

# Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules

Autor(en): **Guarinos, J.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft**

Band (Jahr): **52 (1994)**

Heft 260

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-898769>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.



# Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules

J. GUARINOS

Il peut paraître étrange de juxtaposer, dans un même titre, deux domaines de recherche que l'on pourrait considérer, à première vue, comme n'ayant aucun rapport entre eux. En effet, comment trouver des liens étroits entre la physique des particules, dont l'objet est l'étude des constituants ultimes de la matière, et la cosmologie, cette branche de l'astrophysique qui cherche à comprendre comment fonctionne l'Univers, ce «tout» qui désigne l'ensemble de ce qui existe, et que certains astrophysiciens ont l'audace de vouloir mettre en équations? Comment l'étude de l'infiniment grand et celle de l'infiniment petit peuvent-elles trouver un champ d'investigations commun?

Tout, jusqu'aux instruments utilisés, semble opposer ces deux domaines de recherche: Peut-on vraiment rapprocher les observations faites à l'aide d'un télescope, des expériences menées dans un collisionneur de particules? Et pourtant, les questions qui intéressent à la fois les astrophysiciens et les physiciens des particules sont suffisamment nombreuses et importantes pour que les échanges et les collaborations entre les deux communautés scientifiques soient devenus courants. Désormais, un astrophysicien ne peut plus ignorer les progrès de la physique des particules; dorénavant, un physicien des particules doit se tenir au courant des avancées de l'astrophysique et en particulier de la cosmologie. Mieux: les découvertes des uns, observationnelles, expérimentales ou théoriques, ont de plus en plus d'implications sur les travaux des autres. Comment expliquer ce rapprochement, en apparence si surprenant? Pour mieux comprendre cela, il est nécessaire de résumer les développements de chacune de ces deux branches de la physique, qui se sont déjà plusieurs fois rejointes par le passé (prenons l'exemple de l'étude des rayons cosmiques) et dont l'histoire se confond avec les progrès de la physique en ce XX<sup>e</sup> siècle. Cette «promenade» à travers les chemins des deux domaines extrêmes de la physique nous donnera l'occasion de faire le point sur les connaissances actuelles de la structure intime de la matière et de l'Univers.

## Relativité et mécanique quantique: les deux piliers de la physique moderne

### Le modèle du «Big Bang»

Il est de notoriété publique que les travaux de l'illustre physicien Albert Einstein ont révolutionné notre conception du monde et de l'Univers. En particulier, sa théorie de la *relativité générale* est un pilier fondamental de la compréhension de l'Univers en tant que système considéré dans son ensemble. C'est dans le cadre de cette théorie que l'on explique certains faits observationnels et que l'on construit un modèle de la structure de l'Univers. Ce modèle, dit du «Big Bang», permet aussi de retracer l'histoire de l'Univers. Comme tous les modèles, il n'est pas exempt d'imperfections. Mais c'est celui qui, confronté aux observations, a donné jusqu'à présent les meilleurs résultats.

Le modèle du Big Bang nous enseigne que l'Univers est né d'une gigantesque «explosion primordiale», il y a 12 à 18 milliards d'années. Cette idée est venue du fait qu'en 1929, l'astronome Edwin Hubble a mis en évidence ce que l'on a coutume d'appeler la «fuite des galaxies» et qui traduit le fait que les galaxies donnent l'impression de s'éloigner de nous, à une vitesse qui semble proportionnelle à leur distance. Comme il ne paraît pas raisonnable d'en déduire que notre galaxie occupe une position privilégiée dans l'Univers, la seule explication valable est d'attribuer cette «fuite» apparente à une dilatation de *toutes* les distances, en tout point de l'Univers, et non à un déplacement réel des galaxies. Ainsi, où qu'il se trouve dans l'Univers, un observateur aura toujours l'impression que tout ce qui l'entoure s'éloigne de lui, et que la vitesse d'éloignement est proportionnelle à la distance. On dit que notre Univers est en expansion. Nous allons éclaircir tout cela un peu plus loin, grâce à quelques notions de base de la relativité générale.

Si l'Univers est en expansion, cela signifie qu'en remontant le cours du temps, on arrive à un moment où sa taille est infiniment petite. Cet instant peut donc être interprété comme... celui de la naissance de l'Univers, celui du fameux «Big Bang». Le Big Bang est cette sorte d'explosion primordiale qui a donné naissance à notre Univers, ce dernier subissant encore l'expansion consécutive à cette titanesque explosion. L'augmentation de volume qui en résulte est accompagnée d'une diminution de la température globale de l'Univers et de sa densité d'énergie. Au moment du Big Bang, ces deux grandeurs étaient infinies. Actuellement, la température<sup>1</sup> de l'Univers est de 2.73 K, soit 2.73 degrés au dessus du 0 absolu, la température la plus basse possible, qui vaut  $-273.16^{\circ}\text{C}$ .

L'une des plus importantes preuves en faveur du modèle du Big Bang est la découverte, en 1965, d'un rayonnement dans le domaine des micro-ondes, en provenance de toutes les directions de l'Univers. Ce rayonnement, dont l'existence avait été prévue par la théorie, est appelé «rayonnement cosmologique» ou «rayonnement de fond» de l'Univers. Il montre que celui-ci rayonne tout entier comme un corps «chauffé» à la température d'environ  $-270^{\circ}\text{C}$ . En effet, quelle que soit la direction visée, la répartition de l'intensité de ce rayonnement en fonction de la longueur d'onde est toujours identique et conforme à celle d'un corps chauffé à  $-270^{\circ}\text{C}$ , qui rémettrait l'énergie conférée par cette «chaleur» sous forme de rayonnement électromagnétique, donc de photons, ces particules qui composent la lumière et, d'une façon générale, tout rayonnement électromagnétique. L'intensité maximale du rayonnement cosmologique est émise à une longueur d'onde voisine de 3 mm, c'est-à-dire dans un domaine de longueurs d'ondes soumis à l'absorption causée par l'atmosphère terrestre. Cela signifie qu'une très large portion de

<sup>1</sup> En toute rigueur, dire que la température de l'Univers est de 2.73 K n'a pas de sens, dans la mesure où ce dernier n'est plus en équilibre thermique. Mais ce petit «mensonge» permet d'aller plus loin dans les explications, sans trop déformer la réalité.



ce rayonnement ne peut être détectée que grâce à l'utilisation de satellites. C'est pourquoi il a fallu attendre les récentes observations du satellite COBE (Cosmic Background Explorer) pour disposer d'une mesure extrêmement précise de la température actuelle de l'Univers, à 0.01 degré près. Les photons qui composent le rayonnement cosmologique ont été émis très peu de temps après le Big Bang, en comparaison de l'âge de l'Univers. L'origine de ce rayonnement remonte en effet à environ 100'000 ans après la grande explosion primordiale, soit la cent cinquante millièmes partie du temps écoulé depuis cette époque. On peut donc considérer les photons du rayonnement cosmologique comme les témoins des toutes premières étapes de la création de notre Univers. Pour employer une image familière, on pourrait dire que le rayonnement cosmologique est comparable à une sorte de bruit de fond, comme un lointain écho de la «déflagration» qui aurait accompagné l'explosion primordiale.

Pour résumer ce qui vient d'être dit, l'Univers est en cours de refroidissement, sa température actuelle étant d'environ  $-270^{\circ}\text{C}$ . Ce refroidissement trouve son origine dans l'expansion que subit l'Univers, expansion dont la «fuite des galaxies» est l'une des conséquences observables et la preuve la plus évidente.

### La relativité générale, pilier de la cosmologie

Pour comprendre comment les distances peuvent augmenter et les galaxies s'éloigner sans que ces dernières se déplacent, il faut faire appel aux travaux que le physicien Albert Einstein réalisa au début de ce siècle. Ce fut lui en effet qui comprit le premier que, pour expliquer certains faits observationnels ou expérimentaux, il faut associer dans les mêmes équations le temps et les trois dimensions de l'espace. Cet important pas en avant n'est pas encore celui qui allait permettre d'étudier l'Univers dans son ensemble. Mais c'est ainsi que naquit le concept «d'espace-temps», qui gouverne tous les systèmes contenus dans l'Univers et l'Univers lui-même. Einstein décrit ce concept et les résultats fondamentaux qui découlent de son application à la description du monde dans ce qu'on appelle la *relativité restreinte*, théorie présentée en 1905. Ses conséquences sont très importantes et ses applications nombreuses. Citons notamment le principe d'équivalence entre la masse et l'énergie, le fameux « $E = m c^2$ », où  $E$  désigne l'énergie,  $m$  la masse et  $c^2$  le carré de la vitesse de la lumière. Ce principe, qui découle de la formulation de lois physiques dans un espace-temps à 4 dimensions, a rendu possibles, entre autres: la compréhension, par Hans Bethe en 1938, des mécanismes (les réactions nucléaires) à l'origine de la formidable énergie rayonnée par les étoiles et notamment par le soleil; la production d'énergie domestique dans les centrales nucléaires; la libération brutale d'énergie destructrice dans les explosions des bombes A et H; et les progrès de la physique des particules à travers l'utilisation d'accélérateurs et de collisionneurs de particules. Contrairement aux trois premiers exemples, les collisionneurs de particules utilisent le principe d'équivalence entre la masse et l'énergie dans l'autre sens: de la matière est créée à partir d'énergie. Nous reviendrons un peu plus loin sur ce dernier point.

C'est en approfondissant sa relativité restreinte qu'Albert Einstein énonça les principes révolutionnaires d'une nouvelle théorie, la *relativité générale*, dont le résultat le plus considérable est qu'elle fournit une interprétation géométrique du phénomène de la gravitation universelle. Lorsque, en 1916, Einstein publia la relativité générale, il acheva de bouleverser la conception des physiciens sur l'espace et le temps. Mais, très vite, des mathématiciens, des physiciens et des astronomes se

penchèrent sur l'application de cette théorie à l'étude globale de l'Univers, dans lequel la force dominante est précisément la gravitation. Lorsque, en 1929, Hubble fit sa découverte de la fuite des galaxies, il devint rapidement évident que l'Univers devait être décrit par un espace-temps obéissant aux principes de la relativité générale et subissant une expansion continue. Ce fut la naissance de la cosmologie moderne. Fille de la relativité générale, elle-même issue de l'approfondissement de la relativité restreinte, la cosmologie part du principe que la structure de l'Univers et son évolution s'énoncent à l'aide d'équations à 4 dimensions, le temps jouant le rôle de quatrième dimension. Plus exactement, les phénomènes qui se déroulent dans l'Univers s'expriment correctement dans un espace, l'espace-temps, où la position de chaque «événement» est repérée grâce à 4 coordonnées: La longueur, la largeur, la hauteur et une quatrième coordonnée qui est une fonction du temps. C'est ainsi que la fuite des galaxies est la conséquence, dans les 3 dimensions auxquelles notre perception des choses nous donne accès, d'un phénomène qui s'explique dans un Univers à 4 dimensions... et que notre esprit ne pourra jamais appréhender complètement.

### Comprendre la relativité générale à l'aide d'un ballon de baudruche

Pour mieux comprendre ce dont il s'agit, il est nécessaire de raisonner par analogies. La plus parlante est celle qui consiste à supposer l'existence d'êtres bi-dimensionnels, que nous nommerons: les «bidims». Imaginons que l'univers des bidims soit la *surface* d'un énorme ballon de baudruche. Pour ces êtres, l'Univers perceptible est donc pourvu de deux dimensions, comme eux. Évidemment, il s'agit en réalité d'une surface qui se développe dans un volume, donc dans un espace à trois dimensions. Mais les bidims ne peuvent imaginer un monde à plus de deux dimensions, de même que nous ne pouvons imaginer un monde à plus de trois dimensions...

Dans l'univers des bidims, c'est-à-dire à la surface du ballon, on trouve des structures bi-dimensionnelles qui sont l'équivalent, avec une dimension en moins, de nos galaxies. L'une de ces «galaxies» abrite nos êtres hypothétiques. Repérons trois points *immobiles* à la surface du ballon, marquant les emplacements de trois galaxies dont l'une est celle des bidims. Supposons maintenant que l'on gonfle le ballon de baudruche: sa surface se dilate. Nous voyons alors les trois points s'écarter les uns des autres, par suite du gonflage. Du point de vue des bidims qui, pour se déplacer, sont condamnés à suivre la courbure de la surface du ballon – leur univers – ces trois points subissent un mouvement qui indique que les trois galaxies s'éloignent entre elles. Puisqu'ils se trouvent sur l'une de ces trois galaxies, ils considèrent que les deux autres «fuient». En outre, ils peuvent calculer que la galaxie la plus distante s'éloigne plus vite que la plus proche. En fait, les bidims ne tarderont pas à s'apercevoir que la distance entre eux et n'importe quel point de leur univers augmente avec le temps, d'autant plus vite que ce point est éloigné de leur position. Voici donc comment le gonflage du ballon de baudruche, phénomène qui se déroule dans un univers à 3 dimensions, est interprété par les bidims comme une fuite des galaxies dans l'univers à 2 dimensions qu'ils perçoivent. Voici pourquoi les bidims voient les galaxies s'éloigner, même si ces dernières ne se déplacent pas dans leur univers, c'est-à-dire à la surface du ballon.

Mais imaginons à présent que l'un de ces êtres hypothétiques, ayant bénéficié d'un enseignement de mathématiques (on peut espérer que la privation d'une dimension n'entrave pas trop les progrès des mathématiques...), cherche à vérifier, *sur*



une grande échelle, l'équivalent, dans le monde bidim, du théorème de Pythagore. Il se rendra bien vite compte que, pour tout triangle rectangle, la somme des carrés des deux plus petits côtés n'est jamais égale au carré de l'hypothénuse! Or, notre mathématicien bidim sait que cette loi n'est valable que pour les surfaces planes. Donc, s'il pousse un peu plus loin sa réflexion, il interprétera ce résultat comme la preuve de l'existence d'une courbure globale de l'Univers, mais d'une courbure qui s'inscrit dans une troisième dimension, inconcevable par son esprit «enfermé» dans un univers à 2 dimensions. Il pourra même calculer le rayon de courbure qui, pour nous, n'est autre que... le rayon du ballon! Si, en outre, notre cosmologue bidim se rend compte que ce rayon de courbure augmente avec le temps, il comprendra alors peut-être que ce qu'un autre avait nommé «fuite des galaxies» n'est qu'une expansion de son univers... expansion que nous, êtres tri-dimensionnels, concevons sans difficulté et assimilons au gonflement du ballon de baudruche.

Dans un premier temps, le mathématicien bidim serait peut-être regardé par nombre de ses collègues comme un fantaisiste ou un fou. Et pourtant... ses observations ne s'expliquent que par l'existence d'un phénomène affectant un univers qui possède une dimension de plus, et qui «englobe» celui dont il a conscience. Revenons aux êtres tri-dimensionnels que nous sommes, enfermés dans une vision de l'espace qui n'admet que la longueur, la largeur et la hauteur. Notre Univers possède une courbure globale, caractérisée par un rayon de courbure qui augmente avec le temps. Mais il ne faut pas chercher à matérialiser ce rayon dans l'Univers accessible à nos sens. Il n'a de signification que dans un Univers pourvu de 4 dimensions. De même, la «fuite» apparente des galaxies n'est que la traduction, dans nos 3 dimensions, de l'expansion de l'Univers à 4 dimensions dans lequel nous évoluons sans en avoir conscience, de la même façon que les bidims ne se doutent pas qu'ils vivent à la surface d'une sphère.

Nos êtres bi-dimensionnels, dont l'esprit (bi-dimensionnel lui aussi...) ne peut pas concevoir l'existence d'une troisième dimension, perçoivent leur univers d'une façon tout à fait différente de celle dont nous, nous le percevons. Etant donné qu'ils sont infiniment petits comparés à la taille du ballon, leur univers leur semble infini: s'ils partent dans une direction, ils ne rencontreront jamais de limite, jamais de barrière, jamais de bord. Mais pour nous, qui avons accès à une dimension supplémentaire, leur univers est circonscrit dans une sphère, que nous aurions du mal à qualifier d'infinie! En fait, l'Univers des bidims est *illimité* mais *fini*. Il est possible que ces qualificatifs puissent convenir également à la description de notre propre Univers. Ce n'est pas tout. Pour les bidims, l'intérieur du ballon est hors de leur univers. Cela n'existe tout simplement pas. Pour aller d'un point à un autre de la surface du ballon, ils ne peuvent quitter cette dernière. Nous, nous voyons bien que le plus court chemin consiste en une ligne droite traversant l'intérieur du ballon. Mais pour les bidims, prendre le plus court chemin pour aller d'un point à un autre de leur univers consiste à suivre la courbe de la sphère, en visant bien. Après, il suffit de continuer «tout droit». Les bidims croient ainsi suivre une ligne droite puisqu'ils vont «tout droit». Pour nous, ils suivent une trajectoire courbe, puisqu'ils «collent» à la surface sphérique du ballon, prenant ainsi un chemin qui n'est pas le plus court. Mais c'est tout naturellement que les bidims pensent se déplacer en ligne droite, exactement comme nous considérons que pour aller de Genève à New York, il faut «aller tout droit»... même si nous savons que sur le globe terrestre, la trajectoire est incurvée!

### La relativité générale, théorie de la gravitation

Nous venons donc de constater que le «plus court chemin» pour aller d'un point à un autre n'apparaît pas forcément comme une ligne droite. En fait, l'idée de «plus court chemin» est intimement liée à la structure de l'univers dans lequel on évolue. C'est pourquoi on a introduit la notion de *géodésique*, sorte de généralisation de la ligne droite. La relativité générale nous enseigne que tout corps, de la particule élémentaire à l'étoile supergéante, ne peut que suivre une géodésique de l'espace-temps au cours de ses déplacements, quelles que soient les forces auxquelles ce corps est soumis. *Toute trajectoire est obligatoirement une géodésique*. L'importance, en relativité générale, de la notion géométrique de géodésique étant soulignée, nous pouvons à présent montrer comment cette théorie permet d'expliquer en termes géométriques la gravitation, c'est-à-dire la force qui provoque l'attraction mutuelle de deux masses. Tout d'abord, selon la relativité générale, toute masse «courbe» localement l'espace-temps (quadri-dimensionnel), un peu comme on peut déformer une surface souple. En outre, en vertu du principe d'équivalence entre la masse et l'énergie, cette dernière aussi contribue à incurver l'espace-temps. La courbure globale de notre Univers pris dans son ensemble est donc interprétée comme une déformation générale de l'espace-temps, liée à la masse totale et à l'énergie totale que l'Univers renferme, ainsi qu'à sa vitesse d'expansion. À cette courbure globale viennent se superposer des courbures locales, en chaque point où se trouve une masse. Tâchons d'illustrer, à l'aide d'une image simple, comment une masse peut, en déformant l'espace-temps, engendrer le phénomène connu sous le nom de gravitation universelle.

De ce point de vue, l'image habituellement utilisée est éloquent: Lançons, avec une vitesse initiale horizontale, une petite bille de plomb sur une membrane de caoutchouc, horizontale également, et sur laquelle rien d'autre n'est posé. La petite bille de plomb va suivre une trajectoire rectiligne. Maintenant, recommençons l'expérience en ayant posé, au préalable, une grosse bille de plomb au milieu de la membrane. Celle-ci est donc creusée au voisinage de la grosse bille. Si nous lançons la petite bille dans une direction voisine de celle de la grosse bille, la petite bille aura tendance à «tomber» sur la grosse. Selon l'erreur de visée et la vitesse initiale, la trajectoire de la petite bille s'infléchira plus ou moins vers la grosse bille, jusqu'à éventuellement la conduire à des mouvements à peu près circulaires autour de cette dernière. C'est l'image, à deux dimensions, du mouvement des planètes autour du soleil, ou encore de la lune et des satellites autour de la Terre. Ces corps célestes sont «piégés» par la masse de l'astre central, comme la petite bille lorsqu'elle tourne autour de la grosse bille. La présence de la grosse bille de plomb déforme localement la membrane. Plus la masse de la grosse bille est élevée, plus la déformation est importante et plus celle-ci affecte le mouvement des autres billes. En outre, la distance à laquelle la déformation de la membrane commence à jouer un rôle sur les trajectoires des autres billes est d'autant plus grande que la masse de la grosse bille est importante.

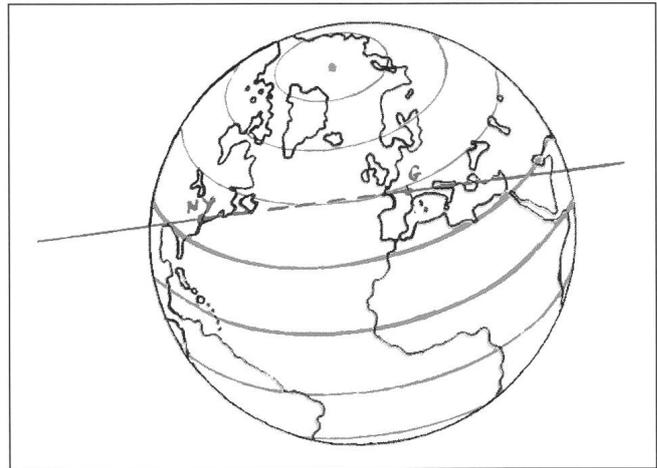
La membrane de caoutchouc pourrait représenter l'espace-temps: toute masse déforme l'espace-temps autour d'elle, pour lui donner une courbure locale qui est d'autant plus importante que la masse est grande. Cette image – l'espace-temps représenté par une membrane déformable – est éloquent quand il s'agit de donner une idée de la façon dont une déformation de l'espace-temps, causée par une masse, peut provoquer des effets similaires à ceux qui



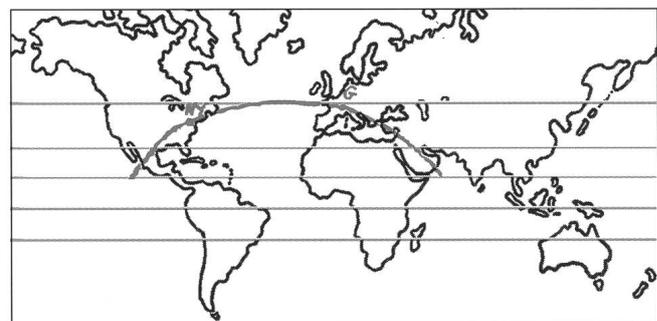
caractérisent la gravitation: infléchissement d'une trajectoire, mise en orbite... Mais on doit se garder de la considérer comme une représentation de ce qu'est la gravitation dans un espace-temps qui aurait une dimension de moins que celui dans lequel nous évoluons. On pourrait pourtant penser que cette image est l'illustration d'une gravitation affectant un espace-temps tri-dimensionnel et dont les effets, dans un univers spatial bi-dimensionnel, sont ceux qui sont visibles dans une projection plane de la membrane déformée. C'est faux. Pour mieux comprendre ce qui se passe en réalité dans un espace-temps au voisinage d'une masse, il faut se souvenir que, selon la relativité générale, tout corps se déplace obligatoirement sur une géodésique, c'est-à-dire sur une *ligne droite généralisée*. Ainsi, dans l'espace-temps quadri-dimensionnel de notre Univers, tout corps suit obligatoirement, au cours de ses déplacements, une trajectoire qui peut être interprétée comme l'équivalent, dans un espace à quatre dimensions, de la ligne droite. Par conséquent, contrairement à la trajectoire de la bille sur la membrane déformée, toute trajectoire dans un espace-temps est une ligne droite, ce dernier étant déformé en tout point où se trouve une masse. Mais pourtant, me direz-vous, les trajectoires des corps célestes apparaissent bien incurvées dans nos trois dimensions! Bien sûr: c'est la déformation de l'espace-temps quadri-dimensionnel au voisinage de chaque masse qui, dans l'Univers tri-dimensionnel que nous percevons, fait apparaître les lignes droites comme des lignes courbes! Tandis que l'absence de masse, et donc l'absence de déformation de l'espace-temps, laisse ces lignes droites inchangées dans un espace pourvu de seulement trois dimensions.

Résumons: Si les trajectoires des corps célestes nous apparaissent courbées, c'est parce que nous les voyons dans un monde à trois dimensions, un univers privé de sa quatrième dimension. La *projection* d'une géodésique dans notre univers perceptible, à 3 dimensions, est courbe lorsque l'espace-temps, à 4 dimensions, est lui-même courbe. En revanche, l'absence de masse, ou d'énergie, laisse l'espace-temps «plat». Dans ce cas, la projection d'une géodésique de l'espace-temps dans notre Univers perceptible tri-dimensionnel est alors une ligne droite. Illustrons ces «effets de projection» par une image faisant appel à un espace tri-dimensionnel dans lequel on considère un univers pourvu de seulement deux dimensions. Nous aurions pu reprendre l'exemple de l'Univers des bidims. Prenons une image semblable – une sphère – mais plus familière: le globe terrestre (voir figure en haut à droite). Pour aller de Genève à New-York, le chemin le plus court, dans l'espace à trois dimensions qui sert de cadre à notre exemple, est évidemment... un tunnel en ligne droite, joignant les deux villes en passant sous terre! Faisons abstraction des problèmes – colossaux – que rencontreraient les ingénieurs chargés de sa construction (n'oublions pas que la température de l'intérieur terrestre atteint très rapidement plusieurs centaines de degrés!). Une fois ce tunnel construit, les voyageurs ayant l'intention de l'emprunter pourraient visualiser leur trajet sur une carte, qui ne serait autre qu'une *projection* plane de la surface du globe et du tunnel. Sur une telle carte, les parallèles du globe terrestre apparaîtraient comme des lignes droites... mais le tunnel dessinerait une courbe!

L'espace-temps plat, dont les géodésiques nous apparaissent comme des lignes droites, est celui de la relativité restreinte, qui constitue une bonne approximation de la réalité lorsque les masses et les distances considérées sont négligeables à



*En relativité générale, les mouvements des corps s'effectuent le long des géodésiques de l'espace-temps. Ce dernier, quadridimensionnel, est «courbé» par la masse et l'énergie. Les géodésiques sont les chemins les plus courts et constituent une sorte de généralisation de la ligne droite. Considérées dans notre Univers tridimensionnel, ces géodésiques apparaissent incurvées, d'où les trajectoires des corps célestes. C'est une façon de concevoir la gravitation universelle.*



*Pour se représenter le phénomène, imaginons un espace à 3 dimensions dans lequel existe un univers bidimensionnel. Les géodésiques de l'espace à 3 dimensions sont des lignes droites. Les projections de ces lignes droites sur l'Univers bidimensionnel peuvent être des courbes. Par exemple, la géodésique joignant Genève à New-York est un tunnel en ligne droite creusé sous terre. Mais sur une carte comme celles qui ornent les atlas, le tunnel et ses prolongements suivraient une courbe, en raison de la projection utilisée.*

l'échelle cosmologique. L'espace-temps courbe est celui de la relativité générale, le seul qui puisse décrire correctement les phénomènes physiques à l'échelle de l'Univers, le seul également qui puisse prendre en compte de façon satisfaisante les effets des masses élevées, comme celles de certains astres: De telles masses peuvent affecter l'écoulement du temps et ralentir ce dernier pour un observateur soumis à leur champ de gravitation. En relativité, une trajectoire est une géodésique, par définition. Si l'espace n'est pas vide, ces géodésiques nous apparaissent incurvées, et *toute chose*, même la lumière, suit des trajectoires incurvées par la masse. C'est cela que l'on appelle la gravitation universelle.

La preuve que les rayons lumineux sont incurvés au voisinage des masses a été formellement apportée pour la première fois en 1919, par l'observation, lors d'une éclipse solaire, d'une étoile dont la ligne de visée était proche de celle



du soleil. On touche là un point crucial de la relativité générale. La loi de la gravitation universelle, découverte par Isaac Newton dans les années 1680, permet d'expliquer convenablement les mouvements des corps célestes, en fonction de leurs masses et de leurs distances respectives: c'est la mécanique céleste, fondée sur la loi de la gravitation universelle. En vertu de cette loi, deux corps s'attirent proportionnellement au produit de leurs masses, et en proportion inverse du carré de la distance qui les sépare. Appliquée à tous les corps, cette loi devient la *théorie classique de la gravitation* et donne satisfaction dans tous les cas rencontrés sur Terre et quasiment tous ceux rencontrés dans le système solaire. Mais elle ne prévoit pas que les photons, particules *sans masse* qui composent la lumière, soient sensibles à la gravitation. La relativité générale donne une explication, géométrique, à ce phénomène: les photons suivent, eux aussi, les géodésiques de l'espace-temps. En outre, des décalages subtils entre l'observation et les calculs de la mécanique newtonienne, comme l'avance du périhélie de Mercure, s'expliquent parfaitement en ayant recours à la relativité générale.

Il faut toutefois bien comprendre que la relativité générale ne remet pas en question la théorie classique de la gravitation: elle la complète. Dans l'immense majorité des problèmes que doivent résoudre les physiciens ou astronomes, la théorie newtonienne de la gravitation convient tout à fait. Mais pour traiter certains problèmes faisant intervenir des masses ou des accélérations importantes, il faut faire appel à la théorie einsteinienne ou *théorie relativiste de la gravitation*. La cosmologie en est l'exemple le plus significatif. En outre, la relativité générale n'est pas seulement un instrument de calcul. Elle constitue le premier véritable début d'explication du phénomène de la gravitation: contrairement à la théorie classique, la relativité générale fournit de précieux éléments de réponse à la question «pourquoi deux masses s'attirent-elles?». Selon Einstein et sa théorie, deux masses s'attirent parce qu'elles déforment l'espace-temps là où elles se trouvent, et que ces déformations ont tendance à faire «tomber» les deux masses l'une vers l'autre.

### La mécanique quantique, physique de l'infiniment petit

Autant la relativité générale est particulièrement adaptée à l'étude de l'infiniment grand, autant la *mécanique quantique* convient parfaitement à la description de l'infiniment petit, domaine dans lequel son utilisation doit se restreindre. Les conceptions actuelles de la structure profonde de la matière dérivent directement des principes de la mécanique quantique, oeuvre de plusieurs physiciens, élaborée principalement dans les années 1920. Entre l'infiniment petit et l'infiniment grand, les physiciens disposent, pour décrire le monde, d'un arsenal de lois et de principes qui conviennent tout à fait aux échelles de grandeur intermédiaires, mais qui sont incapables de rendre compte de ce qui se passe dans l'un ou l'autre des deux extrêmes. Ce «cloisonnement» apparent dans la physique moderne traduit tout simplement l'existence de phénomènes insignifiants aux échelles de grandeur habituellement considérées, mais prépondérants dans l'un ou l'autre des deux «univers extrêmes».

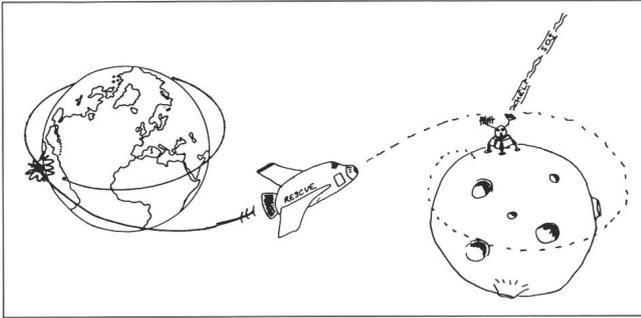
Nous avons vu que la masse et l'énergie courbent l'espace-temps. Les effets de cette courbure sont considérables et fondamentaux à l'échelle de l'Univers. Ils peuvent aussi être extrêmement spectaculaires s'ils concernent certains objets «exotiques» de l'Univers, comme les hypothétiques trous noirs. Mais, dans le monde qui nous entoure, la courbure globale de l'Univers et celles causées par chacun des objets qui s'y trouvent

sont insignifiantes. Elles existent, mais leurs effets ne sont pas plus notables que la courbure de la Terre n'est évidente: à l'échelle de notre planète, la rotundité du globe terrestre est un paramètre important... mais pour construire une maison, on peut faire l'approximation que la surface de la Terre est plate!

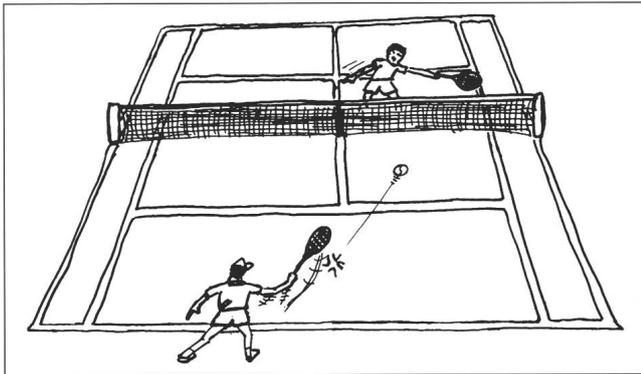
Comme la relativité générale le fait pour l'infiniment grand, la mécanique quantique présente, à plus d'un titre, une image troublante du monde de l'infiniment petit. En particulier, elle considère que l'évolution temporelle des caractéristiques d'un système physique ne peut pas être prédite avec certitude, même si l'état initial de ce système est parfaitement connu. Seules des probabilités peuvent être calculées pour les différentes valeurs que peut prendre chaque paramètre descriptif du système. Cette interprétation probabiliste du monde, qui choqua même Einstein, s'oppose au déterminisme absolu de la mécanique classique, qu'il s'agisse de la mécanique céleste, des lois qui régissent le mouvement d'une balle de tennis lors d'un échange entre deux joueurs... ou même de la relativité générale. Que diriez-vous si je vous disais qu'il est absolument impossible d'avoir la plus petite idée de l'endroit où va atterrir la balle de tennis renvoyée par le joueur A opposé au joueur B, même si l'on a attentivement observé la force et la direction de la frappe de balle, l'inclinaison de la raquette, la vitesse et la direction du déplacement du joueur A au moment où sa raquette rencontre la balle, la direction et la vitesse du vent, etc? Vous répondriez peut-être que le joueur A possède, lui au moins, une idée de l'endroit où il veut placer la balle... Eh bien, en mécanique quantique, ça ne marche pas comme ça. Si vous remplaciez la balle de tennis par une particule élémentaire, vous ne pourriez que calculer des probabilités: la mécanique quantique ne permet en effet que le calcul de la *probabilité* qu'une particule élémentaire en mouvement se trouve à un endroit donné, à un instant  $t$ . Non pas, et c'est là que la mécanique quantique heurte le sens commun, parce que vous ne disposeriez pas de tous les éléments pour prévoir correctement l'évolution des paramètres qui décrivent votre particule (vitesse, position...), mais parce que la nature a recours au *hasard* pour les faire évoluer. Cela dit, si l'on quitte le monde de l'infiniment petit pour rejoindre celui des ordres de grandeur qui nous sont familiers, tout «rentre dans l'ordre»: sans quoi, aucun match de tennis ne pourrait se jouer!

Poursuivons avec l'exemple du match de tennis. A tout moment, on peut déterminer avec une assez bonne précision à la fois la vitesse et la position de la balle de tennis: il suffit par exemple de faire coïncider le déclenchement d'un appareil photo qui immortalisera la position occupée par la balle à l'instant  $t$  du déclenchement, avec celui d'un radar qui mesurera la vitesse de la balle en cet instant. Cela marche pour une balle de tennis, cela marche aussi pour les véhicules photographiés par la gendarmerie nationale au dessus de la vitesse maximale autorisée! Mais cela ne marche pas pour les particules élémentaires. C'est Werner Heisenberg, l'un des pères de la mécanique quantique, qui, vers 1925, énonça son fameux principe d'incertitude qui prévoit que l'on ne peut déterminer simultanément et avec une bonne précision la position d'une particule et le produit de sa masse par sa vitesse. La détermination extrêmement précise de l'un de ces deux paramètres entraîne l'augmentation vers des valeurs infinies de l'incertitude sur l'autre paramètre. Dès lors, comment s'étonner d'être dans l'impossibilité de dire où sera la particule à un instant futur donné?

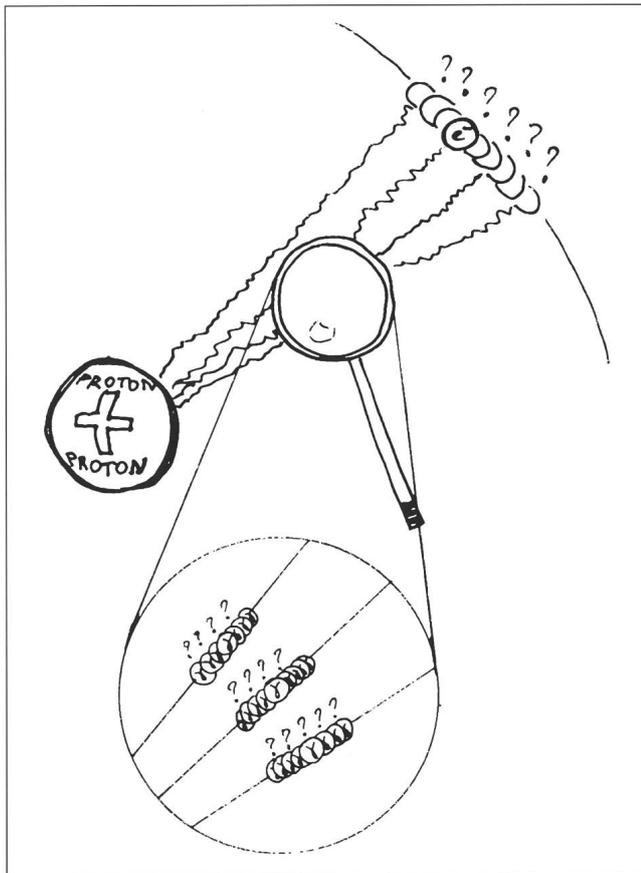
Le principe d'incertitude de Heisenberg et l'interprétation probabiliste du monde de l'infiniment petit par la mécanique quantique ne sont plus aujourd'hui mis en doute. Les



◀ Lors d'un voyage interplanétaire, un vaisseau spatial suit une trajectoire parfaitement déterminée. Celle-ci peut être calculée en utilisant les lois de la mécanique céleste. Dans une partie de tennis, lors d'un échange, la balle suit une trajectoire que l'on pourrait calculer avec précision en connaissant tous les paramètres qui entrent en jeu. Mais même sans ordinateur, chacun des deux joueurs peut apprécier la trajectoire que va emprunter la balle, et agir en conséquence. Dans le monde des particules, tout est différent. La mécanique quantique abolit la notion de trajectoire. Lorsqu'un proton et un électron échangent un photon (par interaction électromagnétique), on ne peut pas dire à l'avance et avec précision où sera l'électron au moment de l'échange. La même indétermination pèse sur le photon émis.



applications de la mécanique quantique sont nombreuses, y compris dans la conception d'instruments de la vie de tous les jours, et constitue autant de preuves de son bien-fondé. Parmi les grands domaines scientifiques qui en ont bénéficié, citons l'électronique, la physique atomique, la chimie, la physique du solide, la physique nucléaire (et ses applications en astrophysique), et la physique des particules. C'est à la mécanique quantique que nous devons, entre autres, l'invention du transistor, et des semi-conducteurs en général, ainsi que celle du laser. C'est grâce à la mécanique quantique que la télévision existe et que l'informatique est un outil en plein développement. Plus éloignées des préoccupations de la vie de tous les jours, les recherches qui sont menées dans les collisionneurs de particules font grand usage du principe d'incertitude. Nous verrons cela plus en détail.



Parmi les fondements de la mécanique quantique, citons la description probabiliste de la matière, dont nous venons de parler, la variation discontinue de certaines quantités qui, en mécanique classique, varient de façon continue, et ce que l'on appelle la «dualité onde-corpuscule». Nous reparlerons bientôt de ces deux derniers points, fondamentaux en mécanique quantique. Toutes ces hypothèses, étayées par de nombreuses expériences et observations, se sont avérées très fécondes pour la physique des particules.

Résumons tout ce qui vient d'être dit: la relativité générale est l'outil de compréhension de l'infiniment grand, c'est l'instrument de la cosmologie; la mécanique quantique est parfaitement adaptée à la description de l'infiniment petit, c'est elle qui règne en maître dans le monde des particules. Dans ces conditions, comment trouver un terrain commun à la cosmologie et à la physique des particules? Tout d'abord, ce n'est pas parce que le chirurgien utilise un bistouri et le bûcheron une tronçonneuse qu'ils n'ont rien à se dire et qu'ils ne peuvent prendre le bus ensemble. Mais il est certain que la recherche d'une théorie physique unifiant la relativité générale et la mécanique quantique est l'un des défis les plus fondamentaux actuellement relevés par les théoriciens. Nous reviendrons sur ce point important.

### La description quantique de la matière

L'image que les physiciens ont peu à peu acquise de la matière est celle d'une structure hiérarchisée, qui voit tous les corps, de la simple bactérie à l'étoile supergéante, s'organiser en molécules, elles-mêmes constituées d'atomes, ces derniers étant formés d'un noyau entouré d'électrons. Le noyau se compose, quant à lui, de nucléons. Ceux-ci sont de deux sortes: le *proton*, dont la charge électrique est égale mais de signe opposé à celle de l'électron, et le *neutron*, de charge électrique nulle. Dans le cas d'un atome normal, le nombre d'électrons



est égal au nombre de protons, de sorte que l'atome est électriquement neutre. On sait que les électrons, qu'il est commode de considérer comme des particules ponctuelles en orbite autour du noyau, sont les principaux acteurs des phénomènes électriques et chimiques visibles à l'échelle macroscopique. On sait également que le noyau est le siège de toutes les réactions dites, pour cette raison, nucléaires. Le noyau représente la quasi-totalité de la masse de l'atome puisque, si la masse du proton n'est que de  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg (moins de deux millièmes de milliardièmes de milliardièmes de milligrammes) et celle du neutron comparable à la masse du proton, l'électron, quant à lui, ne pèse qu'un demi-millième de la masse du proton. Sachant que la taille d'un nucléon est environ la millième partie du milliardième de millimètre, on ne s'étonnera pas du fait qu'il y a encore une trentaine d'années, les scientifiques pensaient que les nucléons étaient les constituants les plus petits du noyau, et que les électrons, les protons et les neutrons étaient les briques élémentaires à partir desquelles était «assemblée» toute la matière. Mais certains faits observationnels restaient mal compris, voire contradictoires avec la théorie. Par exemple, la répulsion électrostatique ne pouvait permettre aux protons de cohabiter dans le noyau. Et pourtant, l'existence d'un noyau solide et stable semblait avérée...

La réponse est venue des développements théoriques et des expériences dans les accélérateurs et collisionneurs de particules, deux champs d'investigations que la mécanique quantique a rendu extrêmement féconds. On sait maintenant que les nucléons sont eux-mêmes des assemblages de particules encore plus élémentaires, les *quarks*, qui interagissent de telle façon que le noyau garde sa cohésion. Malgré la complexité de sa structure, on entend souvent dire que la matière est faite de vide. Cette affirmation n'est pas exagérée: si la taille d'un atome n'excède pas le dix millionième de millimètre, il faut encore diviser par dix mille cette grandeur pour atteindre la taille du noyau. L'immense vide qui règne entre le noyau et les électrons des couches externes n'est cependant pas plus considérable que celui que l'on trouve à l'intérieur des nucléons eux-mêmes (dont la taille est de l'ordre du dixième du diamètre du noyau). En effet, un quark occupe un volume inférieur au milliardième de celui du nucléon; or, il n'y a que trois quarks par nucléon! En fait, comme dans le cas des électrons, les quarks sont si petits qu'il est pour l'instant impossible de leur attribuer une taille. On sait simplement que celle-ci est inférieure au millième de celle du nucléon, c'est-à-dire qu'elle n'atteint pas le millionième de milliardième de millimètre...

Si l'existence de l'électron a pu être établie dès 1897 et celle de la structure dite «planétaire» de l'atome en 1911, il a fallu attendre 1932 pour que l'on découvre le *neutron*, de masse comparable à celle du proton mais porteur d'aucune charge électrique. Ensuite, de nombreuses découvertes ont successivement permis d'affiner notre compréhension de la matière. C'est grâce au développement de la mécanique quantique et des théories qui se sont appuyées sur ses principes, que le voile a ainsi pu être en partie levé sur la structure intime de la matière. La mécanique quantique a permis de comprendre l'organisation de la matière et les interactions entre ses constituants fondamentaux, et aussi de prévoir l'existence de nouvelles particules, lesquelles, une fois détectées, permettaient d'affiner la théorie qui se trouvait validée. Au contraire, la non-détection d'une particule dont l'existence avait été prédite par la théorie incite à une révision de cette dernière. Cette interdépendance

entre la théorie et l'expérience, dont se nourrit la science, est à la base des progrès de la physique des particules depuis ses débuts. Actuellement, c'est dans les collisionneurs de particules que sont testées les théories de la matière. Mais, comme nous le verrons un peu plus loin, c'est à l'étude des rayons cosmiques que l'on doit quelques-unes des découvertes importantes intervenues entre 1930 et 1950. Comprendre les conceptions actuelles de la physique des particules nécessite au préalable une petite introduction à ce qui fait l'essence de la mécanique quantique, ainsi qu'un résumé du déroulement historique de la construction de ce bel édifice théorique, dont la portée en physique des particules est immense.

Les origines de la mécanique quantique remontent à l'année 1900, quand le physicien Max Planck propose son *hypothèse des quanta*, qui prévoit que la lumière est faite de «petits grains» possédant chacun une quantité d'énergie fonction de la fréquence: le quantum d'énergie. Ce faisant, et sans le savoir, Planck posa les bases de la mécanique quantique, l'autre révolution de la physique du XX<sup>e</sup> siècle, avec la relativité. Ainsi, l'énergie varie par sauts, ne pouvant prendre que des valeurs discontinues que nous qualifierons de «quantiques». Cinq ans plus tard, Einstein utilisa ce concept nouveau pour expliquer l'effet photo-électrique. La nature corpusculaire de la lumière était une découverte surprenante, étant donné que tous les physiciens l'avaient jusque-là exclusivement considérée comme une onde, dont les lois de propagation avaient été écrites par Maxwell, en 1868. La variation de l'énergie par sauts fut encore invoquée par le physicien Niels Bohr qui, en 1913, expliqua ainsi le fait que les fréquences (ou les couleurs, si l'on préfère) des rayonnements émis par les atomes ne peuvent pas prendre n'importe quelles valeurs. C'est en effet Bohr qui, le premier, comprit que les électrons ne peuvent graviter autour du noyau atomique que sur des orbites bien déterminées, un changement d'orbite s'opérant toujours par l'absorption ou l'émission d'un quantum d'énergie, c'est-à-dire d'un photon, suivant que l'électron gagne une orbite plus énergétique ou moins énergétique. Cette quantification de l'énergie des électrons constitue un pan important des fondations de la mécanique quantique, en même temps que le point de départ de la physique atomique. Mais c'est une dizaine d'années plus tard que l'impulsion décisive allait être lancée pour l'édification d'une physique entièrement nouvelle, rompant avec des principes considérés jusque-là comme indiscutables, et que même la relativité n'avait osé remettre en question.

Comme pour achever de rendre floue la frontière entre la notion de particule et celle d'onde, ce fut, après le photon, au tour de l'électron de se voir attribuer la double nature, à la fois ondulatoire et corpusculaire. C'est Louis de Broglie qui, en 1923, associa une onde à l'électron, dans sa *mécanique ondulatoire*. Tout alla ensuite très vite. 1926: Erwin Schrödinger propose une équation qui régit l'évolution temporelle de l'onde que De Broglie attribue aux électrons et que l'on appelle la «fonction d'onde». La même année, Max Born relie la probabilité que le résultat d'une mesure prenne une valeur quantique, à la fonction d'onde. 1927: la nature ondulatoire de l'électron est confirmée expérimentalement. Ainsi, l'on sait maintenant que les électrons comme les photons et, d'une manière générale, les particules élémentaires, se comportent, tantôt comme des particules, tantôt comme des ondes, selon les circonstances. Par la suite, la mécanique quantique volera de succès en succès dans son application à la description des phénomènes microscopiques de la nature.



### Entrée en (anti)matière de la physique des particules

En 1929, la physique fait à nouveau un important pas en avant, grâce au physicien Paul Dirac qui introduit les concepts de la relativité restreinte dans la description quantique du comportement des électrons. La théorie qui en résulte aboutit à la prédiction de l'existence d'un électron de charge positive, ou «antiélectron». Cette nouvelle particule, de même masse que l'électron mais de charge opposée, que l'on nomme plus volontiers «positron» (ou parfois «positon»), sera détectée en 1932 dans les rayons cosmiques, validant ainsi la théorie de Dirac. Cette détection du positron est le premier exemple historique illustrant l'intersection entre la physique des particules et l'astrophysique. Mais surtout, la découverte de l'antiélectron dans les rayons cosmiques apporta la preuve de l'existence de l'antimatière. On sait maintenant que chaque particule élémentaire possède son *antiparticule*, de même masse mais possédant des caractéristiques inversées. Par exemple, lorsque la particule n'est pas neutre, son antiparticule possède une charge électrique opposée. Une autre quantité, la «couleur», dont nous allons bientôt reparler, est elle aussi inversée. En fait, la description des propriétés des antiparticules a été mise au point dans une théorie plus récente, qui date de 1949, et que l'on doit à deux physiciens: Richard Feynman, auteur notamment d'une technique de calcul fondée sur une représentation graphique et qui simplifia grandement les calculs relatifs aux interactions électromagnétiques, et Julian Schwinger. L'*électrodynamique quantique*, tel est le nom de cette théorie, traduit les équations de Maxwell, qui décrivent la propagation des ondes lumineuses (ou électromagnétiques, de façon plus générale), en un formalisme qui tient compte des concepts de la mécanique quantique. Les équations de Maxwell sont valables dès que l'on quitte le monde de l'infiniment petit: c'est l'électrodynamique classique. Mais lorsque l'on traite de l'interaction entre deux particules élémentaires, on doit faire appel à l'électrodynamique quantique, ou théorie quantique relativiste du champ électromagnétique. Cette théorie décrit également les processus de création de paires et d'annihilation électron-positron.

La création de paires, conséquence directe du principe d'équivalence entre la masse et l'énergie, est quotidiennement exploitée dans les collisionneurs de particules comme ceux qui fonctionnent au CERN, le laboratoire européen de physique des particules, situé à Genève. Dans ces collisionneurs, de la matière est créée à partir de l'énergie libérée dans des chocs entre particules. Des photons sont transformés en une paire particule-antiparticule. On parle de «matérialisation». C'est lors de ces matérialisations que l'on peut espérer pouvoir faire naître des particules qui n'existent pas à l'état naturel, mais dont la théorie prévoit l'existence. Voilà tout l'enjeu de la recherche expérimentale en physique des particules: tenter de matérialiser des particules extrêmement instables et de les détecter pendant le temps extraordinairement court de leur existence. Il faut savoir en effet que certaines de ces particules ne vivent pas plus d'un dix millième de milliardième de seconde avant de se désintégrer! Nous reviendrons sur ces créations de paires et l'utilisation de ce phénomène en physique des particules.

L'annihilation électron-positron est, elle aussi, une conséquence du principe d'équivalence entre la masse et l'énergie. Mais elle correspond à une transformation inverse: quand une particule et son antiparticule se rencontrent, elles se détruisent mutuellement, on dit qu'elles s'annihilent, et se transforment en énergie, donc en photons.

### Quatre interactions pour gouverner l'Univers

Nous avons déjà brièvement décrit quelques caractéristiques de la gravitation. Cette force provoque l'attraction mutuelle de deux corps, quels qu'ils soient. Ce qu'il faut comprendre dès à présent, c'est que la gravitation est en réalité une «micro-force» qui agit sur toutes les particules élémentaires, chacune d'entre elles attirant chacune des autres. Les effets que nous pouvons constater à notre échelle de grandeur ne sont que ceux des forces résultant de la combinaison de toutes ces micro-forces, lorsque de grandes quantités de particules élémentaires sont mises en jeu. La pomme de Newton, notre planète, le soleil, la feuille de papier que vous lisez, le fauteuil sur lequel vous êtes assis... et vous-mêmes, n'êtes en effet que de formidables amoncellements de quarks et d'électrons, tous soumis à l'action de cette force élémentaire. Cette dernière est extrêmement faible, mais l'accumulation d'une telle quantité de particules dans les corps habituellement considérés, même les plus petits, fait que la force résultante devient importante.

C'est Newton qui, le premier, a exprimé la formule mathématique qui permet de calculer l'intensité de cette force en fonction de la masse de chacun des deux corps considérés et en fonction de la distance qui les sépare. Mais Newton a fait beaucoup plus que cela. Il a compris que cette force d'attraction était une force «interagissante». Prenons le cas de deux objets, A et B. Il peut s'agir de deux particules (ou antiparticules). La force de gravitation s'exerce de A vers B, mais aussi de B vers A: A attire B tout autant que B attire A. Pour cette raison, on dit que la force «interagit» entre A et B. On parlera donc «d'interaction gravitationnelle».

L'interaction gravitationnelle n'est que l'une des quatre interactions fondamentales qui existent dans la nature et qui gouvernent l'Univers. Ces quatre interactions fondamentales sont les forces élémentaires qui sont à la base de tous les phénomènes physiques, y compris la cohésion de la matière. Outre la gravitation, ces forces élémentaires sont: l'interaction électromagnétique, responsable des phénomènes électriques ou magnétiques, dont ceux qui sont à l'origine de la structure de l'atome; l'interaction forte, qui intervient dans de nombreuses réactions nucléaires et qui est l'agent de la cohésion du noyau atomique; et l'interaction faible, à l'origine de nombreuses désintégrations de particules, et notamment de la forme la plus courante de radioactivité, la radioactivité *beta*. Cette dernière interaction a ceci de particulier par rapport aux trois autres, qu'elle est la seule à pouvoir modifier la nature des particules qu'elle fait interagir. Nous passerons brièvement en revue ces quatre interactions qui, se manifestant à l'échelle microscopique, sont responsables de la forme sous laquelle existe la matière ainsi que des phénomènes que nous observons à l'échelle macroscopique. Mais afin de mieux comprendre les mécanismes qui régissent ces interactions, il est nécessaire de décrire auparavant les différentes familles de particules élémentaires, en ouvrant au passage une parenthèse (que nous refermerons vite) à propos de la nature du vide dans la physique moderne, qui joue un rôle fondamental en physique des particules.

### Les particules élémentaires: des fermions et des bosons intermédiaires

Nous avons vu que la nature est faite de plusieurs particules dites «élémentaires», avec lesquelles se construit la matière... ou l'antimatière. Toutes ces particules sont si petites que, en prenant l'exemple des quarks, nous pourrions en aligner plus d'un million de milliards dans un intervalle de seulement 1 mm. La vision que, de nos jours, nous avons de la structure

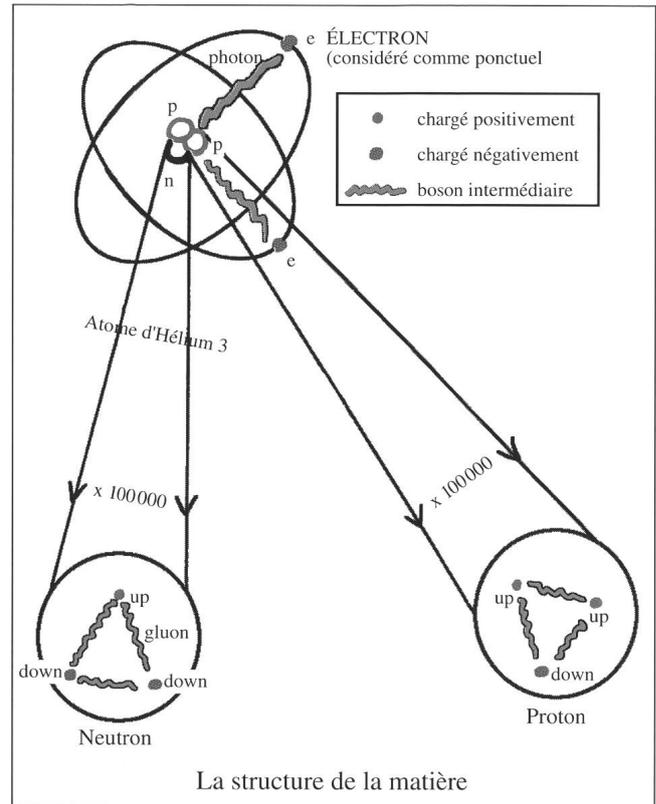
intime de la matière pourrait passer pour très compliquée en raison du nombre assez important de particules élémentaires dont nous avons besoin pour l'expliquer. En réalité, si ce nombre est effectivement beaucoup plus grand qu'il y a quelques dizaines d'années, nous avons considérablement gagné en simplicité quant aux mécanismes nécessaires pour expliquer leurs interactions. Nous savons désormais qu'une interaction entre deux particules consiste en l'échange d'une troisième particule entre elles. Cette particule échangée transmet, en quelque sorte, l'interaction. En outre, toutes ces différentes particules peuvent se regrouper en familles, comme nous allons le voir.

Les particules élémentaires sont d'abord divisées en deux catégories: celles qui subissent les interactions, les *fermions*, et celles qui véhiculent ces interactions, les *bosons intermédiaires* ou bosons vecteurs. Les fermions, dont nous avons vu qu'ils possèdent chacun une antiparticule associée, se subdivisent eux-mêmes en deux types: les *leptons*, dont le plus connu est l'électron, et les *quarks*.

Nous avons déjà cité le nom d'un boson intermédiaire: en effet, le *photon*, dont il convient de noter qu'il est sa propre antiparticule, est non seulement le constituant de la lumière, mais également l'agent de transmission de l'interaction électromagnétique. Sa charge électrique est nulle. Les autres bosons actuellement connus sont le *gluon*, qui véhicule l'interaction forte et dont la charge électrique est nulle également, et les trois bosons qui transmettent l'interaction faible. Ces derniers sont le *boson  $Z^0$* , de charge électrique nulle aussi, le *boson  $W^-$* , de charge électrique  $-1$  et enfin le *boson  $W^+$* , de charge électrique  $+1$ . Les bosons responsables de la transmission de l'interaction faible n'ont été observés pour la première fois qu'en 1983, au CERN. Ajoutons que l'on suppose l'existence d'un sixième boson, le *graviton*, qui transmettrait l'interaction gravitationnelle. Sa détection n'est cependant pas à l'ordre du jour: tant du point de vue théorique que du point de vue expérimental, il est pour l'instant difficile de traiter l'interaction gravitationnelle comme les trois autres forces élémentaires, pour des raisons que nous aborderons plus tard.

En fait, il y a une différence importante entre un boson intermédiaire et un fermion: le second est réel, tandis que le premier est *virtuel*. Qu'entend-on par là? Le fait que les bosons vecteurs soient qualifiés de «virtuels» signifie-t-il qu'ils ne sont pas réels? Exactement. Ou plus précisément, cela indique qu'ils sont inobservables. Pour comprendre le sens de tout cela, il faut tout d'abord revenir au rôle des bosons intermédiaires. Il semble que si une interaction entre deux particules implique l'échange entre elles d'un tel boson, alors toute interaction est un processus qui viole, d'une certaine façon, le principe de conservation de l'énergie: en effet, le boson doit subitement commencer d'exister, véhiculer la force fondamentale et, sitôt sa besogne effectuée, disparaître aussi soudainement qu'il était apparu. Pendant un certain temps, tandis qu'il effectue le trajet d'une particule à l'autre, il est porteur d'une certaine quantité d'énergie. S'agit-il vraiment d'une violation du principe de conservation de l'énergie? Pas si la particule ne peut pas être détectée. Pas si elle n'existe pas assez longtemps pour que l'on puisse l'observer.

Cette inobservabilité ou indétectabilité ne provient pas d'une quelconque insuffisance de moyens techniques mis à disposition des physiciens qui voudraient l'observer, elle est inhérente au boson: celui-ci est virtuel, il n'existe pas vraiment, donc on ne peut pas le voir. Mais comment une particule pourrait-elle à la fois transmettre une force et ne pas exister?



La structure de la matière

La réponse peut être trouvée en ayant recours au principe d'incertitude de Heisenberg, décidément bien utile. En effet, ce principe qui, rappelons-le, stipule que, pour une particule élémentaire, la position  $x$  et le produit de la masse  $m$  par la vitesse  $v$  ne peuvent être déterminés simultanément avec précision, ce principe donc, peut être interprété de façon différente. Le premier énoncé peut s'exprimer dans une inéquation qui s'écrit  $\Delta x \cdot \Delta mv \geq \hbar$ , où  $\hbar$  est une constante et où les symboles  $\Delta$  désignent l'incertitude (par exemple,  $\Delta x$  est l'incertitude sur la position de la particule). Cette inéquation est équivalente à une autre inéquation:  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ , où  $\Delta t$  désigne un intervalle de temps et  $\Delta E$  une fluctuation d'énergie. Voilà l'explication de notre paradoxe apparent: si le principe de conservation de la quantité d'énergie est «violé» pendant un intervalle de temps  $\Delta t$  tel que l'inégalité n'est pas vérifiée, c'est-à-dire si le boson intermédiaire d'énergie  $\Delta E$  n'existe pas assez longtemps pour que le membre de gauche de l'inéquation soit supérieur ou égal au membre de droite, alors le boson échappe à toute détection et le principe de conservation de la quantité d'énergie n'est pas violé. En ne satisfaisant pas le principe d'incertitude de Heisenberg, le boson ne gagne pas ses galons de particule *réelle*, mais il peut tout de même transmettre une interaction. Les bosons intermédiaires sont, pour cette raison, qualifiés de *virtuels*. Cependant, même inobservables directement, les bosons intermédiaires peuvent être indirectement détectés, grâce à l'observation des particules qui naissent de leur désintégration.

### Quand le vide n'est plus vide

Nous avons déjà évoqué les «créations de paires». Dans ce type de processus, c'est un photon virtuel qui se transforme en une paire particule-antiparticule, constituant ainsi une



illustration de l'équivalence de la masse et de l'énergie, ces deux quantités pouvant se transformer l'une en l'autre. Ainsi, la paire particule-antiparticule ne surgit pas du néant, elle provient de la transformation d'un photon virtuel. Ce dernier aussi désobéit au principe d'incertitude de Heisenberg. Nous avons maintenant un aperçu d'un autre bouleversement apporté par la mécanique quantique: le vide n'est pas synonyme de rien. Dans le vide, il peut toujours y avoir des particules virtuelles.

Comme nous l'avons vu, cette notion de vide qui ne l'est pas vraiment est à la base des expériences qui sont menées dans les collisionneurs de particules. Lors de certaines de ces expériences, on provoque la collision de deux faisceaux de particules circulant en sens inverse dans un anneau. Avant le choc, chaque faisceau a accumulé une certaine quantité d'énergie, conférée par sa vitesse, celle-ci étant très proche de celle de la lumière. Lors de la collision, cette énergie, appelée *énergie cinétique* parce que due à la vitesse des particules, est soudain concentrée dans un volume infiniment petit et brutalement libérée. Une grande partie de cette énergie libérée se transforme alors en masse, des paires particule-antiparticule étant créées à partir de photons virtuels. Le «surplus» d'énergie disponible sera instantanément conféré aux particules nouvellement créées, sous forme d'énergie cinétique, par la vitesse qui leur aura été communiquée. Pour qu'une particule de masse donnée puisse être créée lors d'un de ces chocs, il faut donc que l'énergie libérée au moment de la collision soit au moins égale à la masse au repos de cette particule, multipliée par le carré de la vitesse de la lumière. On comprend à présent la course à l'énergie engagée depuis de nombreuses années par les physiciens, qui veulent disposer de nouveaux accélérateurs et de nouveaux collisionneurs, toujours plus puissants. Cette course vers des énergies sans cesse plus élevées n'a d'autre motivation que la recherche de la mise en évidence de particules toujours plus massives, qui n'existent pas à l'état naturel, mais qui peuvent se matérialiser dans des collisions énergétiques, validant ainsi une théorie si elles sont observées avec les caractéristiques prédites par ladite théorie... ou renvoyant les théoriciens à leurs calculs dans le cas contraire.

### Les leptons et les quarks

Il est temps de revenir à notre inventaire des particules élémentaires. Nous avons vu que les fermions, les particules réelles (et non virtuelles) qui subissent les interactions, se subdivisent en deux catégories: les leptons et les quarks.

Les leptons sont au nombre de six. Il y a d'abord l'électron, dont l'existence a été établie en 1897; il y a ensuite le muon, découvert en 1936 dans les rayons cosmiques; et enfin il y a la particule «tau», dont l'existence est connue depuis 1976, date à laquelle elle fut observée pour la première fois dans l'accélérateur linéaire de Stanford (SLAC), en Californie. Ces trois leptons ont la même charge électrique: Celle-ci vaut -1 (la charge de l'électron sert d'unité). L'électron est le lepton le plus connu puisqu'il rentre dans la constitution des atomes et que le courant électrique n'est rien d'autre qu'un courant d'électrons. Bien que n'entrant pas dans la composition de la matière «normale», celle qui nous entoure et dont nous sommes nous-mêmes faits, le muon et la particule tau existent et doivent être pris en compte si l'on veut comprendre de quoi la matière est faite. Les trois autres leptons sont les *neutrinos* associés à chacun des leptons que nous venons de citer. Chaque neutrino est en effet une sorte de partenaire pour l'un de ces trois leptons. Les neutrinos se

distinguent par une charge électrique nulle. Ce sont des particules très difficiles à détecter car elles interagissent extrêmement peu avec la matière. C'est vers 1930 que le physicien Wolfgang Pauli prédit l'existence des neutrinos, mais ce n'est qu'en 1956 que l'on en détecta enfin.

Au début des années 1960, on savait qu'il existait des particules beaucoup plus lourdes que l'électron et le muon: ce sont les *baryons*, dont nous reparlerons. Le proton et le neutron sont des baryons et, à l'époque, on en connaissait également six autres, apparus fugacement dans les accélérateurs de particules ou dans les rayons cosmiques. En 1961, les physiciens Murray Gell-Mann et Yuval Ne'eman montrent indépendamment que l'on peut décrire les propriétés des baryons par une construction mathématique baptisée du nom peu évocateur de SU(3). Selon cette dernière, les baryons obéissent à des «lois de symétrie». En physique des particules, on désigne sous le nom de symétrie la faculté pour un système d'équations décrivant un système physique d'admettre des solutions qui ne changent pas lorsqu'on modifie l'une des caractéristiques du système en question. La symétrie s'exerce alors par rapport à ladite caractéristique. Depuis cette époque, l'application de ces lois de symétrie s'est généralisée à toutes les familles de particules, et l'une de leurs conséquences est qu'il doit y avoir autant de leptons que de quarks. Mais revenons à la description des propriétés des baryons et à la symétrie SU(3). En 1963, le même Gell-Mann et un autre chercheur du nom de George Zweig proposent indépendamment et presque en même temps le modèle des quarks. Selon ce modèle, les baryons sont tous constitués de particules encore plus petites, appelées quarks, et dont les différentes combinaisons possibles permettent de reconstituer des objets physiques obéissant aux principes de symétrie de SU(3). Les propriétés de chaque baryon dépendent des quarks dont il est constitué, lesquels n'existent qu'en un petit nombre de types différents (trois, pensait-on à l'époque). Avec différentes combinaisons de ces trois quarks, on arrivait à reconstituer tous les baryons connus alors. Lorsque, en 1967, à l'Université de Stanford, en Californie, des électrons accélérés jusqu'à une énergie auparavant jamais atteinte permirent de mettre en évidence la présence de particules à l'intérieur des protons, on pensa que l'on venait peut-être de découvrir expérimentalement les fameux quarks.

Depuis, l'apparition de nouveaux baryons a nécessité d'augmenter le nombre de quarks nécessaires pour rendre compte de la diversité de leurs propriétés à l'aide de ce modèle. C'est en 1974 que ce dernier fut définitivement admis, après la découverte d'un baryon dont l'existence avait été prédite à partir du modèle étendu à quatre quarks. Le principe des symétries mathématiques a montré sa capacité à décrire les propriétés de la matière, s'appliquant également aux leptons. Aujourd'hui, la notion de symétrie est fondamentale en physique des particules.

L'existence d'un quark supplémentaire ayant été mise en évidence en 1977, on en recense actuellement cinq: les quarks «up» et «charm», dont la charge électrique vaut  $+2/3$ ; et les quarks «down», «strange» et «bottom», dont la charge électrique vaut  $-1/3$ . En réalité, les lois de symétrie que nous venons d'évoquer incitent les théoriciens à prévoir l'existence d'un sixième quark, appelé «top», et dont la charge électrique serait de  $+2/3$ . Ce dernier n'a pas encore pu être détecté, restant pour le moment en dehors de la limite de détection des instruments actuels, en raison de l'énergie importante qu'il faut fournir pour le faire apparaître. Il semble cependant que l'existence de ce sixième quark ne puisse pas être mise en



doute et que sa détection ne soit plus qu'une affaire de temps. Seuls les quarks up et down, qui constituent les nucléons, sont des briques élémentaires de la matière qui nous entoure. Les quatre autres quarks sont beaucoup plus lourds et se désintègrent spontanément pour mener à la création de quarks up et down, ce qui explique leur durée de vie extrêmement courte.

Les quarks ont ceci de particulier que, contrairement aux leptons, il leur est impossible d'être isolés. Cela signifie qu'ils se regroupent toujours en baryons et que, par conséquent, aucune expérience ne peut permettre d'observer un quark solitaire. Lorsqu'une paire quark-antiquark est créée, les deux particules se transforment immédiatement en baryons. Cependant, comme l'ont montré les expériences réalisées dès la fin des années 1960 à Stanford, les quarks sont presque entièrement libres à l'intérieur des nucléons, même s'ils ne peuvent s'en échapper.

**Charge électrique, saveur et couleur**

Nous avons déjà cité les charges électriques des différents leptons, quarks et bosons intermédiaires. Dans l'état actuel de nos connaissances, deux autres grandeurs caractérisent les particules élémentaires: la saveur et la couleur. Que les lecteurs se rassurent: les physiciens des particules ne confondent leur domaine, ni avec la cuisine, ni avec la peinture! La saveur et la couleur dont ils parlent n'a rien de commun avec les notions que ces mots désignent dans le vocabulaire courant.

La charge électrique régit le comportement d'une particule lorsque celle-ci est soumise à l'interaction électromagnétique. Toutes les particules chargées sont sensibles à cette interaction, tandis que les particules de charge nulle ne seront pas concernées par l'électromagnétisme.

La saveur des particules varie de l'une à l'autre. Il y a autant de saveurs que de particules, ce qui en totalise donc douze pour les fermions. La saveur conditionne le comportement d'une particule face à l'interaction faible. Tous les fermions subissent donc l'interaction faible, d'une façon qui est propre à chacun d'entre eux. En fait, pour les physiciens des particules, la saveur est à l'interaction faible, ce que la charge électrique est à l'interaction électromagnétique.

La couleur caractérise, quant à elle, la réponse d'une particule à l'interaction forte. Seuls les quarks y sont sensibles. En effet, les leptons étant dépourvus de couleur, ils ne peuvent pas être affectés par cette interaction. En revanche, chaque quark peut porter l'une des trois couleurs qui existent dans le monde des quarks: rouge, bleue ou verte. On l'aura compris, la couleur joue, vis-à-vis de l'interaction forte, le même rôle que celui de la charge électrique à l'égard de l'interaction électromagnétique.

**Trois familles de fermions**

Des considérations théoriques – des lois de symétrie comme celles qui ont conduit à supposer l'existence des quarks – ont amené les physiciens des particules à classer les fermions que nous venons d'énumérer en trois familles. La première famille est celle qui regroupe l'électron, son neutrino, le quark up et le quark down. Cette famille est donc constituée d'un doublet de leptons et d'un doublet de quarks. Les membres de la seconde famille sont le muon, son neutrino, le quark charm et le quark strange: encore un doublet de leptons et un doublet de quarks. Enfin, on trouve associés dans la troisième famille, la particule tau, son neutrino, et les quarks top et bottom, soit à nouveau un

doublet de leptons et un doublet de quarks. Rappelons que c'est justement dans le cadre de cette classification motivée par des considérations de «symétrie», que l'existence du sixième quark, le quark top, trouve sa justification.

On remarquera que la première famille regroupe toutes les particules élémentaires qui rentrent dans la composition de la matière «normale», celle qui existe autour de nous: les quarks up et down forment les nucléons et l'électron achève de compléter la structure des atomes. La deuxième famille, quant à elle, est constituée de fermions de plus grande masse. Considérons, par exemple, deux leptons représentant chacune de ces deux familles. On constate que le muon, appartenant à la seconde famille, est 200 fois plus massif que l'électron, membre de la première famille. En raison de leur «grande» masse, les fermions qui composent la deuxième famille sont très instables et ne peuvent pas exister longtemps. On ne les trouve donc que dans le rayonnement cosmique (le muon) ou dans les expériences qui sont menées dans les collisionneurs de particules. La troisième famille, enfin, rassemble des fermions dont les masses sont encore plus élevées. La particule tau, pour reprendre l'exemple des leptons dans chaque famille, possède une masse 4000 fois supérieure à celle de l'électron. Les fermions de la troisième famille sont, par conséquent, encore plus difficiles à mettre en évidence puisque, plus la masse d'une particule est élevée, plus l'énergie qu'il faut fournir pour la créer est importante.

	1 <sup>re</sup> famille	2 <sup>e</sup> famille	3 <sup>e</sup> famille	Charge électrique	Bosons pouvant les faire interagir
<b>Leptons</b>	électron	muon	tau	-1	$\gamma$ , WZ et gr
	neutrino électronique	neutrino muonique	neutrino du tau	0	WZ
<b>Quarks</b>	up	charm	top	+2/3	$gl$ , $\gamma$ , WZ et gr
	down	strange	bottom	-1/3	

*Classification des particules élémentaires. Parmi les fermions, seul le quark top n'a pas encore pu être mis en évidence. En ce qui concerne les bosons intermédiaires, les gluons (gl), les trois médiateurs  $W^-$ ,  $W^+$  et  $Z^0$  de l'interaction faible (WZ) et les photons ( $\gamma$ ) ont pu être identifiés. Seul le graviton (gr) reste en dehors de nos possibilités de détection.*

En réalité, ces énergies sont extrêmement faibles comparées à celles que l'homme sait créer. C'est la densité d'énergie qui doit être colossale pour pouvoir mettre en évidence, par exemple, le sixième quark, le quark top. C'est-à-dire que l'énergie mise en jeu dans les accélérateurs et les collisionneurs de particules doit pouvoir être concentrée dans un volume extrêmement petit, afin de pouvoir se transformer en une particule dont la masse au repos est, dans le cas du quark top, supérieure à 100 fois celle du proton, ou encore, plus grande que 200'000 fois celle de l'électron.

On pourrait se poser la question de savoir s'il existe davantage de familles de fermions que les trois que nous venons d'énumérer. En fait, il semble bien que ce nombre soit effectivement limité à trois. L'une des raisons qui incitent les



physiciens à repousser la possibilité de l'existence d'une quatrième famille de particules élémentaires fait appel à la cosmologie, plus exactement à ce que l'on sait (ou croit savoir) de l'histoire de la formation de la matière, dont les moments cruciaux remontent aux tout premiers instants de l'Univers.

### Breve histoire de la matière

Au fur et à mesure que l'Univers s'est refroidi, la matière s'est élaborée. Ce processus a commencé par la création des nucléons à partir des quarks, s'est poursuivi avec la synthèse des noyaux légers (quelques nucléons seulement), puis la formation des atomes neutres, et s'est achevé par la synthèse des éléments lourds dans les étoiles qui étaient nées de l'effondrement gravitationnel des nuages d'hydrogène.

Il ne s'est écoulé qu'un temps de l'ordre du dix millième de seconde après le Big Bang, pour que les quarks s'associent en protons et en neutrons. L'Univers était alors à une température de plusieurs milliers de milliards de degrés. Environ une minute après, quand l'âge de l'Univers ne se comptait encore qu'en dizaines de secondes, la grande majorité des noyaux des éléments légers qui peuplent actuellement l'Univers se sont constitués à partir des nucléons récemment formés. C'est en effet lors de cette *nucléosynthèse primordiale* que furent synthétisés: le deutérium (ou hydrogène «lourd»), à partir d'un proton et d'un neutron; l'hélium 3 et l'hélium 4, à partir de deux protons et de respectivement un et deux neutrons; et le lithium 7, à partir de trois protons et quatre neutrons. La température de l'Univers avait considérablement baissé, mais était encore d'environ un milliard de degrés! Ce n'est que bien plus tard, environ 100'000 ans après, que les électrons allaient être capturés par les noyaux, formant ainsi des atomes neutres dans un Univers de quelques milliers de degrés. Ces cent mille ans n'auront pourtant été, pour l'Univers, que l'équivalent, pour un homme de soixante dix ans, des quatre premières heures de sa vie...

A partir de ce moment, et tandis que l'Univers continuait à se refroidir, les nuages de gaz ont commencé à se contracter sous l'effet de la force de gravitation. Principalement constitués d'hydrogène atomique (un proton autour duquel gravite un électron: c'est l'atome le plus simple), ces nuages de gaz ont fini par se contracter suffisamment pour que la densité et la température au centre des grumeaux qui s'étaient ainsi formés deviennent assez importantes pour que les réactions nucléaires démarrent. C'est de cette façon que la première génération d'étoiles est née dans les galaxies. Depuis, plusieurs autres générations se sont succédées, toutes dues aux mêmes mécanismes de formation. Il y a cependant une différence très importante entre la première génération d'étoiles et celles qui lui ont fait suite: ces dernières ont pu bénéficier de l'apport des éléments lourds qui avaient été fabriqués dans le coeur des étoiles qui les avaient précédées, grâce aux réactions nucléaires au cours desquelles des noyaux fusionnent pour donner des noyaux plus lourds. En effet, lorsqu'une étoile meurt en explosant (phénomène connu sous le nom de supernova), elle éjecte une grande quantité de la matière qu'elle avait elle-même synthétisée au moyen des réactions de fusion thermonucléaire, rejetant ainsi dans le milieu interstellaire des éléments lourds que les prochaines générations d'étoiles intégreront au cours du processus de contraction gravitationnelle. Si cet enrichissement en éléments lourds est important, c'est parce que sans ces noyaux fabriqués un jour au coeur d'une étoile, nous n'existerions pas... Nous en sommes en effet entièrement constitués!

### Où la désintégration du boson $Z^0$ confirme la nucléosynthèse primordiale

Par conséquent, à la différence des éléments plus lourds, presque tous les noyaux formés de 2 à 7 nucléons ont été synthétisés dans les deux premières minutes de l'Univers. Ce fait a permis un rapprochement important entre l'astrophysique et la physique des particules. Revenons à l'inventaire que nous avons fait des particules élémentaires dont nous connaissons l'existence (rappelons cependant que le quark *top* n'a pas encore été mis en évidence).

Nous avons vu que les physiciens des particules classent les fermions en trois familles, et nous avons dit qu'ils excluent désormais la possibilité que l'on en découvre une quatrième. Cette quasi-certitude est très récente et repose sur des expériences qui se sont déroulées dans des collisionneurs de particules, et dont les résultats sont, en outre, en accord avec les calculs que les astrophysiciens avaient effectués en se fondant notamment sur leurs propres observations. En effet, en 1989, quatre équipes du CERN et une équipe de Stanford conduisirent des expériences destinées à compter les différentes espèces existantes de neutrinos. Pour ce faire, ils mesurèrent la durée de vie moyenne du boson  $Z^0$ , seule particule dont la désintégration aboutit souvent à la matérialisation de paires neutrino-antineutrino. Plus il existe d'espèces de neutrinos, plus le boson  $Z^0$  aura de possibilités de se désintégrer et, par conséquent, plus courte sera sa durée de vie. Pour mesurer cette dernière, les physiciens ont encore recours au principe d'incertitude de Heisenberg: souvenons-nous que l'un des énoncés de ce principe relie la durée de vie d'une particule à l'incertitude sur son énergie. Les expérimentateurs procèdent donc de la manière suivante: Ils font varier l'énergie des collisions au cours desquelles les bosons  $Z^0$  sont produits; puis ils dressent la courbe donnant le nombre de détections de bosons  $Z^0$  en fonction de cette énergie, la courbe obtenue ayant une forme dite «en cloche» et s'étalant de part et d'autre du maximum; enfin, ils mesurent la largeur de cette cloche. Cette largeur constitue en effet une estimation de l'incertitude sur l'énergie du boson  $Z^0$ . L'application de la relation d'incertitude permet ensuite d'en déduire la durée de vie moyenne de ce boson.

La mesure indirecte du temps moyen séparant la matérialisation du boson  $Z^0$  de sa désintégration permet donc, nous venons de le voir, de calculer le nombre d'espèces de neutrinos existants. Or, si des quarks et des leptons autres que des neutrinos pourraient avoir des masses qui les maintiennent au delà des possibilités de détection des collisionneurs actuels, il n'en va pas de même des neutrinos, particules dont la masse est nulle ou quasi nulle. Donc, s'il existe d'autres familles de fermions que celles déjà identifiées, la seule possibilité de les mettre en évidence est de chercher à faire apparaître les neutrinos qui en sont membres. En outre, on peut être sûr qu'aucune espèce de neutrino ne peut échapper à sa détection, en raison justement de la nullité supposée de la masse de tout neutrino, qui met ce dernier, quelle que soit la famille dont il est membre, à la portée des collisionneurs actuels. La mesure de la durée de vie du boson  $Z^0$  et, par conséquent, du nombre d'espèces existantes de neutrinos, constitue donc bien un comptage des différentes familles de particules élémentaires. Les résultats des expériences qui furent menées dans ce but indiquent sans ambiguïté qu'il n'existe que trois sortes de neutrinos, correspondant aux trois espèces connues. C'est pourquoi, toujours pour des raisons de symétrie mathématique, les théoriciens pensent que le nombre des doublets de leptons et celui des doublets de quarks doivent être de trois, eux aussi.



Quant à la durée de vie du boson  $Z^0$ , elle est de l'ordre de  $10^{-25}$  seconde, c'est-à-dire un dix millionième de milliardième de milliardième de seconde...

En fait, il eut été surprenant que le nombre d'espèces de neutrinos trouvé dans ces expériences fût supérieur à trois. En effet, les neutrinos ont considérablement contribué au refroidissement de l'Univers qui a accompagné son expansion, chaque neutrino représentant, en quelque sorte, une perte d'énergie. N'interagissant que par interaction faible (ils n'ont ni masse, ni charge électrique, ni couleur), les neutrinos n'ont qu'une probabilité extrêmement faible de céder leur énergie, en raison de l'intensité et de la portée extraordinairement réduites de cette interaction. Or, c'est en partie de la vitesse de refroidissement de l'Univers que dépendent les quantités relatives des éléments légers qui peuplent actuellement l'Univers. Et justement, ces abondances, telles qu'elles sont estimées, correspondent à l'effet de trois types de neutrinos et ne seraient pas compatibles avec l'existence d'une quatrième espèce. Voilà un bel exemple «d'interaction» entre la physique des particules et la cosmologie...

**Dans le prochain numéro:**

**Les défis communs à la cosmologie et à la physique des particules**

## II. Vers une théorie globale de l'univers

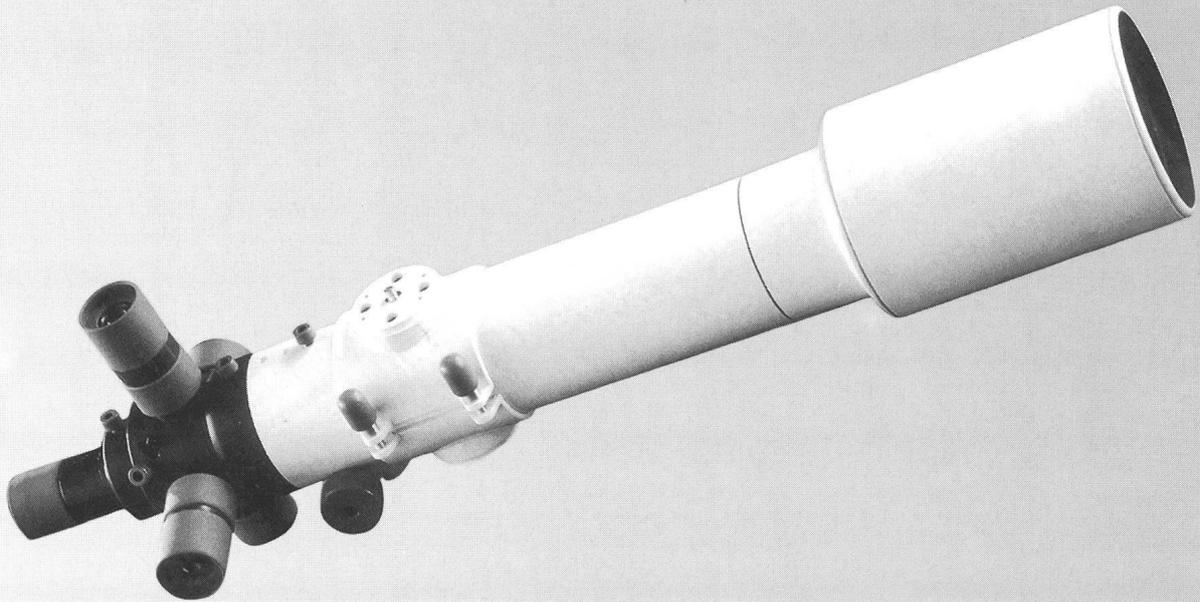
Dans le prochain numéro d'ORION, nous verrons comment les physiciens des particules progressent sur le chemin de l'unification des interactions fondamentales (leur description par une seule et même théorie), en dépit des caractéristiques extrêmement différentes avec lesquelles ces dernières se manifestent. Nous verrons également que la connaissance de ce qui s'est passé au moment de la naissance de l'Univers passe par la réconciliation entre la relativité générale et la mécanique quantique, deux théories dont les incompatibilités constituent des obstacles que les physiciens n'ont pas encore réussi à surmonter.

JACQUES GUARINOS

Observatoire de Genève et

Institut d'astronomie de l'Université de Lausanne

# BORG 100 ED Refraktor



Schmidt-Cassegrains, Newtons, JSO-Schmidtkameras, Montierungen, Okulare, Spiegel-Sets, Filter, Adapter, etc.

**Bestellen Sie unseren GRATISKATALOG!**

# RYSER OPTIK

Kleinhüningerstrasse 157

4057 Basel

☎ 061/65 32 04