

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 ?

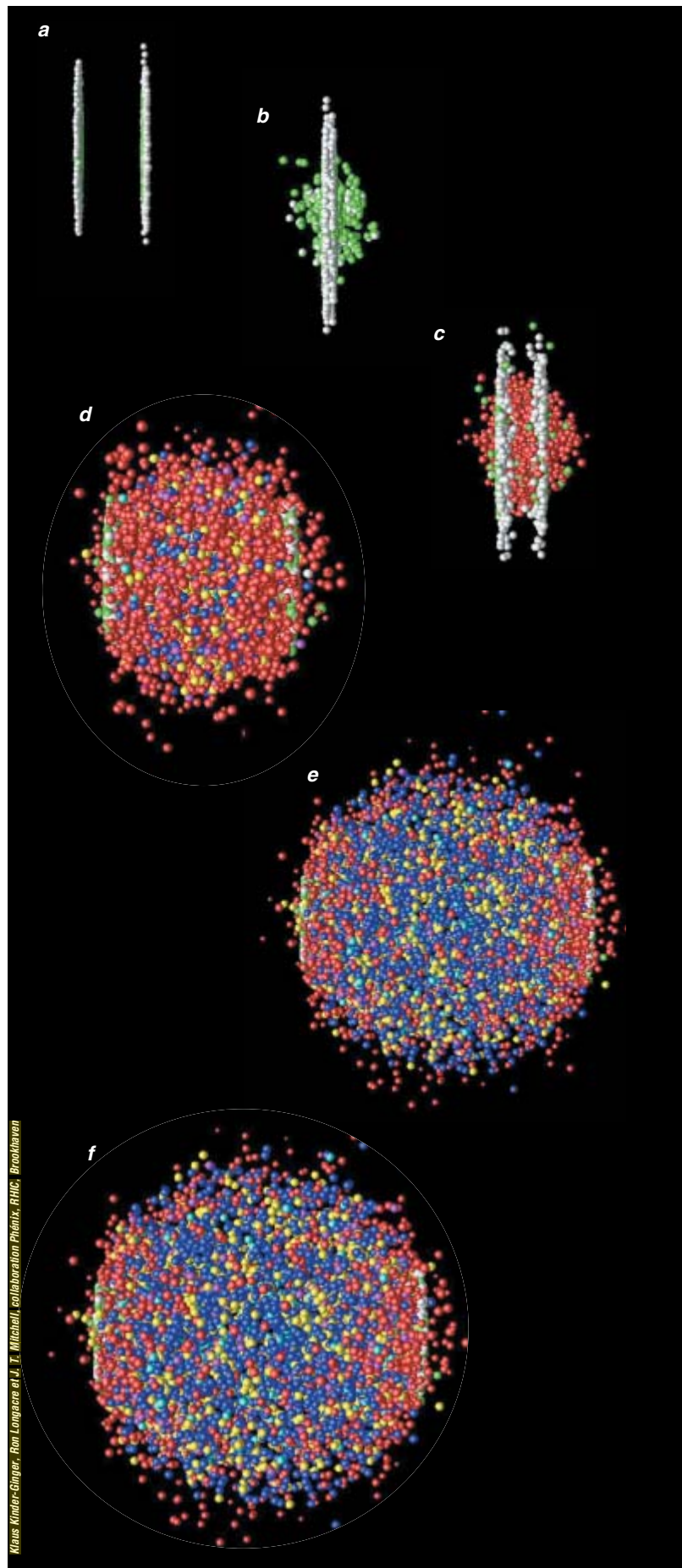
Pour le savoir, ils ont commencé par éliminer les autres causes possibles découlant de phénomènes connus. Pour suivre leur traque, les physiciens ont identifié quatre « signatures indirectes », prédites par la théorie. La première est la forte « saveur étrange » de la matière issue de la collision. On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

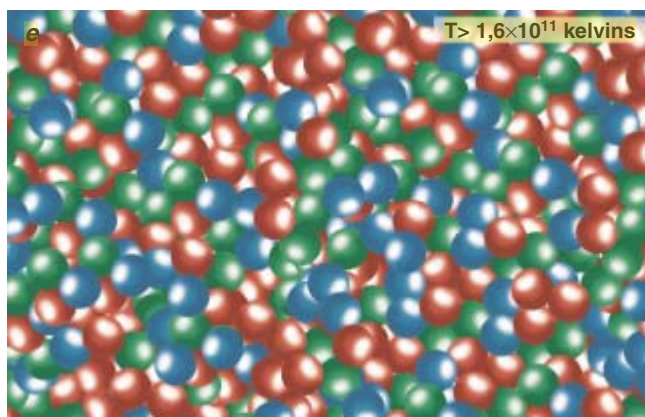
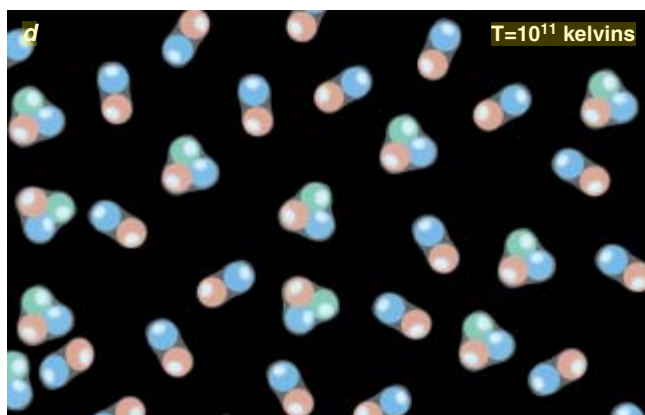
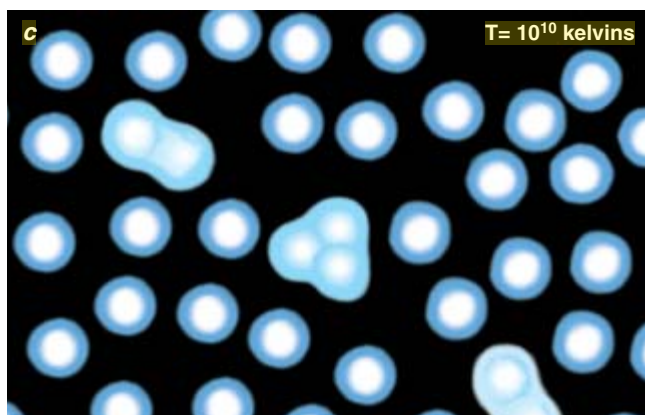
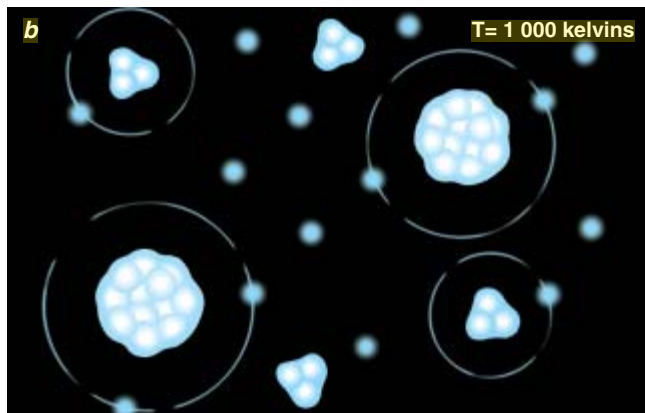
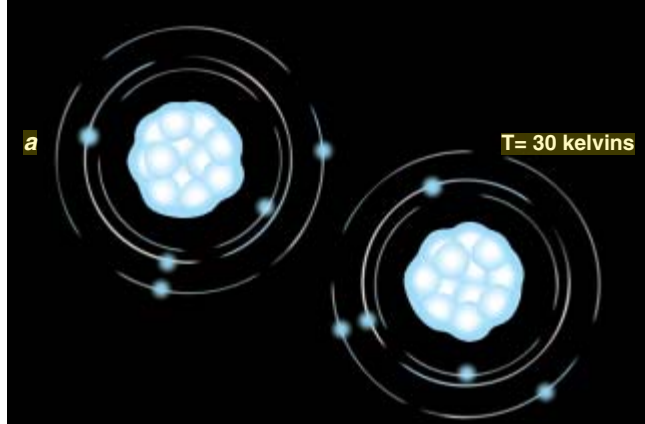
La perte de masse de certaines des particules issues de la collision constitue la deuxième signature de la formation de matière de quarks au-dessus de la densité critique. Le méson ρ_0 en est un exemple. Assemblage d'un quark Up et d'un anti-quark Down, sa masse est inférieure à celle du proton (77 pour 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, Roni 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 antiquark, 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 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).