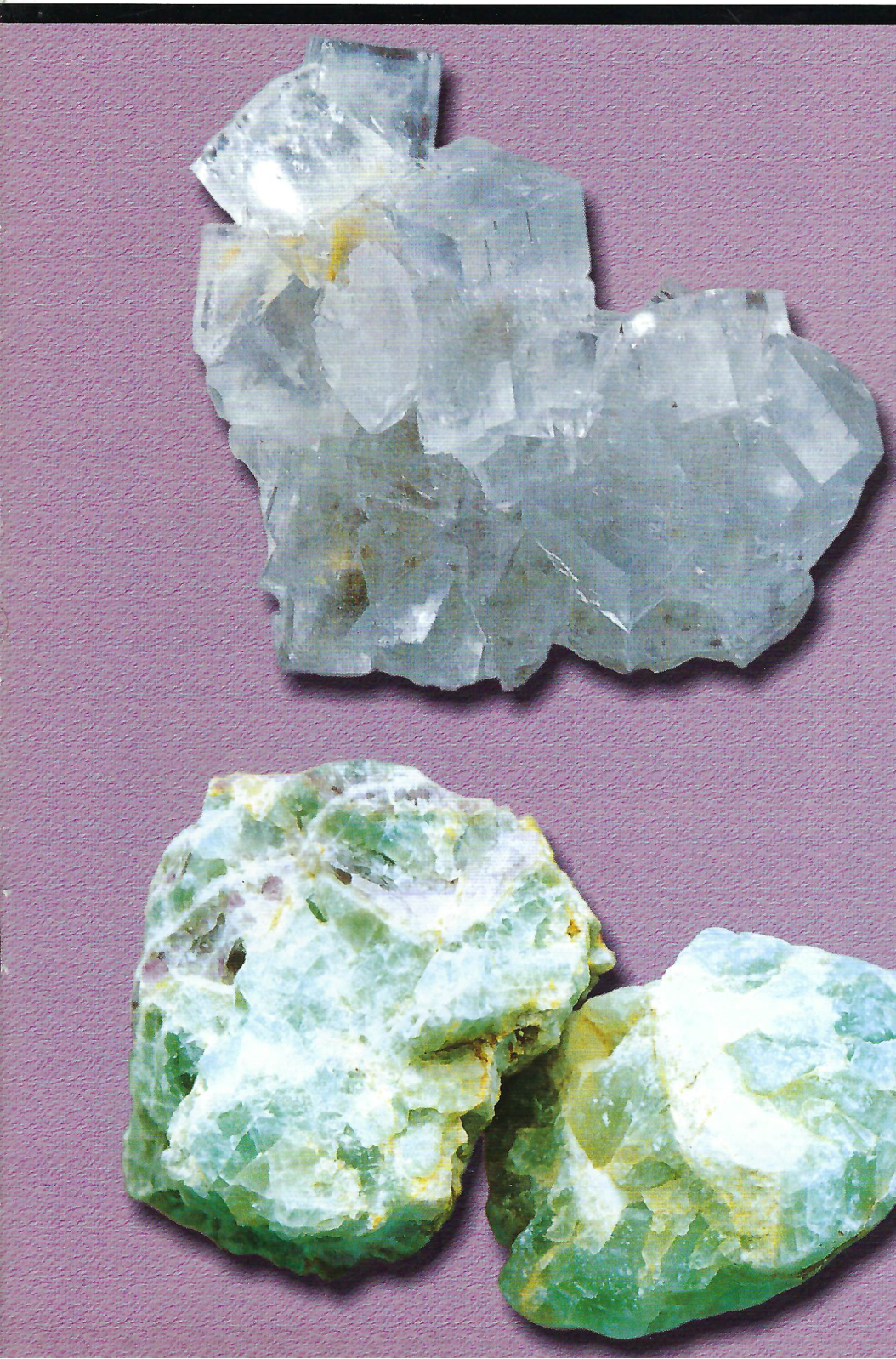
AUVERGNE SCIENCES

BULLETIN DE L'ADASTA

Novembre 1999 N° 46



ASSOCIATION
POUR LE **D**ÉVELOPPEMENT
DE L'**A**NIMATION
SCIENTIFIQUE
ET **T**ECHNIQUE
EN **A**UVERGNE

L'antimatière

Ressources minérales du Massif Central

Pasteur

SOMMAIRE

N° 46

- L'Antimatière ..... p. 3
- L'ADASTA à Expo Sciences .... p. 12
- Remise de diplômes au CUST de Clermont-Fd .....p. 14
- Louis Pasteur à Clermont-Ferrand...p. 19
- Ressources Minérales en Massif Central.. p. 21
- Isaac Newton et les "Principia"... p. 23
- Le Congrès National de la SFP .....p. 24

PERMANENCES :
Tous les jours ouvrables
de 9 h 00 à 12 h 00
et le mercredi
de 14 h 00 à 17 h 00

AUVERGNE-SCIENCES
Publication trimestrielle
19, rue de Bien-Assis
63100 CLERMONT-FERRAND
Directeur de la Publication
Suzanne GELY
Rédaction : Jocelyne ALLEE
N° ISSN 1166-5904
Photo de couverture :
Minéraux d'Auvergne (Fluorite)
Dépôt légal Novembre 1999
Imprimeries Centre France - REIX 04 73 60 75 75 - 33828

L'ADASTA
a pris une part active
à la Semaine
de la Science du
18 au 23 octobre 1999.
Le compte rendu
figurera
dans notre numéro 47.

EDITORIAL

L'ADASTA poursuit sa route. Association créée en 1986, elle est aujourd'hui encore adolescente.
Cependant, grâce au dévouement d'une équipe restreinte mais solide et aussi grâce à votre soutien à tous, à vos encouragements, à votre fidélité, elle va franchir le cap du troisième millénaire, en misant sur l'Europe.
En effet pour la première fois, vous trouverez dans cette Revue une page en anglais.
Vous lirez aussi le compte rendu d'Expo Sciences sur le thème de l'éclipse de soleil du 11 août dernier. Enfin, nous avons obtenu la prestigieuse collaboration de Maurice Jacob qui a bien voulu écrire un article pour Auvergne-Sciences.
Nous le remercions vivement ainsi que les nombreux partenaires qui soutiennent notre action de diffusion scientifique en vue du progrès humain par le Savoir et la Connaissance.

Suzanne GELY

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel	150 F
Adhésions à titre collectif	500 F
Membre bienfaiteur	1 000 F

L'adhésion donne droit au service gratuit du bulletin et à des réductions sur les différents services rendus par l'Association (publications, stages, visites,...)
Adressez le courrier à **ADASTA, 19, rue de Bien-Assis - 63100 Clermont-Ferrand**
Tél. 04 73 92 12 24 - Fax 04 73 92 11 04 - e-mail : adasta@wanadoo.fr

Merci à nos sponsors

AUVERGNE
CONSEIL RÉGIONAL D'AUVERGNE
CONSEIL GENERAL DU PUY-DE-DOME
volvic
MICHELIN
MINISTERE DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE
France Telecom
VILLE DE CLERMONT FERRAND
EDF Electricité de France

L'Antimatière

Maurice Jacob

Maurice Jacob, ancien élève de l'Ecole Normale Supérieure, Agrégé de l'Université et Docteur ès Sciences, est un chercheur mondialement connu. Il a travaillé notamment aux Etats Unis et en France, dans le domaine de la physique théorique des particules. Retraité du CERN depuis 1998, Maurice Jacob est membre de nombreux comités scientifiques en France et à l'étranger.

L'article ci-dessous est l'adaptation française abrégée d'un article écrit par le même auteur, en contribution au livre "Paul Dirac, the man and his work" préfacé par S. Hawking et publié par Cambridge University Press en 1998.

"Les lois de la physique doivent avoir la beauté des mathématiques"
P. A. M. Dirac, 1955.

La confrontation entre objets ou entre idées, associés comme semblables et différents à la fois, a un pouvoir souvent fascinant. On pense tout de suite au ying et yang de la philosophie orientale et notre façon de penser s'articule parfois sur cette union complémentaire entre opposés et même inconciliables. La physique est riche en concepts de ce type et la complémentarité entre onde et corpuscule en est un exemple particulièrement important. La physique exploite la complémentarité mais aussi la symétrie qui peut exister entre entités différentes. Parmi toutes ces symétries, celle entre matière et antimatière fut sans doute la plus révolutionnaire. La présenter lui enlève beaucoup de son mystère mais permet de souligner son intérêt. L'antimatière est nécessaire pour maintenir la causalité dans un monde de matière relativiste et quantique.

L'ÉQUATION DE DIRAC

La physique essaye de trouver les lois qui régissent le comportement de la matière, cet ensemble d'atomes qui constitue le monde dans lequel nous vivons. Elle ne peut les formuler sans postuler l'existence d'une antimatière, formée d'antiatomes, et sans décrire simultanément le comportement de cette antimatière.

A chaque grain (particule) de matière (proton, électron, quark...) on doit en effet associer un grain d'antimatière (antiproton, antiélectron ou positon, antiquark...), soit une particule ayant la même masse mais la charge électrique opposée. Les forces nucléaires et électromagnétiques qui créent les structures présentes dans le monde étant les mêmes pour les particules et les antiparticules, les antiparticules peuvent constituer de l'antimatière tout comme les particules constituent de la matière. La prédiction et la découverte de l'antimatière représentent assurément un des plus grands succès de la physique au cours du siècle passé.

Elle est due à Paul Dirac qui, vers 1930, montra que l'existence de l 'antimatière était une conséquence inéluctable de la relativité et de la mécanique quantique considérées simultanément, et qu'il était justement arrivé à combiner dans son équation décrivant le mouvement d'un électron. L'antiparticule de l'électron, qu'on appelle le positon, fut découverte peu après par Carl Anderson, en 1932. Le monde se comportait bien comme l'avait prédit Dirac. Dirac et Anderson reçurent séparément le prix Nobel.

L'équation de Dirac est magnifique par sa simplicité. Elle s'écrit (figure-1) :

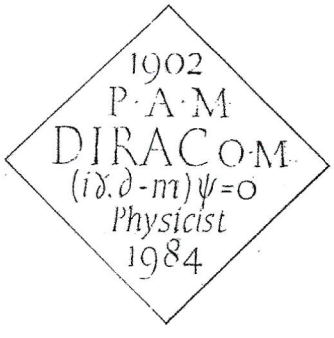


Figure-1 L'équation de Dirac sur la plaque dans l'abbaye de Westminster.

Elle décrit le mouvement d'un électron mais aussi celui d'un positon, de même masse et charge opposée. Tous les phénomènes électromagnétiques sont introduits de façon particulièrement simple. Il suffit de remplacer la dérivé ∂, dans l'équation par ∂-ieA, où A est le potentiel électromagnétique et e la charge de l'électron.

Par cette équation, à l'apparence toute simple, on décrit tous les phénomènes électromagnétiques, de la radio à la chimie en passant par l'électricité et le magnétisme. Tout est calculable et prévisible en fonction des données initiales. Les lois de la physique y trouvent vraiment une beauté mathématique saisissante. Sans avoir à préciser la nature des matrices gamma qui y figurent, ni savoir comment manipuler cette équation, on peut admirer sa simplicité, sa grande beauté mathématique, et se sentir simplement impressionné par son pouvoir. Elle est présentée comme une simple illustration mais disons qu'elle implique la rotation de l'électron sur lui même, son spin, une propriété purement quantique puisque le moment angulaire intrinsèque de l'électron est égal à la moitié de la constante de Planck divisé par 2π. Prenant cela comme unité d'action, ou aussi de moment angulaire, on dit que le spin de l'électron est 1/2. La quantité qui figure est un spineur. Sans entrer plus avant dans l'analyse de l'équation de Dirac, remarquons seulement que beauté et simplicité y récompensent le choix des bons concepts.

Cette équation orne la dalle de Dirac, dans l'abbaye de Westminster (figure-1). Elle se trouve au pied du monument dédié à Newton sur le coté gauche de la nef. Elle orne aussi le monument érigé à Saint Maurice, dans le Valais, le berceau de la famille Dirac. Le père de Dirac était originaire de Saint Maurice. Il était allé en Angleterre pour y enseigner le français et s'y était marié et fixé. La théorie de Dirac permet d'exprimer le couplage entre l'électron et le champ électromagnétique, dont l'intensité est proportionnelle à la valeur de la charge électrique e. On peut lui donner une représentation graphique sous forme d'un graphe de Feynman (figure-2). En théorie quantique, le champ électromagnétique a une représentation corpusculaire, sous forme de photons. Le graphe de la figure 2 résume la façon dont un électron (ou un positon) peut émettre (ou absorber) un photon, processus dont l'équation de Dirac permet de calculer les effets

Figure -2 Emission (ou absorption) d'un photon par un électron. Le phénomène élémentaire de toute l'électrodynamique, de la radio à la chimie.

LE PROBLÈME DES ÉNERGIES NÉGATIVES

La physique est relativiste. Ses lois satisfont au principe de relativité d'Einstein. Elles sont les mêmes dans tous les systèmes animés d'un mouvement de translation uniforme l'un par rapport à l'autre. On sait que ceci entraîne des propriétés apparemment surprenantes. Le temps et l'espace perdent en effet leur caractère absolu et la vitesse de la lumière est constante, indépendante de la vitesse de la source ou du récepteur. Mais l'invariance et l'universalité des lois de la physique, quelle que soit la vitesse du système dans lequel on les exprime, n'est-elle pas plus remarquable que le caractère immuable du cours du temps, qui ne reposait en fait que sur une expérience, certes atavique, mais de précision limitée ? Les lois de la physique sont d'autant plus belles qu'elles sont universelles!

L'énergie E et l'impulsion p d'une particule massive dépendent cependant manifestement de la vitesse du système dans lequel on les mesure. Une bonne description du mouvement doit faire appel à des quantités invariantes par rapport à cette vitesse et on en obtient une en soustrayant le carré de l'impulsion multiplié par le carré de la vitesse de la lumière, au carré de l'énergie, ceci donnant le carré de la masse m, multiplié par la vitesse de la lumière à la puissance quatre. La vitesse de la lumière étant constante, on la prend comme unité. Ceci simplifie la relation entre l'énergie, l'impulsion et la masse et l'on obtient $E = \sqrt{(m^2+p^2)}$. Mais, pour toute solution d'énergie positive, comme il se doit, on trouve ainsi aussi que pour chaque valeur de l'impulsion, il existe une autre solution, d'énergie négative : $E = -\sqrt{(m^2+p^2)}$, et donnant la même valeur de E^2.

La description du mouvement relativiste implique donc des solutions d'énergie négative et la solution de l'équation de Dirac, qui est relativiste, va en faire apparaître. C'est le prix à payer pour sa forme relativiste. Peut-on leur dénier un sens physique? En physique classique on peut le faire. L'énergie varie de façon continue en fonction des paramètres qui décrivent le mouvement. Elle est limitée vers le bas par sa valeur la plus faible, qui est l'énergie de masse, le fameux $m\,c^2$, mais nous dirons simplement m, la vitesse de la lumière étant prise comme unité. On peut donc laisser à un autre monde fictif les énergies négatives qui sont limitées vers le haut par -m. Il y a une séparation claire et nette entre ce qui se passe, séparément, pour E supérieur à m et pour E inférieur à -m.

Mais la physique est quantique ! Les gains et les pertes d'énergie ne sont pas continus mais se produisent par sauts, l'importance de ces sauts étant proportionnelle à la constante de Planck h.

Rien n'empêche dans ce cas un saut d'énergie permettant de passer des énergies positives aux énergies négatives ou vice versa. Dans une formulation quantique on ne peut plus dénier un sens physique aux énergies négatives. Énergies positives et négatives sont simultanément présentes. Ceci est très grave car tout devient instable. Rien n'empêche un électron, dont le mouvement est décrit par l'équation de Dirac, de rayonner sans arrêt de l'énergie en tombant dans des états d'énergie de plus en plus négative.

Dirac remarqua ce problème dès la formulation de son équation qui conciliait relativité et mécanique quantique. Il devait dire à ce sujet "Dans de telles circonstances deux possibilités restent ouvertes : soit il y a une signification physique pour les énergies négatives, soit nous devons admettre qu'une théorie à la fois quantique et relativiste n'est pas correcte". Dirac trouva la solution à ce problème en se fondant sur le principe d'exclusion énoncé peu avant par Pauli. La physique est quantique. Une particule n'est pas seulement un corpuscule, par essence localisé de façon discontinue dans l'espace. Elle est aussi une onde, par essence continue. Il y a complémentarité entre les deux descriptions manifestement opposées, l'une ne pouvant se réduire à l'autre, et les deux étant nécessaires. Sous la forme corpusculaire, l'échange de deux électrons dans le même état, donc a priori indiscernables, ne pose pas de question. Mais sous la forme ondulatoire, l'onde décrivant les deux électrons identiques peut changer de signe quand on les échange. C'est ce qu'elle fait et, de ce fait les deux électrons identiques ne peuvent pas se trouver dans le même état sans que l'onde associée soit nulle. Un électron dans un état particulier en exclut tous les autres. C'est le principe d'exclusion de Pauli.

Que dit Dirac :
"Acceptons que dans l'univers tel que nous le connaissons, presque tous les états d'énergie négatives soient occupés, la distribution de charge qui en résulte étant inobservable de par son homogénéité spatiale. Dans ce cas, tout état non occupé représente une disruption qui brise l'uniformité. On peut décrire cela comme un "trou" (dans cette "mer" d'électrons d'énergies négatives) et ce "trou" va se comporter comme un positon (manifestement une particule d'énergie positive et de charge opposée à celle de l'électron, puisqu'on enlève un électron d'énergie négative)".
Les difficultés apportées par les énergies négatives disparaissent. Le Vide, cet état de base par rapport auquel on décrit les phénomènes physiques est par contre compliqué. Il est rempli à ras bord d'électrons d'énergies négatives mais, qu'à cela ne tienne, on a ainsi une théorie cohérente et prédictive décrivant les électrons d'énergie positive et des positons d'énergie positive, chaque fois que des "trous" apparaissent.

Dirac décrit cela de façon très claire et complète dans sa présentation de 1934 au septième Congrès Solvay. A l'époque ces Congrès Solvay réunissaient de temps en temps les grands de la physique venus confronter leurs idées.

L'exposé de Dirac commence par une phrase magnifique de modestie :
"La découverte récente d'un électron de charge positive ou positon (la découverte de Anderson en 1932) a ravivé l'intérêt d'une vieille théorie sur les états d'énergie cinétique négative d'un électron, car les résultats expérimentaux déjà obtenus sont en accord avec les prédictions de la théorie."

La théorie n'était pourtant pas si vieille !

Dirac avait en effet montré, juste quelques années plus tôt, en 1930-31, comment une théorie relativiste et quantique de l'électron imposait l'existence du positon. C'était une conséquence de son équation quand on interprétait proprement les solutions d'énergie négative. Dirac écrivait alors à propos du positon : "Ce serait un nouveau type de particule, inconnu en physique expérimentale, qui aurait la même masse et la charge opposée à l'électron. On peut appeler une telle particule un anti-électron. "Et il ajoutait" Nous ne devons pas nous attendre à en trouver dans la nature à cause de leur recombinaison rapide avec les électrons mais ils peuvent être produits expérimentalement et, dans un vide poussé, ils seraient stables et susceptibles d'être observés. " Il avait parfaitement raison et son exposé de 1934 au Congrès Solvay apportait non seulement une présentation détaillée de la théorie mais aussi de nombreuses prédictions quant au comportement des antiparticules.

Souvenons-nous. Le positon est un "trou" parmi des électrons d'énergie négative omniprésents dans le vide. On peut créer un tel trou en "éjectant du vide" un des électrons d'énergie négative qui s'y trouvent et qui, absorbant un photon d'une énergie égale à au moins 2m, prend une énergie positive. Créant un trou (positon) on a cependant automatiquement créé une paire électron-positon. L'énergie du photon se transforme en matière (électron) mais aussi en antimatière (positon). Le trou est un état d'électron d'énergie négative qui n'est plus "protégé" par le principe de Pauli. Rien n'empêche un électron d'y tomber en perdant son énergie positive en émettant un photon. On a ainsi une annihilation électron- positon (matière-antimatière) résultant en une production de rayonnement. La théorie de Dirac permet de calculer la fréquence de ces processus et de comprendre pourquoi un positon (créé avec un électron par un photon du rayonnement cosmique rencontrant une particule chargée dans l'atmosphère) a une bonne chance de traverser la chambre d'Anderson avant de s'annihiler contre un électron, ce qu'il fait en fin de compte dans l'environnement terrestre.

La théorie prédit comment l'énergie peut se transformer en matière et antimatière et comment l'antimatière s'annihile au contact de la matière.
On peut donner à l'action du principe de Pauli et à l'apparence d'antiparticules une représentation imagée élémentaire en considérant deux parkings superposés. Le parking inférieur est peint en rouge et, pour une raison de symétrie, disons que le parking supérieur est bleu. Les voitures sont bleues. Prenons quelques voitures sur le parking inférieur. Ce sont des voitures bleues sur fond rouge que l'on peut identifier à des électrons. Mais il y a affluence et le parking du bas se remplit, ne laissant des places libres que sur le parking du haut où vont se placer quelques voitures (électrons). Une voiture quitte cependant le parking du bas pour aller sur celui du haut. Elle y laisse une

place rouge, qui, si une voiture du bas (bleue) se déplace pour prendre la place laissée libre, apparaîtra de loin comme une voiture rouge se déplaçant d'une façon inverse à ce qui est attendu (un positon), la voiture sur le parking du haut évoluant elle de façon normale comme voiture bleue sur fond rouge. On peut s'amuser à poursuivre cette métaphore. Elle est assez fidèle.

LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS ET LA SYMÉTRIE CPT

Ce vide compliqué de la théorie de Dirac peut sembler gênant. Il ne l'est pas pour le physicien qui définit le vide comme étant l'état d'énergie la plus basse du système considéré, et calcule à partir de là. Ce vide n'a pas de raison particulière d'être identique au néant. En fait on peut reconnaître dans le vide de la théorie de Dirac quelque chose d'analogue à un semiconducteur, où les rares électrons assurant la conduction sont arrachés à une bande (d'énergie) de valence (où tous les états sont occupés par des électrons) en y laissant des trous. Néanmoins, Pauli, dans son discours Nobel 1945, où il présentait la théorie de Dirac reposant sur son principe d'exclusion, déplorait cette complexité du vide pourtant inobservable et pensait qu'une théorie meilleure devrait se passer de ce "monde hypothétique" qui n'était qu'une fiction mathématique.

Dans la fin des années quarante, la théorie quantique des champs ramena le vide à son état (plus attendu) de néant tout en imposant implicitement une symétrie entre particule et antiparticule. Le vide redevenait identique au néant mais il était impossible de décrire des particules par des champs quantiques sans décrire en même temps leurs antiparticules.

En théorie quantique des champs, le champ qui décrit l'électron n'est plus une onde, comme dans la théorie quantique élémentaire, mais un opérateur qui détruit et crée des particules à partir des états physiques sur lesquels il agit. Les énergies négatives introduites par l'équation de Dirac apparaissent comme des énergies de désexcitation agissant sur des états physiques. Le champ de Dirac (qui remplace maintenant la fonction spinorielle de la figure-1) détruit un électron et crée" quelque chose", une particule d'un nouveau type. Ce champ a automatiquement un opérateur adjoint qui lui crée un électron et détruit ce "quelque chose". La définition d'un opérateur décrivant la charge électrique d'un état physique, que l'on peut écrire à partir du champ de Dirac et de son adjoint, montre que ce "quelque chose" doit être une particule semblable à l'électron, ayant la même masse mais la charge opposée.

Le vide ne contient plus ni électron ni positon. Il redevient identique au néant. Mais le formalisme de la théorie quantique des champs décrit simultanément, et de façon parfaitement symétrique, électrons et positons. Sa description du comportement de la matière implique l'existence de l'antimatière et prédit son comportement.

Imposant la causalité, soit le fait que la théorie ne puisse prédire aucun signal précédant une cause, on peut montrer que la force du mécanisme de création d'une particule doit être identique à celle du mécanisme de destruction d'une antiparticule et vice versa. C'est ce qu'on appelle la symétrie de croisement. Dans chaque processus physique on peut librement remplacer toute particule entrante par son antiparticule sortante et vice versa. Si l'une existe, l'autre se doit d'exister aussi et on peut prédire sa force.

On retrouve les conséquences de la théorie initiale de Dirac mais avec un vide redevenu simple. Cette nouvelle vue des choses où les particules sont décrites par des champs quantiques et non plus des corpuscules ou des ondes remonte en fait à Majorana en 1937. Il fallut cependant attendre plus de dix ans pour qu'elle s'impose vraiment, avec l'élimination devenue possible de problèmes liés aux infinités apparaissant dans le calcul. On ne peut en effet plus parler d'un électron isolé. L'électron peut émettre un photon (figure-2) qui se transforme en paire électron-positon et qui s'annihilent mutuellement en un photon avant d'être re-absorbé (figure-3),avec tous les termes encore plus complexes que l'on peut considérer. Il faut pouvoir tenir compte de tous ces termes dans le calcul sans se heurter à des valeurs infinies. Ceci n'est pas facile et exige une approche spéciale pour laquelle Feynman, Schwinger et Tomonaga reçurent le prix Nobel. C'est aujourd'hui cette vision de l'électron, traduite par la théorie quantique des champs, qui correspond le mieux à la réalité. Calcul et expérience rivalisent de précision.

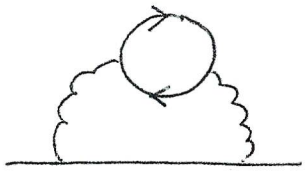


Figure-3 Evolution (limitée) d'un électron en théorie quantique des champs. La notion de particule individualisée disparaît.

L'existence de l'antimatière, avec cette symétrie entre matière et antimatière, apparaît ainsi comme une conséquence directe de la structure de la théorie quantique des champs. C'est le formalisme qui combine relativité et théorie quantique tout en préservant la causalité. La symétrie CTP (ou l'invariance par CPT) de la physique en résulte. Dans ce cas, C désigne une opération qui change particule en antiparticule et vice versa, une opération appelée Conjugaison de charge. P est une opération qui inverse le sens des coordonnées d'espace, une Parité. A une rotation près, c'est une image dans un miroir. Quant à T, il représente l'inversion du sens du temps. Le monde serait très différent si les particules étaient transformées en antiparticules (C), la droite en gauche (P) et si les horloges tournaient à l'envers (T). Mais les lois de la physique seraient les mêmes ! C'est la conséquence de cette propriété d'invariance par l'application simultanée de C, P et de T. Il se trouve que, pour les interactions fortes et électromagnétiques,

qui président à la formation de structures à partir des particules fondamentales (quarks et électrons), les propriétés d'invariance par C, par P et par T sont séparément valables. Particules et antiparticules créent les mêmes structures, ou plutôt des structures (atomes, molécules...) et des antistructures qui sont en correspondance directe.

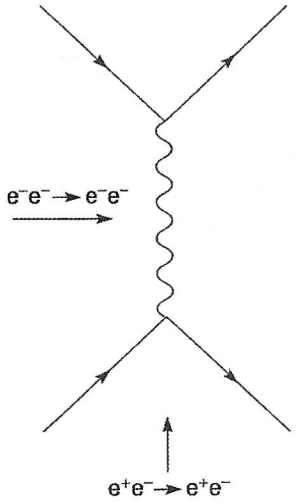
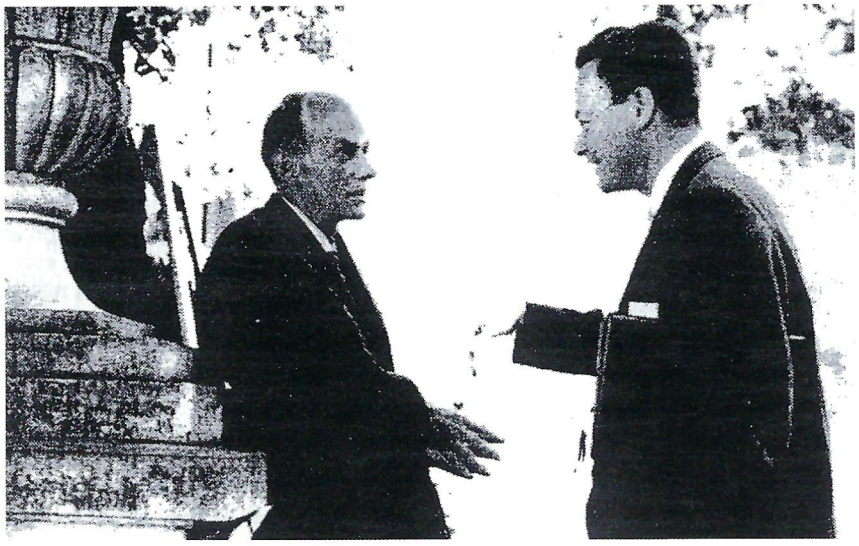


Figure-4 Graphe de Feynman représentant la collision de deux électrons échangeant un photon (lecture latérale). Il représente aussi l'annihilation et la production d'une paire électron-positon par production d'un photon (lecture verticale). En théorie quantique des champs, le même trème décrit simultanément les deux phénomènes.

On peut illustrer ce remplacement possible de particule (entrante) par antiparticule (sortante) à l'aide d'un graphe de Feynman construit à partir de celui de la figure-2 (figure-4). Un photon est ici échangé entre deux électrons qui ricochent l'un sur l'autre dans l'approximation la plus simple, négligeant ici toutes les complications telles que celles apparaissant dans la figure-3. Cette limitation donne cependant déjà une bonne approximation du phénomène. La collision décrite correspond en fait au graphe lu de gauche à droite. Mais on peut aussi le lire de bas en haut !
C'est maintenant un électron et un positon qui s'annihilent en un photon qui va créer une paire électron-positon. Le même terme, résumant un calcul en théorie quantique des champs, décrit simultanément les deux phénomènes. Particules et antiparticules ne peuvent pas être dissociées. Si l'énergie des deux électrons est supérieure à deux fois la masse, c'est le premier processus qui se produit. Si l'énergie de la paire électron-positon est supérieure à deux fois la masse, c'est le second. Si l'un existe. L'autre doit exister.
Nous sommes partis de l'électron et avons rencontré le positon, comme conséquence d'une théorie quantique, relativiste et causale de l'électron. Ceci fut vite généralisé à toutes les particules sensibles au principe d'exclusion de Pauli et pouvant être décrites, comme l'électron, par une équation de Dirac. Ce fut le cas du proton, du neutron, puis des quarks, tous de spin 1/2 (ou tous fermions). Le quark est le constituant ultime connu, le proton et le neutron étant formés chacun de trois quarks. La chromodynamique quantique qui rend compte de leur dynamique implique tout un ballet de quarks, d'antiquarks et de gluons autour de ces trois quarks et elle en précise la chorégraphie. Le gluon y joue le rôle du proton en électrodynamique. C'est Gell-Mann qui a le premier postulé l'existence des quarks, bien confirmée depuis. On dit qu'après avoir écouté une conférence de Gell-Mann sur les quarks, Dirac, qui était resté silencieux tout le temps, finit par dire "Savez vous, je crois à l'existence des quarks". "Merveilleux" dit Gell-Mann, tout joyeux, mais "quelle est votre principale raison pour cela". "C'est parce qu'ils ont le spin 1/2", répondit Dirac. Le quark est décrit par l'équation de Dirac.
L'antiproton fut découvert au milieu des années cinquante. Avec la théorie quantique des champs on combine relativité, mécanisme quantique et causalité et particule et antiparticule deviennent inséparables. Ceci est maintenant vrai pour toutes les particules, aussi bien celles de spin entier, comme les bosons, pour lesquelles le principe d'exclusion ne s'applique pas que pour celles de spin 1/2 pour lesquelles il s'applique. On a appris que ces bosons se comportent par beaucoup d'aspects comme des paires du type : particule A de spin 1/2- antiparticule B de spin 1/2. L'antiparticule correspond alors à la paire antiparticule A-particuleB. Ce système peut être différent du premier même si le boson est neutre mais ce boson peut alors se transformer au cours du temps en son antiparticule. Ces phénomènes d'oscillation entre particule et antiparticule ont été observés sur les mésons K neutres (particules étranges) et les mésons B neutres (particules porteuses de beauté). C'est une physique très intéressante et particulièrement riche mais que nous n'aborderons pas ici. Disons seulement que dans ces cas les interactions en jeu (interactions faibles) ne satisfont pas séparément aux invariances

Figure-5 Dirac (à gauche) et Feynman dans une discussion de physique (au cours d'une conférence à Varsovie).



par C, P et T, seule reste, comme il se doit, l'invariance par CPT.
Résumons. L'antimatière est imposée de façon très générale par la structure de la théorie quantique des champs et sa symétrie CPT, une théorie qui préserve la causalité dans un monde quantique et relativiste. **On voit donc apparaître la raison d'être de l'antimatière comme la façon dont la Nature préserve la causalité en présence de sauts quantiques et sans que le cours du temps ait un caractère absolu.**

Antimatière et causalité

Reprenons ceci de façon plus directe. Feynman a magnifiquement traité cette question dans sa conférence au Mémorial de Dirac de 1986. Il part d'exemples clairs et simples et en tire de brillantes généralisations. La figure-5 montre, de façon appropriée à ce stade, Feynman et Dirac engagés dans une conversation de physique. Dans cette conférence de 1986 Feynman considère en particulier le double ricochet d'une particule (électron) dans un champ électromagnétique. En termes quantiques, en deux points de l'espace temps l'électron absorbe ou émet un photon (figure-6). Entre les deux événements un électron virtuel (non directement observable) se propage. La figure 6-a montre les deux événements suivant le cours du temps. Il n'y a chaque fois qu'un électron en jeu. L'électron initial tout comme l'électron final, tous deux directement observables, ont manifestement une énergie positive. Mais voilà : Si on impose que l'électron intermédiaire ait lui aussi une énergie positive, on ne peut plus garantir que le second événement soit toujours dans le futur du premier. On peut trouver d'autres systèmes où, selon la relativité, le second événement apparaîtra comme précédant le premier (figure6-b), comme si l'électron intermédiaire remontait le cours du temps. On peut certes introduire explicitement des énergies négatives pour restaurer la causalité mais aussi rencontrer les difficultés apportées par l'équation de Dirac. Mais on peut sauver la causalité plus directement tout en ne conservant que des énergies positives, en introduisant le positon. On donnera ainsi une interprétation causale au processus de la figure6-b en disant que l'événement qui apparaît maintenant le premier est une création de paire électron-positon. Le positon suit le cours du temps (comme il se doit) pour aller annihiler l'électron initial au moment qui apparaît maintenant comme le plus tard. Comme Feynman le résume "la particule virtuelle de quelqu'un peut être l'antiparticule virtuelle de quelqu'un d'autre. "L'existence du positon est ici nécessaire pour maintenir la causalité.

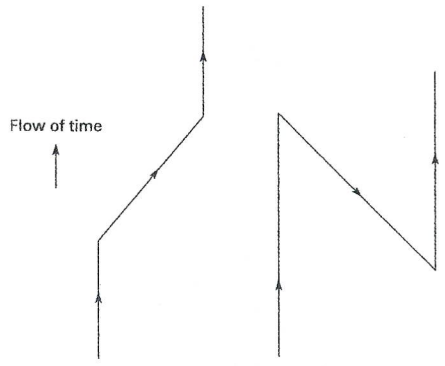


Figure-6 Double diffusion d'un électron dans le champ électromagnétique. Les deux diffusions d'électrons peuvent se suivre (6-a) ou impliquent la production d'une paire électron-positon (6b).

Feynman, dans sa formulation originale de l'électrodynamique quantique avait introduit cette nouvelle vision de l'antimatière où les positons apparaissent comme des électrons remontant le cours du temps. Sa description quantique du mouvement de l'électron dans le champ électromagnétique implique en effet une sommation sur de nombreux parcours dont ceux pour lesquels le temps propre à la particule semble parfois suivre un sens inversé. Dans ce cas l'électron est en réalité un positon.
Suivant l'événement en fonction du temps, on voit tantôt une seule particule, tantôt trois particules, comme l'apparition de trois routes qui peut se présenter dans une vision terre à terre de deux épingles à cheveux sur la même route. Comme nous l'avons déjà vu (figure-3), au sein d'un événement, la notion d'une particule bien individualisée cesse d'être valable. On ne peut plus affirmer si l'électron sortant est celui qui est entré ou si c'est un des électrons créé avec un positon. Ceci peut sembler une question naturelle mais les électrons sont indiscernables. Elle n'a en réalité pas de sens !

L'ANTIMATIÈRE EN PHYSIQUE DES PARTICULES AUJOURD'HUI

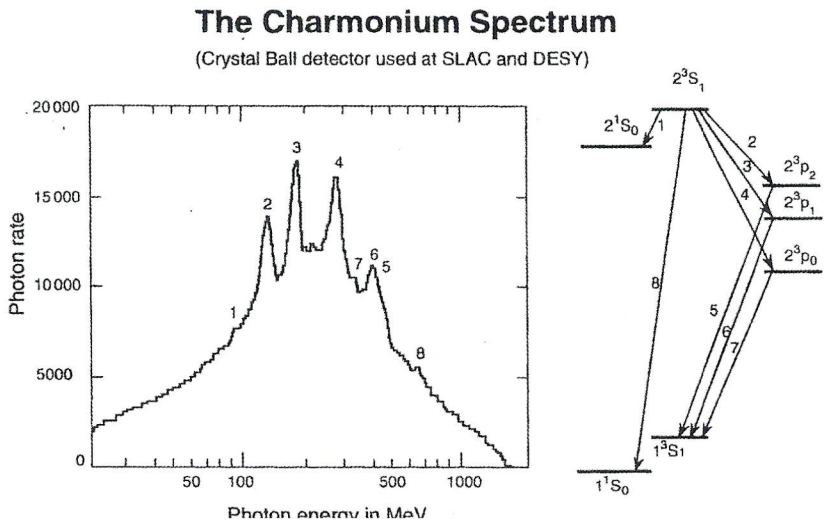
Etats liés de particule et d'antiparticule

Matière et antimatière peuvent s'annihiler mutuellement en rayonnement. L'image de l'antimatière rencontrant la matière avec une explosion brutale est même bien répandue. Avec l'annihilation d'un proton et d'un antiproton on obtient en effet une énergie par particule qui est 200 fois supérieure à ce que l'on a dans une bombe à hydrogène ! Les choses ne se passent cependant souvent pas d'une façon aussi violente. Quand un morceau d'antimatière commence à s'annihiler contre un morceau de matière, on obtient très vite entre les deux morceaux un coussin de radiation à haute pression qui tend à séparer matière et antimatière et qui freine l'évolution du processus. Une métaphore utile est offerte par des gouttes d'eau jetées sur une plaque très chaude. Les gouttes d'eau ne se vaporisent pas immédiatement, comme on le sait, mais se déplacent en tout sens sur la plaque, protégées de la chaleur intense par un coussin de vapeur. Le phénomène d'évaporation est assez lent. C'est d'ailleurs dans cette optique que l'on recherche l'antimatière dans l'univers. La rencontre d'une galaxie et d'un antigalaxie devrait donner pendant un temps très long la radiation caractéristique (rayons gamma) de l'annihilation d'un électron contre un positon. On n'a encore rien trouvé avec une précision qui place l'antimatière à un niveau au moins dix mille fois moins abondant que la matière, et cela dans tout l'univers visible. Nous reviendrons là-dessus. En physique des par-

ticules, on peut étudier les antiparticules produites même une par une. Quand elle rencontre une particule, une antiparticule forme souvent un état lié qui a un temps de vie appréciable avant de s'annihiler. Le positronium (un "atome" formé d'un électron et d'un positon) est un système bien connu.

Nous considérons plutôt pour être plus moderne, le charmonium. Il est formé d'un quark charmé et de son antiquark. Quark et antiquark ont ici des charmes opposés (comme leurs charges). Le système a un charme global nul mais il garde un charme caché. Le quark charmé est massif (près de une fois et demie la masse du proton). On peut donc facilement calculer d'une façon non relativiste, avec une très bonne approximation et sans les complications techniques de la théorie quantique des champs, les niveaux d'énergie du système, tout comme on sait le faire pour l'atome d'hydrogène. On peut prédire l'énergie des niveaux et la fréquence d'apparitions des transitions entre ces niveaux, avec chaque fois émission d'un photon. La séparation entre les niveaux d'énergie est ici exprimée en centaine de MeV et non plus en eV, comme dans le cas de l'atome d'hydrogène, mais la physique est très semblable. La figure-7 montre le spectre d'émission du charmonium (figure7-a) et les niveaux d'énergie du système (figure7-b). Un tel accord entre la théorie et l'expérience est une bonne preuve de la structure en quark (antiquark) du charmonium. Le charmonium vit assez longtemps avant de s'annihiler pour que ces transitions puissent être observées.

Figure-7 Le spectre d'émission du charmonium (7-a) et ses niveaux d'énergie (7-b). Il s'agit d'un "atome" formé d'un quark et d'un antiquark.



La production de particules

Explorant la structure profonde de la matière, on sonde les particules qui peuvent apparaître comme élémentaires en les frappant l'une contre l'autre aux énergies les plus élevées que l'on puisse obtenir. Les énergies de collision disponibles aujourd'hui se situent dans la centaine de GeV. Elles sont bien supérieures aux énergies de masse des particules stables amenées en collision (de l'ordre du Gev pour le proton et de 0.5 MeV pour l'électron). Rien n'empêche dans ce cas une partie de l'énergie cinétique de choc de se transformer en particules et antiparticules. En général, une collision de haute énergie va se traduire par une abondante production de particules nouvelles, avec autant d'antiparticules (une trentaine au total pour une collision d'une centaine de GeV). Ce sont le plus souvent des mésons π mais d'autres particules apparaissent aussi avec des probabilités plus faibles. A la fin des années quarante, l'énergie du Bevatron, à Berkeley, avait été choisie de façon à ce qu'une paire proton-antiproton puisse être produite. C'est comme cela que l'antiproton fut découvert.

La production de particules et d'antiparticules est aujourd'hui le "tout courant" en physique des hautes énergies. Mais ce n'est pas seulement un phénomène déjà bien connu et bien compris. C'est un phénomène très utilisé en pratique.

La plupart des particules produites sont instables mais ce n'est pas le cas des antiprotons et des positons qui, dans le vide, sont aussi stables que le proton ou l'électron. Ceci est une conséquence de l'invariance par CPT. On peut envisager la production de faisceaux de positons et celle de faisceaux d'antiprotons. Ils peuvent être guidés et accélérés dans des accélérateurs, tout comme des faisceaux d'électrons ou de protons. Les positons sont faciles à produire. Il suffit d'une faible énergie de choc. Les antiprotons sont beaucoup plus difficiles à obtenir. Mais un bon faisceau d'accélérateur contient cent milliards de fois moins de particules que ce que contient un gramme de matière (le nombre d'Avogadro). Recueillir un tel nombre d'antiprotons est aujourd'hui possible. On peut réaliser de bons faisceaux de positons mais aussi de bons faisceaux d'antiprotons.

Collisionneurs de particules et antiparticules

Un faisceau d'antiparticules présente un grand avantage. On peut l'introduire dans le tube à vide d'un accélérateur en même temps qu'un faisceau de particules. Particule et antiparticule ayant la même masse mais des charges opposées, le système qui accélère des particules dans un sens va simultanément accélérer les antiparticules mais dans l'autre sens, et cela dans le même tube à vide et en les canalisant par les mêmes aimants. Les faisceaux de grande énergie sont fractionnés en paquets qui se croisent avec collision frontale à l'intérieur de l'accélérateur, dans des zones particulières où l'on place des détecteurs. On transforme ainsi un accélérateur en collisionneur.

Quand on envoie le faisceau d'un accélérateur sur une cible fixe, une partie importante de l'énergie est "per-

due" dans l'entraînement de la particule cible. L'énergie de collision effective entre particules n'augmente que comme la racine carrée de l'énergie d'accélération. Avec un collisionneur toute l'énergie d'accélération est par contre directement disponible dans la collision. On peut ainsi obtenir sans coût supplémentaire des énergies de collision bien supérieures à celles disponibles à l'aide de l'accélérateur et de cibles fixes. Ou, si l'on veut, il faudrait pour les atteindre un accélérateur beaucoup plus grand et beaucoup plus coûteux. Transformer des accélérateurs de particules en collisionneurs de particules et d'antiparticules a permis un grand bond en avant en physique des hautes énergies. Il y eut d'abord des collisionneurs d'électrons et de positons car il est facile de produire des positons. Ceci commença dans les années soixante avec ADONE, à Frascati, en Italie. Ensuite la brillante série de découvertes à SPEAR (4 GeV), à SLAC, Stanford, aux Etats-Unis, avec la découverte du charmonium, de mésons charmés puis du lepton tau, fut à l'origine d'une série de machines d'énergies de plus en plus élevées. Il y eut CESR à Cornell, PETRA à DESY Hamburg en Allemagne, PEP à SLAC, TRISTAN à Tsukuba au Japon, le tout culminant avec le LEP au CERN (100 puis 200 GeV d'énergie de collision). La figure-8 montre l'emplacement du tunnel du LEP au CERN. LEP a été construit comme la machine idéale pour tester la théorie électrofaible qui unifie l'électrodynamique et les interactions faibles. La théorie a passé avec brio tous les tests précis ainsi permis. Il en fut de même de la Chromodynamique (la théorie des interactions entre quarks) qui put aussi être testée avec grande précision. Près de 800 thèses de physique sont déjà sorties des résultats du LEP. La moitié de ces thésards sont maintenant dans l'industrie où ils appliquent à de nombreux domaines leur style de travail, à la frontière de la physique et de la technologie, et pratiqué dans de grandes équipes internationales.

Les machines circulaires, comme toutes celles citées ont un grand avantage. Les paquets d'électrons et de positons accélérés se croisent très souvent (40 000 fois par seconde dans le LEP) et on peut ainsi obtenir de nombreuses collisions même si la probabilité d'en avoir une dans chaque collision entre paquets est assez faible. Un paquet d'électrons dans le collisionneur représente en effet un vide déjà poussé !

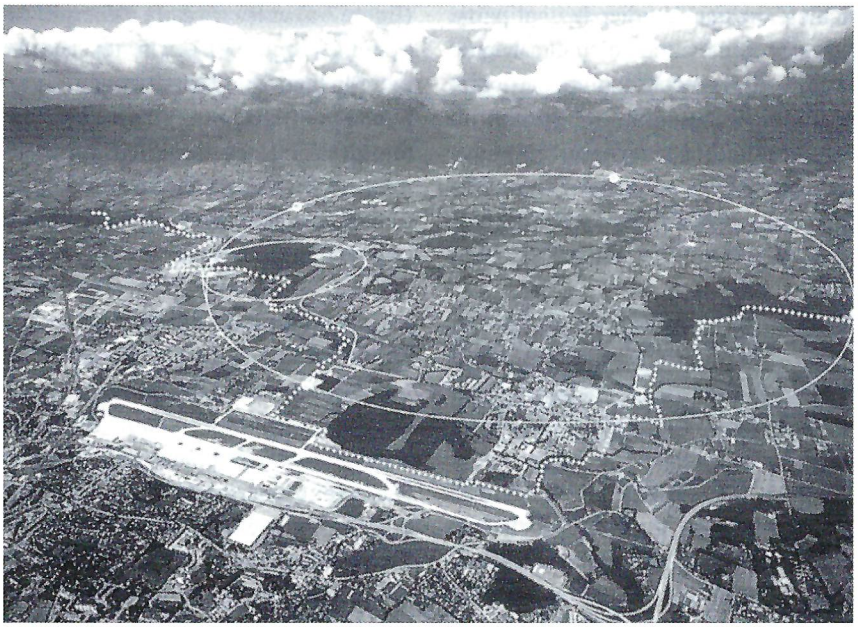


Figure-8 Emplacements des tunnels du LEP (27 km de circonférence) et du SPS (7 km de circonférence) au CERN à Genève.

LEP sera cependant la plus grande machine circulaire jamais construite (27 km de circonférence). Avec le rayonnement synchrotron des particules accélérées qui augmente comme la quatrième puissance de l'énergie, il deviendrait pratiquement impossible à plus haute énergie de restituer aux particules circulant dans la machine, l'énergie qu'elles perdraient par rayonnement à chaque tour. Des collisionneurs linéaires, où les électrons et les positons sont simultanément accélérés le long de deux tubes linéaires, devraient les remplacer. L'un deux fonctionne déjà à 100 GeV, à Stanford. Les paquets accélérés ne se croisent cependant alors qu'une fois et il faut les concentrer énormément pour obtenir une probabilité correcte d'interaction. Des projets existent, pour atteindre le TeV et le dépasser. Quand verront-ils le jour ? Ces machines sont très longues (dizaines de km) et coûtent donc très cher quand on les conçoit avec les procédés d'accélération actuels.

Les antiprotons sont beaucoup plus difficiles à obtenir car une paire proton-antiproton a une masse 2000 fois supérieure à celle d'une paire d'électron-positon. Il faut des collisions de protons de haute énergie pour les produire. Par contre, et du fait de la masse élevée du proton, il n'y a plus de problème avec la radiation synchrotron et cela jusqu'à une centaine de TeV . On peut donc accélérer des protons et des antiprotons dans une machine circulaire de taille relativement modeste et obtenir les plus hautes énergies de collision disponibles aujourd'hui (près de 2 TeV à Fermilab).

Le CERN, bénéficiant du talent et de la détermination de Carlo Rubbia et de Simon van der Meer, fit acte de pionnier en la matière. Au début des années quatre-vingts, des antiprotons purent être produits, stockés et accélérés en nombre suffisant dans le SPS, le Super Synchrotron à Protons, dont l'anneau (7 km de circonférence) est aussi visible sur la figure-8. La figure-9 montre l'accumulateur d'antiprotons où les antiprotons sont collectés et stockés, circulant dans une chambre à vide où on les "empile" par un procédé inventé au CERN. On obtient ainsi jusqu'à mille milliards d'antiprotons par jour, de quoi faire un bon faisceau

à injecter avec autant de protons dans le SPS. Protons et antiprotons y sont simultanément accélérés avant d'y circuler longuement (pour un jour) par paquets et en sens inverse, en se rencontrant dans des zones équipées de gros détecteurs. Le CERN put ainsi obtenir et étudier des collisions de protons et antiprotons à 600 GeV d'énergie de collision. Ceci était nécessaire pour pouvoir produire les bosons W et Z (de masses respectives de l'ordre de 80 et 90 GeV), qui sont les vecteurs de l'interaction faible dans la théorie électrofaible. Ils étaient au rendez-vous, en 1983. Cette découverte fut récompensée par le prix Nobel, attribué à Rubbia et à van der Meer.

Le proton (et l'antiproton) sont des objets compliqués. Ils contiennent des quarks, des antiquarks et des gluons qui tous prennent part à la collision. Dans une collision de haute énergie, proton et antiproton peuvent chacun être considéré comme un faisceau à large bande de quarks, d'antiquarks et de gluons, dont on connaît les rôles relatifs. Quand l'énergie de collision augmente, ils deviennent de plus en plus semblables car les collisions gluon-gluon, communes aux deux, sont très importantes et des collisions quark-antiquark deviennent aussi fréquentes entre protons. Ce qui est important dans un collisionneur proton-antiproton c'est moins de réaliser des collisions entre particule et antiparticule que d'obtenir des collisions de très hautes énergies à partir d'un accélérateur qui serait loin de pouvoir les atteindre sur une cible fixe. La grande première du CERN, qui a permis de découvrir le W et le Z, a été depuis suivie par Fermilab, à plus haute énergie. Ceci a permis la découverte du quark top, une particule d'une masse d'environ 175 GeV, qui était attendue et dont les mesures précises du LEP avait permis de déterminer la masse par l'intermédiaire des processus virtuels (figure-3) dans lesquels il peut se manifester, même en dessous de son énergie de production, ce qui était hélas le cas au LEP. Il faut en effet le produire en paires, soit une masse d'au moins 350 GeV !

Avec la construction du collisionneur de Fermilab, le CERN a "lâché prise" dans le domaine pour se concentrer sur l'exploitation du LEP et maintenant sur la construction du LHC. Il s'agit d'un collisionneur mais de...Protons, pouvant atteindre 14 TeV. Pourquoi abandonner la voie économique offerte par les collisions de protons et d'antiprotons ? En fait il faut obtenir une densité de collisions très élevées pour observer les événements rares particulièrement intéressants et les faisceaux de protons sont facilement mille fois plus intenses que ceux d'antiprotons. On abandonne l'économie d'un seul tube à vide pour deux faisceaux mais, en construisant la machine dans le tunnel du LEP (pas de problèmes avec la radiation synchrotron pour des protons), on réalise quand même de grosses économies. Produire une source assez intense d'antiprotons coûterait beaucoup plus cher et les physiciens doivent compter, en optimisant chaque fois les ressources.
Mais revenons au premier collisionneur de protons et d'antiprotons et à ses grands succès du début des années quatre-vingts.

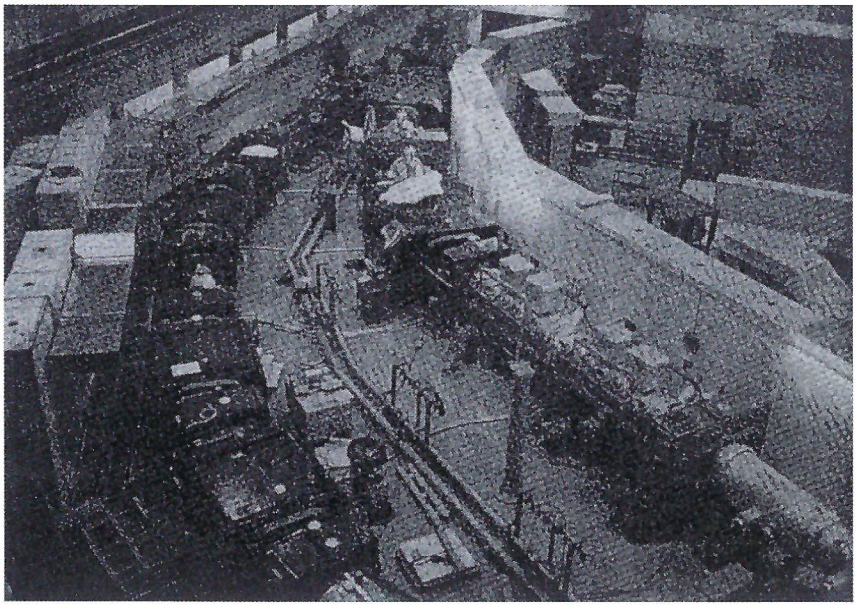


Figure-9 Accumulateur d'antiprotons au CERN. La première "bouteille" d'antimatière, stockant mille milliards d'antiprotons.

L'un deux fut la mise en évidence du Z, produit par annihilation quark-antiquark et se désintégrant parfois en une paire électron-positon. C'est comme cela qu'il fut découvert. La figure-10 donne un schéma du détecteur et de l'événement, tel qu'il est reconstruit par l'ordinateur à partir des données recueillies. On y voit clairement les deux traces à grand angle associées à l'électron et au positon, produit chacun avec une énergie d'environ 45 GeV par la désintégration du Z. Le reste des particules produites partent en avant et en arrière comme on l'attend d'une collision typique entre proton et antiproton à grande énergie. La figure-11 montre la production de deux jets hadroniques. Deux constituants ponctuels (quark, antiquark ou gluon) dans chacune des particules en collision (proton et antiproton) ont ici une collision frontale qui les éjecte à grand angle avec grande énergie. Ces constituants portent tous de la "couleur ", une quantité qui joue le rôle de la charge en chromodynamique quantique. Mais le vide est opaque à la "couleur". Ces constituants "colorés" doivent laisser leur énergie et leur impulsion très élevées à des faisceaux de particules neutres vis à vis de la "couleur", surtout des mésons π où un quark et un antiquark compensent globalement leur couleur qui sont opposées. Ces particules peuvent elles librement circuler dans le vide.

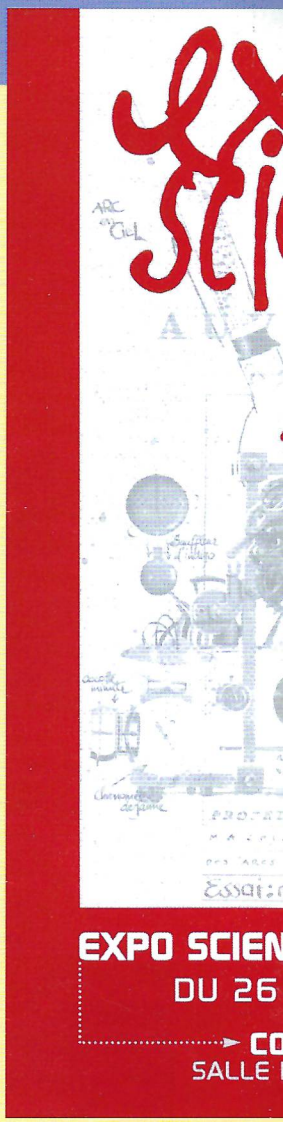
Suite page 15

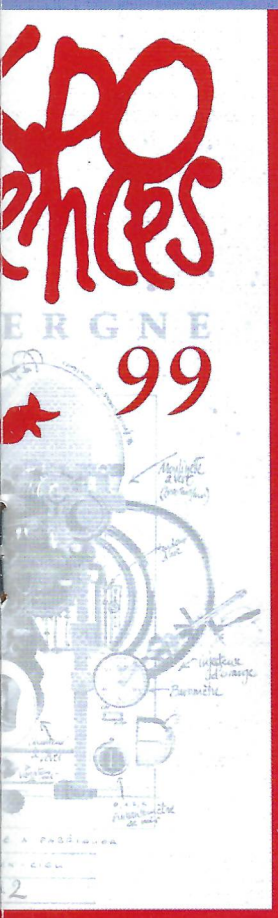
L'ADASTA à EXPO SCIENCES

Cournon d'Auvergne du 26 au 29 mai 1999

Suzanne Gély explique l'effet de serre

Un petit groupe entourant Jocelyne Allée et le géorama





Essayons les lunettes

Comme à l'accoutumée, Expo Sciences 99 a ouvert ses portes à de nombreux projets scientifiques, ou réalisations d'établissements scolaires de premier et second degré, sur les thèmes les plus variés : l'astronomie, la couleur, la faune, les plantes médicinales, l'énergie, l'eau, la préhistoire... et bien d'autres encore.

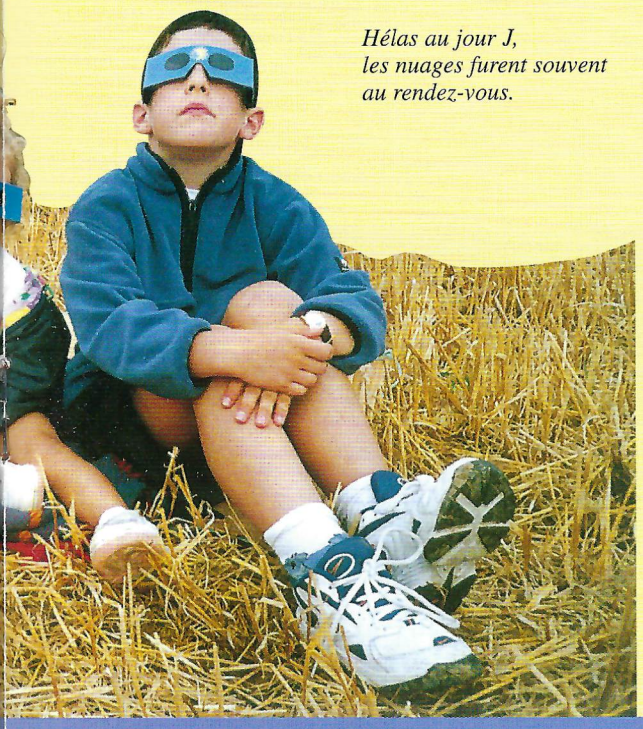
*Au stand de l'ADASTA on pouvait contempler quelques unes des magnifiques affiches de l'exposition EXPOSOLEIL * de la Société Astronomique de France.*

*En effet nous avions choisi d'axer notre intervention sur l'éclipse de soleil du 11 août 1999, et pour faciliter la compréhension de ce phénomène, nous avions fait l'acquisition du GEORAMA (Jeulin) *. Cet appareil, de conception très simple, permet de visualiser les mouvements de la terre par rapport au soleil, de la lune par rapport à la terre, et de comprendre les phénomènes qui en sont les conséquences : l'alternance du jour et de la nuit, les saisons, les éclipses, les marées... C'était aussi le bon moment pour parler "prévention" et sensibiliser le jeune public aux dangers d'une observation directe du soleil.*

Les enfants furent ravis d'essayer avant l'heure les lunettes de protection "spécial éclipse" de l'Association Française d'Astronomie.

Enfin, la réalisation d'une expérience de Suzanne Gély mettant en évidence l'effet de serre complétait cette présentation appréciée de tous.

L'ADASTA remercie vivement les personnes qui sont venues aider Suzanne Gély et Jocelyne Allée pendant ces quatre jours.



Hélas au jour J, les nuages furent souvent au rendez-vous.

** l'exposition et le géorama peuvent être loués à l'ADASTA*

Cérémonie de Remise de diplômes au CUST

Les Officiels

Le 25 septembre, le grand amphithéâtre de la Faculté de Lettres, était trop petit pour accueillir tous ceux qui étaient venus à la remise des diplômes aux quelques 200 élèves, des 5 départements de la promotion 1999 du CUST (Génie Biologique, Génie Civil, Génie Electrique, Génie Mathématique, Génie Physique). Il faut dire que cette remise de diplômes était un peu particulière puisqu'elle était la première des manifestations qui jalonneront l'année du trentenaire du CUST. Parents et amis avaient, certes, tenu à entourer les nouveaux ingénieurs mais on pouvait aussi remarquer la présence de nombreux représentants du monde universitaire ou économique.

Après l'intervention de Monsieur Michel TROQUET qui remercia les générations successives d'étudiants, de parents sans lesquelles le CUST ne serait pas l'école d'ingénieurs connue et reconnue qu'il est devenu, plusieurs orateurs se succédèrent à la tribune, chacun ayant à coeur de délivrer un message "de raison" et de bonne route aux nouveaux diplômés : Monsieur Géry DAMBRICOURT, Président du Conseil d'Administration du CUST, Monsieur Alain CATALA, Directeur Général du Groupe LIMAGRAIN et parrain de la promotion, Monsieur Jacques FONTAINE, Président de l'Université Blaise Pascal, Monsieur Bernard SAINT-GIRONS, Recteur de l'Académie de Clermont-Ferrand et enfin Madame Francine DEMICHEL, Directrice de l'Enseignement Supérieur.

Enfin, moment attendu par tous, les nouveaux ingénieurs montèrent sur scène, au son de marches viennoises, aussi gaies que martiales, pour recevoir leur diplôme, sous les applaudissements nourris de la salle puis Madame DEMICHEL et Monsieur CATALA remirent un "souvenir du trentenaire" aux majors des 5 départements (Rameau et Lulli ayant remplacé Johann Strauss...). Quand les acclamations se turent enfin, chacun se dirigea vers le buffet, servi en plein air, sous l'auvent de la faculté, car le temps lui-même, était d'excellente humeur !

Les diplômés

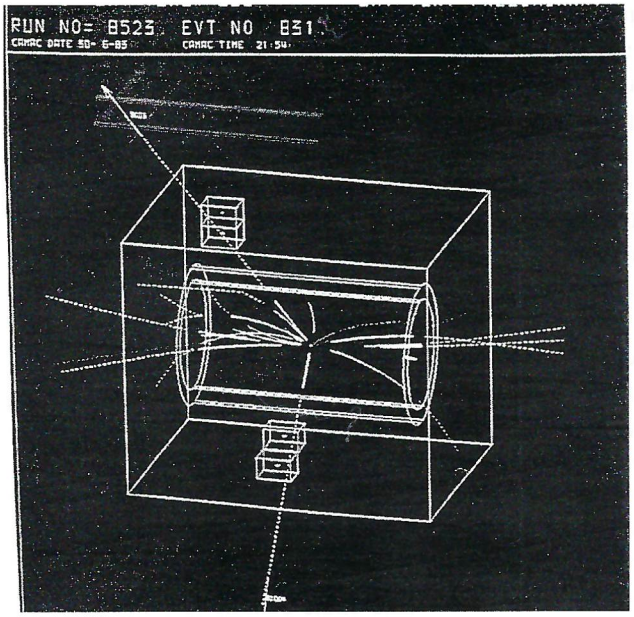


Figure- 10. Production de Z et annihilation en électron-positon dans une collision de proton et d'antiproton (l'antimatière à l'oeuvre!)

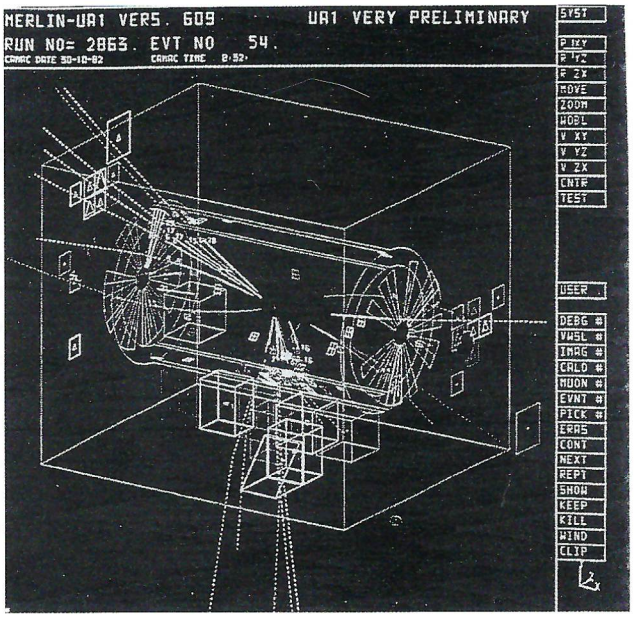


Figure-11. Production de deux jets hadroniques dans une collision proton-antiproton de haute énergie (la version moderne de l'expérience de Rutherford).

On ne peut pas voir directement quarks, antiquarks ou gluons, mais on voit clairement à la place ces jets qui sont déjà très spectaculaires et ne laissent aucun doute de la nature primordiale de l'événement. Tous ces effets avaient pu être prévus en chromodynamique quantique. Les premiers résultats du collisionneur ont rallié les derniers indécis au bien-fondé de la théorie.

On se souvient de la fameuse expérience de Rutherford qui, au début du siècle, avait mis en évidence le tout petit noyau de l'atome. Des particules alpha (noyau d'hélium) étaient envoyées sur une feuille de métal. La plupart d'entre elles traversaient la feuille comme si de rien n'était mais, quelques unes, relativement rares, étaient éjectées à grand angle, comme si elles heurtaient quelque chose de très petit et de très dur à l'intérieur de l'atome qui est pratiquement vide. Les jets hadroniques représentent la version moderne de l'expérience de Rutherford. Il s'agit maintenant de la diffusion des quarks, antiquarks et gluons, tous ponctuels et présents à l'intérieur des (relativement) gros protons et antiprotons auxquels ils appartiennent.

A l'oeuvre avec l'antimatière

Avec les collisionneurs d'électrons et de positons et ceux de protons et d'antiprotons, l'antimatière a vite été mise à l'oeuvre en physique des particules. Mais il n'y a pas que la frontière des hautes énergies, qu'elle a permis de repousser énormément et à faible coût. Il est aussi intéressant d'étudier et de comprendre les mécanismes d'annihilation des antiprotons contre des protons ce qui se fait le plus aisément à basse énergie. Une grande quantité d'énergie est déjà disponible par l'annihilation (2Gev) et cela permet de produire de nombreux mésons que l'on peut étudier en détail, certains connus, d'autres encore mal connus ou inconnus. Au CERN, les antiprotons accumulés ont pu être aussi décelés et stockés dans un anneau, le LEAR (Low Energy Antiproton Ring) d'où ils pouvaient être extraits peu à peu pour donner chaque fois un jet intense et pur d'antiprotons. Dans l'anneau du LEAR, mille milliards d'antiprotons peuvent être maintenus pendant des jours. Il comporte des guides d'onde qui transfèrent l'information sur les antiprotons plus vite que le faisceau lui même, qui tourne dans l'anneau, à une vitesse proche de celle de la lumière. On peut ainsi déceler une anomalie de distribution et la corriger quand elle arrive à l'autre extrémité du guide d'onde, pour maintenir sans arrêt la qualité du faisceau et assurer sa longue durée de vie.

On peut faire beaucoup de physique avec des antiprotons même en dehors de la physique des particules. Ils peuvent être capturés par des atomes où ils y remplacent un électron et occupent des niveaux d'énergie atomiques spécifiques. Ces atomes ont des comportements très particuliers. On peut aussi capturer des antiprotons dans une trappe d'une taille de l'ordre d'un décimètre et transportable. Cela ne représente aucun danger. L'annihilation brutale d'un milliard d'antiprotons ne donne même pas un joule d'énergie ! Les antiprotons y tournent dans un champ magnétique en étant prisonniers d'un tube à vide. A l'aide de ces trappes, on peut vérifier avec grande précision les propriétés de l'antiproton, sa masse, son comportement vis à vis de la gravitation... La précision actuelle dans ces domaines atteint déjà le milliardième.

LEAR a maintenant été arrêté, après avoir été bien exploité pour la physique des particules, mais un décélérateur d'antiprotons, d'utilisation beaucoup plus économique, le remplace maintenant pour continuer ces expériences de trappes.

Il suffit souvent d'une quantité infime d'antiprotons pour faire des expériences de physique, et, comme nous l'avons vu, d'un millième de milliar-

dième de gramme pour faire déjà un bon faisceau d'accélérateur. Heureusement car ils coûtent très cher. On peut estimer le prix actuel des antiprotons à cent mille milliards d'Euros par gramme! Ceci exclut heureusement toute idée de bombe d'antimatière.

Avec des bouteilles magnétiques d'antiprotons et des bouteilles magnétiques de positons on peut envisager de faire de l'antihydrogène. C'est le pas suivant vers ce qui est effectivement de l'antimatière. L'antihydrogène est neutre mais il est diamagnétique et on peut donc en principe stocker de la glace d'antihydrogène dans une bouteille magnétique. On l'a déjà fait pour la glace d'hydrogène.

C'est à LEAR qu'on a obtenu pour la première fois de l'antihydrogène. C'était en 1996, le faisceau d'antiprotons circulant dans l'anneau passait à travers un jet de xénon. Le noyau du xénon a une très grande charge. Passant auprès d'un tel noyau, un antiproton peut induire la production d'une paire électron-positon dans le champ électromagnétique du noyau et, dans certains cas rares, capturer le positon. L'antiatome neutre n'est alors plus confiné dans le tube à vide de LEAR par les aimants de guidage. Il sort en droite ligne. Un premier détecteur arrache le positon et signe sa nature. Un second détecteur, qui lui fait suite, signe, en coïncidence, la nature de l'antiproton. L'antihydrogè-ne est découvert. En 1996, on a formé et détecté ainsi 9 (anti)atomes d'antihydrogène. L'expérience a été reproduite plus tard à Fermilab. Il reste maintenant à capturer l'antihydrogène produit en quantité raisonnable, à l'aide cette fois de trappes d'antiprotons et positons. On pourra dans un premier stade étudier en détail les propriétés spectroscopiques de l'antihydrogène et vérifier si elles sont bien, comme on l'attend, identiques à celles de l'hydrogène. On devrait atteindre une précision du milliardième de milliardième mais il s'agit de la symétrie CPT. Elle doit tenir !

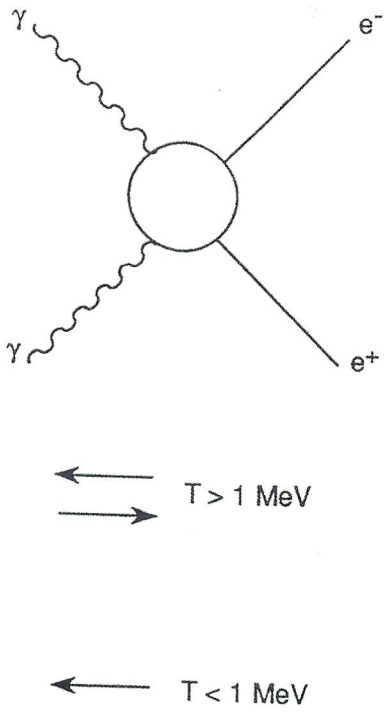


Figure 12 Annihilation électron-positon en deux photons, et réaction inverse. Selon la température (énergie des photons ambiants), les deux réactions, ou seulement l'une d'elles, sont possibles.

L'ANTIMATIÈRE À L'ÉCHELLE COSMIQUE

La physique nous donne une vision bien symétrique entre la matière et l'antimatière et, dans ce cas, quoi de plus naturel qu'un univers où matière et antimatière seraient globalement également présentes même si, dans notre voisinage, et pour notre avantage, il n'y a que de la matière. Cependant voilà : Sondant l'univers de plus en plus loin on ne voit aucun signe d'antimatière s'annihilant contre de la matière. Il semble que tout l'univers dont nous recevions des signaux, au moins jusqu'à plusieurs milliards d'années lumière, soit constitué uniquement de matière, la limite expérimentale actuelle pour la présence relative d'antimatière étant de l'ordre du dix-millième. Et pourtant tout porte à penser que l'antimatière devait être omniprésente au début de l'univers, quand il était très chaud !

Notre univers est né d'un Big Bang qui s'est produit il y a environ 15 milliards d'années. Quand on remonte vers le passé, la température, soit l'énergie moyenne par particule, croît comme l'inverse de la racine carrée du temps écoulé depuis le début. Avec 100 GeV, énergie actuelle typique en physique des particules, nous sommes à un dix-milliardième de seconde du Big Bang. A 1MeV, énergie d'annihilation d'une paire électron-positon, nous sommes à environ une seconde du Big Bang. La physique qui prévaut au début de l'univers est la physique des hautes énergies que l'on étudie à l'aide d'accélérateurs. Au début de l'univers la densité est très élevée.

Elle chute comme le carré du temps écoulé depuis le Big Bang. Tout ce qui est permis se passe donc très vite. Nous nous limiterons ici à décrire deux événements dans l'histoire de l'univers qui ont (nous le pensons) impliqué la disparition de l'antimatière. Le premier se place quand l'univers a une seconde. Jusque là la température est supérieure à 1 MeV. L'annihilation d'une paire électron-positon en deux photons est possible, mais c'est aussi le cas pour la réaction inverse, où deux photons donnent une paire électron-positon. Tout se passe très vite et dans les deux sens (figure-12). Il y a équilibre entre électrons, positons et photons qui sont tous également présents dans l'univers.

Dépassons cependant une seconde. La température de l'univers tombe en dessous de 1MeV et avec elle celle de l'énergie des photons. Dès qu'elle devient inférieure à 0.5 MeV, les photons n'ont plus assez d'énergie pour créer des paires électron-positon mais les positons peuvent toujours librement s'annihiler contre des électrons. Les positons et les électrons disparaissent et il ne reste que des photons. Pas tout à fait. Il y avait au début de l'univers un léger excès d'électrons par rapport aux positons (un sur un milliard) et, après le grand carnage d'électrons et de positons, c'est ce milliardième d'électrons qui reste, comme seuls électrons présents dans l'univers, jusqu'à l'époque actuelle.

Le second événement se place quand

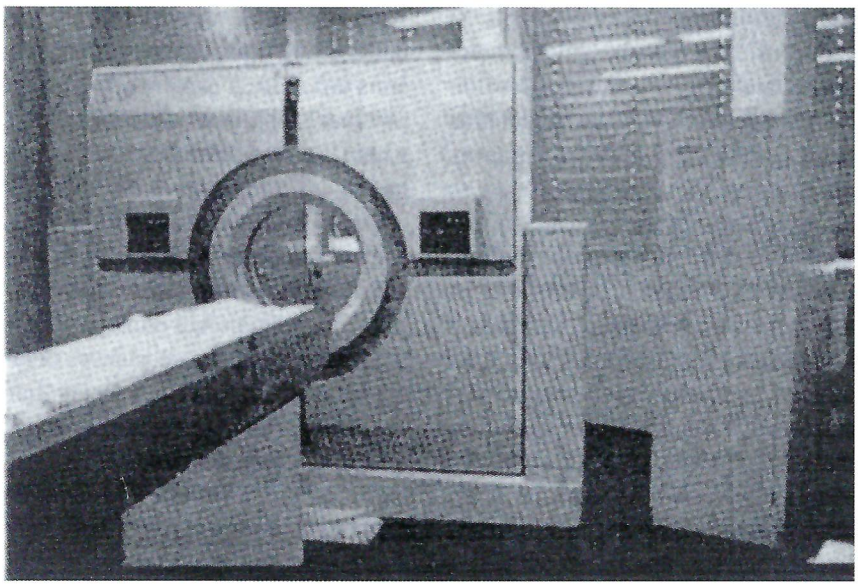
l'univers avait dix microsecondes et la température tombait en deçà de 200 MeV. Il ne s'agit plus d'un simple effet de seuil de production mais d'un changement de phase du vide (comme de l'eau se transformant en glace). A haute température, supérieure à 200 MeV (soit mille fois supérieure à la température au centre du soleil), la chromodynamique implique que le vide est transparent à la "couleur" des quarks. A plus basse température, il se fige dans un autre état, opaque à la "couleur". Jusqu'à 200 MeV, l'univers est un plasma de quarks, d'antiquarks et de gluons qui circulent librement dans le vide et sont en collisions constantes. Il y a pratiquement autant de quarks que d'antiquarks, de gluons et de protons. En deçà de 200 MeV, quarks, antiquarks et gluons ne peuvent plus circuler dans le vide. Ils doivent se grouper en particules globalement neutres vis à vis de la couleur, comme les protons et les antiprotons. Il faut trois quarks pour un proton et trois antiquarks pour un antiproton. Mais la température est déjà bien inférieure à la masse du proton. Protons et antiprotons peuvent librement s'annihiler mais le rayonnement ambiant n'a plus assez d'énergie pour produire des paires proton-antiproton. Ils disparaissent tous en un grand carnage. Pas tous car il y avait au début un léger excès de protons (de quarks) par rapport aux antiquarks, de l'ordre de un pour un milliard. C'est cette relativement infime quantité qui constitue tous les protons dans l'univers actuel.

Aujourd'hui, quand on compte les protons, les électrons et les photons dans l'univers, on trouve bien un milliard de fois plus de photons. Ils se sont refroidis avec l'expansion de l'univers et constituent le rayonnement micro-onde qui le baigne. C'est une des preuves du Big Bang.
On peut se demander pourquoi le nombre des protons survivants semble égal à celui des électrons survivants, l'univers étant globalement neutre. Répondre à cette question conduit à la violation de l'invariance par CP dans une théorie de grande unification, mélangeant quarks et électrons. Alors que la symétrie associée à une telle théorie a pu prévaloir au tout début de l'univers, sa violation avec le refroidissement de l'univers au-dessous d'une température de changement de phase (quand l'univers avait 10^{-36} seconde), a pu conduire à une différenciation entre quarks et électrons avec le même excédent entre particules et antiparticules. Ceci est très plausible mais correspond à un domaine d'énergie où la théorie ne peut encore être soumise à un test expérimental direct. On trouve en tous cas bien de l'ordre d'un milliard de photons par proton ou électron dans tout l'univers visible. Tout est conforme à un début de l'univers où matière et antimatière étaient pratiquement sur le même pied (à un milliardième près !) Mais où toute l'antimatière se serait annihilée contre la matière dans la première seconde. Ceci ne doit cependant pas décourager la recherche d'antimatière dans l'univers. Il se pourrait que l'asymétrie presque primordiale entre matière et antimatière n'ait pas été la même dans tout l'univers, ou qu'une partie de l'antimatière ait résisté au carnage. Une expérience spatiale va la rechercher au niveau du milliardième, dans le cas particulièrement intéressant de l'hélium par rapport à l'antihélium. La limite actuelle est de quelques millionièmes. Néanmoins, l'absence d'antimatière apparaît comme une des conséquences supplémentaires et vérifiées du Big Bang.

D'AUTRES USAGES POUR L'ANTIMATIÈRE

Nous nous limiterons d'abord aux usages médicaux qui correspondent à des applications déjà présentes ou à venir. Le plus important aujourd'hui est le PET (Positon Emission Tomography). On utilise des positons qui sont émis par des noyaux radioactifs déficients en neutrons. Un proton s'y transforme en neutron avec émission de positon et neutrino. Un tel positon, produit dans la matière vivante, a un libre parcours moyen de 1 mm. Il s'annihile contre un électron en produisant une paire de rayons gamma émis dos à dos à une énergie caractéristique. L'observation de ces rayons gamma permet d'obtenir une bonne image de l'organe à partir d'un nombre assez faible d'événements, soit une injection très modeste de substance radioactive. Il existe des émetteurs de positons qui s'intègrent très facilement dans des substances organiques utilisées comme traceurs, que ce soit le Carbone-11, l'Azote-13, l'Oxygène-15 ou le Fluor-18. La détection de leur présence et de leur circulation dans le corps humain peut être utilisée non seulement pour localiser des anomalies dans des organes particuliers mais aussi pour étudier des modifications biologiques en cours d'évolution, en suivant le métabolisme. Des développements pathologiques peuvent être décelés bien avant que des modifications anatomiques soient décelables. Les traceurs les plus utilisés, comme ceux mentionnés, ont des vies moyennes de l'ordre de quelques minutes à une heure. Il vaut mieux les produire sur place. Ceci est possible à l'aide de petits cyclotrons spécialisés qui sont disponibles et d'usage facile. Les cameras du PET qui détectent les rayons gamma donnent une bonne localisation in vivo du traceur et cela en fonction du temps.

Les PET sont maintenant disponibles sous une forme automatisée facilement utilisable à l'hôpital. La figure 13 montre le premier scanner PET réalisé au CERN et installé à l'hôpital universitaire de Genève. Le développement des caméras a beaucoup bénéficié des travaux sur les cristaux (Oxyde de Bismuth et de Germanium) mis au point pour un des détecteurs du LEP. Il va maintenant bénéficier du perfectionnement de l'électronique associée aux cristaux de verre au tungstène d'un détecteur du LHC.
Il y a environ 200 PET dans le monde et leur nombre augmente vite. Ils ont de nombreuses applications en oncologie (détection et traitement des tumeurs) en neurologie et en cardiologie. L'usage clinique est aussi en rapide extension.



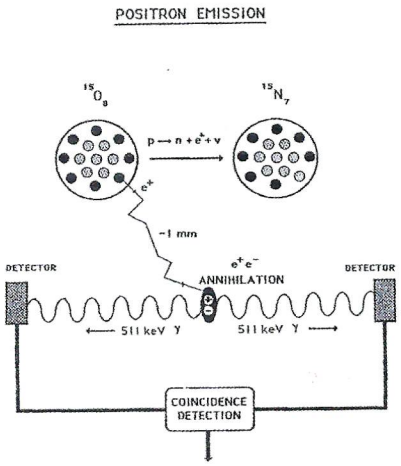


Figure 13 Tomographie par annihilation d'électron et de positon (PET). 13-a vue de l'appareil. 13-b. Principe de la détection. Un usage déjà répandu de l'antimatière dans le domaine médical.

Il s'agit de positons. Que peut on dire des antiprotons ?
Leur production n'est pas encore très efficace et coûte très cher. Elle reste certes très abordable pour le millième de milliardième de gramme où nous sommes, mais serait encore prohibitive pour un microgramme. La capture et le stockage se font aujourd'hui avec une efficacité de l'ordre du pour cent mais, une fois le stockage réalisé, les transferts de faisceaux s'effectuent avec une efficacité de 90%. Les bouteilles magnétiques contiennent facilement jusqu'à 10^{12} antiprotons et cela sans danger; Le rendement énergétique est ridicule, il n'est que de l'ordre du centième de millionième ! Ceci interdit heureusement toute application militaire.
Il y a beaucoup à tirer de ces antiprotons et d'abord, comme nous l'avons vu, pour la physique. Le meilleur usage pratique qui puisse être envisagé actuellement semble être en tomographie, où des protons remplacent déjà les rayons X en tomographie et en oncologie. Les détecteurs de Georges Charpak avec leurs systèmes de détection fondés sur les chambres à fils sont très efficaces et les doses d'irradiation peuvent rester minimes tout en produisant de bonnes images. Avec la tomographie par protons on doit cependant utiliser les diffusions à grand angle, seules capables de bien localiser le lieu d'impact. Les protons diffusés majoritairement à petit angle sont de faible utilité mais créent quand même des dégâts. Avec des antiprotons, chaque impact est par contre clairement localisable par l'intermédiaire des mésons π produits par l'annihilation contre un proton et donc facilement détecté. Le niveau d'irradiation pourrait être considérablement réduit, tout en donnant de bonnes images. Avec un milliard d'antiprotons on peut obtenir une très bonne vision tridimensionnelle d'un organe. On peut définir l'énergie de façon que la zone d'arrêt, où les dégâts se produisent, soit à l'endroit voulu. On protège ainsi les tissus intermédiaires ce qui n'est pas le cas avec des rayons X. Si une tumeur est détectée, une dose plus élevée (par un facteur mille) peut être utilisée pour la détruire. Avec les antiprotons tels qu'on sait les produire aujourd'hui à un coût acceptable, on peut envisager ainsi un usage tomographique et oncologique important.
Si l'on considère maintenant le futur plus lointain et cela sans sous-estimer l'ingéniosité à venir, on peut envisager des moteurs de fusée. Mais il faut pour cela atteindre le milligramme, soit un milliard de fois plus que ce qui est possible aujourd'hui ! Sautant à pieds joints au dessus de ces problèmes, envisageons une tuyère chauffée à très haute température (3000 K) par annihilation d'antimatière. Avec une grande vitesse d'échappement des gaz, une telle tuyère pourrait donner un bien meilleur rendement (entre poids utile et masse des gaz d'échappement) que ce que l'on peut obtenir aujourd'hui. Avec quelques milligrammes d'antihydrogène on peut chauffer ainsi plusieurs tonnes de fuel et partir pour un voyage interplanétaire.
Des quantités infimes d'antimatière (un millième de milliardième de gramme) apparaissent déjà comme très utiles. On ne peut que rêver à ce qui serait possible avec des milligrammes !

Mais, à côté de ces applications actuelles et futuristes, qui touchent encore à la science fiction, on ne peut qu'admirer la très grande réussite intellectuelle que représente la prédiction de l'antimatière par Dirac. Dans les années soixante Heisenberg ne disait-il pas que c'était "La découverte la plus décisive dans notre découverte des propriétés des particules élémentaires". Et pourtant, pour les jeunes physiciens de ma génération, l'antimatière nous semblait déjà si naturelle quand, dans les années soixante, nous calculions des graphes de Feynman et utilisions l'invariance par CPT de la physique. Elle est aujourd'hui le "tout courant" en physique des particules et elle a déjà fait une entrée importante dans le domaine médical.

Pasteur à Clermont-Ferrand

Avril 1871-Août 1871

Suzanne GELY
Agrégée de Sciences Physiques
Ancienne élève
de l'Ecole Normale Supérieure
Présidente de l'ADASTA

Portrait de Louis Pasteur

En avril 1871, quand Pasteur arrive à Clermont-Ferrand, il a déjà la renommée d'un savant estimé et remarquable : il a 49 ans...

Né à Dôle, dans le Jura, en 1822, Louis Pasteur, après des études secondaires à Besançon, entre à l'ENS, rue d'Ulm, à Paris. Elève du célèbre chimiste, Jean-Baptiste Dumas, après avoir été reçu à l'Agrégation, il obtient un Doctorat de Physique et de Chimie, en 1848.

Nommé d'abord professeur de Sciences Physiques au lycée de Dijon, il enseigne ensuite la Chimie à la Faculté des Sciences de Strasbourg où il est accueilli chaleureusement, le 15 Janvier 1849, par le Recteur, M. Laurent (qui avait débuté sa carrière, comme professeur, au collège royal de Clermont-Ferrand). Pasteur ne tarde pas à obtenir, du Recteur, la main de sa fille, Marie, (née à Clermont-Ferrand, en 1826) qui sera, jusqu'à la mort de Pasteur, en 1895, une épouse dévouée, aimante et fidèle.

En 1854, Pasteur est nommé professeur et Doyen de la Faculté des Sciences de Lille qui venait de se créer. Mais, en 1857, le voilà Directeur scientifique de l'ENS, rue d'Ulm. C'est à partir de 1857, et à la requête d'un fabricant d'alcool de betterave mécontent de sa production, que Pasteur s'intéresse aux fermentations : alcoolique, lactique, butyrique, à la formation du vinaigre (1862) ... C'est Pasteur qui, le premier, explique l'origine des fermentations en les rattachant à l'action d'un micro-organisme vivant provenant de l'extérieur et non pas issu d'une génération spontanée, comme le prétendait Félix Fouchet, Directeur du Muséum d'Histoire Naturelle de Rouen et correspondant à l'Institut.

Plaque commémorative, 25 rue Montlosier

En 1862, à 40 ans, Pasteur entre à l'Académie des Sciences et continue la bataille contre la génération spontanée. En 1863, il s'intéresse aux maladies des vins et pense qu'elles sont dues à des germes; Il découvre alors que, pour empêcher le vin de se gâter, il suffit de porter les bouteilles pendant quelques instants à des températures entre 50° et 60°C !

En 1864, il présente à l'Académie des Sciences la célèbre expérience des ballons : deux ballons de verre au long col de cygne contiennent une infusion de matière organique mais pour l'un des ballons le col effilé a été recourbé; Ils sont portés à ébullition puis laissés à l'air libre... Au bout de quelques jours, apparaissent des moisissures dans le ballon à col droit tandis que le ballon à col recourbé reste inaltéré! Pasteur explique que les poussières et les germes de l'air ont pu agir dans le liquide du premier ballon mais ont été arrêtés par le col recourbé du deuxième. Et si on agite vivement deux ou trois fois le ballon à col recourbé, les moisissures apparaissent à leur tour au bout de deux ou trois jours car l'air contenant les germes a pu entrer brusquement dans le ballon malgré le col recourbé...

Enfin un troisième ballon de verre contenant la même infusion organique, porté à l'ébullition puis soigneusement fermé hermétiquement par la fusion au chalumeau du col de verre reste inaltéré !

En 1865, son maître de jadis, Jean-Baptiste Dumas, que Napoléon III a nommé Ministre de l'Agriculture, demande à Louis Pasteur d'étudier la maladie des vers à soie qui ruine les magnaneries du Midi de la France; Pendant cinq ans, Pasteur ira régulièrement dans le Gard; Il découvre vite l'origine de la maladie et le remède : rejeter les oeufs des papillons malades : c'est le grainage.

En 1868, une hémorragie cérébrale paralyse le côté gauche; Pasteur se remet lentement mais gardera une difficulté pour marcher. Cependant, il reprend courageusement et passionnément ses travaux.

Le 18 Juillet 1870, la France déclare la guerre à la Prusse. Hélas, les soldats de Bismarck envahissent très rapidement la France; Pasteur voudrait rester à Paris mais ses amis lui font comprendre que, en cas de siège, il serait une bouche de plus à nourrir...

Médaille de Bronze Exposition d'Hanoï 1896 — Médaille d'Or Exposition de Paris 1897

ANCIENNE MAISON KUHN-RIBEYRE

Fondée en 1797

GRANDE BRASSERIE MALTERIE

W. KUHN

USINE A VAPEUR ET HYDRAULIQUE

BIÈRE BRUNE POUR LA MISE EN CRUCHE — BIÈRE BLANCHE BIÈRE BOOCK ET DE CONSERVE

EXPORTATION

C'est dans le Laboratoire de l'importante BRASSERIE KUHN que M. PASTEUR, membre de l'Institut fit, pendant plusieurs mois, ses recherches relatives aux fermentations.

Il y puisa les documents de son livre célèbre : *Essais sur la Bière*, publié dans un but patriotique, après nos revers de 71, pour donner plus d'extension à l'industrie de la Brasserie en France. Dans sa préface, M. PASTEUR remercie M. KUHN de son concours. C'est aussi dans l'Usine Kuhn qu'on appliqua, la première fois, le système PASTEUR à la fabrication de la Bière.

Alors, la mort dans l'âme, le 5 Septembre 1870, trois jours après Sedan, Pasteur part pour Arbois, son pays natal. Mais la défaite de la France est telle que la guerre gagne bientôt le Jura. Dans l'armée en déroute, près de Pontarlier, parmi les soldats épuisés, affamés, Pasteur retrouve son fils Jean-Baptiste qui part rejoindre l'armée de la Loire tandis que Pasteur, avec sa femme et sa fille doivent se réfugier en Suisse pour fuir les Prussiens qui occupent maintenant le Jura...

Mais Pasteur veut rejoindre la France, sa Patrie, malgré les événements douloureux de la Commune.

C'est alors que son ancien élève, Emile Duclaux, lui propose de venir chez lui, à Clermont-Ferrand, 25 rue Montlosier, afin de reprendre des travaux en commun. Emile Duclaux, né à Aurillac en 1840, entré à l'ENS, Ulm, avait été le préparateur de Pasteur lors de l'étude des fermentations. Pasteur, arrivé à Clermont en Avril 1871, bien que meurtri par la défaite, reprend un vieux projet d'étude de la fabrication de la bière afin de ravir à l'Allemagne sa réputation de premier brasseur du monde...

Avec Emile Duclaux, il va voir M. Kuhn, propriétaire de la Brasserie de Chamalières qui fabriquait une excellente bière de renommée locale mais M. Kuhn avait des déboires avec certaines cuvées pour des raisons mystérieuses! Alors Pasteur s'attaque au problème, allant chaque jour à la Brasserie, située à l'entrée de Chamalières sur un chemin partant du faubourg de Clermont en direction de Royat.

C'est donc à Clermont que Pasteur commence à mettre au point "un procédé nouveau assez avantageux de la fabrication de la bière" (Lettre à son ami Raulin du 13 Juin 1871). Il obtient d'excellents résultats en opérant sur des cuvées de 25 litres...

Les recherches sur la bière ne sont pas encore terminées mais Pasteur décide, au mois d'août de rentrer à Paris, enfin pacifié. Il continuera, pendant trois ans encore ses recherches sur la bière qui assureront désormais aux brasseurs des cuvées régulières de la plus haute qualité en pratiquant un chauffage modéré, procédé que les Allemands appelleront pour la première fois "pasteurisation". Grâce aux travaux commencés à Chamalières, Pasteur prit un brevet en stipulant "Je désire que les bières fabriquées par mon procédé portent le nom de Bières de la revanche nationale et à l'étranger le nom de Bières françaises".

La vie de Louis Pasteur après son départ de Clermont est connue tous; Aussi je ne citerai que les grandes étapes :

1873 : Entrée à l'Académie de Médecine; Pasteur donne alors des conseils d'antisepsie; c'est grâce à lui que les maladies contagieuses sont de devenues évitables par des pratiques d'hygiène et d'asepsie ignorées autrefois.

De 1877 à 1881 : Etude de la maladie du charbon des moutons et découverte des premiers vaccins.

1882 : Entrée à l'Académie Française où il est accueilli par Renan.

1884-1885 : Recherches sur la rage : premier vaccin inoculé en juillet 1885 sur le jeune Joseph Meister, âgé de 9 ans, mordu par un chien enragé; Pasteur lui sauve la vie.

14 Novembre 1888 : Inauguration de l'INSTITUT PASTEUR.

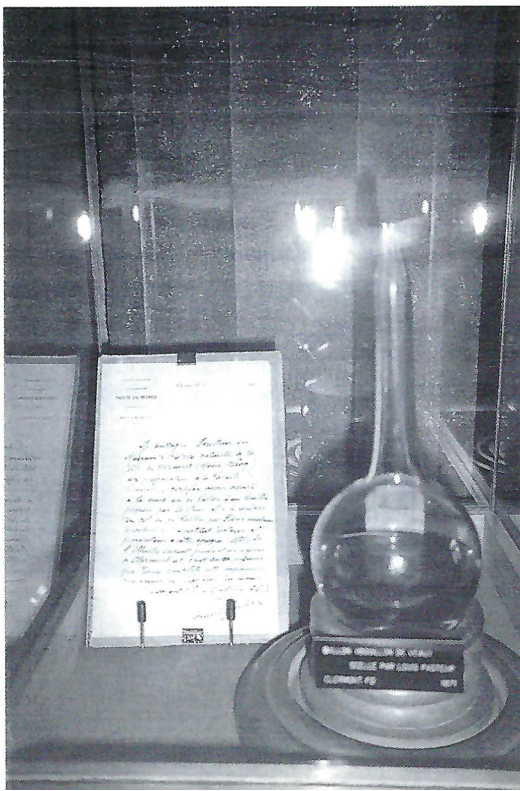
27 décembre 1892 : Célébration solennelle du 70 ème Anniversaire de Pasteur, dans le grand amphithéâtre de la Sorbonne, en présence du président de la République (Sadi Carnot) et de nombreux dignitaires Français et étrangers.

Pasteur lutte courageusement contre la maladie...

Mais il s'éteint, entouré de l'estime générale et de l'affection de sa famille, le 28 Septembre 1895.

Dans sa vie aussi remplie les quelques mois passés à Clermont-Ferrand pourraient paraître insignifiants, mais ils méritent d'être signalés; La ville possède, au Musée Lecoq, un des précieux ballons, préparés et scellés par Pasteur lui-même; Au Musée du Ranquet se trouve une presse en bois ayant servi à Pasteur dans la Brasserie Kuhn; D'autres témoins (plaque de la rue Montlosier, dalle de la brasserie de Kuhn, 15 bis avenue Pasteur à Chamalières, Boulevard Pasteur à Clermont...) évoquent le passage du grand savant dans la capitale Auvergnate qui fut, dans les premières à appliquer les théories pastoriennes en médecine et en chirurgie.

Le regretté Professeur Gaston Pierre Dastugue, de la faculté de médecine de Clermont-Ferrand a su, dans des articles (bulletin de l'ADASTA-Auvergne-Science n°6, Juin 1988) et par des conférences raviver le souvenir du passage à Clermont de l'illustre savant, bienfaiteur de l'humanité, LOUIS PASTEUR.



L'expérience de Pasteur (Musée Lecoq Clermont-Ferrand) . on peut lire sur le manuscrit : "Je soussigné le Directeur du Muséum d'Histoire Naturelle de la ville de Clermont, ex-préparateur à la faculté des Sciences, certifie avoir assisté à la mise en ce ballon d'un bouillon préparé par Pasteur, et la soudure du col de ce ballon par Roux, actuellement directeur de l'Institut Pasteur et préparateur à cette époque (1871) de l'illustre savant pendant son séjour à Clermont et c'est en sa présence que Roux compléta cette expérience commencée par Pasteur lui-même. Clermont-Ferrand, ce 2 octobre 1924.

Quelques exemples pris parmi les ressources minérales actuelles du Massif central

Un bref aperçu de la conférence faite à l'ADASTA le 19 mai 1999 par Monsieur Claude Perrin-Waldemer, Maître de Conférences honoraire à l'université Blaise Pascal.

Entité à la fois géographique et géologique, le Massif Central occupe une part importante (1/5 e) de la superficie de la France. Son histoire remonte à plus de 500 millions d'années.

LA GÎTOLOGIE MINIÈRE

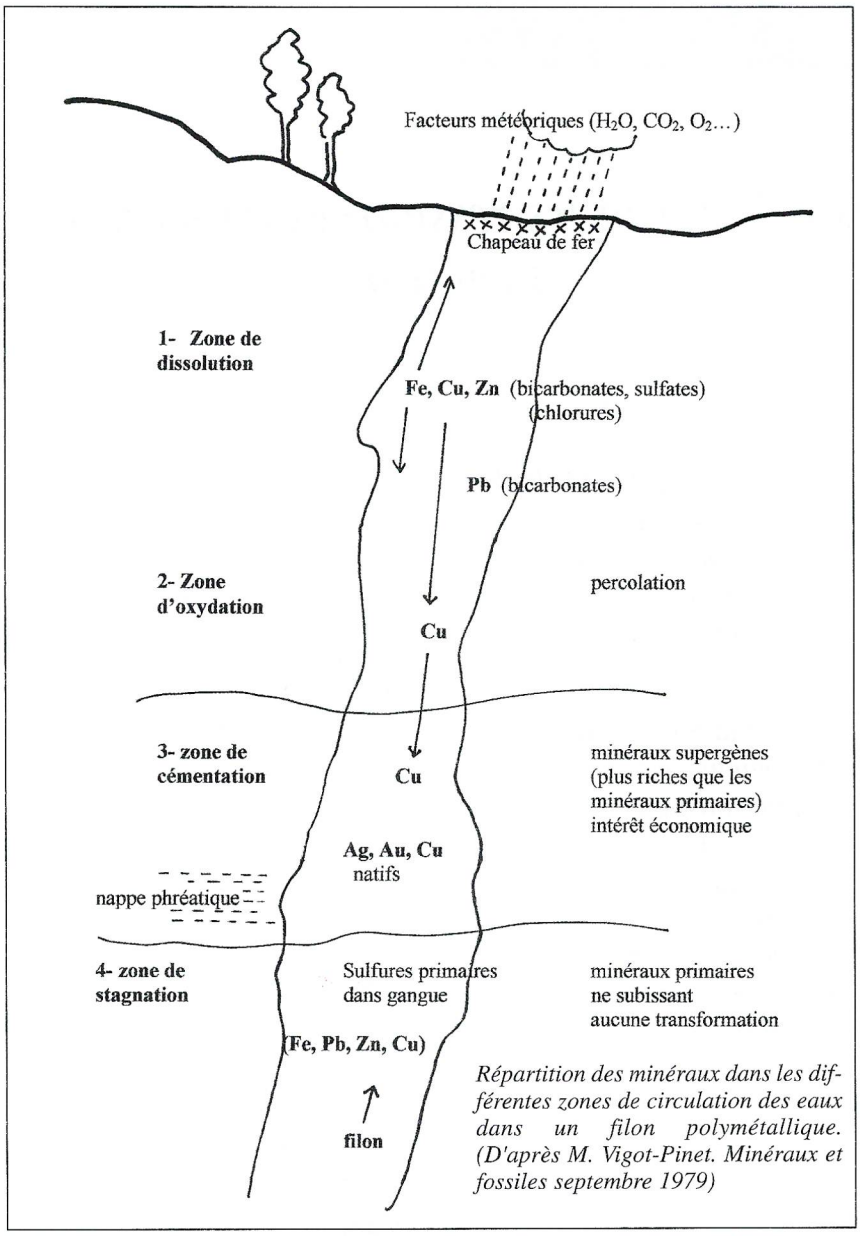
Le socle du Massif Central est hétérogène par sa pétrographie : schistes cristallins et granites variés. Cet ensemble a été soumis à des tensions mécaniques considérables, qui ont donné lieu à de nombreux systèmes de failles tant à la fin de l'ère primaire, qu'à l'aube de l'ère tertiaire lors de la formation de la chaîne alpine. Cet abondant réseau de failles de directions variées a entraîné la formation de nombreux gîtes minéraux, de sources hydrothermales et de dépôts de charbon, notamment le long du sillon houiller s'étendant sur 400 km. Ces gîtes minéraux sont en grande partie associés à la mise en place des granites du cycle orogénique hercynien (la chaîne hercynienne s'étant formée entre 400 et 300 millions d'années).

Rappelons qu'un gîte est une accumulation d'éléments métalliques (Cu, Fe, Pb, Zn, ...)liés à d'autres éléments (S, As, Sb ...) en concentration suffisante (supérieure à 1 %) pour justifier son exploitation et son intérêt industriel.

Les gisements peuvent se présenter soit en dépôts horizontaux (gisements stratiformes) dans les terrains encaissants, soit en filons recoupant des formations très diverses : sédimentaires, métamorphiques ou éruptives.

En ce qui concerne les gisements en couches (stratiformes), dans des successions de strates sédimentaires, on notera que la mobilité des différents ions métalliques s'effectue à partir du dôme d'un pluton granitique selon des vitesses différentes. L'uranium reste intragranitique en subissant toutefois une concentration, due à la circulation d'eaux siliceuses le précipitant sous forme d'oxyde (UO_2), pour atteindre une teneur supérieure à 5 ppm (5 parties par million, soit 5 g par tonne). D'autres métaux, comme l'étain et le tungstène, restent au voisinage du pluton. Enfin le zinc, l'argent, le plomb, l'antimoine et le mercure migrent le plus haut dans les terrains sédimentaires par rapport au pluton. Le cas de l'or est particulier car il n'obéit pas au trajet classique. En effet l'or subit des remobilisations successives. Venant du manteau terrestre, il gagne la croûte océanique, puis continentale, se dépose dans les schistes cristallins, il est remobilisé à la fois par des eaux météoriques, et des circulations hydrothermales d'origine magmatique, pour se déposer dans des zones soumises à d'intenses mouvements de compressions mécaniques (failles de cisaillement) au sein de roches granitiques, soumises à une tectonique dite "cassante". Le granite, paradoxalement, a une teneur très faible en or (inférieure à 2 mg par tonne) et n'est donc nullement son berceau d'origine.

Madame Gély, présidente de l'ADASTA accueille Monsieur Perrin-Waldemer



Répartition des minéraux dans les différentes zones de circulation des eaux dans un filon polymétallique. (D'après M. Vigot-Pinet. Minéraux et fossiles septembre 1979)

QUELQUES EXEMPLES DE GÎTES MINIERS

Le seul site exploité actuellement, celui de Mont-Roc, est situé au sud du Massif Central au sud-est d'Albi. Les autres sites classiques de la Haute-Loire (Langeac, Chavaniac-Lafayette) et du Puy-De-Dôme (Le Beix) sont épuisés depuis de nombreuses années. Le gisement de Mont-Roc, le premier producteur européen de fluorite ($Ca F_2$)est exploité en carrière à ciel ouvert. Une usine de concentration de la fluorite y est annexée pour la production de spath fluor "chimique", donnant lieu à de nombreuses applications industrielles (produits fluorés et fondant en métallurgie)

Un gîte de barytine ($BaSO_4$) est situé à Chaillac (36) dans la partie nord-ouest du Massif Central, à la limite du socle et de l'affleurement des terrains secondaires.

Dans l'important gisement polymétallique, situé dans l'Allier près de Saint-Eloy-les-Mines, les micaschistes du toit sont riches en wolframite (WO_4 Mn Fe). Il faut remarquer aussi l'importante réserve que constitue le granite intrusif de Beauvoir qui, dans sa partie superficielle, s'altère en kaolin, et qui dans sa partie plus profonde est très riche en étain (cassitérite), en mica lithinifère (lépidolite), en niobio-tantalites (Fe Mn $Nb_2 O_6$ et Fe Mn $Ta_2 O_6$). Ces deux métaux lourds sont séparés par flottation à partir du kaolin.

Enfin on aborde le cas du métal le plus précieux : l'or. Rappelons que la richesse en or de la Gaule était sujet de convoitise pour les Romains. César y envoya ses légions pour l'exploiter, en Limousin notamment. La mine du Bourneix, près de Saint Yrieix, est activement exploitée depuis 1980. L'or natif est associé au quartz. L'or est associé au mispickel ou arsénopyrite (Fe As S) de façon très intime, soit entre les cristaux sous forme de dépôt d'or, soit dans la maille même du réseau cristallin du mispickel, comme le signale un chercheur de Nancy intervenant lors de la discussion et apportant aussi une confirmation et une précision très intéressante.

CONCLUSION

Au terme de ce tour d'horizon, il apparaît qu'il existe une grande variété dans le comportement des éléments chimiques, conduisant à des concentrations pouvant atteindre quelques pour cent, alors qu'ils étaient à l'état d'oligo-éléments dans la croûte terrestre.

Certains métaux, comme le plomb, sont issus de la désintégration d'éléments radioactifs (Uranium). Le plomb peut se combiner au soufre pour donner un sulfure PbS, la galène.

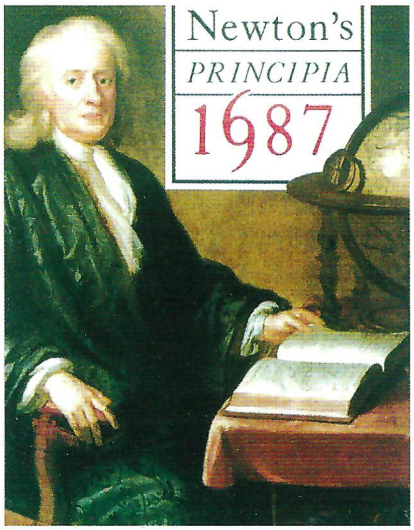
Un autre cas est celui de l'or, d'origine extra-terrestre, puisque issu des réactions nucléaires produites au sein des étoiles (cycle de Bethe). L'or s'est accumulé ensuite parmi les poussières et particules en suspension gravitant autour du soleil qui ont conduit à la formation des planètes. L'or est resté intact : présent à l'état natif, il a migré depuis le noyau terrestre, a traversé le manteau pour gagner la croûte terrestre. Par ailleurs l'or est aussi associé dans des sulfures plus ou moins complexes.

Rares sont les éléments métalliques qui sont restés à l'état natif, hormis le groupe de l'argent, l'or, le platine, le mercure. La plupart se sont combinés au soufre, ou à l'oxygène pour aboutir à la création d'espèces minérales nouvelles.

Isaac NEWTON

"Philosophiae Naturalis PRINCIPIA Mathematica"

L'ADASTA possédant l'exposition (en dix panneaux) célébrant en 1987, le tricentenaire de la publication d'Isaac NEWTON "Philosophiae Naturalis PRINCIPIA Mathematica" se devait de proposer aux classes européennes, avec l'autorisation du Muséum d'Histoire Naturelle du Royaume Uni, l'étude de chacun des dix textes dont nous commençons la publication dans ce numéro.



Historical Background to Principia

M.A Hoskin

In the Middle Ages Aristotle's world picture was taught throughout western Europe. It was a "two sphere" universe : at the centre the small sphere of Earth on which we live, and at the outside the sphere of the so-called "fixed" stars. The earthly part of the world extended nearly to the moon, and was made of the four elements earth, water, air and fire. In this "sublunary" region there was life and death, coming-to-be and passing-away.

By contrast, the heavens saw no change. The stars were made of a fifth element ("quintessence") that expressed its permanence by moving eternally in circular motions around the centre of the universe. The "fixed" stars always kept their positions relative to each other. The "wandering" stars ("planets", among them the Sun and Moon) moved in combinations of circular motions, and it was a prime task of the astronomer to analyse these motions and forecast the future positions of the planets. Astronomy was a kind of applied geometry.

In trying to do this, the Pole Nicholas Copernicus (1473-1543) found that his task was strikingly simplified if he supposed that the planets circled around the Sun rather the Earth - so much so that he became convinced this really was the case, despite the fact that we on Earth have no sensation of movement; Copernicans would need to explain how this could be. On the other hand, Copernicus continued to believe astronomers must work only with uniform circular motions; but by making the Earth a planet he undermined Aristotle's contrast between the earthly world and the heavens.

A reform of observational astronomy began with Dane Tycho Brahe (1542-1601). Tycho campaigned for accuracy, partly through a systematic programme of instrument construction, and partly by making many observations where his predecessors would have been content with one or even none. He showed that a bright new object that appeared in 1572 was indeed a new star-so proving that the heavens do change-and that the comet of 1577 was celestial, and not in the atmosphere of the Earth as Aristotle would have held. As the comet passed freely through the region of the planets, the question of what moved the planets became acute.

ORIGINE HISTORIQUE DU PRINCIPE

A la fin du Moyen Age, la description du monde d'après Aristote était enseignée à travers toute l'Europe occidentale. C'était un univers à deux sphères : au centre, la petite sphère de la Terre sur laquelle nous vivons et, à l'extérieur, la sphère des étoiles, dites "fixes". La partie terrestre du monde, s'étendant presque jusqu'à la Lune, était constituée des 4 éléments : terre, eau, air, et feu. Dans cette région "sublunaire" il y avait la vie et la mort, la naissance et l'anéantissement. Par contraste, le monde céleste ne voyait aucun changement. Les étoiles étaient faites d'un cinquième élément (quintessence) qui exprimait sa permanence en se déplaçant éternellement sur des trajectoires circulaires autour du centre de l'univers. Les étoiles "fixes" gardaient leurs positions relatives les unes par rapport aux autres. Les étoiles "vagabondes" (planètes parmi lesquelles le Soleil et la

Lune) se déplaçaient en combinaisons de mouvements circulaires et ce fut le premier travail de l'astronome d'analyser ces mouvements des planètes. L'Astronomie était ainsi une sorte de géométrie appliquée.

En essayant de comprendre ces mouvements, le Polonais Copernic (1473-1543) trouva que sa tâche était extraordinairement simplifiée s'il supposait que les planètes circulaient autour du Soleil plutôt que de la Terre, si bien qu'il devint convaincu que c'était réellement le cas, même si, sur la Terre, nous n'avions pas la sensation de mouvement - point sur lequel il faudrait trouver une explication . D'un autre côté, Copernic continuait à croire que les astronomes devaient travailler seulement avec des mouvements circulaires uniformes; mais, en faisant de la Terre une planète, il dénonçait le contraste aristotélicien entre le monde terrestre et le Ciel. Une réforme de l'astronomie expérimentale commença avec le Danois Tycho-Brahé (1542-1601). Tycho milita pour la précision, d'une part en lançant un programme de construction d'instruments, d'autre part en faisant beaucoup d'observations alors que ses prédécesseurs s'étaient contentés d'une seule observation ou même pas du tout. Il montra ainsi qu'un nouvel objet brillant, apparu en 1572, était sans doute une nouvelle étoile (prouvant ainsi que le ciel changeait) et que la comète de 1577 était un objet céleste situé non dans l'atmosphère de la Terre comme Aristote l'aurait soutenu. Puisque la Comète passait librement à proximité des planètes, la cause du mouvement des planètes devint une question urgente à étudier!

Congrès de la Société Française de Physique

Participation de l'ADASTA

Le congrès général de la Société Française de Physique a eu lieu à Clermont-Ferrand du 5 au 9 Juillet 1999.

Organisé par Jean-François Mathiot, et présidé par Yves Petroff, directeur de l' "European Synchrotron Radiation Facility" à Grenoble, il a réuni environ 400 participants pour :
- Des expositions
- Des exposés grand public
- 13 colloques de spécialités
- 13 conférences plénières sur les thèmes suivants :

- **Le neutrino et ses mystères,** Jacques BOUCHEZ
- **Atome et cavité : une exploration du monde quantique,** Jean-Michel RAIMOND
- **De nouvelles structures au centre de l'atome,** Olivier SORLIN
- **Défis scientifiques des technologies Si du futur,** Jean THERME
- **Variations naturelles ou anthropiques du climat : le rôle du couplage océan-atmosphère,** Hervé LE TREUT
- **Les géologues font-ils de la physique du solide,** Philippe GILET
- **Dynamique femtoseconde de la liaison hydrogène dans l'eau liquide,** Geoffrey GALE
- **Des cordes aux particules,** Jean ILIOPOULOS
- **Magnétisme de nano-objets, applications des nano-matériaux magnétiques,** Dominique GIVORD
- **L'ADN : propriétés physiques et mécanismes biologiques,** Didier CHATENAY
- **Observation de quasi-particules de charges fractionnaires,** Christian GLATTLI
- **Le Very Large Telescope Européen : défis scientifiques et techniques,** Michel DENNEFELD
- **Exposés des lauréats SFP 99 des prix Gentner-Kastler et Jean Ricard.**

L'ADASTA était représentée à la Maison des Congrès par deux panneaux illustrant le passage en Auvergne de deux grands savants : Pasteur en 1871, voir l'article du Professeur Dasturgue dans Auvergne-Sciences n° 6 Mai Juin 1988 et l'article de Madame Gély dans le présent numéro.
Ampère en 1834, voir les articles de Madame Gély dans Auvergne-Sciences n°44 et n°45