

former un hybride. Par exemple, un quark rouge et un antiquark antibleu pouvait se lier à un gluon bleu / anti-rouge pour former une particule blanche.

L'idée est élégante, mais la chromodynamique quantique est une théorie compliquée : la nature particulière et complexe de l'interaction forte interdit tout calcul théorique exact, et la quasi-totalité de nos connaissances sur la couleur et sur les gluons provient de colossales simulations numériques (voir *Quarks et simulation numérique*, par Donald Weingarten, *Pour la Science*, avril 1996). Dans cette chromodynamique sur réseau, on assimile l'espace-temps à un réseau discontinu. Un quark en un point donné du réseau est connecté par un segment à un antiquark situé en un autre point. Le calcul fait apparaître des entités purement gluoniques, constituées d'un tube de glu qui se referme sur lui-même, tel un serpent qui se mord la queue. La boucle ainsi formée est une représentation simple d'une boule de glu.

La plus légère boule de glu permise par la théorie correspond à un tube de glu circulaire possédant un moment cinétique intrinsèque, ou spin, nul.

Conformément aux équations de la théorie quantique, un tel objet de moment cinétique nul doit être décrit par une fonction d'onde à symétrie sphérique. D'autres «boules de glu» ont un moment cinétique non nul ; elles sont donc décrites par des fonctions d'onde non sphériques.

Parfois, le tube de glu reliant une paire quark-antiquark se détend et s'écarte légèrement de l'axe rectiligne joignant les deux particules. Il peut alors tourner autour de cet axe, à la manière d'une corde à sauter (voir la figure 5). Cette rotation exigeant une énergie considérable, l'énergie totale du système (ou sa masse, puisque masse m et énergie E sont reliées par la relation d'Einstein, $E = mc^2$, où c est la vitesse de la lumière) est supérieure à celle d'un méson ordinaire. Les configurations résultantes, qui peuvent être considérées comme contenant un gluon supplémentaire, correspondent aux hybrides prédits par H. Fritzsch et M. Gell-Mann.

Un méson ordinaire, composé d'un quark et d'un antiquark reliés par un tube gluonique rectiligne, peut également subir une rotation, mais

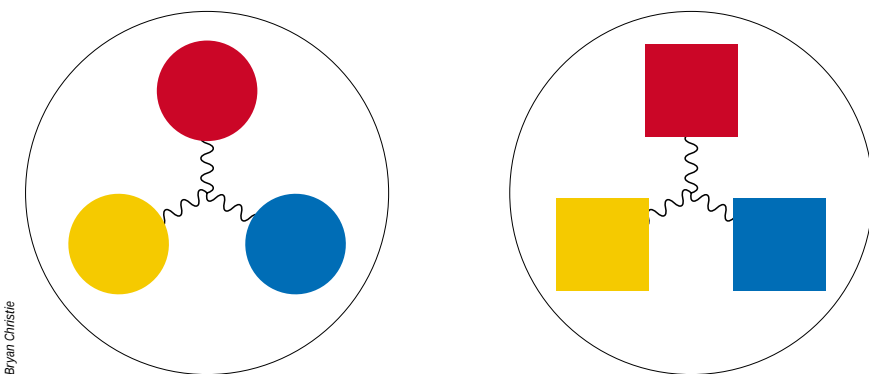
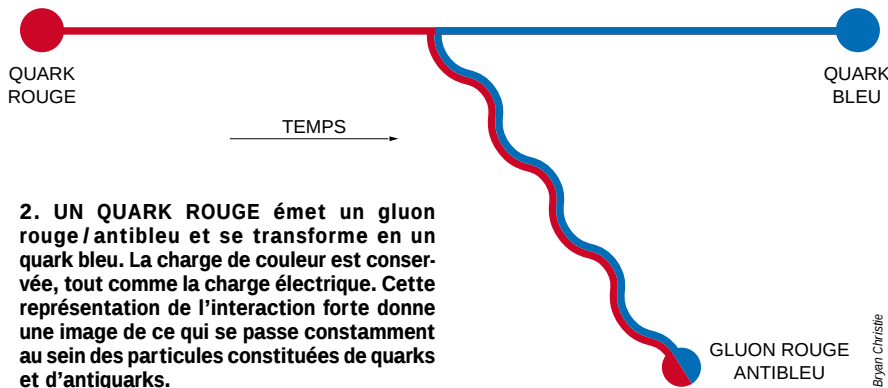
uniquement autour d'un axe perpendiculaire à l'axe quark-antiquark. Un méson d'énergie minimale n'est pas soumis à une telle rotation : il est décrit par ce que l'on nomme une fonction d'onde de type S. D'une manière générale, un méson d'énergie minimale (par exemple, le pion) se désintègre en deux mésons d'énergie minimale. En revanche, un hybride, d'énergie supérieure, se désintègre rarement de cette manière, car une telle désintégration violerait la conservation du moment cinétique intrinsèque. La théorie prédit la désintégration des hybrides en un méson d'énergie minimale et en un autre méson, à courte durée de vie, dont le moment cinétique n'est pas nul et qui se désintègre ensuite en deux mésons d'énergie minimale. L'hybride signalerait donc sa présence en engendrant au minimum trois mésons d'énergie minimale.

Les hybrides exotiques

Durant de nombreuses années, les physiciens ont parlé des hybrides, sans les chercher vraiment : les difficultés de détection des trois mésons émis lors d'une désintégration semblaient insurmontables.

En décembre 1994, nous avons calculé toutes les désintégrations possibles d'hybrides en assimilant les tubes de glu à une chaîne de boules représentant des gluons. Les résultats étaient similaires à ceux de la chromodynamique sur réseau, mais notre modèle avait l'avantage d'expliquer plus de situations. Nous avons alors constaté que l'on avait peut-être même observé un hybride au cours de cette même année 1994 : durant l'été, des physiciens de l'Institut de physique des hautes énergies, à Protvino, en Russie, avaient détecté un objet nouveau lors de collisions de pions et de protons. Cette particule, nommée $\pi(1800)$ – le nombre entre parenthèses indique la masse en millions d'électronvolts –, avait les caractéristiques et les modes de désintégration prédits pour les hybrides.

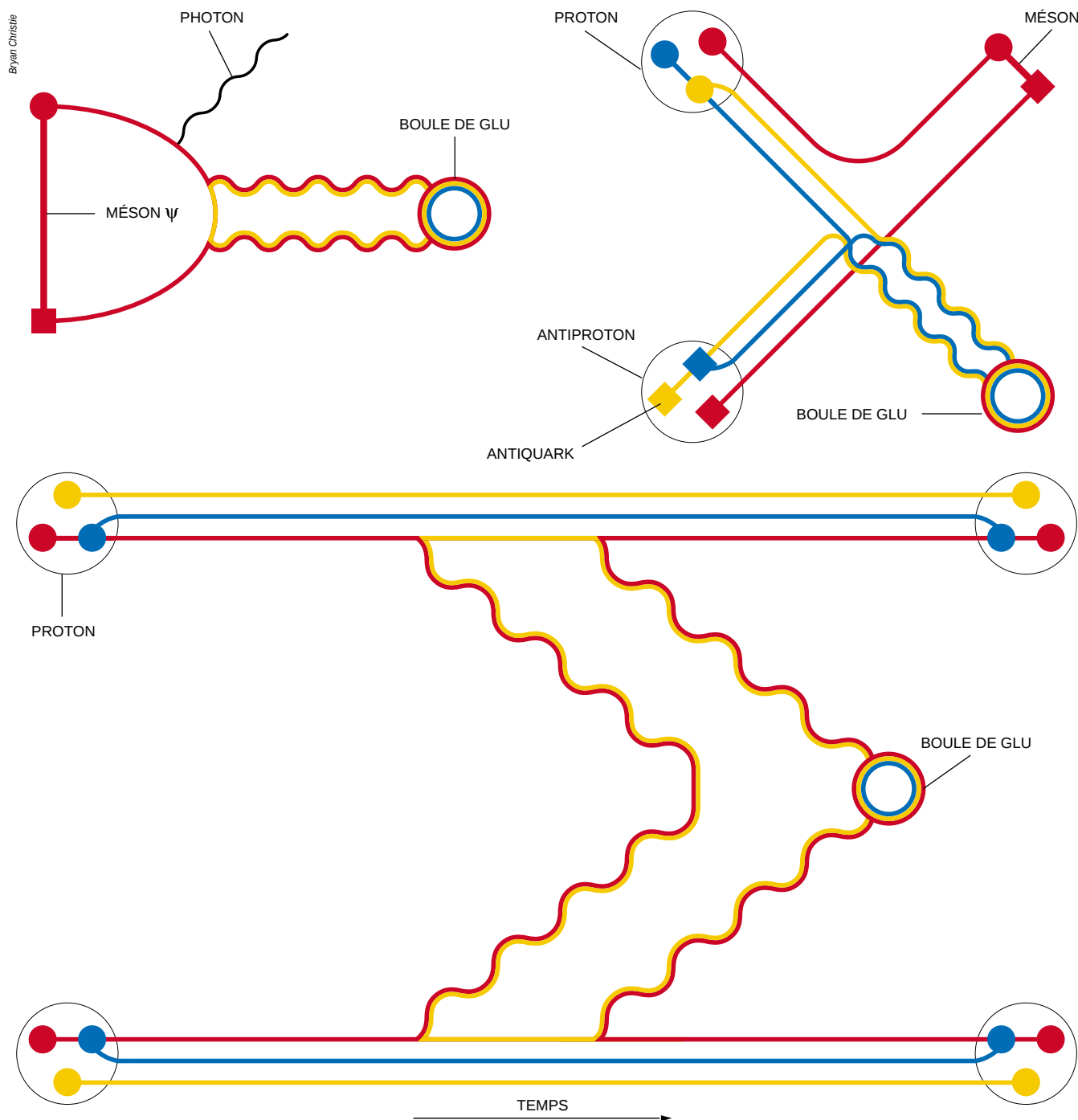
L'identité du $\pi(1800)$ reste incertaine, mais des indices récents suggèrent l'existence d'hybrides particuliers, qualifiés d'«exotiques». Les mésons sont caractérisés par plusieurs nombres quantiques tels que leur moment cinétique intrinsèque J , leur parité P (qui indique si le symétrique par rapport à un point conserve, ou non, les mêmes propriétés) et leur conjugaison de charge C (qui



indique si une particule et son antiparticule ont les mêmes propriétés). Les hybrides exotiques sont caractérisés par des combinaisons rares de ces trois nombres quantiques. Les nombres C et P du méson standard, dont le moment cinétique J est égal à 1, sont égaux à -1 . L'hybride exotique le plus simple correspond à $J = 1$, $P = -1$ et $C = +1$.

En 1997, des expérimentateurs du Laboratoire de Brookhaven, travaillant également avec des faisceaux de pions et des cibles de protons, ont trouvé cet hybride exotique. Peu après, le groupe Crystal Barrel (en français, tonneau de cristal) du CERN, à Genève, a détecté des traces de cette même particule. Les expérimentateurs cherchaient seu-

lement deux mésons d'énergie minimale, le η (méson éta) et le π (méson pi ou pion), qui ne sont pas les produits les plus abondants d'une désintégration d'hybride exotique, mais ceux qui sont détectables le plus facilement. À l'époque, l'un de nous (F. Close) préconisait d'orienter les recherches sur les boules de glu de masses comprises entre



4. LA PRÉSENCE DES BOULES DE GLU est probable dans les réactions auxquelles participent des gluons. Par exemple, un méson ψ (psi) se désintègre en libérant un photon et deux gluons. Ces derniers s'associent pour former une boule de glu (a). Les quarks d'un proton interagissent avec les antiquarks d'un antiproton contre lequel le proton s'écrase (b) : deux gluons

et un méson sont émis. Les gluons peuvent alors se combiner en une boule de glu. En outre, lorsque deux protons se heurtent, leurs quarks constitutifs échangent des gluons (c). Deux de ces gluons peuvent également fusionner en une boule de glu qui se désintégrerait alors de diverses manières, par exemple en deux pions ou en d'autres mésons (*non représentés ici*).