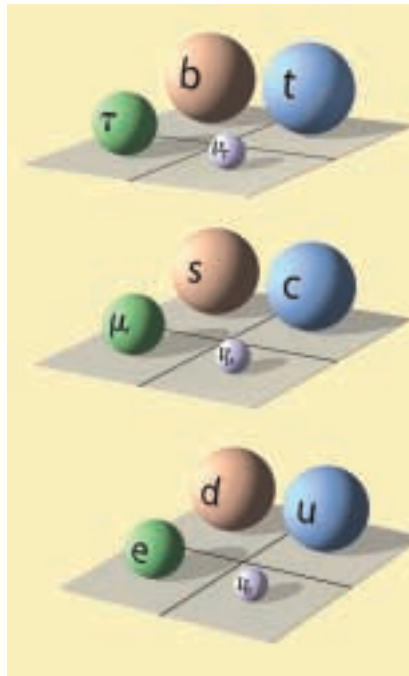


constituants élémentaires a une autre origine.

Ainsi va la physique de l'infiniment petit. Au début du XX^e siècle, on a observé le spectre des états d'énergie de l'électron de l'hydrogène. Bien qu'il ait une structure simple, on ne sut l'expliquer avant l'avènement de la théorie quantique. Aujourd'hui, c'est le spectre des leptons et des quarks que les physiciens cherchent à expliquer. Dans cette science de l'infiniment petit, les progrès naissent le plus souvent d'expériences qui nous livrent de nouvelles structures simples, mais inattendues. Rien de ce genre ne s'est produit au cours des dernières années. Les arguments en faveur des leptons et des quarks du modèle standard sont-ils satisfaisants? Ces particules sont ponctuelles et représentent des singularités dans l'espace. Des particules infiniment petites peuvent-elles avoir une masse? Si oui, pourquoi la masse du muon est-elle 207 fois supérieure à celle de l'électron, bien que par ailleurs ces deux types de particules soient indiscernables. Peut-être serons-nous, un jour, contraints de renoncer au concept de particules ponctuelles. On peut supposer que les masses des leptons et des quarks résultent d'une sous-structure de ces particules, comme c'est le cas pour le proton. Peut-être obtiendra-t-on de nouveaux indices sur les constituants des leptons et des quarks grâce aux expériences futures réalisées dans les grands accélérateurs.

Perfectionner le modèle standard

Une autre raison incite les physiciens à perfectionner le modèle standard : ils voudraient ajouter la gravitation aux trois interactions – électromagnétique, faible et forte – qu'il décrit déjà. En fait, deux conceptions s'opposent : d'un côté, le modèle standard avec ses théories quantiques et ses interactions locales entre particules ponctuelles et, de l'autre, la relativité générale, où la gravitation résulte d'une déformation de l'espace-temps. Que faire? Considérer la relativité générale telle que nous la connaissons comme la théorie classique d'une théorie quantique, plus générale, la gravitation quantique (qui resterait à élaborer)? Une théorie quantique de la gravitation serait en même temps une théorie quantique de l'espace et du temps. Or, le modèle standard et la plupart des théories physiques sont bâties sur l'espace et sur le temps, et toute



8. LE MODÈLE STANDARD est la théorie la mieux acceptée par les physiciens des particules, lesquels le testent par l'expérience depuis 30 ans. Il est fondé sur trois familles au sein desquelles deux quarks sont associés à deux leptons. La matière et ses manifestations les plus courantes sont entièrement dues à la famille (u, d, e, ν_e), laquelle comprend les quarks u et d , l'électron et son neutrino associé. Les autres familles contiennent des particules beaucoup plus massives, qui se manifestent dans les désintégrations de particules lourdes, observables seulement dans les accélérateurs ou dans le Cosmos.

modification des fondations risquerait de les faire vaciller. Néanmoins, aux petites distances (inférieures à 10^{-35} mètre), les incertitudes dues à la théorie quantique perturbent vraisemblablement la structure de l'espace-temps. Si un électron est réellement une singularité de l'espace-temps avec une masse (une particule infiniment petite), cette singularité devrait disparaître à cette échelle. À quoi ressemble alors un électron? On l'ignore.

Selon certains théoriciens, les leptons et les quarks sont des manifestations de minuscules objets unidimensionnels, les «supercordes». Sortes de petites structures en forme de fils, les supercordes seraient moins singulières qu'un point. Or, la formulation de la gravitation quantique semble moins ardue dans le cadre d'une théorie des supercordes. On devrait alors supposer que l'espace-temps décrit à l'aide de quatre dimensions (trois d'espace et une de temps) acquiert dix dimensions supplémentaires. Cela semble *a priori* contredire

nos observations, mais seules quatre des dix dimensions auraient des effets macroscopiques ; les autres ne seraient perceptibles qu'à petite distance, et y rendraient la gravitation plus intense. Prenons une image : si nous enroulons une feuille de papier sous forme de cylindre, elle ressemble, vue de loin, à une droite à une dimension. La deuxième dimension, celle qui permet de tourner autour du cylindre, n'est perçue qu'à courte distance. Ainsi en va-t-il des dimensions cachées de l'Univers : elle sont peut-être là, mais si petites que nous ne les voyons pas.

Si notre espace possède effectivement d'autres dimensions à petite échelle, elles pourraient être mises en relation avec certains phénomènes observés par les physiciens des particules. Ainsi, on ignore encore pourquoi la nature semble apprécier le chiffre trois : il y a trois dimensions d'espaces, mais aussi trois familles de leptons, trois familles de quarks, ces derniers ont trois couleurs... Le rôle particulier du chiffre 3 découle peut-être des dimensions cachées et leur nombre. En d'autres termes, peut-être existe-t-il une explication géométrique de ces structures fondamentales du modèle standard. Peut-être réaliserons-nous que les leptons et les quarks ne sont pas ponctuels ; peut-être comprendrons-nous aussi pourquoi leurs masses ont certaines valeurs? Pour le moment, le mystère demeure, mais Bertolt Brecht n'a-t-il pas écrit, en 1921, dans son Journal : «Là où il n'y a pas de mystère, il n'y a pas de vérité»?

Harald FRITZSCH est professeur de physique théorique à l'Université de Munich.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Neutrino Mixing and Maximal CP Violation*, Acta Phys. Polon. B31:1349-1364, 2000.

Harald FRITZSCH et Zhi-zhong XING, *Mass and Flavor Mixing Schemes of Quarks and Leptons*, in Prog. Part. Nucl. Phys., 45:1-81, 2000.

Harald FRITZSCH, *An Equation that Changed the World : Newton, Einstein, and the Theory of Relativity*, University of Chicago Press, 1994.

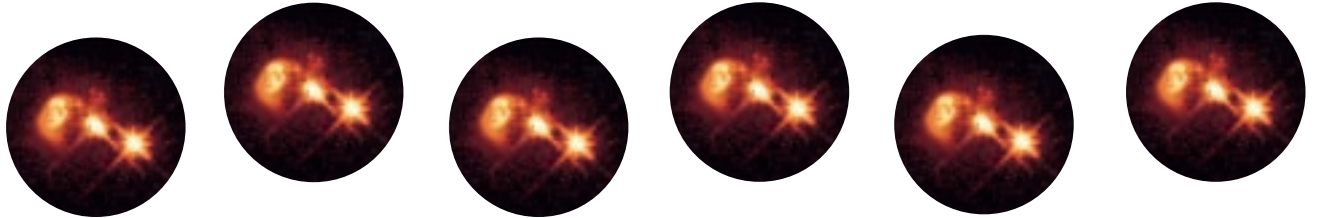
Harald FRITZSCH, *Quarks. Urstoff unserer Welt*, Piper, 1992.

Harald FRITZSCH, *Vom Urknall zum Zerfall. Die Welt zwischen Anfang und Ende*, Piper, 1999.

L'infiniment grand

GERHARD BÖRNER

L'Univers semble être brusquement sorti d'un état initial infiniment dense, que les physiciens ont des difficultés à imaginer et à décrire par une théorie.



L'infiniment grand, l'Univers, est-il sorti de l'infiniment petit, c'est-à-dire d'un point matériel? Nul ne le sait. Toutefois, de nombreuses théories prédisent un comportement extrême de la matière : la contraction sans fin des grandes masses sous l'effet de leur propre poids, jusqu'à la formation d'un point infiniment dense. Pour les physiciens, ces théories sont imparfaites ; elles annoncent des états aberrants, qu'ils ne sauraient admettre. Cependant, ils sont persuadés que ces points singuliers indiquent des tendances réelles des systèmes cosmiques, dont, au premier chef, l'Univers lui-même. L'observation de plus en plus probable de trous noirs, les traces laissées par une lointaine explosion originelle d'une nature mystérieuse sont autant d'indices qui les confortent dans leur conviction. Ils étudient donc ardemment les «maladies» de leurs édifices théoriques, au premier rang desquelles la relativité générale d'Albert Einstein et le modèle cosmologique standard, et inventent de nouvelles théories plus générales. Dans le même temps, ils observent de près les catastrophes cosmiques, telles les supernovae, les trous noirs, les quasars et les tourbillons ultra-rapides de nuages stellaires. Leur but : tout comprendre avant que l'Univers ne... disparaisse.

Intuitivement, il nous semble évident que les grandes masses soumises à la force de gravitation auront une destinée catastrophique. La gravitation agit à l'identique sur toutes les particules massives : elle les attire. De plus, elle a

une portée infinie, même quand elle est faible. Par ailleurs, si nous ajoutons particule sur particule à une masse quelconque, la force de gravitation croît avec le nombre de particules. Elle finit toujours par l'emporter sur toutes les forces qui s'opposent à son effet, que ce soit la pression thermonucléaire au cœur d'une étoile, la force répulsive interne aux noyaux atomiques ou la pression d'un gaz de particules. À cela s'ajoute le fait que non seulement la matière, mais aussi l'antimatière, ou même toute forme d'énergie, a un effet gravitationnel. Réciproquement, toute forme d'énergie subit la pesanteur. C'est pourquoi, si une gigantesque pression interne peut – jusqu'à un certain point – maintenir une masse en équilibre, les formes d'énergie qui créent cette pression contribuent à son champ de pesanteur et participent finalement à son effondrement gravitationnel.

Les singularités de l'espace-temps

Les solutions des équations compliquées de la relativité générale présentent des singularités, dont on a longtemps pensé qu'elles étaient des conséquences des hypothèses de symétrie, introduites dans les calculs pour en faciliter la résolution. Les physiciens espéraient qu'elles disparaîtraient si l'on perturbait légèrement ces solutions, pour les rendre un peu moins symétriques. Toutefois, dans les années 1965 à 1970, les mathématiciens et les physiciens britanniques Roger Penrose et

Stephen Hawking montrèrent que des singularités de l'espace-temps apparaissent aussi dans le cas général, non symétrique, et qu'elles sont, en général, stables vis-à-vis de petites perturbations. En d'autres termes, ces physiciens découvraient que les singularités sont des cas limites incontournables en relativité générale, des «maladies» dont la nature ne pourra être mieux comprise sans une extension quantique de la théorie d'Einstein. Toutefois, de nombreux physiciens pensent que les théories physiques actuelles suffisent à décrire la situation à proximité de ces singularités, nommées «lieux d'infinis», quelle que soit leur nature réelle.

Les trous noirs et le Big Bang sont-ils des lieux d'infinis? Avant d'aborder cette question, rappelons quelques aspects fondamentaux des théories de la gravitation.

Isaac Newton, le savant anglais du XVII^e siècle fondateur de la physique théorique classique, admettait l'existence d'un espace absolu. Il lui attribuait implicitement les propriétés géométriques que le Grec Euclide avait déduites d'axiomes fondamentaux «intuitifs». Newton supposait aussi qu'un «temps universel», mesurable sans ambiguïté, caractérise tous les événements que l'on peut étudier. Ainsi, un espace absolu muni de repères solides et inaltérables fixe le cadre où évoluent les corps

1. DIVERSES SIMULATIONS de trous noirs. Au cours de leur aspiration par un trou noir, les gaz interstellaires s'échauffent au point de former un plasma ultrachaud : le disque d'accrétion (les zones blanc-jaune).