

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.

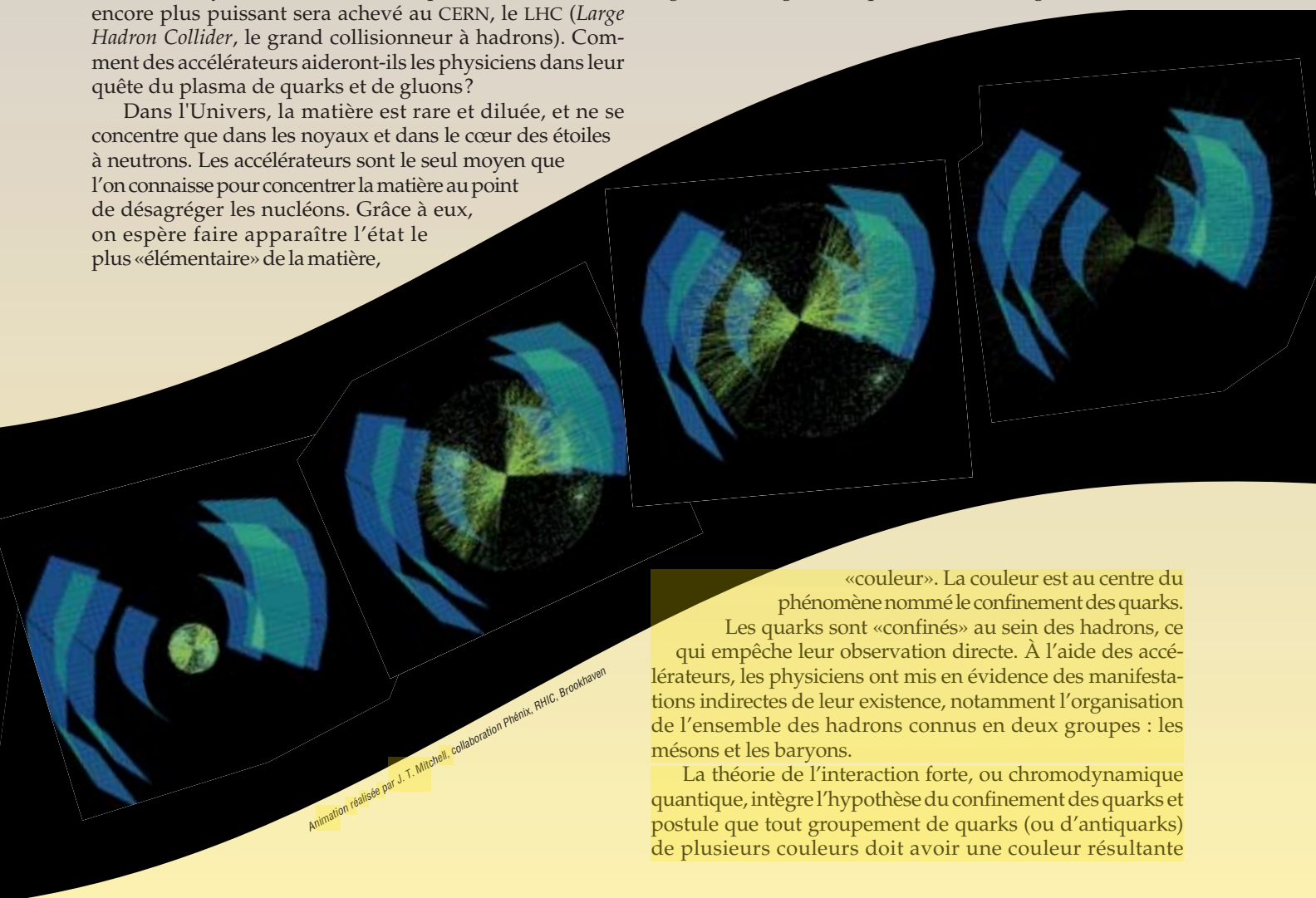
Expériences pionnières

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.

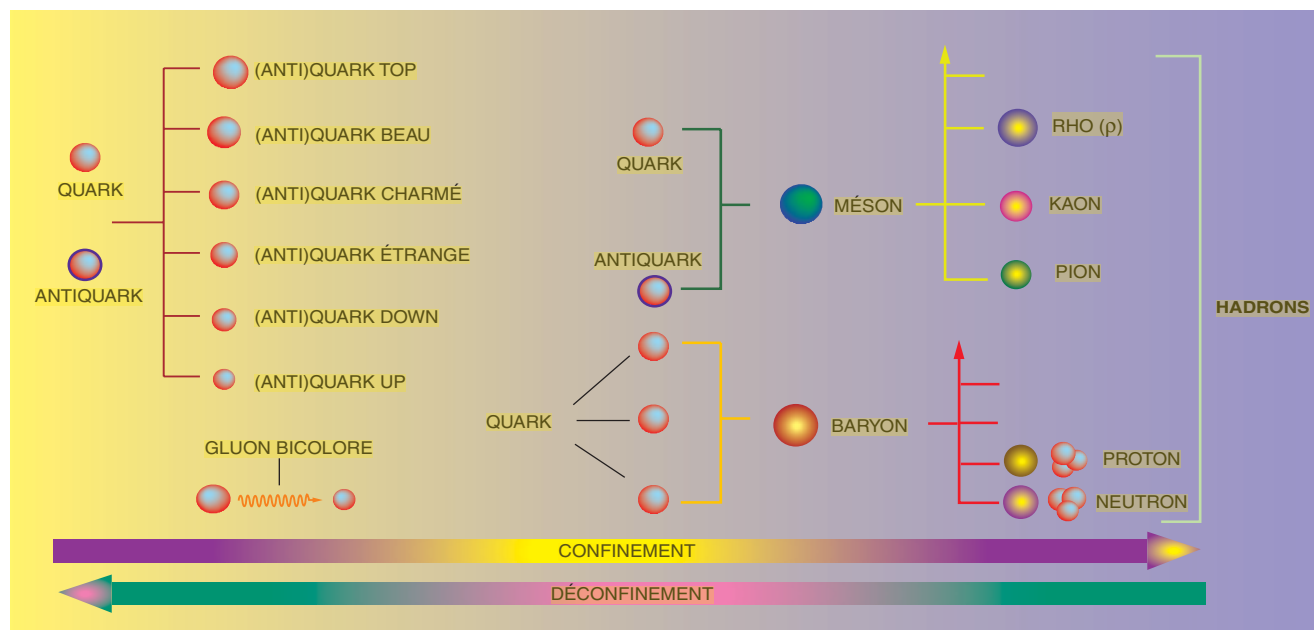
Avec l'interaction forte, l'interaction faible, l'interaction électromagnétique et la gravitation constituent les quatre interactions fondamentales de la matière (ou types de forces). Deux particules en interaction échangent une particule messagère. Ainsi, une interaction forte se traduit par l'échange 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 «mailles» 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 ?

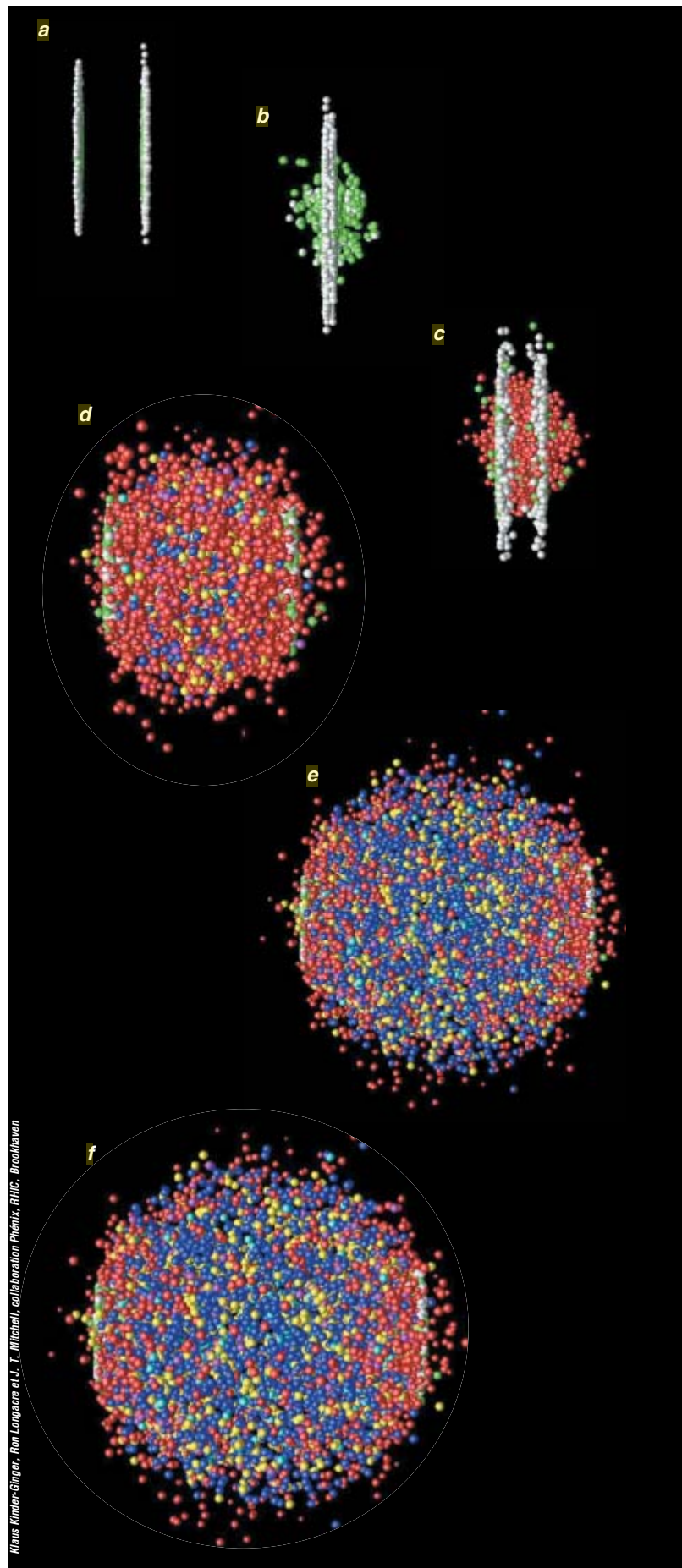
Pour le savoir, ils ont commencé par éliminer les autres causes possibles découlant de phénomènes connus. Pour suivre leur traque, les physiciens ont identifié quatre « signatures indirectes », prédites par la théorie. La première est la forte « saveur étrange » de la matière issue de la collision. On 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