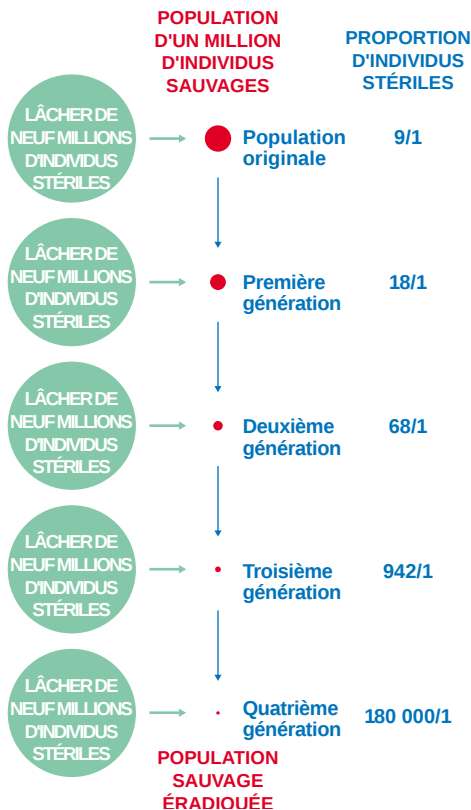




Dmitry Krasny, d'après Gerald Franz

9. LA TECHNIQUE DE L'INSECTE STÉRILE est parfois une arme efficace contre les ravageurs. Les insectes stériles (surtout des mâles), lâchés par vagues successives, surpassent en nombre les individus fertiles de la même espèce et rendent la plupart des accouplements inféconds. Après quelques générations, la population de ravageurs est décimée.

les industriels sont handicapés par la fragilité de ces fils, et ils lorgnent sur les fils de soie produits par les araignées, qui sont plus solides que le Kevlar (lequel entre dans la composition des gilets pare-balles et de pièces d'avions). Malheureusement, les araignées ne produisent pas leur fil au rythme des usines de Kevlar ni même des larves du bombyx. D'où la tentation d'introduire des gènes arachnéens de la soie dans le génome des vers à soie.

Évidemment ces études posent aux scientifiques comme aux hommes politiques le problème général de

l'utilisation du génie génétique dans les laboratoires et dans la nature. Des réglementations régissent déjà le transfert du laboratoire au champ des applications de la transgénèse. Toutes les techniques, notamment la fabrication d'insectes transgéniques, font encourir des risques que nous devons comprendre et minimiser. Par exemple, on étudie d'éventuels transferts imprévus de transgènes d'une espèce d'insectes à une autre. Dans certains cas, le risque semble minime : lorsqu'on lâche dans la nature des individus stériles d'une espèce transgénique, les gènes ajoutés à ces insectes restent confinés dans ces individus.

Les agences techniques qui dépendent des États se préoccupent d'évaluer les risques et les avantages des nouvelles techniques. Aux États-Unis, elles ont élaboré des procédures qui garantissent la sécurité génétique et écologique de l'utilisation en agriculture d'insectes transgéniques.

Les recherches sur la transgénèse ont bouleversé toute la biologie, parce que les résultats obtenus lors de l'étude d'espèces particulières s'appliquent aux autres espèces. Les modestes plants de pois de Gregor Mendel ont révélé la génétique de toutes les espèces végétales ou animales, et les études sur la drosophile ont posé les fondations de l'essentiel des recherches modernes dans le domaine de la génétique. Les investigations dont a fait l'objet la bactérie *Escherichia coli* ont conduit à l'exploration des mécanismes de régulation qui ont accéléré le développement du génie génétique. Des mammifères transgéniques produisent déjà toute une variété de médicaments. Appliquée aux insectes, la transgénèse ouvrira aux biologistes de nouvelles voies d'exploration, de contrôle et d'exploitation de ces créatures qui exercent une emprise considérable sur une importante part des activités économiques de l'homme.

David O'BROCHTA travaille l'Université du Maryland. Peter ATKINSON travaille à l'Université de Californie.

C.F. CURTIS et P.M. GRAVES, *Methods for Replacement of Malaria Vector Populations*, in *Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, vol. 91, n° 2, pp. 43-48, avril 1988.

The Ecology of Agricultural Pests : Biochemical Approaches, sous la direction de W.O.C. Symondson et J.E. Liddell, Chapman and Hall, 1996.

Frank H. COLLINS et Anthony A. JAMES, *Genetic Modifications of Mosquitoes*, in *Science & Medicine*, pp. 52-61, novembre / décembre 1996.

Margaret G. KIDWELL et Alice R. WATTAM, *An Important Step Forward in the Genetic Manipulation of Mosquito Vectors in Human Disease*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 95, n° 7, pp. 3349-3350, 31 mars 1998.

Les boules de glu

FRANK CLOSE • PHILIP PAGE

Les gluons sont les particules qui transmettent l'interaction nucléaire forte entre les quarks et assurent la cohésion des protons. Ils se regroupent parfois en «boules de glu».

Il n'existe pas d'atomes de lumière : les photons, ces particules qui transmettent les interactions électromagnétiques, ne se lient pas en entités composées analogues aux atomes. Pourquoi alors existe-t-il des assemblages de gluons ? Ces particules lient les quarks (les composants élémentaires de la matière nucléaire) en particules telles que les protons. Les assemblages de gluons sont ce que les

physiciens nomment des boules de glu. On pense que les boules de glu ont un rayon de 0,5 femtomètre (soit 0,5 millionième de milliardième de mètre), inférieur à celui du proton, et une durée de vie inférieure au temps mis par la lumière pour traverser un atome d'hydrogène. De nombreux physiciens sont aujourd'hui convaincus que, malgré leur caractère éphémère, des boules de glu ont été produites dans des accélérateurs de particules. La mise en évidence d'une boule de glu serait l'un des plus beaux épisodes de l'histoire des charges de couleur, commencée en 1964 avec les travaux de Murray Gell-Mann.

Dans les années 1960, les physiciens comprirent que les protons ou les neutrons qu'ils observaient expérimentalement se composent de particules encore plus petites, nommées quarks. Ces quarks ont une charge électrique

et d'autres caractéristiques plus insolites, telle la «saveur», qui se présente sous six aspects différents nommés *up*, *down*, *charm*, *strange*, *top* et *bottom* ; ils ont également une charge «de couleur». Par exemple, un quark *up* peut être rouge, jaune ou bleu.

Le regroupement de trois quarks de couleurs différentes forme un objet «blanc», c'est-à-dire un objet dont la charge de couleur totale est nulle : selon la saveur des quarks constituants, les objets blancs sont des protons, des neutrons ou n'importe laquelle des innombrables particules du même type, que l'on nomme des baryons. Les physiciens ont nommé couleur ce type de charge parce que l'addition de trois charges de couleur est toujours égale à zéro, de la même façon que l'addition des trois couleurs primaires donne du blanc. Les particules (quarks et gluons) qui

1. UN GLUON () est libéré par un antiquark () qui a été créé en même temps qu'un quark () à partir d'un photon (). Ce photon résulte de l'annihilation d'un électron () et d'un positon (). Les quarks, les antiquarks et les gluons ont des charges de couleur (rouge, bleu et jaune) qui déterminent leurs interactions par la force nucléaire forte. Une charge de couleur et la charge d'anticouleur correspondante (couleur opposée) sont représentées ici par la même couleur. La nature ayant horreur de la couleur, le quark, l'antiquark et le gluon se combinent à d'autres particules ; ainsi, ils forment les «jets» () de particules incolores, ou blanches, que l'on observe lors des expériences. L'électron, le positon et le photon ont une charge de couleur nulle, de sorte qu'ils sont insensibles à l'interaction forte. Sur ce diagramme, le temps s'écoule de gauche à droite. Les diagrammes de ce type se nomment diagrammes de Feynman, du nom du physicien Richard Feynman, qui les a inventés pour faciliter le calcul.

portent des charges de couleur s'attirent par la force nucléaire forte. C'est elle qui regroupe les quarks en objets stables nommés baryons.

Les quarks se lient également aux antiquarks, qui ont des caractéristiques – des «nombres quantiques» – opposées à celles des quarks. Par exemple, un antiquark possède une anticharge de couleur : il peut être antirouge, anti-jaune ou antibleu (une anticouleur est mathématiquement représentée par une charge de couleur négative : l'antirouge est «moins rouge»). Les charges de couleur de signes opposés s'attirent. Par exemple, un quark rouge qui se lie à un antiquark antirouge forme un objet blanc nommé méson ; le méson le plus courant est le pion, souvent observé dans les réactions nucléaires.

La théorie électromagnétique décrit l'attraction entre charges électriques opposées. Dans les années 1940, les physiciens ont intégré cette théorie dans le formalisme de la relativité et de la mécanique quantique, établissant ainsi l'électrodynamique quantique. Cette théorie stipule que la force électromagnétique est transmise par des objets de masse nulle, les photons. Grâce à ces quanta de lumière, l'idée classique de forces agissant à distance est transformée : par exemple, un électron attire son antiparticule, le positon, parce qu'un photon rebondit entre les deux particules. Les photons assurent l'attraction de particules de charges électriques opposées sans être eux-mêmes chargés. Aussi, un photon n'attire ni ne repousse un autre photon.

Un tube de gluons

Pour les charges de couleur, la théorie équivalant à l'électrodynamique quantique est la chromodynamique quantique, qui décrit l'interaction forte, et ce sont les gluons, particules sans masse, qui transmettent cette interaction. Les gluons possèdent une charge de couleur, mais aussi une charge d'anticouleur. Par exemple, un quark rouge se transforme quelquefois en un quark bleu en émettant un gluon rouge / antibleu (voir la figure 2). Contrairement aux photons, qui ne portent pas de charge, les gluons interagissent selon leur charge de couleur.

Par ailleurs, un électron isolé est entouré d'un nuage de photons dont la densité décroît avec la distance ; de sorte que l'attraction entre un électron et un positon diminue lorsque la distance qui les sépare augmente. Les gluons, eux, ne sont pas répartis aussi uniformément autour des quarks : ils se regroupent en un tube qui relie un quark à un antiquark ; la couleur qui prend sa source dans le quark «s'écoule» à travers ce tube gluonique pour être absorbée par l'antiquark.

Lorsque le tube est étiré, il réagit en opposant une force constante, indépendante de sa longueur. Il faudrait donc dépenser une énergie infinie pour donner une longueur infinie au tube, c'est-à-dire pour séparer un quark d'un antiquark. Ainsi les quarks ne sont

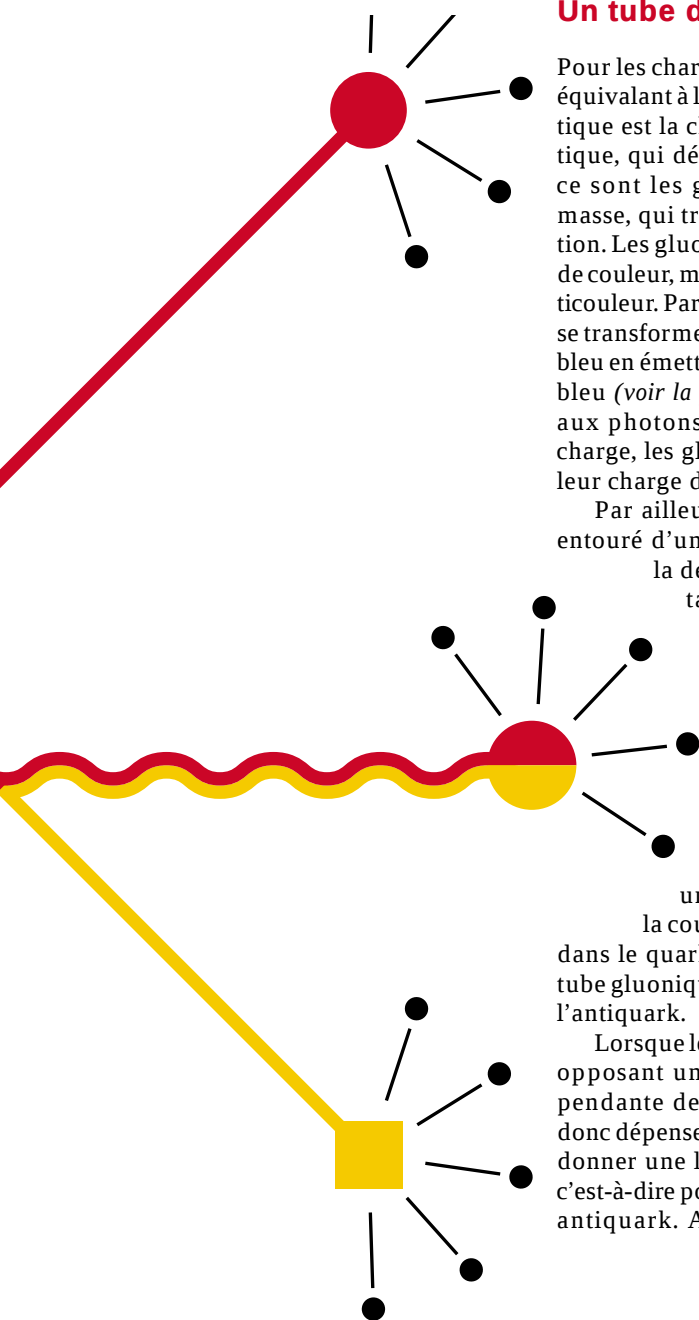
jamais isolés : la nature a horreur de la couleur. Cependant, un tube de gluons, qui assure la cohésion d'un méson, peut se rompre en deux morceaux. Les nouvelles extrémités colorées des tubes correspondent à des quarks ou à des antiquarks : le méson se scinde en deux mésons (voir la figure 5).

Cette interprétation théorique décrit bien les observations, mais comment démontrer l'existence des gluons ? L'annihilation d'une paire électron-positon donne des indices indirects de cette existence : lorsque ces particules se combinent, l'énergie libérée se matérialise souvent en un quark et un antiquark, qui partent dans des directions opposées. Le tube qui les relie se brise en gerbes de mésons et de baryons, et l'expérimentateur voit deux jets de particules composées qui s'éloignent en sens contraires.

Cependant, le quark ou l'antiquark émet parfois un gluon, ce qui porte le nombre de jets à trois (voir la figure 1). Les premiers triplets de tels jets ont été découverts en 1979, à Hambourg, grâce au synchrotron à électrons allemand (DESY). Les jets étaient exactement ceux prédits par les calculs des théoriciens, et l'expérience a également confirmé que les gluons pouvaient émettre d'autres gluons.

Les expérimentateurs du DESY ont également sondé la structure interne des protons en envoyant vers eux des électrons très énergétiques, et ils ont alors retrouvé la présence de gluons. Par ailleurs, les gluons sont nécessaires pour expliquer les valeurs des masses de certains mésons : ceux qui sont composés de quarks et d'antiquarks massifs (saveurs *strange*, *charm* et *bottom*). La valeur de leur masse correspond à celle d'un quantum de force de couleur possédant un moment cinétique intrinsèque égal à 1 ; ce qui est le cas pour les gluons.

Les gluons peuvent-ils se manifester de façon autonome, c'est-à-dire sans quarks ? En 1972, à l'Institut de technologie de Californie, Harald Fritzsch et Murray Gell-Mann ont prédit que deux – ou plus de deux – gluons (par exemple, un rouge / antibleu et un bleu / antirouge) pouvaient se combiner en une particule de couleur neutre, ou blanche. Cet objet hypothétique, composé uniquement de gluons solidement liés ensemble est ce que l'on a nommé une boule de glu. Ces théoriciens ont affirmé également qu'un gluon pouvait se lier à un méson pour



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

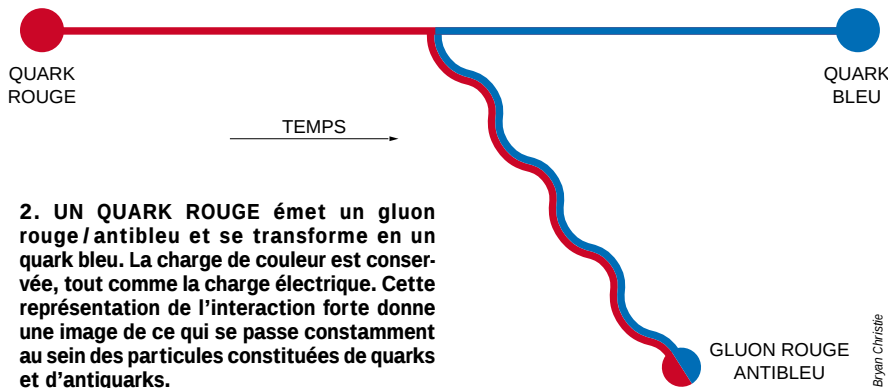
uniquement autour d'un axe perpendiculaire à l'axe quark-antiquark. Un méson d'énergie minimale n'est pas soumis à une telle rotation : il est décrit par ce que l'on nomme une fonction d'onde de type S. D'une manière générale, un méson d'énergie minimale (par exemple, le pion) se désintègre en deux mésons 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

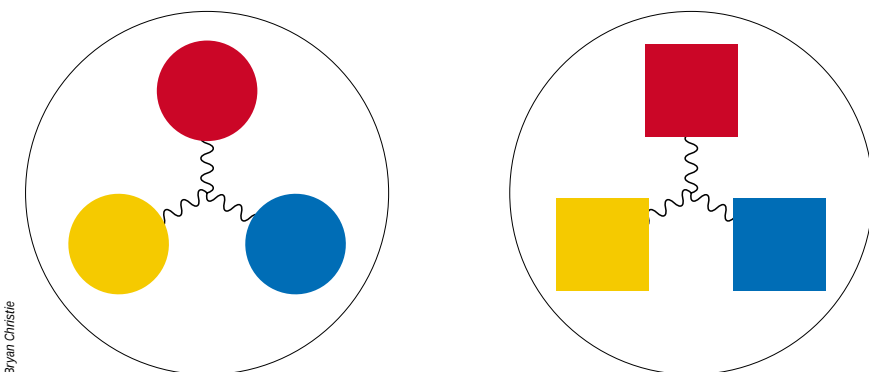
Durant de nombreuses années, les physiciens ont parlé des hybrides, sans les chercher vraiment : les difficultés de détection des trois mésons émis lors d'une désintégration semblaient insurmontables.

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



2. UN QUARK ROUGE émet un gluon rouge / antibleu et se transforme en un quark bleu. La charge de couleur est conservée, tout comme la charge électrique. Cette représentation de l'interaction forte donne une image de ce qui se passe constamment au sein des particules constituées de quarks et d'antiquarks.

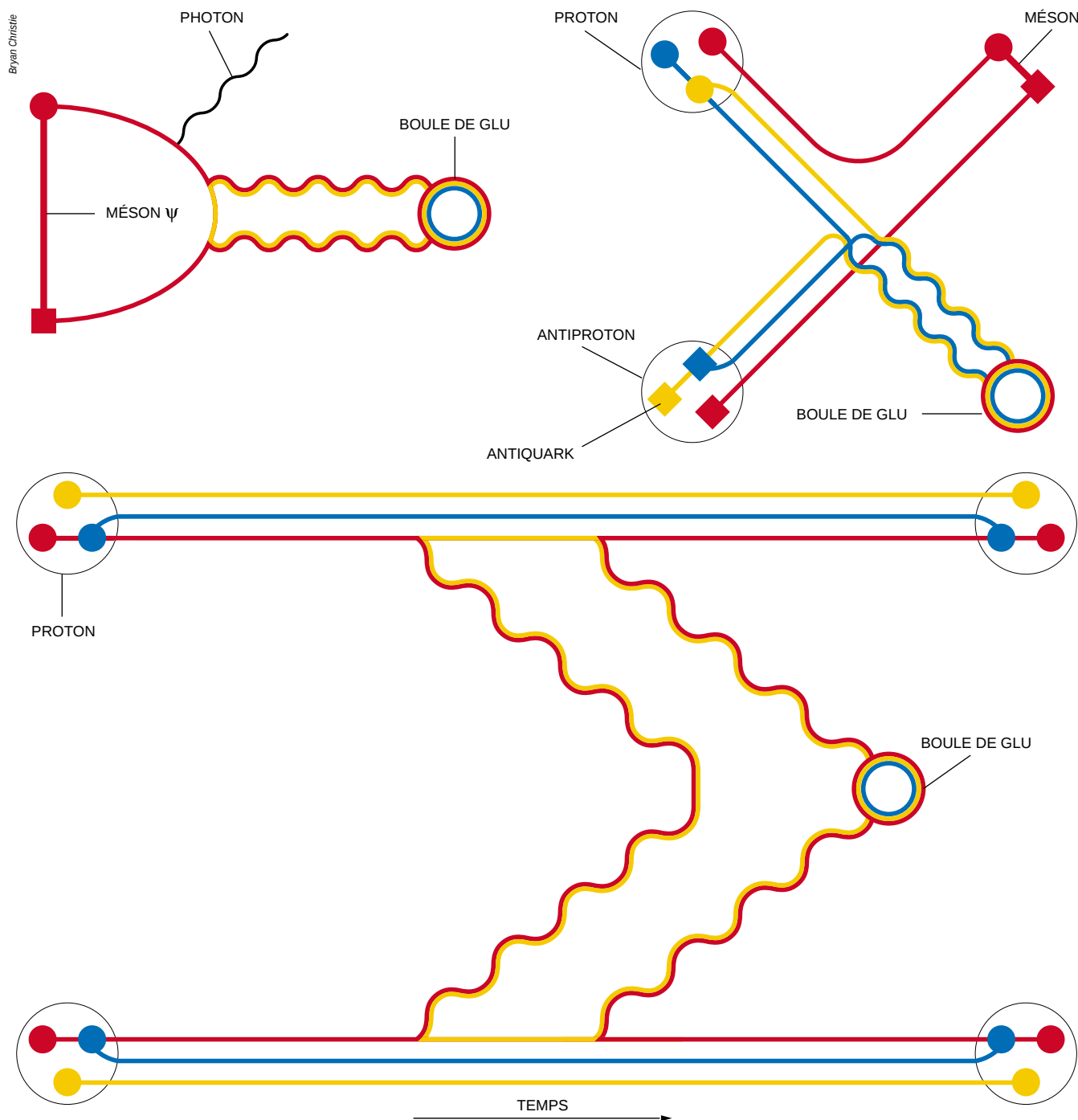


3. LES BARYONS (à gauche) ont une charge de couleur nulle ; ils sont «blancs». Les baryons les plus communs sont le proton et le neutron. Les quarks contenus dans un proton interagissent en échangeant des gluons et en modifiant constamment leur couleur. L'antiproton (à droite), par exemple, est un antibaryon composé de trois antiquarks respectivement antirouge, antibleu et antijaune.

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 $C = +1$.

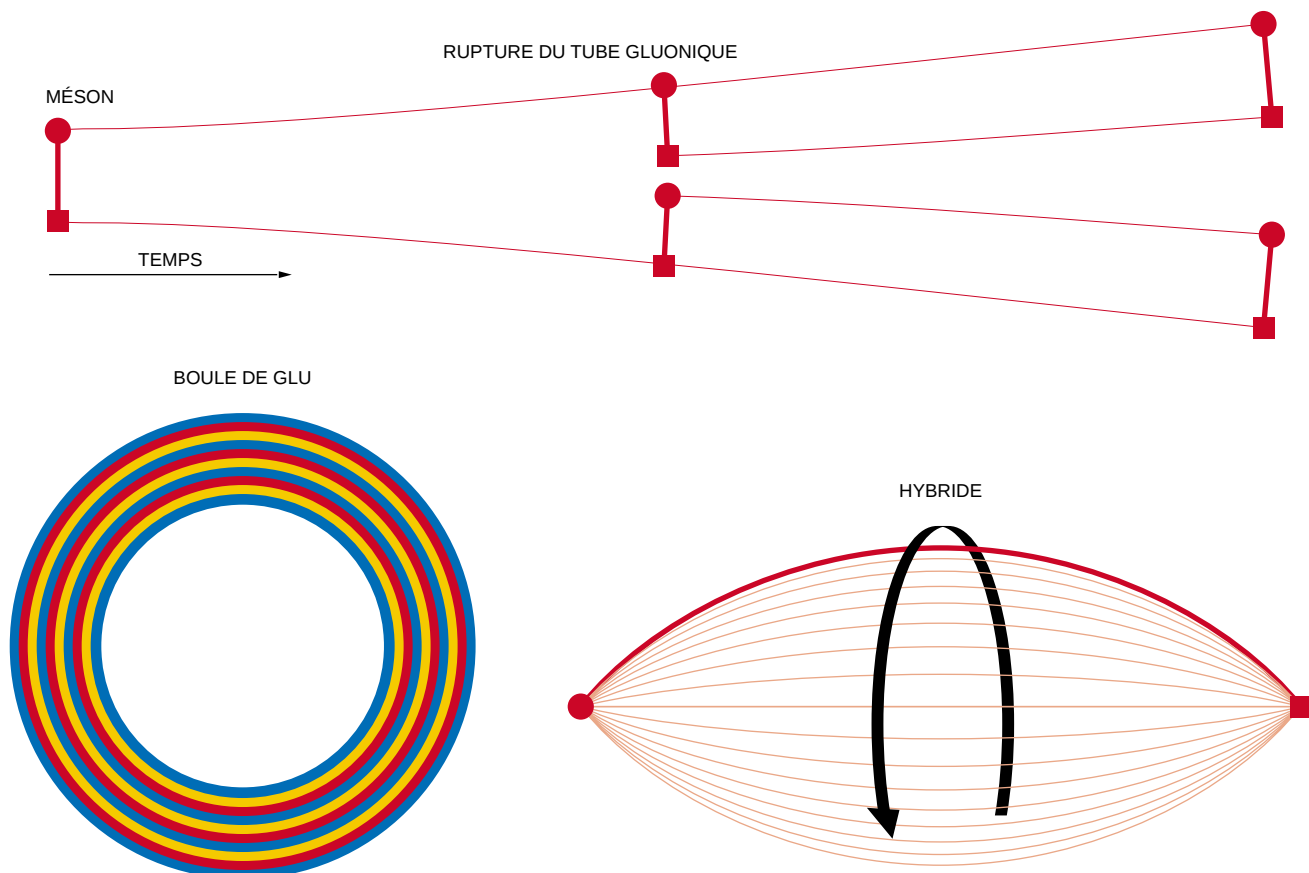
En 1997, des expérimentateurs du Laboratoire de Brookhaven, travaillant également avec des faisceaux de pions et des cibles de protons, ont trouvé cet hybride exotique. Peu après, le groupe Crystal Barrel (en français, tonneau de cristal) du CERN, à Genève, a détecté des traces de cette même particule.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



5. LE MÉSON, LA BOULE DE GLU ET L'HYBRIDE sont trois particules composées dont les constituants sont liés par un tube de gluons. Un méson est constitué d'un quark et d'un antiquark reliés par un tube de gluons. On considère que la couleur prend sa source dans le quark et «s'écoule» vers l'antiquark. Quand le tube se rompt, ses extrémités colorées se comportent de la même manière qu'un quark et un antiquark : deux mésons sont créés. Selon la chromodynamique quan-

tique sur réseau, une boule de glu est un anneau de glu, c'est-à-dire un tube de glu refermé sur lui-même et qui ne contient ni quark ni antiquark. La neutralisation des couleurs des gluons stabilise les boules de glu. Un hybride, autre particule hypothétique, est essentiellement un méson où le tube de gluons tourne autour de la droite reliant le quark et l'antiquark. On peut le considérer comme un méson formé d'un quark et d'un antiquark auquel est ajouté un gluon.

1 500 et 1 800 millions d'électronvolts – sans savoir que le groupe Crystal Barrel découvrait une particule de courte durée de vie baptisée $f_0(1500)$, dont le moment cinétique est nul, comme l'indice l'indique, tandis que sa masse se situe dans l'intervalle prévu. Cette particule est probablement la plus légère des boules de glu existantes.

En 1993, utilisant la théorie sur réseau, une équipe de l'Université d'Édimbourg a attribué aux boules de glu une masse de 1 550 millions d'électronvolts. Peu après, D. Weingarten et ses collaborateurs du Centre de recherches Thomas Watson ont calculé une masse de 1 740 millions d'électronvolts. Par la suite, ils ont prédit une durée de vie des boules de glu égale à 10^{-24} seconde (un milliardième de milliardième de seconde). Néanmoins, cet infime laps de temps est suffisant pour que la boule de glu soit détectable.

Depuis la fin des années 1980, les expérimentateurs soupçonnent

également l'existence d'un objet qui a été nommé $f_J(1710)$, dont le moment cinétique J reste inconnu. Si J est nul, cette particule sera une autre candidate au statut de boule de glu.

La théorie quantique complique encore tout, car elle prévoit le mélange de deux objets qui ont des nombres quantiques identiques et des masses peu différentes. Or, les calculs prédisent l'existence de deux mésons de nombres quantiques et de masses voisins de ceux de la boule de glu : la boule de glu devrait donc se mélanger à ces mésons pour donner trois objets plus compliqués, partiellement composés de glu. Le $f_0(1500)$ et le $f_J(1710)$ ont des caractéristiques telles que semblent en avoir des demi-boules de glu. On cherche à confirmer cette présomption.

Dans quelques semaines, au Japon et aux États-Unis, de nouveaux accélérateurs produiront en abondance des mésons B (voir *L'asymétrie de la matière*, par Helen Quinn et Michael Witherell, *Pour la Science*, janvier 1999).

On utilisera ces mésons pour étudier les boules de glu et les hybrides.

Ultérieurement, à l'Accélérateur Thomas Jefferson, en Virginie, on cherchera des boules de glu et des hybrides. En 2001, le CERN s'associera à ces recherches. Une de ces expériences fournira-t-elle des preuves définitives de l'existence des boules de glu ?

Frank CLOSE travaille au Laboratoire Rutherford Appleton de Cambridge. Philip PAGE travaille au Laboratoire national de Los Alamos.

Frank CLOSE, *The Quark Structure of Matter*, in *The New Physics*, sous la direction de Paul Davies, Cambridge University Press, 1989.

F.E. CLOSE, *Glueballs and Hybrids: New States of Matter*, in *Contemporary Physics*, vol. 38, n° 1, pp. 1-12, janvier 1997.

F.E. CLOSE, *Particle Physics: Exotic Meson Plays Hard-to-Get*, in *Nature*, vol. 389, pp. 230-231, 18 septembre 1997.

La physique du yo-yo

Le yo-yo moderne à roue libre facilite la réalisation de figures.

Comme une vague déferlante, le yo-yo balaie l'univers du jouet à intervalles réguliers. La mode actuelle n'est numériquement pas très impressionnante par rapport aux engouements passés : en 1962, la Société *Duncan* vendait annuellement 45 millions de yo-yo aux États-Unis. Grisée par son succès, elle investit trop en moyens publicitaires et, quand elle perdit son monopole sur la marque yo-yo considérée comme générique, elle fit faillite.

Les habitants des Philippines prétendent que le yo-yo était utilisé par les chasseurs comme instrument de jet. Assis dans un arbre, ils attendaient, dit-on, que la proie passe à leur portée pour lancer la pierre, qui, s'ils avaient manqué l'objectif, remontait pour revenir dans leur main. Une telle utilisation est peu probable, car il est plus facile de lancer une pierre attachée à une ficelle pour la récupération. De plus, la vitesse de translation d'une pierre lancée est supérieure à celle qui tourne au bout d'un yo-yo. Toujours est-il que yo-yo signifie «va-et-vient» en philippin.

Le yo-yo, apparaît en France durant la Révolution française : il est dénommé l'émigrette, une allusion aux valseuses hésitations des nobles qui émigraient vers Coblenz puis revenaient. On raconte que certains condamnés trompaient leur angoisse en y jouant durant le trajet qui les menaient à la guillotine. Avant la bataille de Waterloo, de nombreux généraux de Napoléon et leur adversaire, le duc de Wellington, attendaient le début des hostilités en pratiquant le yo-yo. Dans *Le mariage de Figaro*, le héros de Beaumarchais trahit sa nervosité, non en se tordant les mains, mais en jouant au yo-yo, qui «lui délasse l'esprit».

Le yo-yo moderne avec dispositif de débrayage, que nous décrivons ici, est l'invention de Michael Caffrey, lequel en déposât le brevet en 1980. La championne du monde 1 998 est Jennifer Baybrook, qui joue avec un yo-yo dans chaque main et exécute quelques centaines de figures. Les figures consistent à faire tourner le yo-yo autour de la main, à le faire rouler sur le sol et, au bas de sa course, à le faire osciller comme un pendule.

Les lecteurs intéressés peuvent se procurer le yo-yo décrit ici en le commandant à la boutique, page 23.

LE PRINCIPE DU YO-YO

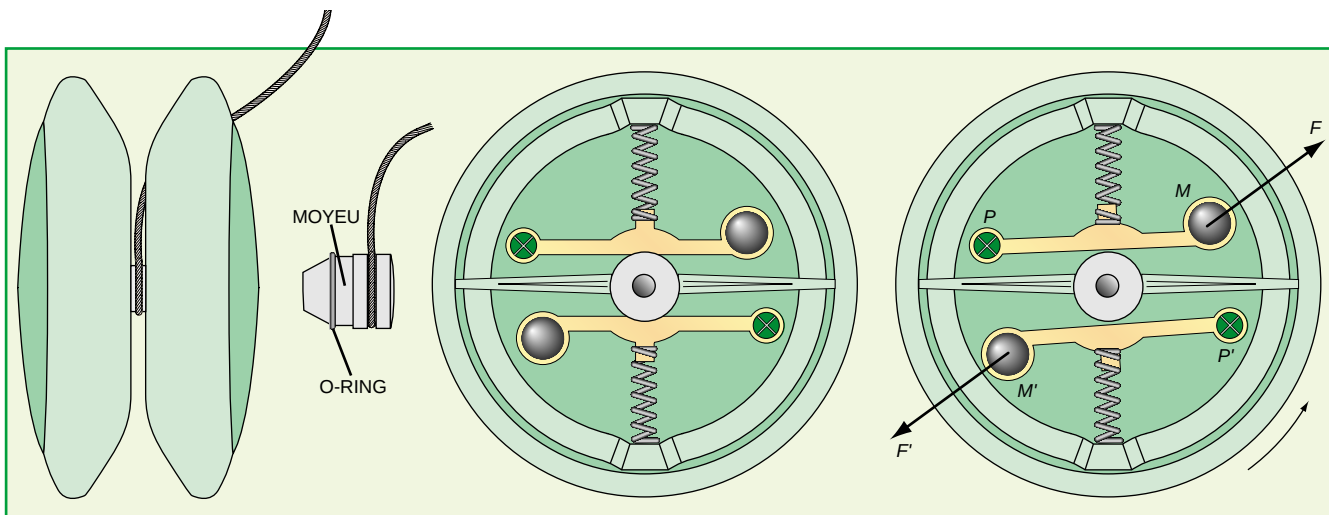
Quand le yo-yo tombe, la ficelle fait tourner le tambour du yo-yo. L'énergie potentielle est convertie, lors de la descente, en énergie de rotation et de translation du yo-yo. Lorsque le yo-yo remonte, ces deux énergies sont reconverties en énergie potentielle et, s'il n'y avait pas de friction, le yo-yo remonterait à la même altitude, pour se blottir, à vitesse de rotation nulle, dans la main du lanceur.

Le yo-yo tombe moins vite que s'il ne tournait pas. Un yo-yo tombe en chute libre d'un mètre en une demi-seconde ; lorsqu'il tourne sur une ficelle de même longueur, son temps de descente est entre une et deux secondes.

En bas de la course, il tourne à 30 tours par seconde. En bas de la ficelle, avant de remonter, il doit faire un demi-tour, ce qui lui prend environ un soixantième de seconde (voir la figure 2). Donc la remontée est presque instantanée par rapport à la durée de la chute.

Pour augmenter la vitesse de rotation du yo-yo, on déplace la main dans le sens contraire du mouvement du yo-yo, vers le haut quand le yo-yo descend, vers le bas quand il monte.

Les yo-yo modernes permettent la roue libre (*free-rolling*). En bas de course, s'ils tournent suffisamment vite, des masselottes s'écartent par la force centrifuge et des ressorts n'appuient plus sur un moyeu solidaire de la corde et enfilé sur l'axe. Alors le yo-yo tourne sans entraîner la ficelle et il ne remonte pas, du moins pendant un temps. Quand la vitesse de



1. Le dispositif de débrayage du yo-yo comporte un moyeu en téflon sur lequel est fixée la ficelle. Ce moyeu en téflon est entouré d'un O-ring qui, au repos, est écrasé par les mâchoires solidaires du corps du yo-yo. Quand la vitesse de rotation du yo-yo dépasse une valeur critique, la force centrifuge écarte les masselottes *M* et *M'* ; pivotant

autour des fixations *P* et *P'* les mâchoires s'écartent, désolidarisant le moyeu où est attachée la ficelle du corps du yo-yo. Le yo-yo tourne alors librement en roue libre jusqu'à ce que les frottements diminuent la vitesse de rotation du yo-yo au-dessous de la vitesse limite ; les mâchoires appuient alors sur le O-ring et le yo-yo remonte.