES DELAGRANGE

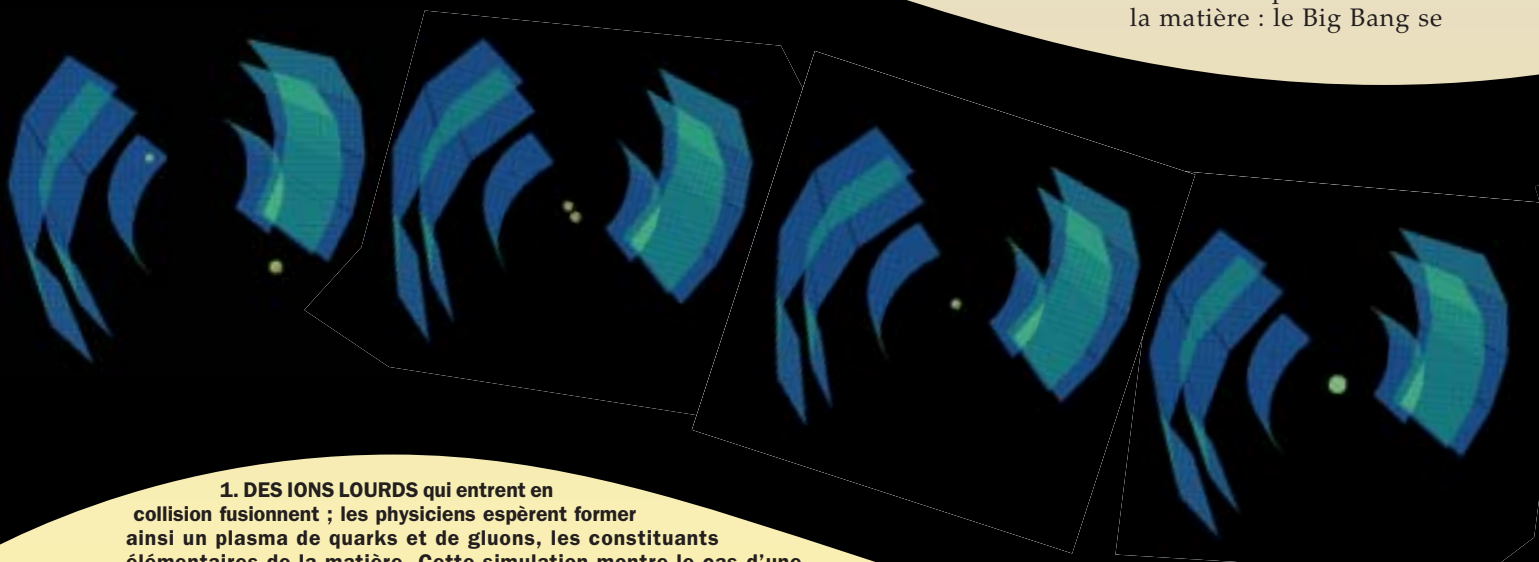
Les constituants des noyaux se désagrègent-ils à très haute température? Après en avoir obtenu des indices à l'accélérateur de Genève, les physiciens ont commencé de nouvelles expériences sur l'accélérateur de particules de Brookhaven pour prouver la réalité de ce phénomène, dit de déconfinement.

Au mois de juillet 1999, la presse annonçait qu'une machine allait reproduire le Big Bang... au risque de détruire la Terre. Les physiciens du Laboratoire de Brookhaven, près de New York, jouaient-ils aux apprentis sorciers? Avec un accélérateur où des noyaux atomiques devaient se heurter avec des énergies considérables, allait-on recréer les conditions infernales qui régnaient à la naissance de l'Univers? Ne risquait-on pas de déclencher une «explosion» aussi gigantesque que celle qui fut à l'origine de l'Univers, il y a 15 milliards d'années? Tout comme Enrico Fermi dut s'employer à démontrer que l'explosion d'une bombe atomique ne risquait pas d'enflammer l'atmosphère, les physiciens réfutèrent les arguments catastrophistes. Ils avancèrent, notamment, que certaines particules cosmiques sont

beaucoup plus énergétiques que celles qui circulent au sein du collisionneur de Brookhaven. Or, elles n'ont jamais déclenché de catastrophes cosmiques. Les premières expériences confirmèrent bientôt que ces collisions de noyaux atomiques se déroulent sans perturber le cours de l'histoire universelle.

Un phénomène violent et éphémère

Les physiciens veulent prouver l'existence du «plasma de quarks et de gluons» ou encore de la «matière de quarks». C'est ainsi qu'ils désignent le plasma qu'ils pensent créer en libérant les quarks et les gluons, les constituants des nucléons (protons et neutrons). Pour ce faire, ils «chauffent» et «compriment» les constituants des noyaux à la faveur de collisions. Ils espèrent ainsi changer l'état de la matière ordinaire, tout comme l'eau se transforme en vapeur quand on la chauffe à 100 °C. Ce nouvel état serait la forme primordiale de la matière : le Big Bang se



1. DES IONS LOURDS qui entrent en collision fusionnent ; les physiciens espèrent former ainsi un plasma de quarks et de gluons, les constituants élémentaires de la matière. Cette simulation montre le cas d'une collision entre deux noyaux d'or dans le détecteur PHENIX.

de quarks et de gluons

développa à partir d'un état d'une densité d'énergie extrême pour aboutir à l'Univers actuel froid et dilué. La matière primordiale exista quelques microsecondes après le Big Bang. Comment les quarks et les gluons se sont-ils ensuite «condensés» pour former la matière telle que nous la connaissons? Pour le savoir, une méthode consiste à parcourir le «chemin inverse» de celui qui fut celui de l'Univers : on tente de créer un plasma de quarks et de gluons à partir de la matière ordinaire.

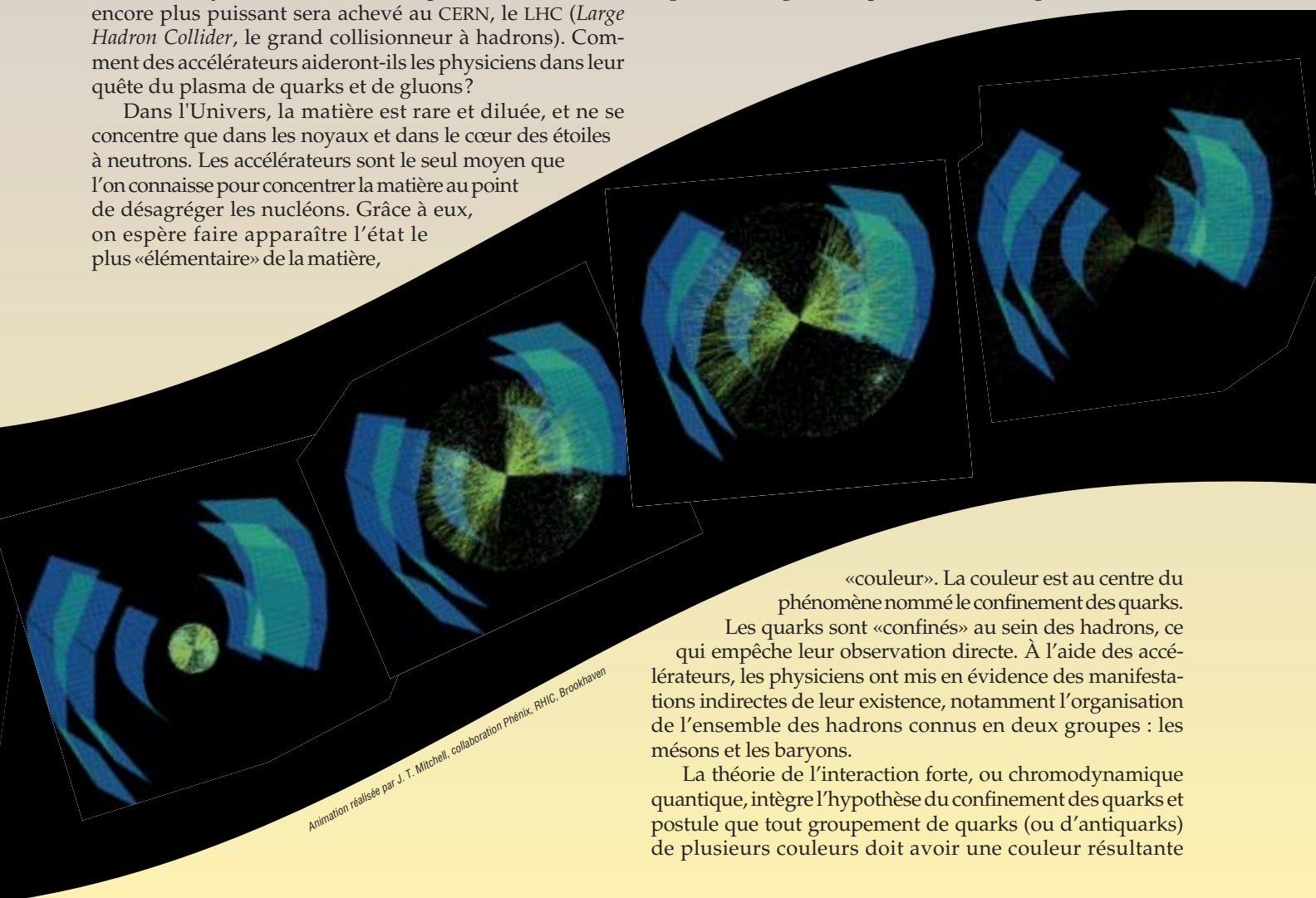
Expériences pionnières

Les premières expériences de ce type ont eu lieu à Genève, au CERN (*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*). Comme elles n'ont pas fourni de résultats concluants, les physiciens poursuivent leurs expériences au RHIC, *Relativistic Heavy Ion Collider*, c'est-à-dire le collisionneur relativiste à ions lourds, au Laboratoire de Brookhaven. Cet accélérateur d'ions, le plus puissant du monde, est entré en activité il y a deux ans. Dans cinq ans, un accélérateur encore plus puissant sera achevé au CERN, le LHC (*Large Hadron Collider*, le grand collisionneur à hadrons). Comment des accélérateurs aideront-ils les physiciens dans leur quête du plasma de quarks et de gluons?

Dans l'Univers, la matière est rare et diluée, et ne se concentre que dans les noyaux et dans le cœur des étoiles à neutrons. Les accélérateurs sont le seul moyen que l'on connaisse pour concentrer la matière au point de désagréger les nucléons. Grâce à eux, on espère faire apparaître l'état le plus «élémentaire» de la matière,

celui qu'elle adopte quand ses constituants ultimes sont libérés. Nous savons aujourd'hui que les nucléons ne sont pas des particules élémentaires, mais qu'ils sont constitués de trois quarks. Ces briques de la matière interagissent suivant un mode particulier, nommé l'interaction forte. Les quarks s'associent soit par deux (un quark et un antiquark) pour former les mésons (pions, kaons, ρ , etc.), soit par trois ou plus, pour former les baryons (protons, neutrons, etc.). L'ensemble des mésons et des baryons constitue le groupe des hadrons, l'essentiel de la masse visible de l'Univers.

Avec l'interaction forte, l'interaction faible, l'interaction électromagnétique et la gravitation constituent les quatre interactions fondamentales de la matière (ou types de forces). Deux particules en interaction échangent une particule messagère. Ainsi, une interaction forte se traduit par l'échange d'un quantum nommé gluon, tandis qu'une interaction électromagnétique se traduit par l'échange d'un photon. Les quarks, les antiquarks et les gluons sont dits «colorés», car ils sont caractérisés par une grandeur physique analogue à la charge électrique, nommée charge de couleur ou

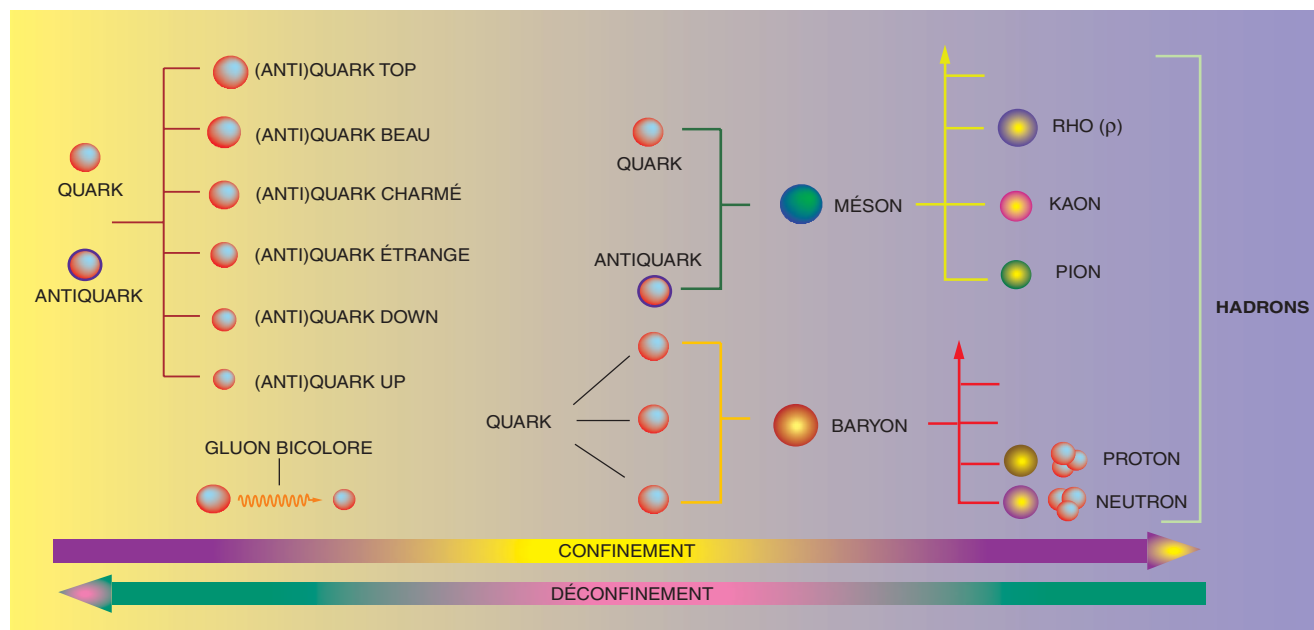


Animation réalisée par J. T. Mitchell, collaboration PHENIX, RHIC, Brookhaven

«couleur». La couleur est au centre du phénomène nommé le confinement des quarks.

Les quarks sont «confinés» au sein des hadrons, ce qui empêche leur observation directe. À l'aide des accélérateurs, les physiciens ont mis en évidence des manifestations indirectes de leur existence, notamment l'organisation de l'ensemble des hadrons connus en deux groupes : les mésons et les baryons.

La théorie de l'interaction forte, ou chromodynamique quantique, intègre l'hypothèse du confinement des quarks et postule que tout groupement de quarks (ou d'antiquarks) de plusieurs couleurs doit avoir une couleur résultante



2. POUR ÉTUDIER LES CONSTITUANTS DES HADRONS, on doit les dissocier, c'est-à-dire «déconfiner» la matière. Ces constituants, les quarks et les antiquarks, ont chacun, six «saveurs» : Up, Down, Étrange, Charmé, Beau et Top. Chacun de ces états a en outre trois «couleurs» possibles (non représentées), dont le mélange donne une couleur blanche. Les gluons, les médiateurs de l'interaction forte entre deux quarks, par

exemple, sont eux-mêmes porteurs d'une couleur et d'une anticouleur. Les hadrons sont des associations incolores d'un quark et d'un antiquark (un méson) ou de trois quarks (un baryon). Les noyaux sont des assemblages de neutrons (quarks Up, Up et Down) et de protons (quarks Up, Down et Down). La matière reste dans son état ordinaire tant que la température demeure inférieure à une valeur dite critique.

nulle (blanche), exactement comme les composantes de l'arc-en-ciel se combinent pour donner la couleur blanche de la lumière visible. Nous vivons dans un monde incolore au sens de l'interaction forte, même s'il est fait de couleurs variées ou de particules élémentaires dites colorées.

Ainsi, le plasma de quarks et de gluons est la matière qui existe après le «déconfinement», lorsqu'est atteinte une densité d'énergie (ou, ce qui est équivalent, une température) assez grande pour que les quarks et les gluons se meuvent librement. Au contraire, la matière ordinaire est comparable à des bulles de glu – les protons et les neutrons – à l'intérieur desquelles les quarks sont «englués», ou encore confinés par les gluons qu'ils échangent. La cohésion de la matière nucléaire résulte de «l'interaction nucléaire», la forme que prend l'interaction forte entre les protons et les neutrons. Toutefois, comme une membrane de bulle, même extrêmement mince, voile les phénomènes qui se produisent à l'intérieur, les structures hadroniques sont autant d'écrans qui dissimulent l'interaction forte. Pour avoir accès à l'interaction forte sous sa forme pure, il faut «entrer» dans la bulle. C'est la raison pour laquelle les physiciens veulent faire disparaître le confinement.

Les physiciens simulent le plasma de quarks et de gluons en décomposant l'espace-temps en «maillages» assez petites et assez simples pour que la résolution des équations qui décrivent cet état de la matière y devienne possible. D'après ces simulations, le déconfinement a lieu au-delà d'une certaine densité d'énergie, environ dix fois supérieure à celle de la matière nucléaire ordinaire (0,14 gigaélectronvolt par fermi cube, soit environ un quart de million de kilotonnes par centimètre cube) ou encore une température de quelque 20 000 milliards de kelvins.

Ainsi, quelques fractions de seconde après l'apparition du cosmos, la température atteignait des milliers de milliards de kelvins. L'Univers formait alors un milieu contenant tous

les quarks et les gluons. Les collisions susceptibles de faire éclater les bulles hadroniques se produisent à des vitesses proches de celle de la lumière, et créent des milliers de particules. Le phénomène est confiné dans un volume de l'ordre de un millier de fermis cubes (un fermi vaut 10^{-15} mètre, soit un millième de milliardième de millimètre), et il dure à peine 10^{-24} seconde.

Sur la piste du plasma

Selon Luciano Maiani, qui dirige le CERN, les données rassemblées dans le Centre de recherche genevois au cours de sept expériences menées sur les collisions d'ions lourds ont révélé un nouvel état de la matière, vraisemblablement, le plasma de quarks et de gluons. Pour rassembler les indices de l'existence de cet état, les physiciens ont multiplié, six ans durant, les expériences sur des faisceaux d'ions lourds de haute énergie (33×10^{12} électronvolts).

Les expériences se sont succédé à partir de 1994, chacune d'elles traquant, à l'aide d'un détecteur, un type particulier de «signatures» (la présence du plasma de quarks et de gluons) qui se sont produites au cours du choc entre noyaux. Les détecteurs sont des «machines à mesurer les probabilités», c'est-à-dire les fréquences de ces signatures. Les probabilités des signatures intéressantes sont en général très faibles. En outre, elles sont noyées dans un important bruit de fond, car les collisions qui les font apparaître produisent de nombreuses particules. Les détecteurs accumulent les données d'observation de telle ou telle particule, tir après tir, année après année. Dans une unique campagne de mesure, l'une de ces énormes machines enregistre les milliers de particules produites par plusieurs centaines de millions de collisions! Les informations doivent être traitées rapidement et les particules produites doivent être distinguées les unes des autres.

Au CERN, les physiciens ont obtenu une densité d'énergie de quelque 2,5 gigaélectronvolts par fermi cube, soit 20 fois plus élevée que la densité d'énergie dans le noyau d'un atome : cette valeur est bien supérieure à la densité critique, où se produit, selon la théorie, la transition entre un gaz de hadrons et le plasma de quarks et de gluons. Or, on a observé indirectement que le comportement de la matière nucléaire change lors des collisions frontales, lorsque les densités d'énergie les plus importantes sont atteintes. Le phénomène correspond-il à la création d'un plasma de quarks et de gluons ?

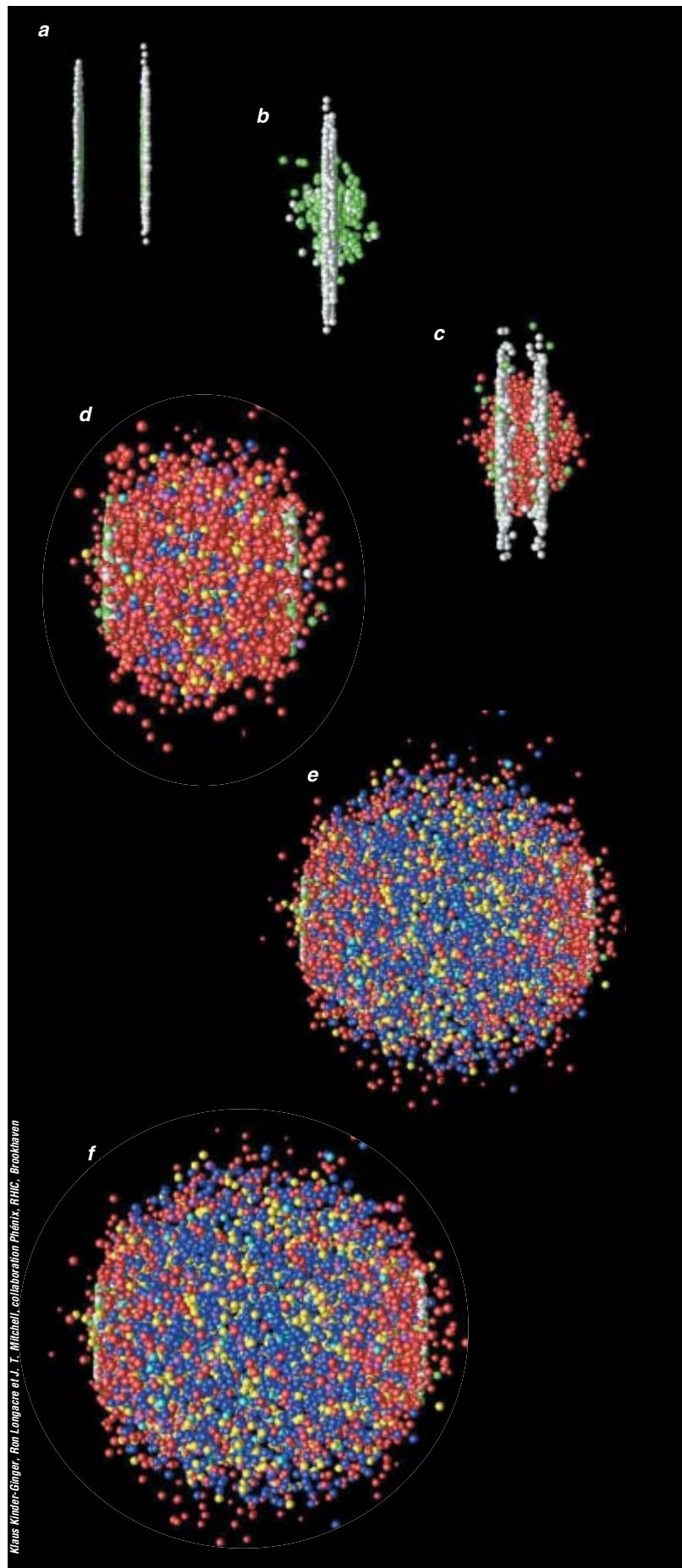
Pour le savoir, ils ont commencé par éliminer les autres causes possibles découlant de phénomènes connus. Pour suivre leur traque, les physiciens ont identifié quatre « signatures indirectes », prédites par la théorie. La première est la forte « saveur étrange » de la matière issue de la collision. On dénombre six types de quarks, nommés saveurs. Par ordre croissant de masses, les saveurs des quarks sont les quarks « Up », « Down », « Étrange », « Charmé », « Beau » et « Top ». Tandis que la matière ordinaire ne comprend que les saveurs Up et Down, d'autres types de matière existent qui sont enrichis en saveurs rares, tel le quark étrange. Ainsi, les moins lourds des mésons étranges, les kaons, sont des mésons de type anti-Up-Étrange, et le plus léger des baryons étranges est la particule Λ , un assemblage Up-Down-Étrange.

Créé à partir du vide et de l'énergie de la collision, un plasma de quarks et de gluons tout juste formé contient surtout des quarks légers (Up et Down). Au-delà de la température de transition vers le plasma, le principe de Pauli (deux fermions ne peuvent être dans le même état physique) implique la création de nouvelles saveurs de quarks, au premier rang desquelles la saveur étrange. Or, au CERN, les expérimentateurs ont bien détecté la forte production de hadrons étranges prédite au-dessus de la densité critique.

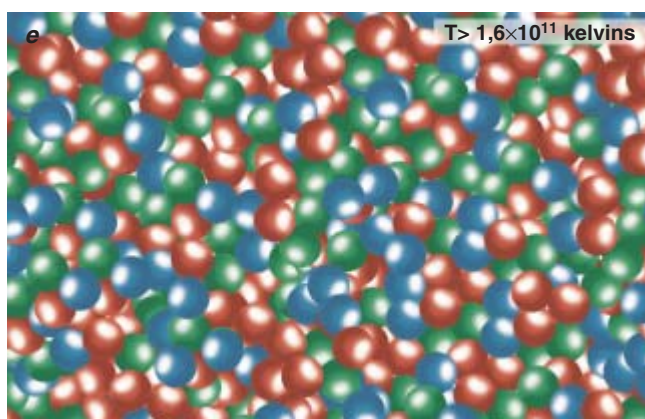
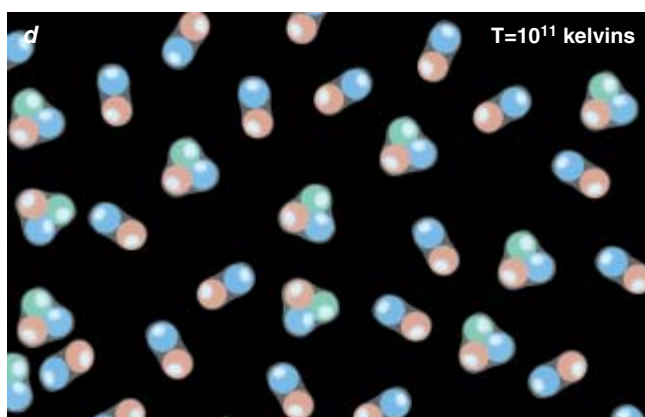
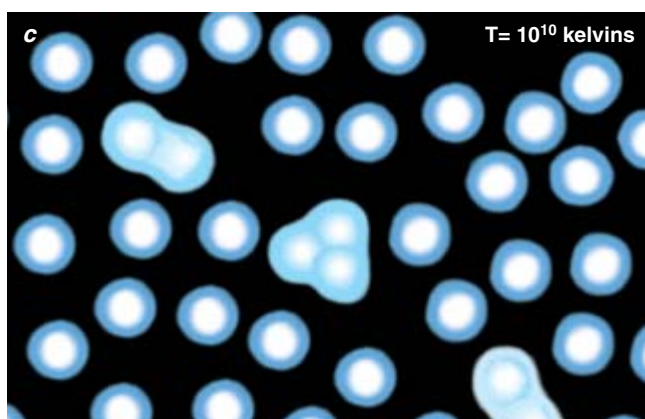
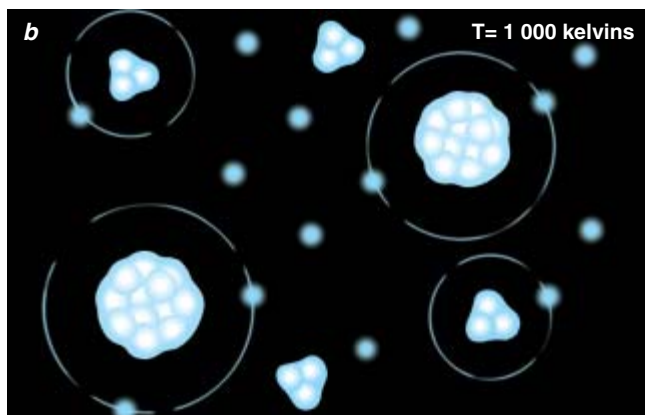
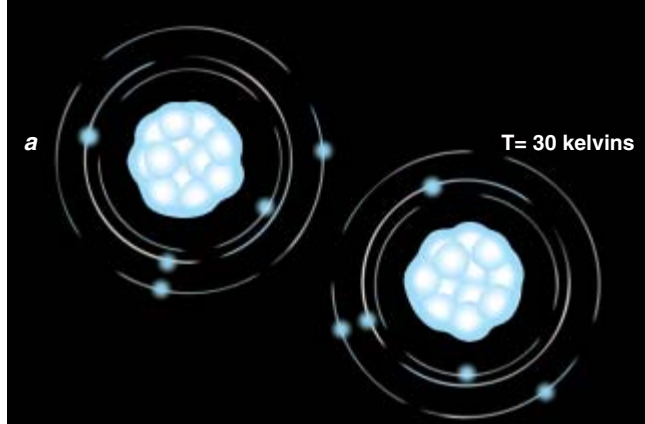
La perte de masse de certaines des particules issues de la collision constitue la deuxième signature de la formation de matière de quarks au-dessus de la densité critique. Le méson ρ_0 en est un exemple. Assemblage d'un quark Up et d'un anti-quark Down, sa masse est inférieure à celle du proton (77 pour cent), ce qui facilite sa production en nombre suffisant. Sa durée de vie est courte et il se désintègre notamment en une paire électron-positon, enregistrée par le détecteur (une particule électromagnétique n'interagit quasiment pas avec la matière nucléaire). Ainsi, on a détecté assez de mésons ρ_0 pour mesurer leur masse alors qu'ils étaient encore englués dans le milieu formé lors de la collision.

Qu'a-t-on constaté ? Ces particules semblent « fondre ». Cette perte de masse est d'autant plus grande que la collision est violente, c'est-à-dire que la densité d'énergie atteinte est élevée. À quoi correspond-elle ? Elle serait une conséquence de la restauration partielle de la situation qui régnerait si les quarks avaient des masses nulles, comme lors de la création de l'Univers. Or, la théorie prévoit que les quarks perdent leur masse à mesure que l'énergie augmente. Ainsi,

3. CETTE SIMULATION DU CHOC de deux noyaux d'or montre le cas d'une collision centrale, c'est-à-dire que les deux noyaux se recouvrent entièrement au moment de leur rencontre. Ils apparaissent d'abord allongés par la contraction de Lorentz, un effet relativiste qui déforme les dimensions longitudinales des objets se déplaçant à grande vitesse (a). Puis ils se « traversent » (b). Le choc crée entre eux une région emplies d'une multitude de particules nouvelles agitées par l'interaction forte : les quarks et les gluons (c et d). Après s'être formé, le plasma de quarks reste brièvement en équilibre thermique avant d'entrer en expansion, de se refroidir et de se muer en hadrons (e et f).



Klaus Kindler-Ginger, Ron Longacre et J. T. Mitchell, collaboration PHENIX, RHIC, Brookhaven



la perte de masse du p_0 est, comme prévu, un signe de l'apparition de quarks de faibles masses aux énergies où la matière de quark existe.

La troisième signature du plasma

La troisième signature du plasma de quarks et de gluons est la disparition manifeste du méson J/ψ au-dessus de la densité critique. Constitué d'un quark Charmé et de son anti-quark, J/ψ est l'état fondamental (de plus faible masse) du charmonium (les mésons ne contenant que des quarks Charmés). Trois fois plus lourds que le proton, les mésons J/ψ sont instables. Ils se désintègrent très vite, notamment en une paire de « leptons » (électrons ou muons) que les détecteurs identifient facilement. De ces observations, on peut déduire les propriétés du J/ψ lorsqu'il est encore englué dans le plasma. Les physiciens ont observé que la production de ce méson était soudainement réduite, quand les collisions deviennent plus violentes, c'est-à-dire quand les axes des noyaux de plomb tendent à se confondre. Cette situation tient à la présence de quarks libres de toutes les couleurs et de plusieurs saveurs dans le plasma : leur présence rend très improbable la combinaison d'un quark et d'un antiquark Charmé en un J/ψ .

La dernière signature prévue par la théorie de la formation du plasma est le « caractère thermique » de son rayonnement électromagnétique. On nomme rayonnement thermique, le rayonnement électromagnétique d'un corps en équilibre thermodynamique avec son environnement. Le rayonnement de la matière formée par la collision est particulièrement intense au centre du volume de collision. Après avoir vérifié que la forme spectrale de ce rayonnement (son évolution en fonction de l'énergie) est analogue à celle d'un rayonnement thermique, les physiciens en ont déduit la température du corps émetteur. La valeur trouvée est supérieure à la température critique théorique de transition de la matière nucléaire vers le plasma de quarks et de gluons.

Tous les indices obtenus au CERN plaident en faveur de l'existence de la matière de quark, même si d'autres interprétations restent possibles. On peut affirmer qu'un nouvel état de la matière s'est bel et bien formé dans l'accélérateur du CERN. Comment acquérir la certitude qu'il s'agissait du plasma de quarks et de gluons ? Pour le savoir, il importe de mieux explorer son domaine d'existence présumé. Les physiciens sont en train de le faire au RHIC.

Les expériences en cours au RHIC

Parce qu'elles se déroulent bien au-dessus de la densité critique, les expériences du RHIC ont bien plus de chances de révéler l'existence du plasma recherché. Après 20 ans de préparation, les premiers chocs de noyaux d'or ont eu lieu le 12 juin 2000. En quelques mois, l'énergie des collisions est passée de 55 gigaélectronvolts à 200 gigaélectronvolts (dans

4. PLUSIEURS TYPES DE PLASMAS se forment quand l'énergie augmente. Aux températures usuelles, la matière est constituée d'atomes (a). Dès quelques milliers de kelvins, elle s'ionise, c'est-à-dire que les atomes libèrent progressivement leurs électrons (b). Au-dessus de dix milliards de kelvins, la matière nucléaire se vaporise en un gaz de nucléons (c), puis en un gaz de hadrons (d). Ces derniers sont soit des mésons (deux quarks), soit des baryons (trois quarks). Les quarks portent trois couleurs possibles, c'est-à-dire trois valeurs différentes de la charge de l'interaction forte. Enfin, au-dessus de 160 milliards de degrés, les hadrons se « dissolvent » à leur tour, et un plasma de quarks et de gluons apparaît (e).

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.

Justice aveugle

DENNIS SHASHA

Pour trancher certaines affaires, un juge utilise les probabilités, mais aussi la bonne foi des deux parties opposées.

Un juge versé en mathématiques utilise un étrange moyen pour régler les litiges financiers. Avant de défendre leur cause devant le magistrat, le plaignant et l'accusé estiment le verdict : le plaignant inscrit sur un papier la somme P qu'il pense être en droit de recevoir, puis cache le papier dans une enveloppe scellée ; de la même façon, l'accusé décide de la somme A dont il se sent redevable.

Le juge ignore P et A . Après les plaidoiries de chacun, il rend son verdict : «L'accusé doit la somme J au plaignant à titre de dommages et intérêts!» Puis, il compare cette somme à P et à A . Quand J est plus proche de P , l'accusé doit P . En revanche, lorsque J est plus proche de A , l'accusé paie la somme A . Par exemple, le plaignant a écrit 18 millions

d'euros, tandis que l'accusé pense ne rien devoir. Le juge estime le différend à huit millions d'euros. Puisque 8 est plus proche de 0 que de 18, le plaignant ne touche rien. Ainsi, chacun a-t-il intérêt à être le plus juste dans ses appréciations.

Quelle est la meilleure stratégie du plaignant sachant que le verdict du juge sera compris entre trois et dix millions d'euros, avec une probabilité équivalente pour toutes les sommes? En d'autres termes, combien le plaignant doit-il revendiquer pour optimiser son indemnité? Doit-il changer de stratégie s'il suspecte l'accusé de pouvoir lire la somme P à travers l'enveloppe?

La solution de l'énigme sera donnée le mois prochain, et sera bientôt disponible sur le site Internet : www.pourlascience.com



Solution du problème d'énigmatics du numéro 296

La femme F frappe D , mais celle-ci ne frappe personne, elle est donc entrée dans la hutte de F . Cette observation est cohérente avec les deux phrases : « C parle à F » et « A parle à F ».

On remarque que F ne frappe personne d'autre que D : C et A ont toutes les deux accusé D .

E frappe A . A est-elle coupable d'intrusion dans la hutte de E , alors qu'elle frappe B qui a parlé à E ? En d'autres termes, B aurait-elle accusé A à tort d'être entrée dans la hutte de E ?

A frappe C qui, elle, ne frappe personne. Aussi, C est-elle entrée dans la hutte de A et a été dénoncée par F .

A frappe B , car B a fait un faux témoignage. C'est la réponse à notre précédente question.

B a frappé A pour une seule raison : E a accusé A d'intrusion. Puisque A frappe ensuite E , A montre qu'il s'agissait d'une fausse accusation.

Les deux dernières bastonnades résultent de la fausse déclaration de A selon laquelle C est entrée dans la hutte de B .

En résumé, voici ce qui s'est passé dans le village :

C est entrée dans la hutte de A .

D est entrée dans la hutte de F .

C dit à F que D est entrée dans sa hutte.

B dit à E que A est entrée dans sa hutte.

A dit à F que D est entrée dans sa hutte.

F dit à A que C est entrée dans sa hutte.

E dit à B que A est entrée dans sa hutte.

A dit à B que C est entrée dans sa hutte.