

Quand l'énergie devient matière...

*Un coup d'oeil
sur le monde
des particules*



539.12 CAR

Rafel Carreras

Imaginons qu'en cet instant un coup de vent arrache cette page...

... et qu'elle se mette à voler autour du lecteur comme un étrange oiseau de papier : n'essaierait-il pas de trouver une explication à ce curieux phénomène ? Est-ce une illusion ?... D'où vient ce brusque courant d'air ?... Y a-t-il un fil invisible ?... Cette page était-elle truquée ?... Comment l'attraper pour trouver la clé du mystère ?... Cette attitude est exactement celle des scientifiques : essayer d'expliquer ce qui est observé en recourant aux connaissances déjà acquises, quitte parfois à les modifier et les enrichir.

C'est pourquoi ces pages, destinées aux personnes qui n'ont pas de formation scientifique, s'adressent en fait à des scientifiques ; mais des scientifiques d'un genre particulier, car non seulement ils ne savent pas qu'ils sont des scientifiques, mais encore quand on le leur dit, ils ne le croient pas !

C'est à eux que j'ai eu pendant trente ans au CERN le privilège de présenter la science en toute liberté. Cette même liberté m'a encore une fois largement été octroyée pour réaliser cette brochure.

Que ceux qui me l'ont accordée soient ici remerciés.

R.C.

2230917

539.12 CAR

Avant-propos

Ces neuf leçons courtes et simples sont une introduction à un domaine de la recherche scientifique de pointe, la Physique des particules, qui étudie la métamorphose de l'énergie en matière, métamorphose d'où sont nés l'Univers et la matière dont nous sommes faits.

Pour comprendre cet étrange phénomène, il a fallu développer des appareils gigantesques et construire dans des laboratoires occupant plusieurs milliers de personnes, des machines qui sont probablement les plus complexes au monde. Les théories qui tentent d'expliquer les phénomènes mis en évidence dans ces laboratoires sont si abstraites que les physiciens venant d'autres horizons s'y sentent eux-mêmes perdus !

Pourtant nous pensons qu'il est possible de donner de ces recherches une première idée qui soit à la fois correcte et accessible à tous. C'est la raison d'être de cette brochure.

Première Partie

Leçons

Leçon 1	Les collisions du quatrième type	6
Leçon 2	Pourquoi est-ce que ça ne marche pas avec des fraises ?	12
Leçon 3	A la recherche d'objets de plus en plus petits	20
Leçon 4	Comment accélérer des électrons ?	26
Leçon 5	Rendre perceptible l'invisible	32
Leçon 6	Les particules sont presque toutes instables	42
Leçon 7	Les particules ne sont pas des objets	48
Leçon 8	Le vide n'est pas vide	54
Leçon 9	Antiparticules et anti-matière	58

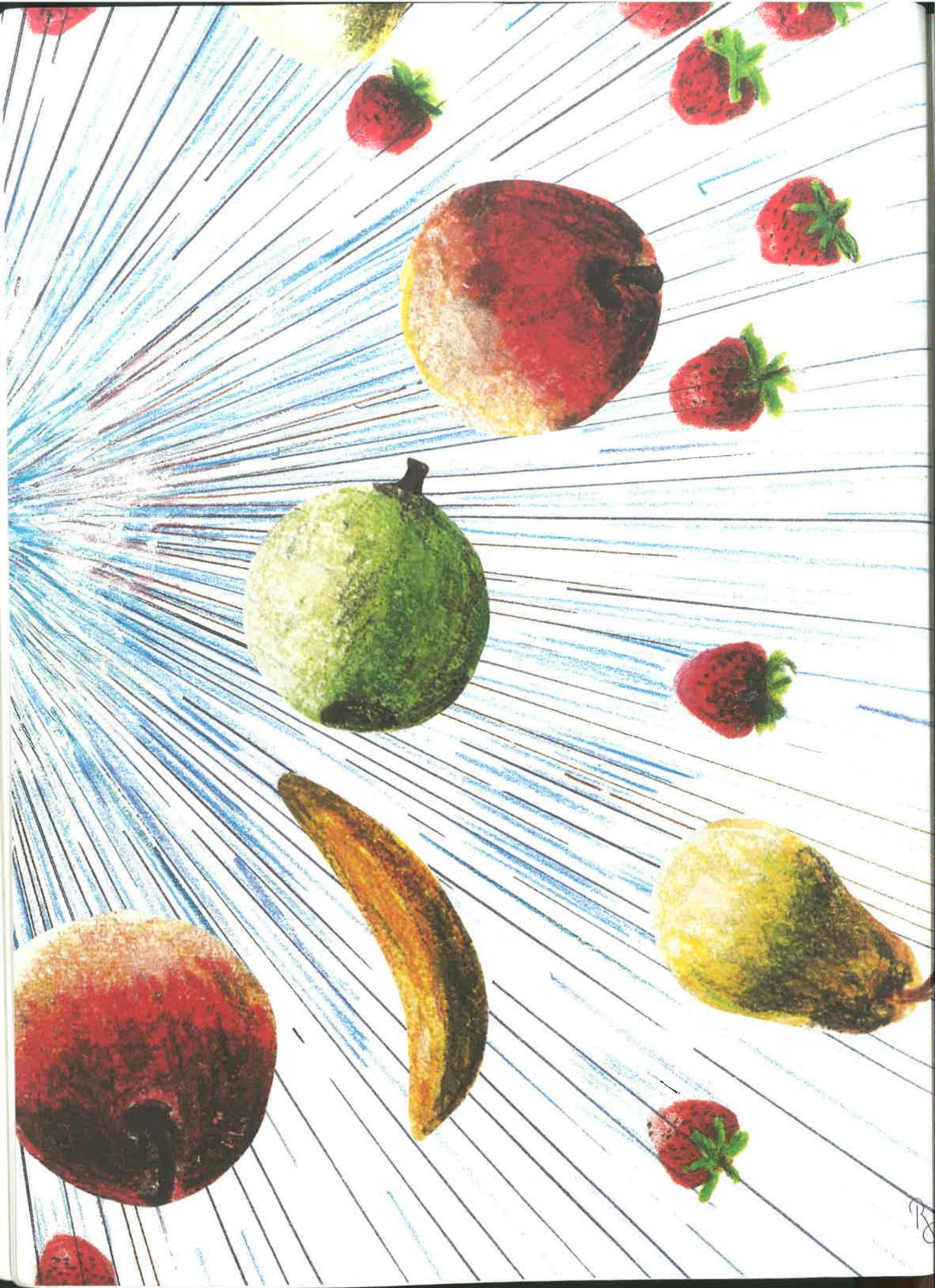
Deuxième Partie

Questions

Racines	68
Existe-t-il un lien entre la Physique des particules et l'énergie nucléaire ?	70
Pourquoi les accélérateurs sont-ils si grands ?	72
Pourquoi les détecteurs sont-ils si énormes ?	73
Ces recherches ont-elles des retombées pratiques ?	74
Combien de particules différentes existe-t-il ?	76
Qu'entend-on exactement par la dimension d'une particule ?	78
Les particules ont-elles une température ?	80
Comment peut-il exister des objets colorés alors qu'ils sont faits de particules qui ne sont pas colorées ?	82
Que sont les neutrinos, ces particules qui ne font "rien" et qui nous permettent pourtant de sonder le coeur des étoiles ?	85
Où va-t-on ?	87

Troisième Partie

Index et commentaires



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.**

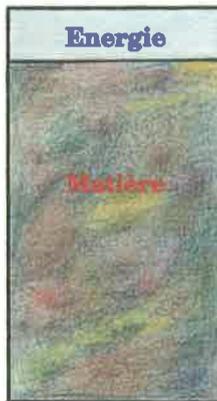
Le résultat des collisions habituelles (par exemple lors d'un choc frontal entre deux véhicules), est une combinaison de ces trois possibilités.

Il y a pourtant une quatrième possibilité qui ne se manifeste que dans des circonstances très spéciales. La couverture de cette brochure en suggère le principe. *Dans ce type de collision, il se crée de la matière aux dépens de l'énergie du choc.*

Pour bien saisir ce qui est évoqué dans cette collision imaginaire de fraises, regardons ce schéma.

Avant :

Il y a un peu de matière (les fraises) et beaucoup d'énergie (l'énergie due à leur vitesse).



Après :

Une partie de cette énergie s'est condensée en matière (les divers fruits), mais il en reste un peu, car les fruits ont tous une certaine vitesse. Si les fruits nés de la collision étaient tous immobiles, on pourrait dire que toute l'énergie des fraises initiales s'est transformée en "matière".

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".

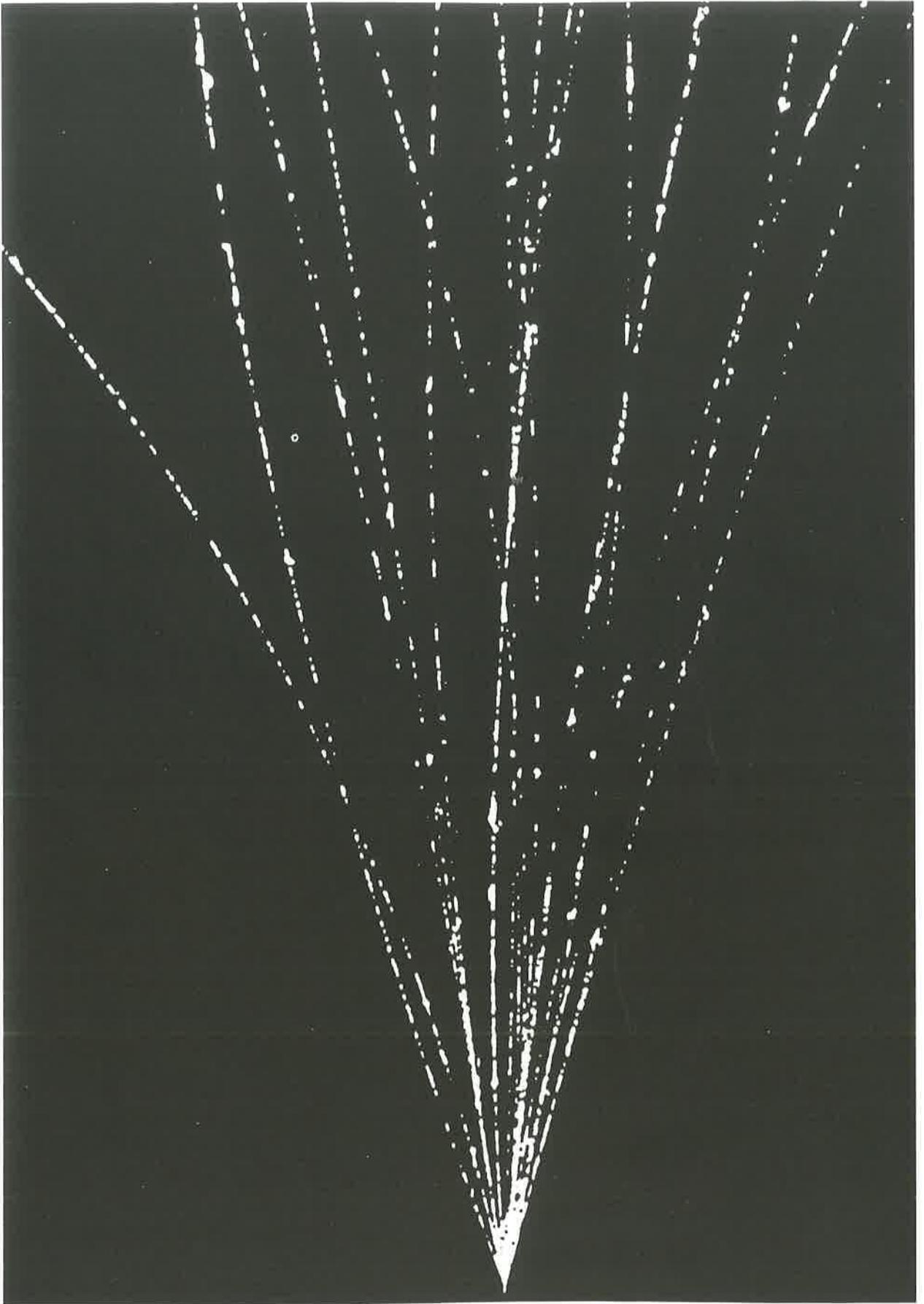
La nature a fait amplement usage, au début de l'Univers, de cette capacité étrange de l'énergie : pouvoir disparaître sous forme de mouvement et réapparaître sous forme de matière. Tout ce qui est matériel en est issu. Pour étudier en laboratoire ce brusque changement d'état, ce ne sont pas des fraises que nous lançons les unes contre les autres, mais des objets beaucoup plus petits. Nous verrons pourquoi à la prochaine leçon.

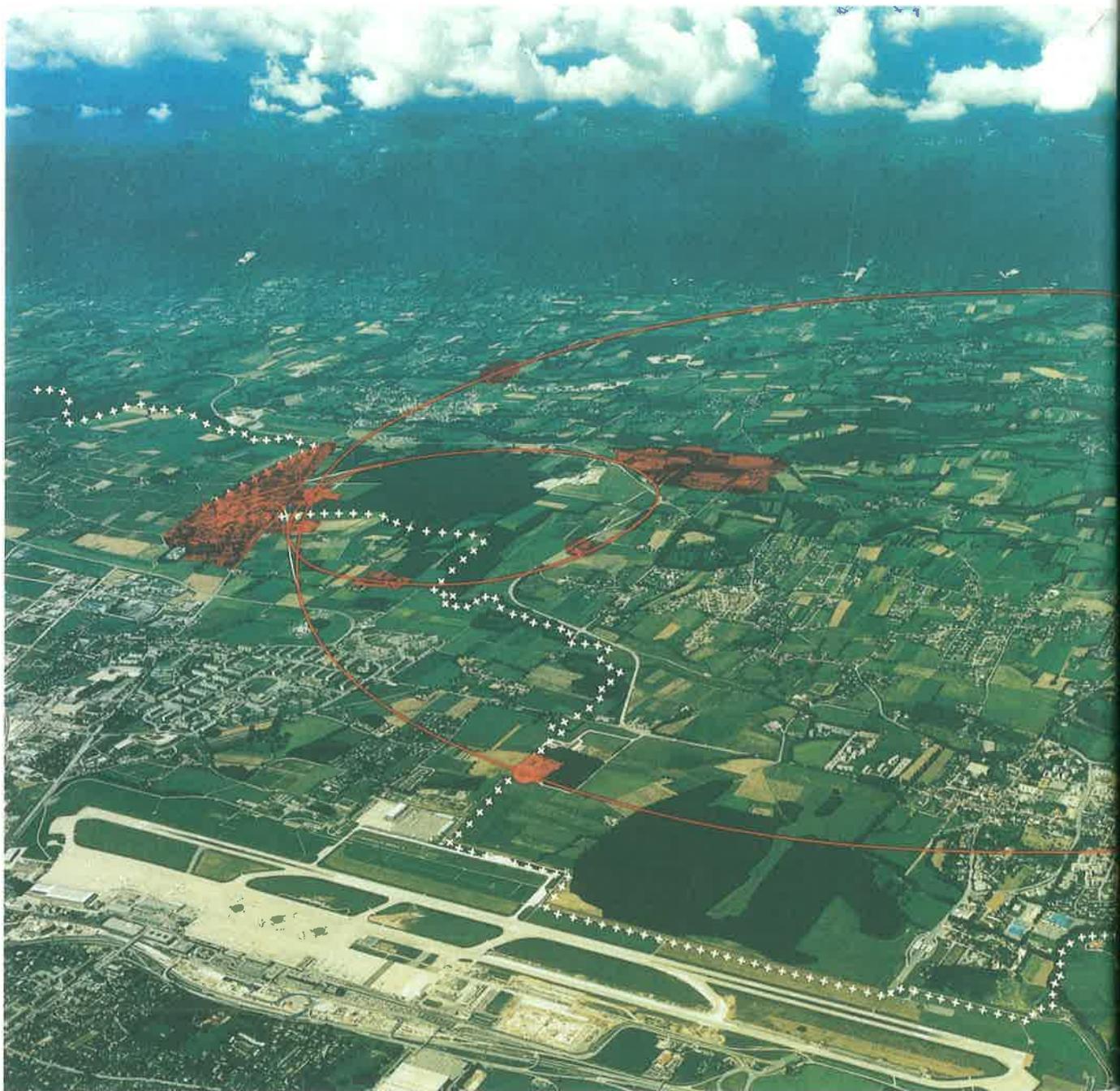
De toute façon, étudier le résultat de ces "collisions du quatrième type" n'est pas facile, car la matière produite dans ces collisions se présente sous la forme de particules plus d'un milliard de fois plus petites que ce que les microscopes habituels permettent de voir ! De plus, ces particules vont à des vitesses folles et beaucoup d'entre elles ne durent que moins d'un millionième de millionième de seconde ! 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 :

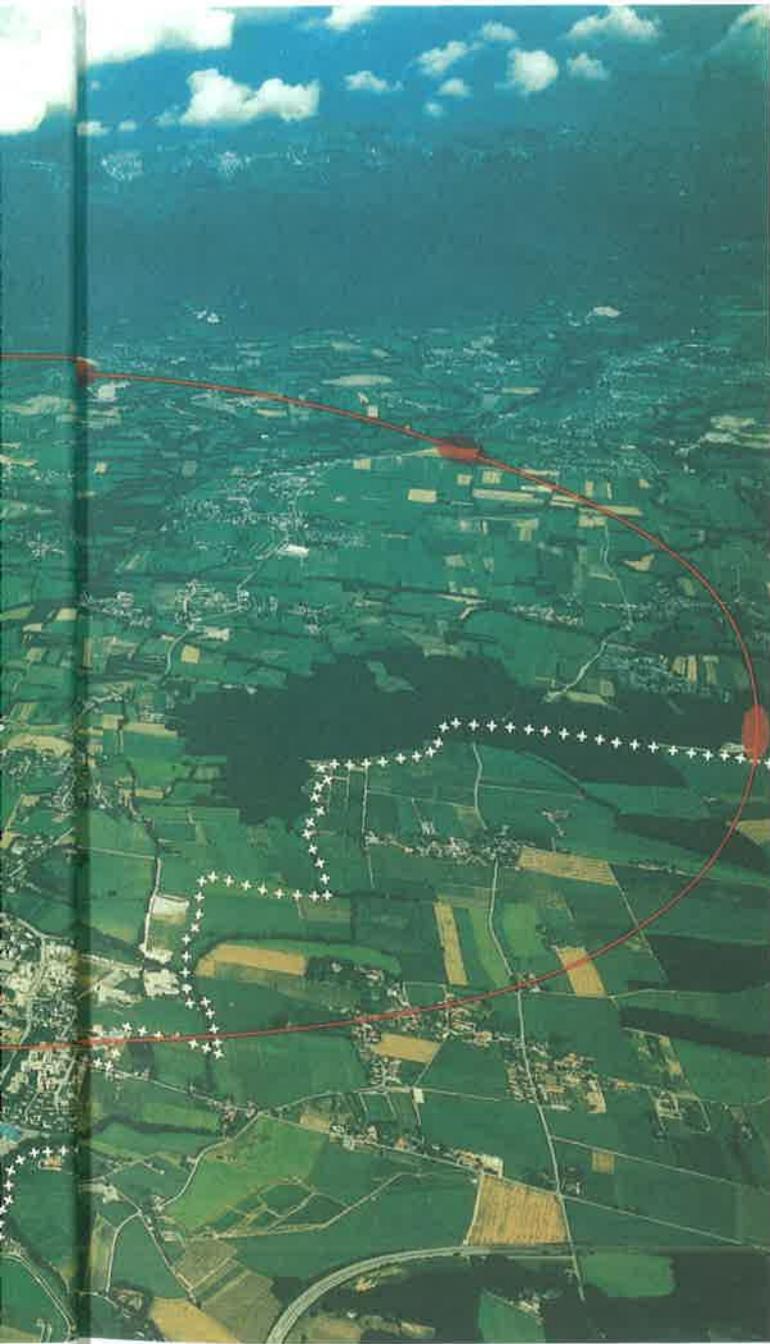
1. **Les accélérateurs** qui donnent à certains "grains de matière" une vitesse extrême, très proche de celle de la lumière, avant de les faire se percuter.
2. **Les détecteurs**, énormes assemblages de matériaux spéciaux et de dispositifs électroniques, qui, traversés par les particules produites dans ces collisions, traduisent sous forme de signaux électriques les effets de leur passage.
3. **Les ordinateurs**, eux, 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.

Création de matière : l'énergie d'une particule venant du bas s'est transformée en quinze autres particules dont on voit les traces. Cette photo a été prise dans un détecteur nommé CHAMBRE A BULLES. Les trajectoires des particules traversant le liquide sont visibles sous forme de fins chapelets de bulles minuscules.





*Vue générale des installations du CERN.
La frontière franco-suisse est marquée par des croix blanches.
Au premier plan l'aéroport de Genève. En rouge, les deux accélérateurs
souterrains (les deux grands cercles), les puits d'accès aux grands
détecteurs et à leur réseau de tunnels, les zones d'expériences et à gauche
divers bâtiments du Laboratoire groupés dans un secteur
de 2 kilomètres de long.*

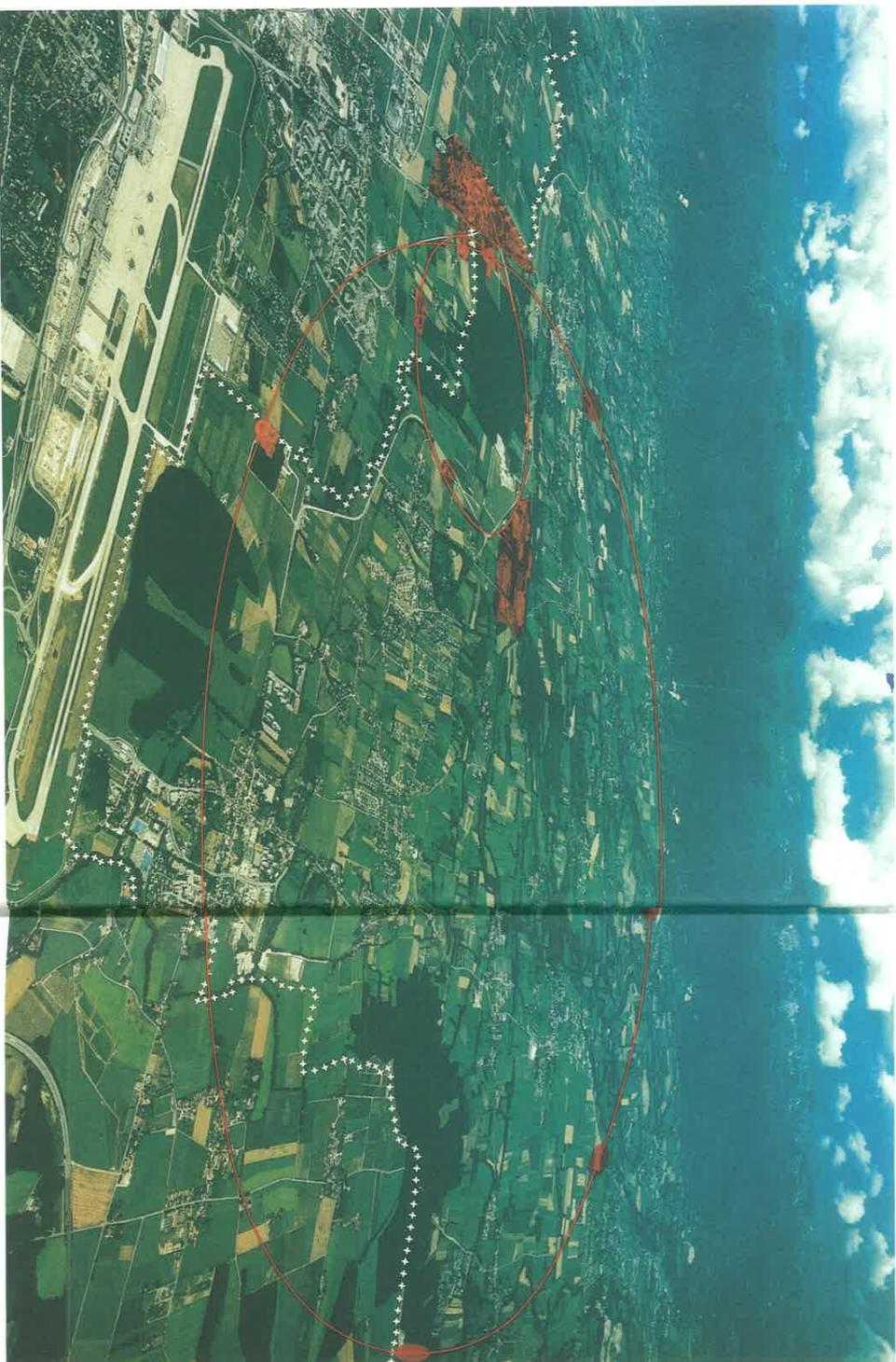


1

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.

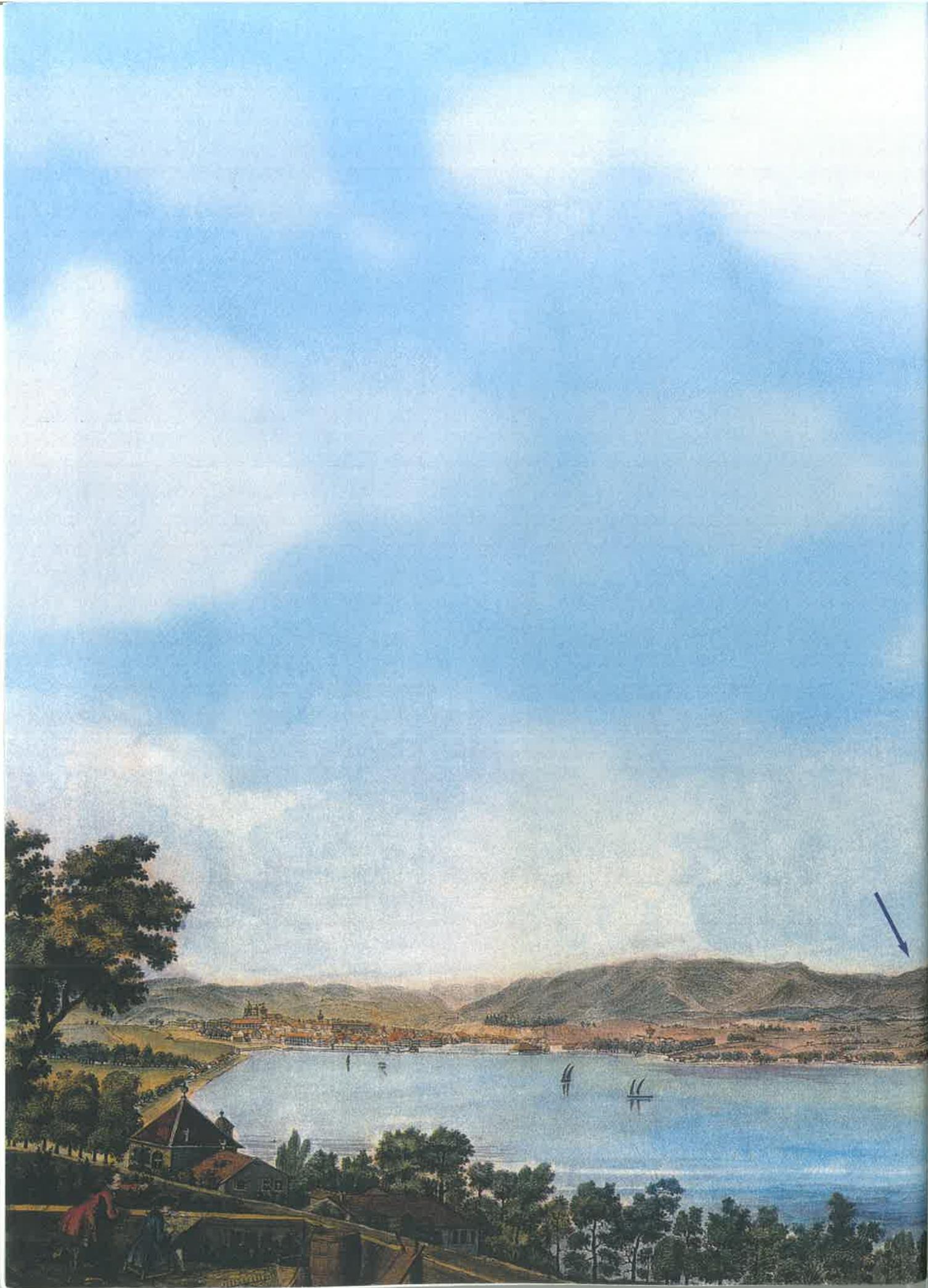


*Vue générale des installations du CERN.
La frontière franco-suisse est marquée par des croix blanches.
Au premier plan l'aéroport de Genève. En rouge, les deux accélérateurs souterrains (les deux grands cercles), les puits d'accès aux grands détecteurs et à leur réseau de tunnels, les zones d'expériences et à gauche divers bâtiments du Laboratoire groupés dans un secteur de 2 kilomètres de long.*

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.

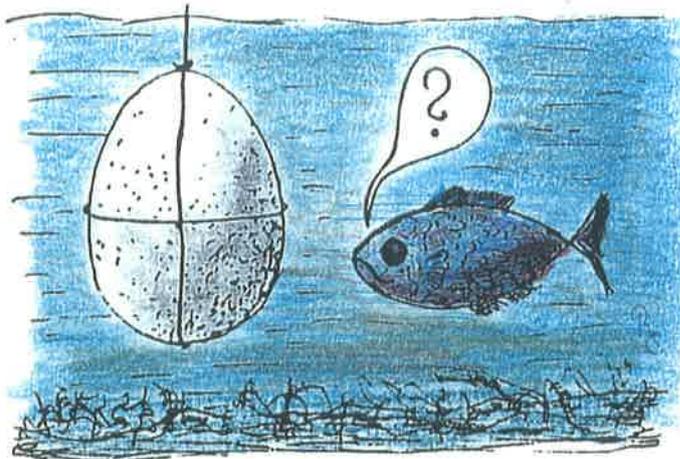
Le CERN est une véritable ville-laboratoire. Près de 7000 personnes venant de 80 pays y travaillent en liaison avec plus de 500 instituts de recherche répartis sur les cinq continents. Son principal accélérateur fait 27 kilomètres de circonférence et certains de ses détecteurs pèsent plus de 7000 tonnes. 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'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.



Pourquoi est-ce que ça ne marche pas avec des fraises ?

1. On ne peut pas faire cuire un oeuf 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 oeuf 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'oeuf qu'on y placera cuira (ou sera même brûlé !), tandis que rien ne se passera dans l'eau du lac.



La flèche en bas à droite indique la région au pied du Jura où se trouve le CERN aujourd'hui.

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 francs 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 (francs par gramme) et non la valeur elle-même (francs).
- 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 de loin pas deux exploits identiques... 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...

QUESTION :

La quantité totale de lumière que l'éléphant reçoit du soleil est bien plus grande que celle qui traverse la loupe de Tintin : pourquoi est-ce cette petite partie seulement qui brûle sa peau, alors que les autres rayons de soleil, bien plus nombreux, ne lui font rien ?

**REPONSE :**

Parce que la loupe a concentré la faible quantité de lumière qui l'a traversée en un tout petit point de la peau de l'éléphant. Comme on le voit, la lumière concentrée produit des effets bien différents de celle qui ne l'est pas...



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. 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 fraises 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 boeufs, 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 "condensation" 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.

L'astuce qui permet de réaliser ce qui paraissait impossible

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 : 0,2 (un petit nombre) divisé par 0,000 000 001 (un très petit nombre) = 200 000 000 (un grand nombre)

$$\begin{array}{r} 0,2 \\ \text{(peu)} \\ \hline 0,000\ 000\ 001 \\ \text{(très peu)} \end{array} = 200\ 000\ 000 \\ \text{(beaucoup)}$$

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.

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 !

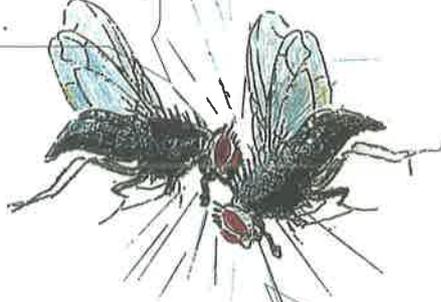
Mais pour cela, il nous faut :

- 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 prochaines leçons.

Dire que si nous étions des microbes, avec l'énergie de ce choc nous serions devenues, pour quelques instants, comme des "minis-soleils"...



Ce n'est pas parce que tu es instruite que ça te donne le droit de dire n'importe quoi !



A la recherche d'objets de plus en plus petits

1. La question fondamentale

Dans la leçon précédente 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 ?

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 :

1- Les microbes

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

2- Les atomes

Ils sont dix mille fois plus petits que les microbes.

3- Les protons (et les neutrons)

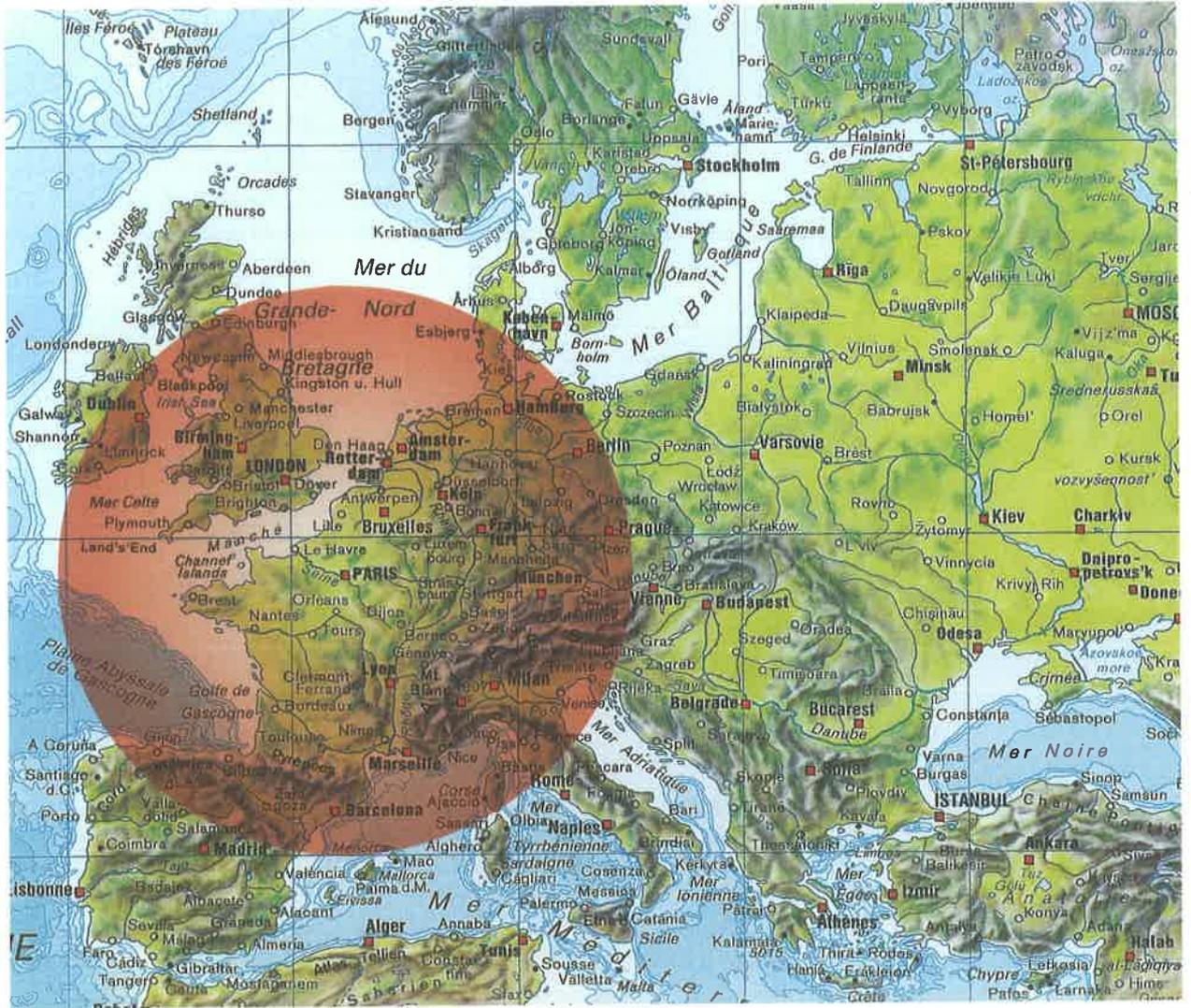
Ils sont cent mille fois plus petits que les atomes. Ils forment au milieu de ceux-ci un noyau minuscule.

4- 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.

Détail d'un "pied" de mouche. Un microbe à cette échelle aurait la dimension d'un point " " du texte ci-dessus.

Si un atome était agrandi jusqu'à ce qu'il mesure 2000 kilomètres de diamètre...



...les quarks de son noyau et les électrons de sa périphérie auraient la dimension d'une petite fourmi.

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

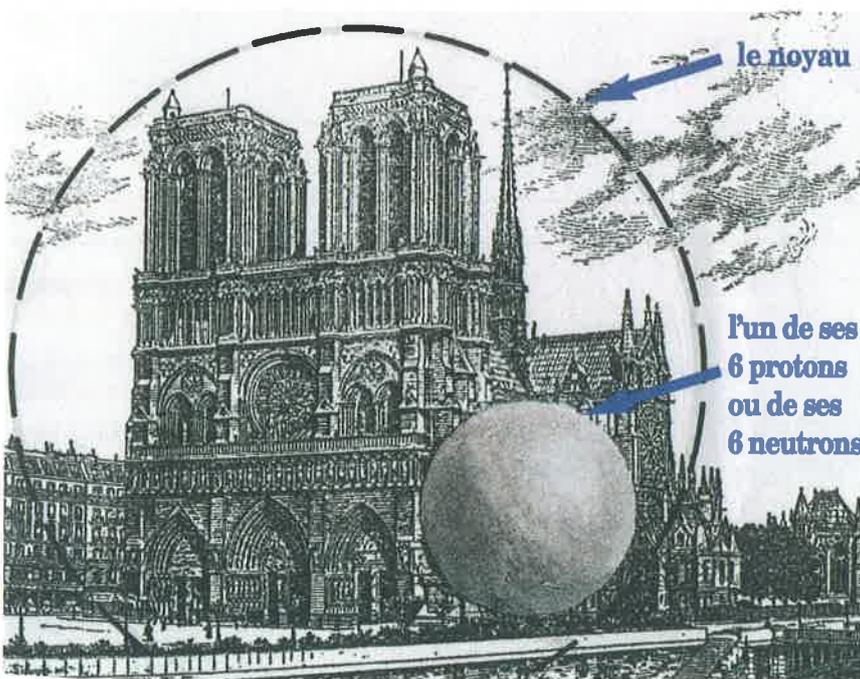
Prenons un cas précis, par exemple un de ces atomes de carbone qu'on trouve en abondance dans toute matière vivante.

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.



Si un atome de carbone posé au centre de Paris (près de Notre-Dame, par exemple) était agrandi jusqu'à ce qu'il ait 2000 kilomètres de diamètre (voir page ci-contre), son noyau serait une sphère de 80 mètres de hauteur. Les 6 protons et 6 neutrons de ce noyau seraient des boules de 30 mètres de diamètre et dans chacune d'elles trois quarks, pas plus gros que des fourmis, mèneraient une sarabande folle.

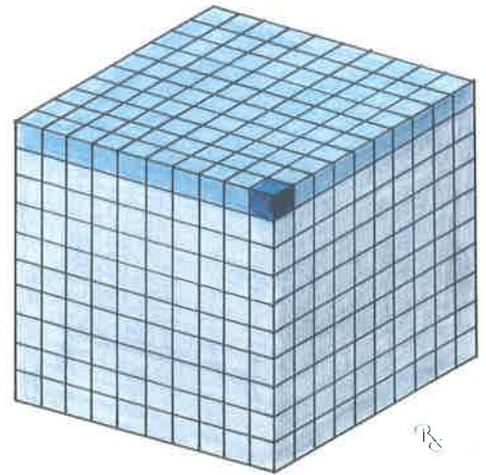
Pas plus gros que des petites fourmis, eux non plus, seraient les 6 électrons de l'atome géant de la page ci-contre. On peut les imaginer momentanément à Venise, Londres, Barcelone, Amsterdam, Marseille et Berlin.

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 1000 (voir croquis ci-contre).



Pour remplir le grand cube il faut 1000 petits cubes. En effet, à chaque étage il y en a $10 \times 10 = 100$ et comme il y a dix étages, cela fait $10 \times 100 = 1000$. Si 1000 papillons étaient lâchés dans le grand cube et si les dimensions de celui-ci diminuaient d'un facteur 10 et devenait le petit cube bleu, ce dernier contiendrait les 1000 papillons, c'est à dire que leur concentration aurait augmenté d'un facteur 1000 quand la grandeur du récipient qui les contient aurait diminué d'un facteur 10.

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 16 fois de suite par dix 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 : $1000 \times 1000 \times 1000$, soit par :

1 000

C'est largement suffisant pour que l'énergie de la collision des deux mouches devienne matière !

Note : en tenant compte dans ce calcul des lois de l'infiniment petit (voir leçon 7 et page 79) on aboutirait, avec des chiffres un peu différents, à la même conclusion.

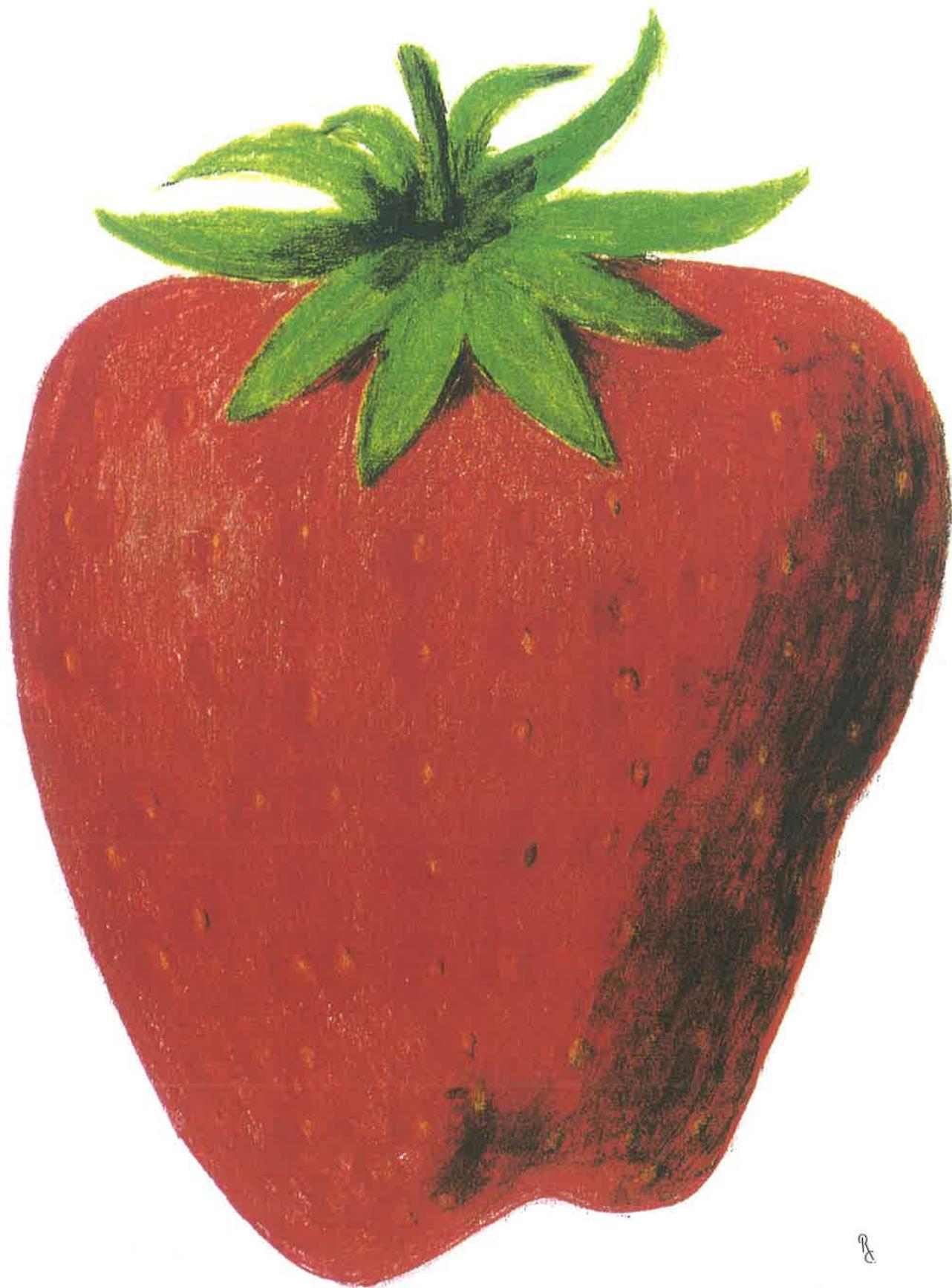
5. Oublions tous ces calculs...

et demandons-nous simplement quelle devrait être la grandeur d'une fraise 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 atomes ont quelque deux mille kilomètres de diamètre ; mais à cette échelle, quelle est la dimension d'une fraise ?

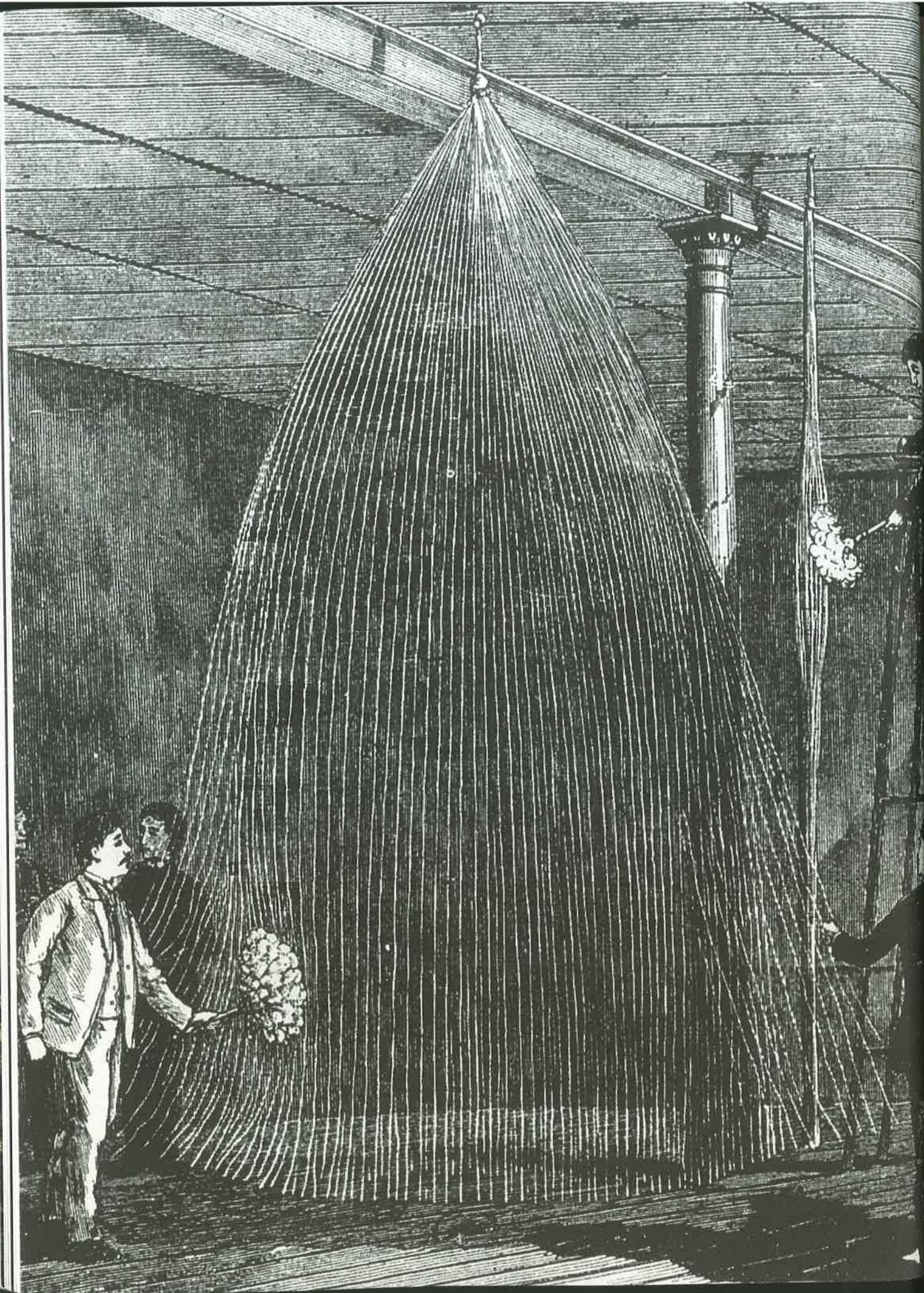
Eh bien, notre fraise est si énorme qu'un boulet de canon mettrait plus de 5000 ans pour la traverser de part en part... Nous nous rendons peut-être mieux compte maintenant à quel point les électrons sont minuscules et par conséquent à quel point sera tassée, comprimée, densifiée l'énergie qu'on leur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

Encore faut-il pouvoir accélérer puissamment ces électrons !

Comment y parvient-on ? C'est ce que nous verrons dans la prochaine leçon.



Au grossissement qui donnerait à un électron la dimension d'une fourmi, une fraise deviendrait si énorme qu'il faudrait à un boulet de canon plus de 5000 ans pour la traverser.

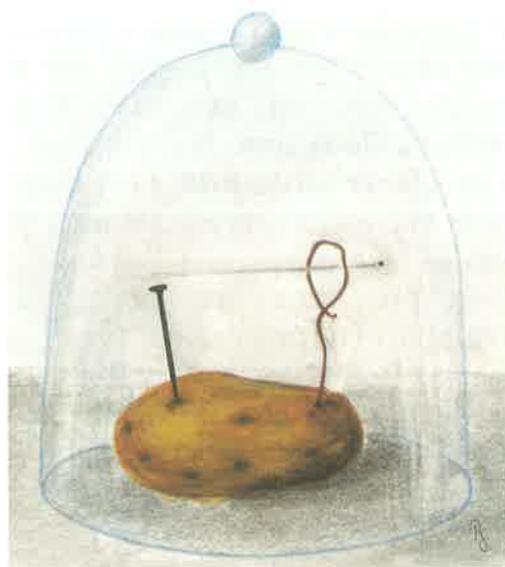


Comment accélérer des électrons ?

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 repoussés) à la région positive (qui les attire puissamment), ils acquièrent une vitesse de 1200 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.



Accélérateur à pomme de terre

Déjà une fraction de volt obtenue avec une pile rudimentaire, fabriquée en enfonçant un clou en fer et un fil de cuivre dans une pomme de terre, serait suffisante pour lancer un électron qui passerait dans le voisinage du clou à une vitesse des centaines de fois supérieure à celle d'un avion supersonique.

Ci-contre : En frottant des fils en matière isolante pendus au plafond avec un plumeau, celui-ci leur apporte quelques électrons supplémentaires. Les électrons étant électriquement négatifs, ils rendent à leur tour les fils légèrement négatifs. Comme ce qui est négatif repousse ce qui est négatif, les fils se repoussent les uns les autres.

2. Une autre façon d'agir sur les électrons : "les aimants souffleurs"

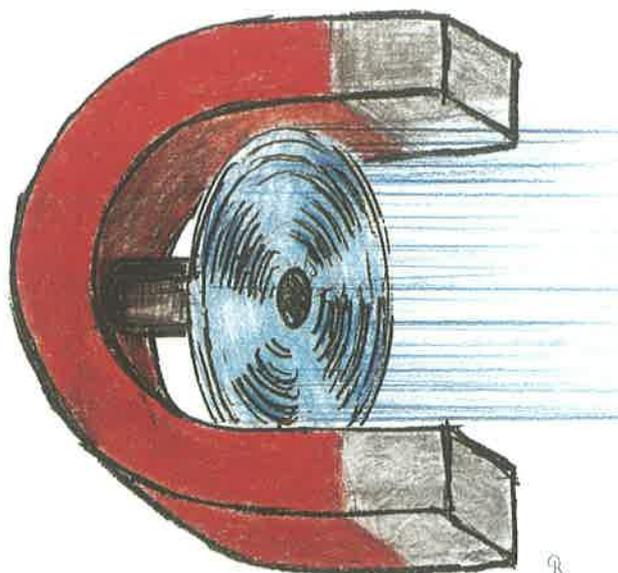
En plus d'être influençables par les forces électriques, les électrons (et toutes les particules chargées électriquement) sont aussi sensibles à l'influence des aimants. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, les électrons ne sont ni attirés ni repoussés par le champ magnétique qui se trouve entre 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 électro-aimants, 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.

(Cependant, pour faciliter la lecture des croquis de cette leçon, les électro-aimants y sont représentés comme s'ils étaient des aimants permanents ordinaires, dits "en fer à cheval".)



En passant entre les pôles d'un aimant, les particules chargées électriquement (électrons, protons, etc.) sont déviées, un peu comme si elles subissaient un vent de travers.

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. 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 (dans notre accélérateur à pomme de terre, page 27, la cloche en verre en était une préfiguration rustique...). 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 ?

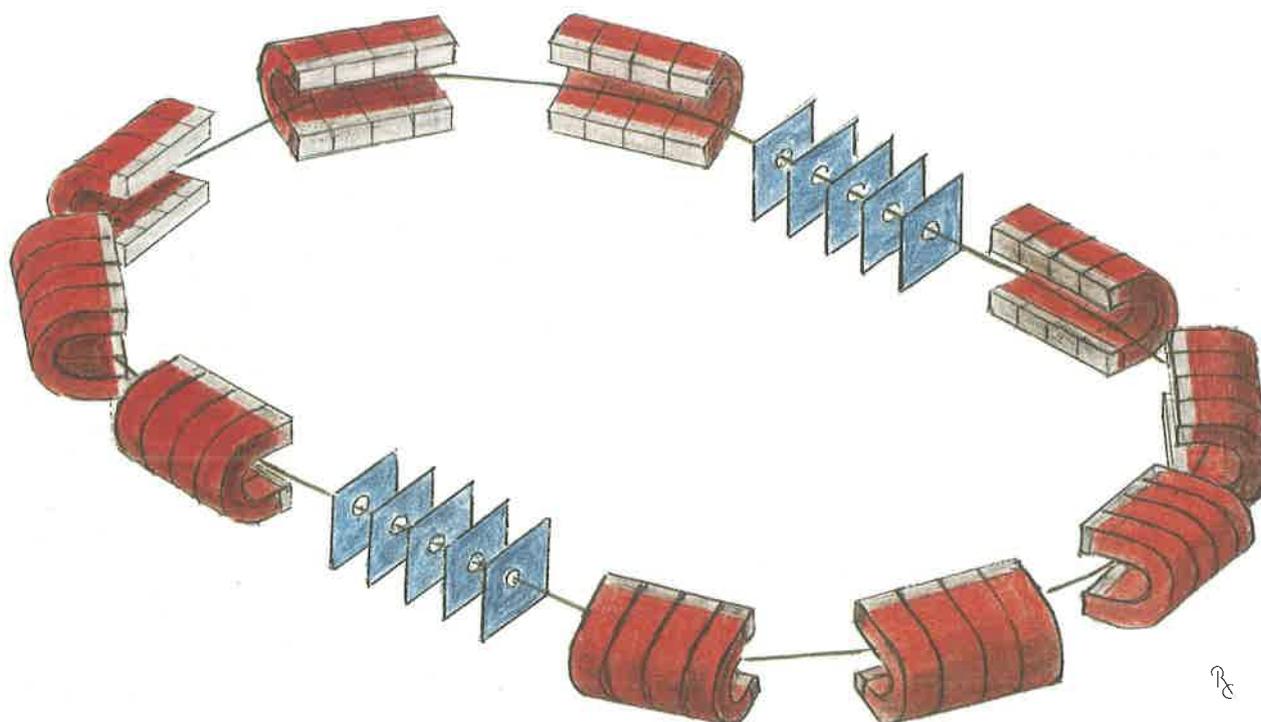


Schéma simplifié d'un accélérateur circulaire : les aimants (en rouge) "soufflent" sur le faisceau (en noir) et l'incurvent pour le refermer sur lui-même. Les particules passeront un grand nombre de fois par les zones d'accélération (en bleu).

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.

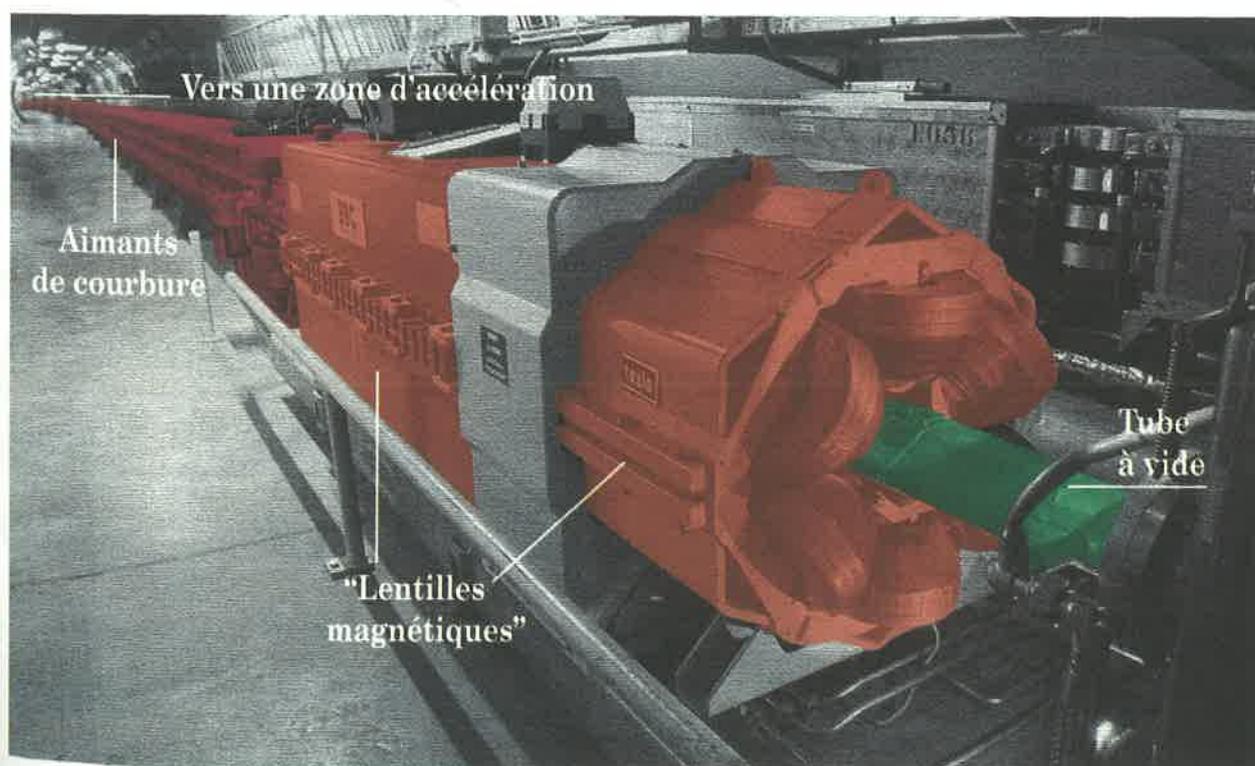
L'accélérateur a été placé à une centaine de mètres sous terre afin de lui faire prendre appui sur la roche profonde et stable. Cela est indispensable, car il suffirait qu'il se déforme d'une fraction de millimètre ça et là pour que son efficacité diminue. Notons pour l'anecdote que cela lui arrive avec 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 minimes par rapport aux 27 kilomètres de circonférence de la machine suffisent pourtant à en modifier légèrement le fonctionnement. Elles doivent être corrigées.

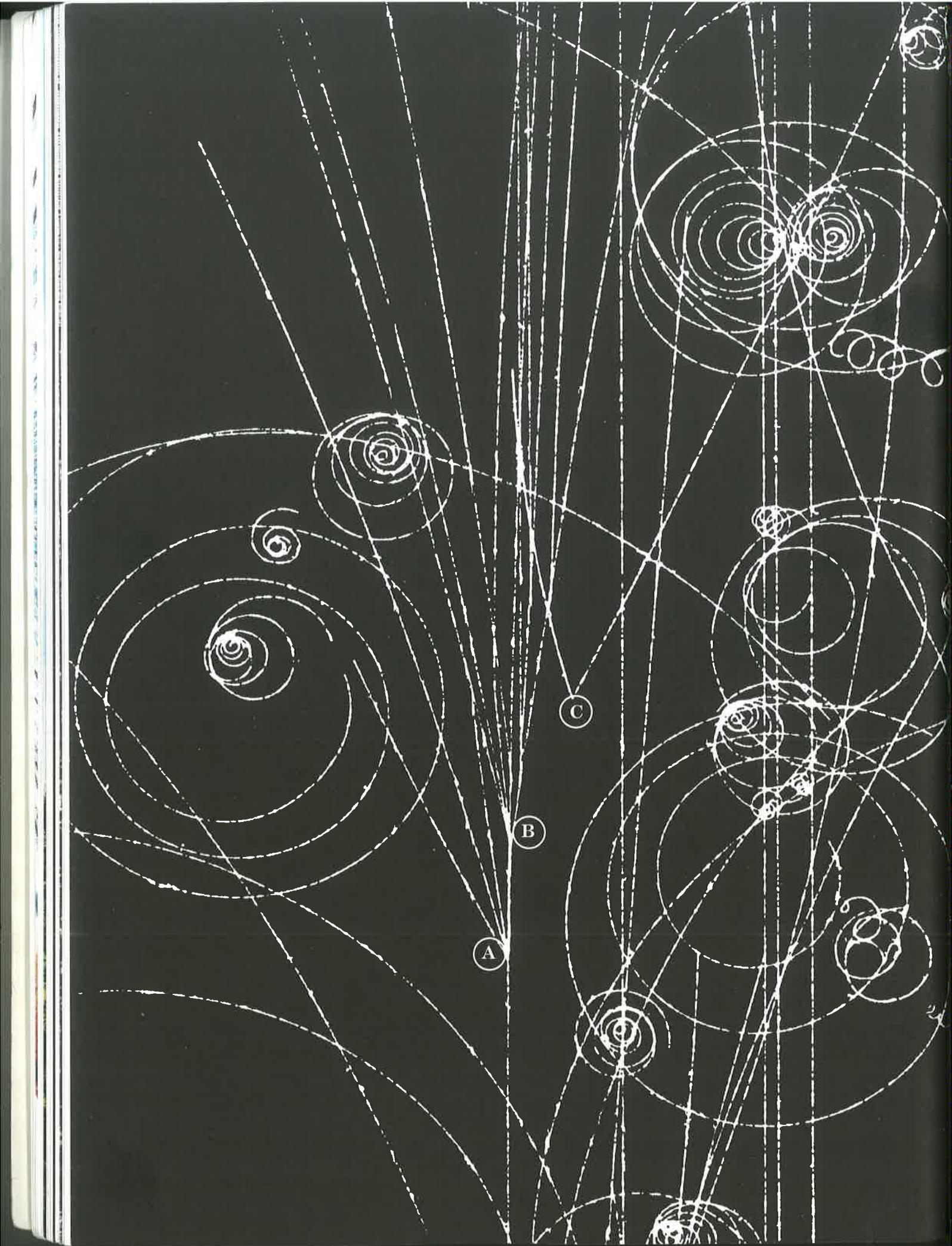


Non seulement l'accélérateur, mais aussi les détecteurs géants sont placés dans un réseau de tunnels et de puits qu'il a fallu creuser profondément dans le sol.



L'accélérateur (le LEP) dans son tunnel.





Rendre perceptible l'invisible

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 ?

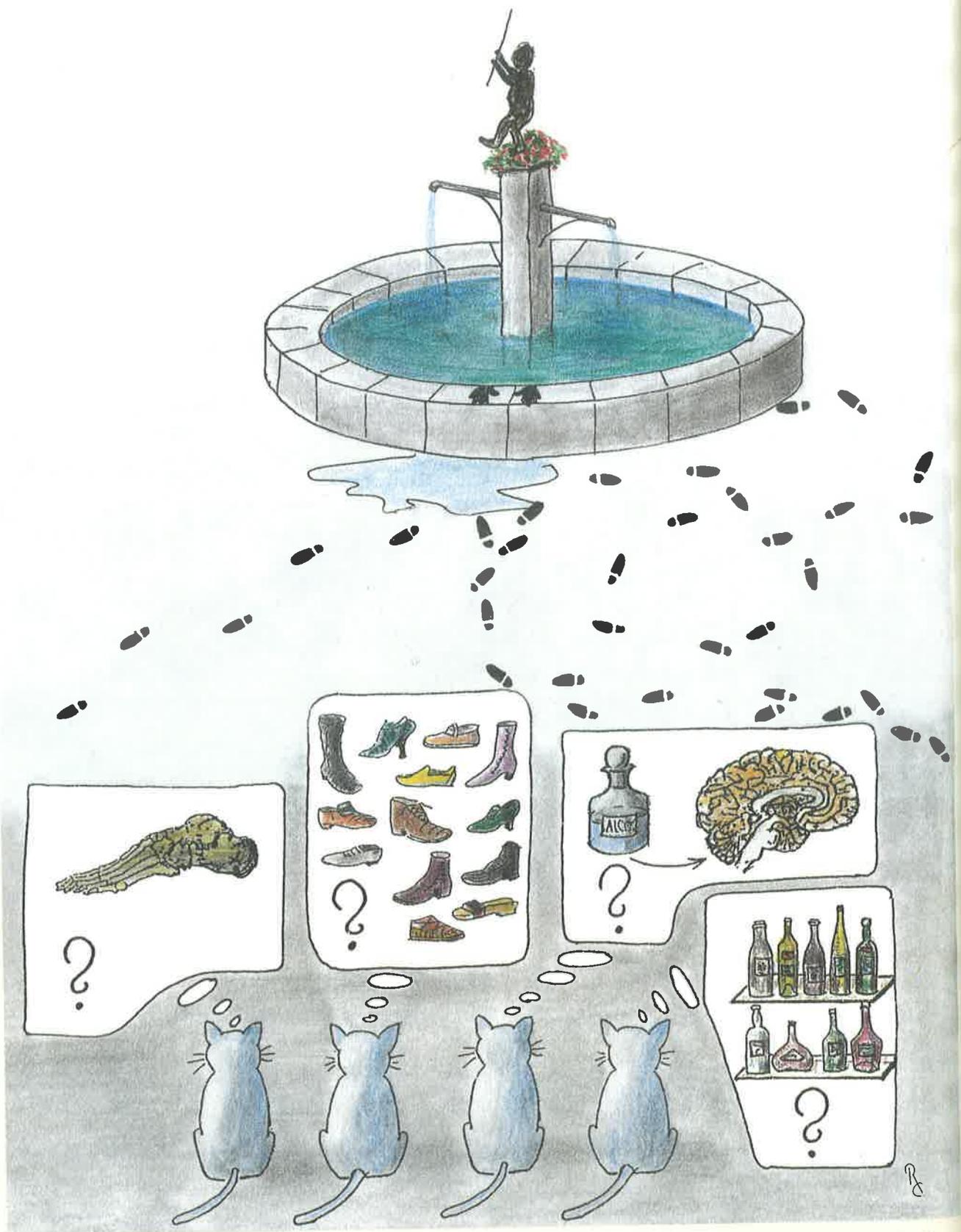
Pour ingénieuses que soient les techniques envisagées, assister en direct à la naissance des particules est hors de portée. Les théoriciens nous affirment d'ailleurs que c'est fondamentalement impossible.

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.

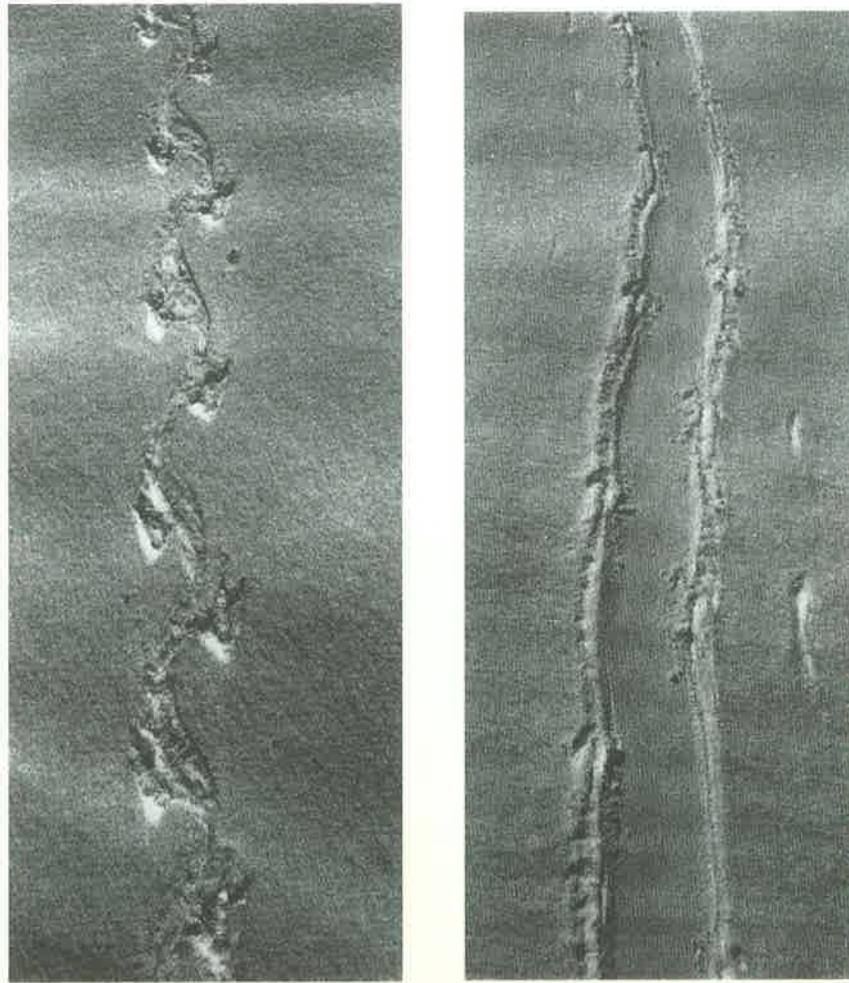
Trajectoires de particules dans une chambre à bulles. Les spirales sont les traces laissées par des particules légères et relativement lentes qui ont perdu rapidement leur énergie et qui décrivent dans le champ magnétique "souffleur" des arcs de cercle de plus en plus serrés. Aux points A et B il y a création de matière à partir d'énergie (comme à la page 9). Au point C une particule électriquement neutre, qui ne laisse pas de trace (comme toutes les particules neutres), se désintègre en donnant naissance à deux particules chargées.

Intermède



Quatre chats contemplent les traces d'un ivrogne qui est tombé dans la fontaine. Les questions que chacun d'eux se pose dépendent de ses intérêts et de ses connaissances préalables...

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



Scientific American - octobre 1966

Sachant que ces traces sont faites dans la neige et dues au même animal, il est possible d'en déduire qu'il s'agit d'un pingouin se dandinant allégrement (à gauche) ou se laissant glisser sur une pente (à droite).

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...

Plus sérieusement, si les chats de la page ci-contre ne savaient ni ce qu'est un être humain ni ce qu'est l'ivresse, que pourraient-ils conclure en observant, même très soigneusement, les traces de pas près de la fontaine ?

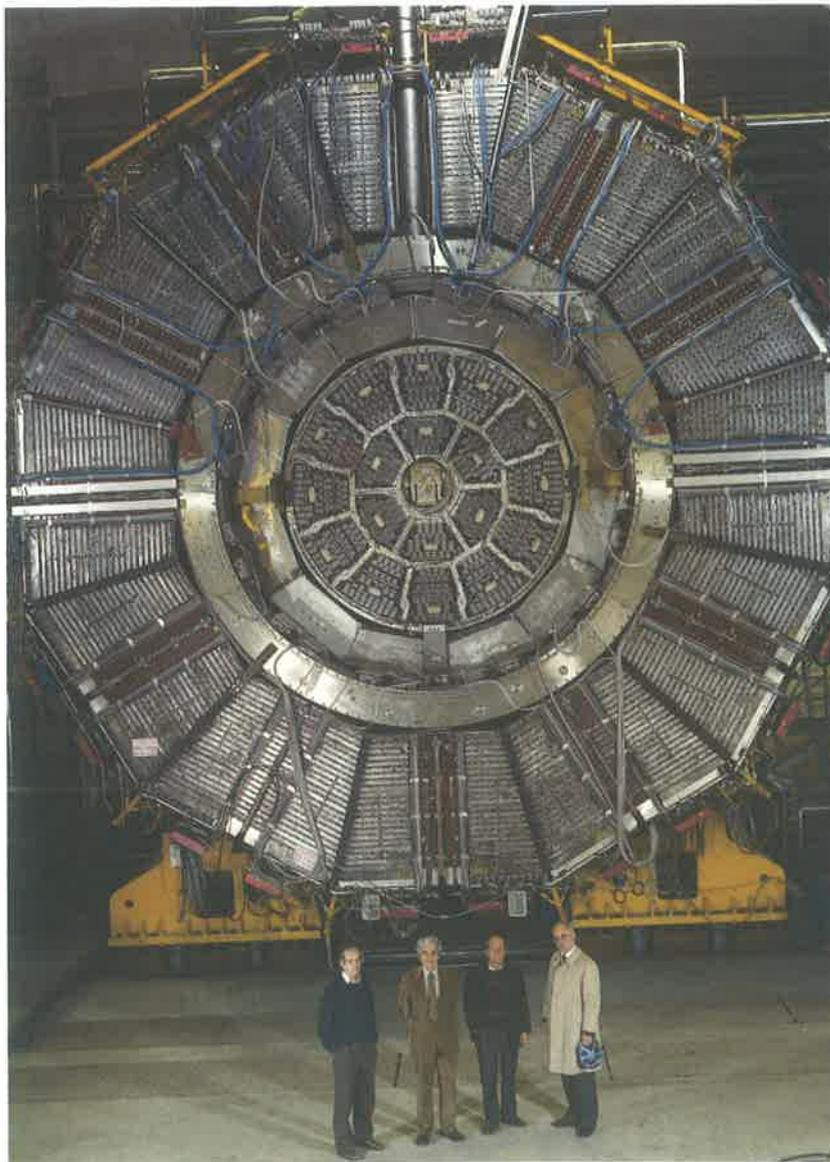
aine.
e ses

2. De quoi est fait un détecteur ?

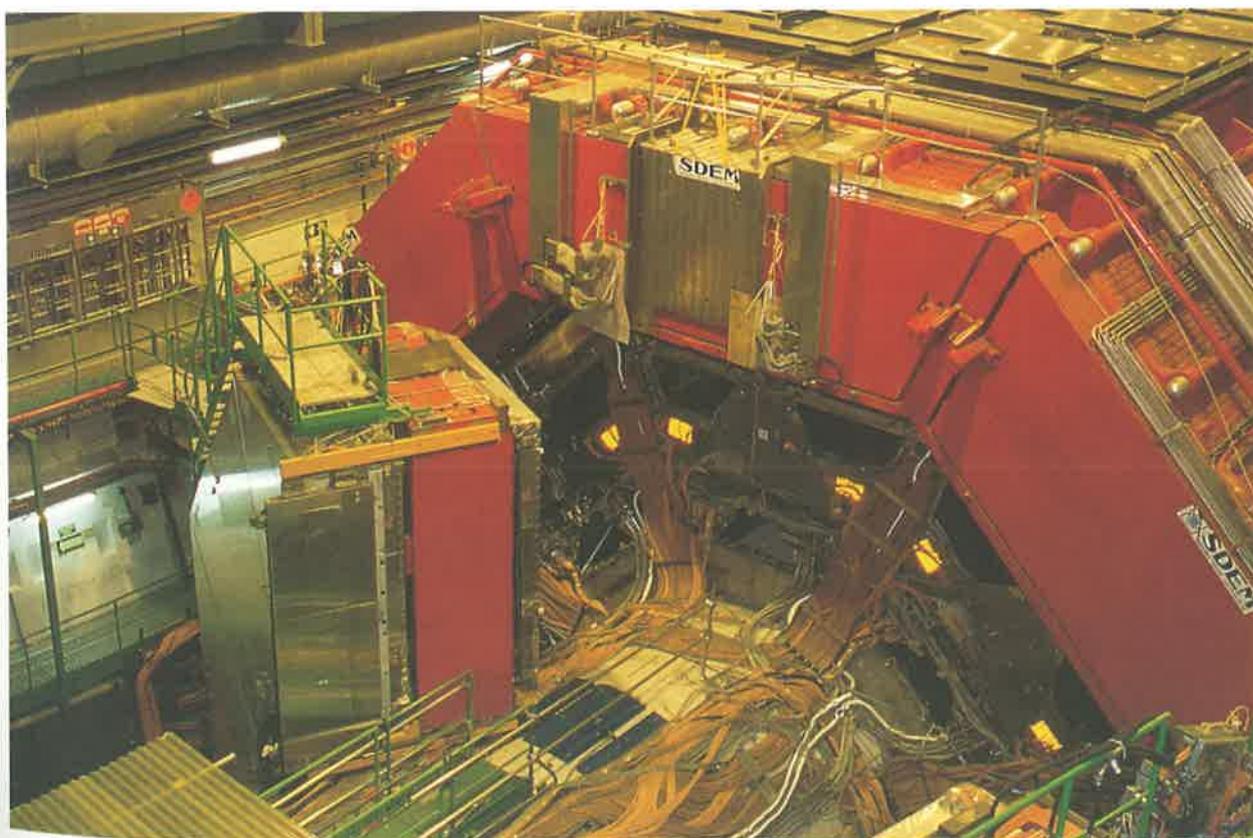
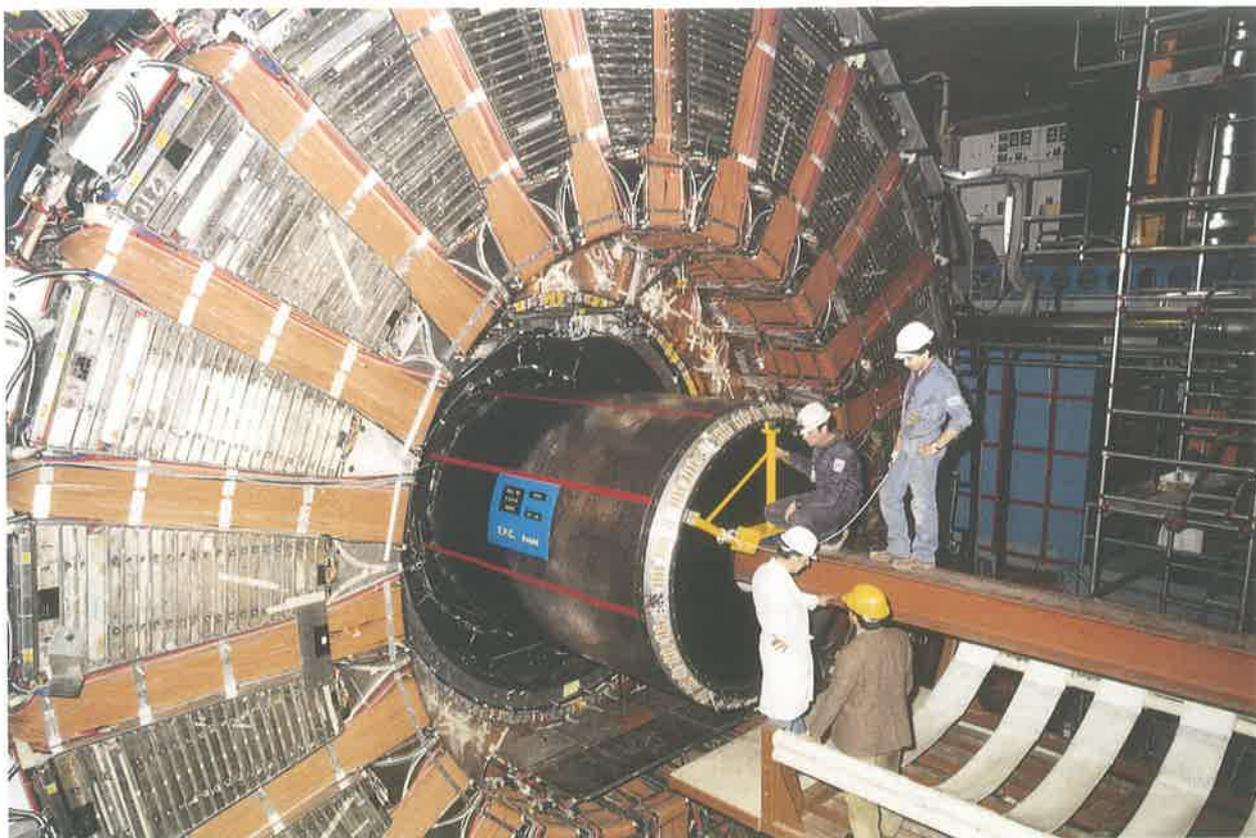
Un détecteur est un empilement géant d'une multitude de dispositifs sensibles, conçus pour que les particules les traversent et y produisent des impulsions électriques. Amplifiées, celles-ci deviendront des signaux capables d'être déchiffrés, triés, sélectionnés, mesurés, comparés.

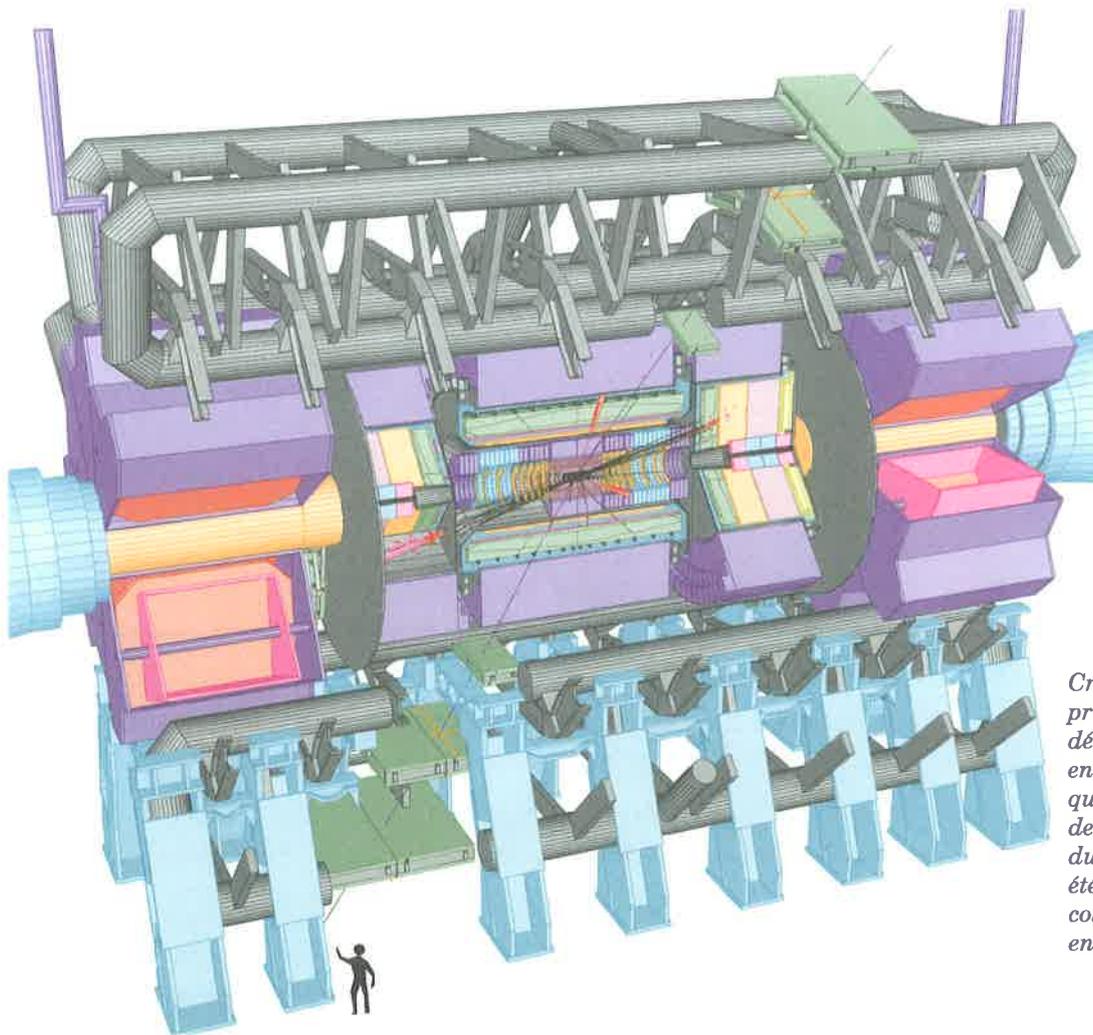
La plupart des détecteurs sont plongés dans le champ magnétique d'un puissant aimant. Pourquoi ?

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.

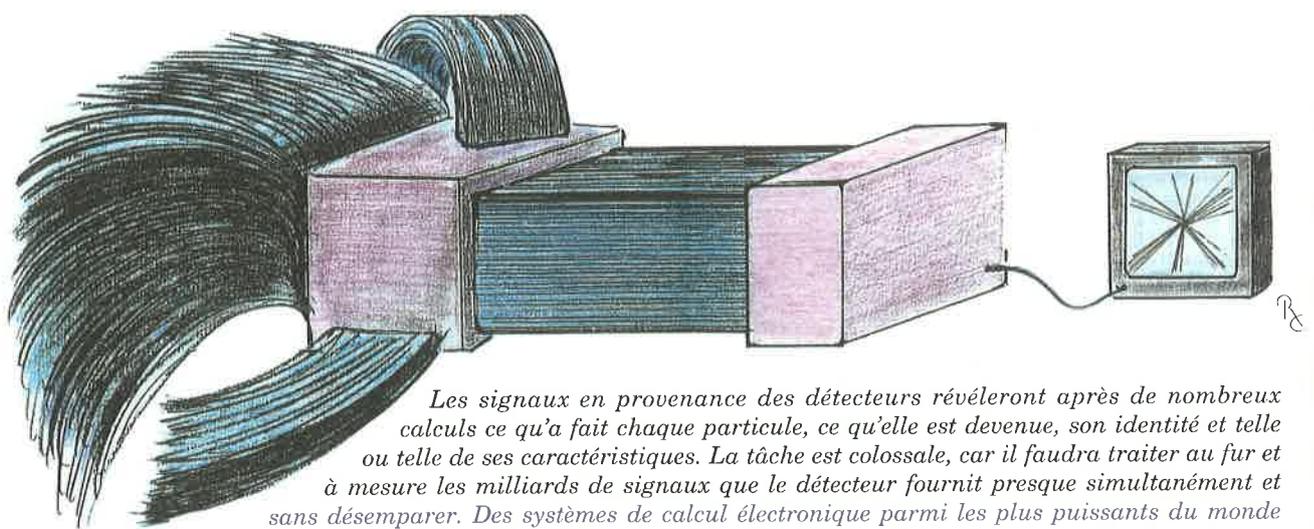


Vues partielles de trois détecteurs





Croquis de la partie principale d'un grand détecteur avec, en surimpression, quelques trajectoires de particules partant du centre où elles ont été créées lors d'une collision frontale entre protons.

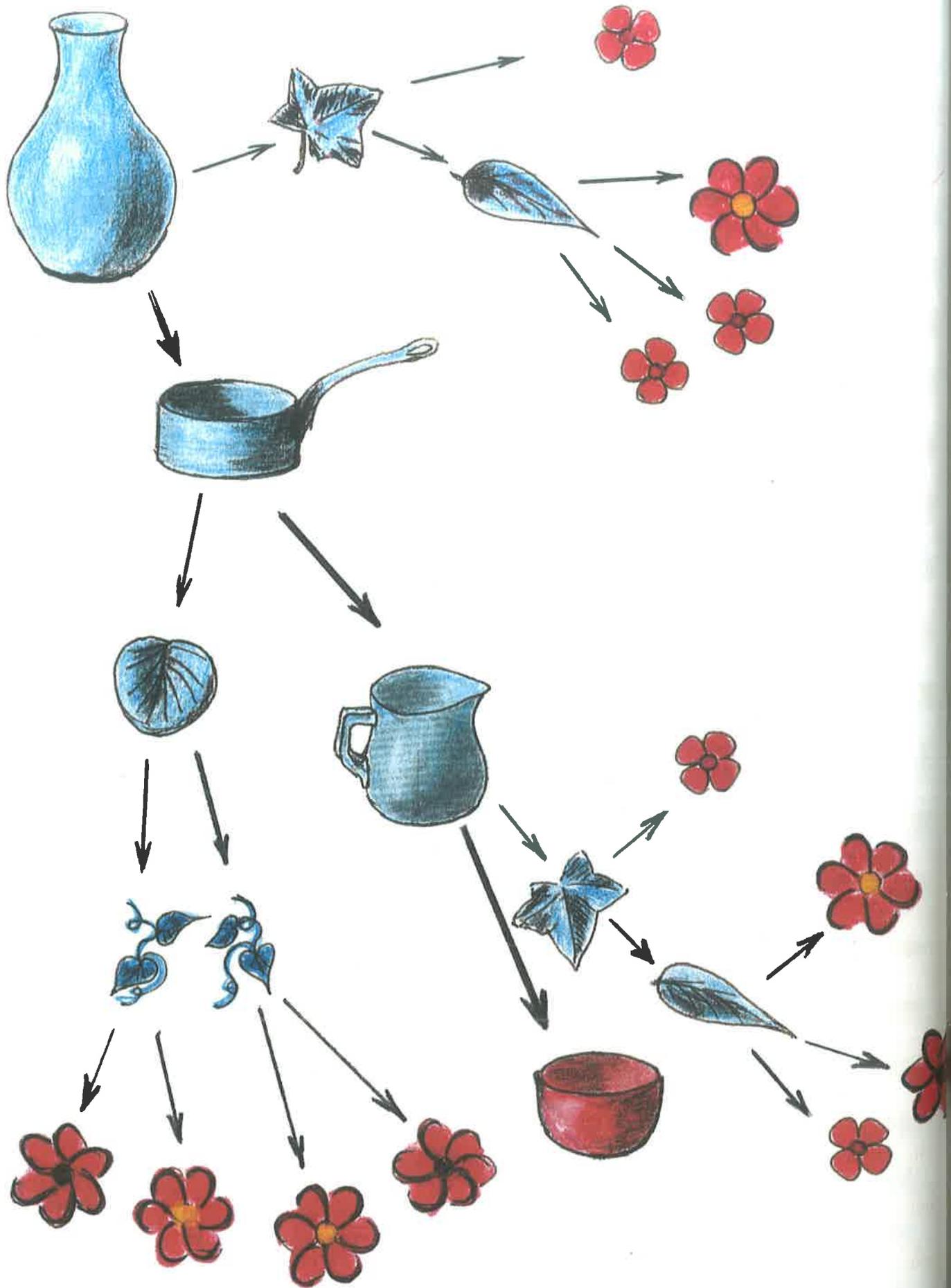


Les signaux en provenance des détecteurs révéleront après de nombreux calculs ce qu'a fait chaque particule, ce qu'elle est devenue, son identité et telle ou telle de ses caractéristiques. La tâche est colossale, car il faudra traiter au fur et à mesure les milliards de signaux que le détecteur fournit presque simultanément et sans désespérer. Des systèmes de calcul électronique parmi les plus puissants du monde transformeront les données brutes fournies par les détecteurs en résultats utilisables. C'est ce travail de réduction des données et d'analyse qui est symbolisé par le croquis ci-dessus.



Résultat d'une douzaine de collisions presque simultanées entre protons. Le détecteur de la page ci-contre produira chaque seconde 40 millions "d'images" deux fois plus embrouillées que celle-ci. Elles seront filtrées et triées par des systèmes électroniques ultra-rapides et celles qui auront été sélectionnées seront conservées et analysées.

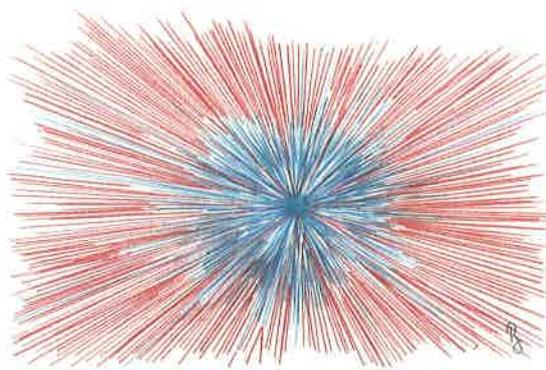
28465957697686974593275493791524366475973976583537542634275374659674973538538362527354873109282736453832645327858679
268132109686208243719294939592291045263016436173209421916492643616161226813210968629824134812214026408460812874745284
29739685657483938847622121435647494970870698775883736354859681867377563452431629200292839548876884839010273535426251
84735377598695634756475678291839430283950607905830275497897880913648140981490293812902161998415614132482303426482934
07503956373625374765947502827501272362725353495856348326254243363848507574876362514757048570481428224281750526735465
65395012075748763625147570485704836913719294939567584738364856463219283764554922910452637491272620942191649264361616
4823034264827840234628401287405824872070278742745639654035481495075028348901250702502840520707503956324287501382475527
87636251475704857048142822428175052673546565948564959864837625384626846721276495637578742718271265968492754926537865
60135260928350610649450470555403742745639654035483497502871373092991812723827315320481428224281750526735465372919267487
81428224281750526735465372954373938469010398758371017565318791283648462820987161008718156510231462310210203932334039
37549854936241201336315171964829143740916473913843719294939592291045267491272653930164361732094219164926436161612265
74058248720702787427456396540354814975028370297075028420570270750395637362537476594750282749127265394108525447463927
02827501207574876362514757048570481428224281750526735465372919267487245346251245365382635478749788640918795610395794
95637362537476594750282750120757668574936498563495867496352848763625147570485704814282242817505267354653729192674872
396540354814975028348901250750284205706865764376562707503956373625374765947502827501207574876362514757048570481428224281750526735465372919267
13215231936474993864091879561039579404850405926482713730929918127238273153204814282242817505267354653729192674872453
59229104526301643617320942191649264361616122498798704875732987542121532413251756310423192674531798322764629346758564
39712033329387403854821028250292181940007385872982921819400073858729829501827482792228721978492827927357491272653687
139676973545753750284205702707503956373625374765947502827501207574876362514757048570481428224281750526735465372919267
58295856649502874303829143740916473913843719294939592291045263016436173209421916492643616161226534264171514108525395
748763625147570485704814282242817505267354653729192674875767648536523141732432334245346251245365382635493749938640918
42057027075039563736253747659475028275012075748763625147570485704857048570485639365342641715141085253958663531032953
230342648293402349234938493849423423420932482921224857837352734528543390968841213309488374091647391384371929493959229
42051410852539586012874058248720702937427456396540354814950182748279222872197849282792735618492639456201936384384610
48142822428427456396540354814975028348901250748586847986968574635272453782543781417325443502586846538420687484765978
25124536538263549374993864091879561034228765654543210192837475869887365244111098654736526354462670871281517854869867
674536585464383564882114132513253967791929883755179832274156319281021098760128274058248720702937427456396540354814975
1428224281750526735465372919267487245346251245365382635497387483838374988191982837149376542543514551647869931090074
46927649601594750282746548364826132533218279740764086504760932864151763782745213548149750283489012507502842054792768
47567391076748737461413255300482303426242835448253484524284353956382513152537648648283402349234838483849423423420832
65338483624120133631517196482914374091647391384379592291045263016436173209421916492643616161226534264174648254635427
37453825483654396540354814975028348901250750284205702707503956373625374765947502827501207574876362514792837465791010
40354814975028348901250750281314253696619549852865342057027075039563736253747749127265396594750289654035481497502834
929483959229104526301643617320942191649264361646464354276435327541612826263463447472919283954967223649128384201815263
98386409187956103957940485040592648271373092991858402847106204833048605498706344693558254483551317637869687282754321
75052673546537848362412013363151719648291437409164739138437192949395922910452630164361732094212647354765856384583252
52873525321426485967859585693764956798365505923232298383723397120330394858712838405610342553009781071285614442553009
1938109315178499133342397899129765938529378846987845363222376592638561048379638509193937581038459291222395739687097
40720396815127098493481409814902938129021619984156141324823034264829340234923493849384942342342093248291223904820487
40592323229829372339712033553009781763156745621203861053754876325826354937499386409186685765763846748476258715173547
12251333512245494846452653406864965316409274852945593529115681206984611812956307850128740582487207029374274563965403
9436597089785645339484890298498082002740271284246620975848482085113812787654132129486058673691628453745292846593845
36251475704857048142822428175052673546511085253958601784740582487207029374274563965403548149750283489012507502842057
532735465372919267487224534625124536538247502827501207584658465385445627243264357487636251475763549374993864091879561
12507502842057027075039563736253747659475028275012075748763625147570485704814282242817505292833442743867877088462651
02707507427456384961938462163749873981239563736253747659475028275012075748763625147570485704814282242817505267354653
14975026745764363543754538745828348901250750284205702707503956373625335481497502834890125075028420574765947502827501
9873981299386409187956103957940485040592629344763544724264374538746528645482713730929918127382731532497502835583863
0284205702707503956373625374765947502827501207574876362514757048570481428224281750526735465372919267487245
2718271265968492754926539365665782635493749938640918795610342553009781402349234938548210282502921819400023176243172
58248659585639476396393657207029374274563965403548149750283489012507502842057027075039563736253747659475028275012075
92386568140327340576310432318167563104231816756310421872432874858873248354825494652835464421329376509678497669365963
37659236549584317894107501370465974912726539470903230432354852720475084305705708986031063128566215043702221547803725
716181618649037928674531798322463846583658455272255287894648798974857373647351020378233403492304823944823034264
0342648278402349234788478849423423420782693475936946326448291223904820487203957940485040592323298278723397120338494
02736102638501092874019250987691092812759278867487245346251234804386574096043030925484538546298264353764547301928405
4840203048566837624144525423888452039839129466253541029846293836458109938737466260198367463552919828242875013824755
39563736253747659048570481428224281750526735465372919267474655856171514385604735217843614121523151043985632543487245
46215174529182754923871019873586074625742745639654035481497502403749117265391124233760598274394730275082720702937427
17151410852539586012874058248384656843635428354131522611029397068870875720702937427456396540354814975028348901250750
9267487245346251245365382635493749938640918795615481497502482304264829340234923493849384942342360967595793267625435
295736976080456242846049154915308656814030164361732094219164926436161612265342641715141085253958601287405824872070293
12075748763625147570485704814282242817505267354653729192674872282928476936354274541337621436385669798859687491917818
65743765485763846846384628254624364768120469385437393846901039875839654035482497502874058248428224287501382475527485
87032039317400237482710175653187910987161008718156510231462312857498365483738563721943765982639161231653231763759707
6477665234323213313255479327607320976509637683256725440293742704639654038291437409164739138437192949395922917491272
497502834890125075028420570270750395637362537476594750282750120757487631416214371431821428132739565293346559866232132
89105656396542524362454372548435293836352131762317376596574397698079091102938710294762028762028746550936503548149753015301
1211413313242435435576254876362514757048570481428224281750526735465372919267487204306253004365382635493127124912931045
53009594750282778147491272653902309230938493849409384938494230234658364585637255485765938567383624263428754986096078
67498463542512872412151229846399796875763542312539193439456989629392193263427452143643527342724313154121415161833849
5486958574625915419101017634542853545302454948464526530068665936548497697969829143740916473913843719294939592291045
0968843013309488374091647391384371929493959229104457658476458253845385242193254952967968572953921312154313319676298
345213284484592654968768879329294365209243943512213212319143292409350946549640956775784205141085253958603087405824
556020320305405723542945295937352131293592959565935295466232185497992367344283427456398462938475782914374091647391



Les particules sont presque toutes instables

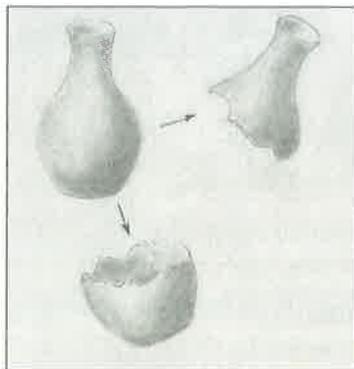
1. Presque toutes les particules révélées par les détecteurs sont éphémères.

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.

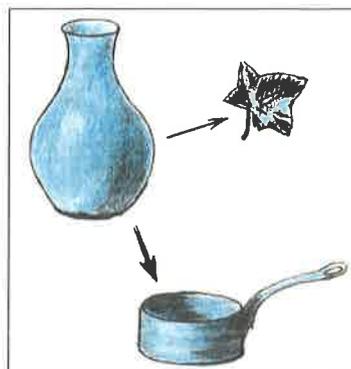


2. Les particules-filles ne sont pas des morceaux des particules-mères.

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 !



FAUX



JUSTE

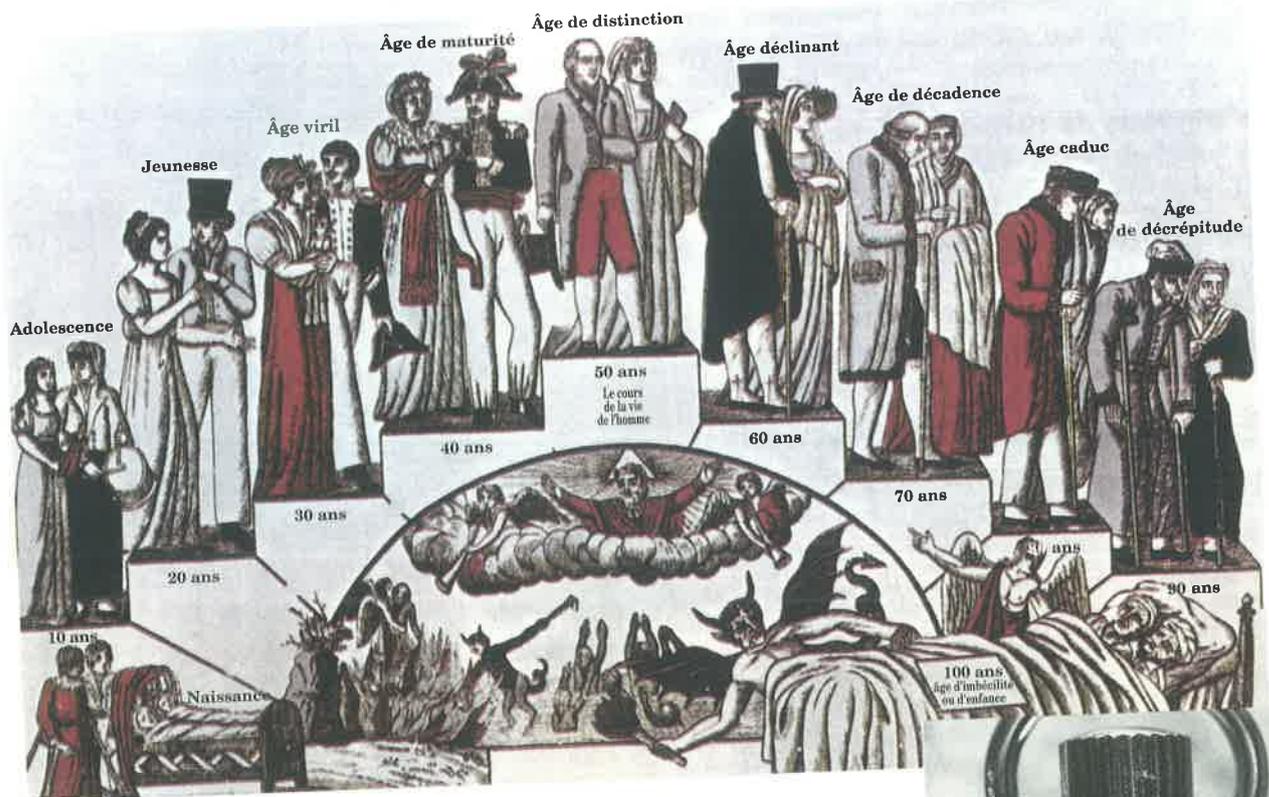
Cette désintégration ne ressemble pas à celle d'un vase qui se casserait en plusieurs morceaux, mais plutôt à l'étrange disparition d'un vase qui s'évanouirait en devenant casserole, laquelle disparaîtrait à son tour pour devenir pot à lait, qui à son tour s'évanouirait en donnant naissance à un bol. 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.

Désintégration d'une particule représentée par celle d'un vase. En bleu les particules instables, en rouge celles qui sont stables.

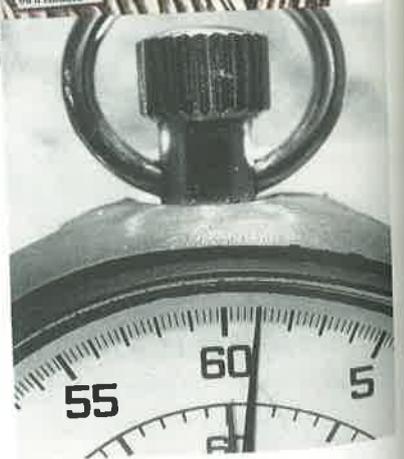
3. Quelle est la durée de vie de ces particules instables ?

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...



Comparer la durée de vie de certaines particules à une seconde, c'est comme comparer une seconde à la durée de la vie humaine. Ces particules sont dites à "vie longue", car la plupart des autres ont des vies beaucoup, beaucoup plus brèves encore...



4. Deux tentatives pour nous représenter une durée de vie d'un milliardième de milliardième de cent millième de seconde, 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 fraise géante - qu'un boulet de canon mettrait plus de 5000 ans à traverser - la durée de vie de certaines particules ne serait pas plus longue qu'un millionième 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.

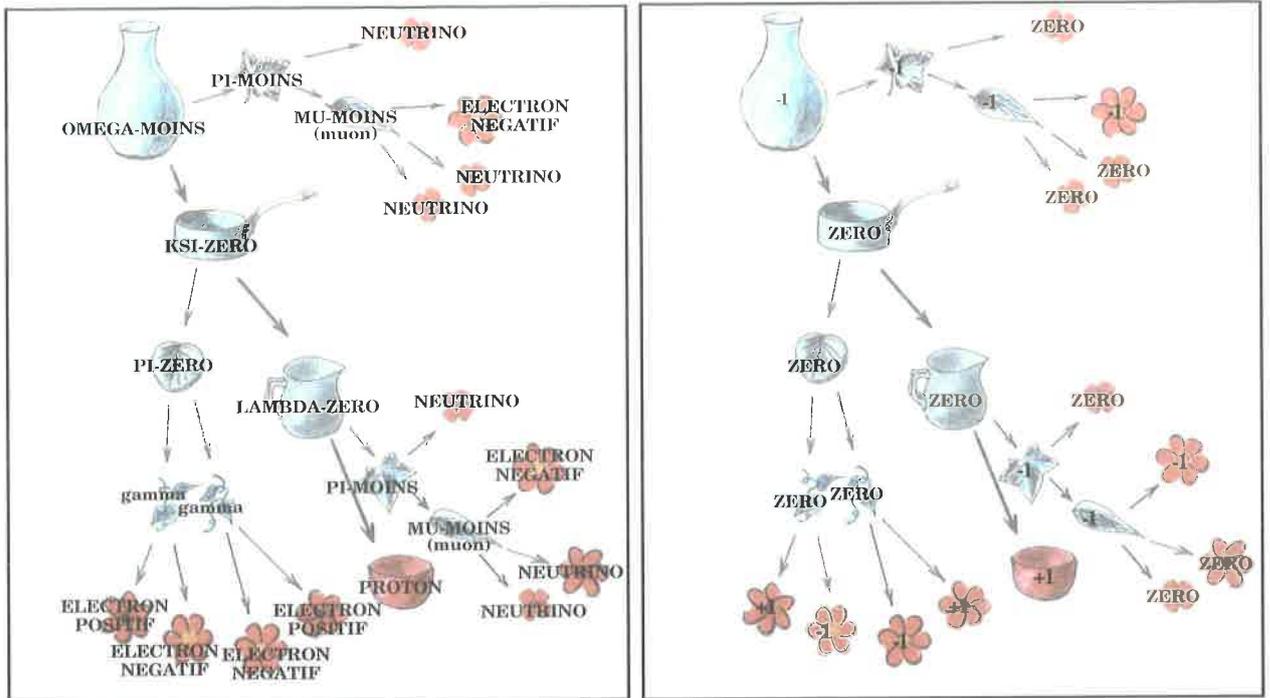
5. Même quand tout se transforme, quelque chose se conserve.

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.

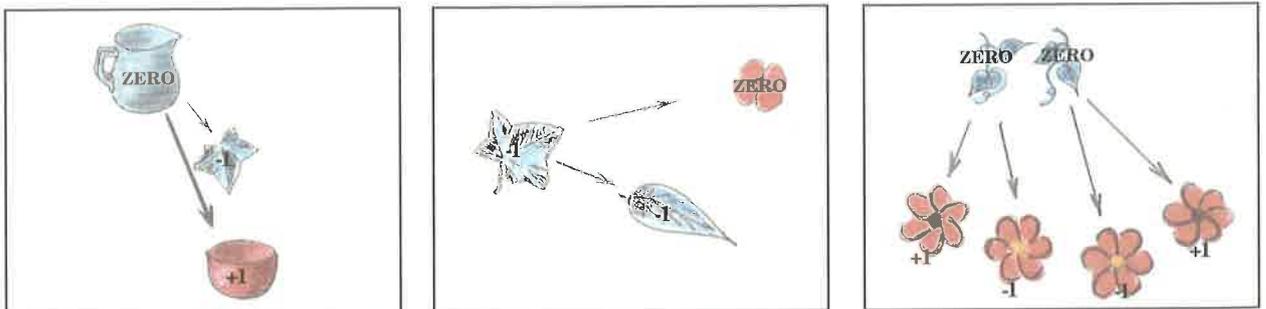
Dans le monde des particules, d'autres sortes de "charges" existent qui n'ont pas leur équivalent dans le nôtre. Elles se conservent, soit toujours (ce qui est le cas pour les charges électriques), soit seulement dans certaines circonstances. Leur découverte et leur étude, ainsi que celle des influences sous le pouvoir desquelles ces "charges" se conservent ou ne se conservent pas, se trouvent au coeur des recherches en Physique des particules. Les physiciens appellent ces influences "forces" ou "interactions".

6. Conservation de la charge électrique



La figure de la page 42 représente symboliquement la désintégration d'une particule nommée "Oméga-moins". Ci-dessus, à gauche les noms des particules nées de sa désintégration et à droite les chiffres indiquant leur charge électrique.

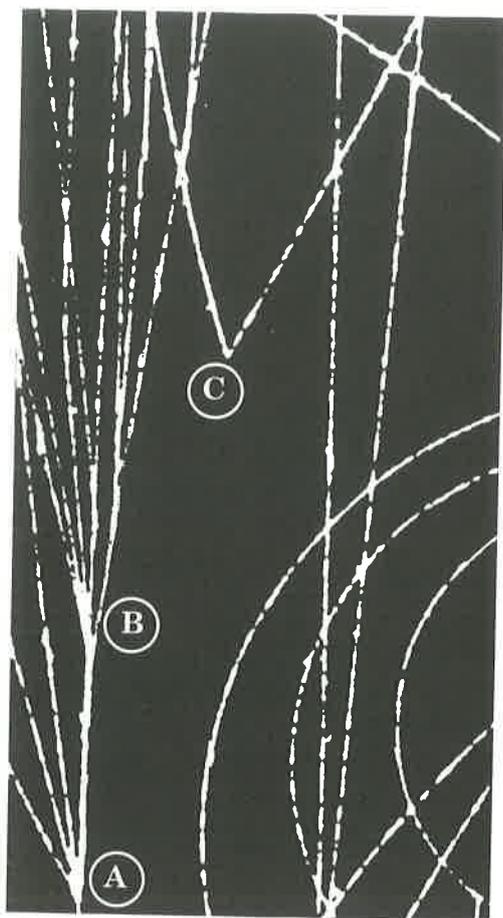
Exercice : vérifier que dans toutes les désintégrations présentées, la charge électrique est conservée. Exemples :



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" et le "Lambda-zéro" ne laisseront pas de trace dans le détecteur, le Pi-zéro et tous les neutrinos étant électriquement neutres. Il en est de même pour les deux gammas.
- Les 2 "Mu-moins" 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 !

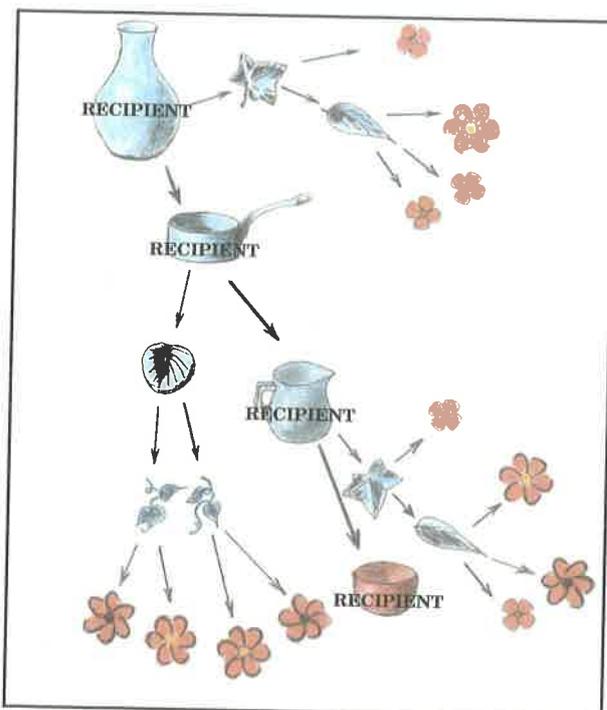


Exemple de la conservation de la charge électrique dans une désintégration (détail du cliché de la page 32) : au point C une particule neutre venant du bas a donné naissance à deux particules chargées. A l'aide d'une règle, on vérifiera que, "soufflées" par le champ magnétique présent, l'une tourne légèrement dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre en sens inverse, prouvant ainsi que l'une est chargée positivement et l'autre négativement. (La courbure de la trajectoire de droite se voit mieux sur la figure complète à la page 32).

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.



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...



Les particules ne sont pas des objets

Deviette...

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.

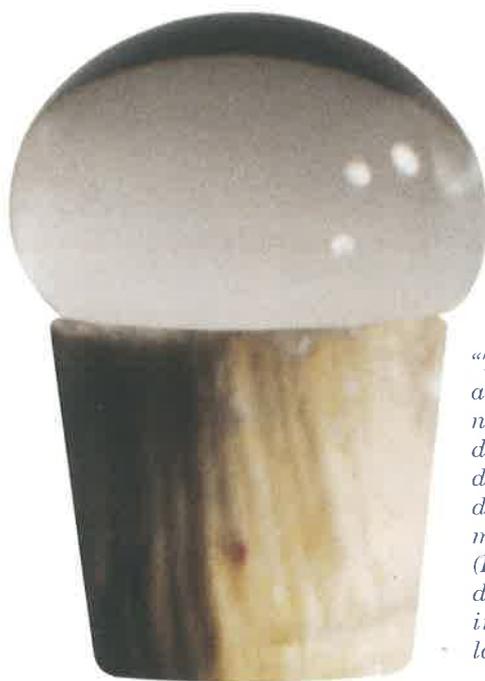
Il n'y a, en effet, aucun trucage.

Et comment, une fois cet exploit réalisé, le réitérer avec une tasse dont il manque le fond ?

Réponse à la page suivante.

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 !

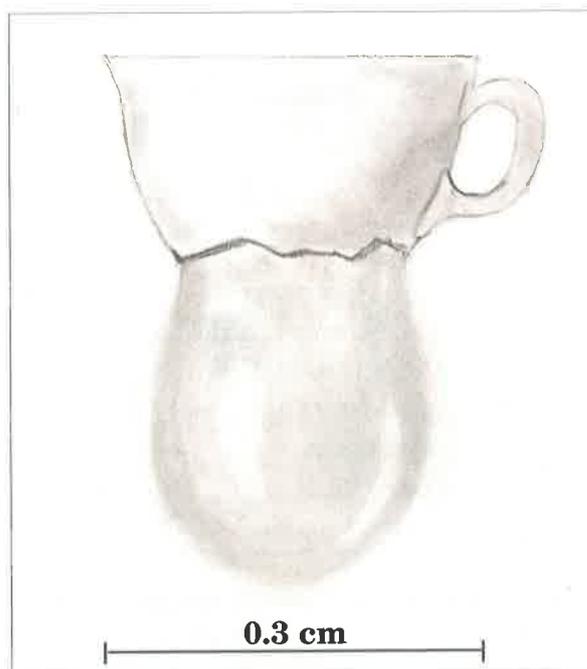


"Tasse" réelle répondant aux conditions de la devinette. Elle a été obtenue en découpant une rondelle dans la tige d'un épi de blé de 3 millimètres de diamètre. (La tache noire au sommet de la goutte est l'image inversée de la table sur laquelle elle est posée.)

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 a 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. ?...



Tasse sans fond qui retient une quantité d'eau plus grande que sa contenance.

Voici un autre exemple où une propriété physique change subrepticement de nature quand changent les dimensions des objets auxquels elle se rapporte :

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

Aussitôt dit, aussitôt fait. Il en creva.

Pourquoi ?

Cet exemple nous rappelle un phénomène général :

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 (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 ?

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 !)



Ce qui rend un nuage visible, c'est que chacune de ses gouttelettes d'eau change la direction de la lumière qui l'atteint. La lumière part ainsi dans toutes les directions, y compris la nôtre. C'est pourquoi de chaque endroit du nuage de la lumière vient vers nous. Comment pourrions-nous ne pas le voir ?

- 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.

5. 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 !



Le vide n'est pas vide

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, une pièce de 5 francs, 5 pièces de 1 franc 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 de la pièce de 5 francs et la sortie des 5 pièces de 1 franc, son capital augmente de 5 francs.

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 de francs qui n'existerait pas juridiquement, mais qui pourrait servir, par exemple, à garantir des emprunts qui, eux, seraient en francs 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.

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...

Rien
Rien
Rien
Rien
Rien
Rien



Rien
Rien
Rien
Rien
Rien
Rien

R

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 !



Plus ça change, plus on dit la même chose ? Oui, mais les mots ont un sens différent. Ce à quoi pensent aujourd'hui les physiciens en parlant du "VIDE" est bien différent de ce qu'entendaient les philosophes par ce mot il y a 2500 ans !

Qui peut prétendre créer l'être à partir du néant ? Pourtant, une somme d'argent peut être obtenue à partir de rien... si l'on accepte de créer en même temps une dette équivalente.

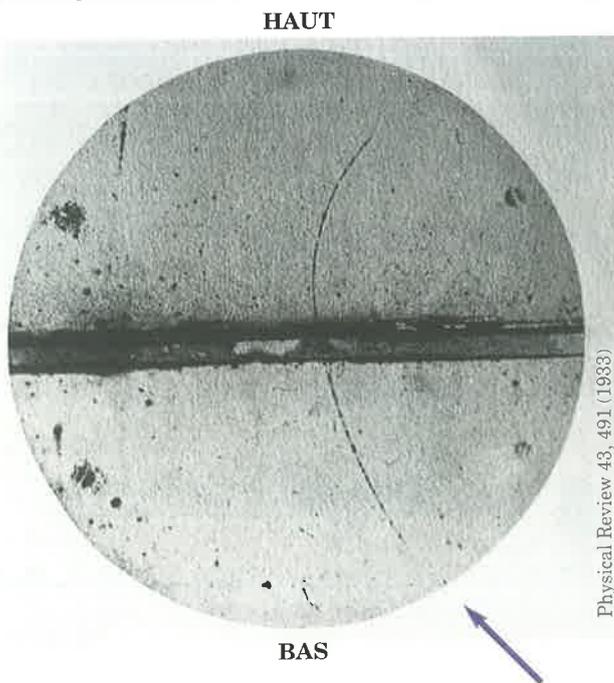
Attention ! Toute image a ses limites, toute métaphore contient ses pièges, tout langage peut être source de malentendus. Cela est particulièrement vrai dans cette leçon sur le "vide créateur" où l'on tente de décrire ce dont il n'est pas possible de parler...

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.

Découverte de l'électron positif

Cette trajectoire est célèbre dans l'histoire de la Physique des particules, elle date de 1932. C'est la preuve expérimentale de l'existence d'un électron positif, un antiélectron, car sa trajectoire soufflée par un aimant correspondait parfaitement à celle d'un électron ordinaire (négatif), mais tournait dans le sens opposé.



Le détecteur (dit "chambre à brouillard") était un récipient de quelques centimètres de haut dans lequel de la vapeur se condensait en formant des gouttelettes le long de la trajectoire de la particule.

La bande centrale est un écran de plomb vu par la tranche. En le traversant, l'électron positif a perdu de l'énergie. Cela l'a rendu plus sensible au champ magnétique présent : sa trajectoire est plus incurvée après son passage à travers cet écran qu'avant.



Cet électron positif est né dans la cascade d'événements déclenchés par l'interaction d'une particule venant du cosmos ("rayon cosmique", voir page 69) avec l'atmosphère terrestre.

2. Le vide et le début de notre Univers (le "Big Bang")

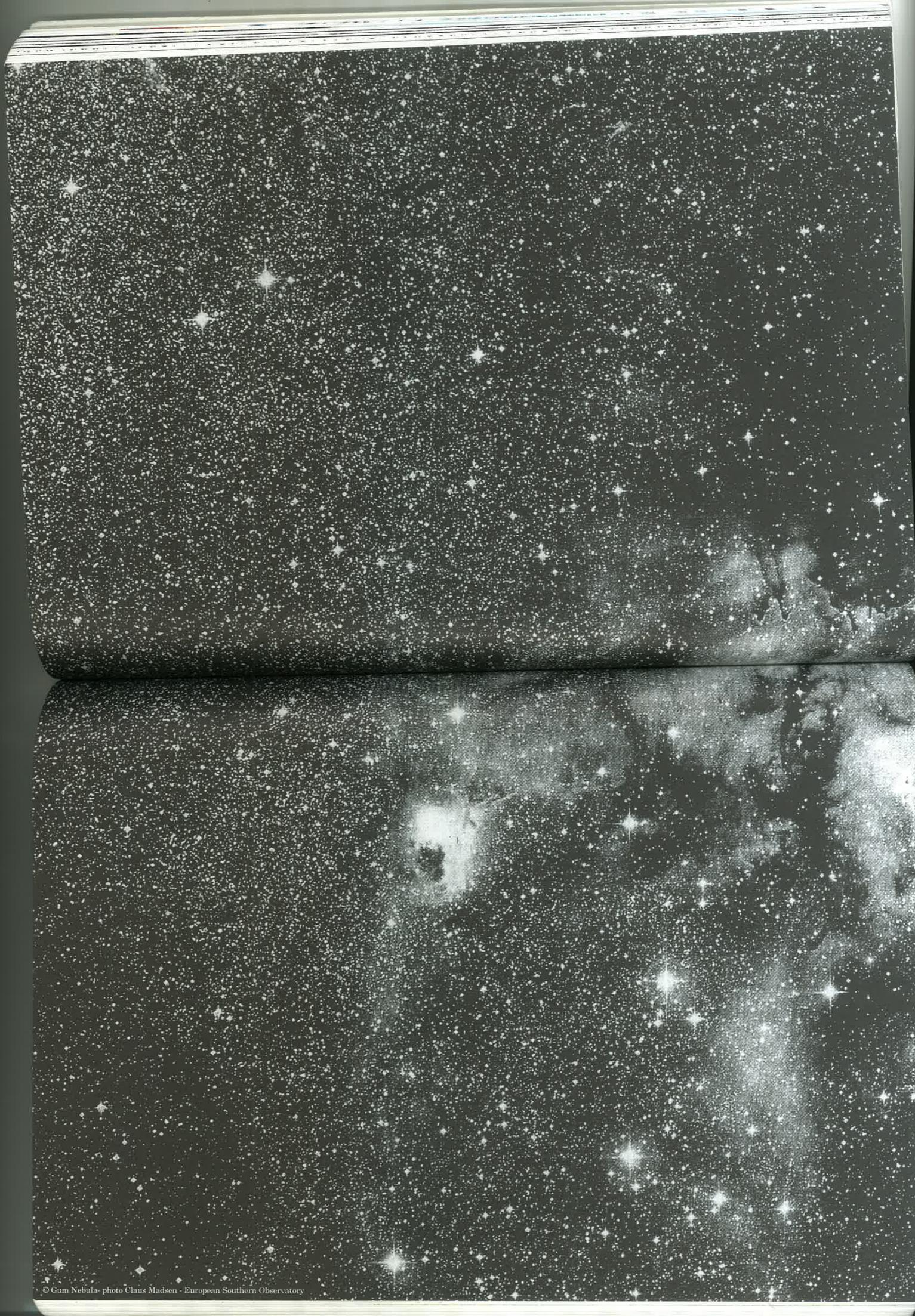
Tentons de résumer en quelques lignes l'histoire de l'Univers, selon une hypothèse qui concerne directement le vide et l'antimatière. Ce serait un "vide primordial" (hors de l'espace et du temps ?) qui aurait, au cours d'une fluctuation d'énergie très particulière, offert à l'Univers — qui n'existait 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 !

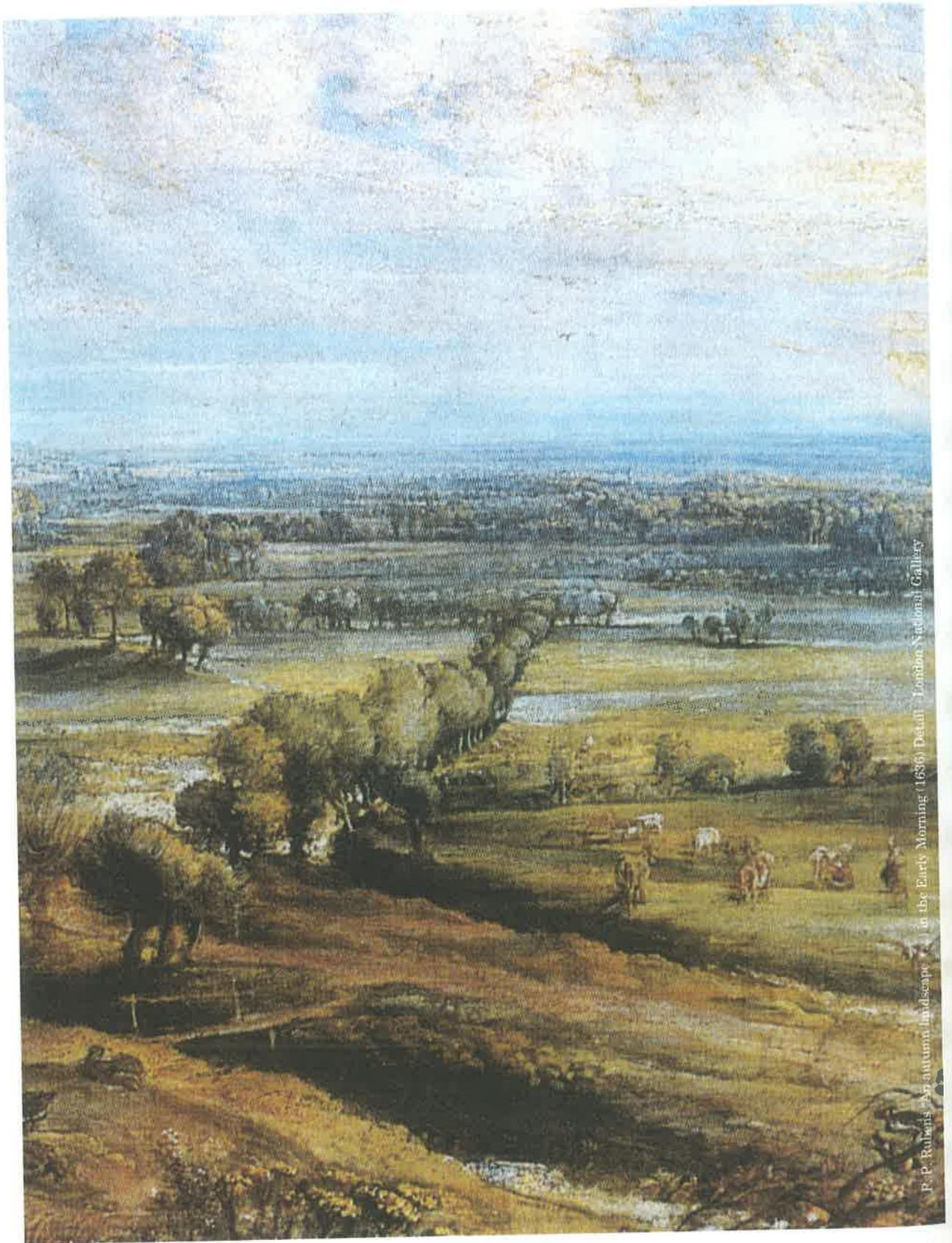
Très vite, c'est à dire en moins d'un milliardième de milliardième de millionième de seconde, cette énergie s'est condensée en particules et en antiparticules qui se sont annihilées les unes les autres ou désintégrées en cascade pour finalement donner naissance à un résidu de particules stables, parmi 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 anti-quarks. 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 coeur 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...

Double page suivante : portion de la Voie Lactée. Les points blancs sont des étoiles. Les zones claires sont des nuages de gaz et les régions sombres des nuages de poussière. Gaz et poussières proviennent d'une étoile qui aurait explosé il y a quelque 10.000 ans.





P. P. Rubens - An autumn landscape - 1636 - Oil on canvas - London, National Gallery

Personne ne sait ce qu'il y avait avant qu'existe l'espace qu'occupe ce paysage... ni où, ni pourquoi se sont créés, à partir d'énergie, les particules qui le constituent... ni de combien d'étoiles différentes proviennent les atomes dont sont faits les arbres, les montagnes, les vaches, les oiseaux de ce tableau ... et le lecteur ou la lectrice qui en cet instant le regarde.

$$\int \mathcal{D}X \mathcal{D}\psi \exp \frac{1}{4\pi\alpha'} \int d^2\sigma g_{ij}(X) \partial_\mu X^i \partial^\mu X^j + \text{ferm} + \text{dil}$$

top \rightarrow CFT, $\beta_{ij}(g, \Phi) = \beta_\Phi = \beta_B = 0$

$\beta_{ij}(g, 0) = \frac{1}{2\alpha'} R_{ij}(g) + \dots$
 i.e. we do Einstein eqns. in T

$R_{ij} = \frac{1}{2} g_{ij} R$

top. with $B_{ij}, \Phi +$
 RR-fields yields
 bos. sector of the st

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 - \frac{dr^2}{1 - 2M/r} + r^2 d\Omega^2$$

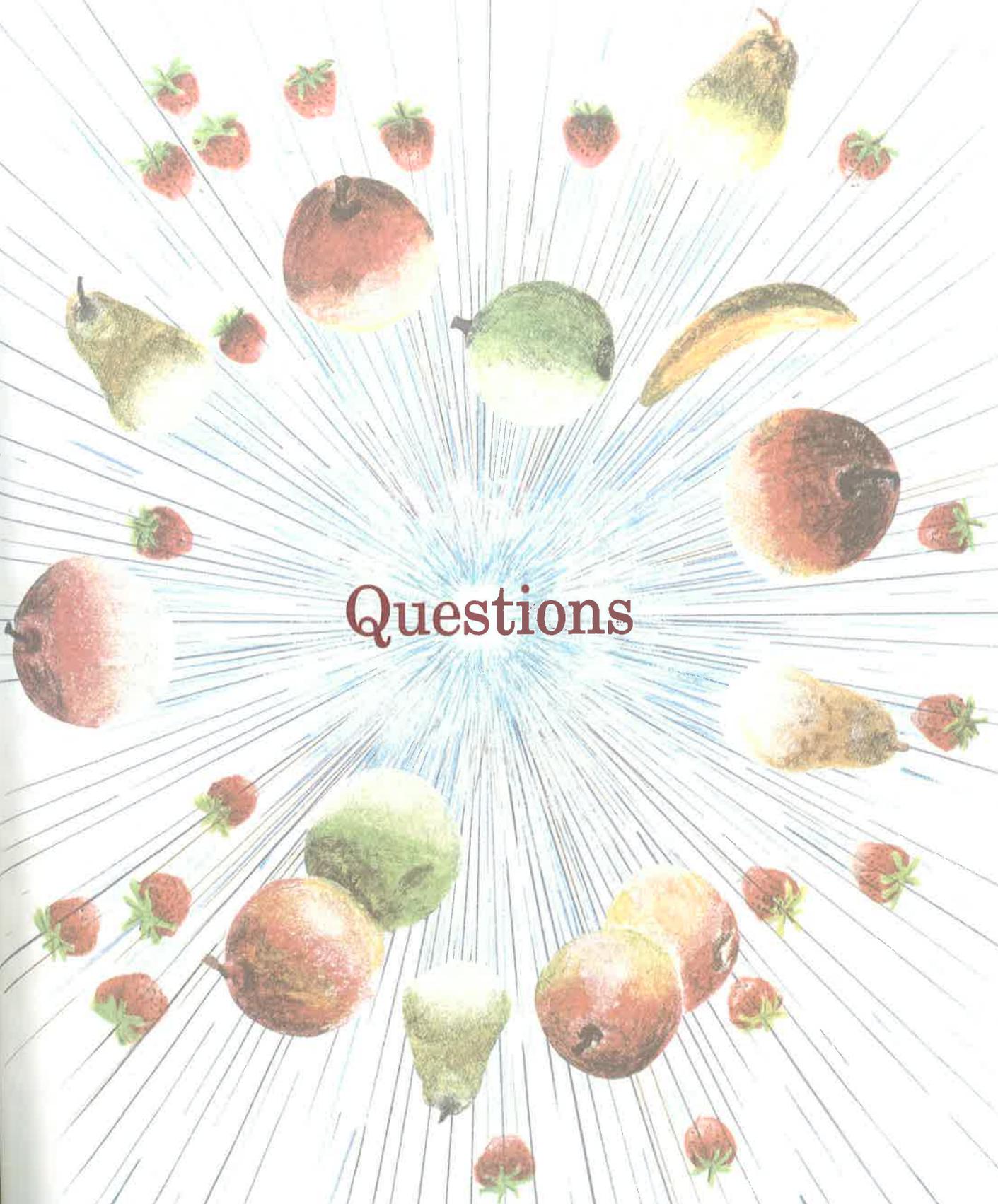
La Physique des particules permet de remonter le cours du temps et d'étudier de quoi était fait le monde avant même la formation des protons et des électrons ; elle est déjà parvenue à remonter jusqu'à un millième de milliardième de seconde après le Big Bang. Comme on a pu le constater, le langage courant 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.

Questions



Galileo Galilei (1564-1642)
 Otto von Guericke (1602-1686)
 Charles Coulomb (1736-1806)
 Hans C. Oersted (1777- 1851)
 Kamerlingh Onnes (1853-1926)
 C.T. R. Wilson (1869-1959)

Racines

Galileo Galilei (1564-1642)
 Otto von Guericke (1602-1686)
 Charles Coulomb (1736-1806)
 Hans C. Oersted (1777- 1851)
 Kamerlingh Onnes (1853-1926)
 C.T. R. Wilson (1869-1959)



Louis Pasteur (1822-1894)
 Marie Curie (1867-1934)
 Albert Einstein (1879-1955)
 Niels Bohr (1879-1962)
 Werner Heisenberg (1901-1976)
 Paul Dirac (1902-1984)
 Erwin Schrödinger (1887-1961)
 Wolfgang Pauli (1900-1958)
 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 Dirac (1902-1984)

- 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 découverte des rayons cosmiques (V.F.Hess)
- 1911 découverte du noyau (E. Rutherford)
- 1927 idée de l'explosion initiale de l'Univers (G.Lemaître)
- 1928 prévision 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 prévision théorique de l'existence du neutrino (W.Pauli)
- 1932 découverte du neutron (J.Chadwick)
- 1932 premier accélérateur à protons (J.Cockcroft et E.Walton)
- 1932 preuve expérimentale de l'existence de l'antiélectron (C.Anderson)
- 1935 prévision 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.Veksler)
- 1964 première théorie du Big Bang basée sur des faits précis (G.Gamow)
- 1964 prévision théorique de l'existence des quarks (M.Gell-Mann et G.Zweig)

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.

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).

Comment tout cela a-t-il commencé ?

La Physique des particules a débuté avec le XXe 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.



Physikalische Blätter (18, 1962)

V. F. Hess (en casquette foncée), en 1911, au départ d'une de ses ascensions qui le menèrent à plus de 5000 m d'altitude et confirmèrent l'origine extra-terrestre des rayons cosmiques.

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 XXe 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.

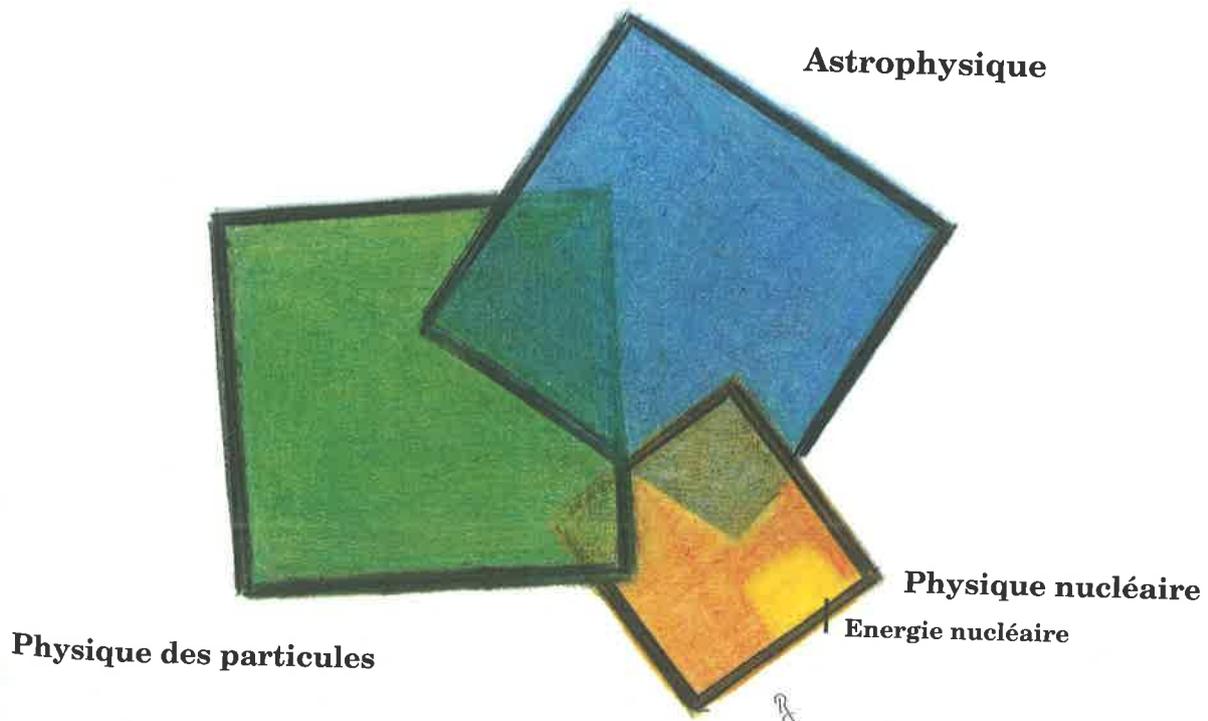
En 1952, les physiciens des particules fondèrent le CERN, afin de disposer, grâce à un accélérateur énorme pour l'époque (180 m de diamètre), de protons rapides que la Nature ne leur prodiguait qu'en très petites quantités sous forme de "rayons cosmiques". Comment appeler ce centre de recherches sinon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

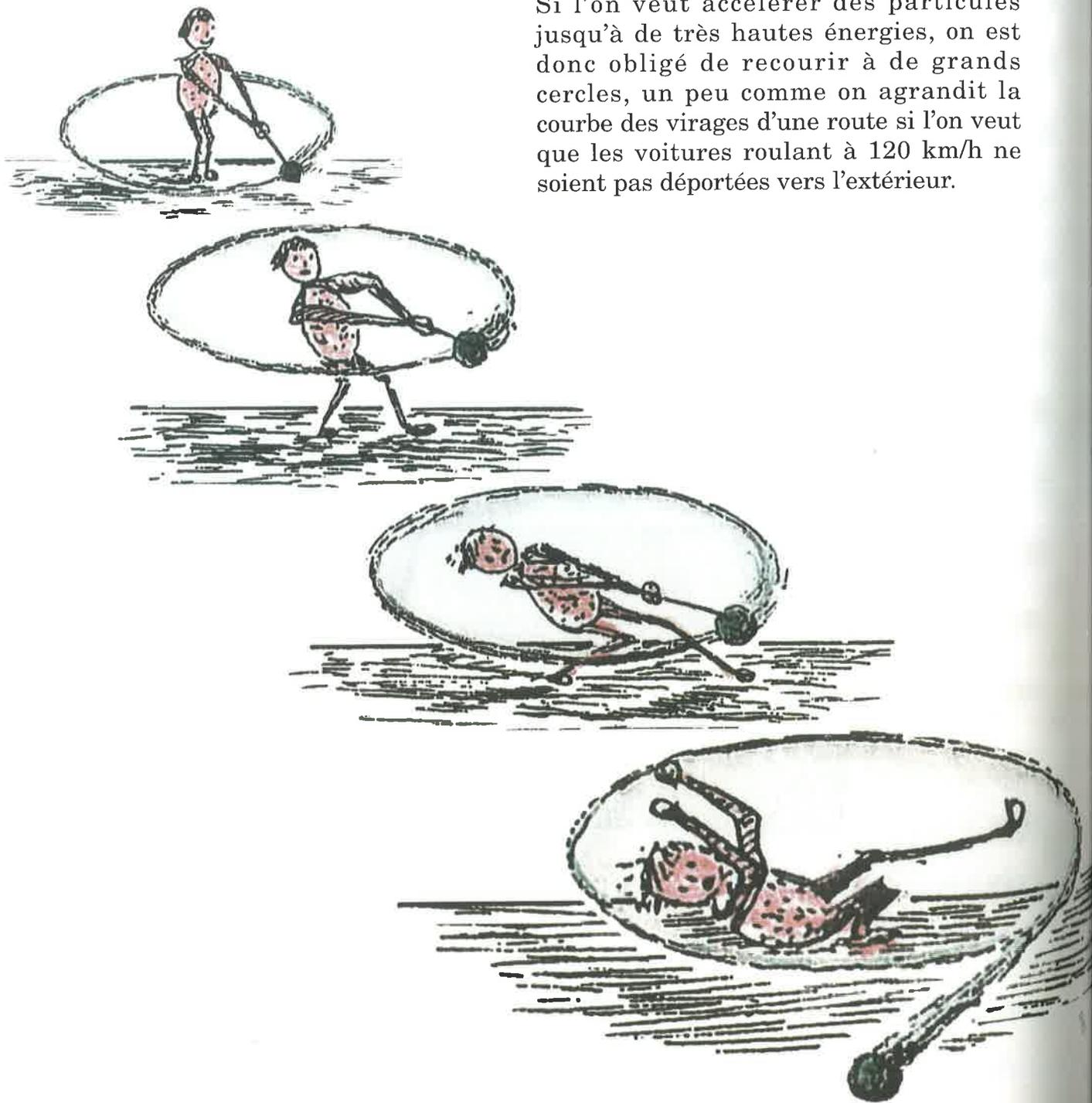


Pourquoi les accélérateurs sont-ils si grands ?

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.

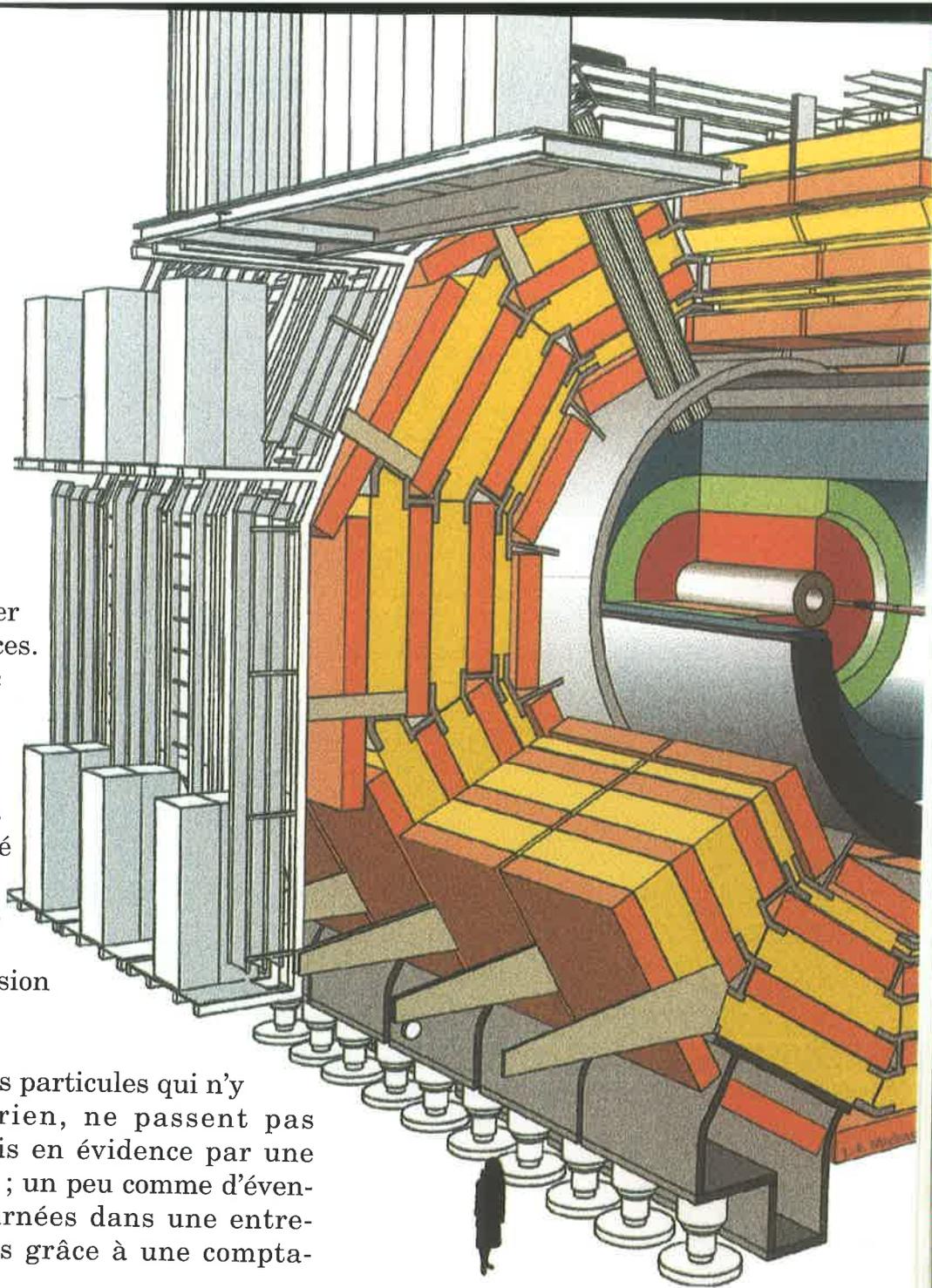
Si l'on veut accélérer des particules jusqu'à de très hautes énergies, on est donc obligé de recourir à de grands cercles, un peu comme on agrandit la courbe des virages d'une route si l'on veut que les voitures roulant à 120 km/h ne soient pas déportées vers l'extérieur.



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.

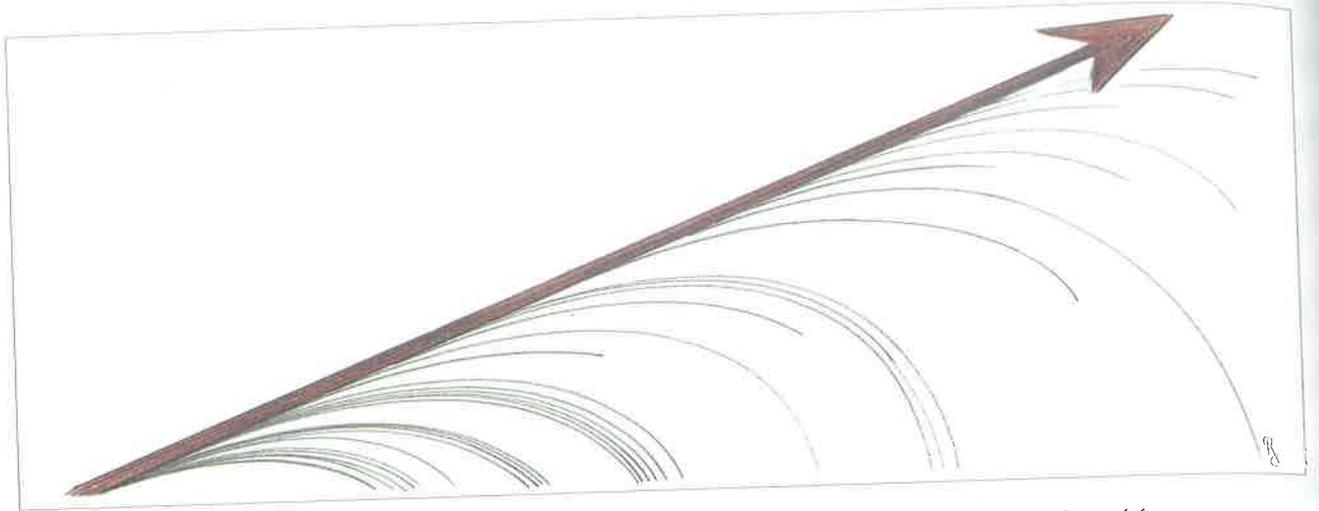


Les déductions à propos des pingouins de la page 35 auraient-elles été possibles si nous n'avions eu à notre disposition qu'un tout petit échantillon de leur trajet ?



Et dire que les premiers détecteurs tenaient dans le creux de la main et faisait simplement "clic" quand une particule les traversait....

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.

Instituts et Universités avec lesquels le CERN collabore au moment de mettre sous presse (par ordre alphabétique des pays).

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 (Ξ), Lambda (Λ), Omega (Ω), Sigma (Σ), Delta (Δ), méson pi (π), méson rho (ρ), quark u, quark d, muon (μ), neutrino (ν), W^+ , W^- , Z^0 , boson de Higgs (qui n'a pas encore été découvert expérimentalement mais qu'on cherche activement, car 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 (anti-électron, 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 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)

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.



ArSciMed - SRL

L'intérieur d'un proton : en disant que le proton est composé de deux quarks u et d'un quark d, on ne dit qu'une partie de la vérité ! Il ne faut pas oublier les gluons échangés entre ces trois quarks. Leurs trajectoires sont suggérées par les "rayons" qui émanent des quarks dans la figure ci-dessus. La réalité est encore bien plus complexe : l'intérieur d'un proton est essentiellement un océan en furie où naissent, bouillonnent et s'annihilent constamment un nombre immense de quarks et d'antiquarks de toutes sortes. Le bilan de ces catastrophes aussi éphémères qu'innombrables laisse à chaque instant apparaître un solde fixe de deux quarks u et d'un quark d. C'est ce qui permet de ne pas mentir en disant que le proton est composé de deux quarks u et d'un quark d...

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...

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 !

Terre



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.

- Lune

La Terre, la Lune et leur distance sont représentées ici dans leurs proportions correctes.

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 !

Terre



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.

La Terre, la Lune et leur distance sont représentées ici dans leurs proportions correctes.

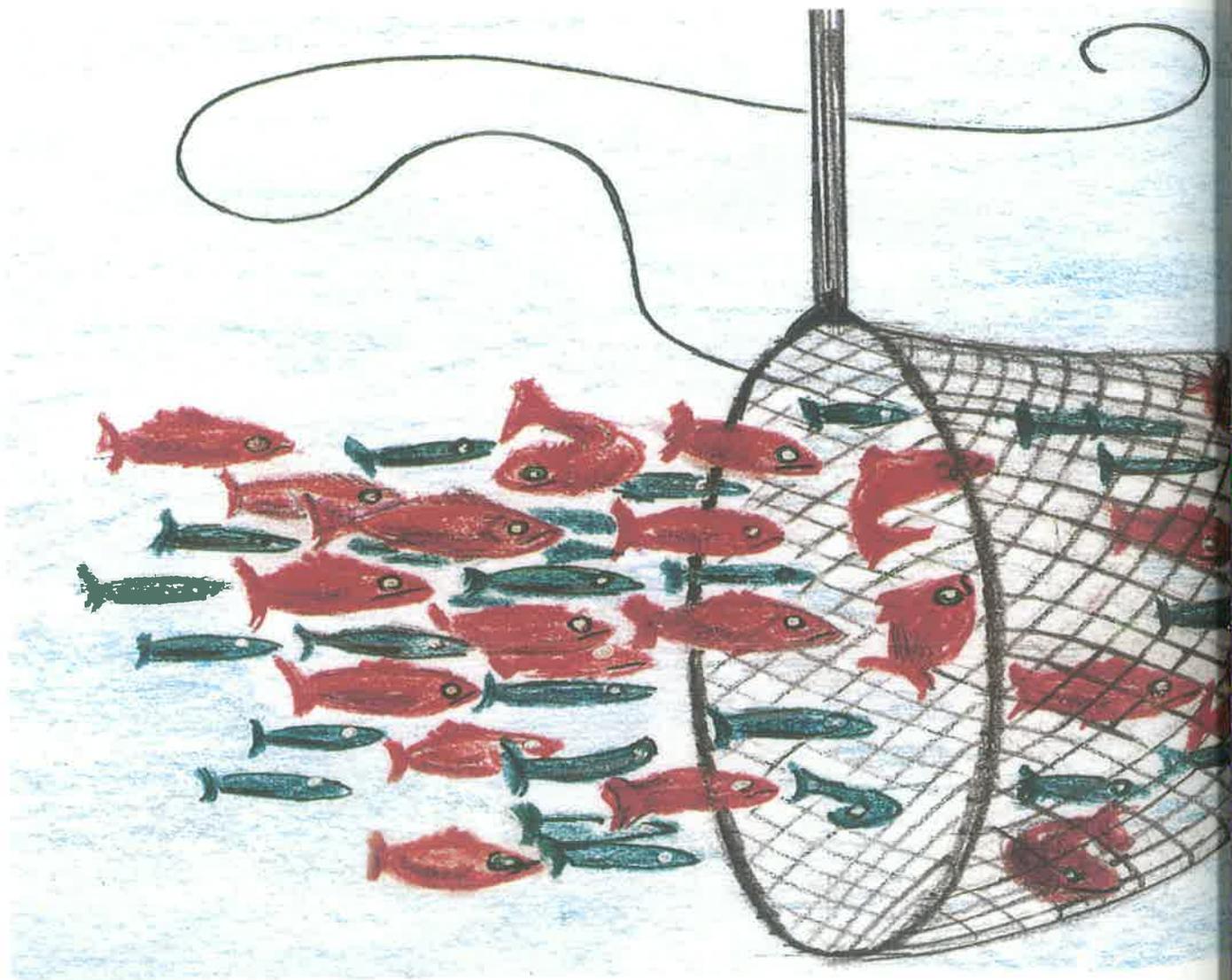
Comment peut-il exister des objets colorés alors qu'ils sont faits de particules qui ne sont pas colorées ?

“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 de poissons.

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.

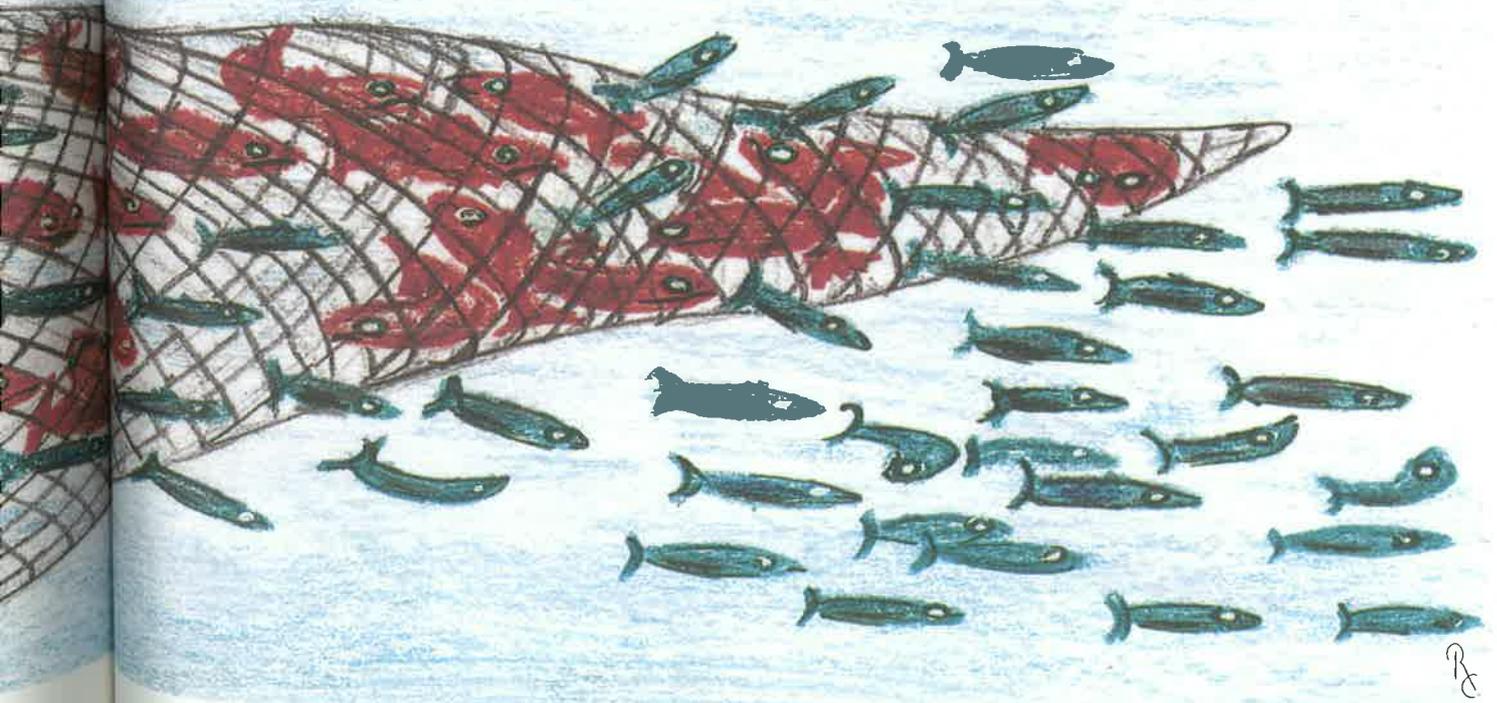
Les particules stables (protons, neutrons et électrons) forment des structures - les atomes - qui souvent, à leur tour, s'assemblent en arrangements plus complexes : les molécules.

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

certaines 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 dissenter 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 ?»*





Je ne vois que ce qui nous arrive
de la surface des étoiles.

Moi, d'ici, j'observe ce qui se
passe au coeur des étoiles.

“Dis-moi où tu es et je te dirai ce que tu peux voir et ce que tu ne peux pas voir.”

Que sont les neutrinos, ces particules qui ne font "rien" et qui nous permettent pourtant de sonder le coeur 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.

Étudier 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.

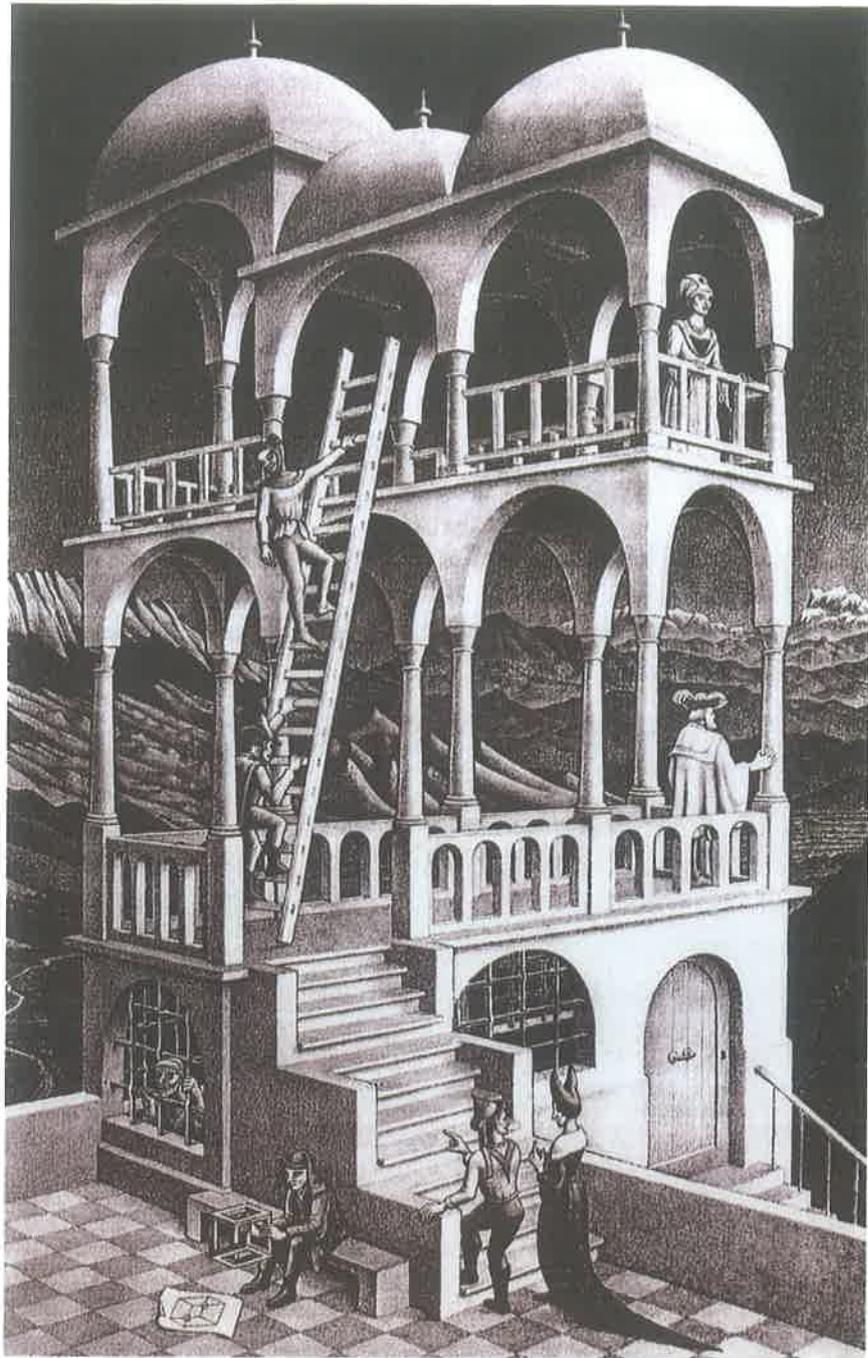
Les étoiles (et donc le Soleil) produisent dans leurs régions centrales beaucoup de neutrinos qui s'en échappent en ligne

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 !

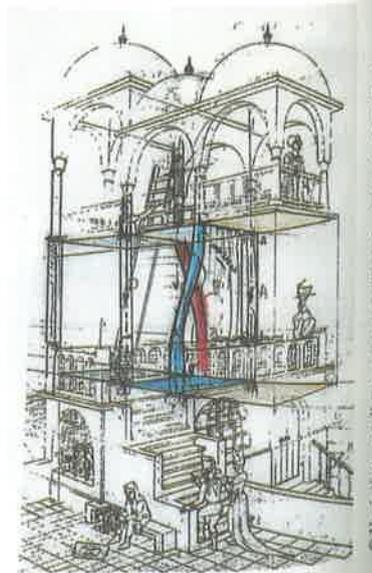
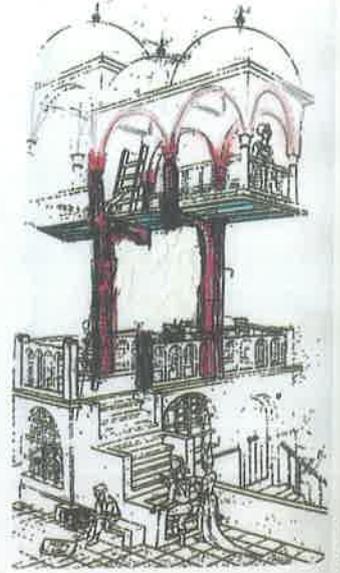
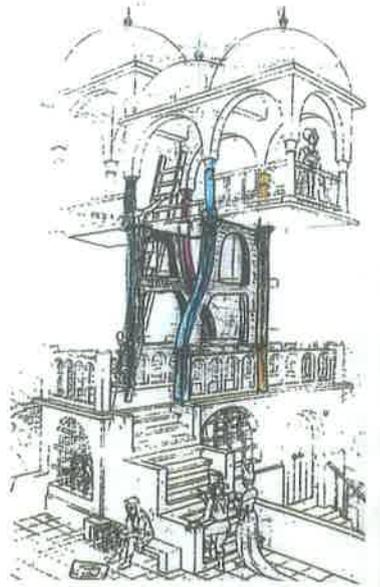
Regardons un instant l'ongle d'un de nos doigts : plus de 200 milliards de neutrinos le traversent chaque seconde, autant qu'il y a eu d'êtres humains depuis l'apparition de l'Homme, autant qu'il faudrait aligner de grains de sable fin, côte à côte, pour faire le tour de la Terre...

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 (États-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.

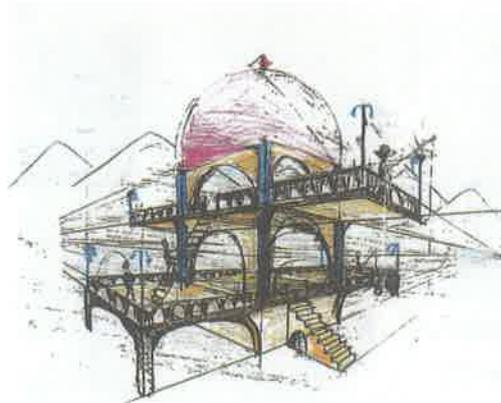
Les neutrinos ne cessent de nous lancer des défis tant du point de vue théorique qu'expérimental. S'il est un domaine de la Physique des particules qui est resté en permanence d'actualité depuis plus d'un demi-siècle, c'est bien celui-ci.



© Le Belvédère de M.C. Escher, Lithographie (1958) - M.C. Escher Foundations, The Hague



© Variations par l'auteur à partir d'une © étude de M.C. Escher pour "le Belvédère".



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...

Malgré de nombreuses tentatives, la synthèse est pour l'instant impossible entre la Mécanique Quantique et la Relativité Générale, deux chapitres de la Physique pourtant parfaitement cohérents en eux-mêmes. Est-ce la préfiguration d'impasses futures plus définitives ?

index et commentaires

- accélération
- aéroport ● aimants ● atome ●
- baryonique ● bibliographie ● Big Bang
- coïncidence ● collisions ● concentration
- cosmologie ● détecteur ● détecteurs et
- détectives ● dimensions et phénomènes ● eau
- comprimée ● électronvolt ● escargot ●
- fromage ● GeV ● grossissement ● interpré-
- tation transcendante ● laboratoires ● LEP
- LHC ● néant ● particule ● parti-
- cules ● symétrie ● Terre-Lune ●
- Tout ● vide ● Voie Lactée ●
- zéro, etc.

accélérateur à pomme de terre (fig.) 27

accélérateur considéré comme source artificielle de rayons cosmiques 67

accélérateur LEP dans son tunnel (fig.) 31

accélérateur, effet de la Lune (marées terrestres) sur l'accélérateur 30

accélérateur, "longueur" d'un accélérateur 29

accélérateur, schéma simplifié (fig.) 29

accélérateurs, pourquoi sont-ils si grands ? (fig.) 72,73

accélération

• *Dans les accélérateurs les particules atteignent une vitesse très proche de celle de la lumière (300.000 kilomètres à la seconde). Une voiture de course capable de passer en 3 secondes de zéro à 100 kilomètres à l'heure, devrait, pour approcher cette vitesse, maintenir son accélération foudroyante nuit et jour pendant... une année !*

accélérer, accélérer les électrons, 27-31

aéroport, vue aérienne du CERN, 10-11

• *La piste de l'aéroport au premier plan permet de faire un exercice d'interprétation de traces en observant près des ses deux extrémités celles des pneus des avions qui y ont atterri (voir pages 34 et 35) : si l'on ne savait pas qu'il s'agit de la piste d'un aéroport, comment ces traces seraient-elles interprétées ? Et le sachant, quelles conclusions peut-on tirer de leur examen attentif, par exemple sur les consignes données aux pilotes ou sur les vents dominants à Genève ? (Les avions atterrissent face au vent.)*

aimants "souffleurs" dans un accélérateur (fig.) 28-30

aimants, l'action des aimants sur les particules chargées, principe des "aimants souffleurs" (fig.) 28

• *La façon dont une particule est "soufflée" dans un champ magnétique est très particulière : voici ce que pourrait être l'interview d'une particule interrogée à ce sujet :*

- *Vous me paraissez être une particule chargée, que ressentez-vous quand vous passez entre les pôles d'un aimant ?*
- *Je sens une force qui me fait constamment dévier du même côté.*
- *Mais alors votre trajectoire ne sera plus une ligne droite ?*
- *En effet, ma trajectoire sera une courbe, un arc de cercle pour être précis.*
- *Pourrait-il vous arriver de décrire un cercle complet ?*
- *Oui, mais à moins d'être dans le vide parfait ou qu'on me fournisse de l'énergie, je vais perdre peu à peu mon élan et comme la force qui me fait dévier, elle, ne change pas, je serai de moins en moins capable de lui résister.*
- *Quelle forme prendra alors votre trajectoire ?*
- *Celle d'une suite d'arcs de cercle de plus en plus serrés, c'est à dire d'une spirale.*
- *Il y a donc des particules qui décrivent des spirales dans les détecteurs ? Cela doit être exceptionnel !*
- *Pas du tout, regardez par exemple à la page 32, vous y verrez les traces en spirale de particules de plus en plus fatiguées.*
- *Vous en parlez avec un certain dédain, pourquoi ?*
- *Parce que, par politesse, dans cette interview j'ai fait semblant d'être une particule chargée, ce que je ne suis pas. Moi, je me moque des champs magnétiques, je vais toujours tout droit, rien ne me dévie, rien ne m'arrête !*
- *Qu'êtes vous donc ?*
- *Un neutrino !*

animaux cités : boeufs 16, chats (fig.) 34, chevaux 16, chien 73, éléphant 15, escargot 45, fourmi 22, 23, (fig.) 25, microbes 18, mouches 18, (fig.) 19, papillons 24, pingouins 35, poissons 81, serpent 51, souris (dos couverture), vaches 64

antiélectrons (= électrons positifs, = positons.) 59-60

antimatière et antiparticules 58-61

antiparticules 58-61

arithmétique, un petit nombre divisé par un très petit nombre donne un grand nombre 17

astuce, l'astuce qui permet d'obtenir de hautes concentrations d'énergie 17

atome agrandi dix millions de milliards de fois : il a alors quelque 2000 kilomètres de diamètre, (fig.) 22.

• Les atomes ont des dimensions mieux définies que nos particules. Cependant leur grandeur réelle varie suivant leur nature et les circonstances dans lesquelles ils se trouvent. La valeur adoptée pour nos calculs est de deux dix-millionièmes de millimètre.

atomes et vide jadis et aujourd'hui (fig.) 57

atomes, leur dimension (voir ci-dessus "atome agrandi")

automate changeur de monnaie 55

avenir, où va la Physique des particules ? (fig.) 86-87

baryonique, la charge baryonique est un exemple de charge non électrique 47

Bibliographie

• Dans cette brochure on ne trouvera pas, comme il est d'usage, une liste de livres "pour aller plus loin". En effet, il nous a paru imprudent de recommander au lecteur n'ayant pas de formation scientifique des lectures plus poussées sans connaître sa formation, ses intérêts, le temps et l'énergie qu'il est prêt à y consacrer et surtout sa capacité de ne pas perdre confiance quand il se trouve devant un mot ou une explication qu'il ne comprend pas.

Nous espérons l'avoir conduit à la gare... mais nous ne savons pas quel voyage il veut entreprendre, ni même s'il veut monter dans un train... Après tout, une gare, ça peut aussi être intéressant !

Big Bang 61

• Cette expression se réfère au voisinage immédiat de l'instant zéro de notre Univers. Celui-ci était alors dans un état indescriptible et inimaginable : qui peut concevoir l'espace, le temps, la matière et le vide créateur mélangés comme seraient mélangés par un pinceau fou quatre pots de peinture de couleurs différentes et cela dans un volume des milliards de milliards de fois plus petit que celui d'un électron, volume qui contenait pourtant la masse totale de l'Univers ?

• D'autres hypothèses que celle évoquée à la page 61 ont été proposées. Dans l'une d'elles, l'état décrit ci-dessus serait la conséquence d'un phénomène qui se serait produit juste avant le Big Bang, par exemple l'implosion d'une masse énorme, colossale, si lourde que rien n'avait pu s'opposer à ce qu'elle s'effondre sans fin sur elle-même.

bougie, faire cuire un oeuf avec une bougie 13

bulles, voir "chambre à bulles"

calculs, chiffres manipulés en une seconde par un gros détecteur (fig.) 40-41

CERN, origine de ce mot 70

CERN, vue d'avion des diverses installations (fig.) et quelques données à son sujet 10, 11

chambre à brouillard (fig.) 60

chambre à bulles, traces dans une chambre à bulles (fig.) 32

chambre à bulles, trajectoire de 15 particules qui y sont créées en un point précis (fig.) 9

changeur de monnaie qui fait des "bénéfices" 55

charge baryonique, une charge non électrique 47

charge électrique, la charge électrique se conserve dans la désintégration des particules, 45, (fig.) 46-47

charge électrique, la notion de charge électrique 27

chats contemplant les traces d'un ivrogne (fig.) 34

chiffres manipulés en une seconde par un gros détecteur (fig.) 40-41

chose, une particule n'est pas une chose 52

classification des particules 76

• Une classification plus fine que celle que nous avons donnée place les particules des classes I et II dans un tableau de 4 lignes et de 3 colonnes dont toutes les cases sont occupées par une et une seule particule :

électron	mu (muon)	tau
neutrino-e	neutrino-mu	neutrino-tau
quark u	quark c	quark t
quark d	quark s	quark b

Chaque colonne représente une "famille". On a démontré au CERN qu'il ne pouvait exister que trois "familles". Cette contrainte joue un rôle important dans l'explication de ce qui s'est passé dans les premiers instants de l'Univers.

Les centaines de particules correspondant aux combinaisons de quarks et d'antiquarks obéissent aussi à des classifications simples.

coïncidences

• *Il aurait suffi que les protons soient un peu plus lourds, que la lumière soit un peu plus lente, que les électrons ne se repoussent pas exactement avec la même force, que les gluons aient une portée légèrement plus courte et que quelques autres constantes et lois de la Nature soient à peine différentes... pour que non seulement la vie ait été impossible, mais l'existence des atomes eux-mêmes.*

Le concours de circonstances qui a permis l'apparition de l'intelligence est-il le fait d'un coup de hasard exceptionnel ? L'ajustement extraordinaire des lois et des constantes de la Nature pour permettre la vie est-il réellement si extraordinaire ? Ne sera-t-il pas un jour expliqué comme une conséquence logique de quelques principes généraux simples ? Ou faut-il y voir une intention cachée ? Un "Créateur" aurait-il fixé les constantes et les lois de la Nature il y a quelques 12 milliards d'années en se disant qu'avec de telles valeurs et de telles lois, il serait inévitable qu'un jour, sur une planète ou une autre, apparaissent des êtres intelligents qui s'efforceraient de démontrer qu'Il n'existe pas ? Ou plus simplement, y a-t-il un nombre colossal d'univers, chacun avec des constantes et des lois fondamentales différentes ? Nous appartiendrions alors à l'un des rares d'entre eux où la vie et l'intelligence avaient quelques chances d'apparaître...

collaboration internationale (fig.) 75

collisions, les quatre sortes de collisions 7

• *Attention ! L'expression "collision du quatrième type" n'existe que dans cette brochure ! Elle y a été imaginée pour désigner un type de collision qui n'a pas de nom particulier : celle où de l'énergie se condense en matière.*

combien y a-t-il de particules différentes ? 76

concentration d'énergie, l'astuce 17

concentration de l'énergie dans la collision de deux quarks 24

concentration et les fractions arithmétiques 17

concentration, exemples où elle compte plus que la quantité 14

• *Encore un exemple tiré de la vie quotidienne : la pression. En appuyant la pointe d'un crayon sur du papier, on y exerce une pression dix fois plus élevée (une quarantaine de kilos par centimètre carré) que celle qu'exercent les pneus d'un train routier de 30 tonnes sur la chaussée ! Vérification : poser une feuille de papier carbone sur une page blanche, déposer le tout sur une planche lisse et faire passer par dessus une voiture ou un camion. La pression n'est pas assez forte pour que le pneu y laisse son empreinte. Mais si l'on écrit sur le carbone avec un crayon, celui-ci laissera sur le papier blanc une trace bien visible ! Ici encore "peu mais très concentré" aboutit à des surprises...*

concentrer, que signifie au juste ce terme ? 16

connaissances, accroissement des connaissances 35

conservation de la charge électrique et d'autres "charges", 45 (voir aussi sous "symétrie")

conservation de la charge électrique, cliché de traces de la désintégration d'une particule neutre dans une chambre à bulles (fig.) 47

conservation d'une charge "non électrique", un exemple (fig.) 46

corps humain et particules produites par les accélérateurs

• *La sarabande frénétique et incassante des quarks, des antiquarks et des gluons telle qu'elle est esquissée à*

la page 75 a lieu dans tous les nombreux (un nombre de 28 zéros !) protons et neutrons de notre corps. Ce ne sont donc pas seulement des quarks u et d et des électrons que nous portons en nous (ou plutôt qui nous portent), mais encore une multitude de paires évanescents d'à peu près toutes les particules que les accélérateurs géants ont fait découvrir aux physiciens ces dernières décennies... (voir leçons 8 et 9)

cosmiques, rayons cosmiques 60, 66-67

couleur, un fil incolore peut colorer un banc de poissons 83

création de matière 7, (fig.) 8

cube, le volume d'un cube diminue très vite quand ses dimensions décroissent 24

découverte de l'électron positif (= positon = antiélectron) 60

désintégration d'une particule représentée par des objets familiers (fig.) 42

désintégration des particules, des règles qui sont respectées 43-47

détecter les particules 32-41

détecteur, chiffres manipulés en une seconde par un gros détecteur (fig.) 40-41

détecteur, les moyens utilisés pour détecter les particules 38

• *Suivant l'époque, les trajectoires des particules ont été visualisées à l'aide de diverses techniques : sous forme de traînées de brouillard (voir page 60), de traces dans des émulsions photographiques, de chapelets de bulles (voir pages 9 et 32), d'étincelles électriques, d'effets lumineux, de perturbations électriques dans des gaz ou des solides. Aujourd'hui, sauf rarissimes exceptions, les détecteurs sont conçus pour être directement reliés aux ordinateurs, afin que le*

dépouillement des données soit effectué automatiquement et à très grande vitesse (voir pages 36-41).

détecteur, trajectoires après la collision de protons de très haute énergie (simulation LHC) (fig.) 39

détecteurs et détectives 33

• *Ces deux termes ont la même origine : ils viennent du latin "detegere" qui signifie "enlever ce qui cache", "mettre à jour".*

détecteurs (fig.) 36, 37, 38

détecteurs, pourquoi sont-ils si énormes ? (fig.) 73

détecteurs, réduction des données obtenues jusqu'à ce qu'elles soient interprétables (fig.) 38

devinette à propos d'une tasse 49

dimensions et phénomènes. Les phénomènes changent quand les dimensions considérées changent (fig.) 49-53

• *Notons que si la forme que prend l'eau change avec la dimension des tasses dans lesquelles on la met (p.50), à l'échelle des cellules vivantes (quelques centièmes de millimètre), une nouvelle propriété apparaît : l'eau est incroyablement agitée et cela en permanence ! C'est le "grouillement" auquel il est fait allusion à propos de la notion de température (p.80).*

Cette agitation extrême permet aux molécules indispensables à la vie de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une cellule, de changer de place et d'orientation des milliers et même des millions de fois à la seconde jusqu'à ce qu'elles atteignent l'endroit où elles doivent se fixer pour, par exemple, participer à une réaction ou transmettre un signal. Elles se comportent un peu comme des clés qui chercheraient frénétiquement leur serrure au hasard.

durée de vie des particules (fig.) 44, 45

eau comprimée dans un dé à coudre 14

• *L'exemple est extrême et fera sourire les physiciens : personne ne peut dire quelles seraient les propriétés de l'eau dans une telle situation ! Celles qui lui sont attribuées à la page 14 sont un pâle reflet de ce que serait la réalité...*

eau dans une cellule vivante, voir "dimensions et phénomènes"

électricité, attraction et répulsion électriques (fig.) 26, 27

électro-aimants 28

électron et fraise agrandis dix millions de milliards de fois (fig.) 25

électrons, bien que petits, leur présence se manifeste à distance 23

électrons, comment les accélérer ? 26-31

électrons, les électrons d'un atome agrandi dix millions de milliards de fois auraient la grosseur d'une fourmi 23

électrons, la raison de leur sensibilité aux forces électriques 27

électronvolt : c'est l'énergie d'un électron qui franchit une différence de tension électrique de 1 volt.

• *C'est une quantité d'énergie extrêmement faible à notre échelle, mais pas à celle des particules ! Un électron qui franchit 1,5 volt (voir page 27) possède une vitesse de 1200 kilomètres à la seconde et ceux qui sont accélérés dans notre accélérateur à pomme de terre, où la tension entre le clou et la boucle de cuivre est d'environ un demi volt, vont déjà à une vitesse qu'aucun objet à notre échelle ne peut atteindre ! Un milliard d'électronvolts se nomme Giga-électronvolt, (voir "GeV").*

éléphant et la loupe de Tintin (fig.) 15

énergie condensée et "poussière d'énergie" 7

énergie, elle se conserve mais se transforme dans une collision (fig.) 7

énergie nucléaire et Physique des particules (fig.) 71-71

énergie, son incroyable degré de concentration lors de la collision de deux quarks 24

énergie produite par l'humanité depuis que l'Homo sapiens existe 16

escargot 45

• On peut se représenter assez facilement un escargot qui chaque premier de l'an avance de 1 millimètre. Il est plus difficile de l'imaginer - ce qui revient au même pour notre exemple - avançant pendant toute l'année à la vitesse de 1 millimètre par an. A cette "vitesse", il franchirait un atome toutes les 6 secondes et si des neutrons étaient posés côte à côte, comme c'est le cas dans certaines étoiles, notre escargot en dépasserait quelque 30.000 à la seconde... C'est une autre façon de réaliser la petitesse des neutrons qui sont pourtant mille fois plus gros que les électrons et les quarks (voir p. 21).

étoiles, les neutrinos nous permettent de savoir ce qui se passe au coeur des étoiles (fig.) 84-85

étoiles, naissance, vie et mort des étoiles, ce qu'elles produisent pendant leur existence et à leur fin 61

étoiles, nuages de gaz et de poussières dans une portion de la Voie Lactée (fig.) 62-63

être et néant (fig.) 56-57 (voir "néant")

filts chargés négativement se repoussant (fig.) 26

forces et interactions 45, 76

fourmi ; un électron agrandi dix millions de milliards de fois aurait la grandeur d'une fourmi (fig.) 22

fraise géante grossie dix millions de milliards de fois (fig.) 25

fraises, pourquoi est-ce que ça ne marche pas avec des fraises ? 12-19

fromage

• Tout le monde sait plus ou moins que la matière est faite d'atomes et que ceux-ci ont au centre un noyau fait de protons et de neutrons. Cela n'empêche pas la plupart des gens d'être surpris que ce soit aussi vrai pour le fromage. Un kilo de fromage contient en effet 1/2 kilo de protons et 1/2 kilo de neutrons (les électrons sont si légers que leur contribution au poids est négligeable).

Suggestions :

1. Manger du fromage en pensant qu'il s'agit d'un mélange de protons, de neutrons et d'électrons...

2. Demander d'une voix forte en entrant dans une fromagerie s'il y a des neutrons dans le fromage mis en vente... et l'on sera fixé sur la culture scientifique du citoyen moyen en ce début du troisième millénaire...

futur, quel pourrait être le futur de la Physique des particules ? (fig.) 86, 87

Genève, gravure ancienne (fig.) 12

GeV, abréviation pour milliard d'électronvolts

• Ce terme n'a pas été utilisé dans cette brochure bien qu'il soit très employé dans le monde de la Physique des particules. Il signifie "Giga-électronvolt", c'est-à-dire un milliard d'électronvolts. C'est l'énergie d'un électron (ou de n'importe quelle autre

particule chargée) qui a été accélérée sous une tension de 1 milliard de volts. C'est l'énergie qu'il faut condenser pour créer un proton.

A notre échelle, c'est une quantité dérisoire : même si nos mouches étaient de minuscules moucheron ne pesant que 10 milligrammes et si elles entraient en collision à la vitesse de 1 centimètre à la seconde, l'énergie de leur collision serait d'une dizaine de GeV, c'est-à-dire dix milliards d'électronvolts !

Il ne faut pas se laisser impressionner à tort par le terme "milliard" : si les francs d'un pays valaient le milliardième des nôtres, une tasse de café coûterait des milliards de ces francs ; serait-elle chère pour autant ?

Un petit gravier lancé par un enfant de deux ans possède une énergie de quelque 50.000 GeV, c'est à dire de 50 mille milliards d'électronvolts ! Si la condensation de l'énergie en particules était une question de quantité et non de concentration, cet enfant battrait largement les plus gigantesques, les plus sophistiqués et plus coûteux accélérateurs du monde...

gluons 76, (fig.) 77

grossissement ; le grossissement qui a été utilisé tout au long de cette brochure est de dix millions de milliards de fois - un 1 suivi de 16 zéros.

• C'est ce grossissement qui donne aux atomes quelques milliers de kilomètres de diamètre, aux électrons et aux quarks la grandeur d'une fourmi et à une fraise une dimension telle qu'il faudrait à un boulet de canon plus de 5000 ans pour la traverser (voir pages 22-25).

humanité, toute l'énergie que l'humanité a produite ou utilisée depuis l'apparition de l'Homo sapiens (il y a environ 100.000 ans) concentrée dans le volume d'une fraise... 16

interaction (voir "forces")

interprétations "transcendantes" : Attention!

• Ce n'est pas parce que la physique de l'infinitésimal apparaît étrange où même irrationnelle dès qu'on tente de l'exprimer avec des mots familiers, qu'il est licite de s'en servir pour justifier n'importe quelle représentation du monde étrange ou irrationnelle. Avec des mots pris hors de leur contexte et rapprochés sans s'occuper de leur signification précise, il est facile de trouver des "convergences" entre "les dernières théories de la Physique" et n'importe quelle spéculation métaphysique ou même n'importe quelle élucubration fantasque à propos du monde !

Dialogue dans un train :

premier voyageur : Vous habitez Paris ?

deuxième voyageur : Non !

premier voyageur : Moi non plus !

deuxième voyageur : Quelle coïncidence, nous sommes donc voisins !

Les mêmes, un instant plus tard :

deuxième voyageur : Votre vision de la réalité vous apparaît-elle tout à fait raisonnable ?

premier voyageur : Non ! Je suis physicien.

deuxième voyageur : Quelle coïncidence ! Ma vision non plus n'est pas raisonnable, je suis penseur-écrivain-conférencier. Nos pensées convergent certainement !

troisième voyageur : Je suis éditeur. Votre conversation est très intéressante. Ecrivez donc un livre ensemble, je me charge d'en faire un best-seller !

invisible, rendre perceptible l'invisible 33-41

laboratoires de recherche en Physique des particules :

• *Les plus grands laboratoires dans le monde après le CERN : FERMILAB près de Chicago (USA), DESY près de Hambourg (Allemagne), SLAC en Californie (USA), KEK, Tsukuba (Japon). Parmi les Instituts et Universités cités à la page 75, plusieurs possèdent des accélérateurs.*

lac, on ne peut y faire cuire un oeuf 13

langage, dérive du sens des mots quand les dimensions changent 51

langage, l'impossibilité de décrire correctement avec des mots ou des images le monde infinitésimal 52, 57, 61, 65, 76-77, 78-79, 87 (voir aussi sous "néant")

LEP signifie "Large Electron Positron collider", grand collisionneur à électrons et à positons (électrons positifs) ; (fig.) 31

• *Dans cette brochure, nous avons parlé de collisions entre électrons. Pour être plus précis, et sans que cela change les explications et les chiffres donnés, on peut ajouter qu'au LEP les collisions ont lieu entre électrons négatifs et électrons positifs (positons). L'avantage d'utiliser des positons, c'est que la charge électrique totale de la collision est nulle (+1-1). Avec uniquement des électrons négatifs, la charge totale vaudrait -2, ce qui notamment défavoriserait l'apparition de particules neutres ou positives.*

• *Le LEP, collisionneur à électrons, va être remplacé par le LHC, collisionneur de hadrons (voir ci dessous). Les images du LEP (p.31) étant plus faciles à rapprocher des explications données que celles du LHC où l'essentiel est caché, c'est d'accélération d'électrons dont nous avons surtout parlé dans cette*

brochure. Mais le principe est le même pour les protons.

LEP, l'accélérateur LEP dans son tunnel (fig.) 31

LHC, "Large Hadron Collider" (Grand collisionneur de hadrons)

• *Le terme "hadron" s'applique à l'ensemble des particules composées de quarks. Les protons sont les hadrons qui seront le plus souvent accélérés dans le LHC.*

• *Il est aussi prévu d'y produire des collisions entre des noyaux d'atomes comme ceux du plomb qui contiennent beaucoup de protons et de neutrons. Sous ce choc brutal ils fusionneront. Le résultat de cette fusion sera une "bouillie" de quarks et de gluons semblable à celle qui constituait l'Univers dans ses premiers milliardièmes de seconde, quand il était encore si chaud (penser au thermomètre Terre-Lune p.80 !) et si agité que les protons et les neutrons n'avaient pas encore pu se former. Dans ce sens, le LHC est une machine à remonter le temps...*

limites, y a-t-il des limites à la Physique des particules ? (fig.) 86-87

loupe, Tintin et l'éléphant (fig.) 15

Lune, effet de la Lune sur un grand accélérateur 30

Lune, grandeur et distance relatives de la Terre et de la Lune (fig.) 80-81

Lune, un thermomètre qui irait jusqu'à la Lune (fig.) 80-81

lentilles magnétiques (lentilles à "aimants souffleurs") 30

mathématiques et réalité 65, 87

matière ; pour créer de la matière à partir d'énergie, c'est la concentration de l'énergie qui compte 16

matière créée lors de collisions du quatrième type 7

matière et antimatière 58-61

microbes, collision entre microbes 18

microbes, leur dimension par rapport à un "pied" de mouche (fig.) 20

monde infinitésimal ; il est étrange, les particules qui s'y trouvent ne sont pas des objets 49-53

mouche, pied d'une mouche, point "." et microbe (fig.) 20, 21

mouches, collision de deux mouches 23, 24

néant et être (fig.) 56-57

• En restant dans le domaine des mots et des idées qu'ils véhiculent, on peut discuter longtemps, sagement et subtilement sur les différences qu'il y a ou qu'il n'y a pas entre "rien", "néant", "non-être" et "vide". Mais quelles que soient les définitions choisies, il faut reconnaître qu'elles sont établies à partir d'évidences et de réflexions sur le monde à l'échelle humaine. Qu'est-ce qui nous fait croire qu'elles sont encore valables dans l'infiniment grand et l'infiniment petit ?

neutrinos, ces particules qui ne font (presque) rien 84-85

• Bien qu'il y ait 3 sortes de neutrinos et donc 3 sortes d'antineutrinos (voir p.70 et sous "classification"), on les appelle couramment tous "neutrinos". Précisons cependant que les "neutrinos" qui nous viennent des étoiles et du Soleil, comme ceux qui figurent dans la désintégration du vase (pages 43-47), sont pour la plupart des antineutrinos.

• Une centrale nucléaire produit aussi beaucoup de neutrinos (environ cent milliards de milliards par seconde). Ils emportent dans

l'espace plus de 5% de l'énergie produite dans le réacteur. C'est cette abondance qui a permis de détecter en 1952 quelques neutrinos pour la première fois.

Curieuse conséquence de cette abondance : en Europe, chaque centimètre carré de notre corps est traversé chaque seconde par plusieurs centaines de neutrinos en provenance des centrales nucléaires du Japon d'où ils nous arrivent en ligne droite après avoir voyagé pendant 1/30 de seconde. Ceux qui nous traverseront sortent du sol à environ un mètre devant nous, légèrement à droite quand nous sommes tournés vers le Nord. Bien sûr, les centrales nucléaires plus proches nous envoient un plus grand nombre, mais encore beaucoup plus nombreux sont les neutrinos qui nous parviennent de l'espace et nous traversent eux aussi sans rien, vraiment rien faire du tout ! (Voir page 85)

• Le poids total des neutrinos errant dans l'Univers est encore mal connu. S'il était suffisamment élevé, l'Univers arrêterait son expansion, l'inverserait et probablement disparaîtrait dans un effondrement gigantesque, suivi d'un nouveau Big Bang créateur d'un nouvel Univers...

Notre Dame de Paris au centre d'un atome agrandi dix millions de milliards de fois (fig.) 23
nucléaire, l'origine de ce mot 70

objets colorés faits de particules incolores (fig.) 82-83

objets, les particules ne sont pas des objets 49-53

objets, les propriétés des objets changent quand changent leurs dimensions 52

Oméga moins, à propos de sa désintégration (fig.) 42-43, (fig.) 46-47

ordinateurs, chiffres manipulés en une seconde par un gros détecteur (fig.) 40-41

origine de la Physique des particules 68-69
où va la Physique des particules ? (fig.) 86-87

particule, la température d'une particule (fig.) 80-81

particule, peut-on parler de la dimension d'une particule ? 78, (fig.) 79

• Des figures semblables à celle de la page 79 peuvent être obtenues facilement en superposant à un texte sa photocopie sur film transparent et en faisant tourner légèrement ce dernier autour d'un point. Si ensuite on le fait tourner autour d'un autre point, la "particule" y apparaît sans être passée par l'espace intermédiaire. Cela arrive parfois aux particules et s'ajoute à la liste de leurs propriétés étranges qui en font des non-objets (p.52-53).

particules messagères, les "bosons" 76

particules, classification des particules 76

particules, considérées comme de la "poussière d'énergie" ou de la "vitesse solidifiée" 7

• L'extravagance, pour ne pas dire la déraison ou l'absurdité même de ces termes montre bien que les mots usuels ne peuvent décrire ce qui se passe dans l'infinitésimal (voir "langage").

particules, elles sont presque toutes instables 42-47 (voir aussi "désintégration")

particules, les particules n'ont pas de couleur 52, et pourtant... 53

particules, les particules ne sont pas des objets 49-53

particules, leur durée de vie (fig.) 44, 45

particules, quelques noms (fig.) 46

photons et lumière 76

Physique des particules, astrophysique, physique nucléaire et énergie nucléaire (fig.) 71

Physique des particules et énergie nucléaire (fig.) 70-71

Physique des particules et les premiers instants de l'Univers 65

Physique des particules, ses principaux outils 8

Physique des particules, ses racines historiques 68-69

pomme de terre, accélérateur d'électrons à pomme de terre (fig.) 27

positons (= électrons positifs = antiélectrons) leur découverte (fig.) 60

poussière d'énergie 7

précieux, une substance est considérée comme précieuse lorsque sa concentration en valeur (prix au kilo) est élevée 14

proton, l'intérieur d'un proton (fig.) 77

proton, pourquoi le proton est stable 47

protons et neutrons, leur dimension 20-22

publications

• Le CERN est transparent : toutes les étapes des recherches aussi bien que leurs résultats sont publiés immédiatement et accessibles à tous sans aucune condition.

• Chaque année de 1500 à 2000 articles scientifiques ou techniques ont pour sujet les recherches faites au CERN (plus de 6 par jour ouvrable !).

quarks et électrons, leur dimension 20 - 22

quarks, il y a 6 quarks et 6 antiquarks 76

questions impertinentes

• Celui qui aura l'audace de poser l'une ou l'autre de ces questions à un physicien découvrira peut-être cette profession et la Physique elle-même sous un angle nouveau...

Question 1 - En électricité, être chargé positivement est différent d'être chargé négativement. En quoi consiste exactement cette différence ? Et pourquoi l'éventualité d'une troisième sorte de charge électrique n'est-elle jamais évoquée ?

Question 2 - Depuis plus d'un siècle, la notion d'énergie occupe une place centrale en Physique. Les physiciens en parlent tout le temps et aujourd'hui, c'est même un terme largement utilisé par le grand public. Pouvez-vous en quelques mots dire de quoi il s'agit ?

Question 3 - Quelle est la température à l'intérieur du noyau d'un atome ? Et à l'intérieur d'un proton ? Est-ce vrai pour les innombrables noyaux et protons qui font partie de mon corps ?

Si la réponse est un chiffre, il sera probablement élevé, dans ce cas la question suivante sera : Comment se fait-il alors que nous ne soyons ni brûlés ni incandescents avec une telle quantité d'objets à de telles températures dans notre corps ?

Question 4 - Une ligne droite peut être définie physiquement comme la forme que prendrait un fil très solide et très léger tendu très fortement entre deux points. D'autre part, on dit souvent que la lumière se propage en ligne droite. Question : Est-ce qu'entre deux points de l'Univers la trajectoire d'un rayon lumineux suivrait exactement le trajet de notre fil ? Sinon pourquoi ? Et qu'en serait-il dans l'infiniment petit ?

Question 5 - N'y aurait-il pas eu juste après le Big Bang, dans ce mélange incroyable d'espace, de vide créateur, de matière et de temps, un lieu à partir duquel aurait pu sembler durer des millions d'années ce qui, perçu d'un autre point, n'aurait semblé représenter qu'un milliardième de seconde ?

racines historiques de la Physique des particules **68**

rayons cosmiques (fig.) **69**

rayons cosmiques et le premier électron positif découvert (fig.) **60**

retombées pratiques des recherches en Physique des particules (fig.) **74**

rien (fig.) **56**, voir "vide"

serpent, l'erreur fatale du serpent **51**

soleil, mini-soleil obtenu par la collision de deux microbes (fig.) **18**

symétrie particule/antiparticule 59-61

• En Physique des particules, l'étude des symétries et des questions subtiles qui leur sont associées est fondamentale.

Par exemple :

- Est-ce que nous remarquerions quelque chose d'anormal si nous observions le comportement de particules dans un miroir, sans savoir que c'est dans un miroir que nous les voyons ? Les physiciens ont longtemps pensé que non, mais aujourd'hui ils ont changé d'avis.

A cette question est probablement lié un problème fondamental en biologie qui n'est pas encore résolu :

Pourquoi l'image dans un miroir d'une molécule provenant d'un être vivant représente-t-elle une molécule qu'on ne trouve chez aucun être vivant ?

Par exemple, si une molécule appartenant à un être vivant ressemblait à un tire-bouchon qui avance quand on le tourne dans le sens des aiguilles d'une montre, son image dans le miroir sera celle d'un tire-bouchon qu'il faut tourner dans le sens inverse pour le faire avancer.

(Faire l'expérience devant un miroir en observant le mouvement de la main.) Or - et c'est là l'énigme - cette molécule "symétrique", ce "tire-bouchon-vu-dans-un-miroir" ne se trouverait dans aucun être vivant. Pourquoi ? La Physique des particules avec ses entorses à certaines lois de la symétrie apportera peut-être la réponse.

- Si nous communiquions avec des extraterrestres, pourrions-nous nous entendre avec eux pour savoir si leur monde est en antimatière ou s'il est fait de la même matière que la nôtre ? Et comment ferions nous pour leur dire ce que nous appelons "tourner dans le sens des aiguilles d'une montre" ?

- Pourquoi, quand de l'énergie se condense en matière, donc en particules et en antiparticules (p.59) et que, par la suite, ces particules et ces antiparticules s'annihilent, reste-t-il un solde de particules très petit (un milliardième du total environ, voir pages 58-61) qui n'ont pas leur contrepartie en antiparticules "comme il se devrait" si la charge électrique était parfaitement conservée et si tout était symétrique ?

table, vingt personnes concentrées sur une table (fig.) 14

tableau noir, un des 4.000 tableaux noirs du CERN (fig.) 65

tasse (fig.) 49

tasses de même forme, mais de grandeur décroissante, pleines d'eau (fig.) 50

tasse découpée dans la tige d'un épi de blé et remplie "au ras bord" (fig.) 50

tasse, devinette 49

tasse sans fond (fig.) 50

tasse, réponse aux questions de la devinette (fig.) 50

tasse, une tasse est-elle toujours une tasse ? 51

température, le Big Bang et la Physique des particules 80

température, la température est liée à la concentration de la chaleur 13

Terre et Lune, leurs dimensions et leur distance dans les proportions justes (fig.) 80-81

• *A l'échelle de ce croquis, le Soleil serait une sphère d'environ 1 mètre de diamètre, placée à 150 mètres.*

• *Valeurs numériques :*

Diamètre de la Lune : $\approx 1/4$ du diamètre terrestre

Distance moyenne de la Terre à la Lune ≈ 30 diamètres terrestres

Diamètre du Soleil ≈ 100 diamètres terrestres

Distance Terre-Soleil ≈ 400 fois la distance Terre-Lune, c'est-à-dire 12.000 diamètres terrestres

(Diamètre de la Terre : 12.700 km)

thermomètre géant qui va de la Terre à la Lune (fig.) 80-81

"Théorie du Tout"

• *Les physiciens des particules parlent parfois de la "Théorie du Tout", théorie qui contiendrait condensées toutes les lois de la physique. Il a même été dit que le résumé de cette théorie tiendrait dans une formule qu'on pourrait imprimer sur un T-shirt. Mais expliquera-t-elle l'existence dans l'Univers de ce T-shirt ?*

Certainement pas ! Elle ne permettrait même pas de prévoir à coup sûr quelles particules seraient créées dans telle ou telle collision entre électrons ! Il faut la voir plutôt comme l'unification des lois déjà connues. C'est un peu comme si l'on parvenait à résumer toutes les règles du jeu

d'échecs en une seule règle, un seul principe. Puis partant de l'hypothèse que tous les jeux ont la même origine (par exemple une caractéristique du cerveau humain), l'étape suivante serait d'unifier le jeu d'échecs avec le principe primordial du football, puis avec les règles du tennis, etc. pour parvenir à la "Théorie Primordiale de tous les jeux"...

Pour les physiciens, la course à l'unification est fondée sur l'hypothèse plus raisonnable, et d'ailleurs unanimement admise, qu'au début de l'Univers, alors que sa température était extrêmement élevée, toutes les relations entre les particules (les "forces") procédaient de la même façon. L'Univers se refroidissant, la Nature aurait inventé pour ses particules, un peu au hasard, des jeux plus variés...

Tintin, la loupe et l'éléphant (fig.) 15

traces dans chambre à bulle (fig.) 32

traces de pingouins dans la neige (fig.) 35

tunnels et puits souterrains (fig.) 30

Univers

• Il est prudent, en utilisant le mot "Univers", d'ajouter "observable" ou de parler de "notre" Univers. Car il y en a peut-être d'autres, ce que nous ne saurons probablement jamais.

Univers, brève histoire de l'Univers 61

Univers, ses premiers instants et la Physique des particules 65

vase-casserole-pot-bol, une cascade de désintégrations (fig.) 42

vide et atomes, dans l'Antiquité et aujourd'hui (fig.) 57

vide et Big Bang 61

vide, comment il se peuple 55-57

vide, le vide n'est pas vide 54-57

• Dans les recherches en Physique des particules, le mot "vide" est pris dans deux sens très différents qu'il ne faut pas confondre :

1- Le vide à notre échelle, le vide technique. C'est celui qui règne dans le tube de l'accélérateur (p.29). Ici, le mot "vide" est pris dans le sens habituel comme dans "Ce tiroir est vide". Dire que le vide règne dans le tube de l'accélérateur où circulent les particules à accélérer, signifie qu'on a enlevé de ce tube tout ce qui a été possible (poussières, air) et cela avec un soin extrême.

2- Le vide dans l'infiniment petit, c'est celui qui sépare, par exemple, les quarks dans un proton ou qui se trouve dans les environs immédiats d'un électron. C'est ce "vide" qui n'est pas vide, qui est créateur. Voir pages 55 à 61.

Voie Lactée, étoiles, nuages de gaz et poussières (fig.) 62-63

• On peut se représenter la Voie Lactée comme une immense roue de char sur les rayons de laquelle deux cent milliards de vers luisants microscopiques, les étoiles, seraient posés. Notre Soleil est l'un d'eux.

• Les étoiles de la photographie des pages 62-63 semblent très proches les unes des autres, mais elles sont en réalité très éloignées. Cet effet est dû :

1- A la perspective : certaines étoiles voisines sur la photographie sont en fait très distantes les unes des autres, mais situées presque sur la même ligne de regard. Si je faisais une photographie de mon pouce - supposé lumineux - tendu vers la Lune, ces

deux "astres" sembleraient très proches...

2- A l'impossibilité de photographier les étoiles sans grossir énormément la tache blanche qui est censée être leur image. Le diamètre d'une étoile est en général de 10 à 100 millions de fois plus petit que la distance qui la sépare de ses voisines.

zéro (fig.) 58, (fig.) 59, 61

• En arithmétique $3 - 3 = \text{zéro}$, il ne reste absolument rien. En Physique des particules (voir pages 58-59 et sous "symétrie particule / antiparticule"), il semble bien que dans certaines soustractions qui en principe devraient donner zéro, il y a un léger reste. A l'échelle du Big Bang (p.61), notre Univers serait ce reste.

Mais après tout, cela n'arrive-t-il pas aussi avec les roses : quand on enlève les trois roses qui avaient été mises dans une chambre, le résultat n'est pas tout à fait zéro : ne reste-t-il pas un peu de leur parfum ?

Remerciements

C'est avec Guy Hentsch que la première version de cette brochure avait été élaborée en 1981. Il a bien voulu revoir celle-ci et y a apporté des remarques judicieuses. Son aide, sa participation et ses encouragements méritent une fois de plus toute ma reconnaissance.

James Gillies, lui, a offert sa connaissance du CERN. Sa contribution a été précieuse : il m'a fourni des données pas toujours évidentes à établir (par exemple le nombre de tableaux noirs !) et il a aussi vérifié les miennes. James a de plus trouvé certains documents avec un flair surprenant : n'a-t-il pas mis la main sur l'image du "pied" d'une mouche en quelques minutes par Internet... en Australie ?

C'est Ming Feng qui détient le record absolu du nombre de corrections de ce texte. Ses remarques, tout en finesse, ont rendu cette brochure plus intelligible. Comment pourrais-je passer sa contribution sous silence ?

Michèle Jouhet et son service Desktop Publishing, ont pris à coeur ce projet dès le départ et en ont grandement facilité la réalisation. A Isabelle Bellaton, responsable technique de cette publication, je dis mon admiration. Elle a su dans une mise en page originale utiliser avec hardiesse texte, dessins et documents et organiser l'ensemble de cette brochure avec un goût très sûr. Si les yeux du lecteur ont eu du plaisir à parcourir ces pages, c'est en grande partie à elle qu'ils le doivent. Je lui exprime ma gratitude non seulement pour son professionnalisme, mais aussi pour la patience et le respect avec lesquels elle a toujours accueilli les nombreuses modifications, corrections et restructurations qui lui étaient suggérées.

Pour terminer, c'est à vous, lecteur, que j'adresse mes remerciements, car c'est sûr de votre complicité que je me suis permis certaines audaces pour parler aussi raisonnablement que possible du monde des particules et de ses folles réalités...

Les illustrations ont été réalisées par l'auteur

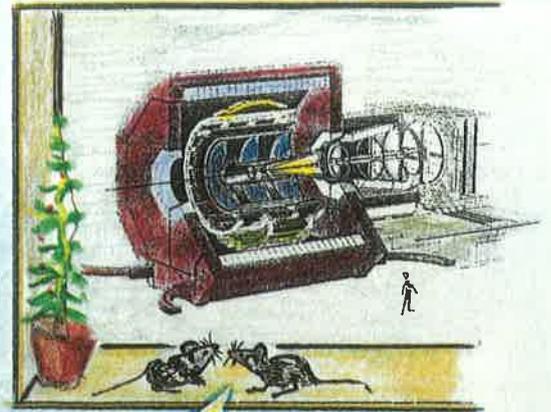
© Rafel Carreras

Edité par le CERN service DTP,
janvier 2000

Trois raisons qui expliquent pourquoi la Physique des particules est capable d'accéder à l'infiniment petit qui est pourtant un monde si différent du nôtre.

1. Parce qu'elle se donne la liberté...

- ...de se poser des questions originales
- ...d'inventer des théories même extravagantes pour y répondre
- ...d'imaginer des expériences audacieuses pour vérifier ces réponses

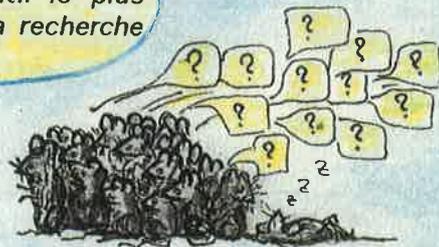


Grâce à leurs expériences gigantesques et à leurs théories de plus en plus abstraites, les physiciens expliqueront peut-être tout mais je crains qu'ils finissent par ne plus savoir de quoi ils parlent!

2. Parce qu'elle est capable, (comme les autres sciences dites "dures") d'éliminer impitoyablement ce qui s'est révélé faux.



Et voici l'outil le plus précieux de la recherche scientifique!



Arrête! Mettre en question ne veut pas dire que ça ne vaut plus rien!

3. Et parce que tout peut toujours y être remis en question.



Que pensera-t-on de tout ça dans dix ans... dans cent ans... dans mille ans?

