

LA VIE EXCENTRIQUE DES QUARKS : UN ZOOM DANS LA MATIÈRE

David Gross*

Institut Kavli de physique théorique, Université de Californie, Santa Barbara, CA, États-Unis

JEUNES EXAMINATEURS/TRICES :



EDOARDO

ÂGE : 8



ILYAN

ÂGE : 8



MATTIA

ÂGE : 9



WHITCHUR-
CH
PRIMARY
SCHOOL

ÂGE : 10–11

Dans le domaine de la physique des particules, nous essayons de comprendre de quoi est fait notre univers. Nous étudions les propriétés fondamentales de la matière, décrivons les particules élémentaires qui la composent et cherchons à comprendre comment coopèrent les différentes particules qui construisent notre monde. Dans cet article, nous plongeons au cœur des atomes – les éléments constitutifs de la matière – et essayons de répondre à des questions intrigantes et fondamentales sur l'Univers. De quoi sont faits les protons et les neutrons, ces particules qui composent le noyau des atomes ? Ces composants peuvent-ils être divisés en particules encore plus petites ? Des éléments de réponse t'attendent plus bas.

Le Professeur David Gross a reçu le prix Nobel de physique en 2004 avec le Professeur Hugh David Politzer et le Professeur Frank Wilczek, pour la découverte de la liberté asymptotique dans la théorie de l'interaction forte.

PHYSIQUE THÉORIQUE

Branche de la physique qui utilise des équations mathématiques pour construire des modèles qui aident à décrire le monde.

PHYSIQUE DES PARTICULES

Branche de la physique qui étudie les constituants élémentaires de la matière.

LA PHYSIQUE THÉORIQUE – MON AMOUR DE COLLÈGE

J'étais curieux de science dès mon plus jeune âge. Au collège, j'étais passionné par la lecture de livres de vulgarisation scientifique, tels que « *Un, deux, trois... l'infini* » de George Gamow, qui aborde des concepts en mathématiques et en physique. Pour mon 13^e anniversaire, j'ai reçu un livre très spécial signé par Albert Einstein lui-même, rien que ça ! Il m'a été offert par un parent du collaborateur d'Albert Einstein, Leopold Infeld, qui a co-écrit ce livre. C'est à ce moment-là que je suis tombé amoureux de la **physique théorique**. J'étais fasciné par l'idée d'utiliser les mathématiques et mon propre esprit pour comprendre l'univers. À partir de ce moment-là, j'ai su que je voulais être physicien théoricien, ce que je suis toujours. Mon amour pour la physique théorique a mûri avec les années, mais c'est fondamentalement le même amour qu'à l'adolescence. Je suis toujours animé par le désir de comprendre les énigmes fondamentales de notre univers, l'une d'entre elles étant : de quoi est-il fait ?

LA PHYSIQUE DES PARTICULES, UNE MATIÈRE À RÉFLEXION

Qu'est-ce que la matière exactement ? De quoi est-elle composée ? C'est le genre de questions que nous essayons d'aborder en **physique des particules**. De nos jours, c'est bien connu que toute la matière – des étoiles à notre propre corps – est faite d'atomes, eux-mêmes faits de protons, de neutrons et d'électrons. Mais jusqu'au début des années 1900, la structure de l'atome était inconnue. Entre 1908 et 1913, un physicien néo-zélandais nommé Ernest Rutherford et ses étudiants ont effectué une série d'expériences pour explorer la structure de l'atome [1]. Ils ont pris de minuscules particules appelées particules alpha et les ont bombardées sur les atomes d'une feuille d'or (Pour en savoir plus sur Ernest Rutherford et cette expérience, tu peux lire [cet article](#) et [celui-là](#), tous deux disponibles en anglais uniquement). Certaines particules alpha ont traversé la feuille sans être déviées, tandis que d'autres semblaient avoir heurté quelque chose de solide et ont été dispersées dans diverses directions ([Figure 1A](#)). Les résultats de ces fameuses expériences ont révélé que la majeure partie du volume de l'atome était un espace vide, tandis que l'essentiel de sa masse et toute sa charge positive étaient concentrées dans un très petit volume central, appelé noyau. C'était une grande découverte, et elle a marqué le début de la physique des particules.

Quelques années plus tard, Ernest Rutherford a découvert que la charge positive de l'atome vient de particules appelées **protons**, et que le nombre de protons dans un atome est égal au nombre d'électrons entourant le noyau [2]. Il a fallu plus de 10 ans pour passer à l'étape suivante vers la compréhension de la structure du noyau. En 1932, un physicien renommé nommé **James Chadwick** a découvert que le noyau contient des protons et des neutrons [3]. Sa

Figure 1

Premières études de la structure de l'atome.

(A) L'expérience de Rutherford sur la feuille d'or en 1919 a révélé que l'atome a un noyau solide en son centre. Lorsque des particules alpha ont été utilisées pour bombarder les atomes dans une feuille de feuille d'or, certaines d'entre elles sont passées à travers tandis que d'autres ont rebondi sur quelque chose qui a changé leur trajectoire. Cet obstacle s'est avéré être le noyau (Image adaptée de : <https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-chemistry-flexbook-2.0/section/4.14/primary/lesson/rutherfords-atomic-model-chem/>). (B) Des études menées dans les années 1930 ont révélé que l'atome a une structure semblable au système solaire, dans laquelle les électrons orbitent autour du noyau. Lexique : Gold foil : Feuille d'or ; Experiments : Expériences ; Particle : Particule ; Emitter : Émetteur ; Detecting screen : Écran de détection ; Nucleus : noyau.

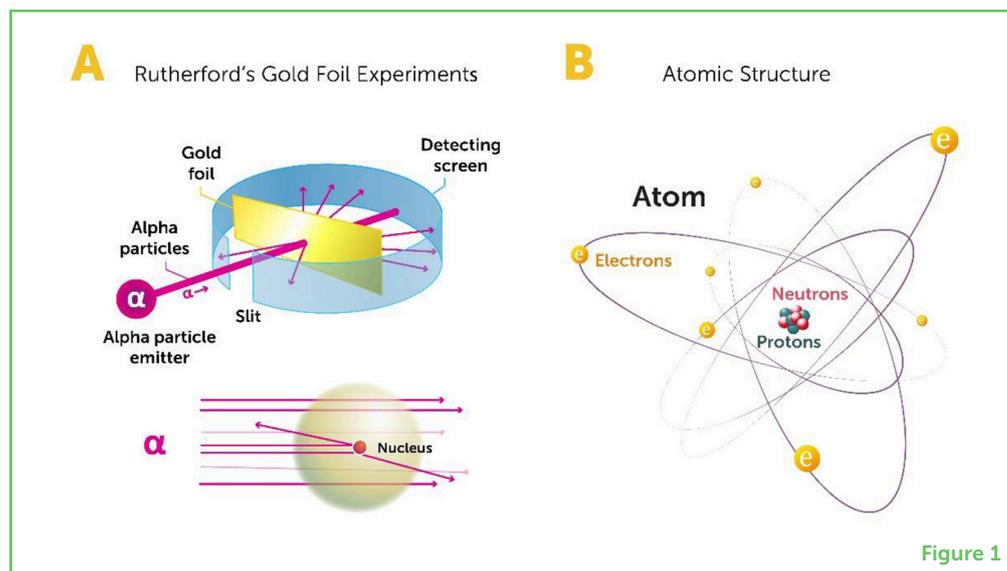


Figure 1

LES ACCÉLÉRATEURS DE NOTRE COMPRÉHENSION

Depuis l'expérience pionnière de Rutherford sur les feuilles d'or, les physiciens des particules ont fait de nombreuses expériences similaires de dispersion d'une particule, appelée particule de sondage, par une particule différente, appelée particule cible, pour en apprendre davantage sur les propriétés de la particule cible. Ce processus s'appelle le sondage. Nous mesurons la dispersion de la particule de sondage (par exemple, un électron) quand elle heurte la particule cible (par exemple, un proton), lorsque la particule de sondage est envoyée sous différents angles et avec différentes quantités d'énergie. Cette information nous permet de déduire la structure de la particule cible. Pour comprendre le sondage, nous pouvons utiliser l'analogie suivante : Imagine une salle pleine de gens. Tu veux savoir où se trouvent les gens, mais tu ne peux pas entrer dans la pièce. Ce que tu *peux* faire, c'est lancer des balles dans la pièce. Tu lances une balle et rien ne se passe. Tu en lances une autre, sous un angle légèrement différent, et tu entends « Aïe ! » Tu sais maintenant qu'il y a une personne dans cette direction. Si tu lances de nombreuses balles dans de nombreuses directions et à différentes vitesses, tu peux éventuellement avoir une idée de la façon dont les gens sont placés dans la pièce. Le même principe s'applique lorsque nous dispersons une particule de sondage – nous apprenons la structure de la particule cible à partir de la réaction obtenue par la diffusion des particules de sondage.

PARTICULES SUBATOMIQUES

Particules qui composent les atomes et sont donc plus petites que la taille d'un atome.

ACCÉLÉRATEURS

Dispositifs qui accélèrent les particules à des vitesses très élevées et les font entrer en collision avec des particules cibles, pour en étudier la structure.

Pour sonder la structure du noyau, Ernest Rutherford avait dispersé des particules alpha, ce qu'il a pu faire dans son laboratoire. Mais pour explorer encore plus profondément la matière, sonder la structure des **particules subatomiques** comme les protons et les neutrons, ou découvrir de *nouvelles* particules subatomiques, nous devons utiliser des énergies beaucoup plus élevées. Les particules subatomiques sont maintenues ensemble par des forces fortes, nous devons donc utiliser des énergies élevées pour les briser afin de pouvoir étudier leurs structures. Pour ce faire, nous utilisons des **accélérateurs**, des dispositifs qui accélèrent les particules de sondage à des vitesses très élevées.

Au début de ma carrière scientifique, dans les années 1960 et 1970, de nouveaux accélérateurs étaient construits et utilisés. Deux accélérateurs ont influencé ma carrière : le Bevatron de l'Université de Californie à Berkeley, où j'étais étudiant en thèse, et l'accélérateur linéaire du Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) de l'Université de Stanford (Figure 2). Par rapport aux accélérateurs les plus puissants que nous avons aujourd'hui (notamment le Grand collisionneur de hadrons du CERN), le Bevatron et l'accélérateur linéaire n'accéléraient pas les particules de sondage à des vitesses très élevées. En fait, ils produisaient des énergies d'environ six giga électronvolts (GeV ; un électronvolt équivaut à l'énergie qu'un électron a lorsqu'il est accéléré par une tension d'un volt), ce qui est environ mille fois moins que les énergies des accélérateurs actuels. Pourtant, ces accélérateurs étaient suffisamment puissants pour permettre aux scientifiques de découvrir chaque semaine de nouvelles particules. C'était une période passionnante en physique des particules, et je savais que je voulais être au cœur de cette recherche. Même si les expériences foisonnaient, nous avions très peu de compréhension théorique des structures des particules subatomiques et des interactions qui régissent leur comportement. J'ai choisi de me concentrer sur un problème fondamental : la constitution du proton.

LA STRUCTURE DES PROTONS

Dans l'accélérateur linéaire du SLAC, des électrons, qui sont de simples particules ponctuelles (c'est-à-dire des particules concentrées dans un volume extrêmement petit), ont été utilisés pour sonder la structure des protons. À cette époque, personne ne savait de quoi ils étaient faits. Une hypothèse était que le proton, comme l'électron, était une particule ponctuelle, et qu'il n'était pas composé de parties plus petites. Une autre hypothèse était que le proton était constitué d'un matériau inconnu uniformément réparti. Étonnamment, les résultats de l'accélérateur SLAC ne correspondaient à aucune des deux hypothèses, mais semblaient indiquer que le proton était lui-même composé de particules ponctuelles. Cependant, personne ne les avait jamais vues, et on avait beau envoyer des particules de sondage sur les protons avec de très grandes forces, aucune particule ponctuelle

Figure 2

L'accélérateur linéaire SLAC à l'Université de Stanford. L'accélérateur SLAC (surligné en rose) a été construit en 1966. Il mesure 3,2 kilomètres de long et est capable d'accélérer les électrons à des énergies de 50 giga électronvolts (crédit photo : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/SLAC_National_Accelerator_Laboratory_Aerial.jpg).

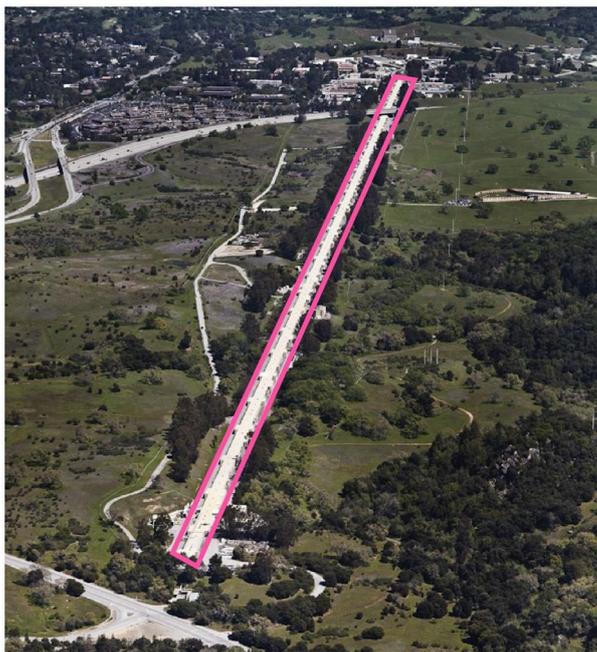


Figure 2

n'en était libérée (en revanche, lors de la collision des atomes, leurs électrons s'envolaient). De plus, les résultats des sondages semblaient indiquer que les particules ponctuelles dans le proton rebondissaient comme si aucune force ne les liait. C'était très étrange parce que nous savions que les particules ponctuelles étaient étroitement liées dans les protons, mais nous ne pouvions pas expliquer la nature de cette liaison.

Dans ma recherche d'une explication à ces découvertes surprenantes, j'ai été aidé par deux théories existantes. L'une d'entre elles avait été proposée par les physiciens Murray Gell-Mann et George Zweig au début des années 1960 [4, 5]. Ils avaient compris que les données obtenues des particules subatomiques à forte interaction pouvaient être expliquées mathématiquement, en supposant qu'elles étaient constituées de trois types de particules plus basiques que Murray Gell-Mann appelait « quarks » (Figure 3A). Au début, cette hypothèse n'était considérée que comme une « astuce » mathématique qui n'avait rien à voir avec la réalité. Mais, au fil du temps, certaines des prédictions de ce modèle se sont précisées. Avec les nouveaux résultats des expériences d'accélérateurs, l'idée des quarks semblait mériter d'être explorée plus en détail. L'autre théorie que j'ai utilisée dérivait de la théorie de l'électromagnétisme de James Clerk Maxwell. Celle-ci explique la force de l'électricité et du magnétisme par l'existence d'un seul type de charge – une charge électrique.

Des généralisations peuvent être faites à partir de la théorie de Maxwell, par exemple que d'autres types de charges peuvent être

Figure 3

Étude des particules subatomiques. **(A)** Dans les années 1960, les physiciens Murray Gell-Mann et George Zweig ont suggéré que les particules subatomiques comme les protons et les neutrons sont constituées de particules basiques appelées « quarks », des particules à forte interaction (*Strongly interacting particles*) liées par une force forte. **(B)** Dans les années 1970, mes collègues et moi avons trouvé une explication mathématique du comportement des quarks – un phénomène appelé « liberté asymptotique » (*Asymptotic freedom*). L'interaction entre les quarks faiblit quand ils se rapprochent et augmente quand ils s'éloignent. C'est pourquoi ils restent confinés aux protons.

RADIOACTIVITÉ

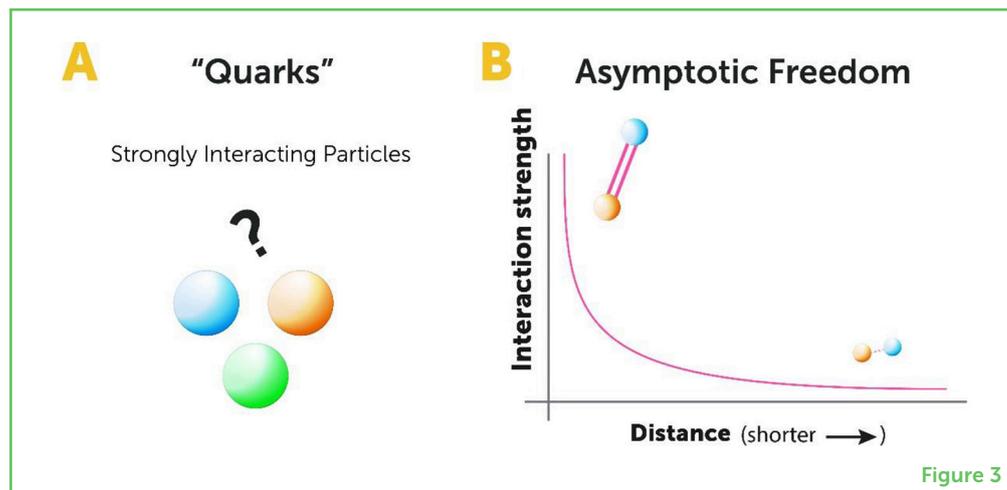
Processus par lequel des particules ou de l'énergie sont émises par un atome instable.

FORCE FORTE

Force qui lie les protons et les neutrons dans les noyaux des atomes.

LIBERTÉ ASYMPTOTIQUE

Phénomène par lequel les quarks agissent comme des particules libres lorsqu'ils sont à de courtes distances, mais s'opposent à leur séparation à mesure que la distance augmente.



utilisés pour expliquer d'autres forces naturelles. En physique, il existe quatre forces fondamentales. La force électromagnétique est responsable de l'électricité et du magnétisme. La force faible est responsable de la **radioactivité** (pour en savoir plus sur la radioactivité, tu peux lire [cet article](#)). La **force forte** lie les protons et les neutrons dans les noyaux des atomes. Enfin, la force gravitationnelle attire les objets massifs les uns vers les autres. Moi, je voulais expliquer comment la force forte maintient ensemble les protons et les neutrons.

Après quelques calculs compliqués basés sur ces deux théories, j'ai développé une nouvelle théorie appelée « chromodynamique quantique » (CDQ). La CDQ explique les propriétés des quarks et les forces qui agissent sur eux. En CDQ, il existe trois types de charges (par opposition à un seul type – électrique – dans l'électromagnétisme classique) et huit types de forces qui agissent entre ces charges. L'une des plus grandes réalisations de la CDQ est sa capacité à expliquer la découverte surprenante selon laquelle les quarks se comportent comme des particules libres à l'intérieur du proton. Mes collègues et moi avons trouvé une explication mathématique à l'affaiblissement de la force forte qui agit entre les quarks à mesure que ceux-ci se rapprochent les uns des autres – un phénomène appelé **liberté asymptotique** [6, 7] (Figure 3B). La découverte de la liberté asymptotique a conduit à une grande avancée en physique des particules, pour laquelle j'ai reçu, avec Hugh David Politzer et Frank Wilczek, le prix Nobel de physique en 2014. La liberté asymptotique a été une découverte surprenante parce qu'elle fait le contraire d'autres forces dans la nature, qui s'affaiblissent à mesure que les particules s'éloignent. La liberté asymptotique explique pourquoi nous ne voyons pas de quarks libres – plus nous essayons de les séparer, plus la force qui les rassemble devient forte. Cela signifie que les quarks restent « enfermés » à l'intérieur des protons, un phénomène appelé **confinement**.

CONFINEMENT

Propriété des quarks de rester « verrouillés » à l'intérieur des protons (ou d'autres particules), même lorsque de grandes forces sont appliquées pour les séparer.

HADRONS

Particules construites à partir de quarks et interagissant via la force forte.

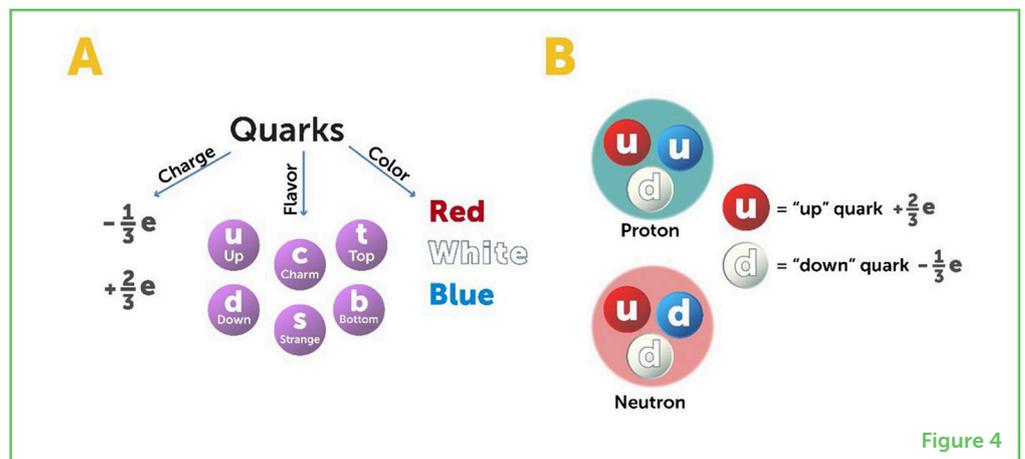
Figure 4

Les quarks. **(A)** Les quarks peuvent avoir diverses charges électriques, saveurs (flavor) et couleurs (color). Leur charge est une fraction de la charge d'un électron ou d'un proton. Leur couleur (rouge, blanche ou bleue) définit la source de la force forte qui les lie ensemble, et leur saveur est liée à la force faible. **(B)** Les protons sont constitués de deux quarks « up » et d'un quark « down », tandis que les neutrons sont constitués de deux quarks « down » et d'un quark « up ».

QUARKS : LES BRIQUES ATYPIQUES LA MATIÈRE

Nous pensons actuellement que les quarks sont des particules ponctuelles qui composent des protons, des neutrons et toute une classe de particules en interaction forte appelées **hadrons**. Comme nous l'avons vu, les quarks sont confinés aux particules qu'ils constituent, et ils se déplacent comme de petites boules rebondissant à l'intérieur d'une boule plus grande. Les quarks ont trois types de charges : la charge électrique, la saveur et la couleur. Mais fais attention, il ne s'agit pas là d'une saveur qu'on pourrait goûter ou d'une couleur qu'on pourrait voir !

Les quarks peuvent avoir une charge électrique qui est une fraction de la charge d'un électron ou d'un proton : soit $-\frac{1}{3}$ (un tiers de la charge négative portée par un électron) ou $+\frac{2}{3}$ (deux tiers de la charge positive portée par un proton). Les quarks existent en six saveurs, que nous appelons le plus souvent de leur noms anglais : up, down, top, bottom, strange et charm (Figure 4A). Les saveurs des quarks sont liées à la force faible impliquée dans la radioactivité. Les protons sont constitués de deux quarks « up » et d'un quark « down » ; les neutrons sont constitués de deux quarks « down » et d'un quark « up » (Figure 4B). En plus de la charge électrique et de la saveur, les quarks peuvent être rouge, blanc ou bleu. Les couleurs sont la source de la force forte qui les lie, et c'est aussi la source du nom chromodynamique – « chromos » signifie « couleur » en grec.



À ce stade, tu te demandes peut-être si les quarks eux-mêmes sont constitués de particules encore plus petites. Dans l'histoire de la physique, on a progressivement trouvé des particules de plus en plus petites qui composent la matière : les atomes sont faits d'électrons et d'un noyau, les noyaux sont faits de protons et de neutrons, les protons et les neutrons sont faits de quarks... Peut-être que les quarks sont constitués d'autre chose ? Jusqu'à présent, il n'existe aucune preuve expérimentale indiquant que les quarks sont constitués de sous-quarks. Pour obtenir une prouver de façon définitive que les quarks sont vraiment indivisibles, nos accélérateurs auraient besoin

d'énergies extraordinairement élevées – de l'ordre de 100 billions de billions d'électronvolts (10^{26} eV), ce qui est environ un billion (10^{12}) de fois plus élevé que les énergies utilisées actuellement. Obtenir de telles énergies serait très difficile et coûteux, et nous ne savons pas encore comment nous y prendre. Sur le plan théorique, nous pouvons extrapoler nos connaissances actuelles des forces fondamentales de la nature sur des échelles très petites. Les expériences indiquent que notre théorie est encore incomplète, et l'étude des quarks pourrait nous aider à combler certaines des lacunes actuelles dans notre compréhension des éléments constitutifs de l'univers.

LA THÉORIE DES CORDES : UNE VISION ALTERNATIVE DE LA MATIÈRE

La **théorie des cordes**, sur laquelle de nombreux scientifiques (moi y compris) travaillent depuis plusieurs décennies, est une autre théorie intéressante qui pourrait nous offrir une nouvelle façon de comprendre l'univers. La théorie des cordes est extrêmement complexe mathématiquement, et ses détails dépassent ce qui peut être décrit dans cet article. Mais, en principe, la théorie des cordes explore comment toutes les particules élémentaires, y compris les quarks, pourraient être constituées d'un type d'objet, appelé « corde ». Cette corde peut vibrer de différentes manières, et chaque motif vibratoire correspond à une particule élémentaire spécifique. Par exemple, si la corde vibre selon un motif, nous obtenons un quark, si elle vibre selon un motif différent, nous obtenons un électron (Figure 5). Si la théorie des cordes est correcte, alors les quarks et autres particules élémentaires ne contiennent pas de sous-particules mais sont plutôt constitués de cordes vibrantes. Tester expérimentalement la théorie des cordes nécessitera des énergies beaucoup plus puissantes que celles que nous avons actuellement – cela pourrait donc prendre un certain temps, mais je pense que c'est un développement à anticiper avec enthousiasme !

THÉORIE DES CORDES

Théorie de la physique qui décrit les particules élémentaires de la matière en termes de cordes qui vibrent de différentes manières.

Figure 5

Théorie des cordes. (A) La théorie des cordes suggère que toutes les particules élémentaires sont composées d'un objet appelé « corde ». (B) Lorsque cette corde vibre de différentes manières, des particules spécifiques sont produites. Les technologies existantes ne nous permettent pas encore de tester cette théorie, mais nous espérons être en mesure de le faire à l'avenir.

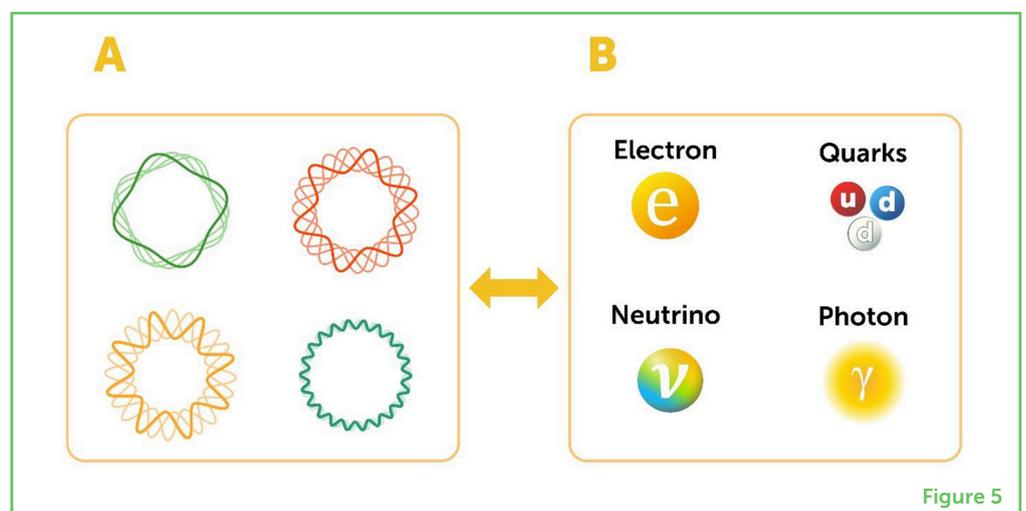


Figure 5

RECOMMANDATIONS POUR LES JEUNES ESPRITS

En physique, comme dans toute science, la créativité est une compétence importante. Malheureusement, nous ne savons pas comment l'enseigner, mais nous pouvons y inspirer nos étudiants en donnant l'exemple et en étant de bons mentors. La meilleure chose que les élèves puissent faire est d'observer la manière dont les gens créatifs travaillent et en tirer des leçons. Je considère mes étudiants comme des collègues et j'aime travailler avec eux d'égal à égal. Cela peut être difficile pour certains étudiants, mais d'autres s'épanouissent dans ce type de relation. Le professeur Frank Wilczek, mon premier étudiant officiel, en est un bon exemple. Il a remporté le prix Nobel avec moi pour notre travail commun sur la liberté asymptotique.

Si l'on veut être un bon scientifique, il est aussi important de commencer à faire de la recherche le plus tôt possible. C'est une activité très différente des cours et des études académiques. En classe de physique, les problèmes sont la meilleure méthode que nous ayons pour préparer les étudiants à faire de la recherche. Nous donnons aux étudiants beaucoup de problèmes qu'ils doivent résoudre, ça leur apprend à tirer des conclusions. Mais même les problèmes les plus coriaces que tu vois en classe sont inventés. La recherche, elle, se base sur des problèmes réels que personne ne sait encore résoudre. Le plus grand défi de la recherche est de poser les *bonnes questions*. Avant même de t'attaquer à une question scientifique, tu dois d'abord t'assurer que la question est la bonne (Figure 6). Poser de bonnes questions est aussi une compétence que nous ne pouvons pas enseigner directement – nous ne pouvons que fournir des exemples et modéliser des modes de pensée productifs. Une fois que tu parviens à poser de bonnes questions, tu ne pourras peut-être pas y répondre tout de suite, mais au moins tu pourras progresser vers une réponse.

Figure 6

Recommandations pour les jeunes esprits. L'une des compétences les plus importantes pour faire de bonnes recherches est de poser les bonnes questions.



Figure 6

À mon avis, il y a de nombreuses raisons pour lesquelles être un scientifique peut mener à une vie heureuse. D'une part, connaissant de l'importance de la science dans nos vies, la société respecte généralement le talent requis pour être un scientifique. En tant que tel, tu pourras être soutenu et respecté par la société et gagner sa vie grâce à un métier qui te passionne et t'apporte du plaisir. D'autre part, quand on est scientifique, on appartient à une communauté internationale de personnes qui partagent les mêmes passions et intérêts. Tu pourras aller n'importe où dans le monde et trouver des gens intéressés par les mêmes sujets que toi, et avoir des discussions intéressantes avec eux. La science est une sorte de famille que tu choisis de rejoindre.

Je pense que les gens devraient faire ce qu'ils aiment. Pas forcément de la science, tu peux choisir ce que tu veux ! Si tu peux passer ta vie à faire ce que tu aimes vraiment, tu as beaucoup de chance. Le meilleur conseil que je puisse te donner, c'est de trouver ce que tu aimes faire et ce en quoi tu es bon. Une fois que tu auras trouvé, sois ambitieux, donne-toi du mal et sois prêt à affronter l'échec. Si tu choisis de faire ce que tu aimes, les échecs ne te feront pas peur, parce que tu sauras que le jeu en vaut la chandelle.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier [Noa Segev](#) d'avoir mené l'interview qui a servi de base à cet article et d'avoir co-écrit l'article, et [Alex Bernstein](#) d'avoir fourni les figures.

LECTURES SUPPLÉMENTAIRES

1. [Quantum chromodynamics - David Gross.](#)
2. [Quantum Chromodynamics \(QCD\) - Professor Dave Explains.](#)

CONTRIBUTIONS À LA VERSION FRANÇAISE

TRADUCTEUR : **Jean-Marie Clément** (Association jeunes Francophones et la Science, Montpellier, France)

ÉDITEUR : **Catherine Braun-Breton** (Association Jeunes Francophones et la Science, Montpellier, France)

RÉFÉRENCES

1. Rutherford, E. 1911. LXXIX. The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom. *Lond. Edinburgh Dublin Philos. Magaz. J. Sci.* 21:669–88. doi: 10.1080/14786440508637080
2. Rutherford, E. 2010. Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen. *Philos. Magaz.* 90:31–7. doi: 10.1017/CBO9780511707179.010
3. Chadwick, J. 1932. The existence of a neutron. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A, Contain. Papers Math. Phys. Charact.* 136:692–708. doi: 10.1098/rspa.1932.0112
4. Gell-Mann, M. 1961. *The Eightfold Way: A Theory of Strong Interaction Symmetry*. Synchrotron Laboratory Report CTSL-20. California Institute of Technology. doi: 10.2172/4008239
5. Zweig, G. 1964. *An SU_3 Model for Strong Interaction Symmetry and Its Breaking (No. CERN-TH-412)*. CM-P00042884.
6. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. *Phys. Rev. Lett.* 30:1343. doi: 10.1103/PhysRevLett.30.1343
7. Gross, D. J., and Wilczek, F. 1973. Asymptotically free gauge theories. I. *Phys. Rev. D* 8:3633. doi: 10.1103/PhysRevD.8.3633

PUBLIÉ EN LIGNE LE 2 février 2024

ÉDITEUR/TRICE : [Idan Segev](#)

MENTOR(S) SCIENTIFIQUE(S) : [Matteo Lorenzini](#) et [Chris North](#)

CITATION : Gross D (2024) La vie excentrique des quarks : un zoom dans la matière. *Front. Young Minds*. doi: 10.3389/frym.2023.1080918-fr

TRADUIT ET ADAPTÉ DEPUIS : Gross D (2023) The Quirky Lives Of Quarks: A Close Look Into Matter. *Front. Young Minds* 11:1080918. doi: 10.3389/frym.2023.1080918

CONFLIT D'INTÉRÊTS : Les auteurs déclarent que les travaux de recherche ont été menés en l'absence de toute relation commerciale ou financière pouvant être interprétée comme un potentiel conflit d'intérêts.

DROITS D'AUTEUR © 2023 © 2024 Gross. Cet article en libre accès est distribué conformément aux conditions de la licence [Creative Commons Attribution \(CC BY\)](#). Son utilisation, distribution ou reproduction sont autorisées, à condition que les auteurs d'origine et les détenteurs du droit d'auteur soient crédités et que la publication originale dans cette revue soit citée conformément aux pratiques académiques courantes. Toute utilisation, distribution ou reproduction non conforme à ces conditions est interdite.

JEUNES EXAMINATEURS/TRICES



EDOARDO, ÂGE : 8

Bonjour, je m'appelle Edoardo et j'aime beaucoup les Pokémons. J'ai 8 ans, j'habite à Monte Porzio Catone près de Rome et j'ai une très jolie petite sœur. Je m'intéresse aux constellations, en particulier au Sagittaire parce que c'est mon signe astrologique. J'aime beaucoup sauter, grimper et courir, alors je pratique le parkour.



ILYAN, ÂGE : 8

Bonjour, je m'appelle Ilyan, j'ai huit ans et je viens de Borghesiana, une ville proche de Rome. Mon école est Germogli Amo. J'aime jouer au football, je fais des claquettes, du piano et j'adore chanter. J'aime les cadeaux et les surprises. Mon animal préféré est le gorille. Mes meilleurs amis sont Edoardo, Yuri, Leonardo et Flavio.



MATTIA, ÂGE : 9

Bonjour, je m'appelle Mattia, j'aime le skateboard, le basket et faire des bandes dessinées. Je pense que les articles scientifiques pourraient être plus intéressants s'ils étaient écrits dans des bulles de dialogue, comme dans les bandes dessinées. Peut-être qu'un jour je serai illustrateur scientifique !



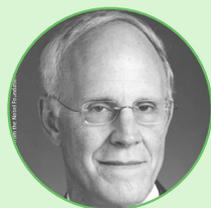
WHITCHURCH PRIMARY SCHOOL, ÂGE : 10–11

Nous sommes un groupe de 6 étudiants à Cardiff, au Pays de Galles, qui aiment explorer le monde qui nous entoure. Nous avons adoré apprendre toutes sortes de sciences dans le cadre de ce projet, et découvrir ce qui est à la fine pointe de la connaissance humaine, et nous avons rencontré tellement de nouveaux mots ! L'expérience va être vraiment précieuse lorsque nous passerons à l'école secondaire !

AUTEURS/TRICES

DAVID GROSS

Le Professeur David Gross est un physicien américain. Il a obtenu son B.Sc. en physique et en mathématiques à l'Université hébraïque de Jérusalem, en Israël. Il a obtenu son doctorat en physique en étudiant les interactions fortes à l'Université de Californie à Berkeley, sous la supervision de Geoffrey Chew. Après avoir obtenu son diplôme en 1966, il a rejoint la Harvard Society of Fellows et, en 1969, est devenu professeur adjoint à l'Université de Princeton, où il est resté pendant 27 ans. Il y a travaillé avec son premier étudiant diplômé, Frank Wilczek et, en 1973, ils ont découvert la liberté asymptotique. Cette découverte a conduit au développement de la théorie de la chromodynamique quantique et a ensuite valu



à Gross et Wilczek le prix Nobel de physique en 2004. En 1984, le Professeur Gross a commencé à travailler sur la théorie des cordes, qui constitue depuis son principal domaine de recherche. Après ses années à Princeton, Il a rejoint l'Institut Kavli de physique théorique de l'Université de Californie à Santa Barbara, où il a été directeur de 1997 à 2012. Il a deux enfants avec sa première femme (Shulamith Toaff), Ariela Gross et Elisheva Gross, et deux petits-enfants. Il vit actuellement avec sa deuxième femme, Jacquelyn Savani, avec qui il a une belle-fille, Miranda Savani. *gross@kitp.ucsb.edu

French version provided by
Version française fournie par

