

Odeur de glu

par Frank Close

débuté par un exposé mémorable de Stephen Hawking sur la mécanique quantique de l'univers. Il s'est attaché à établir les conditions aux limites de ce problème gigantesque. Sans s'appuyer sur des modèles spécifiques, mais en utilisant uniquement de séduisants arguments de plausibilité, il a montré qu'un univers quantique fermé peut osciller.

Il n'y avait pour les spécialistes rien de nouveau dans ce travail, malgré cela le message en était clair: «du fait des singularités qui lui sont inhérentes, la relativité généralisée «classique» s'écroulera sous son propre poids» a affirmé Hawking, «condamnée tout comme l'était le modèle classique de l'atome».

La réunion méritait deux exposés de clôture. Pour les cosmologistes, Martin Rees (Cambridge) a avoué avoir ressenti le symposium comme une «expérience inhabituelle». Pour les physiciens des particules, John Ellis a parlé du «brillant passé qu'ont devant elles» la cosmologie et la physique des particules, se référant à leur nouvel intérêt commun pour la grande explosion primordiale et ses conséquences immédiates.

Le symposium a parfois reflété les difficultés de communication entre macro et microphysiciens. Si elle n'a peut-être pas comblé ce fossé, la réunion a certainement contribué à un rapprochement réciproque. La plupart des participants se sont séparés avec le sentiment d'avoir appris quelque chose, même si pour tous ce quelque chose ne fut pas le même! S'il reste beaucoup de chemin à parcourir, la réunion a montré que certaines des barrières hérissantes de la voie de la solution du plus grand des problèmes sont peut-être en train de disparaître.

Rapport de Gordon Fraser.

Peu après l'invention du modèle des quarks, il y a de cela vingt ans, les physiciens se rendirent compte qu'il était en difficulté. Le principe d'exclusion de Pauli interdisait l'existence de nombreux états bien connus (l'oméga-moins en particulier). Ce hadron formé de trois quarks étranges identiques, celui-là même dont la découverte avait confirmé le bien-fondé de la voie octuple, en tuait la descendance, le modèle des quarks.

A cette époque, la notion de quark de charge fractionnaire, particule jamais observée, répugnait à de nombreux physiciens. Le paradoxe provenant du principe d'exclusion suggérait que les quarks n'étaient au mieux qu'un artifice de calcul sans réalité physique. En face, quelques passionnés prenaient le parti que, s'agissant de drôles de particules, de drôles de loi devaient s'appliquer et que l'application du principe de Pauli pouvait receler quelques subtilités.

Aujourd'hui, nous admettons que les quarks obéissent bien au principe d'exclusion; la subtilité (cachée) réside dans la triade des genres, ou «couleurs», que peut prendre chaque saveur de quark (haut, bas, étrange, etc.). Ainsi, par exemple, si chacun des trois quarks étranges de l'oméga-moins est de couleur différente, ils ne sont plus identiques: Pauli repose en paix, l'oméga-moins peut exister.

La notion de couleur a prouvé sa fécondité en engendrant une théorie des forces entre quarks. La couleur semble être une sorte de charge, comme la charge électrique, et les théoriciens ont pu élaborer une théorie quantique relativiste des champs, la chromodynamique quantique (CDQ), dont nous connaissons les succès dans la description des interactions hadroniques de haute énergie. Mais son application à l'étude des états liés de quarks (les hadrons) a soulevé de nouveaux problèmes passionnants. Elle permet de prévoir une foule de nouveaux hadrons: «boules de glu», «hybrides», «hermaphrodites», «meiktons», dont aucun membre n'a encore été formelle-

ment observé, malgré l'intensification de la recherche ces dernières années. Que sont devenues les fleurs?

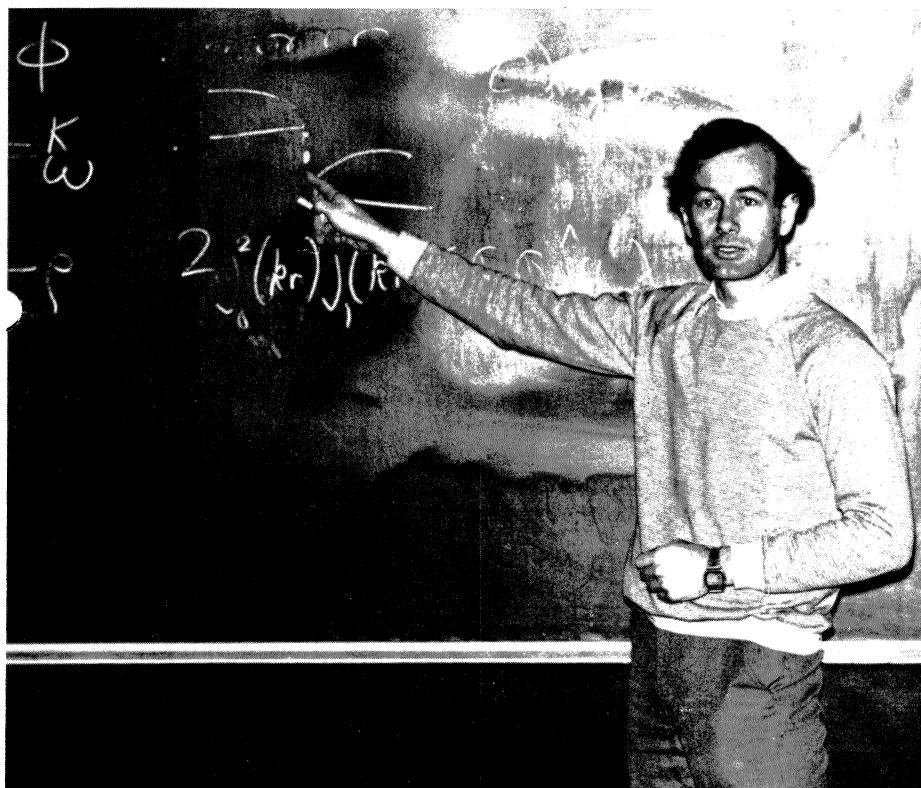
La force de couleur en action

Les charges électriques constituent la source des forces électromagnétiques. Comme le sait tout physicien, les charges contraires s'attirent, les charges semblables se repoussent. Possédant une charge électrique, les quarks sont sensibles aux forces électromagnétiques. C'est pourquoi, même des particules dépourvues de charge électrique nette, comme les neutrons, subissent des interactions électromagnétiques: leurs constituants sont porteurs de charge électrique. Les quarks possèdent également un autre type de charge, la couleur qui, semble-t-il, engendre des forces de manière analogue à la charge électrique avec toutefois une différence concernant une propriété importante: alors que les charges électriques sont soit positives, soit négatives, la couleur se trouve sous trois formes. Supposons que les quarks soient chargés (colorés) positivement et que les antiquarks le soient négativement. Alors, l'attraction des contraires, du quark rouge et de l'antiquark rouge par exemple, créerait les mésons bien connus.

Avec trois couleurs les attractions possibles sont plus variées que dans le cas plus simple de l'électromagnétisme. Les couleurs identiques, tout comme les charges identiques, se repoussent. Pour les attractions, il est nécessaire de généraliser légèrement la règle; non seulement les contraires s'attirent-ils mais également, sous certaines conditions, les couleurs différentes, comme le rouge et le bleu. Il faut tenir compte de l'état quantique du système des deux corpuscules colorés. S'il est antisymétrique par rapport à l'échange des indices de couleur, les corpuscules colorés s'attirent; s'il est symétrique, ils se repoussent.

Frank Close : « Que sont devenues les fleurs ? ».

(Photo Rutherford)



Cette subtilité est inhérente à la chromodynamique quantique (non commutative) et analogue au cas familier de l'échange d'isospin dans les forces nucléaires. Entre deux protons ou deux neutrons, symétriques vis-à-vis de la saveur, la force intrinsèque est répulsive: un proton et un neutron se repoussent dans l'état symétrique, mais s'attirent dans l'état antisymétrique (isoscalaire).

L'action des forces ternaires de la couleur est facilement généralisée depuis l'isospin. Il existe trois combinaisons de paires de quarks: rouge et jaune, jaune et bleu et rouge et bleu. Une paire de quarks n'attirera fortement un troisième quark que d'une couleur différente des siennes et si l'état quantique ainsi formé est antisymétrique vis-à-vis de l'échange des couleurs de l'une quelconque des paires. Ainsi, des groupements rouge-jaune-bleu peuvent-ils se former donnant naissance aux protons, aux neutrons, et aux baryons bien connus. On remarquera que les at-

tractions et répulsions sont telles que nécessairement trois quarks sont présents dans le baryon, tous trois de couleurs différentes.

Si l'on approche un quatrième quark de ce trio, il sera de même couleur que l'un d'entre eux, donc repoussé par celui-là, mais il sera attiré par les deux autres; l'attraction ou la répulsion. Quelle sera la force dominante? Dans ce cas, il y a équilibre: l'attraction exige une combinaison antisymétrique dont la probabilité est de 50 %, et comme deux quarks attirent le nouveau venu et que le troisième le repousse, le bilan est nul. Bien que cet exemple académique n'explique pas l'interdiction de l'ionisation de la couleur (existence de quarks libres), il nous permet au moins d'entrevoir de quelle manière les propriétés des forces de couleur donnent naissance aux groupements de quarks et d'antiquarks observés. Globalement, la couleur des hadrons est nulle, mais ils subissent l'interaction forte parce que leurs constituants sont colorés.

Les gluons sont à la couleur ce que les photons sont à la charge électrique. Les photons transmettent les forces électriques mais ils ne sont pas eux-mêmes porteurs de charge. Ils peuvent ainsi se propager librement dans l'espace. Toutefois, dans le cas de la couleur, l'opulence d'une triade produit des gluons porteurs de couleur. Non seulement, ils transmettent directement la force mais ils la subissent, même au cours de leur propagation. La dépendance spatiale des forces de couleur est donc très différente de celle de l'électromagnétisme.

Gluons et hadrons gluoniques

Si les gluons sont colorés, ils peuvent s'attirer mutuellement en vertu de ces mêmes forces de couleur qui piègent les quarks en groupements incolores. Donc, nous pouvons imaginer l'existence d'états liés des gluons, d'abord appelés mésons gluoniques, mais maintenant généralement dénommés «boules de glu» ou «gluonium». Des hadrons «hybrides» (encore appelés «hermaphrodites» ou «meiktons»), contenant à la fois des quarks et des gluons dans des états excités, sont également possibles.

Dans le modèle heuristique ci-dessus, un méson hybride provient par exemple de l'attraction d'un quark rouge et d'un antiquark bleu. Ces couleurs différentes s'attirent, mais sans se neutraliser; un gluon coloré peut donc être attiré par la paire, neutralisant de la sorte les forces de couleur. Quelques-unes au moins de ces configurations ne sont pas de simples mésons classiques quark-antiquark transformés de jauge. Ainsi, un groupe quark-antiquark-gluon incolore peut-il former un méson hybride. Des baryons hybrides sont également prévus. Je désignerai les boules de glu et les hybrides sous le nom générique d'«excigluons» pour les distinguer de leurs cousins d'existence bien établie les exciquarks (excitations de quarks) classiques.

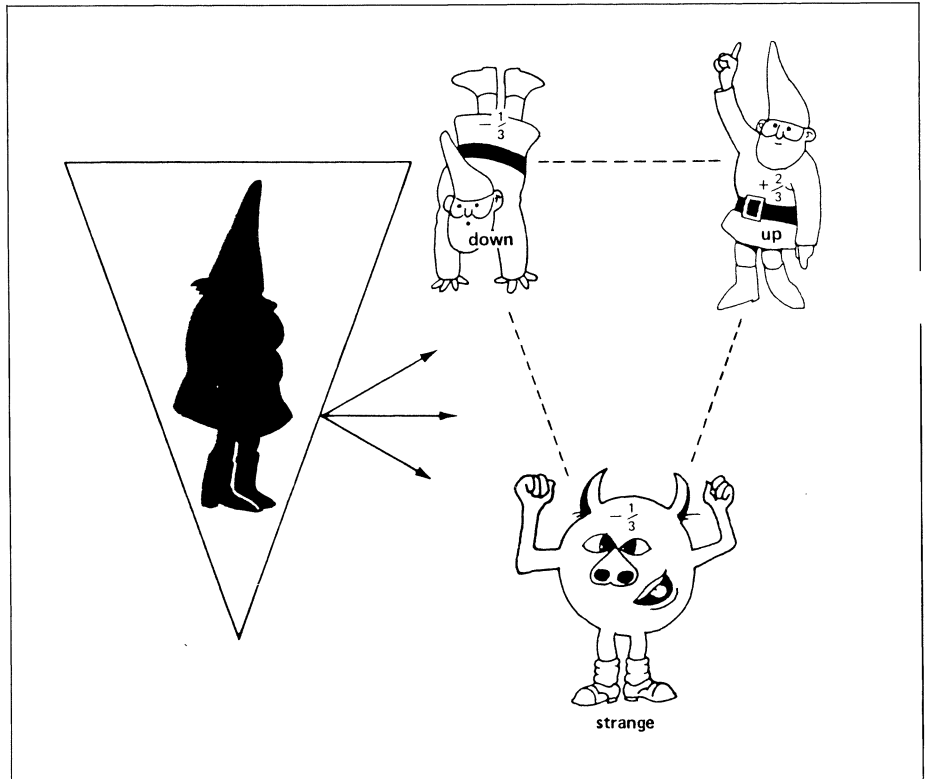
Les trois quarks les plus légers, illustration de Frank Close extraite de son récent livre «L'oignon cosmique». Les nombres indiquent les charges électriques portées par chacun des quarks.

Avons-nous quelque chance de produire, puis d'identifier des exci-glions? Il y a quelques années, on aurait penché avec beaucoup de confiance pour une réponse positive à cette double question. Aujourd'hui, on est moins certain de pouvoir identifier les gluoniums, bien que l'on continue de considérer avec optimisme les possibilités de les produire aisément en laboratoire. La découverte de nouveaux états hadroniques dans de «bonnes expériences» a, peut-être paradoxalement, entraîné ce changement d'opinion. Pourquoi?

Pendant près d'un quart de siècle, nous avons étudié des millions d'interactions de pions, de protons et d'autres particules bien connues et, chemin faisant, découvert des dizaines de résonances qui ensemble ont permis d'asseoir le modèle des quarks décrivant la matière hadronique. Il existe aujourd'hui un tissu serré d'informations prouvant la justesse du modèle. Il n'existe aucune résonance établie qui n'ait une place dans le modèle des quarks; pour les hadrons, la CDQ permet d'expliquer relativement bien les régularités des valeurs des masses; les forces de couleur dépendantes du spin entre les quarks constituants permettent de reproduire qualitativement et même parfois quantitativement le spectre d'énergie observé.

Des faisceaux et des cibles de quarks (enfouis dans leurs hadrons-mères) ont servi à ces expériences «classiques», de sorte que la production prédominante observée consistait en groupements de quarks, surtout si l'étude portait sur les débris proches de la direction avant.

Pour observer des boules de glu, nous devons soit d'abord éliminer les quarks, soit chercher dans les régions que les quarks sont moins susceptibles d'occuper. Cette seconde méthode a récemment été employée au CERN, aux ISR en particulier, où plusieurs groupes ont observé les hadrons produits dans la région de collision centrale. Les gluons engendrés quand deux



quarks se croisent en se frôlant peuvent entrer en résonance et former des gluoniums.

Ici, les difficultés sont évidentes. Peut-on être certain que les quarks sont totalement sans importance dans la région étudiée? Bien sûr, si vous avez suffisamment de chance pour découvrir deux ou trois pics bien nets, jamais mis en évidence ailleurs et se détachant aussi clairement que le fameux J/psi, le monde entier sera à vos pieds. Malheureusement, la nature ne consent de tels dons qu'avec parcimonie. Et même quand elle le fait, il n'est pas facile d'identifier la découverte.

C'est ce qu'illustrent les expériences à élimination de quarks. Elles ont clairement mis en évidence de nouveaux états et les théoriciens ont trouvé là une nouvelle mine d'articles, dans lesquels ils s'interrogent sur la nature de ces états. S'agit-il des gluoniums si recherchés ou simplement de formes excitées de la matière quarkonique classique?

Ces expériences comportent une

annihilation électron-positon à l'énergie exactement nécessaire pour créer des mésons lourds. J/psi ou upsilon par exemple. Le J/psi est constitué d'un quark charme et d'un antiquark charme. De même l'upsilon est formé d'un quark et d'un antiquark de beauté. Ces états ne survivent que le temps nécessaire pour l'annihilation mutuelle du quark et de l'antiquark. Puis, leur énergie se transforme en rayonnement de photons et/ou de gluons. Les gluons peuvent alors former des amas gluoniques. C'est du moins ce que prédit la théorie. La désintégration en un photon plus quelques mésons est particulièrement intéressante. D'après la théorie, une désintégration de psi sur sept devrait être de ce type.

Effectivement, à peu près 15% des désintégrations de psi sont radiatives; l'impression qualitative qu'il y a glu sous roche semble ainsi corroborée quantitativement. Si l'on décèle un nouvel état parmi les débris accompagnant le photon, il est

bien pourvu des attributs requis pour être gluonique. De nouveaux états également ont été découverts (iota, thêta) et la résonance dikaonique 2,2 GeV observée l'été dernier à l'anneau SPEAR par le groupe Mark-III (voir numéro d'octobre, page 311).

Cette bonne nouvelle est quelque peu assombrie par le fait que plusieurs mésons bien connus figurent également, ostensiblement, dans ces données, en particulier le $f(1270)$, l'êta et l'êta prime. Les optimistes considèrent que c'est une preuve qu'effectivement les êta sont intimement liés à la glu et ils relèvent que depuis des années on observe et on néglige une structure intéressante voisine du f . Pour certains chercheurs, c'est une indication que le f n'est pas simplement cet état de mélange idéal de quarks que nous avions pensé.

L'argument pro-gluonique aurait eu plus de force si la désintégration de ces états était plus conforme aux prévisions. Etant donné que les gluons sont dénués de saveur, on a d'abord supposé que leurs produits de désintégration devraient se répartir également entre particules étranges et non étranges. Cependant, on enregistre une copieuse désintégration de l'iota en états finals de kaons (étranges), mais pas en états non étranges (tout à fait l'inverse des prédictions de la « légende » des boules de glu). De même le thêta et le nouvel état à 2,2 GeV ne se désintègrent pas facilement en pions nombreux. Peut-être sont-ils des états formés de quarks classiques ou simplement des combinaisons multiquarks inhabituelles.

Poussés en partie par les difficultés rencontrées avec les gluoniums, les théoriciens ont récemment prêté une attention croissante au fait que d'autres manifestations spectroscopiques des gluons pourraient être de meilleurs sujets d'expérimentation. Leur intérêt s'est porté plus particulièrement sur les hadrons « hybrides », dans lesquels quarks et gluons se trouvent sous forme de degrés de liberté excités.

Leurs propriétés ont été étudiées de diverses façons. Dans certains modèles (celui du sac), les états les plus bas en énergie comprennent des quarks et un seul gluon. Dans d'autres, ils correspondent à des excitations des « cordes » entre quarks. L'adjonction d'un gluon aux quarks permet l'existence de nouveaux états exotiques dont les nombres quantiques sont autrement interdits. La théorie autorise quelque espoir d'observer certains de ces états qui, bien qu'inhibés dans les désintégrations radiatives des J/ψ , pourraient être visibles dans les prochaines expériences proton-antiproton de basse énergie au nouvel anneau LEAR du CERN.

Il n'est pas possible d'éliminer tous ces états par des astuces théoriques de transformation de jauge. Les déplacements d'énergie dépendant du spin auxquels donnent lieu les forces de couleur entre quarks et gluons ont maintenant été calculés par divers groupes et leurs résultats concordent. Ils rappellent les observations faites sur le nonet des mésons bien connu qui inclut les pions et les kaons.

Quelques théoriciens ont exploité cette observation et montré que le spectre de masse de ces mésons peut être compris au prix de leurs métamorphoses en mélanges plutôt impurs d'hybrides et d'états quark-antiquark. Il est bien plus difficile d'écarter cette possibilité qu'on ne pourrait l'imaginer. En effet, les conséquences pour les baryons en ont été étudiées en détail ces derniers mois dans des tentatives menées pour discréditer toute la notion d'hybrides.

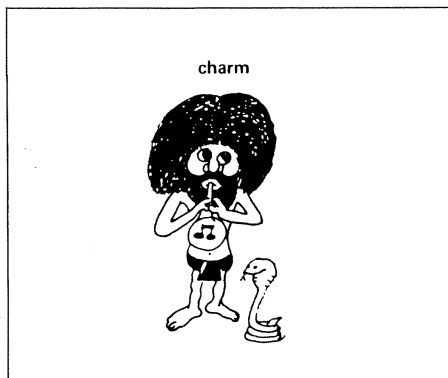
Si, dans le cas des mésons, les incertitudes expérimentales restantes sont suffisantes pour masquer les hybrides, sûrement le spectre des baryons est tellement bien connu qu'on ne s'attend guère à y trouver place pour cette pléthore d'états nouveaux! En fait les résultats ont été des plus surprenants. D'abord, les propriétés électromagnétiques: si l'une des composantes du proton

est constituée de quarks d'un octet de couleur et d'un gluon qui neutralise la couleur, on pourrait s'attendre à ce que les conséquences du principe de Pauli bouleversent tellement l'équilibre des saveurs et spins des quarks que les prévisions relatives aux moments magnétiques des divers baryons seraient gâchées, plus particulièrement le fameux rapport 3/2 entre les moments du proton et du neutron. En fait, ce rapport est conservé. La photoexcitation des protons en hybrides a été calculée et elle est rare semble-t-il. La spectroscopie des baryons ne paraît pas menacée.

Alors, quelles sont les perspectives d'établir l'existence des mésons hybrides ou gluoniques? Du point de vue de la spectroscopie attendue, les idées théoriques convergent. En ce qui concerne les mésons gluoniques, toutes les méthodes semblent s'accorder à prévoir que l'état scalaire (qui ressemble au vide) devrait être le plus léger (sa masse serait comprise entre 0,5 et 1,5 GeV). Les autres états devraient être un peu plus lourds. Le méson scalaire possède la meilleure assise théorique, mais on ne l'a pas observé dans les désintégrations radiatives des J/ψ qui constituent, en principe, la meilleure usine à glu qui soit. Par contre, d'autres mésons gluoniques candidats ont été observés.

Le méson scalaire se cacherait-il sous le $f(1270)$? Pourrait-il être étroit et situé à seulement 600 MeV, et aurait-il par conséquent échappé aux recherches dans les analyses des spectres à deux pions? Y a-t-il des problèmes d'origine théorique liés au vide? Les interactions quark-gluon changent-elles radicalement le modèle théorique qui s'applique seulement aux gluons?

Il est intéressant de considérer plus particulièrement ce dernier point. Tout comme certains mésons sont des mélanges de quarks de diverses saveurs, les mésons gluoniques pourraient être des superpositions de composantes quarkoniques et gluoniques fortement mélangées.



Si les mésons sont en général des mélanges très impurs de quarks et de gluons, la recherche d'états gluoniques individuels, identifiables et purs est menacée. Au lieu de preuves directes nous devons peut-être rechercher dans certaines régions de masse les preuves d'une « surpopulation » d'états, incompatible avec le seul modèle des quarks. Il faudrait alors faire appel à de nouveaux degrés de liberté, aux excigluons par exemple.

A défaut d'un tel don de la nature, il reste une autre stratégie pour nous permettre d'identifier les états dotés d'une composante gluonique notable. D'après la « légende » déclarant l'indépendance vis-à-vis de la saveur des couplages quarks-gluons, la désintégration des hadrons gluoniques se ferait également vers toutes les saveurs. Ce raisonnement est toutefois trop simpliste. En général les forces agissant sur les quarks étranges et non étranges sont différentes. On pourrait naturellement en attendre une production de particules étranges réduite par rapport à celle d'autres, non étranges, moins massives ; c'est un phénomène bien connu en physique hadronique et, d'après la « légende », il est plus facile à partir du vide de créer des quarks légers que les quarks étranges plus massifs.

Il est peut-être imprudent de supposer que cette légende s'applique nécessairement aux désintégrations d'états gluoniques. En effet, si l'on calcule (dans le modèle du sac) les couplages des quarks et des gluons,

on s'aperçoit que le couplage effectif d'un gluon et d'une paire de quarks ou d'antiquarks peut être plus fort dans le cas d'une paire étrange. Aussi, bien que l'échange d'un gluon entre quarks lourds soit moindre qu'entre quarks légers, la production d'une paire massive peut être renforcée dans certains cas.

Cela suggère que les désintégrations d'états gluoniques peuvent produire préférentiellement des quarks et antiquarks étranges ; quelques gluoniums et mésons hybrides possèdent des modes de désintégration importants contenant jusqu'à quatre kaons. Les états liés classiques d'un quark et d'un antiquark étranges se désintègrent en paires de kaons, mais une désintégration préférentielle en quatre kaons aux dépens des pions serait un phénomène plutôt inattendu. Des boules de glu tensorielles (spin deux) de plus de 2 GeV devraient, prévoit-on, comprendre deux gluons, qui tous deux engendreraient préférentiellement des quarks étranges. Donc, des paires de mésons ϕ et états à quatre kaons pourraient constituer des signatures nettes. L'interprétation de l'iota comme un gluonium, selon le modèle du sac, exige qu'il contienne un gluon et des quarks de préférence étranges. Comme leurs couleurs ne se neutralisent pas, les deux quarks ne peuvent émerger sous la forme d'un méson ϕ , mais ils se séparent et finissent dans des hadrons étranges différents, ce qui concorde avec l'affinité apparente pour les particules étranges observée dans les désintégrations des nouveaux états issus de J/psi.

Dans les collisions pion négatif-proton, on affirme avoir mis en évidence, dans le mode de désintégration « gluophile » en paires de mésons ϕ (voir numéro de décembre 1982, page 416), trois mésons tenseurs qui ne sont pas observés dans les autres modes. Juste au-dessus de 2 GeV, on prévoit un gluonium tenseur et un hybride tenseur dotés de cette « préférence pour l'étrange » ;

on attend également à cette masse des mésons tenseurs excités contenant une paire quark-antiquark étrange. Il devrait donc se produire un mélange important, ce qui tendrait à expliquer les grandes largeurs de désintégration de ces candidats.

Cette prédilection pour la production de particules étranges dans les désintégrations gluoniques pourrait être artificiellement introduite par le modèle. Toutefois, si elle correspond à un phénomène réel, l'étude des modes multikaoniques pourrait être avantageuse.

Si des structures sont observées dans ces modes et produites dans des processus « gluophiles », nous pourrions avoir de bonnes chances d'établir la spectroscopie des excigluons. Par ailleurs, on attend avec espoir la multiplication des pseudoscalaires de faible masse ou la découverte d'un état métastable prédominant qui concorde parfaitement avec les prévisions.

Tout le monde semble croire à l'existence d'états gluoniques mais, pour les identifier avec certitude, il faudra peut-être d'abord mieux comprendre la spectroscopie des mésons classiques. Etant donné le rôle fondamental que jouent les gluons dans l'ordre de la nature, il serait déconcertant que seuls les spécialistes de la spectroscopie hadronique puissent les observer. F.C.

Frank Close du Laboratoire Rutherford Appleton, Royaume-Uni, est non seulement un expert en spectroscopie hadronique mais également un écrivain et un chroniqueur de radio sur la physique des particules. Il a récemment publié chez Heinemann Educational Books, à Londres, un livre intitulé « The Cosmic Onion — Quarks and the Nature of the Universe ».