

« Le plasma quarks-gluons se comporte comme un fluide parfait »

Entretien avec François Gelis



François GELIS est physicien à l'Institut de physique théorique du CEA-Saclay.

Au moyen de collisions à haute énergie entre noyaux atomiques, les physiciens créent un « plasma quarks-gluons ». Ils étudient les propriétés de cet état de la matière qui s'est aussi formé dans les premiers instants de l'Univers.

POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce qu'un plasma de quarks et de gluons ?

FRANÇOIS GELIS : Il s'agit d'un état de la matière composé de quarks et de gluons où ces particules sont quasi libres et ne sont plus confinées dans des états liés de deux ou trois quarks, les hadrons. Ce plasma se forme dans des conditions extrêmes qui étaient celles de l'Univers quelques microsecondes après sa naissance : une température de l'ordre de 2 000 milliards de degrés et une densité six fois supérieure à celle d'un noyau atomique. L'Univers s'est ensuite refroidi. Du fait du phénomène de confinement de l'interaction forte, les quarks et les gluons ont formé des hadrons, tels les protons et les neutrons. Sur le plan cosmologique, le

plasma de quarks et de gluons primordial n'a pas laissé de traces observables.

PLS

Dès lors, comment peut-on étudier cet état de la matière ?

F.G. : Nous sommes capables de créer les conditions appropriées dans un accélérateur de particules en procédant à des collisions de noyaux atomiques lourds, tel le plomb. La collision de protons, par exemple, ne donnerait pas une densité suffisante pour former un plasma quarks-gluons. Les premières expériences datent des années 1970, mais le premier plasma a été observé au Cern en 2000. En 2004, les physiciens du collisionneur RHIC, aux États-Unis, ont montré que le plasma de quarks et de gluons se

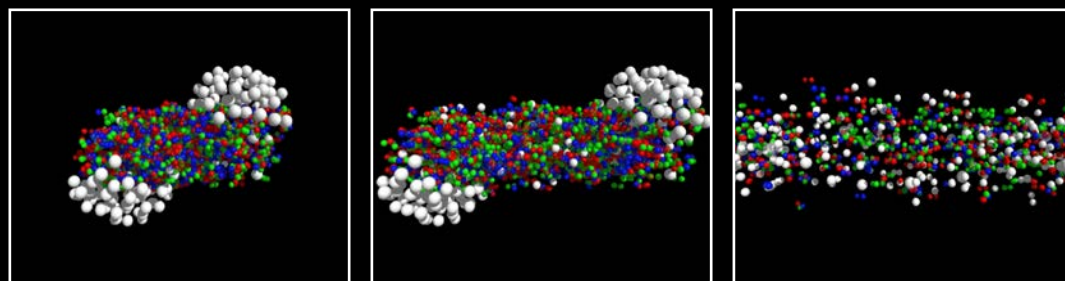
comporte comme un fluide parfait, c'est-à-dire qu'il s'écoule sans résistance.

Le LHC, au Cern, est l'accélérateur le plus puissant actuellement. Il procède principalement à des collisions de protons (ce qui a permis la découverte du boson de Higgs en 2012), mais une partie de son programme est consacrée à des collisions proton-noyau et noyau-noyau. Avec une expérience dédiée à l'étude de ces plasmas, ALICE, mais aussi avec les expériences CMS et ATLAS, les physiciens du LHC ont confirmé les résultats de RHIC et ont obtenu des mesures quantitatives montrant qu'il est possible de décrire l'expansion du plasma de quarks et de gluons au moyen de modèles hydrodynamiques.

PLS

En quoi le plasma quarks-gluons a-t-il des propriétés comparables à celles d'un fluide ?

F.G. : Par exemple, il est caractérisé par une viscosité, et l'une des grandes découvertes dans ce domaine a été sa mesure. Quand deux noyaux entrent en collision (voir les premières images ci-dessus), une goutte de plasma (les particules en couleur dans les images) se forme puis se dilate dans le vide environnant. On mesure sa viscosité par des moyens



LA COLLISION DE NOYAUX LOURDS
(à gauche), composés de protons et neutrons (boules blanches), conduit à la formation d'un plasma de quarks et de gluons (boules de couleur). Les images de cette simulation illustrent comment le plasma s'étend et se refroidit. Puis les quarks se recombinaient pour former des hadrons dont des protons et des neutrons (les boules blanches, à droite).

indirects, car la durée de vie du plasma est trop courte pour que l'on accède directement à ses caractéristiques. Lorsque le plasma devient moins dense, les quarks se lient et forment des hadrons (les boules blanches sur la dernière image) qui filent jusqu'aux détecteurs. On analyse alors la nature des particules détectées, leur énergie et leur impulsion. Ces informations dépendent de la viscosité du plasma. En comparant les données obtenues aux modèles, on trouve que le plasma a une viscosité très faible.

PLS

En termes d'interactions des particules, que signifie un plasma peu visqueux ?

F.G. : De façon contre-intuitive, la faible viscosité du plasma est ici synonyme d'interactions fortes. En effet, une petite viscosité signifie que les ondes acoustiques sont très faiblement atténuées dans le fluide, c'est-à-dire que les transferts d'impulsion d'un constituant à un autre *via* leurs collisions sont très efficaces, ce qui n'est possible que s'ils interagissent fortement. Au début de la collision, le couplage qui quantifie l'intensité de l'interaction forte est petit car la distance entre particules est courte (c'est le phénomène de liberté asymptotique). Mais la densité du plasma étant élevée, les interactions sont nombreuses, ce qui compense la faible intensité de la force. Quand la densité baisse à mesure que la goutte de plasma grossit, le couplage augmente, d'où le maintien d'une forte interaction entre les constituants.

PLS

Qu'en est-il de la température ?

F.G. : Mesurer la température du plasma est complexe, étant donné la très courte durée de vie de la goutte. L'approche est, là encore, indirecte. Nous étudions

la formation de différents mésons lourds (constitués d'un quark et d'un antiquark). Au-dessus d'une certaine température, les interactions empêchent ces mésons de se former. Ils apparaissent au-dessous d'un seuil de température que l'on peut calculer avec les modèles. Ces mésons ont une durée de vie très courte et se désintègrent en d'autres particules avant d'atteindre les détecteurs. Nous déterminons leur présence en reconstruisant à l'envers le processus de désintégration.

Nous évaluons ainsi deux moments clefs dans le plasma qui se refroidit : celui où la température est assez basse pour que les réactions qui changent la nature des particules soient négligeables (on parle de «gel chimique») et celui où la température a assez diminué pour que les collisions élastiques qui transfèrent de l'énergie d'une particule à une autre soient faibles (on parle de «gel cinétique»).

PLS

Quelle température atteint ainsi le plasma ?

F.G. : Les gels se produisent autour de 1500 milliards de degrés (environ 140 mégaelectronvolts, ou MeV). On met ainsi une borne inférieure à la température à laquelle se produit la transition quarks-hadrons, quand les quarks échappent au confinement en hadrons et forment un plasma. Cette transition se ferait autour de 1750 milliards de degrés (150 MeV).

Au LHC, on accède à la température maximale atteinte lors d'une collision de noyaux en analysant l'émission de photons par le plasma. Elle est comparable à celle d'un corps noir, et son intensité est proportionnelle à la puissance 4 de la température. On estime ainsi la température maximale du plasma, qui est un record de température produite par l'homme : 4000 milliards de degrés !

PLS

Quelles sont les autres caractéristiques du plasma que l'on observe ?

F.G. : Le «jet quenching» est un phénomène que nous voyons très bien dans les données. Quand une paire quark-antiquark se forme dans le plasma, les particules s'extraient de celui-ci dans des directions opposées et créent des jets de particules. Si la paire se forme près du bord de la goutte de plasma, l'une des particules traverse une grande distance dans le plasma avant de sortir et perd plus d'énergie en chemin que l'autre. Cette asymétrie, le «jet quenching», peut être mise en évidence en analysant l'énergie des jets.

Ce phénomène est spécifique au plasma quarks-gluons et ne s'observe pas dans une collision proton-proton. Un autre effet caractéristique de la production d'un plasma est celui de la corrélation entre les angles d'émission des particules. La distribution angulaire dépend de la façon dont les noyaux sont entrés en collision : un léger décalage se répercute sur les corrélations entre les directions des particules émises. Cette observation dans des collisions proton-noyau au LHC a permis de conclure que l'on a peut-être formé des gouttes de plasma quarks-gluons malgré une zone d'interaction bien plus petite.

PLS

C'était une surprise ?

F.G. : Il y a quelques années, nous pensions que ces collisions ne formeraient pas de plasma. Or en 2013, au LHC, nous avons observé dans ces collisions proton-noyau des signatures similaires à celles que l'on attribue au plasma quarks-gluons. Sur cet état de la matière, nous avons encore beaucoup à apprendre !

Propos recueillis par Sean BAILLY

Vers la reconstruction de la moelle épinière

Alain Privat et Florence Perrin

La rééducation n'est plus l'unique horizon des personnes paralysées. On comprend mieux aujourd'hui pourquoi une moelle épinière lésée ne se répare pas spontanément et l'on sait mieux comment favoriser sa régénération.

En octobre 2014, Darek Fidyka a fait la une de nombreux médias. Paralysé des membres inférieurs jusqu'à la poitrine à la suite d'une agression au couteau, ce Polonais de 40 ans a recouvré un usage partiel de ses jambes après une transplantation de cellules dans la lésion de sa moelle épinière. Pawel Tabakow, de l'université médicale de Wroclaw, et ses collègues ont ôté la cicatrice qui s'était formée autour de la lésion et ont introduit une population de cellules – des cellules olfactives engainantes – cultivées à partir d'un bulbe olfactif prélevé sur le patient. Après 21 mois d'entraînement intensif, Darek Fidyka a retrouvé des sensations et est à nouveau capable de mouvements volontaires des jambes.

On ne peut être sûr que ce succès soit le fruit de la transplantation : l'homme a suivi un entraînement intensif avant et après l'opération, et chaque étape du protocole opératoire a pu influencer sur le résultat. Pour le confirmer, il faudrait une étude clinique sur plusieurs patients, notamment des patients contrôles qui suivraient le même programme, mais sans transplantation. Néanmoins, ces travaux sont révélateurs des progrès réalisés dans la

L'ESSENTIEL

■ La France compte 40 000 paraplégiques et tétraplégiques.

La plupart de leurs paralysies résultent d'accidents qui ont lésé la moelle épinière.

■ On a longtemps cru qu'il était impossible de réparer une moelle épinière abîmée et que le seul traitement possible était la rééducation fonctionnelle.

■ Mais depuis une vingtaine d'années, grâce à une meilleure compréhension des mécanismes en jeu, d'autres pistes se dessinent : régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique...

© Shutterstock.com/Morphart Creation, Sammartini Graphics, LHF Graphics

compréhension de la moelle épinière et de ses lésions. Aujourd'hui, la rééducation fonctionnelle n'est plus la seule stratégie envisagée pour traiter ces pathologies. Régénération neuronale, thérapie cellulaire, robotique, les pistes explorées sont nombreuses et prometteuses.

Une lésion sur deux due à un accident de la route

Selon la Haute Autorité de santé, la France compte environ 40 000 paraplégiques et tétraplégiques, respectivement paralysés des membres inférieurs et des quatre membres. En 2013, une étude épidémiologique a répertorié l'ensemble des données publiées entre 1950 et 2012 sur les lésions de la moelle épinière (dites médullaires), responsables de telles paralysies dans le monde. Elle évalue le nombre de nouveaux cas par an – l'incidence annuelle de ces lésions – entre 8 (Espagne) et 246 (Chine) par million d'habitants selon les pays (20 en France), et le nombre total de cas répertoriés entre 236 et 1 298 par million (600 en France). L'incidence annuelle varie assez peu depuis un demi-siècle. En revanche, le nombre total de cas augmente régulièrement depuis vingt ans, en raison des