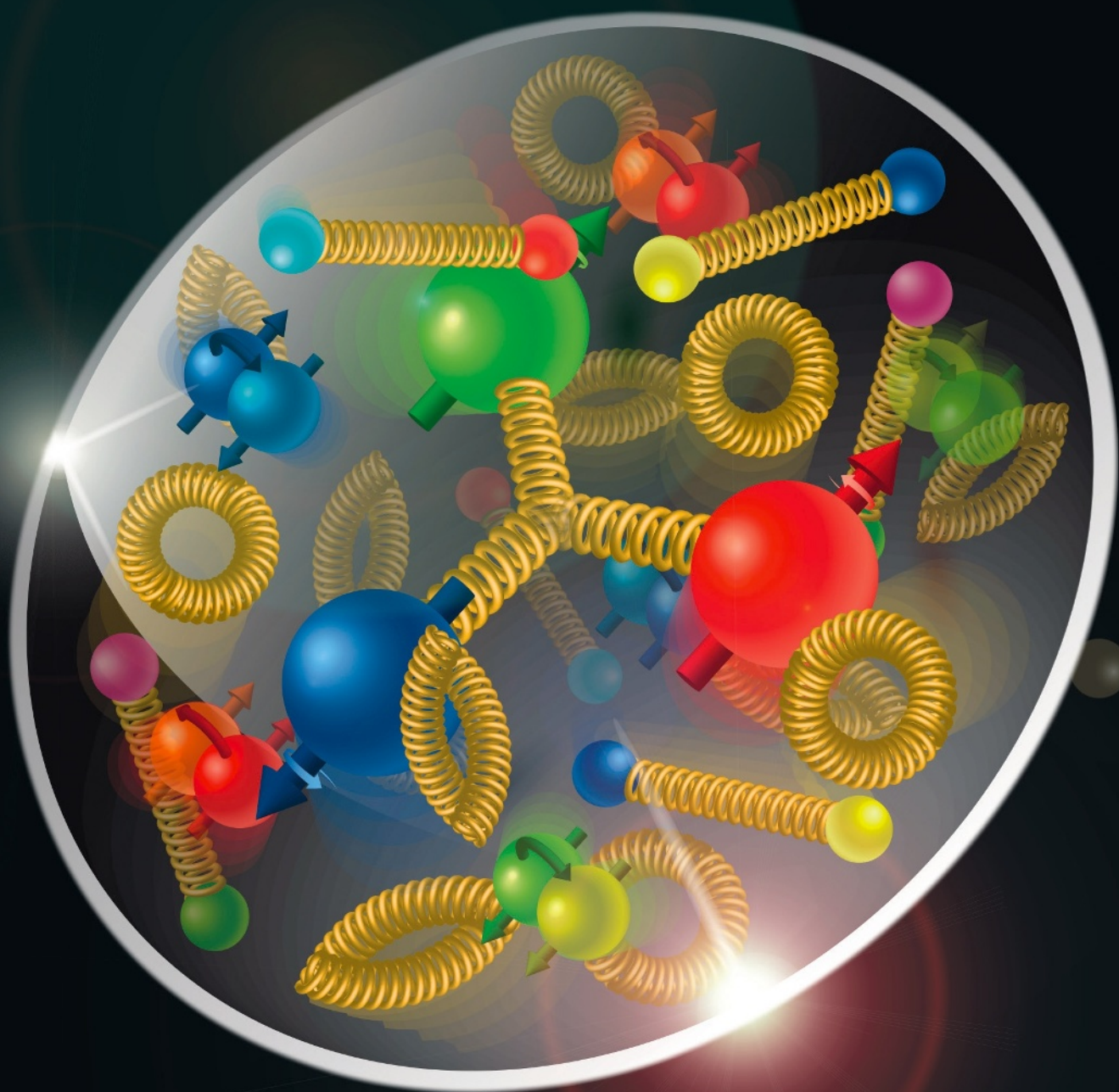




Le proton est composé de trois quarks dits « de valence »
(les trois boules les plus grandes sur cette vue d'artiste)
 et d'une mer d'objets éphémères : des paires quark-
 antiquark *(les petites boules)* et des gluons *(les ressorts)*.
 Ces derniers sont les vecteurs de l'interaction forte, qui lie
 les quarks et assure la cohésion du proton.

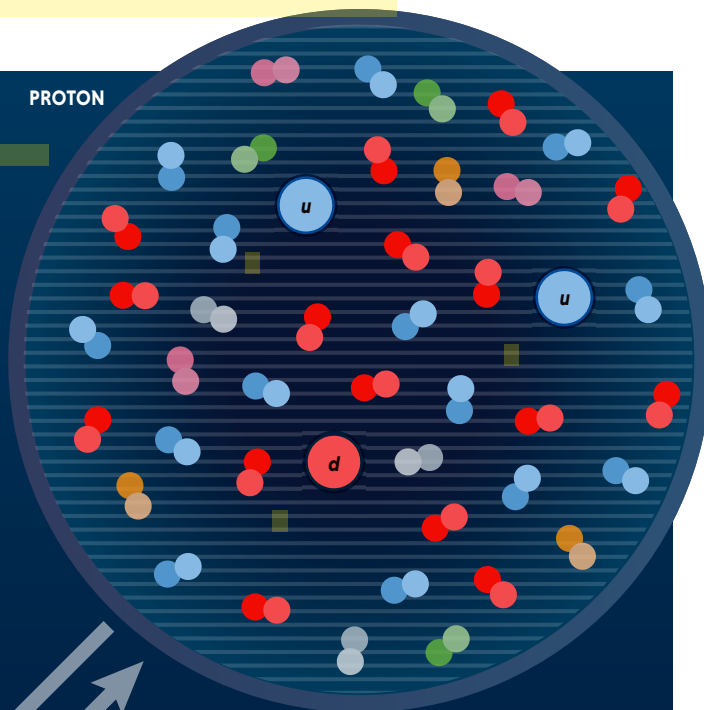
UNE MER DOMINÉE PAR LES ANTIQUARKS D

D'après la chromodynamique quantique, la théorie qui décrit les quarks, les gluons et leurs interactions, on devrait s'attendre à voir une contribution égale des antiquarks u et d dans la mer du proton, car ces deux particules ont presque la même masse (comparativement à celle du proton). Pourtant, l'antiquark d est légèrement surreprésenté. L'une des explications avancées de cette asymétrie invoque un état oscillant.

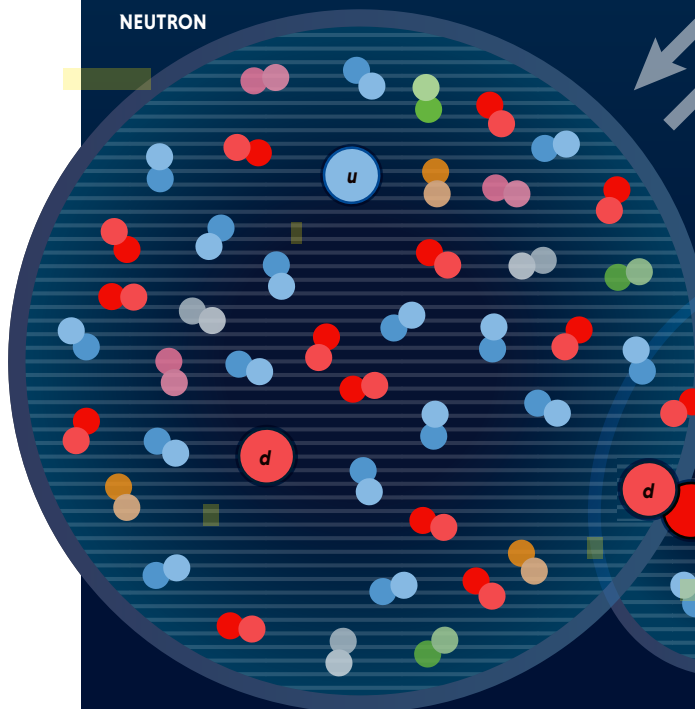
LES QUARKS ET LA COULEUR

Il existe six « saveurs » de quarks (voir en bas) et chaque quark porte par ailleurs une charge de « couleur », l'équivalent pour l'interaction forte de la charge électrique pour la force électromagnétique. Il existe trois couleurs (notées bleu, rouge et vert). Les quarks se combinent pour former des particules sans couleur. Par exemple, le proton et le neutron sont composés de trois quarks, chacun portant une couleur différente (la somme bleu + rouge + vert donnant un objet sans couleur). Ces structures à trois quarks sont les baryons, l'une des deux familles de particules sensibles à l'interaction forte. L'autre famille est celle des mésons, qui sont des paires quark-antiquark (l'un porte une couleur et l'autre son anticouleur correspondante). Le pion positif (quark u -antiquark d) en est un représentant.

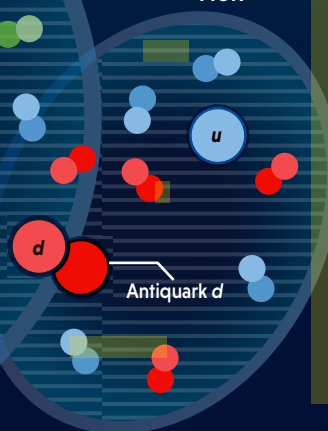
PROTON



NEUTRON



PION



UN ÉTAT OSCILLANT

L'une des hypothèses proposées est que le proton pourrait osciller entre deux états : un état nominal uud et un état composite combinant un neutron (udd) et un pion positif (quark u -antiquark d). Cet état composite présente la même charge électrique que le proton ; il contient aussi, globalement, deux quarks u de valence et un quark d , mais il confère une importance plus grande à une paire quark d -antiquark d . L'existence de cet état composite pourrait donc expliquer la légère asymétrie en faveur de l'antiquark d par rapport à l'antiquark u dans la mer du proton.



> réponse est venue en 1964 sous l'impulsion de Murray Gell-Mann et George Zweig, aux États-Unis. Ces physiciens ont supposé que les particules, à l'image du proton et du neutron et de celles qu'on détectait dans les expériences, n'étaient pas des particules élémentaires, mais qu'elles étaient composées d'éléments réellement fondamentaux, les quarks (un nom que Gell-Mann a emprunté dans *Finnegans Wake*, l'œuvre de l'écrivain irlandais James Joyce).

Aujourd'hui, on connaît six types ou «saveurs» de quarks, notées *u*, *d*, *c*, *s*, *t* et *b* (d'après *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top*, *beauty*, les noms quelque peu arbitraires qu'on leur a donnés). Le proton, par exemple, est constitué de deux quarks *u* et d'un quark *d*, tandis que le neutron se compose de deux quarks *d* et d'un quark *u*. Les quarks sont sensibles à l'«interaction forte», force fondamentale qui les lie au sein du proton (et du neutron) et qui assure aussi la cohésion des protons et des neutrons au sein du noyau atomique. L'interaction forte est associée à une charge dite de «couleur» (l'équivalent de la charge électrique pour l'électromagnétisme) et elle est véhiculée par des gluons (l'équivalent des photons dans l'interaction électromagnétique) qui portent eux-mêmes une charge de couleur (à la différence des photons, qui sont électriquement neutres).

UN TRIO DE QUARKS

En 1968, à l'accélérateur *Slac*, en Californie, des expériences où des protons étaient bombardés par des électrons de haute énergie ont montré que le proton est une particule composite, ce qui a confirmé l'hypothèse des quarks. Mais rapidement, au cours des années 1970, cette image élégante de la structure du proton est devenue une source de difficultés. En effet, la masse des trois quarks constitutifs ne représente qu'un faible pourcentage de la masse du proton. Et même en ajoutant la masse équivalente à l'énergie cinétique de ces quarks (selon la célèbre relation $E = mc^2$), le compte n'y était pas. Par ailleurs, des expériences montraient qu'une partie des électrons incidents étaient déviés par d'autres constituants dans le proton...

En fait, la théorie de l'interaction forte, la «chromodynamique quantique», indique qu'en plus de ses trois quarks dits «de valence», le proton héberge également une «mer» formée d'une multitude de paires quark-antiquark éphémères, dites «virtuelles». En effet, les gluons qui lient les quarks entre eux émettent parfois de nouveaux gluons ou se désintègrent en une paire quark-antiquark, qui s'annihile aussitôt pour reformer un gluon. L'énergie de cette mer en agitation permanente correspondrait à la partie manquante de la masse du proton.

L'énigme de la masse était-elle ainsi résolue? En 2008, Laurent Lellouch, du Centre de

physique théorique du CNRS et de l'université d'Aix-Marseille, et ses collègues ont confirmé l'hypothèse du rôle de la mer en calculant la masse du proton par ordinateur grâce à une technique nommée «chromodynamique quantique sur réseau». Le résultat était compatible avec les mesures expérimentales.

Les physiciens se sont ensuite interrogés sur la composition de la mer de quarks et d'antiquarks. Certaines saveurs de quarks et d'antiquarks y émergent-elles plus fréquemment? Les



Les quarks de valence ne représentent qu'un faible pourcentage de la masse du proton



saveurs ont des masses différentes: les quarks *u* et *d* ont une masse de l'ordre de quelques mégaelectronvolts (en unités d'énergie), *s* est environ 100 fois plus lourd, *c* et *b* sont près de 1000 fois plus lourds et *t* est 100000 fois plus massif. Si tous les quarks contribuent à la mer, celle-ci est dominée par les deux quarks les plus légers, car la probabilité de l'apparition d'une paire quark-antiquark diminue avec la masse. La question se résume donc à savoir dans quelles proportions entrent le quark *u* et le quark *d*. *A priori*, leurs masses étant proches, on peut penser qu'ils apparaissent à parts égales.

Comme il est difficile de distinguer un quark appartenant au triplet de valence *uud* d'un quark appartenant à la mer, les chercheurs ont concentré leur attention sur les antiquarks, qui proviennent forcément de la mer. Dans leurs expériences, ils se focalisent sur un processus particulier pour sonder le proton. En 1970, les Américains Sidney Drell et Tung-Mow Yan ont proposé de bombarder une cible de protons (un gaz d'hydrogène) avec un faisceau de protons. Lorsqu'un quark de valence d'un proton incident interagit avec un antiquark de la mer d'un proton de la cible, ils s'annihilent en formant un photon, qui se désintègre à son tour en une paire électron-positron ou une paire muon-antimuon (le muon étant une version plus lourde de l'électron). Dans ce type d'expériences, les muons sont plus faciles à mesurer; dès lors, les physiciens analysent les muons émergents pour déterminer les proportions des antiquarks *u* et *d*.

Deux expériences ont été menées afin d'effectuer ce type de mesure. L'expérience *NA51*, >