

# David Gross : « Pourquoi les quarks restent invisibles »

Au début des années soixante-dix, les physiciens découvraient une nouvelle échelle dans la structure de la matière. Les protons et les neutrons, constituants du noyau atomique, semblaient eux-mêmes constitués de particules plus élémentaires encore : les quarks. Mais tandis qu'ils semblaient se mouvoir librement dans les protons, impossible d'isoler l'un de ces quarks. C'est l'explication de ce phénomène qu'a récompensée, en 2004, le prix Nobel de physique.

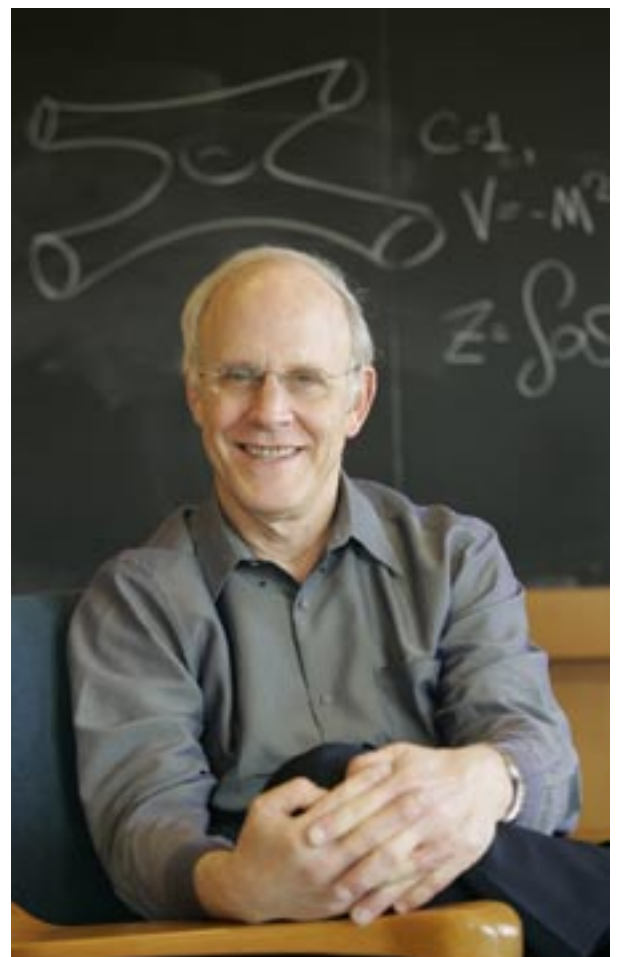
**David Gross,**  
Prix Nobel de physique 2004,  
est directeur de l'institut  
Kakli de physique théorique  
de l'université de Californie  
à Santa Barbara.

**LA RECHERCHE :** Pour quels travaux précisément avez-vous reçu le prix Nobel ?

**DAVID GROSS :** Ce prix a récompensé la découverte de la « liberté asymptotique ». Il s'agit probablement de l'avancée la plus importante dans la théorie de l'interaction nucléaire forte, qui relie les quarks, constituants des protons et des neutrons. Contrairement aux autres forces, dont l'intensité diminue lorsque la distance d'interaction augmente, celle-ci tend à diminuer lorsque la distance entre les quarks diminue. C'est ce comportement des quarks, presque libres à courte distance, et fortement liés à longue distance, que nous avons appelé liberté asymptotique.

**Comment la liberté asymptotique s'intègre-t-elle aux autres théories physiques ?**

**DAVID GROSS :** Pour appréhender ces travaux, il est nécessaire de faire un petit retour sur la physique du XX<sup>e</sup> siècle, et notamment sur les interactions intervenant au niveau nucléaire. Nous connaissons depuis longtemps les deux forces les plus perceptibles quotidiennement : la gravitation et les forces électromagnétiques. À la fin des années soixante, une théorie a permis de comprendre la force nucléaire faible, responsable de la radioactivité, et d'établir que cette force et la force électromagnétique sont unies au sein de la force électrofaible. Enfin, dans les années soixante-dix, s'est développée la théorie de l'interaction nucléaire forte, dont la liberté asymptotique est la clé de voûte. Cette théorie, appelée « chromodynamique quantique », est le dernier palier de ce que l'on →



⇒ appelle le « Modèle Standard », c'est-à-dire la théorie des particules élémentaires. C'est une théorie qui fonctionne remarquablement bien aujourd'hui.

**Comment vous êtes-vous intéressé à ce sujet ?**

**DAVID GROSS :** Pour moi, l'histoire a commencé en 1968, avec le SLAC, un nouvel accélérateur de particules qui venait d'être construit à l'université Stanford, en Californie. Cet accélérateur d'électrons est un gigantesque microscope permettant de sonder la structure des protons. Un phénomène assez surprenant a alors été observé : les protons, que l'on pensait être des particules élémentaires, réagissaient comme s'ils étaient formés de constituants ponctuels.

Ces constituants se comportaient comme s'ils se déplaçaient dans les protons sans aucune interaction entre eux, telles des particules bougeant librement dans une boîte. Ces expériences au SLAC ont permis de déterminer la nature et la charge de ces constituants élémentaires, et ont montré qu'ils avaient toutes les propriétés d'objets prédits quelques années auparavant, appelés quarks [1]. Cette découverte était réellement étonnante. Certains l'ont ignorée, la trouvant trop folle. D'autres l'ont prise au sérieux, mais nous n'avions aucun moyen d'apprendre comment fonctionnait l'interaction forte qui les reliait. Comment expliquer qu'à la fois ces constituants élémentaires ne subissent aucune force à courte distance et qu'on ne puisse pas les libérer en les bombardant ? C'était vraiment mystérieux.

**Pourquoi cette physique nucléaire était-elle si mystérieuse ?**

**DAVID GROSS :** Les atomes sont plus faciles à comprendre : quand vous cassez un atome, vous éjectez un électron que vous pouvez observer. Vous en déduisez que l'atome contient des électrons, et que les forces qui les lient sont les mêmes que celles de l'électricité. Mais dans le cas des constituants des noyaux de l'atome, la nature est bien plus maligne. Il apparaît que les protons et les neutrons (les nucléons) sont formés de particules que l'on ne peut pas isoler. Ni leurs charges ni les forces qui les lient ne se manifestent à l'extérieur des nucléons. Les physiciens ne comprenaient rien. Ils continuaient pourtant à travailler, étudiant les symétries de ces particules pour en déduire les propriétés. L'une des plus étranges était que ces quarks possédaient une fraction de la charge électrique de l'électron, que l'on croyait alors la plus petite existante. Personne n'avait jamais vu cela.

**Comment avez-vous découvert la liberté asymptotique ?**

**DAVID GROSS :** Certains ont cherché des explications dans la théorie quantique des champs, l'outil principal que nous avons utilisé au long du XX<sup>e</sup> siècle pour expliquer la physique. Cela ne fonctionnait pas. En 1972, j'ai décidé de me consacrer à ce problème. Je doutais que quelqu'un puisse

un jour expliquer avec la théorie des champs ce que l'on observait au SLAC, et j'ai décidé de prendre le problème différemment. Avec Franck Wilczek, mon premier étudiant, nous nous sommes rendu compte qu'il existait une autre situation dans laquelle les interactions sont plus faibles à courte distance qu'à grande distance : le paramagnétisme. Un matériau paramagnétique est formé de nombreux atomes possédant chacun un moment magnétique permanent. Ces moments magnétiques pointent dans toutes les directions : ils ne s'influencent pas entre voisins. Mais si l'on dispose le matériau dans un champ magnétique extérieur, les moments magnétiques s'alignent tous. Je me suis dit qu'il se passait quelque chose d'analogique en chromodynamique quantique. Franck et moi avons d'abord montré qu'un effet similaire au magnétisme expliquait le comportement des quarks au sein des nucléons.

Puis nous avons prouvé qu'aucune autre théorie ne pouvait expliquer ces phénomènes. David Politzer, alors étudiant à l'université Harvard, a fait indépendamment la même découverte, en étudiant comment les forces variaient dans ce genre de systèmes.

**Qu'est-ce que cette découverte a changé pour vous ?**

**DAVID GROSS :** Un reporter m'a demandé si nous avions célébré cette découverte. Je lui ai répondu : « Vous êtes fou ? Une telle découverte est comme un paysage qui se dévoile : on voit à des kilomètres, de nombreuses possibilités s'offrent à nous. Alors on ne célèbre pas, on calcule ! » Comme la force est presque nulle à courte distance, le calcul est faisable. Pour comprendre le comportement des quarks, nous le comparons à ce qui se passerait en l'absence d'interaction. Cela fait trente ans que des physiciens se passionnent pour ces calculs, puisqu'ils permettent enfin d'expliquer des expériences jusque-là incompréhensibles. À grande distance, en revanche, cela devient plus compliqué. Nous avons aussi immédiatement réalisé que la liberté asymptotique pouvait expliquer pourquoi nous n'avions jamais vu de quark : l'interaction devient si forte à grande distance qu'on ne peut jamais séparer les quarks. Les membres du comité Nobel comparent cela à un élastique, c'est une très bonne image : si l'on rapproche les deux extrémités de l'élastique, on ne ressent aucune force. Mais plus on tire, plus l'énergie de l'élastique est grande. Il faudrait une énergie infinie pour éloigner les deux extrémités à l'infini (en supposant que l'élastique soit assez solide, bien sûr).

**Aujourd'hui, que sait-on des quarks et des forces qui les lient ?**

**DAVID GROSS :** Nous savons qu'il existe six types de quarks (on parle de six « saveurs »). De plus, ces quarks portent ce que l'on appelle des « charges de couleur », rouge, bleue et verte. Enfin, ils portent une charge électrique qui est une fraction de la charge de l'électron :  $-1/3$  ou  $+2/3$ . Dans un



proton, par exemple, nous trouvons deux quarks de charge  $2/3$  et un quark de charge  $-1/3$ , donc la charge totale est de 1. Et chacun des quarks porte une « couleur » différente : l'ensemble est neutre du point de vue de la couleur. Par ailleurs, les forces entre les quarks dans les noyaux sont bien plus compliquées que les forces électromagnétiques dans les atomes. En électromagnétisme, les interactions sont dues à des échanges de photons. Ces particules neutres ne transportent pas de charge électrique, et l'interaction entre les objets ne modifie donc pas leur nature : un électron reste un électron. En chromodynamique quantique, en revanche, les quarks changent de couleur en interagissant. Cela signifie que les forces transmettent les couleurs, donc leurs transmetteurs sont chargés en couleur. Il n'existe pas qu'un seul transmetteur d'interaction, mais huit différents, que nous appelons gluons. L'un change un quark rouge en un quark vert, l'autre en un quark bleu, etc. Comme ils sont « chargés », les gluons interagissent aussi les uns avec les autres. Mais malgré cette complexité, la théorie marche remarquablement bien. Dans de

nombreux cas, l'accord entre la théorie et les expériences est supérieur à 1 %. Nous pouvons calculer la masse des particules, et nous pouvons expliquer les expériences à courte distance avec ces méthodes. Nous continuons à travailler pour comprendre les interactions à plus longue distance, lorsque les forces deviennent très intenses.

**Serait-il quand même possible de séparer les quarks si on leur fournissait assez d'énergie ?**

**DAVID GROSS :** Je pense qu'il est impossible de séparer des quarks. Lorsqu'on tente de le faire, l'énergie que l'on apporte sert à créer des paires réelles de quarks et d'anti-quarks, à partir de paires virtuelles contenues dans le vide. Il faut moins d'énergie pour créer une paire de quarks que pour les séparer. On observe cela dans les accélérateurs : lorsque l'on projette des protons les uns contre les autres, on crée des centaines de particules, des hadrons. Pour reprendre l'analogie avec l'élastique, c'est comme si, en tirant sur un élastique, on en créait beaucoup d'autres. Si l'on porte la température à plusieurs centaines de millions ⇒

[1] Daniel Husson, « Les quarks », *La Recherche*, mars 2001, p. 62.

# ENTRETIEN

## PHYSIQUE

⇒ de degrés, les expériences et la théorie nous indiquent que tous les protons fusionnent, donnant naissance à une nouvelle phase de la matière, appelée plasma de quarks-gluons, dans lequel les quarks et les gluons sont libres [2]. Nous pensons que c'est ce qui existait aux premiers temps de l'Univers, avant que ces particules ne s'agrègent pour



**Les théoriciens font ce qu'ils peuvent. Mais les preuves expérimentales sont très importantes. La nature est souvent plus astucieuse que nous**

former les nucléons. L'étude des premiers temps de l'Univers est l'une des principales applications de la chromodynamique quantique. C'est l'avantage de cette théorie : à l'inverse des autres, cela devient plus simple à haute énergie et à haute densité. En extrapolant ce que nous savons à basse énergie, nous espérons mieux comprendre les débuts de l'Univers.

**Quelles ont été vos recherches depuis la découverte de la liberté asymptotique ?**

**DAVID GROSS :** En 1973, j'ai travaillé sur les conséquences de cette théorie en physique nucléaire. Puis j'ai mené des recherches dans plusieurs directions, tout en continuant à travailler sur la liberté asymptotique. Mais dans les années quatre-vingt, je me suis tourné vers une théorie beaucoup plus simple : la théorie des cordes. Cela fait vingt ans que je travaille sur ce sujet. Cette théorie a été imaginée initialement pour expliquer la force nucléaire, et c'est pourquoi, dans l'institut que je dirige en Californie, nous avons actuellement un programme sur le lien entre la théorie des cordes et la chromodynamique quantique.

**Quelle est la nature de ces liens ?**

**DAVID GROSS :** La théorie des cordes est comme l'Empire romain : elle dévore tout. Elle permet de prendre les problèmes d'une manière différente. Nous avons appris ces dernières décennies que c'est souvent le cas : il existe différentes manières de représenter la même théorie.

La chromodynamique quantique s'est révélée très utile pour expliquer ce qui se passe à courtes distances, mais elle échoue aux grandes distances. Une autre voie tout aussi valable est de décrire les « élastiques » reliant les quarks comme des cordes. C'est le meilleur espoir aujourd'hui pour trouver des solutions aux calculs à grande distance. Nous avons de nombreux exemples dans lesquels la théorie des cordes offre une description équivalente à la théorie des champs classique. Mais la théorie des cordes ne repose pas sur l'expérience, contrairement à la chromodynamique quantique. Les expérimentateurs n'ont rien trouvé de nouveau sur ce sujet depuis longtemps, même si la théorie est très performante. C'est pourquoi nous mettons tous beaucoup d'espoir dans le futur Grand Collisionneur de hadrons (LHC), le nouvel accélérateur du CERN, qui sera bientôt terminé et fournira des données expérimentales dans trois ans [3]. Cela ouvrira un nouveau monde, beaucoup pensent que de nouvelles symétries y seront découvertes. Peut-être la supersymétrie\*, qui jouerait un rôle très important dans la nature. Si elle était établie, ce serait l'un des plus forts soutiens de la théorie des cordes. Donc si nos suppositions sont correctes, le LHC sera le

lieu de découvertes spectaculaires et nous donnera certaines preuves qui nous manquent pour continuer. Les physiciens théoriciens font ce qu'ils peuvent. Mais les preuves expérimentales sont très importantes. La nature est souvent plus astucieuse que nous.

**Qu'est-ce que le prix Nobel a changé pour vous ?**

**DAVID GROSS :** Vous êtes-vous déjà trouvé dans un ouragan ? On ne peut pas l'imaginer tant qu'on ne l'a pas vécu. Le Nobel, c'est pareil. Le premier jour, j'ai reçu plus d'un millier de messages électroniques. Jusqu'à présent, j'ai répondu à tous. Scientifiquement, cette récompense est désastreuse : je n'ai plus le temps de faire de la science. J'espère pouvoir m'y remettre bientôt. J'escompte en revanche que cela m'aidera à trouver des financements : je dirige l'institut Kavli de physique théorique, à l'université de Californie, et l'argent est un problème récurrent. Quant à l'argent du prix Nobel lui-même, je ne sais pas encore ce que je vais en faire... mais ma femme a sûrement déjà des idées.

**Pourquoi le comité Nobel a-t-il attendu trente ans pour vous récompenser ?**

**DAVID GROSS :** Le comité se méfie beaucoup des théoriciens, il ne veut pas faire d'erreur, alors il est très prudent. Il met parfois cinquante ans à récompenser certains travaux. ■■

**Propos recueillis par Cécile Michaut**

**Photos : Todd Bigelow/Aurora**

\* La supersymétrie est une théorie qui associe à chaque particule connue une particule « miroir » suivant une certaine symétrie dans les équations de la mécanique quantique qui décrivent leur comportement.

[2] Michel Gonin, « Quelques millièmes de seconde après le Big Bang », *La Recherche*, octobre 2002, p. 22.

[3] Jacques-Olivier Baruch, « LHC, un défi technologique sans précédent », *La Recherche*, novembre 2002, p. 68.