

## **Tout l'univers dans un atome**

**Gerardus 't Hooft**

Dans cet exposé, je vais expliquer que l'univers gigantesque dans lequel nous vivons abrite un nombre incroyable de minuscules univers : les atomes. Ils présentent une structure extrêmement riche qui a permis aux physiciens d'exercer leur sagacité durant tout le siècle précédent. Le sujet de cet exposé est cet univers microscopique que l'on trouve à l'intérieur des atomes mais il est intimement relié à l'univers macroscopique qui nous est rendu plus familier par les images des médias comme celle de la conquête spatiale.

Au début n'existait qu'un point, et rien d'autre que ce point. Il y a plus de 13 milliards d'années, ce point explosa, marquant le début de l'univers tout entier. Depuis ce moment, l'univers est régi par les lois de la physique. Lors de ses premiers instants, il évolua extrêmement rapidement. Des choses complexes arrivèrent alors, que l'on comprend difficilement.

La première lumière de l'univers, que l'on observe maintenant, est apparue 380 000 ans après cette explosion. Ce n'est qu'un milliard d'années plus tard que l'univers commence à ressembler à ce qu'il est aujourd'hui : un univers constitué d'étoiles, situées à l'intérieur de galaxies s'éloignant les unes des autres.

Deux choses remarquables caractérisent l'univers. La première, c'est qu'il est presque vide : il existe de grands espaces désertiques entre les étoiles et les galaxies, de telle sorte qu'en moyenne, l'univers présente une densité de quelques atomes seulement par kilomètre cube. La deuxième, c'est que tous les objets de l'univers obéissent aux lois de la physique de manière extrêmement précise. Des expériences de toutes sortes, ainsi que des calculs complexes établissent une chose qui n'était pas évidente a priori : les lois de la physique semblent partout les mêmes, peu importe la direction dans laquelle on observe l'univers. L'une de ces lois est celle de la gravitation. C'est elle qui fait que les planètes décrivent autour du soleil des ellipses presque parfaites. Elle implique également que les planètes accélèrent à proximité du soleil et décèlent quand elles s'en éloignent. Il s'agit d'une loi parmi d'autres mais dont les effets sont clairement visibles.

L'univers compte un nombre démesurément grand d'atomes et dans ces mondes minuscules que sont les atomes, on trouve des objets, les électrons, qui se déplacent selon des lois physiques ressemblant beaucoup à celles régissant le mouvement des planètes autour du soleil. Les électrons tournent autour d'un objet central que l'on appelle le noyau atomique. L'atome constitue ainsi un univers à lui tout seul, mais avec des dimensions minuscules.

### **La structure de l'atome**

Dire qu'un atome peut être assimilé à un système planétaire serait en fait mentir. L'atome est gouverné par des lois beaucoup plus complexes, celles de la mécanique quantique. Celle-ci dit qu'en moyenne, les électrons se déplacent selon des orbites elliptiques ; mais cela en moyenne seulement. Leur mouvement est en fait aléatoire, il semble incontrôlé. Autour d'un noyau,

---

<sup>1</sup> Transcription et traduction de Sébastien Renaux-Petel

certaines régions sont dépeuplées d'électrons alors que d'autres en fourmillent. Ce sont les lois de la mécanique quantique qui permettent de faire la distinction entre ces régions.

L'atome possède une autre caractéristique qui le rapproche de l'univers : il est quasiment vide. En effet, le noyau atomique est environ 100 000 fois plus petit que les orbites des électrons, ce qui rend l'atome beaucoup plus vide en réalité qu'un système planétaire. C'est ce noyau, dont l'unité de taille est le Fermi,  $10^{-15}$  m, qui est la partie la plus intéressante et la plus complexe de l'atome.

Il y a plusieurs décennies, les physiciens découvrirent que le noyau atomique est constitué de deux sortes d'objets : les protons et les neutrons. Les premiers sont électriquement chargés alors que les seconds sont neutres, mais hormis cette différence, ces deux objets sont similaires. Ce qui a été découvert plus récemment dans l'histoire de la physique des particules est qu'ils sont tous les deux constitués de trois sous-unités appelées quarks. Ces derniers obéissent à des lois très particulières qui seront évoquées plus loin.

Il y a 35 ans l'existence des quarks était à peine vérifiée. On ne comprenait pas leur comportement, ni pourquoi protons et neutrons étaient constitués de trois d'entre eux. Toutes les particules observées à l'époque étaient cependant regroupées en plusieurs classes, de la même façon qu'en biologie les espèces d'animaux et de plantes sont classées en familles. Il existait une distinction entre les leptons, particules insensibles à ce qui fut appelé plus tard la force forte, et les hadrons, qui y étaient sensibles et avaient donc un comportement totalement différent. Les hadrons furent ensuite séparés entre mésons et baryons. Enfin, il existait une troisième sorte de particules, les photons, qui avec leur comportement radicalement différent des autres, constituaient une famille à eux seuls.

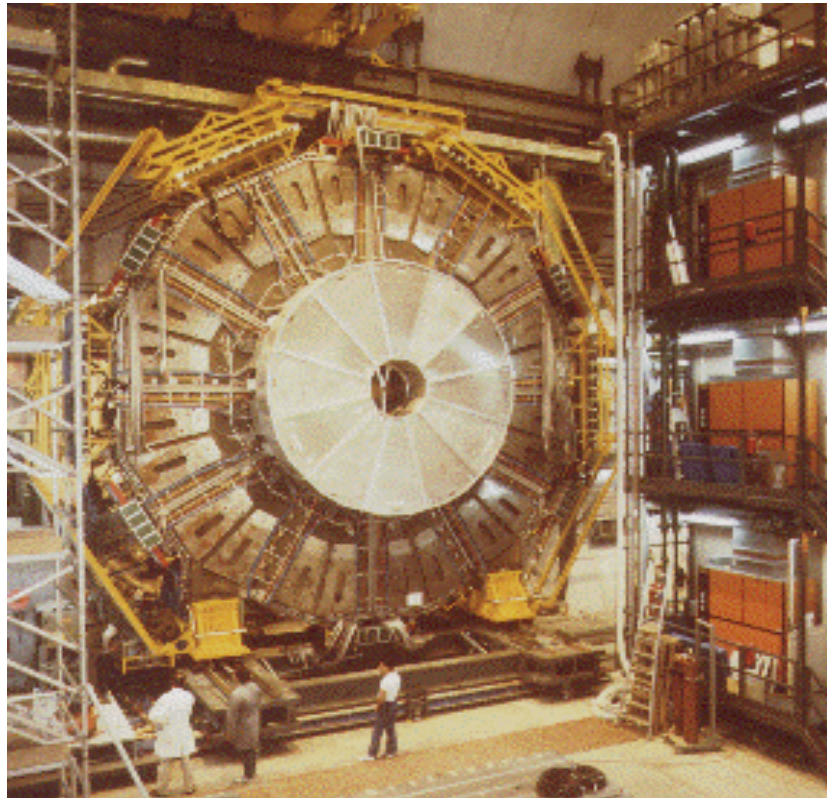
Les leptons, dont on connaissait deux représentants à l'époque, électrons et muons, peuvent être chargés électriquement, le plus souvent de manière négative, ou bien être neutres : on les appelle alors neutrinos. De manière générale, les particules sont caractérisées par leur charge électrique ainsi que par leur spin, propriété liée à leur rotation. Elles sont également accompagnées de leurs « contraires », si l'on peut dire, leurs antiparticules. Il existe ainsi des antileptons et des antibaryons. Les mésons, eux, sont identiques à leurs antiparticules.

Beaucoup de questions émergent de cette classification : Comment peut-on expliquer le comportement de toutes ces particules ? Comment peut-on les décrire ? Enfin, comment s'agencent-elles pour former les atomes ? Pour répondre à ces questions, il a été nécessaire de les étudier.

## **Les outils pour étudier la structure de l'atome**

Pour étudier les atomes, il a été nécessaire de construire de très grandes machines, les accélérateurs de particules. L'un d'eux est situé à la frontière de la Suisse et de la France, près de Genève. S'il n'était pas situé sous terre, parfois à cent mètres de profondeur, d'un avion on pourrait constater qu'il a la forme d'un cercle de 26 km de circonférence. Il s'agit d'un circuit que des particules parcourent chacune dans un sens opposé pour se heurter de plein fouet. Les investigations des physiciens concernent ce qui se déroule lors de telles collisions. Cette machine appelée LEP, pour Large Electron-Positron Collider, a été démontée il y a quelques années pour être remplacée par une autre machine, le LHC, acronyme pour Large Hadron Collider. La première a intensivement étudié les leptons, comme l'électron et son antiparticule, alors que la nouvelle génération d'accélérateurs étudiera les hadrons. Les physiciens doivent cependant attendre encore plusieurs années avant de recevoir les premiers résultats du LHC, prévus en 2007.

La photographie (**fig.1**) représente un des nombreux détecteurs de particules utilisés dans les accélérateurs. Comparés à la taille d'un homme, ces objets sont particulièrement grands. Ceci est une source de questionnement pour les néophytes : pourquoi n'utilise-t-on pas de petits détecteurs pour étudier des particules si minuscules ? N'y gagnerait-on pas en résolution ? Il se trouve que non. Pour bien voir de petits objets, il faut de grosses machines. Par exemple, on pourrait penser que les insectes, avec leurs petits yeux, se voient très bien. C'est tout le contraire. Nous voyons beaucoup mieux les insectes qu'ils ne se voient eux-mêmes, car nos yeux sont beaucoup plus gros que les leurs. C'est pour cela que les insectes ont des antennes, comblant ainsi leur déficit sensoriel. Ainsi, former des images de minuscules particules nécessite d'énormes appareils. Les physiciens, qui cherchent à sonder la matière le plus profondément possible, doivent par conséquent construire les machines les plus imposantes qui soient... tout en respectant un certain budget.



*figure 1*

### **Les forces d'interactions et les particules de Yang-Mills**

Revenons encore trente cinq ans en arrière. A cette époque, il fallait comprendre leurs interactions pour pouvoir décrire les particules ... Qu'elles soient déviées, créées ou annihilées, les physiciens ont réuni tous ces phénomènes dans le concept de force. Ils ont ainsi découvert que trois sortes de forces totalement différentes agissaient sur les noyaux atomiques. L'une d'elles est assez familière, il s'agit de l'électromagnétisme. C'est la force qui est utilisée de manière prédominante dans les microphones et les télévisions. Les uns utilisent la force électromagnétique pour amplifier la voix, les autres pour créer une image sur l'écran. De manière plus simple, on peut voir l'effet de cette force quand un aimant se déplace à proximité d'un autre aimant, ou d'un objet en fer. Ou bien même quand on se coiffe par temps sec et que les cheveux s'électrisent. Il existe également deux autres forces actives dans le domaine des particules élémentaires : la force forte et la force faible. On connaissait peu de

leurs propriétés il y a 35 ans, et par bien des aspects, elles restaient énigmatiques : comment affectent-elles le comportement des particules ?

Il est très difficile de répondre à cette question. On savait qu'elles devaient obéir à la fois à la théorie de la relativité d'Einstein et aux lois de la mécanique quantique. Mais ces lois sont complexes, et il est très difficile de les réconcilier pour que les mouvements observés des particules respectent ces deux théories fondamentales. Ce n'est qu'en 1954 qu'une avancée fut effectuée. Deux physiciens américains, Robert-Mills, étudiant à l'époque et Chen Ning Yang, futur prix Nobel, proposèrent ensemble une façon de décrire les particules subatomiques. Leur réflexion fut la suivante : certaines forces de la nature sont déjà connues, les forces électromagnétiques ; peut-on imaginer une nouvelle force, quelque chose de plus général que l'électricité et le magnétisme, qu'on pourrait décrire avec des équations similaires et qui serait cohérente avec les connaissances acquises par ailleurs en physique ? Ils trouvèrent une réponse à cette question mais ils se rendirent compte très tôt qu'elle était probablement erronée. Beaucoup de physiciens avaient eu des idées similaires mais les avaient rejetées car ils ne leur trouvaient aucun sens. Peut-être n'avaient-elles aucun sens mais elles étaient tellement belles qu'ils publièrent néanmoins leurs travaux, malgré les critiques de leurs pairs, laissant aux autres le soin de s'inquiéter du fait qu'elles n'aient rien de réel.

Qu'ont-ils donc inventé qui allait devenir si important, seulement quelques décennies plus tard ? Yang et Mills imaginèrent qu'il existait un autre champ, ressemblant beaucoup aux champs électriques et magnétiques, mais qui en serait également différent par certains aspects : une particule évoluant dans un tel champ changerait d'identité. Au passage, rappelons que l'identité est une caractéristique essentielle des particules : la modifier a d'énormes conséquences sur leur comportement. Un champ électromagnétique n'altère pas cette identité, mais Yang et Mills imaginèrent qu'une particule puisse transmuter en une autre quand elle traverserait le champ qu'ils ont décrit. Un proton, par exemple, deviendrait neutron. Le point fondamental est que deux particules initialement identiques pourraient ainsi devenir différentes.

Ainsi, ils imaginèrent qu'un champ puisse changer, par exemple, un  $\pi^-$  en un  $\pi^+$  ou en un  $\pi^0$ . C'est une généralisation de la notion d'électromagnétisme, qui, exprimée ainsi, semble incroyable, mais il faut bien se rendre compte que tout cela provient d'équations mathématiques. La véritable beauté de leur proposition ne réside d'ailleurs pas seulement dans cette image mais aussi dans ces équations, que je ne vais pas expliquer étant donné leur difficulté.

Cependant, cela génère un problème qui peut facilement être exprimé : en traversant un champ de Yang-Mills, une particule peut changer de charge. Un  $\pi^-$  peut devenir un  $\pi^+$  ou vice-versa. Or, une loi de la nature stipule que la charge électrique se conserve. Une question s'impose donc d'elle-même : « Qu'est-il arrivé à la charge électrique ? ». La réponse fut assez facile à trouver. Le champ de Yang-Mills obéit aux lois de la mécanique quantique, et ces lois imposent que l'énergie d'un champ soit quantifiée. Ainsi chaque champ se voit associer un petit paquet d'énergie, appelé quanta. Et les quantas se comportent comme des particules élémentaires. Le photon est un exemple de quanta d'énergie, celui du champ des radiations électromagnétiques. Le champ de Yang-Mills est également accompagné de ses propres quantas, appelés particules de Yang-Mills, ou bosons de Yang-Mills pour une raison technique. De ce fait, tout ce que Yang et Mills eurent à dire est que les particules de leur champ pouvaient être chargées. Et quand un proton transmute en neutron, ou un  $\pi^+$  en  $\pi^-$ , l'excès de charge passe dans les quantas d'énergie du champ, assurant la conservation de la charge lors du processus.

Une propriété importante des particules est liée à leur rotation : c'est ce qu'on appelle le spin. Tout tourne dans l'univers : les étoiles, les planètes et les galaxies tournent sur elles-mêmes,

de la même façon que la Terre tourne autour de son axe. Et bien les particules ont un comportement similaire. Telles un ballon de football, une balle de tennis ou une balle de golf, elles tournent sur elles-mêmes : c'est cette propriété qui est caractérisée par le spin. La différence fondamentale entre le monde macroscopique et celui des particules élémentaires est que le spin de celles-ci ne peut prendre que certaines valeurs : entières, ou demi-entières. Une particule ne peut pas tourner autour d'elle-même de n'importe quelle manière. On dit que le spin est quantifié. C'est pour cette raison que les particules se comportent différemment des planètes et des ballons de football qui peuvent tourner sur eux-mêmes comme ils le souhaitent.

L'étude mathématique des quantas d'énergie des champs de Yang-Mills révèle qu'ils ont un spin, comme le photon, le quanta d'énergie de l'électromagnétisme. Celui-ci est la particule messagère de la lumière et se déplace donc toujours à 300 000 km/s : il ne peut rester immobile. La direction dans laquelle il se déplace constitue donc un axe privilégié. Cette loi de la physique est confirmée par les équations : le photon ne peut pas tourner sur lui-même dans une autre direction que celle de son mouvement. D'après les équations de Yang-Mills, leur boson est sensé présenter les mêmes propriétés, c'est-à-dire se déplacer à la vitesse de la lumière et ne tourner sur lui-même qu'autour de l'axe qui est parallèle à la direction de son mouvement, soit à droite, soit à gauche.

Une structure particulièrement intéressante émerge également de la théorie de Yang-Mills. Celle-ci nécessite en effet que les particules soient classées en groupes, qu'on appelle des multiplets. Le proton, par exemple, a un partenaire, le neutron, en lequel il peut transmuter quand il traverse un champ de Yang-Mills. Le  $\pi^+$ , le  $\pi^0$  et le  $\pi^-$  constituent de même un triplet. Les quantas d'énergie de Yang-Mills eux-mêmes sont affectés. Quand ils évoluent à travers leur propre champ, ils peuvent transmuter en l'un de leurs partenaires. L'idée de la théorie est ainsi de classer toutes les particules en groupes au sein duquel le champ de Yang-Mills autorise des transmutations d'une particule en l'une de ses cousines du même multiplet. Cette théorie, aussi séduisante qu'elle puisse paraître, ne peut pas être correcte. Les particules de Yang-Mills ressemblent en effet beaucoup trop aux photons. Or les particules chargées ne peuvent se déplacer à la vitesse de la lumière. Une particule chargée a en effet de l'énergie, et donc une masse qui l'empêche de se déplacer aussi vite que la lumière. Par conséquent, il est possible de l'imaginer au repos. Mais dans ce cas elle n'aurait aucun axe privilégié autour duquel tourner. Ainsi elles peuvent tourner selon toutes les directions, ce qui les différencie des particules de Yang-Mills, du moins en ce qui concerne leur spin.

Aussi stupéfiant que cela puisse paraître, le problème persista pendant près de vingt ans, jusqu'en 1971. Cela constitue un cas très intéressant de sociologie des sciences : des physiciens comme Peter Higgs et deux physiciens travaillant en Belgique, François Englert et Robert Brout, avaient apporté la solution beaucoup plus tôt, mais la communauté scientifique n'avait pas accepté leur réponse. La résolution du problème réside en fait dans sa formulation. Une particule chargée au comportement physique acceptable doit tourner sur elle-même dans trois directions, et non dans deux. On dit aujourd'hui qu'un degré de liberté supplémentaire doit être ajouté. Si les physiciens avaient formulé le problème de cette manière en 1954, ils auraient deviné la réponse immédiatement.

## **Des particules de Yang-Mills aux particules de Higgs**

Les particules de Yang-Mills et les multiplets constitués des particules connues ne suffisent donc pas : il faut ajouter des particules à la théorie, des particules de spin zéro. Celles-ci conspirent avec les bosons de Yang-Mills pour donner un ensemble encore plus complexe d'équations mathématiques. La façon dont je traduirais encore une fois des équations

mathématiques assez compliquées en un langage simple est la suivante : les particules de Yang-Mills, qui ne pouvait pivoter que dans deux directions, peuvent alors en se mêlant à une particule de Higgs, pivoter dans une troisième direction. On introduit donc dans la théorie un champ possédant des quantas d'énergie de spin nul, et ceux-ci fournissent des degrés de liberté supplémentaires aux particules, leur permettant de tourner sur elles-mêmes selon trois dimensions.

Comprendre ce processus nécessite cependant la connaissance de ce que l'on appelle la brisure spontanée de symétrie. Avant d'en donner quelques exemples simples, indiquons comment cela résoud merveilleusement notre problème. Quand la brisure spontanée de symétrie agit, les particules de Yang-Mills, en plus de pouvoir tourner dans trois directions, acquièrent une masse, et se déplacent donc moins vite que la lumière. Grâce à ce mécanisme, une description pleinement cohérente du monde subatomique peut être formulée, en termes de particules, de champs et de forces.

Expliquons en termes simples ce qu'est la brisure spontanée de symétrie. Imaginons une particule se déplaçant dans un champ de telle façon qu'elle acquière une énergie qui dépend de sa position. Si le champ d'énergie a la forme d'une vallée entre deux montagnes (**fig.2-a**), et que cette vallée est parfaitement symétrique, alors la particule s'immobilisera dans un endroit qui est facile à déterminer : exactement au milieu, sur l'axe de symétrie du champ d'énergie. Le système possède la symétrie gauche/droite et la particule respecte cette symétrie en se plaçant au milieu.

La figure **2-b** présente la même symétrie gauche/droite. Autrement dit, chaque vallée est exactement le reflet de l'autre. Si une particule est placée au centre de la figure, on s'attendrait qu'elle y reste. En réalité, comme n'importe quel physicien peut l'imaginer, la particule ne va pas rester là très longtemps. Elle va tomber soit à gauche soit à droite mais elle va préférer être dans une des vallées. C'est l'exemple d'une situation qui a les mêmes symétries que la précédente, mais les symétries ne sont présentes que dans les équations, et pas dans la solution de ces équations. Que la particule se trouve à droite ou à gauche, elle brise la symétrie. C'est ce qu'on appelle la brisure spontanée de symétrie et c'est elle qui nous permet de comprendre le comportement des particules subatomiques.

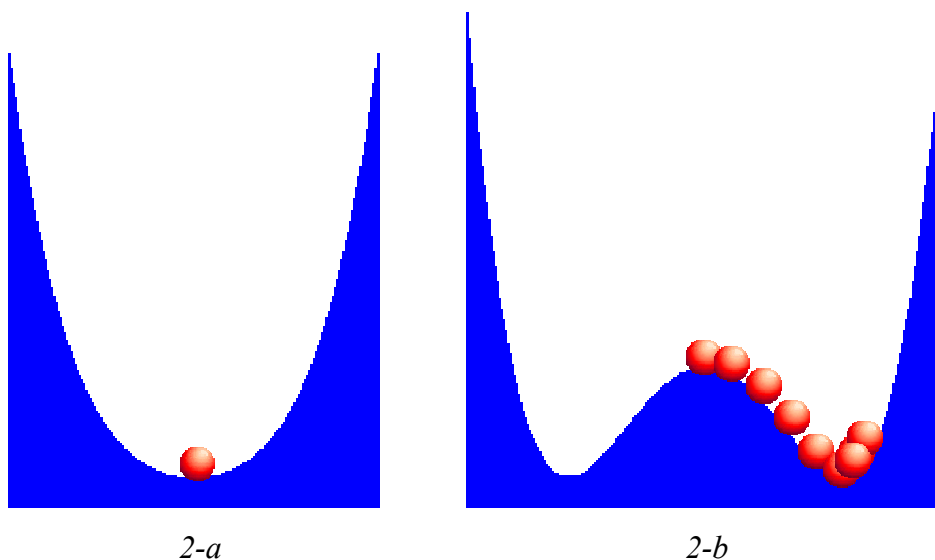
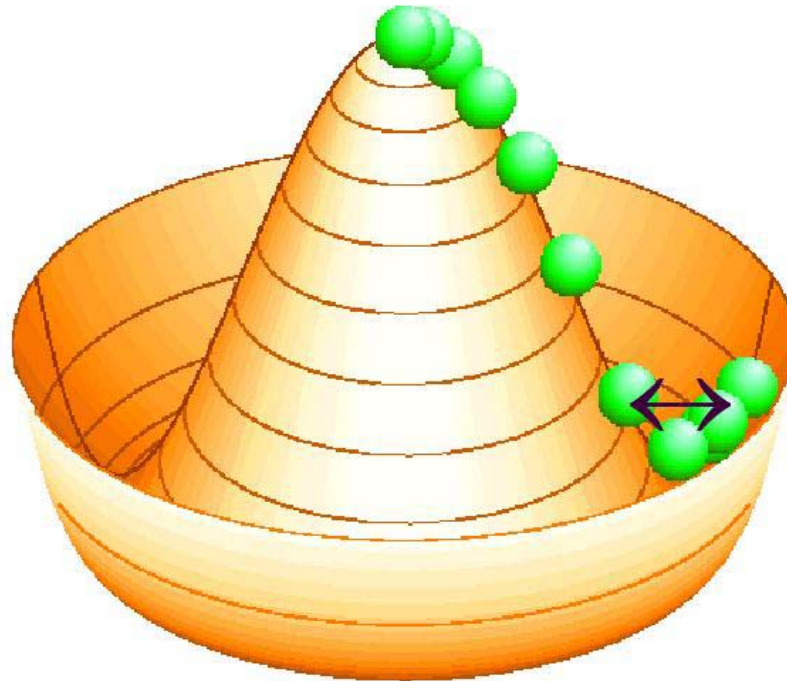


figure 2

Il s'agissait jusque là d'une description assez simple de la brisure de symétrie en termes de symétrie gauche/droite mais on peut aussi avoir des symétries plus importantes. La figure

d'un chapeau mexicain (**fig.3**) présente ainsi une complète symétrie de révolution autour de son axe. Tourner le chapeau mexicain sur lui-même ne modifie pas son apparence. Positionnons une particule à son sommet : il ne s'agit pas d'une position stable. Tôt ou tard, elle va tomber quelque part dans le bord du chapeau, ce qui constitue sa vraie position stable.



*Figure 3*

Revenons à ce qui nous intéresse, les champs de Yang-Mills. Ces derniers se comportent de la même manière que le chapeau mexicain. Les particules de Yang-Mills se déplacent le long du bord du chapeau. Cependant, il existe un autre mouvement possible, le mouvement radial (représenté par une flèche sur la figure 3). Le degré de liberté qu'acquiert le champ en oscillant dans cette direction nous apparaît alors comme les particules de Higgs. Le mouvement dans les autres directions, lui, est absorbé par le champ de Yang-Mills, donnant le degré de liberté manquant pour que les bosons tournent dans trois directions. Ainsi, les particules de Higgs sont ajoutées à la théorie mais finalement, la plupart d'entre elles sont absorbées pour former des paires avec les bosons. Ce système modifie toutes les équations des champs et transforme une théorie en un modèle tout à fait crédible et intéressant pour les particules subatomiques.

Est-ce que les prédictions faites à partir de ces modèles reproduisent ce qui est observé dans les expériences ? Avoir en effet un ensemble d'équations abstraites est une chose, mais ce qu'on veut vraiment est une théorie qui puisse être testée expérimentalement. C'est ce que firent Salam, Glashow et Weinberg en proposant un premier modèle des particules élémentaires qui pouvait être comparé aux observations expérimentales. Et leur modèle était exactement fondé sur l'idée des champs de Yang-Mills, joint à la notion de brisure spontanée de symétrie.

## Les neutrinos

Avant de décrire ce modèle, ajoutons qu'il existe une petite complication au sujet de la rotation intrinsèque des particules : celle-ci vient des neutrinos. Ils ne peuvent tourner sur eux-mêmes que vers la droite, et pas vers la gauche. Les antineutrinos, eux, tournent dans le sens inverse, et cela par rapport à la direction de leur mouvement. Cela provient du fait que les neutrinos sont des particules de spin  $1/2$ . Ils obéissent donc à des règles différentes de celles des particules de spin 1 comme le photon.

Que se passe-t-il quand une particule en rotation comme un neutrino électronique, dont le partenaire est l'électron, traverse un champ de Yang-Mills ? S'il transmute en un électron, alors, par conservation du spin, celui-ci ne peut tourner que vers la droite : cette situation est asymétrique. Ce fut le théâtre de très belles expériences de la fin des années 40 et du début des années 50, qui établirent effectivement que l'électron, lorsqu'il participe à l'interaction faible, tourne de façon asymétrique, et ce, parce qu'il est relié au neutrino qui lui-même ne peut tourner que dans un sens.

Les physiciens essayèrent donc de faire un modèle de toutes les particules subatomiques où la force faible serait due à l'échange de particules de Yang-Mills. Le modèle le plus abouti fut celui de Weinberg. Il enrichissait le spectre des particules connues à l'époque de trois particules,  $W^+$ ,  $Z^0$  et  $W^-$ , qui constituaient un triplet de bosons de Yang-Mills. Le boson de l'électromagnétisme était également présent dans son modèle. Cependant, il existait une complication due à l'asymétrie gauche/droite de la théorie. Ce n'est en effet que lorsque l'électron tourne vers la gauche qu'il peut transmuter en un neutrino. Si l'électron tourne vers la droite, il devient insensible à la force de Yang-Mills et ne peut pas transmuter car le neutrino correspondant n'existe pas. Dans ce cas, il n'interagit donc pas avec la force de Yang-Mills. Une situation analogue est présente pour les antiparticules, qui ne peuvent transmuter en neutrinos que lorsqu'ils tournent vers la droite. La théorie introduit également avec certitude une particule de spin nul, la particule de Higgs. En fait, celle-ci n'a toujours pas été découverte à ce jour mais les physiciens sont presque certains que le LHC va finalement produire le Higgs et valider leurs théories.

## Leptons et particules hadroniques

Le modèle de Weinberg était magnifique mais il l'appela de manière explicite « modèle pour les leptons ». Une question émerge donc naturellement, posée par beaucoup de physiciens : que se passe-t-il avec les hadrons ? Pourquoi ne pas les incorporer dans la théorie ? Ils sont pourtant sensibles à la force faible. Il est difficile de le voir parce qu'elle est dominée par la force forte mais on peut tout de même en détecter l'effet sur les particules hadroniques.

Pourquoi donc Weinberg ne traita pas du cas d'un proton transmutant en neutron quand il traverse un champ de Yang-Mills, ou de tout autre particule hadronique susceptible de transmuter ? Il ne le fit pas car il savait que quelque chose n'allait pas dans son modèle. S'il essayait de prendre en compte les hadrons, il trouvait des réponses qu'il savait être fausses. Les observations expérimentales contredisaient sa théorie. Il y avait donc quelque chose qu'il ne comprenait pas à propos des particules hadroniques. Que fit-il donc ? Il laissa de côté les hadrons. C'était la chose à faire car il s'avéra plus tard que son modèle pour les leptons était essentiellement correct. A cette époque, notre connaissance des particules hadroniques était incomplète et c'est pour cela que Weinberg ne pouvait pas en construire de modèle.

Les particules hadroniques sont en fait beaucoup plus complexes que les leptons. Comme indiqué dans l'introduction, les protons et les neutrons, qui sont des particules hadroniques, sont constitués en fait, chacun, de trois quarks. Et nous devons donc comprendre ces quarks.



Comment se comportent-ils ? Quelle est cette force qui les confine dans les hadrons ? Répondre à ces questions est nécessaire afin de mieux comprendre le comportement des particules hadroniques. Une chose était donc connue: il existe une force mystérieuse qui lie trois quarks ensemble à l'intérieur des hadrons. Rappelez vous que j'ai séparé les hadrons en deux familles, les baryons et les mésons. Les baryons sont en fait constitués, chacun d'entre eux, de trois quarks, alors que les mésons sont constitués d'un quark et un anti-quark liés ensemble. Les antiparticules sont, elles, constituées d'antiquarks. Un antiproton par exemple, est constitué de trois antiquarks. Trois espèces de quarks étaient connues à l'époque de Weinberg, les quarks Up, Down et Strange.

Murray Gell-Mann avait proposé la théorie des quarks en 1964 car elle collait parfaitement avec les observations. Il semblait alors prometteur de postuler que les hadrons étaient constitués de sous-unités mais une question demeurait : quel genre de force pouvait lier les quarks ensemble ? C'est une question très importante. En provoquant des collisions suffisamment fortes entre hadrons, on s'attendrait en effet à ce que des quarks deviennent libres. Cependant, les physiciens expérimentateurs cherchent des quarks libres depuis très longtemps, sans aucun succès : les quarks ne sont jamais libres. Comment est-ce possible ? Nous le savons maintenant. Le miracle vient encore une fois des idées de Yang et Mills. Selon une théorie qui faisait de plus en plus sens pour les physiciens qui l'élaboraient, on doit attribuer aux quarks une propriété interne appelée couleur. Ils peuvent ainsi être rouge, vert ou bleu. Il existe un champ de Yang-Mills associé, qui n'agit pas sur la nature d'un quark, c'est-à-dire sur le fait qu'il s'agisse d'un quark Up, Down ou Strange, mais qui modifie sa couleur. Ce nouveau type de champ de Yang-Mills, qui domine l'interaction forte, a été nommé le champ de la chromodynamique quantique car chroma signifie couleur en grec.

Comment une telle force peut-elle confiner les quarks ensemble de manière permanente ? Cela relève de mathématiques très compliquées qui n'ont été résolues que durant les décennies qui ont suivi la théorie de Gell-Mann. Pour dire vrai, ce sont des calculs extrêmement difficiles et longs, mais on sait maintenant les faire par ordinateur. Ces derniers confirment que la chromodynamique quantique se comporte exactement de la façon escomptée. C'est-à-dire que les quarks restent confinés à l'intérieur des hadrons, liés par une force les empêchant d'être libres.

Avec la théorie des quarks, on peut maintenant comprendre la transmutation d'un proton en neutron. En traversant le champ de Yang-Mills de l'interaction faible, un proton ne devient pas un neutron mais un quark Up devient un quark Down. Le proton est en effet constitué de deux Up et d'un Down, le neutron de deux Down et d'un Up. Un quark a donc transmuté en un autre grâce à l'interaction faible. Tout semble parfait... Mais alors, pourquoi Weinberg refusa-t-il d'inclure les quarks dans sa théorie électrofaible ? Il aurait pu facilement le faire, mais il ne le fit pas. Il connaissait en fait l'existence d'une particule neutre à longue durée de vie, constituée de quarks, appelée  $K_L^0$ , et la théorie prédisait que cette particule se désintègre en deux muons,  $\mu^+$  et  $\mu^-$ . L'idée était très simple : le  $K_L^0$  transmute en une particule  $Z^0$ , présente dans la théorie de Weinberg, et celle-ci se désintègre en  $\mu^+$  et  $\mu^-$ . De plus, cette théorie était pleinement quantitative. On disposait de toutes les équations mathématiques nécessaires pour faire le calcul suivant : à quel rythme la particule  $K_L^0$  se désintègre-t-elle en formant deux muons ? Le calcul indique qu'une telle désintégration est très fréquente mais d'après les expériences, une telle désintégration ne se produit jamais. Il y avait un tel fossé entre les observations et la prédiction issue de la théorie, que Weinberg refusa même de coucher celle-ci sur le papier. En fait, la résolution de ce problème ne fut proposée qu'à la fin des années soixante par Jean Iliopoulos et messieurs Glashow et Maiani, ce dernier étant devenu plus tard directeur général du CERN. Ces trois messieurs, dans leurs jeunes années, proposèrent un modèle surprenant, appelé en leur nom GIM.

Afin de le comprendre, il faut comprendre pourquoi le  $K_L^0$  est sensé se désintégrer en  $\mu^+$  et  $\mu^-$  selon le modèle de Weinberg. Le  $K_L^0$  est constitué d'un quark Strange et d'un antiquark Down ( $\bar{d}$ ). Par un mécanisme qui n'a rien à voir avec une quelconque force de Yang-Mills mais qui est bien connu, le quark s peut transmuter en un quark d. Les quarks d et  $\bar{d}$  s'annihilent alors pour former un  $Z^0$  qui se désintègre en  $\mu^+$  et  $\mu^-$ . On peut calculer les caractéristiques de ce mécanisme, mais le point important à noter est que, des trois quarks, u, d et s, le Strange n'appartient à aucun multiplet. Il ne peut donc transmuter en aucune particule partenaire, n'est pas affecté par la force de Yang-Mills et ne participe pas à la réaction. La proposition faite par les trois physiciens cités plus haut consiste à dire que le quark Strange est lui aussi membre à part entière d'un doublet, mais que le nouveau quark, baptisé quark Charm, n'a pas encore été découvert car l'énergie nécessaire à sa production est gigantesque : 1500 MeV ! Les accélérateurs de l'époque ne disposaient pas d'une telle énergie. Avec ce nouveau quark, on obtient un nouveau mécanisme qui permet la désintégration du  $K_L^0$  ! Le quark  $\bar{d}$  peut transmuter en quark  $\bar{s}$ , puis, comme le quark s participe maintenant à l'interaction de Yang-Mills, s et  $\bar{s}$  peuvent s'annihiler pour former un  $Z^0$  qui se désintègre encore une fois en  $\mu^+$  et  $\mu^-$ . A première vue, cela semble empirer les choses : le  $K_L^0$  a maintenant deux façons de se désintégrer ! En fait, il faut traduire cela en termes de forces. Les forces mises en jeu dans les deux mécanismes s'opposent. Elles s'annihilent par un effet que l'on appelle l'interférence quantique. Le bilan est que, une fois pris en compte les deux mécanismes, il n'y a aucune désintégration. Cela peut sembler étrange mais les équations mathématiques confirment cela, en accord parfait avec les observations. Est-ce suffisant pour croire à une telle théorie ? Beaucoup de physiciens étaient en fait initialement très critiques, trouvant la proposition tirée par les cheveux. Il s'avéra qu'elle était néanmoins correcte. L'énergie dans les accélérateurs devenant de plus en plus importantes, de nouvelles particules furent ensuite découvertes, y compris le quark supplémentaire. Toutes les pièces du puzzle s'assemblaient.

## Les différents quarks et le modèle standard

Décrivons donc la situation. Les quarks Up et Down, ainsi que Strange et Charm, constituent des doublets pour l'interaction faible. En plus d'eux, on découvrit un autre couple de quarks, qu'on baptisa Top et Bottom. La force faible autorise des transmutations dans chaque doublet et la force forte modifie la couleur de ces quarks. Le schéma semble complet. On peut cependant s'interroger : Est-ce seulement un début ? Reste-t-il d'autres quarks à découvrir ? La réponse est que cette dernière hypothèse semble peu probable.

Le modèle des particules subatomiques ainsi construit s'appelle le modèle standard. Son nom semble indiquer qu'il n'y a rien d'intéressant à y découvrir mais c'est complètement faux. C'est une théorie merveilleuse qui semble reproduire les observations des particules élémentaires avec une précision extrême, à un détail près : la force gravitationnelle n'est pas incorporée correctement dans ce modèle.

**La figure 4** est une comparaison entre prédictions et observations. Quand des particules entrent en collision, on mesure dans les expériences ce qu'on appelle la section efficace totale, signifiant ainsi que les particules semblent avoir une certaine taille : si les particules sont trop éloignées, rien ne se passe mais si elles se rapprochent, elles se heurtent de manière similaire à des petites billes. Cette taille effective des particules, dépendante de l'énergie, est mesurée dans les expériences afin d'être comparée avec les prédictions théoriques. Pour dire vrai, les courbes représentées ici sont les résultats de différents laboratoires à travers le monde (CESR, DORIS...). Le pic central sur la figure a été découvert au CERN avec le LEP et confirme une

prédiction fondamentale du modèle de Weinberg, à savoir l'existence du boson  $Z^0$ . D'autres mesures ont été effectuées, avec l'espoir de découvrir de nouveaux phénomènes qui seraient en contradiction avec le modèle standard mais on peut voir sur la figure que toutes les mesures effectuées, jusqu'aux plus grandes énergies disponibles à ce jour, coïncident exactement avec les prédictions de celui-ci. Il décrit de manière très précise, et avec des lois universelles, toutes les particules et les forces qui agissent dans l'univers. Cependant, certains mystères demeurent. La théorie a par exemple besoin de 26 constantes fondamentales : nombres et paramètres, qu'on peut mesurer mais que la théorie ne prédit pas. Une fois ces nombres connus, on peut comparer observations et prédictions mais pour obtenir de manière juste les courbes précédentes, il a fallu ajuster ces paramètres. Heureusement, le nombre important d'expériences les contraint fortement. Que sont ces nombres ? Douze sont des masses de particules, trois seulement sont des constantes de couplage et les onze restants sont des paramètres mixtes, caractérisant les transmutations du type  $d \rightarrow s$  par exemple. Un autre mystère est l'étrange asymétrie droite/gauche de la théorie. Les neutrinos ne peuvent tourner que vers la gauche et les antineutrinos vers la droite. Ceci est une richesse de l'univers des particules élémentaires qui est intrigante. Mais la vraie surprise est celle-ci : on sait que le modèle standard est incomplet. Il ne peut pas expliquer toute la nature et ce, pour une raison, la force gravitationnelle n'y est pas convenablement incorporée. Il existe en fait d'autres raisons qui nous poussent à penser que le modèle standard ne peut pas être l'étape ultime dans notre compréhension de la nature. En effet, il y a deux ans, une découverte fondamentale a été effectuée. Dans une ancienne mine de zinc du Japon, plusieurs kilomètres sous une montagne, des physiciens ont construit un détecteur de neutrino gigantesque, Super-Kamiokande, avec lequel les propriétés des neutrinos peuvent être mesurées avec une telle précision qu'ils ont découvert que, quelque fois, les neutrinos tournent sur eux-mêmes dans la direction interdite. De manière très accidentelle, un neutrino, supposé tourné vers la gauche, peut tourner vers la droite. C'est cette déviation par rapport au vieux modèle standard qui a fait passer le nombre de constantes fondamentales de 21 à 26. Ce comportement avait déjà été suspecté grâce à d'autres expériences mais une magnifique et extrêmement convaincante confirmation vint de la machine des Japonais. Celle-ci est constituée de milliers de détecteurs sensibles à un petit éclair lumineux lorsqu'un neutrino traverse la machine et c'est avec elle qu'un japonais obtint le prix Nobel de physique 2002.

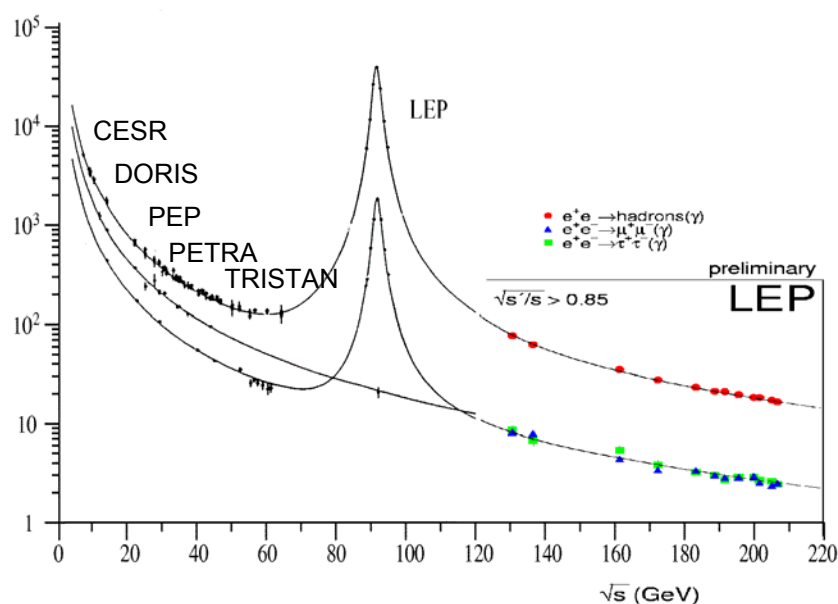
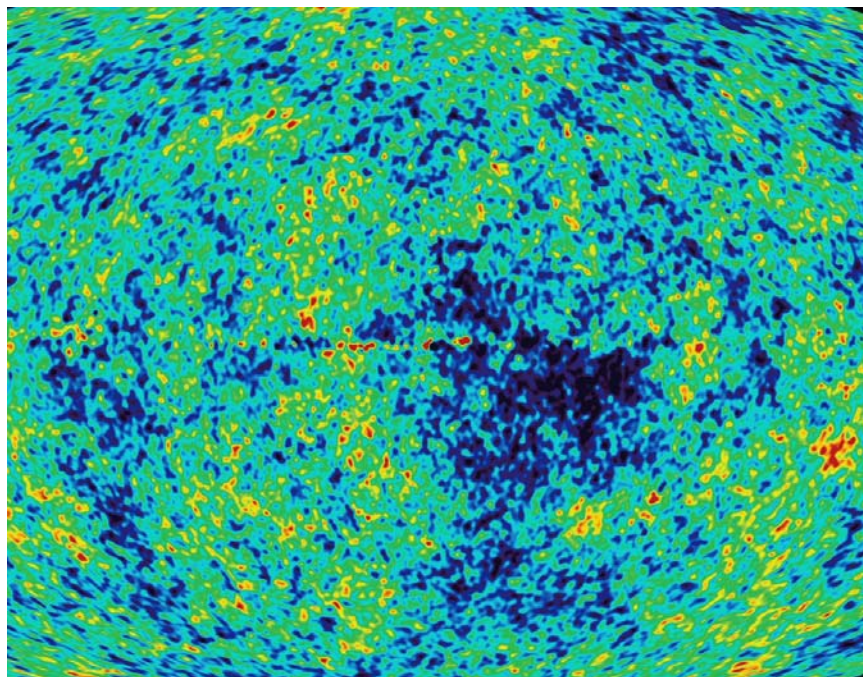


Figure 4

Les physiciens souhaitent maintenant faire collisionner les particules à des énergies encore plus importantes que celles disponibles dans les accélérateurs actuels. Peut-être que ces collisions permettront de découvrir des phénomènes que le modèle standard seul est incapable de prévoir. Le LHC, qui sera, de manière optimiste, opérationnel en 2007, fait partie de cette nouvelle génération de machines qui permettra aux physiciens d'améliorer le modèle standard. De nouvelles particules et de nouveaux champs seraient découverts, dont on ne peut à l'heure actuelle que supposer l'existence. L'idéal des physiciens serait des multiplets de tailles plus importantes, accompagnés de champs de Yang-Mills y permettant des transitions. Pour entrevoir la physique à ultra haute énergie et vérifier les équations des physiciens, il faudra attendre cependant des machines encore plus puissantes que le LHC.

Heureusement, il existe une autre expérience, effectuée par Dieu lui-même, non pas actuellement, mais il y a 13,7 milliards d'années : la naissance de l'univers lui-même. **La figure 5** représente sa première lumière et celle-ci recèle beaucoup d'informations. L'étude des corrélations entre les petites taches qu'elle présente démontrent que celles-ci n'ont rien d'aléatoire. Une étude statistique permet de déterminer la fréquence de ces fluctuations en fonction de leur taille, ce qu'on peut ensuite comparer aux prédictions théoriques. Entre l'instant zéro et 380 000 ans après sa naissance, l'univers est en effet très mal connu mais on peut s'interroger sur les mécanismes à l'œuvre pendant ces premiers instants. Un grand mystère est par exemple celui de la taille gigantesque de l'univers. Quelle force de la nature en est responsable ? Les hypothèses actuelles laissent à penser que des particules de spin nul, comme le boson de Higgs, ont été nécessaires pour permettre l'énorme expansion de l'univers que l'on appelle l'inflation. Cette théorie, qui prédit quelles sont les corrélations visibles dans la première lumière de l'univers, s'accorde remarquablement bien avec l'expérience. La nature, comme la théorie, semblent nous indiquer quelles forces étaient actives lors des tout premiers instants de l'univers. Les particules de spin nuls évoqués dans ce cadre sont en fait beaucoup plus massives que le boson de Higgs et peu d'observations sont disponibles. Cependant, les cosmologistes et les astrophysiciens qui mesurent le cosmos apporteront peut-être des réponses à ces questions.



*figure 5*

Ainsi, les plus petites caractéristiques de l'atome sont reflétées dans les structures de l'univers à l'échelle astrophysique. L'univers de l'atome n'est pas du tout indépendant de l'univers dans lequel nous vivons. La physique est un tout cohérent et le dialogue entre l'étude du monde atomique et celui de l'univers à grande échelle est fécond pour les deux disciplines.