



*Souvent, des équations
ont conduit à des prédictions
physiques extravagantes
qui semblaient au départ
inacceptables
même aux yeux de leur
propre auteur.*

Les équations n'ont pas de préjugés

© Photo : NASA

Stéphane Durand
Professeur de physique
Cégep Édouard-Montpetit

Big Bang, expansion de l'Univers, antimatière, trou noir, quarks, quanta. Comment les physiciens ont-ils imaginé ces idées? Ils ne les ont pas imaginées justement! Les mathématiques l'ont fait pour eux... Ces idées sont sorties toutes seules des équations sans qu'aucun physicien ne les y ait volontairement introduites. Pire, les physiciens ne croyaient même pas au départ à ces idées qui étaient pourtant des conséquences de leurs propres équations! Ces idées leur semblaient tout à fait déraisonnables et même absurdes. Mais ce sont bien les équations qui avaient raison. Contrairement aux physiciens, elles n'avaient pas de préjugés! Le meilleur exemple en est peut-être donné par Einstein lui-même.

La plus grosse gaffe d'Einstein

En 1915, Albert Einstein termine l'élaboration de sa théorie de la relativité générale, une théorie de la gravitation qui améliore et remplace celle de Newton, et fournit enfin une explication à un phénomène inexplicable dans le cadre newtonien¹. Lorsque Einstein applique sa théorie aux mouvements des astres dans le cosmos, elle fonctionne à merveille. Elle décrit par exemple le mouvement des planètes autour du Soleil de façon extrêmement précise. Or, lorsque Einstein décide par la suite d'appliquer sa théorie à l'Univers lui-même, au cosmos dans sa globalité, que

1. Une anomalie dans l'orbite de Mercure autour du Soleil (ce qu'on appelle l'avance du périhélie).

La théorie de la relativité

Cette théorie comprend deux parties. La première, la relativité restreinte, est une théorie qui fusionne l'espace et le temps en un espace-temps à quatre dimensions et qui conduit à la célèbre relation $E = mc^2$. La deuxième, la relativité générale, incorpore la gravitation en courbant cet espace-temps. La force de gravité est alors expliquée comme l'effet de ces courbures. Cette théorie prédit l'expansion (ou la contraction) de l'Univers ainsi que l'existence des trous noirs. Une des conséquences les plus spectaculaires de la théorie de la relativité est le ralentissement du temps. L'écoulement

du temps peut être ralenti par la vitesse ou la gravitation. Toutefois, pour que les effets soient importants, il faut que la vitesse soit très grande (proche de celle de la lumière) ou que la force de gravité soit très forte (proche d'un trou noir). Les effets sont aussi présents dans la vie courante mais beaucoup trop faibles pour être perceptibles. Par contre, lorsque les instruments sont ultra précis, il faut en tenir compte. Ainsi, le GPS ne pourrait pas fonctionner si on ne tenait pas compte du ralentissement du temps qui affecte les satellites en orbite autour de la Terre envoyant les signaux de repérage à notre capteur GPS !

découvre-t-il et que lui dit son équation? Elle lui dit que l'Univers est en expansion. Stupeur! Même pour Einstein, pourtant un révolutionnaire, l'idée d'un Univers en expansion semble absurde. En particulier, une telle idée implique qu'il y a eu un début à l'Univers, une naissance au cosmos – un Big Bang. Hérésie! L'Univers devrait être immuable et éternel, comme tout le monde le pensait depuis Aristote.

Confronté à une telle *invraisemblance*, Einstein modifie artificiellement son équation pour qu'elle conduise à une solution « acceptable », c'est-à-dire à un Univers immuable et éternel². Or, dix ans plus tard, les télescopes deviennent plus puissants et ils permettent enfin aux astronomes de voir plus loin et plus précisément dans le cosmos, au-delà de notre galaxie. Que découvrent-ils? Que l'Univers contient des milliers de galaxies comme la nôtre et – surtout – que toutes ces galaxies s'éloignent les unes des autres : l'Univers est bel et bien en expansion! Einstein n'aurait jamais dû modifier son équation. Après coup, il qualifiera cette modification de « plus grande erreur de sa vie » car il aurait pu, assis à son bureau, simplement par le calcul et la réflexion, prédire l'expansion de l'Univers. Quelle grandiose prédiction cela aurait été! Mais il ne l'a pas fait. Il n'a pas fait assez confiance aux mathématiques, il n'a pas voulu croire ce que son équation s'évertuait à lui dire! Quelque chose que l'auteur n'avait jamais imaginé est sorti de son équation et l'auteur lui-même n'y croyait pas³!

2. Il ajoute à son équation le terme contenant la fameuse constante cosmologique (voir aussi la note 3).

3. En réalité, l'ajout de la constante cosmologique n'est pas une erreur en soi. Elle est permise par les équations d'Einstein et d'ailleurs compatible avec un Univers en expansion; elle est d'ailleurs réintroduite aujourd'hui. L'erreur d'Einstein n'a pas été de l'introduire mais d'avoir voulu la fixer à une valeur précise conduisant à un Univers statique. Mais cette solution d'Einstein est instable, comme on l'a compris par la suite. Un Univers statique n'est donc pas possible même avec la constante cosmologique! De toute façon, le point important ici est qu'Einstein a refusé la prédiction de sa propre théorie.

Le Big Bang

C'est le phénomène initial, produit il y a environ 14 milliards d'années, qui a conduit à la formation et à l'expansion de l'Univers. On peut détecter aujourd'hui le reste de cette « explosion » qu'on appelle le rayonnement (ou le bruit de fond) cosmique.

L'expansion de l'Univers

On désigne ainsi le fait que toutes les galaxies qui nous entourent s'éloignent de nous, et ce à une vitesse d'autant plus grande qu'elles sont lointaines. Ce n'est pas une expansion de la matière dans l'Univers, mais une expansion de l'Univers lui-même (i.e. de l'espace-temps), qui entraîne avec elle toutes les galaxies.

Les trous noirs

Les trous noirs sont une autre prédiction mathématique qui est sortie de la théorie d'Einstein contre son gré. Il trouvait cette idée absurde, et a même publié un article dans lequel il tentait de démontrer que les trous noirs ne pouvaient pas exister! Sa théorie prédit qu'un trou noir peut se former lorsqu'une étoile s'effondre sur elle-même à la fin de sa vie. L'étoile devient tellement compacte qu'il se forme autour d'elle une zone de *non-retour*, de laquelle rien ne peut s'échapper, pas même la lumière. L'astre devient invisible, donc noir, et tout ce qui franchit cette limite se coupe à jamais de notre Univers. Einstein ne croyait pas en l'existence d'une telle zone aussi singulière et bizarre. Il tenta de démontrer qu'un corps céleste ne pouvait pas s'effondrer suffisamment pour former un trou noir. Pourtant, aujourd'hui, une multitude de candidats sont recensés dans l'Univers. En fait, la compréhension exacte de l'intérieur des trous noirs est l'une des questions les plus fondamentales de la physique d'aujourd'hui.



© Photo : NASA

Les trous noirs

Ce sont des objets célestes extraordinairement compacts formés par l'implosion du cœur des grosses étoiles à la fin de leur vie. Une cuillère à soupe de matière de trou noir peut peser un milliard de tonnes! En raison de leur immense force de gravité, rien ne peut s'échapper d'un trou noir, pas même la lumière! Ils sont donc invisibles, c'est-à-dire noirs. Tout ce

qui tombe dans un trou noir est coupé à jamais de notre Univers. Ils pourraient même être des portes vers d'autres Univers. Les trous noirs formés lors de la mort des étoiles sont dits stellaires mais il existe aussi des trous noirs ultra massifs au cœur des galaxies ainsi que peut-être des trous noirs microscopiques.

L'antimatière

À toute particule est associée une antiparticule, c'est-à-dire une particule identique mais de charge électrique opposée. Il existe par exemple des antiprotons et des antiélectrons. On réussit même à construire des antiatomes d'hydrogène en plaçant un antiélectron en orbite autour d'un antiproton. Lorsqu'une particule et son antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent en se transformant totalement en énergie (via la relation $E = mc^2$). Une telle conversion de la matière en énergie est environ 1 000 fois plus efficace qu'une réaction nucléaire traditionnelle. On ne peut donc pas conserver l'antimatière dans des contenants ordinaires de matière, on utilise plutôt des « boîtes » magnétiques.

Une application éventuelle de l'antimatière (envisagée par la NASA) serait dans la propulsion des fusées. De tels moteurs fonctionnant par annihilation de matière et d'antimatière seraient incroyablement plus performants que les présents moteurs chimiques et même que d'éventuels moteurs nucléaires.



© G. T. Jones, Birmingham University / Fermi National Accelerator Laboratory

L'antimatière

L'existence de l'antimatière, prédite par l'équation de Dirac, allait elle aussi à l'encontre de la volonté de son auteur. En 1928, Paul Dirac établit sa fameuse équation qui décrit le comportement des électrons à grande vitesse⁴. Cette équation explique de façon spectaculaire les résultats expérimentaux de l'époque, à savoir, la valeur du mini champ magnétique de l'électron⁵ ainsi que la valeur des niveaux d'énergie fins de l'atome d'hydrogène. C'est un triomphe. Toutefois, après coup, Dirac s'aperçoit que son équation implique l'existence d'un électron positif, c'est-à-dire une particule de même masse que l'électron mais de charge opposée. Personne n'a jamais observé une telle particule! Au départ, donc, Dirac ne croit pas ce que son équation lui dit. Il espère que cet électron positif correspond au proton, malgré la différence de masse. C'est seulement trois ans plus tard qu'il finit par admettre à contrecœur que son équation prédit bel et bien un nouveau type de particule : à chaque particule correspondrait une antiparticule. L'année suivante, la première antiparticule est découverte expérimentalement : l'antimatière existe bel et bien! En signifiant qu'il aurait dû faire confiance dès le départ aux mathématiques, il dira après coup « mon équation a été plus intelligente que moi⁶ ».

Les quanta

En 1900, Max Planck travaille sur le problème du rayonnement lumineux des corps chauds : par exemple la lumière émise par un métal chauffé au rouge (un rond de poêle) ou celle qui est émise par un objet chauffé au blanc (une ampoule).⁷ Pour expliquer les résultats expérimentaux, c'est-à-dire la façon dont la couleur varie selon la température, il introduit pour des raisons mathématiques une certaine constante qui porte maintenant son nom (la célèbre constante de Planck). La nouvelle formule fonctionne à merveille : c'est la loi de Planck. Il tente alors de l'interpréter physiquement. Avec horreur, il découvre qu'elle implique que le rayonnement lumineux est discontinu ou, du moins, émis et absorbé par paquets d'énergie – les fameux quanta. Cinq ans plus tard, Einstein montre qu'une conséquence de cette idée est que la lumière elle-même est faite de particules – les photons. Tout cela est inacceptable pour Planck. Il

4. C'est la généralisation relativiste de l'équation de Schrödinger (l'équation de base de la théorie quantique).

5. Plus précisément, la valeur du moment magnétique de l'électron dû à son spin.

6. Cité dans: R.P. Crease et C.C. Mann, *The Second Creation* (Macmillan Publishing Company, New York, 1986), p. 90.

7. Ce qu'on appelle le rayonnement du corps noir (à ne pas confondre avec le rayonnement d'un trou noir par effet quantique).

refuse de croire à cette idée – son idée! – de discontinuité du rayonnement. Pendant des années, il tente désespérément de modifier sa théorie pour éliminer cette discontinuité. Il mettra des années avant d'admettre que son idée n'était pas qu'un truc mathématique mais qu'elle correspondait bien à une certaine réalité. Cette idée fut pourtant l'étincelle qui allait engendrer la révolution quantique.

Les quarks

Autre exemple encore la découverte des particules constituant le proton et le neutron. En 1961, Murray Gell-Mann s'aperçoit que la théorie qui semble décrire les symétries des particules nucléaires a comme conséquence mathématique que le proton et le neutron doivent être constitués de particules plus petites. Néanmoins, pour obtenir la charge électrique du proton et du neutron, il faut supposer que ces nouvelles particules – les quarks – ont une charge fractionnaire ($-1/3$ et $+2/3$). Hérésie! Personne n'avait jamais observé de charge fractionnaire, et de toute façon cela irait à l'encontre d'une des traditions les plus sacrées de la physique : les charges électriques sont toujours des multiples entiers. Et même en supposant que les quarks existent, pourquoi ne les aurait-on jamais vus? Malgré la beauté de l'idée – la vingtaine de particules nucléaires connues s'expliqueraient à partir de seulement trois quarks – Gell-Mann attend trois ans avant de la publier tellement l'idée lui semble aberrante. Et lorsqu'il le fait, c'est en mettant des gants blancs. En effet, dans son article

Les quarks

Ce sont les particules qui constituent le proton et le neutron (ainsi que plusieurs autres particules nucléaires). Elles possèdent des charges fractionnaires : $+2/3$ et $-1/3$. Deux quarks de charge $+2/3$ et un quark de charge $-1/3$ forment le proton de charge 1, tandis qu'un quark de charge $+2/3$ et deux de charge $-1/3$ forment le neutron de charge 0. Les quarks sont considérés aujourd'hui avec les électrons et les neutrinos comme les particules fondamentales constituant la matière ordinaire.

original, il mentionne que de concevoir le proton et le neutron comme composés de trois quarks n'est qu'un truc mathématique permettant de déduire de façon intéressante les propriétés du proton et du neutron, ainsi que de toutes les autres particules nucléaires. Il insiste même pour dire que les quarks n'existent pas réellement. Cinq ans plus tard, pourtant, les premiers indices expérimentaux de la présence de constituants dans le proton et le neutron commenceront à être détectés. Et aujourd'hui la réalité des quarks est totalement acceptée.

La non-localité quantique

La théorie quantique (on dit aussi la mécanique quantique) est la théorie du monde microscopique qui a complètement remis en question notre vision de la matière. Cette théorie repose sur une vision ondulatoire de la matière qui lui donne toutes sortes de propriétés déroutantes; par exemple, un électron peut être à deux endroits en même temps! Une conséquence révolutionnaire de cette théorie est l'existence d'un certain type d'influence qui peut se propager instantanément d'un point à un autre: ce qu'on appelle la non-localité ou l'effet EPR (pour Einstein, Podolsky et Rosen).

La mécanique quantique

C'est la théorie qui décrit le monde microscopique (la constitution de la matière) ainsi que les forces qui y sont à l'œuvre (les forces électromagnétique et nucléaire). Cette théorie est extraordinairement efficace et presque toute la technologie moderne est basée sur elle (lecteur CD, iPod, ordinateur). Mais elle est aussi très mystérieuse, car on ne comprend pas encore exactement ce qu'elle signifie!

C'est une théorie fondamentale et elle possède de multiples ramifications. Elle explique la stabilité des atomes (donc de la matière!), les liens chimiques et la forme des molécules (la forme en V de la molécule d'eau par exemple), ainsi que toute la structure du tableau périodique. En fait, toutes les cases de ce dernier ne sont que les différentes solutions de l'équation de base de la mécanique quantique (l'équation de Schrödinger, ensuite généralisée par Dirac) appliquée à la force électrique du noyau atomique! Les applications de la mécanique quantique vont du laser au microscope électronique, en passant par les transistors et les microprocesseurs; bref, presque toute l'électronique moderne!

La téléportation quantique

La non-localité et la téléportation quantiques pourraient avoir des applications en cryptographie (la science des codes secrets) ainsi que dans les futurs ordinateurs quantiques (qui seront, s'ils voient le jour, incroyablement plus puissants que ceux d'aujourd'hui). Aujourd'hui, toutes nos transactions bancaires par le guichet automatique et la plupart de nos achats sur le Web (le site Amazon par exemple) sont sécurisées par un cryptage des données qui sont transmises. Les méthodes de codage (non quantiques) utilisées aujourd'hui sont très sécuritaires. Mais quand les ordinateurs quantiques verront le jour, leur code pourra être brisé en quelques secondes! La cryptographie quantique devra alors prendre le relais !

Dix dimensions

Ce dernier exemple est un peu à part car il est pour l'instant totalement spéculatif. Mais, si jamais il s'avérait correspondre à une certaine réalité, ce serait la démonstration ultime de l'extraordinaire pouvoir des mathématiques. Deux grandes théories physiques fondamentales existent pour expliquer l'Univers qui nous entoure: la théorie quantique qui décrit le monde microscopique (les particules constituant la matière) et la relativité générale qui décrit le monde macroscopique (la gravitation et le cosmos). Depuis une trentaine d'années, les physiciens tentent d'unifier ces deux théories en une seule plus générale et encore plus fondamentale (ce qu'on appelle une théorie d'unification). Une telle théorie est essentielle pour comprendre le début de l'Univers, puisqu'à ce moment tout le cosmos observable était concentré dans une région minuscule. Il faut donc une fusion de la théorie quantique et de la relativité générale pour comprendre cet instant.

Un des candidats les plus prometteurs pour une telle théorie d'unification s'appelle la théorie des cordes. Cette théorie possède toutes sortes de propriétés remarquables, mais elle prédit aussi que l'espace-temps possède dix ou vingt-six dimensions!¹⁰ Ces nombres particuliers, dix et vingt-six, sortent tout seuls de la théorie, pour des raisons de cohérence interne. Au départ, la plupart des physiciens considéraient cette idée absurde. Michio Kaku, un des principaux pionniers dans le domaine, se remémore: « Je me souviens

Puisque cette influence voyage à une vitesse plus grande que celle de la lumière, elle semble aller à l'encontre de la relativité d'Einstein. Aucun des pères fondateurs de la théorie quantique n'avait imaginé une telle idée au départ: le formalisme mathématique de la théorie quantique a été élaboré dans les années vingt, mais c'est seulement une dizaine d'années plus tard qu'on en a compris toute la signification et toutes les implications, en particulier celles concernant l'existence de l'effet EPR. Beaucoup ont refusé d'admettre cette idée d'influence instantanée – Einstein en particulier – et ont cru que la théorie quantique était partiellement erronée. C'est seulement cinquante ans plus tard que les expériences ont magistralement donné raison à la théorie quantique⁸. Cet effet est d'ailleurs justement à la base du phénomène de téléportation quantique qui a été réalisé en laboratoire il y a quelques années: l'état interne d'une particule a disparu à un endroit et est réapparu à un autre!⁹ La non-localité et la téléportation quantiques pourraient avoir des applications révolutionnaires dans le domaine des codes secrets (la cryptographie) et dans les futures générations d'ordinateur.

8. *Contrairement aux apparences, l'effet EPR ne va pas à l'encontre de la relativité car l'influence quantique instantanée n'est ni matérielle, ni énergétique et ne permet pas de communiquer des messages. Elle implique par conséquent l'existence d'un deuxième niveau de réalité inaccessible à nos sens.*

9. *Notons cependant que même si elle repose sur un effet EPR instantané, la téléportation est quand même limitée par la vitesse de la lumière puisqu'elle se réalise en deux étapes: une première typiquement quantique et instantanée (effet EPR), et une deuxième limitée par la vitesse de la lumière (effet classique). La téléportation n'étant complétée qu'après la deuxième étape, elle ne prend donc pas effet instantanément.*

10. *En fait, les versions supersymétriques des théories de cordes (dites supercordes) impliquent dix dimensions tandis que la version non-supersymétrique (moins réaliste) implique vingt-six dimensions.*

encore du choc et de la consternation ressentis par beaucoup de physiciens en apprenant que la théorie était cohérente seulement en dix et vingt-six dimensions. Nous avons tous en tête la remarque de Niels Bohr qui disait qu'une grande théorie doit être "assez folle", mais cela semblait dépasser les limites de notre imagination scientifique de croire que l'Univers pourrait avoir dix ou vingt-six dimensions¹¹ ». Mais la théorie des cordes semblait par ailleurs tellement magique – elle possédait toutes sortes de propriétés miraculeuses qui permettaient de contourner tous les problèmes qui avaient à ce jour empêché d'unifier la gravitation et la théorie quantique – que cette idée méritait d'être prise au sérieux. Les physiciens s'y sont d'ailleurs habitués, surtout lorsqu'ils ont compris comment les dimensions additionnelles pouvaient être indétectables dans la vie courante (étant enroulées sur elles-mêmes). Bien sûr, l'idée que l'espace-temps a plus que quatre dimensions n'est évidemment pas encore confirmée, mais certaines expériences sont en cours. Voilà bien un des exemples les plus extraordinaires de prédiction mathématique!¹²

Pourquoi le rôle des mathématiques est-il si important?

Comment des prédictions aussi extravagantes, allant à ce point à l'encontre du sens commun ou de la volonté de leur auteur ont-elles pu être faites? Grâce aux mathématiques! En effet, pour comprendre l'infiniment petit et l'infiniment grand – des domaines inaccessibles à nos sens – les concepts de la vie de tous les jours ne sont plus adaptés: la "logique" en jeu dans ces domaines n'est plus celle de la vie quotidienne; nos mots et concepts usuels ne suffisent plus. Cela peut sembler surprenant, mais il ne faut pas oublier que notre vocabulaire et notre intuition pour décrire le monde physique se sont développés à partir de l'enseignement de nos sens. Ils ne sont donc pas nécessairement adaptés pour appréhender des domaines auxquels nos sens n'ont pas accès. Voici un exemple: lorsqu'on fait faire une rotation de 360 degrés à un électron, il ne revient pas à son état original! Il faut

Loi de Planck

La loi de Planck est la courbe de distribution des couleurs émises par un corps chaud émettant de la lumière. La propriété remarquable de cette courbe est que la couleur émise ne dépend pas de la constitution du corps mais seulement de sa température. En particulier, lorsque la température augmente, la couleur passe du rouge au blanc, puis au bleu. C'est pourquoi le fer chauffé au blanc (le filament d'une ampoule) est plus chaud que le fer chauffé au rouge (un rond de poêle) et pourquoi, dans le ciel, les étoiles blanches sont plus chaudes que celles qui sont rougeâtres (Bételgeuse et Aldébaran, par exemple) et les bleutées encore plus chaudes (Rigel, par exemple). Ainsi, si on veut reproduire artificiellement la couleur de la lumière du Soleil, il suffit de chauffer un filament (dans une ampoule par exemple) à la même température que celle de la surface du Soleil, soit environ 6 000 degrés. Le problème est que les filaments, quelle que soit leur composition, fondent à cette température! Les filaments des ampoules sont donc moins chauds que 6 000 degrés, et par conséquent la lumière qu'ils émettent est plus jaune que celle du soleil. Les flashes photographiques, qui ne s'allument qu'une fraction de seconde, peuvent être un peu plus chaud et leur couleur est donc plus proche de la couleur naturelle du Soleil.

plutôt lui faire faire deux rotations complètes (720 degrés) pour qu'il revienne à son état de départ!! Voilà bien un phénomène qui n'a absolument aucune analogie dans la vie courante, un phénomène totalement au-delà de notre intuition usuelle. Bref, pour comprendre ces nouveaux domaines de la physique, il faut recourir à un autre langage, et celui des mathématiques apparaît parfaitement adapté. En fait, les mathématiques ont le pouvoir de prolonger nos sens et notre imagination. Elles sont, en quelque sorte, un sixième sens¹³.

11. M. Kaku, *Beyond Einstein* (Anchor Books, 1995), p. 94

12. *Tout dernièrement est aussi apparue une théorie encore plus générale, la théorie des membranes, qui englobe toutes les versions des théories de supercordes dans un espace-temps à onze dimensions.*

13. *Pour plus de détails sur tous les exemples présentés, et pour d'autres exemples, voir S. Durand, Bulletin AMQ, mars 2002, p. 10-18.*