

# QUAND l'énergie devient matière

## Table des matières

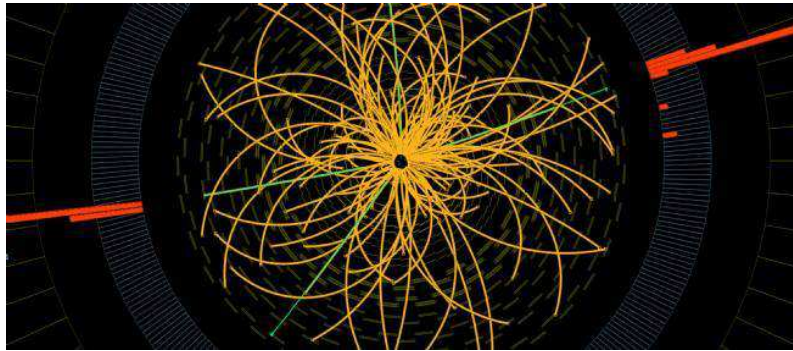
<b>1</b>	<b>Les collisions du quatrième type</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Pourquoi est-ce que ça ne marche pas avec des billes ?</b>	<b>5</b>
2.1	On ne peut pas faire cuire un œuf...	5
2.2	Pour créer de la matière à partir d'énergie...	6
2.3	L'énergie de deux mouches en vol suffit...	7
<b>3</b>	<b>A la recherche d'objets de plus en plus petits</b>	<b>8</b>
3.1	La question fondamentale	8
3.2	Une descente vers l'infiniment petit	8
3.3	Essayons de situer ces divers degrés...	8
3.4	Si deux électrons ou deux quarks se percutaient...	9
3.5	Oublions tous ces calculs...	9
<b>4</b>	<b>Comment accélérer des électrons</b>	<b>10</b>
4.1	Les électrons sont extraordinairement sensibles...	10
4.2	Une autre façon d'agir sur les électrons	10
4.3	A quoi servent les "aimants souffleurs" ?	11
4.4	L'accélérateur : un serpent qui se mord la queue	11
4.5	Faits et chiffres	13
4.5.1	La plus grande machine du monde...	13
4.5.2	Le circuit le plus rapide de la planète...	13
4.5.3	L'espace le plus vide du système solaire...	13
4.5.4	Les points les plus chauds de la galaxie	14
4.5.5	Les détecteurs les plus grands	14
4.5.6	L'ordinateur le plus puissant du monde...	14
<b>5</b>	<b>Rendre perceptible l'invisible</b>	<b>14</b>
5.1	Les reportages en direct sur la naissance des particules...	14
5.2	De quoi est fait un détecteur ?	15

<b>6</b>	<b>Les particules sont presque toutes instables</b>	<b>16</b>
6.1	Presque toutes les particules...	16
6.2	Les particules-filles ne sont pas ...	16
6.3	Quelle est la durée de vie de ces particules instables ?	16
6.4	Deux tentatives pour nous représenter une durée de vie	17
6.5	Même quand tout se transforme, quelque chose se conserve.	17
6.6	Conservation de la charge électrique	18
6.7	Exemple de conservation d'une "charge" non électrique	18
6.8	La nécessité de la conservation de cette "charge"	19
<b>7</b>	<b>Les particules ne sont pas des objets</b>	<b>19</b>
7.1	Devinette...	19
7.2	Réponse	19
7.3	Une "tasse" est-elle toujours une tasse	20
7.4	Les propriétés des objets changent	20
7.5	Une particule est une chose qui n'est	20
7.6	Consolation	21
<b>8</b>	<b>Le vide n'est pas vide</b>	<b>21</b>
8.1	Exercice préliminaire comment gagner de l'argent...	21
8.2	Comment le vide se peuple.	22
<b>9</b>	<b>Antiparticules et antimatière</b>	<b>22</b>
9.1	Zéro = +1-1 = Zéro	22
9.2	Le vide et le début de notre Univers (le "Big Bang")	23
<b>10</b>	<b>Racines</b>	<b>24</b>
<b>11</b>	<b>Comment tout cela a-t-il commencé ?</b>	<b>26</b>
<b>12</b>	<b>Existe-t-il un lien entre la physique...</b>	<b>26</b>
<b>13</b>	<b>Pourquoi les accélérateurs sont-ils si grands ?</b>	<b>27</b>
<b>14</b>	<b>Pourquoi les détecteurs sont-ils si énormes ?</b>	<b>28</b>
<b>15</b>	<b>Ces recherches ont-elles des retombées pratiques ?</b>	<b>28</b>
<b>16</b>	<b>Combien de particules différentes existe-t-il ?</b>	<b>28</b>
<b>17</b>	<b>Qu'entend-on exactement par la dimension d'une particule ?</b>	<b>31</b>
17.1	Les particules ont-elles une température ?	32
<b>18</b>	<b>Comment peut-il exister des objets colorés</b>	<b>32</b>
<b>19</b>	<b>Que sont les neutrinos</b>	<b>33</b>
<b>20</b>	<b>Où va-t-on</b>	<b>34</b>

## 1 Les collisions du quatrième type

Que se passe-t-il quand deux objets entrent en collision ?

- Ou ils rebondissent l'un sur l'autre comme deux balles,
- Ou ils se déforment comme deux plaques de beurre,
- Ou ils se cassent comme deux bouteilles.



Le résultat des collisions habituelles (par exemple lors d'un choc frontal entre deux véhicules), est une combinaison de ces trois possibilités.

Il y a pourtant une quatrième possibilité qui ne se manifeste que dans des circonstances très spéciales. Dans ce type de collision, il se crée de la matière aux dépens de l'énergie du choc.

Il est difficile de se représenter ce phénomène ou même de l'admettre, parce qu'il ne se produit jamais dans la vie quotidienne. Sans aller jusqu'à dire que la matière créée dans ce type de collision est constituée de vitesse solidifiée (!), on peut tenter d'imaginer cette étrange création de matière comme si l'énergie dégagée lors du choc se matérialisait subitement en une sorte de poussière extrêmement fine : une "poussière d'énergie" que les physiciens appellent "particules".

La nature a fait amplement usage, au début de l'Univers de cette capacité étrange de l'énergie : pouvoir disparaître sous forme de mouvement et réapparaître sous forme de matière. Tout ce qui est matériel en est issu.

Pour étudier en laboratoire ce brusque changement d'état ce ne sont pas des "billes" que nous lançons les unes contre les autres. mais des objets beaucoup plus petits.

Étudier le résultat de ces "collisions du quatrième type" n'est pas facile, car la matière produite dans ces collisions se présente sous la forme de particules plus d'un milliard de fois plus petites que ce que les microscopes habituels permettent de voir. De plus, ces particules vont à des vitesses folles et beaucoup d'entre elles ne durent que moins d'un millionième de millionième de millionième de seconde soit  $10^{-18}$  s ! Seules des installations complexes et des techniques extrêmement raffinées permettent d'accéder à leur monde.

La branche de la Physique qui étudie cette "poussière d'énergie" se nomme Physique des particules. Les principaux outils dont elle se sert pour réaliser ses expériences appartiennent à l'une de ces trois catégories :

**Les accélérateurs** qui donnent à certains "grains de matière" une vitesse extrême, très proche de celle de la lumière, avant de les faire se percuter.

**Les détecteurs** : énormes assemblages de matériaux spéciaux et de dispositifs électroniques, qui, traversés par les particules produites dans ces collisions, traduisent sous forme de signaux électriques les effets de leur passage.

**Les ordinateurs** qui démêlent et trient les signaux provenant des détecteurs. En reconstituant ce qui s'y est passé, ils identifient les particules, mesurent, calculent, vérifient leurs propriétés et parfois même les prévoient.

## Le CERN



Le CERN, près de Genève, est le plus grand laboratoire pour l'étude de ces particules, mais il n'est pas unique au monde. Il existe d'autres laboratoires importants qui travaillent sur la "poussière d'énergie", avec lesquels le CERN collabore activement, chacun ayant ses caractéristiques originales.

Le CERN est une véritable ville-laboratoire. Près de 7000 personnes venant de 80 pays y travaillent en liaison avec plus de 500 instituts de recherche répartis sur les cinq continents. Son principal accélérateur fait 27 kilomètres de circonférence et certains de ses détecteurs pèsent plus de 7000 tonnes. Quant à son centre de calcul, il est l'un des plus importants d'Europe.

On trouve aussi au CERN d'autres instruments en apparence plus modestes, par exemple plus de 4000 tableaux noirs. C'est peut-être sur l'un d'entre eux qu'un jour seront écrites, en écho à ses recherches, quelques réponses aux questions que les hommes se posent depuis longtemps sur la matière et quelques-uns de ses "infinis" : **l'infiniment petit, l'infiniment bref, l'infiniment concentré, l'infiniment vide, l'infiniment chaud, l'infiniment dense**. Réponses qui feront probablement surgir de nouvelles questions à propos de la matière, des forces et des lois qui la régissent, de l'espace, du temps, de l'origine de l'Univers et de son destin.

## 2 Pourquoi est-ce que ça ne marche pas avec des billes ?

### 2.1 On ne peut pas faire cuire un œuf en le plongeant dans l'eau d'un lac, même en été.

La quantité de chaleur que le soleil déverse dans un lac pendant une journée d'été est très grande. Beaucoup, beaucoup plus grande que celle que dégage la flamme d'une bougie...

... et pourtant, en laissant tremper un œuf dans l'eau du lac toute la journée, il est impossible de le faire cuire, alors qu'on peut parfaitement y arriver en quelques minutes à l'aide d'une bougie.

#### Pourquoi ?

Parce que l'énorme quantité de chaleur reçue par le lac se trouve diluée dans une telle masse d'eau que sa concentration y est très faible. Tandis que pour la bougie, les choses sont différentes : elle produit peu de chaleur, mais cette chaleur se trouve concentrée dans le tout petit volume de la flamme. Comme la température est directement liée à la concentration de la chaleur, la flamme sera très chaude, l'œuf qu'on y placera cuira (ou sera même brûlé !), tandis que rien ne se passera dans l'eau du lac.

C'est donc la concentration qui compte. Il y a beaucoup de situations où la concentration compte bien plus que la quantité.

En voici quelques exemples :

- Avec 100 euros on peut acheter du sable ou de l'or. Pourquoi alors le sable n'est-il pas considéré comme aussi précieux que l'or ? Parce que ce qui confère le caractère "précieux", c'est la concentration de valeur (euros par gramme) et non la valeur elle-même (euros).
- Si l'on pouvait comprimer un litre d'eau dans le volume d'un dé à coudre, l'eau se transformerait en une sorte de glace très particulière pouvant, par exemple, être chauffée à plus de mille degrés sans fondre ! Mettre un litre d'eau dans une carafe ou le faire tenir dans un dé à coudre ne sont pas deux exploits identiques et de loin... Encore une affaire de concentration.
- Mettez vingt personnes sur une table : elles auront tout de suite des problèmes et elles se comporteront tout autrement que si elles étaient éparpillées sur un kilomètre carré. On n'a pas besoin d'être nombreux pour se sentir serré. Ce n'est pas le nombre de personnes mais leur concentration qui crée les complications...

#### Que signifie au juste "concentrer" ?

**"Concentrer"** : c'est réunir ce qui est dispersé, dilué. C'est rendre plus compact, plus dense. Concentrer, c'est un peu comme : comprimer, entasser, presser, serrer, tasser... Nous dirons que quelque chose est concentré quand il y en a beaucoup par rapport à la place disponible.

## 2.2 Pour créer de la matière à partir d'énergie, ce qui compte ce n'est pas la quantité d'énergie disponible, mais sa concentration qui, elle, doit être énorme.

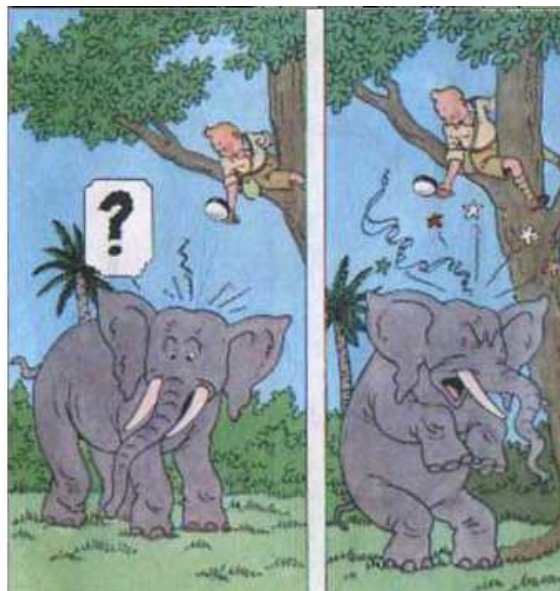
Si on lançait deux billes l'une contre l'autre à une vitesse cent fois supérieure à celle d'une balle de fusil (ce qui est au delà des possibilités techniques actuelles), il se dégagerait au moment de l'impact, dans le petit volume où la collision aurait eu lieu, autant d'énergie que celle libérée par l'explosion d'une cinquantaine de kilos de dynamite ! La concentration d'énergie y serait donc très élevée. Suffirait-elle à ce que l'énergie se condense en matière ?

De loin pas !

Pour donner une idée de la concentration nécessaire, imaginons qu'on "enferme" toute l'énergie produite ou utilisée par l'homme depuis l'invention du feu dans le volume... d'un grain de riz ! Ce serait une quantité d'énergie colossale qui se verrait ainsi concentrée dans quelques millimètres cubes : elle inclurait l'énergie de tous les feux que l'Homme a allumés depuis la lointaine préhistoire, celle de toute la nourriture qu'il a consommée depuis ces temps reculés, celle dépensée par tous les animaux domestiques et de trait comme les chevaux et les bœufs, l'énergie produite par les moulins à vent et à eau, par les turbines hydroélectriques et surtout celle dégagée par la combustion de centaines de milliards de tonnes de combustibles divers (bois, charbon, pétrole, gaz naturel). A cela s'ajouterait l'énergie produite par toutes les centrales nucléaires, celle dégagée par tous les explosifs utilisés dans toutes les guerres et celle libérée par toutes les explosions de bombes atomiques... Eh bien, même si nous enfermions toute cette énergie dans le volume d'un grain de riz, sa concentration ne serait probablement pas encore suffisante pour qu'elle se métamorphose en matière !

Si des concentrations d'énergie aussi délirantes ne garantissent pas sa "concentration" en matière, ne devrions-nous pas admettre que jamais nous ne parviendrons à provoquer ce phénomène en laboratoire ?

Comment alors s'y prennent les chercheurs en Physique des particules qui réalisent cette métamorphose des millions de fois par jour et bientôt, au CERN, un milliard de fois par seconde ? Par quelle ruse réussissent-ils ce qui logiquement paraît définitivement hors de portée ?



Leur astuce est simple : elle consiste à enfermer non pas de gigantesques quantités d'énergie dans un petit volume, mais à libérer de petites quantités d'énergie dans des volumes qui, eux, sont extraordinairement, inimaginablement minuscules. L'arithmétique ne nous dit-elle pas que "peu" divisé par "très peu" égale "beaucoup" ? Il est donc possible, en principe, d'obtenir des concentrations d'énergie aussi élevées qu'on le souhaite, et cela avec peu d'énergie, pour autant qu'on trouve le moyen de lui faire occuper, pendant un instant, un espace suffisamment petit.

Pour obtenir des concentrations très élevées de n'importe quoi, une petite quantité est suffisante, pourvu que l'on parvienne à l'enfermer dans un espace très réduit.

Les fractions en arithmétique l'expriment de façon précise quand nous divisons un petit nombre par un nombre beaucoup plus petit que lui, le résultat est un grand nombre.

Exemple : 
$$\frac{\text{peu}}{\text{très peu}} = \frac{0,2}{0,000\ 000\ 001} = 200\ 000\ 000 = \text{beaucoup}$$

### 2.3 L'énergie de deux mouches en vol suffit largement pour créer de la matière à partir du mouvement !

L'énergie d'un objet qui se déplace est fonction non seulement de sa vitesse mais encore de son poids ( $\frac{1}{2}mv^2$ ).

Si nous voulons donner à une bille la même énergie que celle d'un camion roulant à vive allure, il faudra la lancer à une très grande vitesse. De même, si nous voulons conférer à un microbe une énergie égale à celle que possède une mouche en vol, il faudra le lancer à une vitesse folle - près de 1000 fois la vitesse du son ! Lors de la collision frontale de deux microbes animés d'une telle vitesse, l'énergie du choc resterait confinée, concentrée, dans un espace beaucoup plus réduit que lors de la collision entre les deux mouches et ses effets seraient tout autres : non seulement les microbes seraient entièrement anéantis, mais ils seraient vaporisés, car la température de leurs "restes" égalerait celle du soleil ! Ils disparaîtraient dans un éclair éblouissant !

Si maintenant l'énergie de nos deux mouches est conférée non plus à deux microbes (qui ne sont "que" 10 000 fois plus petits qu'elles), mais à des objets des millions de milliards de fois plus petits, nous pouvons pressentir que sa concentration lors de leur collision sera inouïe et qu'il se passera alors des choses complètement folles - peut-être même... la transformation de cette énergie en matière. Le tour sera joué !

Mais pour cela, il nous faut

- trouver des objets qui soient le plus petit possible ;
- les lancer à une vitesse extrême, de façon à ce que, malgré leur petitesse, ils possèdent, au moment de l'impact, la même énergie que nos mouches.

Déjà pour projeter nos microbes à des vitesses supersoniques, les problèmes techniques auraient été ardues ; comment est-on parvenu à les résoudre pour des objets beaucoup plus petits qui doivent être lancés à des vitesses incroyablement plus élevées ?

C'est ce que nous verrons au cours des deux prochains paragraphes.

## 3 A la recherche d'objets de plus en plus petits

### 3.1 La question fondamentale

Dans le paragraphe précédent nous avons vu que l'énergie de deux mouches en vol conférée à deux microbes produirait déjà, s'ils entraient en collision, des effets surprenants. Mais pour que cette énergie se condense en matière, il faut la faire "porter" par des objets encore beaucoup plus petits. La question fondamentale devient celle-ci :

Quels sont les objets les plus petits qui existent dans la Nature et comment les lancer les uns contre les autres ?

### 3.2 Une descente vers l'infiniment petit

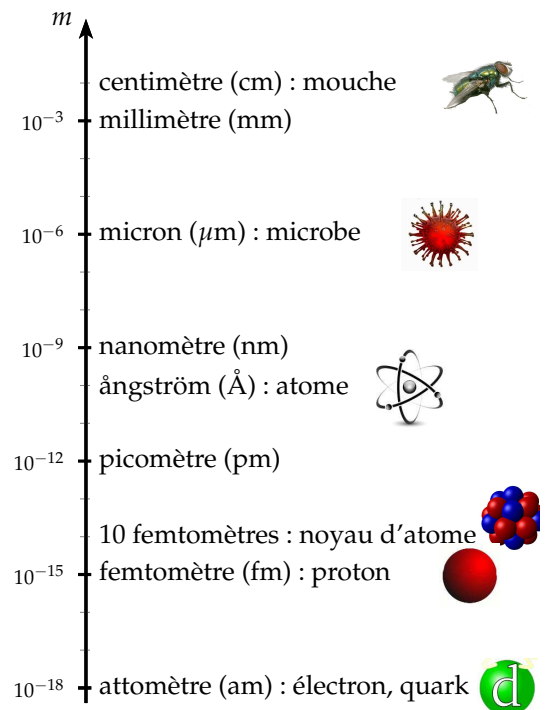
Pour répondre à cette question, il nous faudra effectuer une plongée vertigineuse dans l'infiniment petit. Afin d'avoir le temps d'en savourer le dépaysement et de retomber (peut-être) sur nos pieds, procédons en quatre étapes

**Les microbes** Bien que dix mille fois plus petits qu'une mouche, ils contiennent un nombre gigantesque d'atomes.

**Les atomes** Ils sont dix mille fois plus petits que les microbes.

**Les protons (et les neutrons)** ils sont cent mille fois plus petits que les atomes. Ils forment au milieu de ceux-ci un noyau minuscule.

**Les quarks et les électrons** Ils sont mille fois plus petits que les protons et les neutrons. Dans chaque proton et chaque neutron il y a trois quarks. Les électrons, qui eux occupent la périphérie des atomes, ont probablement la même dimension que les quarks.



### 3.3 Essayons de situer ces divers degrés de petitesse les uns par rapport aux autres.

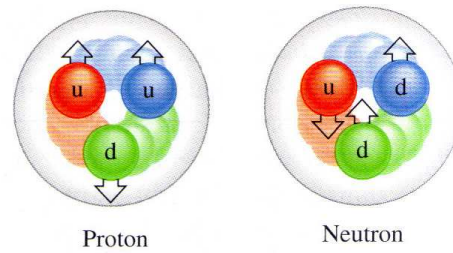
Prenons un cas précis, par exemple un de ces atomes de carbone qu'on trouve en abondance dans toute matière vivante.

Par l'imagination, agrandissons-le jusqu'à ce qu'il mesure 2000 kilomètres de diamètre. Son noyau serait alors une boule de 80 mètres de hauteur contenant douze sphères de 30 mètres de diamètre : six protons et six neutrons. (Les protons et les neutrons sont à peu près identiques, sauf en ce qui concerne leurs propriétés électriques.)



## Qu'y a-t-il à l'intérieur de ces sphères ?

A première vue... rien! Elles n'ont même pas d'enveloppe! Mais en regardant de plus près, on constaterait que dans chacune d'elles courent ou plutôt volent, dans tous les sens et à toute vitesse, trois minuscules "choses" pas plus grosses que des fourmis : les quarks.



Ils s'agitent tellement et perturbent l'espace autour d'eux à un tel point qu'ils donnent l'impression d'occuper à eux trois toute la sphère qui leur est attribuée!

Pas plus gros que des fourmis non plus seraient les six électrons qui peupleraient l'immensité de notre atome de 2000 kilomètres de diamètre... Mais ne nous méprenons pas : les électrons ont des propriétés très différentes de celles des fourmis, leur influence se fait sentir même là où ils ne sont pas. Sur ce point, un électron ressemble plutôt à un dangereux terroriste capable, même s'il est de très petite taille, d'inquiéter tout un pays, donc, d'une certaine façon, d'être présent partout

### 3.4 Si deux électrons ou deux quarks se percutaient avec l'énergie de deux mouches qui se heurtent...

**... il faudrait un nombre de plus de 40 zéros pour écrire son degré de concentration au point d'impact!**

Revenons à notre problème initial : trouver des objets suffisamment petits pour qu'en les lançant les uns contre les autres avec l'énergie d'une mouche en vol, nous obtenions les concentrations d'énergie colossales qu'exige sa transformation en matière.

Pour comprendre le résultat surprenant qui nous attend, il faut garder à l'esprit que chaque fois qu'on divise les dimensions d'un corps par 10, le volume est divisé par  $10^3 = 1\ 000$ .

Les électrons et les quarks sont dix millions de milliards de fois plus petits qu'une mouche. Il faudra donc diviser les dimensions de celle-ci par  $10^{16}$  et chaque fois le volume considéré sera divisé par mille ; la concentration de l'énergie de la mouche sera augmentée d'autant et multipliée par :  $1000^{16}$ , soit par  $10^{48}$

1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000

C'est largement suffisant pour que l'énergie de la collision des deux mouches devienne matière!<sup>1</sup>

### 3.5 Oublions tous ces calculs...

et demandons-nous simplement quelle devrait être la grandeur d'une bille pour qu'un électron, posé à côté d'elle, ait la taille d'une fourmi. Nous avons déjà vu qu'avec le grossissement qui donne aux électrons la taille d'une fourmi, les

1. en tenant compte dans ce calcul des lois de l'infiniment petit, on aboutirait, avec des chiffres un peu différents, à la même conclusion.

atomes ont quelque deux mille kilomètres de diamètre ; mais à cette échelle, quelle est la dimension d'une bille

Eh bien, notre bille est si énorme qu'un avion mettrait plus de 5000 ans pour la traverser de part en part... Nous nous rendons peut-être mieux compte maintenant à quel point les électrons sont minuscules et par conséquent à quel point sera tassée, comprimée, densifiée l'énergie qu'on leur apportera Vie, accélérant puissamment.

Encore faut-il pouvoir accélérer puissamment ces électrons

## 4 Comment accélérer des électrons

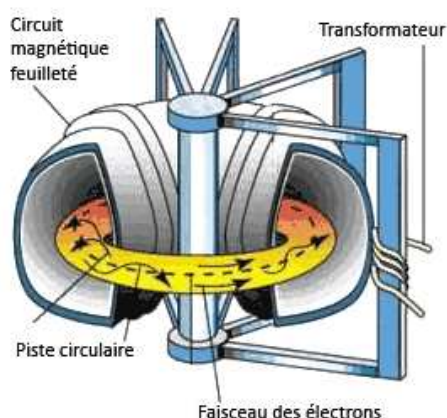
### 4.1 Les électrons sont extraordinairement sensibles aux forces électriques.

Du point de vue électrique, les électrons sont chargés négativement. En quoi cela consiste exactement, personne ne peut le dire, mais les effets de cette propriété sont simples : ce qui est négatif est repoussé par ce qui est négatif et attiré par ce qui est positif. Les électrons étant à la fois très légers et très électrisés, ils subissent ces forces d'attraction et de répulsion avec une violence extrême : rien qu'en passant de la région négative d'une pile ordinaire de 1,5 Volt (région d'où ils sont violemment poussés) à la région positive (qui les attire puissamment), ils acquièrent une vitesse de 1 200 kilomètres par seconde !

Une telle sensibilité aux forces électriques laisse pressentir l'élan et l'énergie dont ils seront dotés si on les accélère non plus avec une pile de lampe de poche, mais à l'aide de techniques puissantes et efficaces, spécialement développées dans ce but.

### 4.2 Une autre façon d'agir sur les électrons : "les aimants souffleurs"

En plus d'être influençables par les forces électriques, les électrons (et toutes les particules chargées électriquement) sont aussi sensibles à l'influence des aimants. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, les électrons ne sont ni attirés ni repoussés par le champ magnétique qui se trouve entre les pôles d'un aimant, mais sont "soufflés" de côté par celui-ci, comme s'ils subissaient un vent de travers. Le résultat est qu'en traversant un champ magnétique, les électrons sont déviés, leur trajectoire n'est plus rectiligne, mais courbe.



Cet effet est très utilisé dans les laboratoires de Physique des particules, tant pour les accélérateurs que pour les détecteurs. Au CERN, par exemple, l'accélérateur

LEP contient 2300 tonnes d'aimants et les gros détecteurs plusieurs fois ce poids chacun. Les "aimants souffleurs" constituent à eux seuls presque la totalité du poids de l'équipement du Laboratoire.

Les aimants utilisés pour ces recherches sont tous des électroaimants, c'est-à-dire que leur champ magnétique est produit à l'aide de courant électrique.

Les électro-aimants sont beaucoup plus puissants que les aimants permanents et ont sur eux l'avantage que leur puissance est modifiable et réglable avec une grande précision.

### 4.3 A quoi servent les "aimants souffleurs" ?

Les aimants sont capables de modifier la trajectoire de toutes les particules chargées. Dans les accélérateurs, ils permettent la maîtrise de la trajectoire des particules en donnant au faisceau, c'est-à-dire à l'ensemble des particules qu'on y a injecté, la forme et la direction optimale en chaque point de la machine et cela avec une très grande précision.

### 4.4 L'accélérateur : un serpent qui se mord la queue

De quoi est fait un accélérateur, par exemple un accélérateur d'électrons ? (Pour les protons c'est à peu près la même chose.)

Il y a d'abord un tube métallique d'une dizaine de centimètres de diamètre dont l'air a été soigneusement chassé pour éviter qu'il perturbe la trajectoire des électrons. Si l'accélérateur était situé dans l'espace ou sur un corps céleste sans atmosphère, ce tube serait inutile.

C'est dans ce tube que les électrons à accélérer vont être injectés. Puis, en des endroits bien précis, ils vont recevoir de violentes impulsions électriques qui les accéléreront. Ce n'est qu'après les avoir subies de nombreuses fois et parcouru 180 millions de kilomètres qu'ils auront atteint leur énergie maximum.

Est-ce que cela signifie que la machine doit avoir 180 millions de kilomètres de long ? Oui et non !

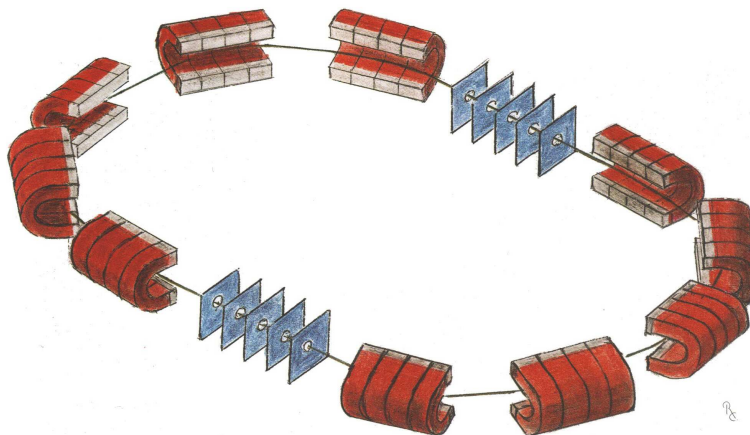
OUI, car il est vrai que les électrons subissent dans l'accélérateur les impulsions tout au long d'un trajet d'une telle longueur !

NON, car la machine qui réussit cet exploit, bien que géante, n'a pas cette longueur. Mais comment donner à un trajet de 180 millions de kilomètres une grandeur relativement raisonnable ?

La clé de l'énigme, ce sont les "aimants souffleurs", nommés ici aimants de courbure, qui la détiennent : ils infléchissent et courbent peu à peu la trajectoire des électrons en "soufflant" sur eux. Cette trajectoire, ainsi que le tube métallique qui la protège de l'air, se referment sur eux-mêmes : voilà pourquoi la machine a la forme d'un immense anneau dans lequel les électrons passent plusieurs fois par les mêmes régions accélératrices.

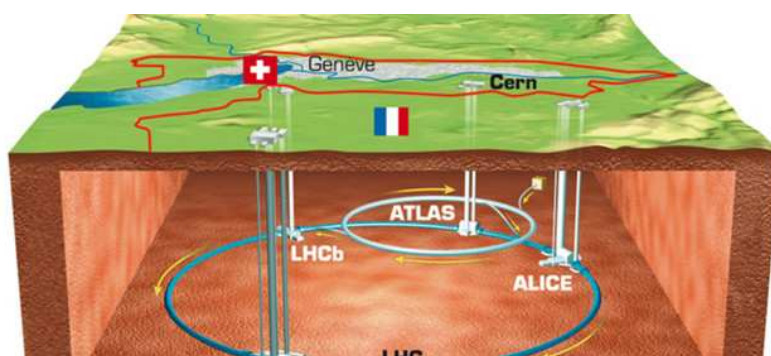
En plus, des lentilles magnétiques sont réparties abondamment tout le long du trajet. Ce sont aussi des "aimants souffleurs" qui, eux, ont pour fonction de maintenir sur une trajectoire proche de la trajectoire idéale les dizaines de milliards d'électrons qui sont accélérés simultanément. Ces lentilles magnétiques doivent également veiller à ce que les collisions frontales ne se produisent que dans les détecteurs, malgré le fait que, dans le même tube à vide, circulent très près les uns

des autres des électrons allant dans des directions opposées. Le tout est contrôlé avec une précision extrême par un ensemble d'ordinateurs.

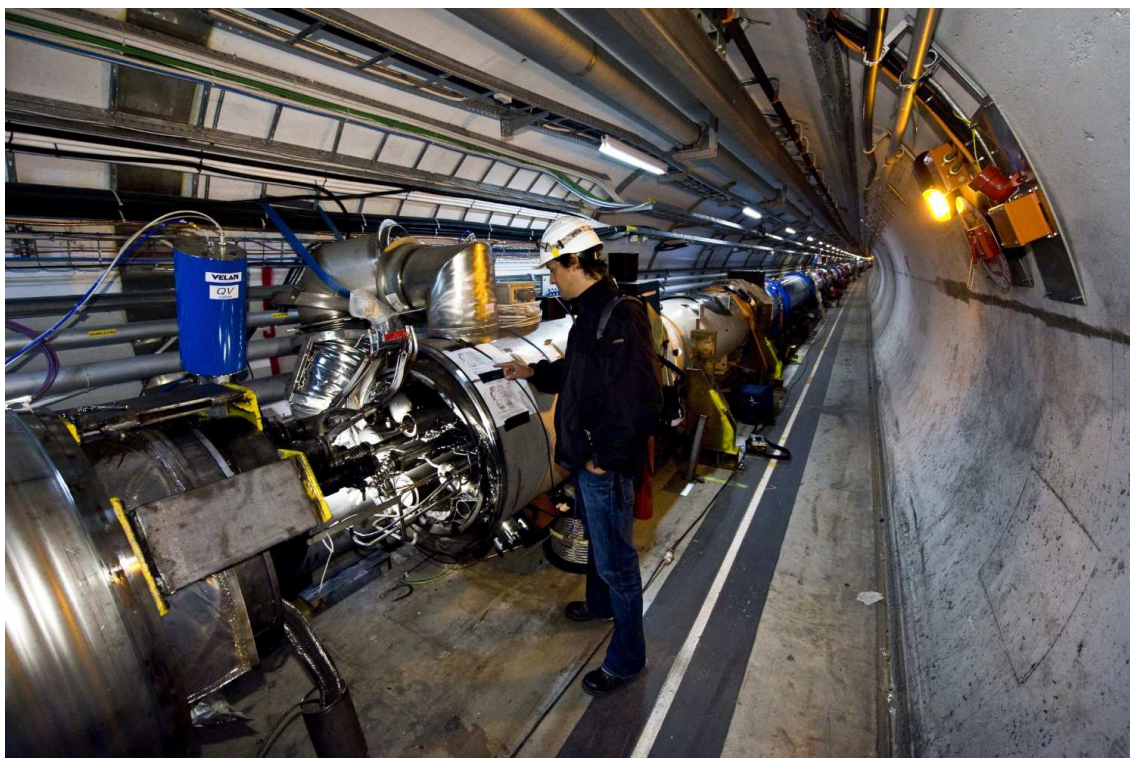


*schéma simplifié d'un accélérateur. Les aimants sont en rouge et les lentilles en bleu*

L'accélérateur a été placé à une centaine de mètres sous terre afin de lui faire prendre appui sur la roche profonde et stable. Cela est indispensable, car il suffirait qu'il se déforme d'une fraction de millimètre çà et là pour que son efficacité diminue.



Notons pour l'anecdote que cela lui arrive avec une grande régularité. La cause de ce dérangement périodique et mystérieux n'est pas à chercher sur terre, mais dans le ciel : la coupable est la Lune ! En effet, bien que les marées provoquées par son influence sur la terre ferme aient une amplitude moins grande que celles de l'océan, elles suffisent cependant à déformer régulièrement de quelques dixièmes de millimètre l'assise de l'accélérateur et donc la machine elle-même. Ces déformations minimales par rapport aux 27 kilomètres de circonférence de la machine suffisent pourtant à en modifier légèrement le fonctionnement. Elles doivent être corrigées.



## 4.5 Faits et chiffres

### 4.5.1 La plus grande machine du monde...

La circonférence exacte du LHC est de 26 659 m, et la machine contient un total de 9300 aimants. Non seulement le LHC (Large Hadron Collider) est le plus grand accélérateur de particules du monde, mais rien qu'un huitième de son système de distribution cryogénique constituerait le plus grand frigo de la planète. Tous les aimants seront prérefroidis à  $-193,2^{\circ}\text{C}$  (80 K) à l'aide de 10 080 tonnes d'azote liquide, avant d'être remplis de près de 120 tonnes d'hélium liquide qui les portera à  $-271,3^{\circ}\text{C}$  (1,9 K).

### 4.5.2 Le circuit le plus rapide de la planète...

À pleine puissance, des trillions de protons, lancés à 99,9999991% de la vitesse de la lumière, vont effectuer 11 245 fois le tour de l'accélérateur par seconde. Deux faisceaux de protons voyageront chacun à une énergie maximum de 7 TeV (tera-électronvolts), permettant ainsi des collisions frontales de 14 TeV. Cela donnera lieu à quelque 600 millions de collisions par seconde.

### 4.5.3 L'espace le plus vide du système solaire...

Afin d'éviter des collisions avec les molécules de gaz présentes dans l'accélérateur, les faisceaux de particules voyagent dans une cavité aussi vide que l'espace interplanétaire, ce qu'on appelle l'ultravide. La pression interne du LHC est de  $10^{-13}$  atm, ce qui est dix fois inférieur à la pression régnant sur la Lune.

#### 4.5.4 Les points les plus chauds de la galaxie dans un anneau plus froid que l'espace intersidéral...

Le LHC est la machine des températures extrêmes. Lorsque deux faisceaux de ions de plomb entrent en collision, ils génèrent, dans un espace minuscule, des températures plus de 100 000 fois supérieures à celles qui règnent au centre du Soleil. A l'opposé, le système de distribution cryogénique, qui alimente l'anneau de l'accélérateur en hélium superfluide, garde le LHC à une température de  $-271,3^{\circ}\text{C}$  (1,9 K), plus froide que l'espace intersidéral.

#### 4.5.5 Les détecteurs les plus grands et les plus performants jamais construits...

Pour sélectionner et enregistrer les données les plus intéressantes parmi ces millions de collisions, physiciens et ingénieurs ont construit de gigantesques appareils qui mesurent les traces de particules avec des précisions de l'ordre du micron. Les détecteurs du LHC tels qu'ATLAS ou CMS sont équipés de systèmes électroniques de déclenchement qui mesurent le temps de passage d'une particule à quelques milliardièmes de seconde près. Le système de déclenchement enregistre également la position des particules au millionième de mètre. La rapidité et la précision de ces systèmes sont essentielles si l'on veut être certain qu'une particule enregistrée dans différentes couches du détecteur est bel et bien la même.

#### 4.5.6 L'ordinateur le plus puissant du monde...

Les données enregistrées par chacune des grandes expériences du LHC pourraient remplir environ 100 000 DVD double couche par année. Afin de permettre à quelque 7000 physiciens du monde entier de participer à l'analyse des données pendant les 15 prochaines années (la durée de vie estimée du LHC), des dizaines de milliers d'ordinateurs dispersés sur la planète seront exploités dans le cadre d'un réseau informatique décentralisé appelé la Grille.

## 5 Rendre perceptible l'invisible

### 5.1 Les reportages en direct sur la naissance des particules sont impossibles.

Il serait fascinant de photographier ou de filmer au ralenti ce qui se passe à l'instant même du choc où l'énergie se métamorphose en matière et d'assister ainsi à la naissance de ces "morceaux de vitesse" ou plutôt "d'énergie solidifiée" que nous nommons "particules".

Hélas, c'est impossible. Car en naissant, les particules sont déjà en mouvement et leur vitesse est telle que même une photographie au milliardième de milliardième de seconde ne serait pas assez rapide pour en fixer l'image à l'instant critique. Et encore faudrait-il qu'il y ait une image à fixer, car la lumière ignore les particules. De quoi pourrait-elle témoigner ?

Pour ingénieuses que soient les techniques envisagées, assister en direct à la naissance des particules est hors de portée. Les théoriciens nous affirment d'ailleurs que c'est fondamentalement impossible.

Il faut donc s'y prendre autrement : faute de pouvoir observer ces événements à l'instant même où ils se produisent, on peut tenter de les reconstituer après coup, un peu comme un détective reconstitue un crime quand aucune caméra de surveillance n'était présente sur le lieu et au moment fatidiques. Sur ce point, les physiciens qui étudient les particules sont avantagés par rapport aux détectives : ils peuvent choisir et aménager le lieu du "crime" de façon à ce que les particules impliquées y laissent des indices suffisamment précis pour leur permettre de comprendre ce qui s'est passé.

Les détecteurs sont justement ces lieux que les particules qui viennent de naître sont obligées de parcourir et où les légères perturbations qu'elles y induisent trahissent ce qu'elles ont fait ou plutôt ce qui leur est arrivé.

### **Plus on sait, plus il est facile d'accroître ce que l'on sait.**

*Supposons qu'on s'intéresse à des traces faites dans la neige. Sachant que ces traces sont faites par un même animal, il est possible d'en déduire, par exemple qu'il s'agit d'un pingouin.*



Il y aura peut-être un connaisseur qui, à partir de ces traces, estimera le poids du pingouin... donc son métabolisme... donc ses besoins en nourriture... donc la quantité de poisson dans les environs... donc la température de l'eau de l'océan... donc les courants thermiques qui s'y produisent... donc le climat dans les prochains mois ou les prochaines années... donc l'abondance des futures récoltes de blé... donc le cours du blé à New-York...

## **5.2 De quoi est fait un détecteur ?**

Un détecteur est un empilement géant d'une multitude de dispositifs sensibles, conçus pour que les particules les traversent et y produisent des impulsions électriques. Amplifiées, celles-ci deviendront des signaux capables d'être déchiffrés, triés, sélectionnés, mesurés, comparés.

La plupart des détecteurs sont plongés dans le champ magnétique d'un puissant aimant. Pourquoi ?

Parce que, en leur "soufflant dessus", l'aimant impose une courbure aux trajectoires des particules chargées électriquement. Cette courbure dépend de leur masse et de leur vitesse. Mesurée avec précision, elle donne des indications précieuses sur l'identité des particules et sur l'énergie qu'elles possèdent.



*La collaboration ATLAS dévoile une peinture murale géante représentant son détecteur de particules. ATLAS est l'une des grandes expériences du Grand collisionneur de hadrons (LHC). Cette fresque donne une idée du détecteur situé à 100 mètres sous terre et qui n'est plus accessible aux visiteurs.*

## 6 Les particules sont presque toutes instables

### 6.1 Presque toutes les particules révélées par les détecteurs sont éphémères.

La plupart des particules se désintègrent rapidement en donnant naissance à d'autres particules, souvent instables elles aussi (ci-contre en bleu). Cependant, au cours de ces désintégrations multiples, des particules stables apparaissent (représentées en rouge), seules survivantes et parfois seuls témoins de cette chaîne d'événements qui n'aura duré qu'une infime fraction de seconde.

### 6.2 Les particules-filles ne sont pas des morceaux des particules-mères.

Contrairement à ce que nous suggère le bon sens, quand une particule se désintègre, elle ne se brise pas en morceaux. Ce qui en reste n'en faisait pas partie avant !

Cette désintégration ne ressemble pas à celle d'un vase qui se casserait en plusieurs morceaux, mais plutôt à l'étrange disparition d'un vase qui s'évanouirait en devenant casserole, laquelle disparaîtrait à son tour pour devenir pot à lait, qui à son tour s'évanouirait en donnant naissance à un bol. Le vase serait ainsi à l'origine d'une chaîne de transformations, d'une sorte d'avalanche de disparitions et d'apparitions dont la lignée principale serait vase-casserole-pot-bol et où secondairement apparaîtraient à chaque étape de nouveaux objets, parfois stables, parfois instables.

### 6.3 Quelle est la durée de vie de ces particules instables ?

Nous avons déjà rencontré des "infinis" (ce terme est pris dans le sens d'extrême) l'infiniment petit, l'infiniment concentré, l'infiniment rapide. Ici, nous allons faire



face à un autre "infini", l'infiniment bref. En effet, beaucoup de particules ne durent que des temps incroyablement courts.

Ainsi, la durée d'existence de certaines particules comparée à une seconde, c'est comme une seconde comparée... à la durée de la vie humaine. Et pourtant ce sont là les particules dites "à vie longue", car beaucoup d'autres ont une existence mille milliards de fois plus brève encore...

#### 6.4 Deux tentatives pour nous représenter une durée de vie d'un milliardième de milliardième de cent millième de seconde ( $10^{-23}$ s), qui est celle de nombreuses particules.

- Imaginons un escargot qui chaque premier janvier avance d'un millimètre et reste là, immobile, le reste de l'année. Il lui faudra un certain temps (40 milliards d'années, trois fois l'âge de l'Univers) pour faire le tour de la Terre. Ce premier tour achevé, imaginons qu'il recommence encore et encore. Et bien, la durée de vie de certaines particules comparée à une seconde, c'est comme une seconde comparée au temps qu'il faudra à cet escargot pour faire... un million de fois le tour de la Terre !
- Si la durée d'une seconde était représentée par notre bille géante - qu'un avion mettrait plus de 5000 ans à survoler - la durée de vie de certaines particules ne serait pas plus longue qu'un milliardième de millimètre (un tout petit morceau de microbe).

Il s'agit là de la durée de vie des particules dites "à vie courte". Mais il en existe encore d'autres (par exemple celle qu'on nomme Z-zéro) qui durent cent fois moins encore... Ces êtres évanescents n'ont pas le temps d'activer les détecteurs. Néanmoins leur existence, leur durée de vie et leurs propriétés peuvent être retrouvées en reconstituant leur désintégration, grâce aux traces des particules moins éphémères auxquelles elles ont donné naissance en disparaissant.

#### 6.5 Même quand tout se transforme, quelque chose se conserve.

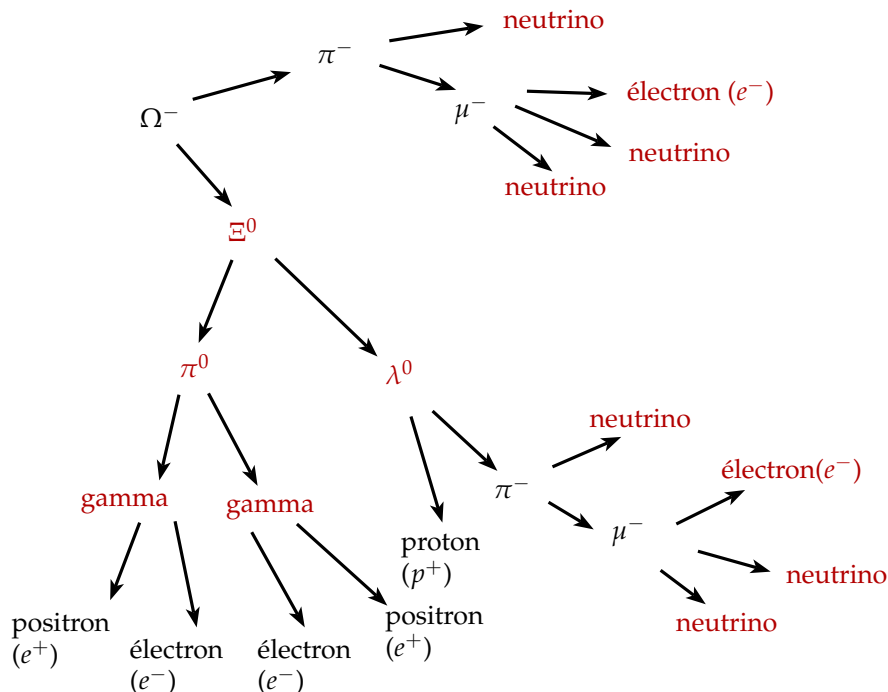
Revenons à notre cascade de désintégrations symboliques : "Vase-casserole-pot-bol". Dans cette suite de désintégrations, certaines propriétés sont conservées. Ainsi, dans la descendance de notre vase, il y aura toujours un et un seul récipient présent. La propriété "être un récipient" ne disparaît pas, ne se multiplie pas. Elle se transmet fidèlement en passant du vase à la casserole, de la casserole au pot, puis finalement du pot au bol.

Il en est de même avec les particules : par exemple, la propriété "être chargé électriquement" ne disparaît pas, elle se transmet et se conserve toujours. Ainsi, quand une particule portant une charge électrique égale à +1 se désintègre, la somme totale des charges des particules qui en proviennent doit être égale à +1. De même, quand une particule neutre disparaît, la somme des charges positives et négatives des particules auxquelles elle a donné naissance doit toujours être nulle.

Dans le monde des particules, d'autres sortes de "charges" existent qui n'ont pas leur équivalent dans le nôtre. Elles se conservent, soit toujours (ce qui est le cas pour les charges électriques), soit seulement dans certaines circonstances. Leur découverte et leur étude, ainsi que celle des influences sous le pouvoir desquelles

ces "charges" se conservent ou ne se conservent pas, se trouvent au cœur des recherches en Physique des particules. Les physiciens appellent ces influences "forces" ou "interactions".

## 6.6 Conservation de la charge électrique



La figure ci-dessus représente symboliquement la désintégration d'une particule nommée "Oméga-moins ( $\Omega^-$ )". L'exposant des particules indique leur charge électrique.

Dans un détecteur, la désintégration de l'Oméga-moins ne se révèle pas entièrement, elle doit être reconstituée à partir de quelques éléments, car

- Le "Ksi-zéro ( $\Xi^0$ )" et le "Lambda-zéro ( $\lambda^0$ )" ne laisseront pas de trace dans le détecteur, le Pi-zéro ( $\pi^0$ ) et tous les neutrinos étant électriquement neutres. Il en est de même pour les deux gammas.
- Les 2 "Mu-moins ( $\mu^-$ )" se désintégreront probablement en dehors du détecteur, car ce sont des particules "à vie longue". Donc les 2 électrons qu'ils produiront naîtront en dehors de celui-ci.

En fin de compte, 13 particules sur les 23 impliquées dans notre schéma ne laisseront pas de traces ! Mais, pour reprendre notre métaphore du détective, ce n'est pas parce que 13 indices sur 23 ne sont pas accessibles que le crime ne peut être élucidé !

## 6.7 Exemple de conservation d'une "charge" non électrique

La "charge baryonique", appelée aussi "nombre baryonique", n'a rien à voir avec la charge électrique. Aucun phénomène à notre échelle ne peut nous en donner une idée. La charge baryonique a été représentée ici par la propriété "être un récipient".

L'Oméga-moins en possède une unité qui devra se conserver tout au long de la cascade de désintégrations qui suivent sa disparition.

## 6.8 La nécessité de la conservation de cette "charge" a pour résultat la stabilité de la matière !

Le dernier terme de cette cascade de désintégrations est le proton. Il n'existe en effet aucune particule dans laquelle il aurait la possibilité de se désintégrer en lui "cédant" sa charge baryonique. Le proton est donc extrêmement stable. Heureusement, car si tel n'était pas le cas, les atomes n'auraient pas pu exister et nous encore moins...

## 7 Les particules ne sont pas des objets

### 7.1 Devinette...

Comment doit-on s'y prendre pour verser dans une tasse une quantité d'eau égale au double de sa contenance et l'y maintenir pendant au moins un quart d'heure ?

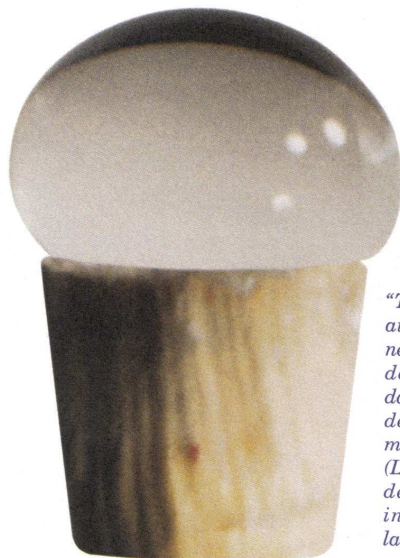
On n'a pas le droit de toucher à la tasse, de la déplacer, de la faire tourner, d'y ajouter un produit chimique, de la congeler, de la mettre en orbite autour de la terre, de faire intervenir quoi que ce soit d'autre que la tasse immobile et l'eau qu'on y verse.

une balance constatera que le poids de l'eau est effectivement deux fois supérieur à celui qui correspond à la contenance de la tasse. Des photographies et des vidéos seront prises sous tous les angles pour convaincre les plus sceptiques qu'il ne s'agit pas d'un tour d'illusionniste.

Il n'y a, en effet, aucun trucage.

### 7.2 Réponse

Pour réaliser ces "exploits", il suffit de prendre une tasse de quelques millimètres de diamètre, de la remplir avec une goutte d'eau, puis de poser délicatement dessus une deuxième goutte. La surface de l'eau se bombe, mais l'eau ne s'écoule pas ! Les conditions de l'épreuve ne sont-elles pas satisfaites ? Et ce n'est pas parce que le fond de la tasse manque que la goutte ne s'y maintiendra pas. Un anneau conviendrait tout aussi bien !



*"Tasse" réelle répondant aux conditions de la devinette. Elle a été obtenue en découpant une rondelle dans la tige d'un épi de blé de 3 millimètres de diamètre. (La tache noire au sommet de la goutte est l'image inversée de la table sur laquelle elle est posée.)*

### 7.3 Une "tasse" est-elle toujours une tasse et peut-on "verser de l'eau" dans une tasse qui n'est plus une tasse

Il a suffi de prendre une tasse minuscule pour modifier profondément ses propriétés vis-à-vis de l'eau. Mais est-elle encore une "tasse" alors qu'elle perdu quelques-unes de ses caractéristiques, comme celle d'avoir besoin d'un fond pour garder les liquides qu'on y verse ou de pouvoir être utilisée pour boire ?

Et puis est-ce vraiment "verser" de l'eau dans une tasse que d'y déposer deux gouttes ?

Que signifie à l'échelle d'une tasse miniature "être rempli", "rempli à moitié", "rempli à ras bord" ? Est-il possible de donner un sens à des mots et des expressions comme "déborder", "être bu jusqu'à la dernière goutte", "ne pas être étanche", etc. ?...

Voici un autre exemple où une propriété physique change subrepticement de nature quand changent les dimensions des objets

#### L'erreur fatale du serpent

En regardant les traces qu'il avait laissées derrière lui dans le sable, un serpent fit le raisonnement suivant :

*Si je puis creuser ce sillon, c'est que je suis plus dur que le sable ; mais le sable, lui, c'est bien connu, est plus dur que l'acier puisqu'il le raye ; donc, je suis plus dur que l'acier.*

Voyant un couteau non loin de là, il s'en saisit.

*Je vais emousser cette lame sur mon dos, se dit-il, ne suis-je pas plus dur que l'acier ?*

Aussitôt dit, aussitôt fait. Il en creuva

#### Pourquoi ?

Cet exemple nous rappelle un phénomène général :

### 7.4 Les propriétés des objets changent radicalement quand changent leurs dimensions.

Et c'est particulièrement vrai quand leurs dimensions diminuent : un facteur de réduction de 30 (notre tasse) a suffi à faire émerger des propriétés nouvelles et en faire disparaître d'autres que personne n'aurait l'idée de mettre en doute.

Faut-il nous étonner alors que le facteur de réduction d'un million de milliards ( $10^{15} = 1\,000\,000\,000\,000\,000$ ) qui nous mène aux dimensions des particules, nous plonge dans un monde complètement nouveau, paradoxal, désarçonnant que nos mots sont impuissants à décrire ?

### 7.5 Une particule est une chose qui n'est ni une particule ni une chose.

Les particules infinitésimales nées de l'énergie ne sont pas les petits grains, les petits points de matière sous lesquels nous nous les représentons, faute de mieux. Elles ne correspondent pas à l'idée que nous nous faisons d'un objet, même très petit. Il est impossible de s'en faire une image, car rien à l'échelle humaine ne leur ressemble.

Voici quelques exemples qui en témoignent :

- Un objet ne peut atteindre une vitesse donnée que s'il passe successivement par toutes les vitesses inférieures. Par contre, les particules, elles, naissent déjà dotées d'une certaine vitesse. Les morceaux d'un objet qui s'est cassé ou désintégré faisaient partie de l'objet intact. Or - nous l'avons vu à la leçon précédente - quand une particule se désintègre, tout se passe comme si elle disparaissait et que de nouvelles particules étaient créées qui n'existaient pas dans la particule d'origine.
- Un objet perdu peut être retrouvé. Mais si l'on retrouve une particule qui ressemble à celle qu'on a perdue, il n'est pas possible de savoir avec certitude si c'est celle qu'on a perdue ou une autre.
- Tout objet éclairé a une apparence, il interagit avec la lumière. Les particules, par contre, n'interagissent pas avec la lumière, elles n'ont aucune propriété optique : elles ne sont donc ni claires, ni foncées, ni colorées, ni incolores, ni ternes, ni brillantes, ni nacrées, ni chatoyantes, ni mates, ni opaques, ni irisées, ni translucides, ni diaphanes, ni même transparentes. (Les gouttelettes d'eau qui constituent les nuages sont transparentes. Mais si elles se comportaient comme les particules, les nuages seraient invisibles, car la lumière passerait à travers eux comme s'ils n'étaient pas là ! Etre transparent ne signifie pas ne pas agir sur la lumière !)
- Les objets ne peuvent pas passer par deux trous en même temps sans se casser. Les particules, elles, se comportent dans certaines circonstances comme si elles y parvenaient. Dans ce cas, elles ressemblent plutôt à une vague qui passe sous les arches d'un pont.
- Un objet ne naît jamais spontanément de rien. Des particules, au contraire, peuvent naître du vide. Elles condensent de l'énergie obtenue en émettant des "chèques sans provision" et disparaissent avant qu'il y ait un contrôle... C'est cet aspect que nous allons examiner d'un peu plus près dans la prochaine leçon.

Constatons une fois de plus à quel point le langage courant se prête mal pour parler des particules : tout en sachant qu'on ne peut les comparer à rien de familier, nous ne pouvons nous empêcher de nous en faire une idée en nous appuyant sur des mots et des images qui sont faits pour décrire le monde à notre échelle et non à la leur.

## 7.6 Consolation

Un physicien célèbre, après avoir expliqué lors d'une conférence pourquoi les particules n'avaient pas de couleur ni de propriétés optiques, fut interpellé par un auditeur qui lui demanda brusquement de quelle couleur il voyait les électrons. Sa réponse fut instantanée : jaune !

# 8 Le vide n'est pas vide

## 8.1 Exercice préliminaire comment gagner de l'argent avec des automates changeurs de monnaie.

La somme d'argent contenue dans un automate changeur de monnaie doit demeurer constante : il ne peut pas subir de pertes ni faire de bénéfices puisqu'il ne

fait que rendre la monnaie : chaque fois que l'on introduit, par exemple, un billet de 5 €, 5 pièces de 1 € en sortent. Comment pourrait-on gagner de l'argent avec une telle machine ? Et pourtant c'est théoriquement possible !

En effet, durant les quelques secondes qui séparent l'introduction du billet de 5 € et la sortie des 5 pièces de 1 €, son capital augmente de 5 €. Cette somme fugace échappe à la comptabilité, à la loi et au fisc ! Si une société possédait un million de changeurs de monnaie et s'ils fonctionnaient tous en permanence, elle détiendrait dans ses automates (en fait dans ses coffres) un capital supplémentaire de 5 millions d'€ qui n'existerait pas juridiquement, mais qui pourrait servir, par exemple, à garantir des emprunts qui, eux, seraient en € tout à fait stables, tangibles, palpables !

Conclusion : ce n'est pas parce qu'une loi est implacable qu'elle ne peut parfois être transgressée impunément pendant des temps très courts. De plus, il peut arriver que l'effet cumulatif de toutes ces transgressions soit stable et non négligeable. C'est ce qui se produit dans le vide.

## 8.2 Comment le vide se peuple.

Une des lois les plus respectables et des plus universelles de la Physique exige que, quels que soient les phénomènes et les circonstances, la quantité totale d'énergie en jeu ne change jamais. Ni pertes ni bénéfices ne sont autorisés. Mais, dans l'infiniment petit et l'infiniment bref, là où tant de choses étranges se passent, la nature ferme parfois les yeux sur les infractions. Disons plutôt qu'elle n'est pas en mesure de les censurer si elles ne durent qu'un très court instant. Ces infractions se présentent sous la forme de fluctuations rapides et spontanées de l'énergie dont l'amplitude est parfois suffisante pour donner naissance à des particules ! Mais celles-ci doivent disparaître très vite, avant d'être inscrites dans la comptabilité...

C'est ainsi que le vide dans l'infiniment petit est habité en permanence par une population de particules-fantômes qui se relaient continuellement entre l'être et le néant mais dont l'effet global est bien réel : il est décelable, mesurable et conforme aux prévisions théoriques. Le vide n'est jamais vide. Il ne peut être vide. Il est créateur malgré lui !

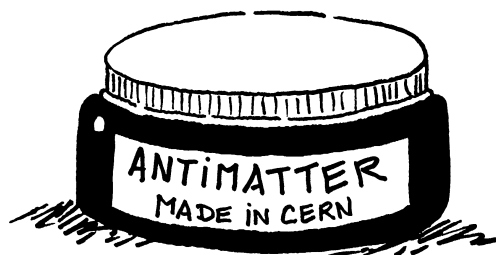
# 9 Antiparticules et antimatière

## 9.1 Zéro = +1-1 = Zéro

Les particules chargées électriquement sont créées obligatoirement par paires, car tout se passe comme si, depuis le début de l'Univers, depuis le "Big Bang", la totalité des charges électriques qui s'y trouvent devait rester constante. Par conséquent, si une particule nouvellement créée porte la charge +1, l'autre devra porter la charge -1 pour que la charge totale dans l'Univers ne change pas. Quand un électron ordinaire (dont la charge électrique vaut -1) est créé, il faudrait donc qu'apparaisse simultanément une particule symétrique dont la charge vaudrait +1, un électron positif qu'on appelle aussi "antiélectron".

Les électrons positifs existent-ils ? Oui. Ils furent d'abord prédits théoriquement en 1928, puis découverts expérimentalement en 1932. Pourquoi n'ont-ils pas été découverts en même temps que l'électron négatif, en 1897 ? Simplement parce

qu'il n'y en a pratiquement pas sur notre planète. En effet, les atomes de la matière usuelle ont à leur périphérie des électrons négatifs, les électrons ordinaires. Or, quand ceux-ci rencontrent un électron positif, ils s'annihilent réciproquement ( $+1-1=0$ ) en donnant un jet d'énergie sous forme de rayons gamma neutres (sorte de rayons X). Un électron positif, bien qu'il soit aussi stable que son homologue négatif, ne peut subsister qu'un temps très bref sur terre, car dès qu'il touchera de la matière, il y rencontrera très vite un de ces électrons négatifs avec lequel il va s'annihiler.



L'électron négatif n'est pas la seule particule à posséder sa particule symétrique. Toutes les particules ont la leur que l'on nomme "antiparticule". La matière symétrique de la nôtre, c'est à dire dont les composants seraient les antiparticules des nôtres (antiélectrons et antiquarks), est appelée "antimatière". Pour l'instant, on n'en a pas trouvé de quantités significatives dans l'Univers.

## 9.2 Le vide et le début de notre Univers (le "Big Bang")

Tentons de résumer en quelques lignes l'histoire de l'Univers, selon une hypothèse qui concerne directement le vide et l'antimatière. Ce serait un "vide primordial" (hors de l'espace et du temps ?) qui aurait, au cours d'une fluctuation d'énergie très particulière, offert à l'Univers - qui n'existait pas encore vraiment - un prêt d'énergie colossal à des conditions extrêmement favorables son échéance est reportée très loin, peut-être même infiniment loin... Cette énergie s'est trouvée concentrée dans un volume plus petit que celui que nous avons attribué à un électron, mais qui contenait l'Univers entier... Un volume où espace, temps, matière et vide créateur se sont mélangés, combinés, et associés d'une façon défiant toute représentation !

Très vite, c'est à dire en moins d'un milliardième de milliardième de milliardième de seconde, cette énergie s'est condensée en particules et en antiparticules qui se sont annihilées les unes les autres ou désintégrées en cascade pour finalement donner naissance à un résidu de particules stables, parmi lesquelles les électrons ordinaires et les quarks. Ce résidu, curieusement, ne semble pas être associé, comme il se devrait, à un nombre égal de particules symétriques antiélectrons et antiquarks. A ce jour, on n'a pas trouvé d'explication entièrement satisfaisante à ce manque de symétrie. Un des buts des recherches que l'on poursuit activement au CERN est justement de comprendre pourquoi la symétrie particules/antiparticules n'est pas absolument parfaite, ce qui éviterait de devoir admettre que notre Univers doit son existence à une comptabilité mal tenue !

Revenons à la suite de son histoire. Les quarks se sont associés entre eux pour former des protons et des neutrons, particules qui à leur tour se sont progressivement associées aux électrons et ont formé de vastes quantités d'atomes d'hydrogène et de quelques autres gaz. Ces gaz se sont alors accumulés progressivement

dans certaines régions en immenses nuages. Ceux-ci se sont peu à peu effondrés, écrasés sous leur propre poids, ce qui les a chauffés à des températures de plus en plus élevées jusqu'à ce qu'elles soient suffisantes pour que l'hydrogène fusionne avec lui-même en dégageant une chaleur intense et se transforme en hélium : les premières étoiles s'allumèrent.

Au cœur de ces étoiles se produisirent de violentes réactions et d'intenses transmutations qui aboutirent après quelques millions d'années à les rendre instables au point qu'elles explosèrent les unes après les autres. Leurs résidus furent repris lors de la formation de nouvelles étoiles qui, à leur tour, explosèrent aussi. Le résultat final de ces cataclysmes fut la formation d'atomes de carbone, d'oxygène, d'azote, etc. qui en fin de compte se sont trouvés (mais il a fallu le temps ! ) mêlés à la grande aventure de la vie. Telle est l'origine des atomes qui nous constituent ; personne ne sait de combien d'étoiles différentes ils proviennent. . .

La Physique des particules permet de remonter le cours du temps et d'étudier de quoi était fait le monde avant même la formation des protons et des électrons ; elle est déjà parvenue à remonter jusqu'à un millième de milliardième de seconde après le Big Bang. Comme on a pu le constater, le langage courant ne peut rendre compte de ce qui se passait alors : seul le langage mathématique convient pour tenter d'en parler.

Les mathématiques sont, en effet, étrangement efficaces pour élaborer les modèles subtils qui décrivent les situations extraordinaires où l'énergie devient matière, qu'il s'agisse de l'origine du monde ou de ce qui s'y passe à l'échelle de l'infiniment petit, comme la folle animation du vide autour des quarks dans les protons. De leur côté, les expériences de la Physique des particules apportent à cette élaboration une contribution décisive, testant en laboratoire les hypothèses des théoriciens et leur en suggérant de nouvelles.

Le risque, malgré tout, demeure de confondre les représentations mathématiques de la réalité - qui deviennent de plus en plus abstraites - avec la réalité elle-même qui, en dépit de nos efforts et de nos découvertes, reste plus que jamais mystérieuse.

## 10 Racines

.....

Galileo Galilei (1564-1642)

Otto von Guericke (1602-1686)

Charles Coulomb (1736-1806)

Hans C.Oersted (1777- 1851)

Kamerlingh Onnes (1853-1926)

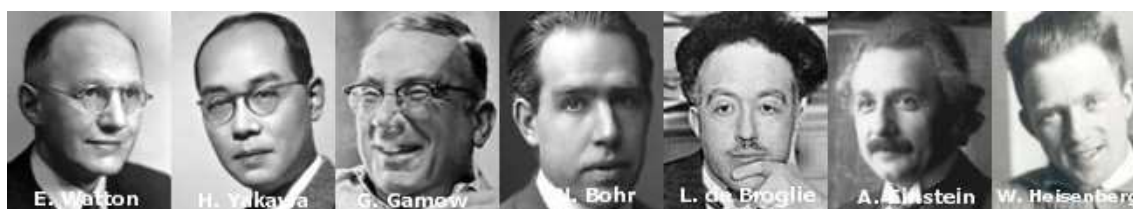
CT. R. Wilson (1869-1959)

Les racines de la Physique des particules plongent dans la nuit des temps. Innombrables sont les expérimentateurs et les théoriciens dont les travaux, directement ou indirectement, ont permis d'étudier aujourd'hui la transformation de l'énergie en matière. En donnant ci-dessous quelques dates et quelques noms de la période 1864-1964, celle des "racines proches", c'est à tous les chercheurs de tous les temps, connus, inconnus ou oubliés qu'en pensée nous rendons justice.





- 1864 : Synthèse électricité - magnétisme (J.C. Maxwell)
- 1879 : Décharges électriques dans les gaz (Sir William Crookes)
- 1887 : Identification de l'électron (J.J. Thomson)
- 1911 : Découvertes des rayons cosmiques (V.F. Hess)
- 1911 : Découverte du noyau (E. Rutherford)
- 1927 : Idée de l'explosion initiale de l'Univers (G. Lemaître)
- 1928 : Prédiction théorique de l'existence de l'antiélectron et de la richesse du vide (P. Dirac)
- 1929 : Premières preuves de l'expansion de l'Univers (E. Hubble)
- 1930 : Premier accélérateur circulaire, le cyclotron (E. Lawrence et S. Livingstone)
- 1930 : Prédiction théorique de l'existence du neutrino (W. Pauli)
- 1932 : Découverte du neutron (J. Chadwick)
- 1932 : Premier accélérateur à proton (J. Cockcroft et E. Walton)
- 1932 : Preuve expérimentale de l'existence de l'antiélectron (C. Anderson)
- 1935 : Prédiction théorique de l'existence de particules Pi (H. Yukawa)
- 1947 : Preuve de l'existence de particules Pi (C.F. Powell et G. Occhialini)
- 1953 : Preuve de l'existence du neutrino (F. Reines et C.L. Cowan)
- 1954 : Premiers accélérateurs capables de créer diverses particules (E. McMillan et V. Van Neumann)
- 1964 : Première théorie du Big Bang basée sur des faits précis (G. Gamow)
- 1964 : Prédiction théorique de l'existence des quarks (M. Gell-Mann et G. Zweig)



Saluons aussi les découvreurs de lois qui régissent l'infiniment petit (les particules ne sont pas des objets, le vide n'est pas vide, etc.) :

- Max Planck (1858-1947),
- Max Born (1882-1970),
- Niels Bohr (1885-1962),
- Erwin Schrödinger (1887-1961),
- Louis de Broglie (1892-1987),

- Albert Einstein (1879-1955),
- Wolfgang Pauli (1900-1958),
- Werner Heisenberg (1901-1976),
- Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984).

## 11 Comment tout cela a-t-il commencé ?

La Physique des particules a débuté avec le XX<sup>e</sup> siècle par une observation "sans grand intérêt" : alors que, selon les lois de la physique, l'air devait être un isolant électrique parfait, toutes les mesures montraient qu'il conduisait légèrement l'électricité.

Ce phénomène était d'autant plus étrange qu'il était plus marqué au sommet des montagnes qu'au bord de la mer !

Peu à peu les physiciens durent se rendre à l'évidence et accepter une explication insolite, proposée pour la première fois en 1900, mais qui mit près de 30 ans pour être unanimement admise : si l'air devenait de plus en plus conducteur en altitude, c'était parce qu'il était frappé par des rayons mystérieux en provenance de l'espace extraterrestre.

On nomma ces rayons "rayons cosmiques". Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit presque toujours de protons dotés d'une très grande énergie, éjectés par certaines étoiles quand elles explosent. En entrant en collision avec l'air, ils "condensent" une partie de leur énergie en matière c'est-à-dire en particules. Celles-ci à leur tour font la même chose ou se désintègrent. Finalement, c'est une véritable avalanche de particules qui est créée. Mais l'atmosphère arrête les plus faibles ; c'est pourquoi au niveau de la mer elles sont moins nombreuses qu'à quelques milliers de mètres d'altitude. Dans leur traversée de l'atmosphère, elles arrachent quelques électrons aux atomes près desquels elles passent. Ce sont ces électrons, un instant libérés, qui rendent l'air un peu conducteur.

(Rappelons que le courant électrique est un courant d'électrons.) Un accélérateur de particules peut être considéré comme une source artificielle de rayons cosmiques. Son avantage sur les sources naturelles est d'en fournir de grandes quantités, de façon régulière et à l'endroit même où les physiciens se sont massivement équipés pour les étudier, tandis que le cosmos ne nous les octroie que parcimonieusement et irrégulièrement.

Cependant, l'étude des rayons cosmiques continue, car ils sont dotés parfois d'une énergie très supérieure à celle qui est accessible à nos accélérateurs. Ils nous permettent alors d'entrevoir des phénomènes que sans eux nous ignorerions.

## 12 Existe-t-il un lien entre la physique des particules et l'énergie nucléaire ?

Le terme "nucléaire" vient du latin nucleus (diminutif de nux, la noix) qui désigne le noyau, la partie dure d'un fruit. Depuis 1919, il est employé à propos du noyau de l'atome. Dès le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, on a pris l'habitude d'associer le mot "nucléaire" aux techniques qui permettent d'obtenir de l'énergie à partir de la fission des noyaux des atomes d'uranium ou de plutonium. Les termes de "centrale nucléaire" ou de "déchets nucléaires" sont devenus familiers.

Mais les enjeux énormes qui sont liés à la production d'énergie nucléaire et les problèmes majeurs que son usage soulève ne doivent pas faire oublier que la physique dite nucléaire, celle qui étudie le noyau des atomes, ne s'occupe pas que des noyaux d'uranium ou de plutonium ! Par exemple, elle étudie aussi la radioactivité, découverte en 1886, et ses applications comme la datation par le carbone 14, la scintigraphie, la radiothérapie, la formation des atomes peu après le Big Bang, les réactions qui transmutent les noyaux dans les étoiles, l'origine de l'énergie du soleil, la possibilité de transformer les déchets nucléaires à longue vie en d'autres à vie plus courte, etc.

Les techniques en usage dans les laboratoires de physique nucléaire, comme le célèbre compteur Geiger-Müller, ancêtre de nos détecteurs géants, ont été longtemps utilisées par les physiciens qui étudiaient les rayons cosmiques. En associant ces outils à ceux de leur propre invention, les premiers physiciens des particules mirent en évidence des phénomènes étranges, difficilement explicables, dans les effets des rayons cosmiques. Pour tenter d'y voir un peu plus clair, ils recoururent souvent à l'acquis théorique de la Physique nucléaire qui était devenue entre temps une science déjà bien constituée. Voilà pourquoi au départ et pendant quelques décennies, Physique des particules et Physique nucléaire ont fait par nécessité un bout de route ensemble.

En 1952, les physiciens des particules fondèrent le CERN, afin de disposer, grâce à un accélérateur énorme pour l'époque (180 m de diamètre), de protons rapides que la Nature ne leur prodiguait qu'en très petites quantités sous forme de "rayons cosmiques". Comment appeler ce centre de recherches sinon "nucléaire" ?

Aurait-il fallu l'appeler "cosmique" ? A l'époque, le choix des termes était très limité. Voilà l'origine du N ("Nucléaire") de CERN, lettre qui, on le comprend, a donné lieu à bien des légendes et à bien des malentendus.

Revenons à la question de départ : existe-t-il un lien entre la Physique des particules et l'énergie nucléaire ? Voici une réponse simple que certains trouveront peut-être trop simpliste malgré la vérité qu'elle exprime : une centrale nucléaire produit beaucoup d'énergie à partir d'un peu de matière, un laboratoire pour la Physique des particules produit très peu de matière à partir de beaucoup d'énergie.

Ce n'est vraiment pas la même chose !

## 13 Pourquoi les accélérateurs sont-ils si grands ?

Une des raisons pour lesquelles les accélérateurs ont des dimensions qui se mesurent en kilomètres est que la force magnétique maximale des aimants qui maintiennent les particules accélérées sur leur orbite est limitée.

Or, plus le cercle qu'on fait suivre aux particules à accélérer est petit, plus il faut de force pour courber leur trajectoire, c'est-à-dire pour les "souffler- vers l'intérieur.

Si l'on veut accélérer des particules jusqu'à de très hautes énergies, on est donc obligé de recourir à de grands cercles, un peu comme on agrandit la courbe des virages d'une route si l'on veut que les voitures roulant à 120 km/h ne soient pas déportées vers l'extérieur.

## 14 Pourquoi les détecteurs sont-ils si énormes ?

Plus un champ enneigé est grand, plus il permet des déductions précises sur le comportement des animaux qui viennent de le traverser et d'y laisser leurs traces. Il en est de même avec les détecteurs : plus ceux-ci sont gros, plus ils ont de chances d'enregistrer les traces de tout ce qui est arrivé aux particules qui y sont nées et qui les ont traversés. Et donc de reconstituer avec précision ce qu'elles ont fait.

Même les neutrinos, ces particules qui n'y font généralement rien, ne passent pas inaperçus. Ils sont mis en évidence par une analyse fine des bilans ; un peu comme d'éventuelles sommes détournées dans une entreprise sont découvertes grâce à une comptabilité bien tenue.

## 15 Ces recherches ont-elles des retombées pratiques ?

Les applications pratiques nées de la recherche en Physique des particules proviennent presque exclusivement des techniques originales dont elle se sert et qui concernent de nombreux domaines. En voici quelques exemples :

- les champs magnétiques intenses et de haute précision ;
- l'usage à grande échelle de très basses températures (cryogénie), par exemple pour les 5000 aimants puissants de l'accélérateur LHC, ultrafroids ("supraconducteurs") et donc très économes en énergie ;
- l'électronique ultrarapide ;
- le traitement simultané d'un nombre gigantesque d'informations.

L'industrie se sert ou se servira de ces techniques, ainsi que d'une multitude de procédés développés parallèlement pour résoudre des problèmes pratiques bien différents de ceux pour lesquels les physiciens et les ingénieurs des laboratoires de Physique des particules les ont inventés.

En ce qui concerne, par exemple, les applications médicales citons les radiographies avec très peu d'irradiation du patient ou de nouvelles techniques pour étudier le fonctionnement du cerveau. Notons aussi que le World Wide Web est né au CERN où il a été créé pour permettre une communication rapide entre scientifiques du monde entier. La liste complète des applications pratiques nées "par ricochet" des recherches en Physique des particules serait longue et n'a probablement jamais été faite...

Remarque :

Pour les grandes expériences en Physique des particules et particulièrement pour celles faites au CERN, une vaste collaboration internationale est de rigueur. Impliquant l'élite scientifique et technique de nombreux pays. Celles-ci n'ont pas manqué d'avoir des retombées économiques et politiques qui sont loin d'être négligeables. Cela continuera d'être d'actualité, car à l'avenir les grandes expériences seront réalisées avec du matériel, des équipes et un financement en provenance du monde entier.

## 16 Combien de particules différentes existe-t-il ?

On a identifié quelques centaines de particules. Les physiciens leur ont donné des noms assez fantaisistes, tirés souvent des lettres des alphabets grec et latin ou

inventés de toutes pièces, par exemple : Ksi ( $\Xi$ ), Lambda ( $\Lambda$ ), Omega ( $\Omega$ ), Sigma ( $\Sigma$ ), Delta ( $\Delta$ ), méson pi ( $\pi$ ), méson rho ( $\rho$ ), quark u, quark d, muon ( $\mu$ ), neutrino ( $\nu$ ),  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$ , boson de Higgs (qui vient d'être découvert expérimentalement (son existence serait la clé de voûte de la théorie actuelle des particules)).

Rappelons qu'à chaque particule correspond une particule symétrique ou plutôt sa particule symétrique (antiélectron, antiproton, antineutrino, antiksi, etc. (voir leçon 9). Ces antiparticules sont donc implicitement contenues dans la classification ci-dessous (qui d'ailleurs n'est pas la seule possible, bien qu'elle soit probablement la plus simple) :

### **Classe I - Les particules simples "légères" : les leptons**

Les électrons, muons et neutrinos, ainsi que quelques particules qui leur ressemblent.

### **Classe II - Les particules simples "lourdes" : les quarks**

Il y en a six différents. Ils sont désignés par les lettres u, d, c, s, t, b. Ils sont toujours associés entre eux (voir Classe III). Aucun quark isolé n'a été détecté, car l'énergie qu'il faut fournir à un quark pour le libérer de son ou de ses congénères est telle qu'elle se condense en un nouveau quark ; celui-ci se lie alors immédiatement avec le quark que nous voulions obtenir seul !

### **Classe III - Les particules composées de 2 ou 3 quarks (combinés éventuellement avec des antiquarks) : les hadrons**

Exemple : Le proton est composé de deux quarks u et d'un quark d et le neutron de deux quarks d et d'un quark u.

### **Classe IV - Les particules messagères, appelées "bosons"**

Ce sont les particules les plus immatérielles de toutes, mais elles jouent un rôle capital : elles servent de moyen de communication entre les particules des catégories précédentes. Messagères évanescentes, apparaissant et disparaissant continuellement, elles peuplent le vide autour des autres particules qui manifestent ainsi leur présence et s'influencent les unes les autres.

Exemples :

- Les photons qui transmettent la présence et l'influence des particules chargées électriquement (et que nos yeux détectent quand leur énergie est très faible. Ils constituent alors ce que nous appelons "lumière" !)
- Les gluons émis par les quarks : c'est grâce aux gluons que les quarks se reconnaissent à l'intérieur du proton et du neutron. Les gluons ont aussi pour effet de maintenir les quarks dans le proton. Ils jouent un peu le rôle de colle, d'où leur nom.

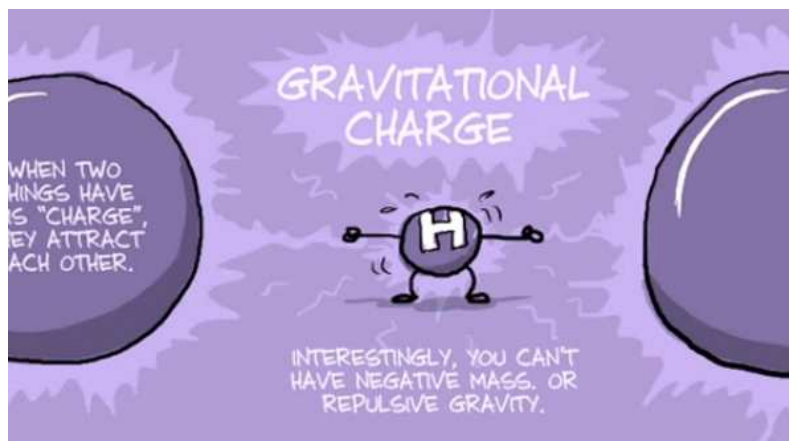
Il n'est pas possible d'illustrer simplement et sans risques de malentendus cette action à distance transmise par les particules messagères. On peut éventuellement trouver quelques métaphores lointaines inspirées par des situations à notre échelle, comme par exemple les insultes ou les compliments qui éloignent ou rapprochent ceux qui les émettent et ceux qui les reçoivent... Mais il est plus raisonnable de reconnaître que la façon dont les bosons transmettent l'influence des

particules les unes sur les autres n'a pas d'équivalent dans notre expérience quotidienne et qu'elle fait partie des propriétés étranges du monde infinitésimal dont il faut accepter l'impossible représentation.

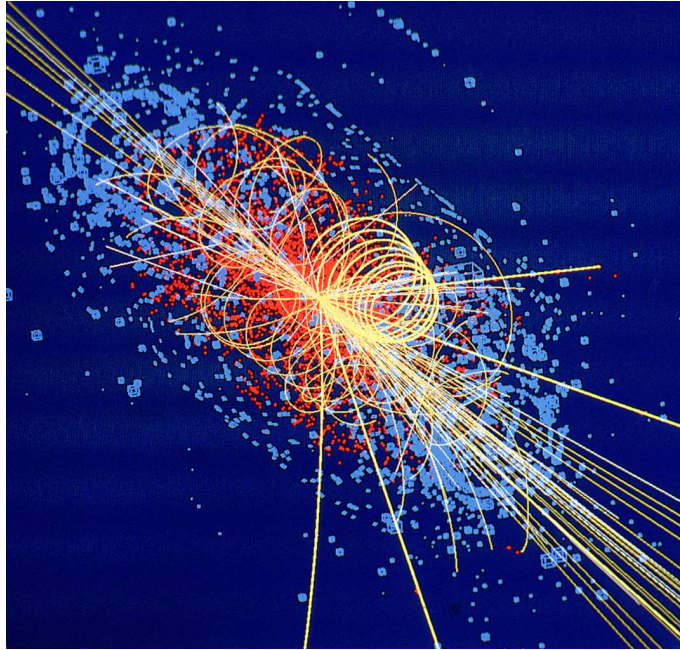
### Le boson manquant

Dans les années 1970, les physiciens constataient que deux des quatre forces fondamentales, la force faible et la force électromagnétique, sont de même nature. Cette avancée majeure pour la physique des particules a permis l'unification des deux forces dans la même théorie, qui constitue la base du modèle standard. Ainsi, l'électricité, le magnétisme, la lumière ainsi que certains types de radioactivité sont toutes des manifestations d'une seule et même force appelée, logiquement, force électrofaible. Cependant, pour que cette unification soit vérifiée mathématiquement, il faut partir du principe que les particules porteuses de force n'ont pas de masse. Or, nous savons que cela n'est pas le cas ; les physiciens Peter Higgs, Robert Brout et François Englert ont proposé une solution à cette énigme.

Leur théorie est que, juste après le Big Bang, aucune particule n'avait de masse. Lorsque l'Univers a refroidi et que la température est tombée en-dessous d'un seuil critique, un champ de force invisible appelé "champ de Higgs" s'est formé en même temps que le boson de Higgs, particule qui lui est associée. L'interaction avec ce champ répandu partout dans le cosmos permet aux particules d'acquiescer une masse par l'intermédiaire du boson de Higgs. Plus les particules interagissent avec le champ de Higgs, plus elles deviennent lourdes. Au contraire, les particules qui n'interagissent pas avec ce champ ne possèdent aucune masse.



Cette idée constituait une solution satisfaisante et était en adéquation avec les théories et les phénomènes établis. Le problème est que personne n'a jamais observé le boson de Higgs lors d'une expérience pour confirmer cette théorie. Trouver cette particule permettrait d'une part de mieux comprendre pourquoi les particules ont la masse qui leur est propre et, d'autre part, de contribuer au développement de la physique. Néanmoins, il y a un problème technique : nous ne connaissons pas la masse du boson de Higgs lui-même, ce qui rend son identification plus difficile. Les physiciens doivent donc procéder systématiquement en le cherchant dans la gamme de masses dans laquelle il est censé se trouver. C'est cette gamme qu'explore le Grand collisionneur de hadrons, dont le rôle est de déterminer l'existence du boson de Higgs. Mais si ce boson s'avère introuvable, les physiciens auront le champ libre pour élaborer une théorie complètement nouvelle afin d'expliquer l'origine de la masse des particules.



Simulation de la désintégration d'un boson de Higgs au Cern. Les traces dénotent les particules qui ont été produites lors de la collision d'une paire de protons d'ultra-haute énergie. Les énergies déposées par les particules dans le détecteur sont montrées en bleu. Si la découverte de la particule est confirmée, les différentes équipes auront toutefois encore besoin d'un peu de temps pour confirmer qu'il s'agit bien du fameux boson.

### Mercredi 4 juillet 2012

Les physiciens du CERN ont annoncé avoir mis la main avec une quasi-certitude sur le boson de Higgs lors d'une grande conférence, mercredi 4 juillet à Genève. *Cette fois, il s'agit bien du fameux boson de Higgs. Les physiciens travaillant à Genève dans le grand collisionneur de hadrons, le LHC, ont annoncé mercredi 4 juillet la découverte d'une nouvelle particule, "du boson le plus lourd jamais observé, autour de 125-126 gigaélectronvolts", dont les caractéristiques sont compatibles avec le boson de Higgs.*

## 17 Qu'entend-on exactement par la dimension d'une particule ?

La dimension d'un objet peut être caractérisée par l'espace qu'il occupe

A l'échelle humaine, cette définition ne pose pas de problème. Mais qu'est-ce que l'espace occupé par une particule, objet qui n'est pas vraiment un objet ?

Imaginons, dans un couloir assez étroit, des personnes courant dans les deux sens. Plus elles sont corpulentes, plus elles ont de chances de provoquer une collision. La fréquence des "accidents" donnera une idée des dimensions des personnes impliquées. Mais voici que deux amis se croisent ; la probabilité qu'ils s'arrêtent (ce qui "vu d'avion" équivaut à une collision) est grande - mais ce n'est pas une raison pour affirmer que subitement ils ont grossi ! C'est une erreur de ce genre qui a fait dire parfois que, lors de collisions frontales entre protons, plus leur énergie était élevée, plus ils grossissaient. Il aurait fallu dire que c'était la probabilité de leur interaction qui augmentait avec leur énergie et non leurs dimensions. Mais comme, pour les calculs des physiciens, cela revenait au même,

ils ne donnaient pas grande importance aux mots utilisés, sachant que de toute façon le vocabulaire habituel est impropre à décrire ce dont ils parlent...

On entrevoit dans l'exemple ci-dessus que la notion de dimension elle-même puisse perdre sa signification absolue, car, dans le monde infinitésimal, le seul moyen pour déterminer les dimensions est de produire des collisions avec d'autres particules et d'en faire des statistiques. Elle peut être, provisoirement, remplacée par la notion relative de "dimension d'une zone où, dans des circonstances données, l'influence de la particule est très forte". C'est dans cet esprit que nous avons osé comparer la dimension de l'électron et celle de la fraise géante et proposer le calcul de la page 24.

Mais cette comparaison et ce calcul, bien que valables quant aux conclusions que nous en avons tirées, doivent être pris avec une certaine prudence, car tant le volume d'un électron que le volume qu'occupe l'énergie qu'on lui a conférée ne dépendent pas seulement de considérations géométriques.

En descendant vers l'infiniment petit, c'est à l'idée même que les particules ont une dimension bien définie qu'il faut renoncer... Encore un attribut de l'objet qui ne s'applique pas aux particules, encore un deuil à faire...

### 17.1 Les particules ont-elles une température ?

La température est un chiffre qui exprime le degré de l'agitation des atomes et des molécules. Il indique leur énergie de "grouillement". L'énergie de nos particules n'est pas due à l'agitation. Une particule seule ne peut pas "grouiller"! C'est pourquoi, strictement parlant, la notion de température ne s'applique pas à elle. Cependant, en interprétant l'énergie de nos particules comme si elle provenait de leur agitation, nous pouvons leur attribuer une "température équivalente".

Ces températures sont incroyablement élevées. Pour donner une idée, essayons de nous représenter celle des électrons du LEP en fin d'accélération. Imaginons un thermomètre de forme classique dont la colonne de mercure monterait de 1 millimètre à chaque augmentation de température de 3000 degrés. Et bien, pour être capable d'indiquer la température de nos électrons, un tel thermomètre devrait être long, très long : aussi long que la distance de la Terre... à la Lune !

Ces températures sont celles de l'Univers un dix milliardième de seconde après le "Big Bang". Un laboratoire de Physique des particules est donc à même de vérifier expérimentalement les hypothèses des théoriciens sur l'état et l'évolution de l'Univers juste après sa naissance.

## 18 Comment peut-il exister des objets colorés alors qu'ils sont faits de particules qui ne sont pas colorées

**"Le tout peut être différent de la somme des parties" ARISTOTE(384-322 av.J.C)**

Un être vivant est fait de molécules dont aucune n'est vivante, une voiture qui roule à toute vitesse est constituée de pièces dont chacune est incapable de se déplacer par elle-même, ce texte qui a - ou souhaiterait avoir - un sens est fait de lettres qui n'en ont pas et qui sont elles-mêmes faites en encre d'imprimerie totalement "illettrée"

**Un fil incolore peut changer la couleur d'un banc (le poisson.**



Imaginons que la couleur des poissons dépende de leur taille : les petits poissons seraient, par exemple bleus et les gros rouges. Avec notre fil confectionnons un filet aux mailles suffisamment larges pour laisser passer les poissons bleus tout en retenant les poissons rouges. Quand un banc de poissons bicolore aura traversé notre filet, il sera uniquement bleu, les poissons rouges ayant été "absorbés" par le filet.

### **Il en va de même avec la lumière.**

Les particules stables (protons, neutrons et électrons) forment des structures - les atomes - qui souvent, à leur tour, s'assemblent en arrangements plus complexes : les molécules.

Une fois réunis, ces atomes et ces molécules se comportent un peu comme notre filet, c'est-à-dire constituent un filtre qui laisse passer certains "grains" de lumière (photons) et pas d'autres. Le résultat sera que la lumière blanche qui contient des photons de toutes les couleurs, en frappant ou en traversant ces assemblages, perdra certains photons qui seront absorbés et prendra une teinte correspondant au mélange des couleurs des photons rescapés.

Deux siècles après Aristote, Lucrèce (98-55 av.J.C.) disait : *"On peut rire sans être formé de particules rieuses, on peut penser et disserter sans graines de philosophie et d'éloquence. Alors pourquoi les êtres capables de sensibilité ne pourraient-ils pas être composés de graines parfaitement insensibles ?"*

Si ce même Lucrèce avait pu pousser plus loin la notion d'atome, dont il était par ailleurs un défenseur, il aurait peut-être ajouté : *"... et pourquoi un objet coloré ne pourrait-il pas être formé de particules incolores ?"*

## **19 Que sont les neutrinos, ces particules qui ne font "rien" et qui nous permettent pourtant de sonder le cœur des étoiles ?**

Vers 1930, l'existence des neutrinos fut proposée pour expliquer la disparition mystérieuse d'une certaine quantité d'énergie lors de réactions qui se produisent dans le noyau de l'atome. L'idée était que l'énergie manquante pouvait être emportée par une particule inconnue, électriquement neutre, le neutrino. On pensait alors que jamais son existence ne serait prouvée, car la propriété principale de ces particules hypothétiques était d'être insaisissables ! Des chercheurs parvinrent cependant en 1956 à en détecter quelques-uns et depuis, leur étude n'a jamais cessé.

Etudier les neutrinos est difficile, car ils sont capables de traverser des épaisseurs énormes de matière (des milliers de fois le diamètre de la Terre !) sans remarquer quoi que ce soit. Ils ne s'assemblent jamais et, bien que stables, ils ne s'associent ni entre eux ni avec d'autres particules et ne participent en rien à la constitution de la matière. Ils traverseront donc allégrement les détecteurs ordinaires sans y faire quoi que ce soit.

Pourtant, bien qu'extrêmement faible, la probabilité qu'un neutrino se signale en passant à travers un détecteur, n'est pas tout à fait nulle. Si l'on parvient à lancer chaque seconde une quantité colossale de neutrinos dans un détecteur énorme conçu spécialement dans ce but, il arrivera de temps en temps que l'un d'entre eux s'y manifeste et déclenche un signal. C'est ce qu'on fait au CERN depuis des

décennies pour tenter de comprendre le comportement étrange de ces particules hors du commun.

Les étoiles (et donc le Soleil) produisent dans leurs régions centrales beaucoup de neutrinos qui s'en échappent en ligne droite sans que rien ne les arrête ou les fasse dévier. D'autres neutrinos errent dans l'Univers depuis le début des temps. Nous nous trouvons ainsi au milieu d'une "pluie" de neutrinos : chaque seconde notre corps est traversé par plus d'un million de milliards d'entre eux, toutes origines confondues !

Regardons un instant l'ongle d'un de nos doigts : plus de 200 milliards de neutrinos le traversent chaque seconde, autant qu'il y a eu d'êtres humains depuis l'apparition de l'Homme, autant qu'il faudrait aligner de grains de sable fin, côte à côte, pour faire le tour de la Terre. . .

Pour étudier ces neutrinos qui nous viennent de l'espace, et du même coup étudier ce qui se passe au coeur des étoiles, d'énormes détecteurs ont été spécialement construits dans d'anciennes mines (Etats-Unis et Japon), dans des tunnels routiers (Italie), plongés dans la mer (Méditerranée), dans un lac profond (Lac Baïkal en Sibérie) et enfouis dans la glace de l'Antarctique. Pourquoi ? Parce que seuls les neutrinos peuvent traverser de si grandes épaisseurs de matière. Les autres particules cosmiques seront arrêtées, ce qui évitera qu'elles déclenchent dans les détecteurs extrêmement sensibles des signaux parasites.

Les neutrinos ne cessent de nous lancer des défis tant du point de vue théorique qu'expérimental. S'il est un domaine de la Physique des particules qui est resté en permanence d'actualité depuis plus d'un demi-siècle, c'est bien celui-ci.

## 20 Où va-t-on

Est-il possible d'envisager qu'un jour la Physique des particules puisse être achevée, qu'on en ait fait le tour aussi bien théoriquement qu'expérimentalement ?

Toutes les lois de la Nature à l'échelle de l'infiniment petit auraient alors été découvertes, toutes les particules identifiées, tous les phénomènes à cette échelle compris et la théorie peut-être réduite à quelques principes fondamentaux universels. A ce sujet les avis sont partagés :

- Il y a ceux qui pensent que ce jour pourrait bien arriver, mais ils ne peuvent prédire si ce sera dans quelques années, quelques décennies ou quelques siècles...
- Il y a ceux qui pensent qu'il y aura toujours quelque chose à découvrir ou à comprendre, qu'il y aura toujours des énigmes et qu'il apparaîtra toujours de nouveaux phénomènes à expliquer si l'on plonge de plus en plus profondément dans l'Univers infinitésimal.
- Il y a ceux qui pensent que nous serons obligés de rester sur notre faim, car ces recherches atteindront bientôt des limites techniques et financières infranchissables, même si elles sont poursuivies en réunissant toutes les ressources à disposition à l'échelle mondiale : ne parle-t-on pas déjà d'expériences impliquant mille physiciens, cent instituts et universités et associant pour les préparer plusieurs milliers d'ingénieurs et de techniciens ?
- Il y a ceux qui pensent que ce sont les limites de l'intelligence humaine elle-même qui fixeront celles de notre compréhension du monde. Ainsi, depuis de

nombreuses années, les théoriciens tentent en vain de faire la synthèse entre la Mécanique Quantique - les lois qui gouvernent l'infiniment petit et la Relativité Générale qui décrit l'influence de la matière sur l'espace et le temps. Cette synthèse, pour l'instant impossible entre deux chapitres de la physique parfaitement cohérents en eux-mêmes, préfigure-t-elle des impasses futures plus définitives ?

Les réponses données aujourd'hui à cette interrogation tiennent plus de la psychologie de celui qui les propose (donc de son hérédité et de son histoire) que de ses compétences, de ses intuitions ou de ses dons prophétiques. Seul l'avenir dira qui a fait le bon pari.

Il est donc prudent d'en rester là et de nous quitter ici, bien que parfois ce soit au moment où les sciences "dures" s'arrêtent, là où leur rigueur et leurs méthodes n'ont plus cours que les questions deviennent vraiment intéressantes...

