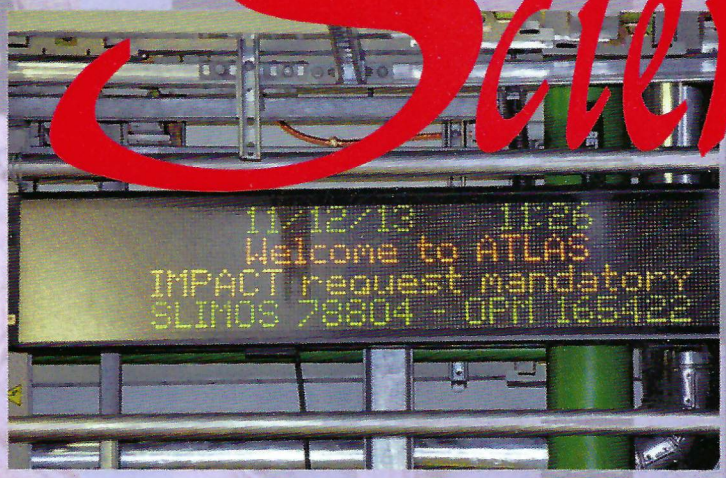
AUVERGNE Sciences

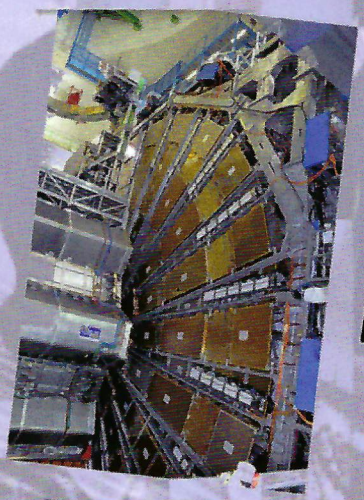
REVUE SPÉCIALE N° 4
MARS 2014

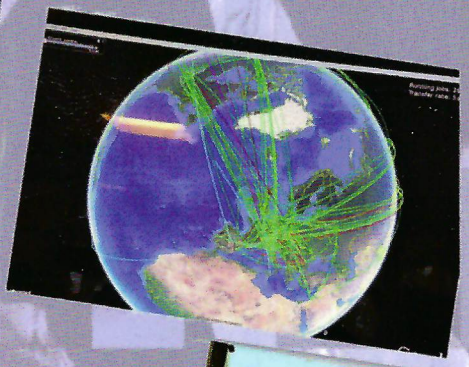
N83

L'enfance de l'Univers



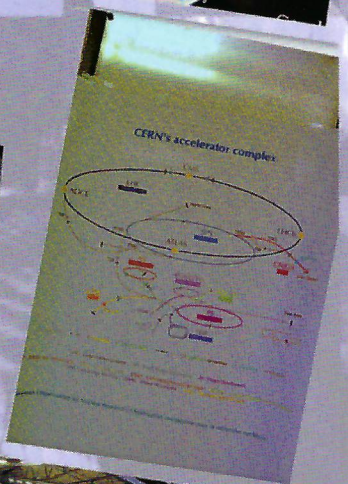
















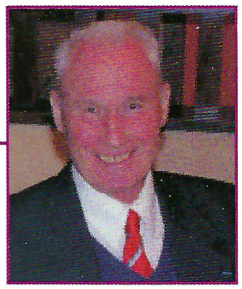


ADASTA

Revue de l'ADASTA

Association pour le Développement de l'Animation Scientifique de Technique en Auvergne

EDITORIAL



L'ADASTA est particulièrement heureuse de vous présenter cette revue spéciale «d'Auvergne Sciences» consacrée à l'historique de la physique des particules et de l'astrophysique et à leur évolution. Il s'agit d'un travail magistral effectué par notre ami et confrère Louis AVAN que la plupart d'entre nous connaissent ou ont connu et qui tous ont apprécié sa compétence, sa délicatesse, sa modestie et sa disponibilité.

Comme disait Montesquieu en parlant des qualités nécessaires aux hommes qui se destinent à être exemplaires, Louis possède l'intelligence, le caractère, le talent et la vertu. Qu'il en soit remercié chaleureusement et accepte notre admiration et notre estime.

Au contenu remarquable de cette revue, l'ADASTA ajoute un historique de la création du laboratoire de physique corpusculaire de Clermont-Ferrand par Louis et Madeleine AVAN.

Cet article a été rédigé par notre Vice-Président Jean-Claude Capélani que nous tenons à remercier tout particulièrement.

L'ADASTA peut être fière d'avoir de tels talents dans ses rangs.

Merci encore à Louis Avan pour tout ce savoir qu'il apporte à l'ADASTA, et merci à toute l'équipe qui a permis la réalisation de cette revue spéciale.

Le Président Henri Bouffard

SOMMAIRE

Enfance de l'Univers ..... **p 01**

Petite histoire d'un laboratoire de recherche ..... **p 50**

MERCI À NOS SPONSORS

CLERMONT COMMUNAUTÉ · INRA · PUY-DE-DÔME CONSEIL GENERAL · VILLE DE CLERMONT FERRAND · CHAMALIERES · RÉPUBLIQUE FRANÇAISE MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE DRRT Auvergne · CENTRE FRANCE · CONSEIL RÉGIONAL AUVERGNE · IFMA INSTITUT FRANÇAIS DE MÉCANIQUE AVANCÉE · MICHELIN Une meilleure façon d'avancer · EDF

Comité de rédaction de la Revue Auvergne-Sciences

Rédacteur en chef : Philippe Choisel

Membres : Georges Anton, Gérard Baillet, Vincent Barra, Henri Bouffard, Jean-Claude Capelani, Jean Chandezon, Roland Fustier, Michel Gendraud, Paul-Louis Hennequin, André Schneider

ADASTA

Adhésions et Abonnements

Adhésions à titre individuel : 30 €

Adhésions à titre collectif : 80 €

L'adhésion donne droit à la revue Auvergne-Sciences, à des invitations aux conférences et aux visites d'entreprises *(une participation aux frais peut être demandée lors de certaines visites).*

Permanences - elles sont assurées par les bénévoles : lundi de 14h à 17h, mercredi de 9h à 12h
En cas d'absence laisser un message sur répondeur ou E-mail.

Adresser le courrier: **ADASTA,**
Centre Riche-Lieu
13 rue Richelieu - 63400 Chamalières

Siège social : 10 rue de Bien-Assis
63000 Clermont-Ferrand
Tél. 04 73 92 12 24
E-mail : adasta@wanadoo.fr
Site internet : www.adasta.fr

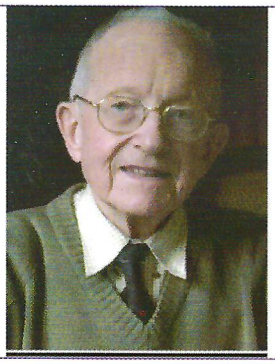
Dépôt légal mars 2014 - N° ISSN - 1166-5904

© toute reproduction partielle ou totale interdite. Les articles publiés sont de la responsabilité exclusive de leurs auteurs.

ENFANCE DE L'UNIVERS:
DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES A LA COSMOLOGIE

De cinq dates-clés:

10^{-43} seconde
10^{-35} seconde
10^{-11} seconde
380 000 ans
13 milliards 820 millions d'années



M. Louis AVAN

Professeur honoraire du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, membre actif de l'Adasta

Six chapitres couvrent ce thème qui va nous proposer des allées et venues entre l'immensité de notre Univers et la petitesse des ses composants.

I. Les particules élémentaires. Les 4 interactions fondamentales. Les lois de conservation.
II. Le boson de Brout - Englert - Higgs (BEH) ou "boson de Higgs".
III. Unification et brisures de symétries. L'inflation de l'Univers.
IV. Les nombres cosmiques. Certitudes et incertitudes.
V. Le rayonnement fossile (ou cosmologique) micro-ondes et le modèle standard de l'Univers.
VI. L'Enfance de l'Univers : les « nouvelles » apportées par l'observatoire spatial PLANCK. Questions.

I - LES PARTICULES ELEMENTAIRES. LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES. LOIS DE CONSERVATION.

I-1 LA PERSPECTIVE ATOMIQUE

- L'idée que le monde est fait de particules plus ou moins élémentaires s'est imposée progressivement tout au long de l'histoire des sciences, voire l'histoire de la connaissance.

- Les Grecs se sont demandé si la matière était continue ou discontinue. **Leucippe** (v. 460 - 370 av. J.C.) et son élève **Démocrite** (même époque) ont opté pour la deuxième hypothèse : Démocrite donna à ces particules « invisibles » le nom d'atomes, du grec « a-tomos » (indivisible). Cette idée, aujourd'hui familière, fut rejetée vigoureusement par Platon et Aristote, avant d'être reprise dans l'enseignement d'Epicure.

- Un illustre épicurien, **Lucrèce** (v. 98 - 55 av. J.C.), philosophe romain, introduit les idées atomiques dans son magnifique poème « De rerum natura » (« De la nature ») épopée en six livres. Cette œuvre fut l'une des premières à bénéficier de l'invention de l'imprimerie. L'idée d'atome ne disparaît jamais complètement en Occident.

- En 1647, **Pierre Gassendi** (1592 - 1655), partisan du système de Copernic, admirateur de Galilée, renoue avec le matérialisme atomiste d'Epicure, tout en le nuançant de thèmes spiritualistes (« De vita et moribus Epicuri »…). Les idées de Gassendi ont influencé les travaux de **Sir Robert Boyle** sur les corps simples et primitifs et les corps composés, sans toutefois parvenir au concept d'élément chimique de Lavoisier (R. Boyle 1627 – 1691) (**Antoine Laurent de Lavoisier** 1743 – 1794).

- Les premiers travaux d'**Isaac Newton** (1642 – 1727) sur la structure de la matière et la transmutation (1714) sont influencés par Boyle. Newton est délibérément atomiste. Entre autres découvertes essentielles, il expose une première théorie de la gravitation et de l'attraction universelle.

- 1804 : **John Dalton** (1766 – 1844). Le savant anglais John Dalton est souvent considéré comme le « père de la chimie moderne » sans pour autant négliger, d'un autre point de vue, le rôle essentiel de Lavoisier. En 1801, il découvre en même temps que **Gay-Lussac** (1778 - 1850) la loi de dilatation des gaz (loi vérifiée par Mariotte). Par une intuition géniale, il suppose (1804) que chaque élément chimique est formé d'atomes caractérisés par leur masse. Il fonde ainsi la théorie atomique moderne. Son nom reste également attaché à la première représentation symbolique liée au système des atomes et à son tableau des masses atomiques. La classification ainsi obtenue sera systématisée par **Dimitri Mendeleïev** (1834 - 1907). Ce tableau purement empirique (1869)ne sera justifié théoriquement que par la mécanique quantique et le principe d'exclusion de Pauli.

L'agencement des atomes, en proportions variées, donne consistance au monde qui nous entoure.

- Le 19ème siècle est très riche en découvertes, ce qui faisait dire à **Marcelin Berthelot** (1827 – 1907), chimiste éminent, découvreur de l'acétylène (1860) que la science "*avait atteint son plus haut degré de perfection et qu'elle donnait l'explication de tout*" (1890)… Prétention très vite démentie par une cascade de découvertes et d'interrogations.

I-2 L'ELECTRON. LA RADIOACTIVITE. LES QUANTA.

- 1895 – La découverte des rayons X par **Wilhelm Röntgen** amorça, en particulier, une nouvelle étape dans l'histoire du tableau périodique. Elle est aussi à l'origine de la découverte de la radioactivité. Le 22 novembre, Röntgen « radiographie » par rayons X la main de sa femme.

- 1896 – **Henri Becquerel**, étudiant les relations entre les rayons X et la fluorescence des sels d'uranium, découvre la radioactivité et les propriétés ionisantes du nouveau rayonnement.

- 1897 – Découverte de la première particule vraiment élémentaire. **Sir Joseph John Thomson**, étudiant les propriétés électriques de la matière, jette les bases de nos connaissances sur l'électron, confirmant en particulier les travaux de **Jean Perrin** suivant lesquels (1895) les rayons cathodiques sont constitués de corpuscules de charge négative. Dans une expérience célèbre de 1897, J.J. Thomson fait agir séparément un champ électrique et un champ magnétique : il détermine ainsi la vitesse des particules constitutives des rayons cathodiques et le rapport e/m de leur charge à leur masse. De 1898 à 1899, il mesure directement leur charge e.

- 1898 – **Pierre et Marie Curie** découvrent le radium et le polonium. "Internationalisation de la Science".

- 1899 – **Ernest Rutherford** discerne dans le rayonnement issu de minerais uranifères protégés par des écrans absorbants deux types de radiations :

a) **la radiation alpha**, facilement absorbée.

b) **la radiation bêta**, plus pénétrante, rapidement identifiée comme formée d'électrons rapides.

c) les désintégrations alpha et bêta sont toujours accompagnées **d'émissions gamma** non déviées par un champ magnétique (Villard). Leur émission n'affecte ni leur masse ni leur charge atomique. Les radiations gamma seront identifiées avec les photons de haute énergie.

L'identification de la radiation alpha intervint plus tard, en 1906, grâce aux travaux conjugués ou indépendants de **Ramsay**, **Soddy** et **Rutherford**. La mesure de la charge et de la masse montra qu'il s'agissait de noyau d'hélium.

- 1900 – **Max Planck** introduit le concept de "quantum d'action" pour expliquer l'échec de la théorie classique du rayonnement thermique.

- 1905 –**Albert Einstein** publie les trois articles « fondateurs » : Probabilités et mouvement brownien, Lumière et photon, Relation masse-énergie E = mc2 : naissance de la «Relativité restreinte ».

Einstein propose une "quantification du champ de radiation", de sorte que l'énergie peut être absorbée ou émise uniquement sous la forme de quantum d'énergie $h\nu$, h étant identique au quantum d'action de Planck, ν la fréquence de l'onde.
Il suggère que les caractéristiques de l'effet photoélectrique découvert par **Hertz** en 1887 soient décrites par l'équation $h(\nu-\nu_0) = 1/2\ mv^2$, ν_0 étant la fréquence seuil, $1/2\ mv^2$ l'énergie cinétique de l'électron éjecté.
Le succès de l'équation d'Einstein démontre le caractère corpusculaire de la radiation.
C'est l'interprétation de l'effet photoélectrique, et non la théorie de la relativité, qui vaut à Einstein le Prix Nobel de Physique en 1921.

- 1903 – **Sir Frederick Soddy**, collaborateur de Rutherford, montre que la radioactivité résulte de la transformation d'un élément chimique en un autre : la conséquence de l'émission d'une particule alpha est la diminution de deux unités du nombre atomique, celle d'une particule bêta, son augmentation d'une unité.

- 1906 – 1913 – A partir de 1906, les propriétés des particules alpha (α) font l'objet d'études intensives, associant notamment **E. Rutherford, Hans Geiger et Marsden**.

I-3 1911 - L'EXPERIENCE DITE DE « DIFFUSION DE RUTHERFORD » va devenir le prototype de nombreuses expériences de « Physique des particules »

Une feuille métallique très fine (or, platine…) est « bombardée » par un faisceau judicieusement collimaté de **particules alpha monoénergétiques issues d'une petite source de Polonium fournie par Marie Curie**. Après traversée de la feuille, des particules α sont plus ou moins déviées dans diverses directions. C'est le phénomène de « diffusion » (en anglais « scattering »). On observe que la grande majorité des particules ne sont pratiquement pas déviées ($\theta = 0$) mais Geiger a déterminé l'angle θ_p le plus probable de déviations des particules alpha traversant des feuilles d'or d'épaisseur 0,0005 millimètre : θ_p est de l'ordre de 1 degré d'arc. Certaines déviations θ sont supérieures à 90 °: c'est le phénomène de « rétrodiffusion ». Geiger et Marsden ont observé, dans le cas d'un film mince de platine, une déviation pour 8000 supérieure à 90° *« c'est aussi incroyable que d'envoyer un obus sur une feuille de papier et de constater que l'obus revient vers vous »* (E. Rutherford).

- Dès 1902, Jean Perrin avait suggéré que l'atome pouvait être une miniature du système solaire, où les électrons « planétaires » circuleraient à d'énormes distances du « soleil nucléaire » positif. La première publication mathématique sur la diffusion des particules alpha, due à E. Rutherford date de 1911. « Il s'agit d'un grand "classique" qui devrait être lu sous sa forme originale par tout étudiant sérieux » [E. Rutherford « Philosophical Magazine » 21 : 669 (1911)].

(Nous avons traduit et adapté cet article dans « Physique Moderne » Ed. Memento des Sciences et Techniques « La maîtrise du savoir » Madeleine et Louis Avan. Juin 1992. SNRI M.67 à 69).

Pour interpréter les expériences, notamment celle en 1909 de H. Geiger et E. Marsden, E. Rutherford suppose que chaque atome possède en son centre un petit « noyau atomique » dont il estimait le diamètre inférieur à 10^{-15} mètre; les expériences ultérieures porteront cette valeur à quelque 10^{-15} mètre. Quant à l'atome entier, son rayon est évalué par Rutherford à environ 10^{-11} mètre.

Rutherford laissait ouverte la question du signe de la charge nucléaire (en 1911), bien qu'il soit aujourd'hui évident que le noyau atomique se trouve positivement chargé, équilibrant ainsi la charge négative du cortège électronique.

"Au sujet de l'ensemble unique des travaux d'Ernest Rutherford, il est juste de souligner l'immense portée de la contribution de Marie Sklodowska Curie: en fournissant au savant britannique l'outil nécessaire à la première découverte de l'atome nucléaire, elle crée une véritable anticipation de l'étape suivante, étape cruciale de la physique: l'exploration, 20 ans plus tard, de la structure même du noyau atomique" (V.F. Weisskopf).



Fig-I-1 Rutherford (à droite) et Geiger (laboratoire de l'Université de Manchester vers 1908)

Pour Rutherford, la distribution angulaire de diffusion des particules alpha, commandée par la section efficace de diffusion $\sigma(\theta)$, est en $z^2Z^2e^4/\sin^4(\theta/2)$, donc en Z^2. Geiger et Marsden montrèrent que le nombre de charges élémentaires formant le noyau est approximativement égal à la moitié du nombre de masse atomique de la cible diffusante. Grâce à un dispositif très ingénieux, J. Chadwick, en 1920, détermina les charges nucléaires.

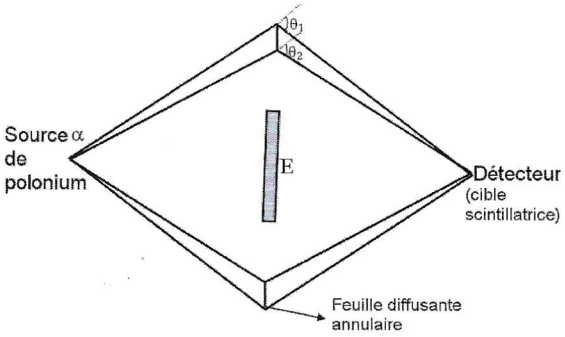


Fig-I-2 Dispositif de Chadwick:

L'écran E arrête le faisceau direct de particules alpha. Les positions respectives de la source, de l'anneau diffuseur et du détecteur permettent, pour des intensités croissantes de particules α , à partir des intensités de diffusion entre les angles θ1 et θ2 , une mesure directe des charges nucléaires relatives aux trois éléments diffuseurs Cu, Ag et Pt soit respectivement 29,3 e, 46,3 e et 77,4 e, avec une incertitude de 1 à 2 pour cent… Confirmation finale des nombres atomiques Z = 29, 47 et 78 précédemment assignés à ces éléments par Moseley. C'est ainsi que le nombre atomique Z fut reconnu comme caractérisant la charge électrique positive du noyau atomique.

Relation angle de diffusion / paramètre d'impact

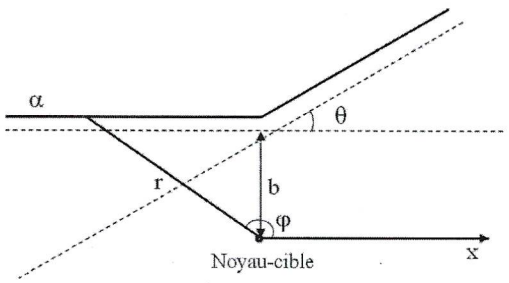


Fig-I-3

Un noyau atomique de charge Ze exerce sur une particule α identifiée à un noyau d'hélium de charge 2e, une force répulsive qui dévie sa trajectoire d'un angle θ d'autant plus grand que le « paramètre d'impact » b (distance entre la ligne de vol de la particule α et le noyau-cible diffuseur) est plus faible. Les forces agissantes sont des forces centrales répulsives dérivant du potentiel $V = +\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{zZe^2}{r} > 0$.

La gravitation est négligeable. La trajectoire est donc hyperbolique (et pratiquement confondue avec les asymptotes).

Les forces sont conservatives. Les énergies initiales (-∞) et finales (+∞) sont identiques :

$$F_x = m\frac{dv_x}{dt} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{zZe^2}{r^2}\cos\varphi$$

Par intégration: $\int_{-\infty}^{+\infty} m dv_x = \frac{zZe^2}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\cos\varphi}{r^2}dt$ Soit $mv_0(\cos\theta - 1) = \frac{zZe^2}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{\cos\varphi}{r^2}dt$

Les forces étant centrales, le moment cinétique est conservé : $|\vec{\ell}| = |\vec{r}.\vec{p}| = mv_0b = -mr^2\frac{d\varphi}{dt}$ $dt = -\frac{r^2}{v_0 b}d\varphi$

D'où $mv_0(\cos\theta - 1) = -\frac{zZe^2}{4\pi\varepsilon_0}\int_{\pi}^{\theta}\frac{1}{v_0 b}\cos\varphi d\varphi$

Enfin: $mv_0(\cos\theta - 1) = -\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{zZe^2}{v_0 b}\sin\theta$ Ainsi $\operatorname{tg}\frac{\theta}{2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{zZe^2}{mv_0^2 b}$

Notations : ε_0 Permittivité du vide
ze Charge de la particule α, de masse m, de vitesse v_0
Ze Charge du noyau-cible (platine, etc…)
b Paramètre d'impact (dont on vérifie le rôle)
θ Angle de diffusion

Hypothèse : le noyau-cible, de masse M >> m, reste fixe.

Nous donnons, pour mémoire, l'intensité de diffusion sous la forme dN/dΩ : nombre de particules diffusées par élément d'angle solide dΩ.
N_0 Nombre de particules incidentes
d Epaisseur de la feuille
n Densité de noyaux-cibles par unité de volume dans la feuille

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{N_0 n dz^2 Z^2 e^4}{64\pi^2\varepsilon^2 m^2 v_0^4}\frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$$

Démonstration de la formule de Rutherford (intérêt général en physique des hautes énergies)

Section efficace de Rutherford : Pour Z donné, les particules dont la déviation est comprise entre θ et θ + dθ ont un paramètre d'impact compris entre p et p + dp, ce qui pour un noyau-cible donné, correspond à une surface "efficace" de 2πp dp.

$N_0 = \frac{N}{s}$ est le nombre de particules incidentes par unité de section droite (et par unité de temps).

Le nombre de particules α passant par unité de temps dans l'anneau efficace est $v_0 N_0$ (2πp dp).

Ce nombre est identique au flux de particules diffusées pendant la même unité de temps dans l'angle solide dΩ défini par θ et θ + dθ. La "densité de courant" incidente est $v_0 N_0$.

On obtient alors la section efficace de diffusion coulombienne.

$\sigma_c(\theta) = \frac{v_0 N_0 (2\pi p\, dp)}{v_0 N_0\, d\Omega} = 2\pi p \frac{dp}{d\Omega}$. Nous généralisons pour une particule incidente de charge ze.

$dp = -\frac{1}{2}(ze^2/4\pi\varepsilon_0 M V_0^2)\frac{1}{\sin^2\frac{\theta}{2}}$ $\quad d\Omega = 2\pi\sin\theta\, d\theta = 4\pi\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\theta}{2}d\theta$

D'où la section efficace de Rutherford (en valeur absolue) : $\sigma_c(\theta) = \frac{z^2 Z^2 e^4}{4(4\pi\varepsilon_0)^2 M^2 v_0^4}\frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$

Si N_0 est le nombre de particules incidentes, d l'épaisseur de la feuille, n la densité de noyaux-cibles dans la feuille (en particules par unité de volume) : $\frac{dN}{d\Omega} = \frac{N_0 n d z^2 Z^2 e^4}{64\pi^2\varepsilon_0^2 M^2 v_0^4}\frac{1}{\sin^4\frac{\theta}{2}}$

I-4 CAS DE LA DIFFUSION DES ELECTRONS

Lorsque les projectiles sont des électrons de haute énergie, ils peuvent pénétrer profondément à l'intérieur de la matière nucléaire. **Robert Hofstadter** (Prix Nobel de Physique 1961), lors de la séance solennelle du Congrès International de Physique Nucléaire et de Médecine Nucléaire de Clermont Ferrand (Tricentenaire de la mort de Blaise Pascal 30 juin 1962), montra, en s'appuyant sur une section efficace de ce type, comment elle dépendait de la distribution des charges dans le noyau. En particulier, la charge du noyau d'hydrogène se répartit de façon non homogène. R. Hofstadter précisa également la répartition de charge des noyaux plus lourds.
Nous avons voulu, par cet exemple, illustrer l'actualité permanente d'une grande découverte : le noyau atomique de Rutherford.

- 1913 – **Niels Bohr** (1885 – 1962). Depuis 1912, il travaille à Cambridge sous la direction de Rutherford. En introduisant les conditions de quantification inspirées de Max Planck au modèle atomique planétaire de Rutherford, il parvint à rendre compte du spectre de l'hydrogène dans les divers domaines de longueur d'onde : visible, ultraviolet, infrarouge.
- 1916 – Einstein étend les idées de sa théorie de 1905 aux repères non galiléens. Ainsi naît la Relativité Générale.

I-5 DECOUVERTE DU PROTON

- 1919 – Rutherford ouvre le champ des réactions nucléaires réalisées par l'homme : en bombardant de l'azote par des particules alpha, il obtient quelques protons de trajectoires importantes.
- En 1923 Patrick Blackett montre qu'il s'agit bien de la première réaction nucléaire de transmutation, suivant l'équation : ${}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$

  La découverte du proton est justement attribuée à Rutherford : c'est le noyau de l'atome d'hydrogène (en réalité, dès 1918, Rutherford avait réalisé la réaction artificielle)

  ${}^{1}_{1}H + {}^{7}_{3}Li \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He$
- 1920 – Les astronomes publient le catalogue du spectre optique de 250 000 étoiles. Les travaux de Balmer, Rydberg, Lyman…Bohr, Rutherford montrent que la physique atomique est la pierre de Rosette de l'astrophysique (voir figure I-4).

I-6 PREMIERES NOTIONS D'ELEMENTARITE

- 1925 – Quelle est, à cette époque marquée par la naissance de la mécanique ondulatoire de Louis de Broglie et de sa forme quantique d'Heisenberg - Schrödinger, la situation des « Particules élémentaires » ?

a) On connaît deux particules « de matière » : l'électron et le proton. Quel paraît être le critère « d'élémentarité» ?

1. Les nombres Np et Ne- pourraient être les « constantes de l'Univers »
2. De telles particules élémentaires semblent décrites comme des « points mathématiques » sans extension spatiale.
3. Un proton est indiscernable d'un autre proton ; un électron est indiscernable d'un autre électron.

b) Qu'en reste-t-il dix ans plus tard ? tout juste le critère n° 3

- 1925 – **Uhlenbeck et Goudsmith** ont introduit le spin de l'électron. **Wolfgang Pauli** (1900 – 1958) énonce son célèbre principe d'exclusion : deux électrons identiques ne peuvent pas se trouver dans le même état quantique.

I-7 NAISSANCE DE LA PHYSIQUE STATISTIQUE QUANTIQUE

- Mais de plus, dès 1924, **Satyendra Bose** a retrouvé la fonction de distribution spectrale de Planck sur des bases entièrement nouvelles, en traitant toute radiation isotherme comme un gaz de photons. Bose suppose que pour une énergie donnée, les photons sont complètement indiscernables. Ainsi, sur un niveau d'énergie donné, le nombre de photons n'est pas limité. Le succès de l'indiscernabilité, dans le cas des photons, suggère à Einstein, aussitôt après la publication de la théorie de Bose, l'idée d'étendre cette hypothèse à des particules matérielles et même à des molécules de même espèce.

- Ainsi naît la statistique quantique de Bose – Einstein. W. Pauli montrera qu'elle s'applique aux particules de spin entier : ce sont les bosons. Le photon est un boson de spin 1 (en unité de $\hbar$).

- 1927 – **Paul A.M. Dirac** (1902 – 1984) élabore en même temps qu'**Enrico Fermi** (1901 – 1954) une statistique quantique conforme au « principe d'exclusion » de Pauli : compte tenu de ce principe, on ne peut pas trouver plus d'un fermion dans un état quantique donné. Aussi abstrait qu'il paraisse, ce principe est à la base de la structure des atomes (répartition des électrons dans des niveaux d'énergie)… et de la physique des particules élémentaires !
  Les fermions ont un spin semi-entier. Le proton et l'électron sont des fermions de spin 1/2

- 1928 – Paul Dirac propose une mécanique quantique relativiste intégrant « relativité et spin ». Il en résulte une interprétation de tous les spectres issus de l'observation du cosmos.

Nouveaux regards sur le ciel : l'Astronomie Gamma – (clichés NASA)

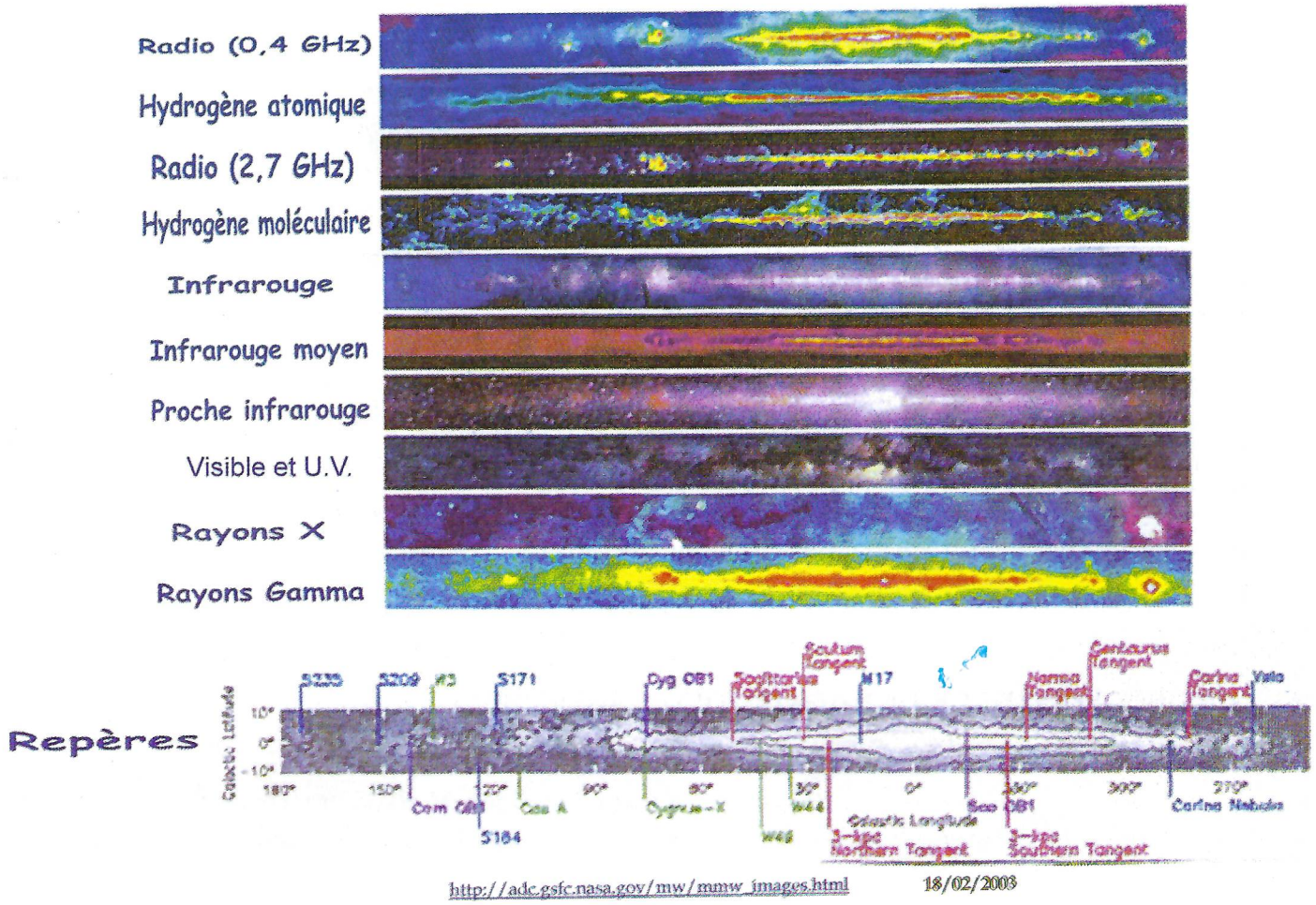


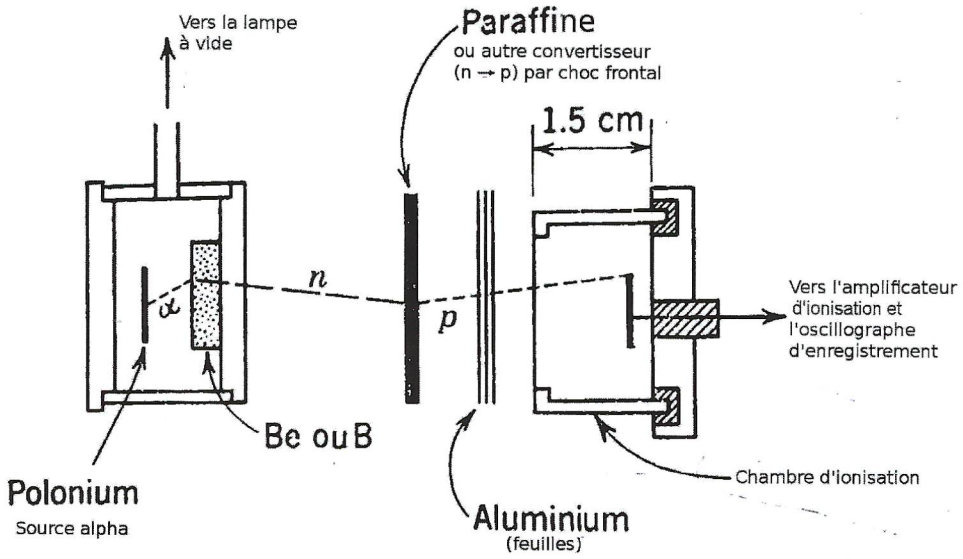
Fig-I-4

1930 – Participant à la création de la théorie quantique des champs, Dirac prédit l'existence des antiparticules.

I-8 DEUX NOUVELLES PARTICULES EN UNE SEULE ANNEE !

- 1932 – Carl Anderson découvre dans le rayonnement cosmique la présence d'électrons positifs ou positons, antiparticules de l'électron, confirmant la théorie de Dirac: dans une chambre de Wilson, en altitude, et placée dans un champ magnétique, la courbure de la trajectoire du positon est opposée à celle de l'électron.

- 1932 – Encore ! Découverte du neutron.



Au moyen du dispositif ci-contre, **Sir James Chadwick**, exploitant, dans une chambre à vide, le bombardement d'une cible de Bore ou de Béryllium par des particules α du Polonium (5,3 MeV), obtient une « radiation pénétrante » (le neutron) convertie en proton à partir d'un écran de paraffine, le proton résiduel traversant une chambre d'ionisation associée à un dispositif amplificateur. La réaction de base est du type ${}^{11}_{5}B + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{14}_{7}N$

Fig-I-5 Expérience de Chadwick

La masse du neutron, déterminée par Irène et Frédéric Joliot-Curie est légèrement supérieure à celle du proton. Soit, aujourd'hui : $m_p = 1{,}6726231(10).10^{-27}$ kg $\quad m_n = 1{,}6749286(10).10^{-27}$ kg.
Cet excès a une très grande importance théorique et pratique: le neutron libre se désintègre spontanément (période 15 mn).

I-9 ENTREE EN MATIERE DU NEUTRINO

Hypothèse du neutrino. La désintégration β des substances radioactives a mis en évidence, expérimentalement, un phénomène curieux : le caractère continu du spectre β. En 1930, Pauli avait suggéré que l'apparente violation de la conservation de l'énergie pourrait être expliquée par la présence d'une autre particule, émise en même temps que la particule β ; ce fut l'hypothèse du neutrino ν. Sa mise en évidence expérimentale interviendra seulement en 1956. Retenons pour mémoire le schéma de désintégration du neutron libre $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ où $\bar{\nu}_e$ désigne en notation actuelle, l'antineutrino électronique: au point de désintégration du neutron son énergie totale se répartit entre proton, électron et antineutrino, tandis que les énergies cinétiques se distribuent entre l'électron (particule β) et l'antineutrino (trajectoire invisible).

I-10 LA DECOUVERTE DE LA RADIOACTIVITE ARTIFICIELLE

1934 – En 1934, Irène Curie et Frédéric Joliot trouvèrent que des feuilles de Bore, d'Aluminium ou de Magnésium, après une exposition de 10 minutes à des particules alpha du polonium, continuaient à émettre des positons, la source alpha étant enlevée. Ce fut la découverte de la radioactivité artificielle (avec émission de e+) suivant par exemple la réaction ${}^{10}_{5}B + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{13}_{7}N$ suivie de ${}^{13}_{7}N \rightarrow \beta^+ + {}^{13}_{6}C$ ($\beta^+ \equiv e^+$). De nombreuses expériences ont illustré les processus de production de paires e+ e- dans des cibles soumises à des rayons gamma d'énergie suffisante, et les processus d'annihilation: $e^+ + e^- \rightarrow$ 2 ou 3 photons gamma.

e^+, e^-, neutron et proton sont des fermions de spin 1/2

Les interactions de type $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$ (capture électronique) ou $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$ (expérience de Reines et Cowan, 1956, mise en évidence de l'existence du neutrino $\bar{\nu}_e$ voir page 24) relèvent de "**l'interaction universelle de Fermi**", avec mise en jeu de 4 fermions. A partir de la réaction initiale $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$, toute interaction universelle de Fermi s'obtient par changement de membre d'une particule, changement qui entraîne la permutation "particule - antiparticule" aux conditions énergétiques de réalisation pratique.
Ainsi $n + e+ \leftarrow \bar{\nu}_e + p$.

CONCLUSION de I-1 à I-10

Tests provisoires d'élémentarité (Voir § I-6))
Le critère 2 ne peut être accepté : les fermions ne peuvent être décrits comme particules ponctuelles sans extension spatiale : **la présence du spin signifie une structure interne** .
Le critère 1: n_p et n_{e^-} constantes de l'Univers est faux.
Contre-exemples :

- Capture électronique
- Annihilation $e^+ e^-$
- Matérialisation des photons gamma dans le champ du noyau atomique.

Création de paires protons – antiprotons lors de la réaction : $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$ (réalisée en 1956).
Il ne reste donc que le critère d'indiscernabilité (insuffisant pour les fermions). Les progrès obtenus depuis 1935 vont conjuguer les avancées théoriques et les découvertes expérimentales dans un ordre non précisé à l'avance.

I-11 STRUCTURE NUCLEONIQUE DU NOYAU ATOMIQUE

1. A partir de 1932, le noyau atomique prend sa forme actuelle. Cœur de l'atome, le noyau est constitué de "nucléons" (protons et neutrons), rassemblés dans un très petit volume : son diamètre ? Quelque 10^{-15} mètre. Nous disons aujourd'hui : quelques fermis. Le nombre de protons d'un noyau est le nombre atomique Z. Le nombre N de neutrons est le nombre « neutronique ». Le nombre de nucléons du noyau, ou nombre de masse A est donc tel que A = Z + N. Une espèce nucléaire de valeurs spécifiques Z et N est appelée « nuclide ». Deux nuclides de même Z et de N différents sont des "isotopes".

2. La structure électronique d'un atome, responsable de ses propriétés chimiques, est déterminée par la répartition des Z électrons de son cortège. La "dimension caractéristique" de l'atome est de l'ordre de quelque 10^{-10} mètre.

3. L'énergie qui doit être mise en œuvre pour séparer les nucléons est appelée "Energie de liaison": $E_B = [ZM_H + (A-Z)M_n - M(Z,A)]c^2$ où M(Z,A) est la masse mesurée de l'atome neutre contenant le noyau. M_H est la masse de l'atome neutre d'hydrogène. Le terme le plus caractéristique est l'énergie de liaison par nucléon, E_B/A, qui varie de 1,112 MeV par nucléon à un maximum de 8,795 MeV par nucléon pour le nickel $^{62}_{28}$Ni. Presque tous les nucléons stables se situent entre 7 et 9 MeV par nucléon. Ces énergies de liaison traduisent la cohésion des noyaux, laquelle cohésion, malgré la répulsion électrique des protons, s'explique par l'existence d'une interaction forte entre nucléons.

   En 1935 – **Hideki Yukawa** suggère que l'interaction forte entre nucléons doit être "transmise", via une particule de masse voisine de 200 m_e nommée "méson" (du grec "mesos", moyen).

   1937 – **Carl Anderson** et **Seth Neddermeyer** découvrent dans le rayonnement cosmique des particules chargées correspondant à cette masse, appelés initialement mésotrons, puis mésons. Pendant plusieurs années, ils furent identifiés -difficilement- à la particule de Yukawa, mais la conviction inverse s'imposa rapidement. La particule découverte par Anderson et Neddermeyer est un électron lourd appelé désormais "muon" de masse 206,8 m_e, de vie moyenne (au repos) $2{,}22.10^{-6}$ s, de charge ±e et de spin 1/2
   Son schéma de désintégration: $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu + \bar{\nu}$.

L'énergie de désintégration du muon se répartit entre l'électron (ou le positon) + un neutrino et un antineutrino. C'est le caractère non monoénergétique qui a imposé ce schéma à trois corps. Le muon ne subit pas l'interaction forte, ce qui explique notamment son grand pouvoir pénétrant. Les plus énergétiques peuvent traverser l'équivalent de quelques milliers de mètres d'eau. Nous avons pu relever la trajectoire de ces muons cosmiques à -450 mètres sous terre (mines de fer de May sur Orne) et observer les électrons de désintégration des muons au repos (Madeleine et Louis Avan). Le muon est un fermion. Ne subissant pas l'interaction forte, les muons, comme l'électron et le positon, sont classés parmi les "leptons"... Lors de la découverte du muon, **Isidor Rabi** s'était écrié: *"qui a commandé cela ?"*

I-12 - 1947 – ETAPE DES MESONS

Les mésons π ou pions.

Le grand pouvoir de pénétration des muons cosmiques évoqué plus haut posait problème aux physiciens qui désiraient l'identifier avec la particule de Yukawa : pour produire une liaison nucléaire forte, le méson de Yukawa doit engendrer une interaction vraiment forte, ce qui implique un pouvoir pénétrant relativement faible.

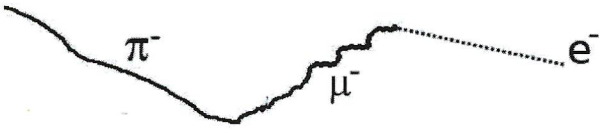


Fig-I-6

Cette difficulté fut résolue par la découverte dans le rayonnement cosmique du méson π (dont la désintégration dans des émulsions nucléaires Ilford G5, suivant le schéma $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$ fut observée par **Lattes, Cecil F. Powell** et **G. Occhialini**).

Le caractère monoénergétique du muon de désintégration implique un processus à "deux corps": $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$.

En 1950 fut découvert le méson π neutre, noté π°, dont l'existence était imposée par la théorie de Yukawa pour les forces nucléaires entre nucléons identiques. Le π° se désintègre en 2 rayons gamma (découverte due à **Steinberger, Panofsky et Stellar**). Les propriétés intrinsèques des mésons π et leurs interactions ont été étudiées intensivement grâce à leurs productions dans des accélérateurs à haute énergie.

	Masse	Charge	Spin	Vie moyenne	Schéma dominant de désintégration	
$\pi^{\pm}$	273,23 m_e 139,6 MeV	± 1,0 charge électronique	0	$2{,}54 \times 10^{-8}$s	$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$	π+ et π- sont mutuellement leurs antiparticules
π°	264,4 m_e 135,1 MeV			$\sim 10^{-15}$s	$\pi^{\circ} \rightarrow \gamma + \gamma$	π° est identique à son antiparticule

Fig-I-7 Tableau des principales propriétés des pions

I 13 LE POINT EN 1950

La découverte du "pion" en 1947 fut saluée triomphalement par les théoriciens, en confirmation de la théorie de Yukawa. De plus, cette découverte fut regardée comme complétant la liste des particules élémentaires dont sont composées matière et énergie. Nous avons évoqué rapidement les premières classifications : fermions et bosons, les mésons π étant des bosons.

Les particules à interaction faible sont des leptons (du grec "leptos" : faible, léger)

Les particules à interaction forte sont des hadrons (du grec "hadros" : "solide").

Nous connaissions en 1950 deux types de hadrons : les mésons π; le proton et le neutron, premiers membres de la classe des "baryons" ("barus" : lourd).

Au stade "1950", on peut décrire la situation de manière cohérente :

- Protons + neutrons (liés par les mésons π) permettent la construction des noyaux atomiques
- Noyaux + électrons (liés par les photons qui peuvent d'ailleurs être émis ou absorbés) conduisent à l'édifice atomique.
- De plus l'électrodynamique quantique a atteint son extrême degré de précision (Tomonaga, Feynman, Schwinger)

I-14 1947 - 1949 OU "LES DEBUTS D'UNE NOUVELLE ERE": L'ETRANGETE

Dès 1947, année de la découverte du méson π , **Rochester et Butler**, étudiant les rayons cosmiques dans deux chambres de Wilson superposées, présentaient des photographies suggérant l'existence de particules encore plus instables que les mésons π, aussi bien neutres que chargées. Leurs observations furent aussitôt confirmées aussi bien dans le rayonnement cosmique (notamment en altitude ! nous avons été les témoins des expériences de PMS Blackett et collaborateurs, par les techniques des chambres de Wilson, au sommet du Jungfraujoch) que dans les accélérateurs de particules. C'était en effet le début d'une nouvelle classe de particules de plus en plus énergétiques. Dans le dernier cas (les accélérateurs de particules) les propriétés des particules ainsi obtenues, appelées "étranges" ont pu être mesurées dans des conditions de laboratoire parfaitement contrôlées.

Deux classes générales de particules étranges sont connues : **les mésons K**, de masses voisines de 1000 m_e et les **hypérons** de masses supérieures à celle du proton.

Le concept "d'étrangeté" introduit par **Muray Gell-Mann** et aussi par **Nishijima** (1953 - 1955) implique essentiellement que les particules étranges ne peuvent pas être produites isolément dans une collision nucléaire, mais doivent être produites en "**association avec une autre particule étrange**".
Par exemple, la réaction $\pi^- + p \rightarrow K^\circ + \Lambda^\circ$ est autorisée tandis que $\pi^- + p \rightarrow K^\circ + n$ est interdite. Les nombres quantiques d'étrangeté sont alors les suivants : $S(K_0) = +1 \quad S(\Lambda_0) = -1 \quad S(\pi) = S(p) = S(n) = 0$

Conservation : L'étrangeté S est conservée dans l'interaction électromagnétique et l'interaction forte, mais pas dans l'interaction faible. Se trouvant à l'intersection de la physique nucléaire et de la physique des particules, l'étrangeté a des implications importantes en astrophysique.

- Les mésons K sont des hadrons, et en même temps des bosons
- Les hypérons sont des baryons hadroniques et fermioniques

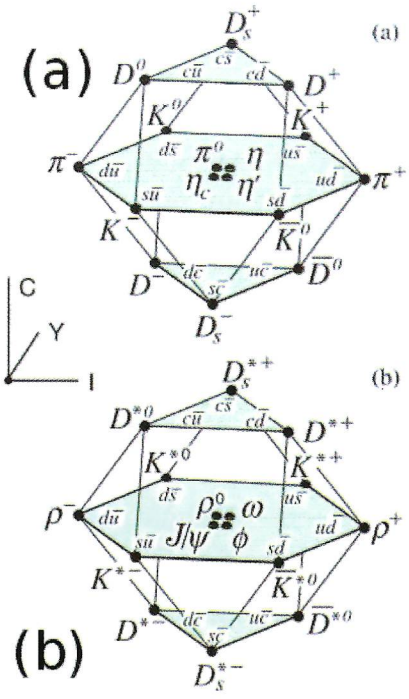
Quand une particule étrange se désintègre (individuellement), l'étrangeté n'est pas conservée

Fig-I-7 Extrait de "Particle Physics Booklet" (réf N°44 en fin d'article)

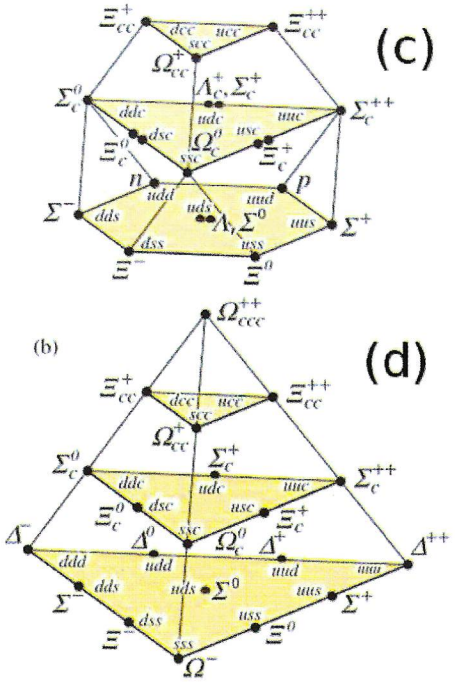
Tableau des mésons (doublets de quarks $q\overline{q'}$) et des **baryons** (triplets **qqq**) en représentation SU(4): "Symétrie Unitaire d'ordre 4" liée à la présence éventuelle de quarks u, d, s, c. Dans le cas le plus général, la formule dite de "Gell-Mann" - "Nishijima" relie la charge électrique Q(= 0 , ± 1), les autres nombres quantiques de saveur S (étrangeté), C (charme), B (beauté), T ("top") et le nombre baryonique $\mathcal{B}$, avec la troisième composante de l'isospin (caractéristique de l'indépendance de charge des interactions fortes), soit $Q = I_Z + (\mathcal{B} + S + C + B + T)/2$. Exemple méson π^+: Q=1 B=0 S=C=B=T=0 I_Z=1. Dans le tableau tridimensionnel, l'hypercharge (profondeur de champ) est définie par $Y = \mathcal{B} + S - C/3$.

Mésons **Baryons**

Graphe (a): les "16-plet" des mésons pseudo-scalaires



Graphe (b): les "16-plet" des mésons vectoriels



Graphe (c): "20-plet" avec octet SU(3)

Graphe (d): "20-plet" avec decuplet SU(3)

I-15 LA STRUCTURE DES PARTICULES

1964 Les Quarks

Les leptons sont des particules ponctuelles sans structure interne en dehors du spin. On a découvert progressivement que les hadrons, nucléons, mésons, hypérons ne sont pas des particules ponctuelles, mais sont constitués d'un nombre réduit d'entités élémentaires, appelés "quarks" (nom tiré du roman de James Joyce : "La veillée de Finnegan"). Développé par M. Gell-Mann et G. Zweig, le modèle des quarks se présentait d'abord comme une facilité de calcul, avant de devenir une véritable réalité physique. L'ensemble des hadrons actuellement connus nécessite l'introduction de 6 quarks. Les six "parfums" ou "saveurs" de quarks sont les quarks u (comme "up" ou haut), d (down), s (strange "étrangeté"), c ("charme"), b ("beauty" ou "bottom"), t ("top"). Comme dans le monde des particules, aux quarks correspondent leurs "miroirs", les antiquarks, notés $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \bar{c}, \bar{b}, \bar{t}$. Leur charge électrique est fractionnaire, leur spin 1/2: ce sont des fermions obéissant au principe d'exclusion de Pauli.

Le proton et le neutron sont des triplets de quarks ainsi notés p (u u d) ; n (u d d).

Les mésons sont des doublets de quarks : exemple π^+ (u $\bar{d}$), π^- ($\bar{u}$ d)

Voir Fig-I-7

De 1960 à 1974, 3 quarks u d s suffisaient à tout expliquer. Les baryons sont des assemblages de trois quarks, les mésons sont des assemblages d'un quark q et d'un antiquark $\bar{q}$

I-16 1974 - 1995 VERS L'ACTE DE NAISSANCE DES "TROIS FAMILLES"

1974 La découverte du méson J/psi ou J/ψ par deux équipes indépendantes, celle du M.I.T. de Cambridge USA dirigée par **S. Ting** et celle de Berkeley - Stanford conduite par **B. Richter**, impose la présence d'un quatrième quark : le J/ψ est un état lié ($c\bar{c}$) qui forme une particule à "charme caché", caractéristique qui l'empêche de se désintégrer aussi vite que la 10^{-23} s prévue, tandis que sa durée de vie est de 10^{-20} seconde. Cette découverte du quark charmé fut confirmée au collisionneur e^+ e^- de Stanford avec la mise en évidence du méson D^+ ($c\bar{d}$) et D^- ($\bar{c}d$). Depuis cette époque, un peu partout dans le monde, des millions de J/ ψ ont été détectés.

En 1975, toujours à Stanford, M. Perl découvre le lepton τ (tau) très lourd, de masse 1,78 GeV/c². L'étude de son schéma de désintégration révèle la présence d'un troisième type de neutrino ν_τ (neutrino tau).

Le cinquième quark, début d'une troisième génération, est né de la découverte, au Fermilab de Chicago, du méson upsilon Y ou υ de masse 9,460 GeV, par l'équipe de **L. Lederman**. Nous sommes en octobre 1977. Le méson upsilon, état lié ($b\bar{b}$) est un "méson à beauté cachée". Le quark de beauté a une masse importante 4,2 GeV [quark appelé encore : bottom (bas)].

Il faudra attendre 1995 pour que soit mis en évidence le sixième quark, appelé "top" (t), par deux groupes utilisant des détecteurs différents auprès du Tevatron du Fermilab. Sur quelque 10^{11} collisions de protons de 0,9 TeV avec des antiprotons de 0,9 TeV (soit une énergie dans le centre de masse de 1,8 TeV), une paire ($t\bar{t}$ .....) fut détectée ! .... avant d'être ensuite largement confirmée ! Sa masse ? 17,4 GeV.

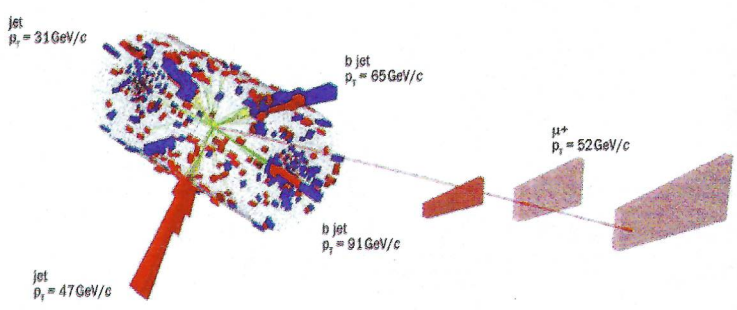


Fig-I-8 (Réf Courrier Cern mars 2012 p.8)

En 2011/2012, le CMS du CERN détecteur intitulé "Solénoïd Compact Muon" a sélectionné et analysé 12 757 évènements $t\bar{t}$ repérés dans le canal "lepton + jets", où l'un des quarks t se désintègre vers l'avant en un quark b + un lepton chargé (électron ou muon) accompagné du neutrino correspondant, tandis que l'autre quark $\bar{t}$ se désintègre en trois quarks. Parallèlement, l'étude des interactions et de leurs porteurs ou médiateurs se développe.

I-17 POURQUOI TROIS FAMILLES ET SEULEMENT TROIS ?

L'un des résultats essentiels du Large Electron Positon (LEP) construit au CERN, fondé sur la "largeur de résonance du boson intermédiaire Z_0" découvert par **Carlo Rubbia** (grâce à la transformation du LEP en collisionneur protons-antiprotons mis au point à partir des travaux de **Simon Van der Meer**), ce résultat essentiel est que le nombre de types de neutrinos est de 3,04 ± 0,09. Les mêmes résultats, au CERN et à Stanford arrivent à la conclusion que le quark "top" est le dernier, à moins que la masse du neutrino additionnel, qui serait l'élément d'une quatrième génération, soit de l'ordre de 40 GeV/c^2.

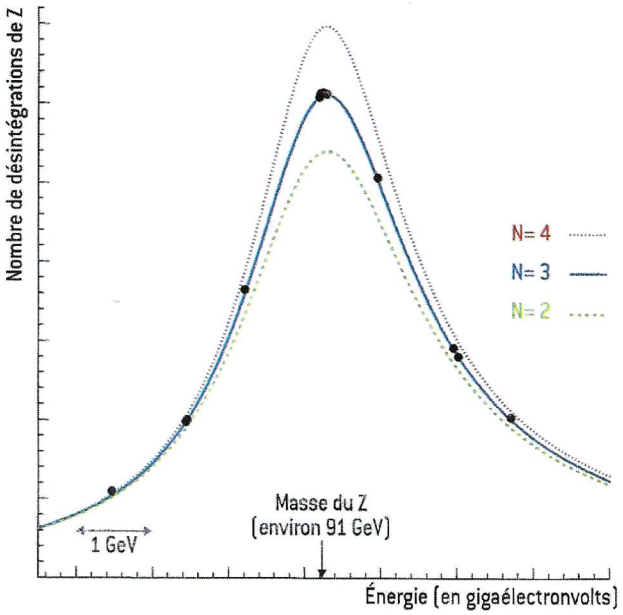


Fig-I-9
Le nombre de désintégrations du boson Z en quarks et antiquarks observées en fonction de l'énergie de la collision est comparé aux prédictions théoriques dans l'hypothèse de deux, trois ou quatre neutrinos différents (courbes verte, bleue et rouge). Il s'avère qu'une coïncidence parfaite existe entre théorie et expérience si l'on suppose trois neutrinos différents. C'est de cette façon que fut prouvée l'existence de trois familles de leptons, et de trois seulement.

(Pour la Science nov 207 p 102)

Particules fondamentales

Aujourd'hui, l'ensemble de ces travaux montre que la matière, quelle qu'elle soit, peut être construite à partir des 6 leptons et 6 quarks connus, regroupés en 3 familles.

	Première génération	Deuxième génération	Troisième génération	Charge électrique
Leptons	**Electron e^-** Masse 0,51 MeV	**Muon μ^-** Masse 106 MeV	**Tau τ** Masse 1784 MeV	-1
	Neutrino électronique ν_e Masse <3 eV	**Neutrino numérique ν_μ** Masse <0,2 MeV	**Neutrino tau ν_τ** Masse <0,7 MeV	0
Quarks	**Quark up u** Masse 0,4 MeV	**Quark étrange s** Masse 150 MeV	**Quark beauté b** Masse 4 200 MeV	+2/3
	Quark down d Masse 7 MeV	**Quark charme c** Masse 1 800 MeV	**Quark top t** Masse 174 GeV	-1/3

Fig-I-10 Tableau des particules fondamentales (spin 1/2)
Les masses sont exprimées en MeV ou eV (on suppose c=1)
(d'après Jean Iliopoulos "Pour la Science" novembre 2007 p. 92)

I-18 LES GLUONS ET LA CHROMODYNAMIQUE QUANTIQUE

Nous l'avons précisé, les quarks étant des fermions, obéissent au principe d'exclusion de Pauli. Or, des quarks identiques entrent dans la composition de nombreux baryons : ainsi le proton p (uud) et le neutron n (udd). Pour concilier le modèle des quarks et le principe d'exclusion, il a fallu introduire un nouveau nombre quantique, qui traduit une nouvelle propriété physique quantique (sans correspondance classique) : la "couleur", ou "couleur de confinement", est un concept purement abstrait, qui n'a rien à voir avec l'optique rétinienne.

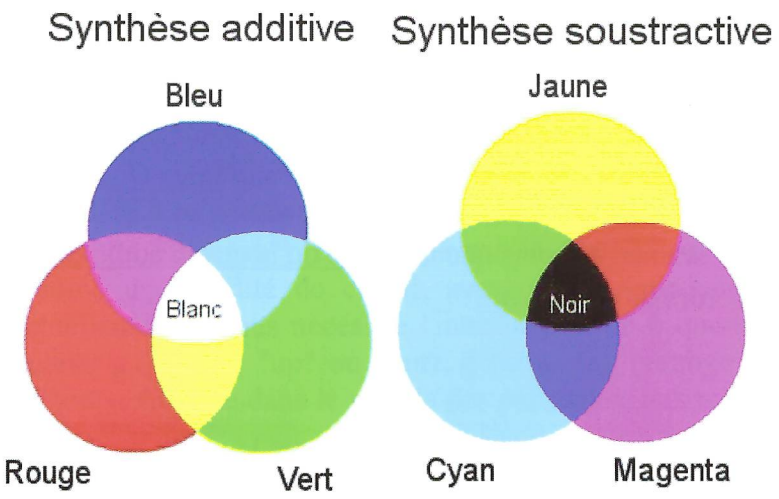


Fig-I-11 Synthèses additive et soustractive

- Tout quark peut ainsi avoir trois couleurs ; on a choisi : Bleu, Vert, Rouge (BVR)

- L'antiquark $\bar{q}$ porte alors les couleurs $\bar{B}\ \bar{V}\ \bar{R}$: Jaune, Magenta, Cyan

Problème de la force

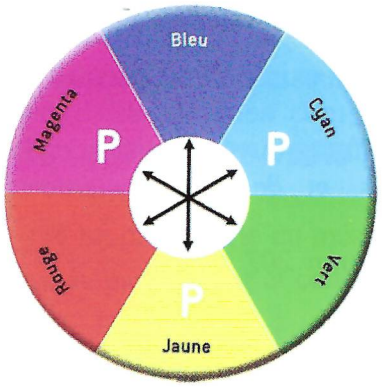


Fig-I-12 Couleurs primaires complémentaires
(Réf. "Lumière et Luminescence" - Bernard Valeur p 86)

La force qui tient confinés les quarks dans les mésons ou les baryons est donc une "force de couleur" transportée par des "gluons". L'interaction forte agit comme une sorte de glu collant les protons et les neutrons au sein des noyaux d'atomes : les gluons transportent donc une "charge de couleur", à la différence des photons qui ont une charge électrique nulle. C'est pour cette raison que la théorie des champs analogues à l'électrodynamique quantique (QED) est appelée Chromodynamique quantique (QCD). Qu'en est-il des particules physiques ? Celles que détecte l'expérience ? Elles ne sont pas colorées au sens quantique : chaque hadron est formé de quarks de couleurs primaires, telles que l'ensemble est "blanc" ou "neutre". Ainsi les nucléons sont formés de 3 quarks portant les couleurs BVR. De même, les mésons sont des doublets de quarks, l'un portant une couleur, l'autre quark portant la couleur complémentaire.

Comment peut-on mettre en évidence, directement, l'existence des quarks ? Les quarks, comme les gluons, n'ont jamais été et ne peuvent être observés à l'état libre. Ils sont confinés à l'intérieur du hadron. Les quarks sont liés entre eux par les gluons. Ils seront détectés grâce à leur "hadronisation" = leur "habillage" lors d'interactions appropriées. Les vérifications sont donc indirectes mais très convaincantes.

➢ Champ de gluons et champ électromagnétique : "une particule".
Depuis les années 2000, lors des collisions d'ions lourds (Pb-Pb), l'existence d'un plasma quarks-gluons a été mise en évidence vers 10^{12} kelvins.

➢ Un champ (esquisse théorique) : les gluons sont des quanta sans masse, comme les photons mais comme ils portent une charge de couleur, ils interagissent entre eux, aussi bien qu'avec les quarks.

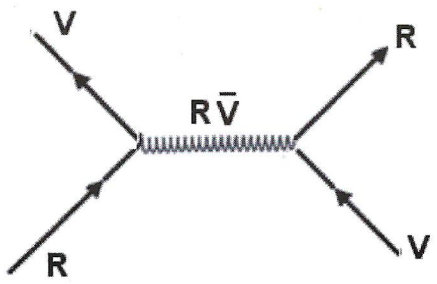


Fig-I-13

La théorie correspondante est donc non linéaire et de résolution très difficile. La QCD a une structure plus riche que la QED et constitue ce qu'on appelle une "théorie de jauge non-abélienne" (en particulier non commutative) : il existe huit types de gluons, au lieu d'un seul photon : les gluons sont eux-mêmes colorés. Par exemple, un quark rouge peut interagir avec un quark vert en échangeant un gluon "rouge-antivert", ou magenta suivant le diagramme de Feynman du 1er ordre correspondant.

I-19 UNE PARTICULE . UN CHAMP (d'après **Jean Iliopoulos**. Loc.cit.)

La théorie quantique des champs fait correspondre à chaque type de champ un type de particule. On divise les particules en deux catégories : les particules de matière et les particules médiatrices des interactions. Tandis que les particules de matière représentent l'essentiel de la masse "visible" de l'Univers, les particules médiatrices - qui peuvent être de masse nulle comme le photon et le gluon, ou non nulle - sont échangées entre les particules de matière au cours de leurs interactions. La puissance prédictive de l'électrodynamique quantique se déduit d'une propriété centrale : "l'invariance de jauge". Qu'on se rappelle, en électrodynamique classique, la condition de jauge de Lorentz sur les potentiels scalaire et vecteur $\vec{\nabla} . \vec{A} + \frac{1}{c^2}\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ qui laissent invariantes les équations de Maxwell des champs électrique et magnétique. Pour en saisir l'importance, il faut, nous rappelle J. Iliopoulos, comprendre la notion de symétrie. En physique une transformation symétrique laisse invariantes les équations de mouvement. Ainsi les formes des trajectoires ne changent pas si on applique une symétrie : une translation par exemple. Or, les symétries dépendent de paramètres qui les définissent (pour les translations, un vecteur: 3 composantes spatiales).

Pour des raisons purement mathématiques, les théoriciens se sont demandé si ces transformations particulières restaient des symétries lorsque leurs paramètres varient en chaque point de l'espace-temps. A priori, la réponse est "non". Mais il existe une façon de modifier les équations du mouvement pour les rendre invariantes par des transformations de jauge, c'est-à-dire par des symétries dont les paramètres dépendent de l'espace et du temps. Or, certaines de ces théories se sont révélées capables de décrire les forces fondamentales de la physique. Ces interactions fondamentales ont une origine "géométrique". Les théories qui décrivent les interactions fortes, électromagnétiques et faibles sont toutes des théories de champs de jauge. Dans de telles théories, les interactions sont une conséquence des exigences d'une fonction appelée "Lagrangien". Tout système possède un Lagrangien, par généralisation du Lagrangien classique L = K-U, K=énergie cinétique, U=énergie potentielle. Le Lagrangien pour des champs de matière libre sera invariant dans une série de transformations appelées "transformations locales de jauge". Nous donnons, pour mémoire, le Lagrangien d'un champ de fermions libres, il s'exprime sous la forme :

$\mathcal{L} = \overline{\Psi}(i\gamma_\mu \partial_\mu - m)\psi$ avec ψ : champ du fermion libre (électron par exemple) de masse m et γ : matrice de Dirac.

La force d'interaction forte résulte de l'exigence suivant laquelle le Lagrangien du quark libre soit invariant par rapport aux rotations locales dans l'espace commandé par les trois couleurs fondamentales. La théorie de jauge résultante est la "chromodynamique quantique".

De plus, à chaque transformation de jauge, est associé un "boson de jauge", qui est le "médiateur" de l'interaction associée à ces transformations : en d'autres termes, une interaction ne s'exerce entre deux particules que par l'intermédiaire d'une troisième qu'on appelle aujourd'hui "le boson de jauge".

Ayant ainsi évoqué, qualitativement, les fondements de la chromodynamique quantique, nous devons y ajouter quelques exemples de confrontation expérimentale.

I-20 CONFRONTATION EXPERIMENTALE

Les premières expériences déterminantes, de 1960 à 1968, concernent les expériences de diffusion "profondément" inélastiques des électrons de 600 MeV et de 4 à 21 GeV par des noyaux lourds, puis par des cibles d'hydrogène et de deutérium liquides, réalisées par J. Friedman, H. Kendall et R. Taylor au MIT et à Stanford. L'électron incident "pénétrant profondément" perd une grande partie de son énergie, sortant donc fortement dévié. La seule interprétation étant la présence dans le proton du noyau cible de constituants ponctuels répondant indépendamment aux électrons incidents.

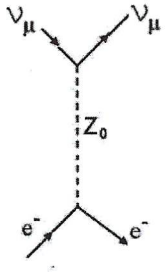


Fig-I-14 Diagramme de Feynman du courant neutre

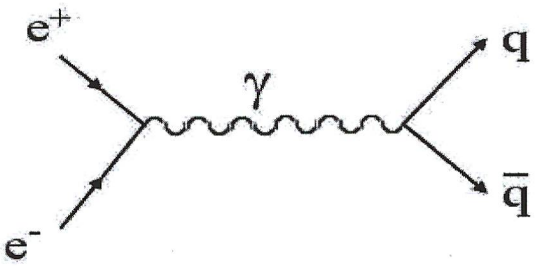
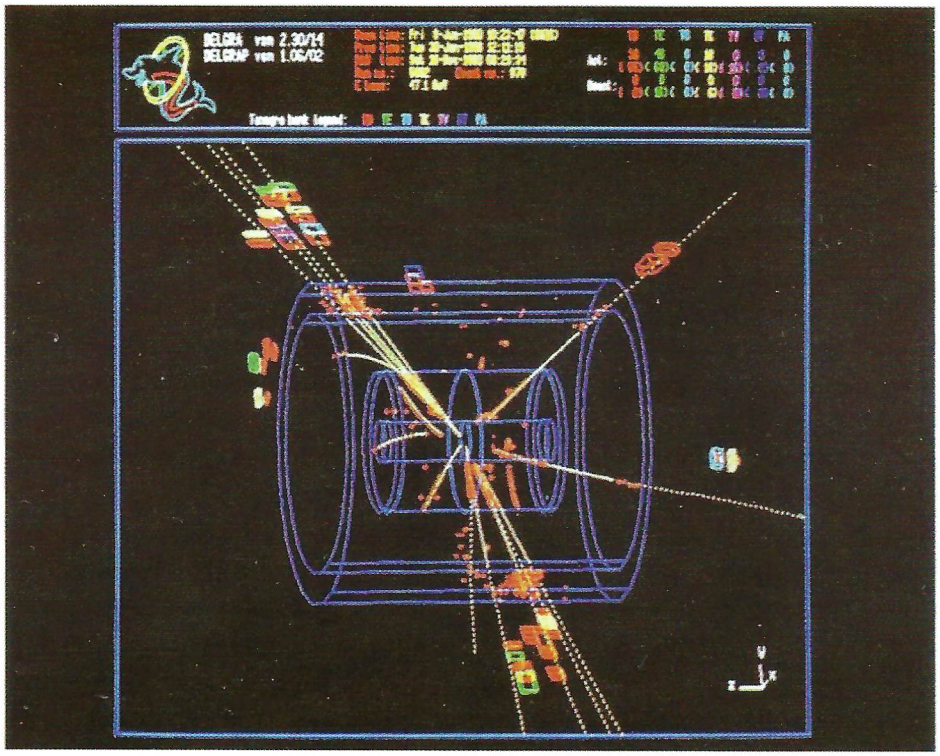


Fig-I-15 Diagramme de Feynman du processus d'annihilation $e^+ + e^- \rightarrow q + \bar{q}$

Dans cette "chasse aux quarks", il faut souligner le rôle de **R.P. Feynman** et de ses diagrammes d'interprétation, mais aussi celui de la découverte au CERN des courants neutres par l'équipe **Lagarrigue**.



En illustration, nous présentons les deux jets d'hadronisation issus de "l'habillage" d'une paire quark-antiquark provenant de la désintégration d'un boson Z_0 (LEP/ALEPH, détecteur DELPHI)

Fig-I-16
Noter la présence de 2 muons isolés
(Réf. Courrier Cern - nov 2009 p.27)

Il existe une autre possibilité traduite par le diagramme de Feynman ci-contre, relatif à une collision e^+ e^- à haute énergie. En effet, la théorie de "perturbation du second ordre" en chromodynamique quantique prévoit qu'un des quarks, avant de se hadroniser, peut quelquefois rayonner un gluon.

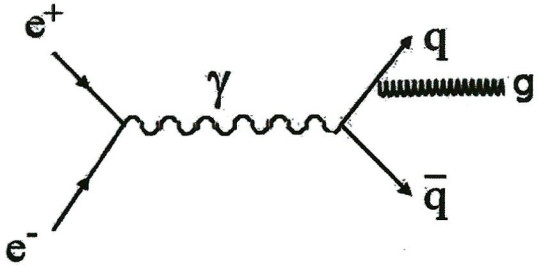


Fig I-17 L'un de 2 quarks émet un gluon

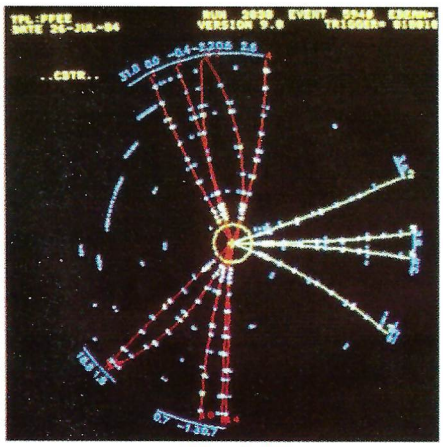


Fig-I-18

L'événement ci-contre (fig I-18) a été enregistré au collisionneur e^+e^- "PETRA" au centre de DESY près de Hambourg. L'énergie disponible, dans le centre de masse, était alors la plus grande au monde : 46 GeV.

1979 vit à PETRA la première observation d'un événement à 3 jets similaires conduisant à la découverte expérimentale du gluon et à la mesure de son spin.

I-21 PREMIERS REGARDS SUR L'OSCILLATION DES NEUTRINOS

L'histoire des particules élémentaires et de ses prolongements ne s'arrête pas avec cette présentation simplifiée :

- La chasse aux nouvelles particules et la mise en évidence de leurs propriétés s'intensifie au contraire auprès de tous les grands accélérateurs... et la moisson est déjà abondante.
- Un autre domaine est très actif : celui des oscillations de neutrinos, à savoir les possibilités de passage d'une forme de neutrino ν_μ par exemple, à une autre forme ν_e et ν_τ par exemple, et réciproquement; l'oscillation $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ est souvent recherchée dans des expériences souterraines à une certaine distance de grands accélérateurs (exemples : Gran Sasso en Italie, Kamioka au Japon). Cette chasse est née du déficit observé dans le cas des neutrinos solaires : le soleil est une étoile typique de la série principale qui produit son énergie par la

fusion de l'hydrogène en hélium, essentiellement selon la chaîne de réactions nucléaires dite proton-proton. L'éclairement énergétique mesuré par satellite soit 1,35 kW par m², permet de remonter à l'énergie émise par le coeur du soleil, centrale thermonucléaire de puissance prodigieuse : $3{,}86.10^{26}$ watts !

L'analyse du cycle thermonucléaire pp conduit alors à une évaluation de la luminosité solaire en flux de neutrinos : approximativement 65 milliards de neutrinos par cm² par seconde sur la Terre. Or les mesures les plus précises, par des méthodes radiochimiques (la désintégration bêta issue des paires pp se traduit par du bore 8, du Lithium 4, ainsi que de la capture électronique conduisant du Béryllium 7 au Lithium 7), conduites dans trois expériences souterraines spécialisées aux Etats-Unis (Homestake), en Europe (SAGE et GALLEX) et au Japon (Kamiokande et Superkamiokande), confirment bien le processus proton-proton comme source d'énergie pour le soleil, et donnent pour le flux de neutrinos observés le tiers de la valeur prévue. Ce désaccord est connu sous le nom de "Problème des neutrinos solaires" : PNS.

En 1968, **Gribov** et **Pontecorvo** avaient suggéré que les "oscillations" de neutrinos de l'électron vers "d'autres saveurs" neutriniques pouvaient réduire le flux des neutrinos électroniques issus du soleil. Plus tard, **Mikhaïev**, **Smirnov** et **Wolfenstein** ont montré que l'amplitude de ces oscillations offrait, dans le cas du milieu Soleil-Terre, une solution élégante : solution dite MSW du PNS, solution confirmée par toutes les oscillations de neutrinos connues à ce jour, objet de recherches importantes.

I-22 CONCLUSION PROVISOIRE... QUESTIONS

Une autre limite de cette présentation des particules élémentaires et qui vaut pour les 5 chapitres suivants, tient au fait que la "matière ordinaire" dont les particules font partie même via les accélérateurs, ne représente que 4,9 % de la matière totale de l'Univers. Pratiquement 95 % de la matière totale soit 26,8 % de matière noire et 68,3 % d'énergie sombre (données fournies par le satellite "Planck") sont actuellement l'objet de recherches intensives... sans compter le fait que même dans notre Univers immédiatement accessible, des objets nous échappent aussi sous leur forme "visible" : ce sont les trous noirs sur lesquels notre "physique corpusculaire" peut cependant élaborer ou conjecturer des "structures": ainsi l'émission de 2 jets de particules (noyaux lourds). Ces remarques, loin de nous rendre pessimistes, doivent au contraire stimuler les "**Recherches aux Limites**".

I-23 LES QUATRE INTERACTIONS FONDAMENTALES

La physique classique, puis la physique des particules expliquent toutes les forces qui gouvernent l'Univers dans toutes ses dimensions en fonction de quatre interactions fondamentales, soit en ordre d'intensité décroissante (de 1 à 10^{-38}) :

Interaction	Force relative	Particule médiatrice			
		Nom	Masse en GeV	Charge	Spin (en unité de $\hbar$)
1) L'interaction forte (ou nucléaire forte)	1	Gluon	0		1
2) L'interaction électromagnétique (α est, en physique atomique, la "constante de structure fine")	$\alpha = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$	Photon	0	0	1
3) L'interaction faible (ou nucléaire faible)	10^{-9}	Boson intermédiaire $W^{\pm}, Z^0$	80,4 91,2	$\pm e, 0$	1
4) L'interaction gravitationnelle	10^{-38}	Graviton	0	0	2

Fig-I-19

Les interactions électromagnétique et gravitationnelle sont familières de la physique classique. Toutes les deux s'expriment en fonction de la distance par une dépendance en $1/r^2$. Leurs particules "médiatrices" ont une masse nulle et sont stables. L'interaction électromagnétique a pour médiateur le photon, de spin 1. La particule médiatrice de l'interaction gravitationnelle est le "graviton" de spin 2 : il n'a pas encore été mis en évidence expérimentalement ; par exemple la force d'attraction gravitationnelle de deux protons est inférieure en intensité

à la force électrique répulsive d'un facteur 10^{36}. La force gravitationnelle est de première importance dans la structure des étoiles et dans le comportement à grande échelle de l'Univers, mais elle ne paraît pas jouer un rôle significatif dans les interactions entre particules, tout au moins à l'échelle des énergies aujourd'hui accessibles.
Le deux autres forces sont moins familières. La première, l'interaction forte, est responsable de la force nucléaire entre constituants du noyau atomique, mais aussi de la production de particules telles que les mésons π ou "pions" ou d'autres particules dans les interactions ou collisions de haute énergie. Au niveau le plus fondamental, le médiateur de l'interaction forte est appelé "gluon", de masse nulle, de charge nulle, de spin 1. Sa portée est faible, de l'ordre de 10^{-15} m.
La quatrième interaction est appelée "interaction faible": elle est responsable de la désintégration β; ainsi dans le corps humain, le carbone 14 et le potassium 40 se désintègrent par conversion d'un neutron du noyau atomique en un proton, un électron et un antineutrino électronique $n \rightarrow p + e^- + \overline{\nu_e}$.
Tandis que la fusion thermonucléaire engageant des noyaux d'hydrogène, de deutérium, met en jeu l'interaction forte, "l'ensemble du processus", pour notre soleil, appelé "chaîne protons-protons" est ainsi décrit :

(1) $^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + \beta^+ + \nu_e$

(2) $^2_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^3_2He + \gamma$

(3) $^3_2He + {}^3_2He \rightarrow {}^4_2He + {}^1_1H + {}^1_1H$

Pour chaque réaction (3) les réactions (1) et (2) interviennent deux fois.
On peut résumer cette chaîne en "conversion de 4 protons en un noyau d'hélium (ou particule alpha) + deux positons + deux neutrinos électroniques et deux gammas". D'où l'importance de l'interaction faible. Tout se passe dans la fusion $^1_1H + {}^1_1H \rightarrow {}^2_1H + \beta^+ + \nu_e$, comme si un proton se transformait en neutron suivant la réaction $p \rightarrow n + \beta^+ + \nu_e$ (interactions faibles).
L'interaction faible ralentit le rythme de la chaîne proton-proton globale (avec une double interaction faible). Sans elle le soleil aurait brûlé son "combustible" depuis plusieurs milliards d'années... Ce qui faisait dire à **Madame Wu** (responsable de l'expérience "princeps" qui a mis en évidence la violation de parité dans l'interaction faible) : "Je suis ici par la force de l'interaction faible !".

Quelques propriétés de l'interaction faible :
- Elle est, comme l'interaction forte, à très court rayon d'action ~ $0{,}001.10^{-15}$ m
- Le neutrino, tous les neutrinos, sont "d'interaction faible". Ils jouent un rôle précis dans les bilans énergétiques. Lors de l'explosion de la Supernova 1987A, 0,1 % de l'énergie est apparue sous forme de lumière visible. Tout le reste a été émis sous forme de neutrinos. La collaboration Ice-Cube vient de mettre en évidence des neutrinos d'origine extra-terrestre, d'énergie supérieure à 60 TeV (décembre 2013).

Pour une théorie électrofaible:
A partir de 1967 S.L. Glashow, S. Weinberg et A. Salam ont montré qu'une théorie de jauge correcte pour la force nucléaire faible incorpore la théorie des champs appelée électrodynamique quantique et doit s'appeler "théorie électrofaible". Elle traite de la force faible et de la force électromagnétique sur un pied d'égalité, les considérant comme des manifestations différentes d'une force plus fondamentale, la force électrofaible, un peu comme l'électricité et le magnétisme apparaissent comme des aspects différents de l'électromagnétisme.
Restait à découvrir, pour Glashow, Weinberg et Salam, les **quatre quanta**, médiateurs de l'interaction électrofaible: le photon et les trois autres bosons de jauge. Carlo Rubbia, sur une idée de refroidissement stochastique de Simon van der Meer, obtient la transformation du LEP du CERN en collisionneur protons-antiprotons de 2x270 GeV. Ainsi fut mise en évidence en 1983, dans les deux sites UA1 et UA2 du CERN (UA = Underground Area), l'existence des bosons $W^{\pm}$ et Z^0 qui véhiculent la force médiatrice de l'interaction nucléaire faible. Leurs masses sont énormes:
$M(W^{\pm}) = 80{,}4$ GeV/c^2 $\qquad$ $M(Z^0) = 91{,}2$ GeV/c^2
Ces masses expliquent à la fois le court rayon d'action et l'intensité 10^9 fois plus faible que l'interaction forte.
A partir d'énergies de 100 GeV, pratiquement énergie de masse de $W^{\pm}$ et Z^0, la force de l'interaction faible est équivalente à celle de l'interaction électromagnétique. Cela veut dire, par exemple, que dans les réactions à très haute énergie, l'échange de Z^0 est aussi commun que l'échange de γ.
Dans le monde de tous les jours la force nucléaire faible est plus petite que la force électromagnétique et plus puissante que la force gravitationnelle. Contrairement au photon, stable et qui peut vivre éternellement, sauf obstacle, en principe, $W^{\pm}$ et Z^0 ont une très faible durée de vie: 10^{-25} seconde…

Schémas de production des bosons de l'interaction faible:	Schémas de désintégration, une des voies:
$W^{\pm} : p + \bar{p} \rightarrow W^{\pm} + X$ où X = somme des débris $Z^0 : p + \bar{p} \rightarrow Z^0 + X$	$W^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e$ $Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$ ou $\mu + \mu^-$

Au SLC de Stanford, sur 80 000 Z^0 → 88% de paires avec hadronisation et jets, 12% entre paires de leptons $e^+ e^- / \mu^+ \mu^-$.

Exemples de médiation: diagrammes de Feynman

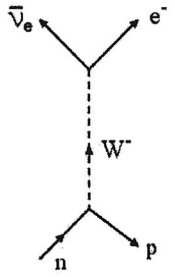


Fig I-20

W⁻ intervient comme médiateur de la désintégration β^- (exemple: le neutron libre $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$)

Collision électron-positon à plus de 100 GeV dans le centre de masse.
Une fois sur deux aux énergies du LEP (100 GeV) l'annihilation $e^+ e^-$ se fait par l'intermédiaire d'un Z_0

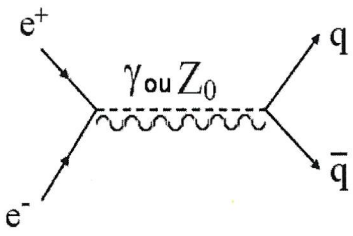


Fig I-21

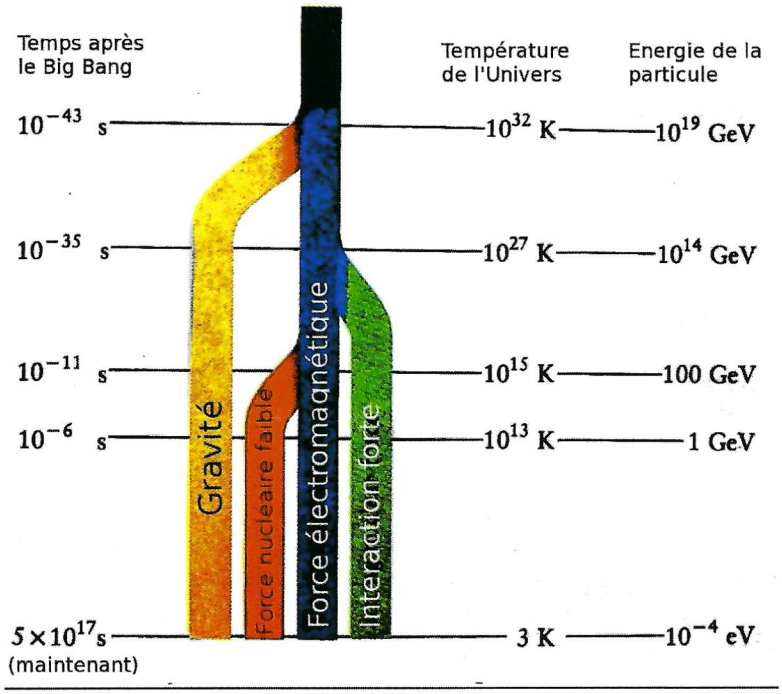


Fig I-22 - Les 4 forces ("Universe" - William J.Kaufmann - Ed Freeman and Company 1994 p.565)

I-24 - LOIS DE CONSERVATION

Toute particule se distingue par des propriétés intrinsèques : sa charge électrique, sa masse m liée à son énergie totale E et sa quantité de mouvement p par la relation $E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$… son spin, sa durée de vie … et ses comportements vis-à-vis des forces de base. Les masses sont exprimées en MeV/c^2, GeV/c^2 … ou en MeV, GeV, ce qui revient à prendre c=1.
Toutes les réactions et désintégrations des particules élémentaires et des hadrons sont décrites par un ensemble de lois de conservation. Le terme "conservation" signifie que certaines quantités demeurent inchangées, les propriétés d'invariance fournissant des outils puissants en vue de la recherche des solutions des équations fondamentales (y compris la mise en évidence de symétries et de brisures de symétries). Certaines lois de conservation appartiennent à la physique classique:

1) Loi de conservation de la quantité de mouvement ou moment linéaire
2) Loi de conservation de l'énergie totale
3) Loi de conservation du moment angulaire total
4) Loi de conservation du spin (extension de la 3ème loi)
5) Loi de conservation de la charge électrique

Exemples et applications des 5 premières lois:

- la désintégration du neutron libre: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ a été découvert expérimentalement par F. Reines et l. Cowan grâce à la réaction inverse: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$. Le flux intense d'antineutrinos provenait de la désintégration bêta moins des produits de fission d'un réacteur de puissance. A Brokhaven le processus d'absorption de l'antineutrino $\bar{\nu}_e$ dans une solution de scintillateurs enrichie au cadmium (riche en protons) est détecté grâce à la séquence $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$, puis la capture du neutron, accompagnée de l'émission de rayons gamma: ce deuxième processus est nettement décalé dans le temps par rapport au premier (10^{-10} seconde et 10^{-6} seconde); de plus dans la première séquence, les rayons gamma sont émis dans deux directions opposées. Dans la seconde séquence, plus "tardive", les directions d'émission gamma sont aléatoires.

6) <u>Conservation du nombre leptonique et baryonique</u>:

"Aucune matière baryonique ou leptonique ne peut apparaître seule, sans être accompagnée de l'antimatière correspondante". Exemples:

- matérialisation de photons gamma d'énergie suffisante $\gamma + \mathcal{N}(\text{noyau}) \rightarrow e^+ + e^- + \mathcal{N}'$
- Production d'antiprotons: $p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$

"Ce qui reste constant, dans l'univers cosmologique, c'est la différence entre la quantité de fermions et celle d'antifermions".

Les lois précédentes provenaient de "symétries" ou "invariances" par rapport à des translations dans l'espace-temps, à des rotations dans l'espace, soit de propriété de symétrie interne des particules.

Les lois de conservation suivantes n'interviennent que dans certains type d'interactions. "<u>Les grandes découvertes sont toujours réussies quand on doute de l'évidence</u>" (V.F. Weisskopf).

<u>7) Non conservation de la parité P</u> <u>(ou violation du reflet symétrique) dans les interactions faibles.</u>

Opérons une réflexion spatiale: si $\psi(-\vec{I}, \vec{S}) = +\psi(+\vec{I}, \vec{S})$, la parité est paire P = +1. Si $\psi(-\vec{I}, \vec{S}) = -\psi(+\vec{I}, \vec{S})$, P = -1. Prédite par **T.D. Lee** et **C.N. Yang**, la violation de parité dans la radioactivité bêta moins fut vérifiée par **Madame C.S. Wu** en 1956. C.S. Wu étudiait à très basse température la radioactivité du Cobalt 60:

$^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + e^- + \bar{\nu}_e$ (dont le processus de base est $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$). Madame Wu vérifia que les électrons e^- de moment $\vec{p}_e$ sont émis préférentiellement dans la direction opposée au spin $\vec{I}$ du Cobalt 60. La valeur moyenne du produit $(\vec{I} \cdot \vec{p}_e)$ est négative.

8) <u>Observations de la violation de l'invariance CP dans les interactions faibles</u>.

En 1964 une légère brisure de la symétrie CP a été découverte. Afin de comprendre comment ce phénomène fut observé, il nous faut poser clairement la question: <<*toutes les lois de la Nature sont-elles invariantes par application simultanée de la conjugaison de charge (échange particule-antiparticule) <u>et</u> la conjugaison de parité (échange "miroir" ou "droite-gauche")*>>.

Qu'implique l'invariance CP ? Que les deux réactions suivantes présentent la même "rapidité":

$A \rightarrow B + e^- + \bar{\nu}_e$ ("droite)

$\bar{A} \rightarrow \bar{B} + e^+ + \nu_e$ ("gauche")

Il existe un système particulièrement intéressant de ce point de vue, celui des mésons K neutres, soit K^0, sans spin, de parité négative, de masse 497,7 MeV, qui se désintègrent soit en 2π: $K_1^0 \rightarrow \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$ ... durée de vie 10^{-10} seconde, soit en 3π: $K_2^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0, \pi^0\pi^0\pi^0$... durée de vie 10^{-8} seconde (voie lente).

Dans le modèle des quarks K_1^0 est un état lié $d\bar{s}$, K_2^0 est un état lié $\bar{d}s$. Soit en terme de nombre quantique d'étrangeté: $K_1^0 = |K^0\rangle$: S = +1 $K_2^0 = |\overline{K^0}\rangle$: S = -1

Sans la transformation CP nous avons:

$CP|K^0\rangle = |\overline{K^0}\rangle$ soit un passage de la voie brève à la voie lente

$CP|\overline{K^0}\rangle = |K^0\rangle$ réciproquement

En 1964, au Laboratoire National de Brookhaven, **Christensen**, **Cronin**, **Fitch** et **Turley** observèrent que la même particule K_2^0 appelée encore K_L^0 à voie lente (10^{-8} seconde) pourrait se désintégrer soit dans le canal "2π", soit dans le canal "3π".
Pour 300 événements "K → 3π", on observait un événement "K → 2π": effet non important quantitativement, mais régulièrement présent; s'il n'y avait pas violation de l'invariance CP, la voie brève donnerait deux pions, la voie longue 3π. La présence même légère - et confirmée par d'autres expériences - d'un mélange "2π" dans "3π" traduit bien une brisure de symétrie, une rupture de l'invariance CP. Plus récemment la violation CP a été observée dans une proportion plus importante (de 10^{-2} à 10^{-1}) dans plusieurs modes de désintégration, des diverses voies du méson B ($b\bar{b}$), $u\bar{b}$, $d\bar{b}$, $c\bar{b}$, $s\bar{b}$ + antiparticules, avec mixages…: **nouvelle ère de physique pour la collaboration LHCb.**
Cette violation de la symétrie CP dans les interactions faibles a une véritable importance cosmologique.

9) Des questions continuent pourtant à être posées: même si plusieurs travaux théoriques montrent que plusieurs modèles pourraient conduire à une importante violation de l'invariance CP dans le domaine du "charme", plusieurs autres études expérimentales approfondies, notamment sur la violation éventuelle de l'invariance CP dans les désintégrations: $D^0 \rightarrow K^+K^-$ et $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$, à partir de la mise en évidence de l'écart ΔA_{CP}, montre que plusieurs mises à jour de telles mesures sont nécessaires pour répondre à la question: *La Nature, et à quel niveau, distingue-t-elle entre "charme" et "anticharme"?* le D^0 a une structure en $c\bar{u}$, sa masse: 1869MeV…[Réf. LHC_b collaboration 2013 arxiv: 1303.2614 (hep-ex)].
Question d'autant plus aiguë qu'un autre problème du Modèle Standard des particules est que la chromodynamique quantique n'impose pas l'invariance CP de l'interaction forte dans certaines situations: plusieurs approches théoriques suggèrent que "au voisinage de la transition de phase de déconfinement" cette violation de l'invariance CP en interaction forte pourrait se manifester suivant la direction du champ magnétique ultra puissant: 10^{14} teslas créé dans les collisions non-centrales d'ions lourds, et perpendiculaire au plan de la réaction. Ce phénomène est appelé "effet magnétique chiral" (CME) [cf "ALICE", CERN: collisions dans le centre de masse 2,76 TeV par paire de nucléons] : en 2010, 13.10^6 événements observés [Réf BI ABELEV et al. ALICE collaboration 2012 arxiv: 1207.0900 (nucl-ex) submitted to Phys.Rev.Lett...].
Autant d'aires de recherches.

10) Invariance CPT ou PCT:
P: inversion des coordonnées spatiales
C: conjugaison de charge
T: inversion du temps [remplacement de T par -T dans toutes les lois physiques. On peut l'imaginer au moyen d'un film représentant la réaction: A + B → C + D (a) qui se déroulerait dans le sens inverse pour obtenir la réaction: C + D → A +B (b)].

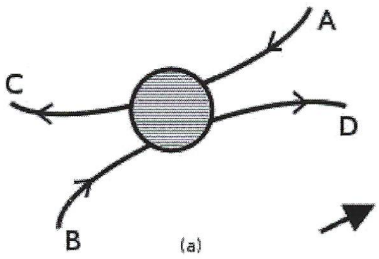


Fig I-23

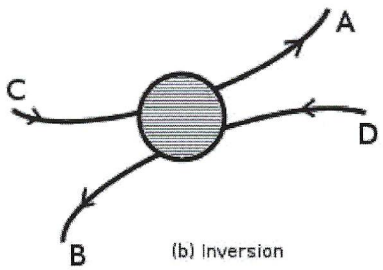


Fig I-24

L'inversion du temps T requiert que les deux processus se réalisent avec la même probabilité (la même "section efficace").
"Les lois de la Nature sont invariantes dans le produit des trois transformations CPT"

Un exemple de test crucial: l'identité $g_{e+} = g_{e-}$ à 10^{-10} près, où g est ainsi défini: le moment magnétique d'une particule vaut $\vec{M} = -g_e(\frac{e}{2m})\vec{S}$ où $\vec{S}$ représente le spin, par exemple $\frac{1}{2}\hbar$. Puis on détermine par résonance $a_{e-} = (g_{e-}-2)/2$, de même a_{e+}. L'identité entre ces deux valeurs obtenue théoriquement par la méthode des diagrammes de Feynman, puis expérimentalement en 1981, est un test crucial de l'invariance CPT.

11) Nouvelle aire de recherche
Depuis 2007 environ, motivés par la quête d'une théorie unifiant la mécanique quantique et la gravitation, des efforts sont entrepris en vue de trouver une évidence expérimentale relative à la violation de l'invariance CPT et de la symétrie de Lorentz (ou "invariance de Lorentz") qui lui est associée. L'invariance de Lorentz rejoint une donnée du principe d'équivalence d'Einstein: dans les référentiels locaux en chute libre, les lois qui régissent les

phénomènes doivent être indépendants de la vitesse du référentiel. D'autre part, en Relativité Générale, les trajectoires des corps tombant en chute libre sont des géodésiques. En Relativité Générale invariance CPT et invariance de Lorentz se rejoignent. Le cadre théorique introduit par les chercheurs en "violation CPT" est nommé Standard Model Extension (SME) [quatrième conférence d'Indiana, Harvard University, Harvard Smithonian Curter for Astrophysic 2008].

Pistes explorées:

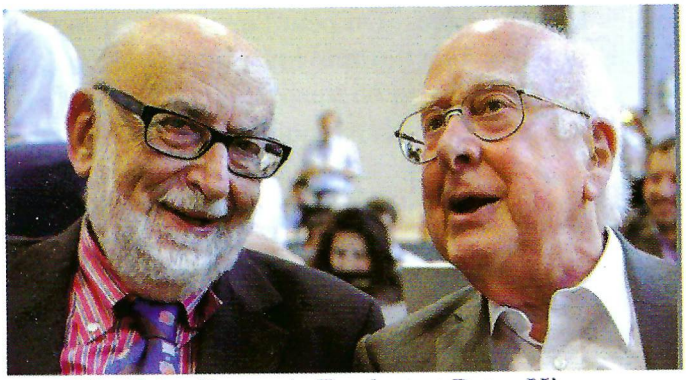
1) Oscillations des neutrinos: $\nu_e \rightarrow \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.
2) Variation de l'anomalie des fréquences (g-2) des muons en lien avec les recherches de variations sidérales. Même recherche sur (g-2) des électrons et positons (collaboration Boston-Brookhaven).
3) Spectroscopie de l'antihydrogène. Certains tests feraient apparaître des variations sidérales dans le spectre.
4) Gravitation et astrophysique: travaux sur le rayonnement fossile micro-onde; la radiation synchrotron et la diffusion Compton inverse dans les sources astrophysiques de haute énergie.
5) Tests de physique atomique: pendules de torsion, horloges atomiques, techniques interférométriques…
Des effets gravitationnels au moyen de la télémétrie laser lunaire ont été étudiés (réf Noël Russel, Université de Michigan et Courrier CERN vol 48 - janvier/février 2008).

I-25 - POUR UNE NOUVELLE PHYSIQUE !?

Même si on ne découvre que de minuscules traces de violations d'invariances Lorentz et CPT, il s'agirait d'un événement entraînant un véritable changement de paradigme. Il en résulterait une profonde altération de nos théories courantes décrivant les forces de la Nature. En attendant des confirmations précises et analysées de façon critique, une grande prudence s'impose.
Depuis la découverte de la radioactivité β et de la désintégration du neutron libre, on sait que tout se passe comme si un proton se transformait en neutron et réciproquement. Cette véritable transmutation - effectuée par l'intermédiaire de l'interaction faible - correspond au changement d'un quark: un quark *u* devient un quark *d* et réciproquement: indice d'un détail plus fin au sein de ces particules ?... D'où l'hypothèse des "préons" et (ou) des "supercordes": frontière à conquérir ! (D'après Don Lincoln "Au cœur des quarks" - Pour la Science juin 2013 p.19-25)

II LE BOSON DE B E H (précédemment nommé boson de Higgs)

II-1 LE CHAMP BEH


Fig II-1 - François Englert et Peter Higgs

Le prix Nobel de physique 2013 vient d'être attribué à François Englert et Peter Higgs en récompense de leurs travaux sur la constitution de la matière, très concrètement pour avoir proposé la théorie qui vient d'être confirmée expérimentalement par la découverte du boson de jauge appelé à l'origine "boson de Higgs".
L'avancée très récente (2012) concerne la mise en évidence expérimentale d'un "champ" né dans le cosmos à l'instant $t = 10^{-11}$ seconde, soit un centième de milliardième de seconde, donc tout proche du Big-Bang. A cet instant la température du cosmos se trouve à environ 10^{15} kelvins.
Au-dessous de cette température il se produit une "transformation de phase" analogue - toute proportion gardée - à ce qui se passe lorsque la glace, ou un cristal de neige fond au-dessus de zéro degré Celsius (273 K). Dans le cas de la glace ou du cristal de neige, la transition de phase se traduit par le passage d'une symétrie cristalline à un état "sans symétrie": l'eau liquide.
Cette transition s'appelle très généralement "brisure de symétrie". Ainsi Peter Higgs, et indépendamment et au même moment, Robert Brout et François Englert, en cosmologie, ont eu l'idée d'introduire au-dessous de 10^{15} kelvins, une "brisure de symétrie" appelée encore "brisure spontanée de symétrie" (BSS).
Pourquoi ce choix ? Parce qu'au-dessous de cette température l'interaction électromagnétique se sépare de l'interaction dite faible qui gouverne en particulier le rythme de fusion thermonucléaire du Soleil.
Pour Brout, Englert et Higgs, cette brisure de symétrie modifie les propriétés de l'espace et crée ainsi un "champ".

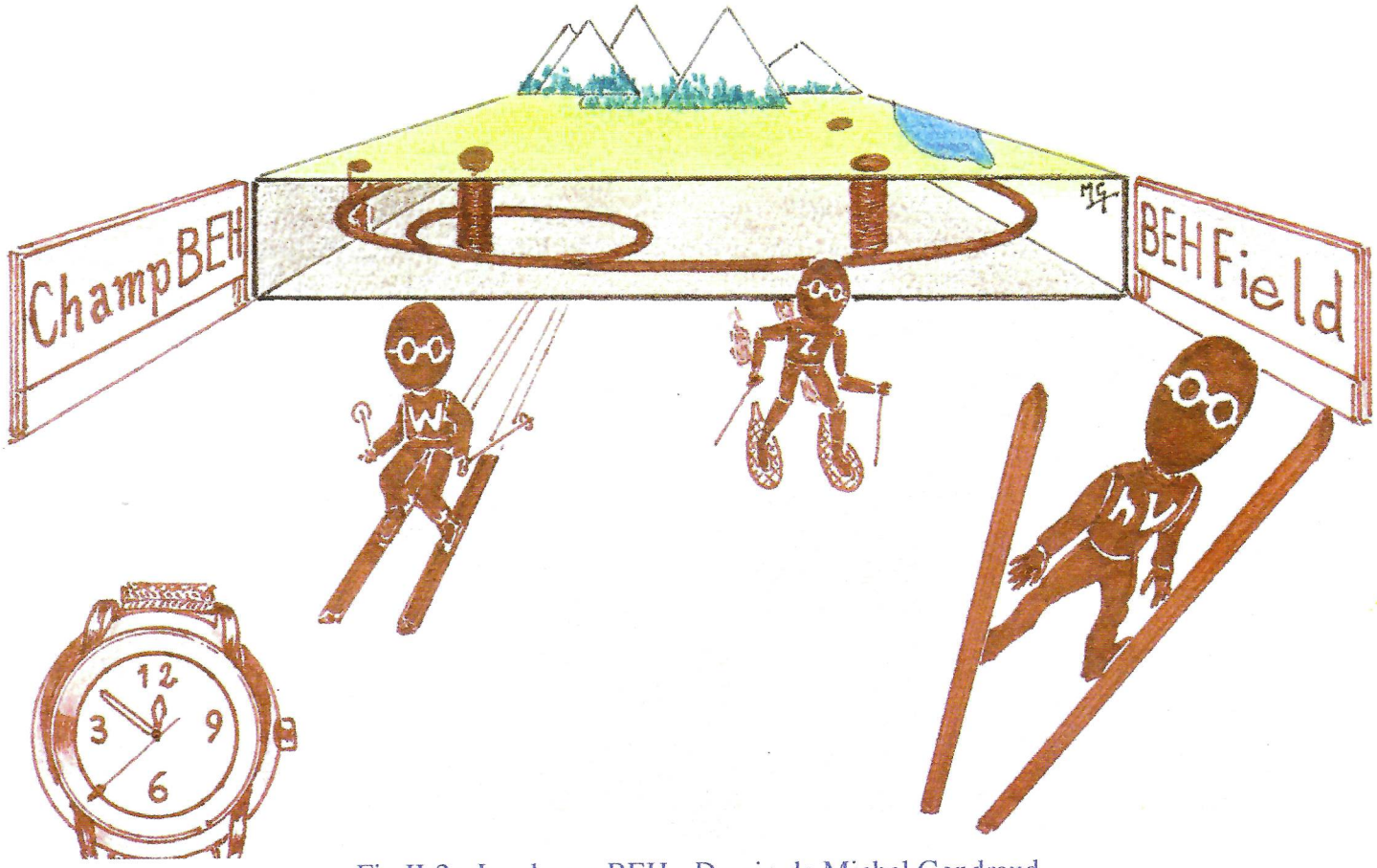


Fig II-2 - Le champ BEH - Dessin de Michel Gendraud

Un "champ" représente l'ensemble des valeurs prises par une certaine grandeur physique en différents points de l'espace: ainsi le champ magnétique créé par un aimant peut être visualisé par l'angle que forme l'aiguille d'une boussole avec la direction Nord-Sud, ou encore par les lignes dessinées par la limaille de fer qui s'oriente dans le voisinage de l'aimant. Dans notre cas à $t = 10^{-11}$ seconde et $T = 10^{15}$ kelvins, précisément juste "après et au-dessous", naît un champ nommé initialement "champ de Higgs" ou "champ BSS" pour "champ de brisure spontanée de symétrie", et aujourd'hui "champ BEH" en l'honneur de Brout, Englert et Higgs; la particule médiatrice de ce champ vient d'être découverte, en juillet 2012 au CERN de Genève, dans deux immenses détecteurs ATLAS et CMS (pour Solenoïde Compact détecteur de Muons). Ces deux détecteurs sont placés séparément sur des secteurs où entrent en collision, lancés à une vitesse voisine de 300 000 km/s, les protons issus de deux faisceaux accélérés dans deux directions opposées dans le Large Hadron Collider (les hadrons sont ici les protons, particules d'interaction forte - "hadron", du grec "hadros"): 600 millions de collisions par seconde !

Mais pourquoi une telle expérience ? "Rien, dans l'Histoire, n'a jamais ressemblé à une telle entreprise!" (Michel Serres)...entreprise qui a mobilisé plus de 8000 chercheurs du monde entier (une quarantaine de pays)... sans compter autant et plus de techniciens, d'ingénieurs...mais également le travail de Recherche et Développement, les exploits technologiques industriels ! Pourquoi une telle "Epopée" scientifique, humaine... à la suite simplement des intuitions géniales de trois théoriciens ? Près d'un demi-siècle au total, sans compter depuis 2008 le fonctionnement, jour et nuit, du L.H.C. ? La réponse scientifique: pour découvrir l'origine de la masse de 36 particules élémentaires mises en évidence depuis 1900, origine de la théorie quantique.

Quel intérêt pour l'Humanité, en dehors de l'accroissement du "champ" des connaissances ? Quel intérêt pour nous ? C'est que, avant l'existence, très brève, à l'instant $t = 10^{-11}$ seconde, pratiquement il y a 13 milliards 820 millions d'années, les particules élémentaires de base: électrons, quarks (briques de matière)... n'avaient pas de masse et, n'ayant pas de masse (d'inertie et gravitationnelle), elles "voyageaient" à la vitesse de la lumière dans le "vide" spatial: trois cent mille kilomètres par seconde. Ces particules élémentaires n'avaient donc aucune possibilité d'interagir pour former des "structures": pas de protons possibles dans un tel cosmos... pas d'atomes

non plus, même le plus léger, l'hydrogène (où l'électron gravite autour du noyau, le proton): l'électron, animé de la vitesse c ne peut que "fuir"… Pas de molécules non plus.

Le champ BEH, qui transporte cette particule mystérieuse, le "boson BEH" de charge électrique nulle, de spin nul - propriétés quantiques fondamentales - a donc, il y a "très" longtemps, structuré le vide et empli tout l'espace cosmique pendant un **temps très bref** (la durée de vie du boson BEH: 10^{-25} seconde). Les particules élémentaires, **toutes**, sensibles à ce maillage spatial, ont été ralenties en traversant le champ BEH qui baigne le Cosmos dès sa "première enfance".
Et plus elles sont ralenties, plus leur masse devient importante. Elles peuvent donc interagir, créer les structures de l'Univers. Ainsi, au fil du temps, s'est peuplé le monde cosmique (galaxies… système solaire… planète Terre…)… et nous sommes là… le champ BEH est donc, aussi, une bonne nouvelle pour nous, pour l'origine de l'Humanité… Par contre la masse des particules élémentaires n'est pas une propriété intrinsèque; nous le préciserons plus bas.
Mais indépendamment de tout cela, l'Homme ne sait-il pas, inconsciemment, qu'il est une énigme dans l'Univers, malgré les conquêtes de l'astrophysique et de la paléontologie ?...
Les toutes récentes conquêtes du CERN nous inclinent pourtant à partager l'observation de l'auteur Sean Caroll de l'ouvrage "The Particle at the End of the Universe" : *"Si seulement les Nations Unies voulaient travailler à la manière du CERN (organisation, coopération, patience, rigueur, clarté, ténacité… paix ! fraternité de la science…) le monde serait en meilleure position"*.

Quant aux théories scientifiques, en général, il faut se rappeler qu'elles sont toujours, dans leur beauté même, des symphonies "en attente", y compris la suite de l'épopée BEH.

Références sur le champ et le boson de Higgs:

- François Englert "Le boson de Higgs, la particule manquante" in "Les dossiers de la Recherche" n° 43 mai 2011 p 28 à 31
- "L'Univers inflatoire" Alan Guth et Paul Steinhardt in "L'Univers : des Faits aux Théories" préface de Jean-Claude Pecker in Bibliothèque "Pour la Science"

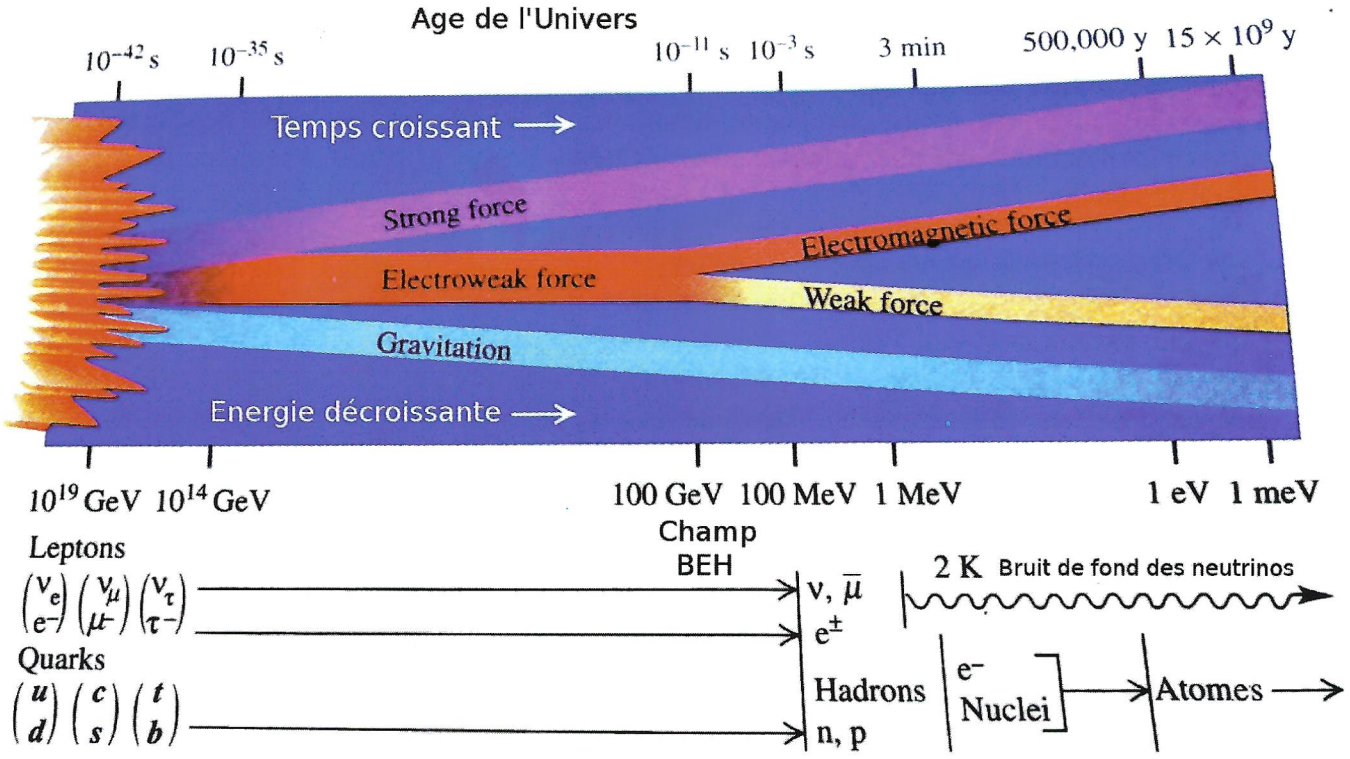


Fig II-3 Diagramme schématique des temps, énergies et interactions in "University Physics" 5ème Ed. Young et Freedman. Ed Addison-Wesleg. Année 2000 p 1443

II-2 EXEMPLES DE PROCESSUS DE PRODUCTION (DIAGRAMMES DE FEYNMAN)

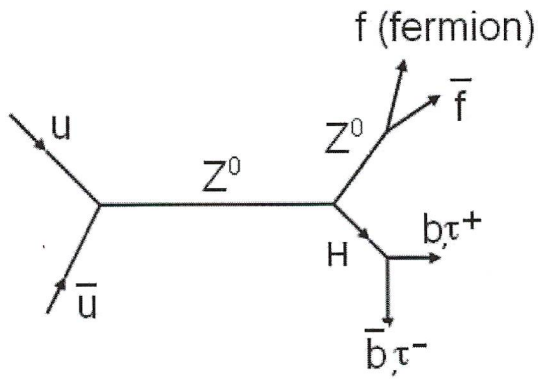


Fig II-4 Processus le plus simple
(réf Jean-Claude. Montret)

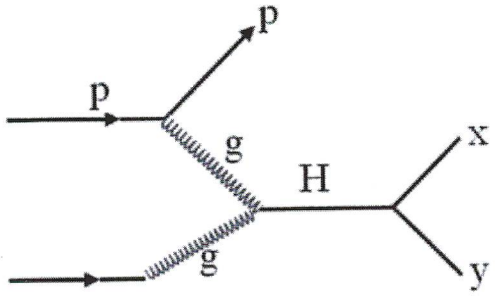


Fig II-5 Processus de fusion de deux gluons par collision proton-proton
(Réf JC Montret - Auvergne Sciences déc 2002)

II-3 GENESE D'UNE GRANDE DECOUVERTE EXPERIMENTALE. LE LHC. LES DETECTEURS GEANTS

Le champ BEH subsiste depuis l'époque primordiale t = 10^{-11} seconde, mais les bosons BEH, produits en nombre immense comme traces de sa naissance, ont disparu depuis longtemps en raison de leur durée de vie très brève, environ 10^{-25} seconde.

Le seul moyen d'apporter la preuve du mécanisme BEH était donc de reproduire en "laboratoire" les conditions historiques de sa production, à savoir l'obtention d'une très haute énergie, supérieure à toutes celles qui se sont succédées depuis le premier accélérateur de particules, le Cyclotron d'**Ernest Lawrence** (1930)… en passant par le Super Synchrotron à protons du CERN, le Tevatron de Chicago et beaucoup d'autres "machines" de par le monde (Berkeley, Brookhaven, Stanford, Darmstadt, Pékin…) … jusqu'au Collisionneur Electrons-Positons du CERN (le LEP qui a fonctionné de 1989 à 2000).

Tous ces accélérateurs ont apporté leur contribution à la floraison de découvertes de particules appartenant au "Modèle Standard": trente-six, si on associe à chaque particule son antiparticule:

24 fermions: 12 leptons + 12 quarks
12 bosons: 8 gluons, W+, W-, Z^0, photon

…… en plus du boson BEH, en attendant le graviton !

Le Tevatron de Chicago, collisionneur à 2 TeV, avait bien montré "quelque chose"autour de 126 GeV. Le LEP avait établi des zones d'exclusion: le boson BEH devait avoir une masse supérieure à 115 GeV.

La décision de construire un nouveau collisionneur , le Large Hadron Collider (LHC) sur le site du LEP (2 anneaux de 27 km de circonférence enfouis entre 50 et 150 mètres sous terre, où les protons seront accélérés à des vitesses proches de la lumière avant d'entrer en collision dans quatre zones de croisement) fut prise en 1994. Les études de Recherche et Développement se sont étendues de 1989 à 1997. La construction du LHC a duré dix années: 1998 - 2008.

Le LHC est l'instrument scientifique le plus grand et le plus complexe jamais construit pour la physique des particules aux très hautes énergies:

L "Large": grand anneau de 27 km de circonférence
H "Hadron": accélérateur de protons et d'ions (plomb)
C "Collider": collisions frontales

Le 11 décembre 2013 les visiteurs des Associations ADASTA et SFEN ont eu le privilège , accueillis par François Vazeille, Directeur de Recherche Emérite au CNRS, chef du projet ATLAS au Laboratoire de Physique Corpusculaire (Université Blaise Pascal et IN2P3), de découvrir à 100 mètres sous terre, le détecteur ATLAS, puis de suivre toute la chaîne initiée par la source de protons: une petite enceinte d'hydrogène à haute pression soumis à un champ électrique oscillant, assure la transformation du gaz en cette source de protons. Ces protons sont injectés dans un premier puis un second accélérateur linéaire, avant d'aboutir à un petit accélérateur circulaire qui nourrit un "booster" à partir duquel le flux désormais intense de protons est successivement dirigé vers le Synchrotron de 24 GeV, puis le Super Synchrotron à protons qui porte les faisceaux à une énergie de 0,49 TeV, avant de les injecter dans le LHC où ils effectuent des millions de tours. A chaque révolution les protons - plus généralement les hadrons - sont accélérés en huit points par un champ

électrique contenu dans des cavités spéciales (5 millions de volts par mètre) jusqu'à atteindre - en 2011 puis en 2012 - des énergies par faisceau de protons de 3,5 puis 4 TeV.
Pour contrôler et guider les faisceaux à de telles énergies, le LHC utilise quelque 1800 systèmes d'aimants supraconducteurs à très basse température (1,9 kelvin soit -271,3 °C) aux fins de refroidir la partie active en alliage de niobium et de titane, les dipôles fournissant un champ magnétique de plus de 8 teslas (200 000 fois le champ terrestre).
Dans le LHC les hadrons circulent en sens contraires dans deux anneaux qui se croisent en quatre points; les quatre expériences complémentaire: ATLAS, CMS, ALICE et LHCb fonctionnent dans un vide très poussé comparable au vide spatial (10^{-13} atmosphère, soit 1 atome par m^3).

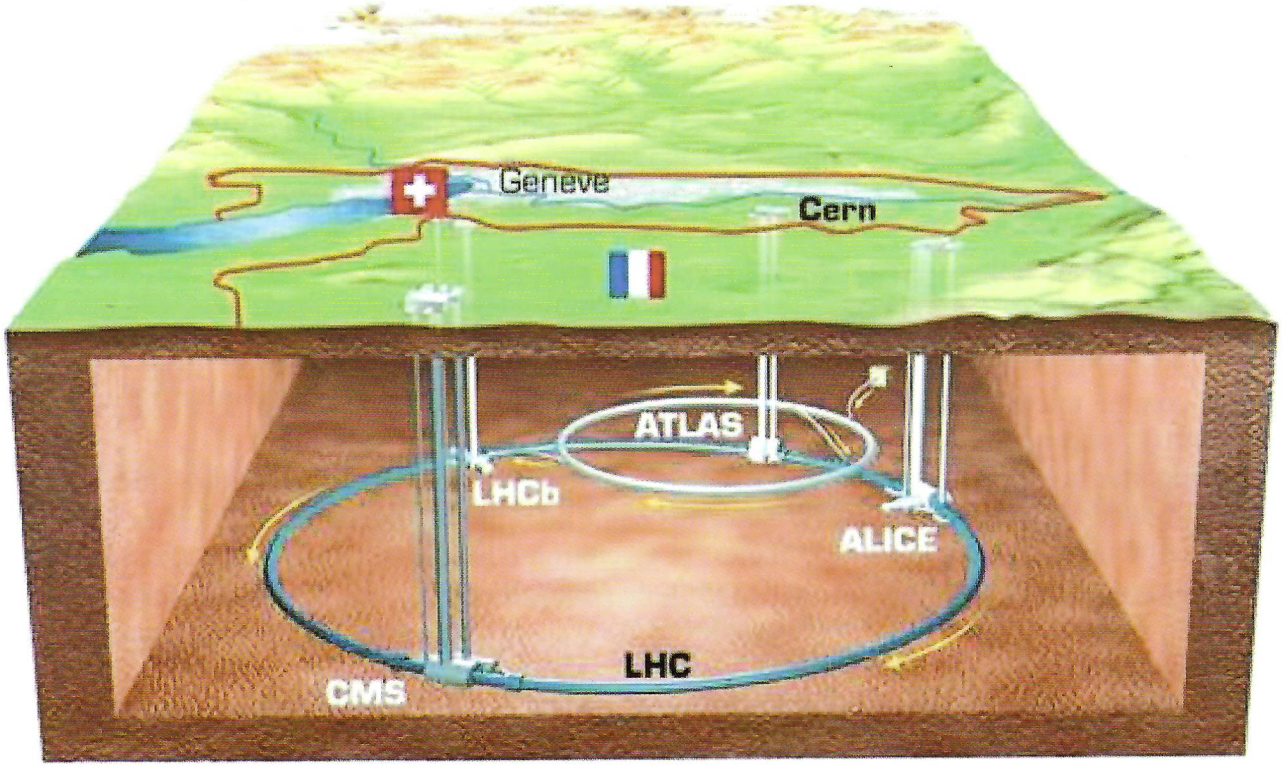


Fig II-6 - Le LHC - Illustration Philippe Mouche

Les collisions ont lieu dans une petite région sur l'axe des faisceaux (quelques micromètres de diamètre, quelques centimètres de long). Chaque faisceau est formé de près de 3000 paquets de particules; chacun de ces paquets contenant 100 milliards de particules (protons). Quand les paquets se croisent, seulement 20 collisions se produisent parmi les 200 milliards de protons. Mais comme les paquets se croisent environ 30 millions de fois par seconde, le LHC produit 600 millions de collisions par seconde.

Résumons: conclusion sur le Large Hadron Collider (François Vazeille):
"Le LHC monopolise les records mondiaux:
- le plus grand collisionneur (27 km)
- le plus puissant (la plus grande intensité de hadrons)
- le plus énergétique (7 TeV par faisceau dans la phase ultime, soit 7000 milliards d'électrons-volts)
- un vide extrême: le vide spatial (1 atome / m^3)
- une température plus basse que celle du rayonnement cosmologique fossile (1,9 K au lieu de 2,7 K)"

- … donc un sommet technologique, industriel, organisationnel.

Les détecteurs géants: Atlas et CMS: il est apparu immédiatement que la construction des détecteurs ATLAS et CMS, tous deux prévus pour la détection (en tous cas la recherche) du boson BEH, posait des problèmes encore plus "insurmontables" que celle du collisionneur LHC lui-même. D'où la nécessité d'une collaboration internationale en Recherche et Développement.
Conception et construction d'ATLAS et CMS ont pris une vingtaine d'années.

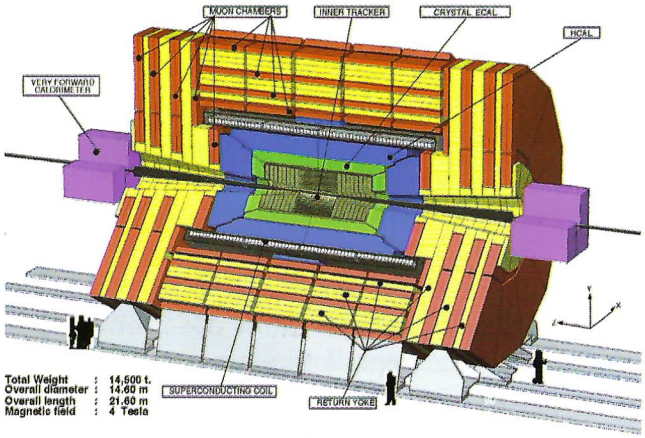


Fig II-7 CMS, le plus grand aimant solénoïdal supraconducteur

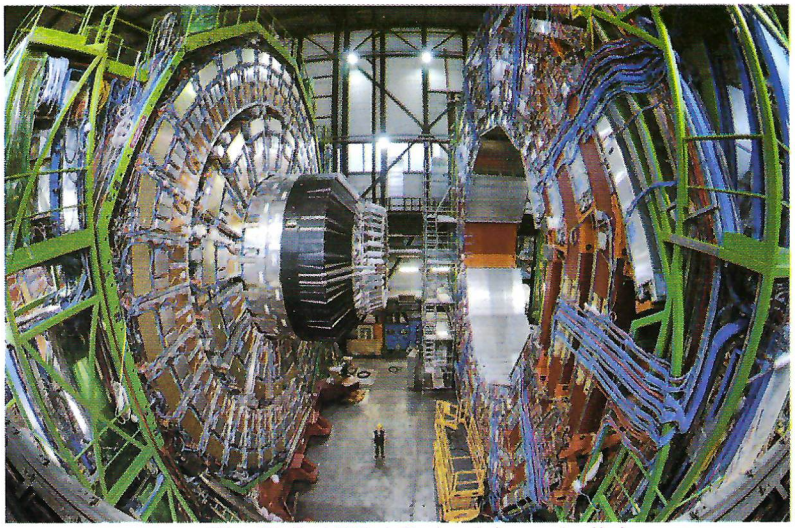


Fig II-8 ATLAS, intérieur de l'aimant

ATLAS:

- la plus grande caverne artificielle du monde
- le plus gros aimant toutes catégories (toroïde supraconducteur)

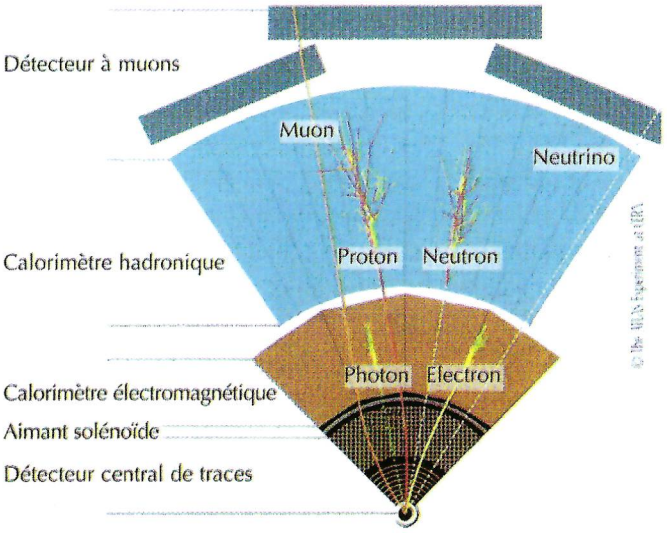


Fig II-9 Schéma simplifié des méthodes de détection dans Atlas, en vue transverse. Les trajectoires en pointillés ne sont pas détectés.
(Les Reflets de la Physique N°14)

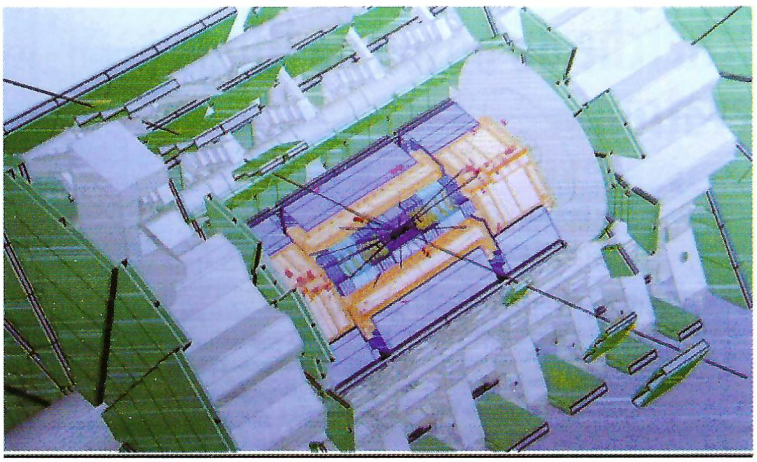


Fig II-10 Simulation d'un événement Higgs: $Z\overline{Z} \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$ dans Atlas (écorché). On distingue les traces des deux muons qui sortent du détecteur et les impacts des deux électrons (en rouge) qui sortent du calorimètre central (orange).
(Réf. Reflets de la physique N°14 mai 2009)

Le flux de données analysées à partir d'ATLAS et CMS

Au niveau quantique le même état initial (la même collision) peut produire des états finals différents bb, WW, ττ, γγ, ZZ suivant une certaine loi de probabilité.

- Des centaines de millions de collisions par seconde avec prises de données jour et nuit depuis 2008 …soit en cette même année 2008: 15 Téraoctects par an (15 mille milliards) équivalant à une pile de CD de 20 km de haut.

- Comment? Une grille mondiale de calcul met en commun 100 000 ordinateurs et 100 centres de calcul dont le nœud LPC de Clermont-Ferrand. La production de BEH a mis en œuvre directement 5 milliards de collisions.

Extrait de "Clermont-Demain" de novembre 2013:

La contribution française et celle du LPC

Le LHC est situé aux deux tiers en France. En tant que pays hôte, avec la Suisse, la France a apporté une contribution financière supplémentaire à son financement usuel du CERN pour la construction du LHC. Elle a bien entendu participé activement à l'élaboration des collaborations ATLAS et CMS et des détecteurs éponymes, via dix laboratoires mixtes CNRS-Université dépendant d'un institut commun du CNRS (l'IN2P3) et du laboratoire IRFU du CEA.
Le LPC est l'unité mixte de recherche CNRS-IN2P3/UPB de Clermont-Ferrand. Il est l'un des laboratoires fondateur de la collaboration Atlas, qui ne comptait à l'origine qu'une quinzaine de laboratoires. Aujourd'hui, ils sont cent soixante-dix-sept laboratoires issus de trente-huit pays.

La contribution du LPC s'est déroulée en 3 temps

- **De 1989 à 1998**: deux expériences de recherche et développement officielles au CERN ont conduit au choix, par la collaboration Atlas, de l'option promue par le LPC d'un calorimètre hadronique à tuiles scintillantes (le Tilecal) destiné à mesurer les hadrons (jets de quarks et gluons; hadrons isolés et muons), alors qu'il y avait deux options concurrentes.
- **De 1998 à 2008**: construction du calorimètre avec la contribution d'une vingtaine d'autres laboratoires, représentant des travaux de mécanique, d'optique, d'électronique et d'informatique.
- **A partir de 2009**:participation au fonctionnement d'Atlas (postes de 8 heures jour et nuit), à sa maintenance, à la prise des données et aux analyses de physique.
  Sachant que pendant la période 1990-2009, l'équipe du LPC a participé également à la prospective des analyses de physique qui seraient effectuées lorsque le LHC fournirait des vraies données.

Le LHC a été arrêté début 2013. Sa remise en route en 2015 s'accompagnera d'une amélioration de ses performances: l'énergie de collision devrait être pratiquement doublée, ce qui permettra d'aller plus loin dans l'analyse des propriétés du boson BEH et, quête ultime, de mettre en évidence une "nouvelle physique".
A l'horizon 2022, le LHC va connaître de nouvelles améliorations qui nécessitent, naturellement, une nouvelle évolution technologique d'Atlas. Depuis 2005 le LPC est engagé dans de nouveaux travaux de recherche et développement visant à améliorer Tilecal.

En savoir plus:

Atlas:	CERN http://atlas.ch/
LPC:	http://clrwww.in2p3.fr/
LHC-France:	http://www.lhc-france.fr

Le LPC (Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand) est ainsi l'un des dix laboratoires français concernés…et brillamment engagés dans cette recherche internationale: plus de 60 pays dans les expériences, 500 laboratoires et 8 000 chercheurs (Europe, Etats-Unis, Russie, Asie). Dans le N° 69 d'"Auvergne Sciences" (décembre 2008) François Vazeille, directeur de recherche émérite au CNRS, pilote de l'équipe clermontoise, souligne les grandeurs de cette aventure scientifique, technologique et humaine.

Le prix Nobel 2013 ne pouvait que combler les acteurs d'ATLAS, du CMS, du LHC qui ont mené cette longue traque dans un seul but: transformer les bosons de Higgs, de **virtuels** qu'ils étaient, objets des prévisions théoriques générales de Robert Brout, François Englert et Peter Higgs, en **bosons réels** retrouvant la vitalité qu'ils avaient lors de l'enfance de l'Univers.

Le prix Nobel de François Englert et Peter Higgs (d'un côté par la lame de fond pacifique qu'ils ont déclenchée, de l'autre par la preuve expérimentale apportée par les 8 000 membres des équipes ATLAS et CMS…) récompense une découverte d'une grande portée, une véritable révolution en physique des particules: nous considérions la masse comme une propriété intrinsèque de la physique des particules fondamentales !

Aujourd'hui leur masse, celle de l'électron, du proton, du méson, du quark…n'est qu'une propriété indirecte et en un sens dérivée, secondaire. Elle est d'abord la trace de leur interaction avec un champ quantique, le champ dit de Higgs ou champ BEH, qui structure le vide de l'Univers. Dans "Reflets de la Physique" N°37 de décembre 2013 - janvier 2014, Jean Orloff, du LPC de Clermont-Ferrand, illustre ainsi l'origine de la masse:

(masse) = (couplage) x (champ de Brout-Englert-Higgs)

et cite l'exemple d'un autre champ générique démultiplié par un couplage de l'objet sensible à ce champ. Ainsi

(force électrostatique) = (charge électrique) x (champ électrique).

"Si la forme de l'équation (masse) = (couplage) x (champ BEH) est classique, le mécanisme de BEH est révolutionnaire à plus d'un titre.
Le mécanisme de BEH permet de faire rentrer les interactions à courte portée dans le cadre fondamental des interactions de jauge, véhiculées par des particules de spin 1, comme le photon dans l'interaction électro-magnétique. Pour leur description quantique et relativiste, ces interactions sont basées sur une symétrie, dite de jauge, qui exige la nullité de la masse des particules intermédiaires (le photon) et implique une interaction de portée infinie. Le mécanisme de BEH permet de concilier "portée finie" et donc "masse non nulle", avec "symétrie", en faisant appel au concept de "brisure spontanée de symétrie", caractéristique du ferromagnétisme (au-delà de la température du point de Curie, la substance ferromagnétique devient paramagnétique)… comparaison importée en physique des particules par ***Yoichro Nambu*** *en 1961."*

Jean Orloff attire notre attention sur une difficulté: le mécanisme BEH explique bien l'origine de la masse des particules; cependant, même en terme de couplage, une question demeure entière: pourquoi la masse du quark up (0,4 MeV) est-elle de cinq ordres de grandeur inférieure à celle du quark top (174 GeV) ?.

II-4 DE LA THEORIE A LA DECOUVERTE DU BOSON DE HIGGS

Le Boson de Higgs

Le 4 juillet 2012 au matin, le CERN accueillait des physiciens des particules du monde entier.
Les collaborations ATLAS et CMS ont annoncé qu'elles avaient observé des indices probants de l'existence d'un nouveau boson aux caractéristiques compatibles avec celles du boson de Higgs au voisinage de 126 GeV.

Nous résumons d'après le Courrier CERN de septembre 2012 les contributions proposées le 4 juillet précédent:

1) La recherche ATLAS du boson de Higgs: La stratégie "ATLAS" consiste à se focaliser sur les modes les plus sensibles de désintégration du boson de Higgs :

- a) Fig II-11 - le mode $H \rightarrow \gamma\gamma$
- b) Fig II-12 - le mode $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ (ℓ désignant les leptons)
- c) Fig II-13 - le mode $H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$ ou $\mu\nu e\nu$ + 0/1 jet

Clés de lectures des 3 graphiques :

- $\sqrt{s}$ désigne l'énergie dans le système du centre de masse (7 ou 8 TeV)
- $\int$Ldt représente la luminosité totale délivrée dans l'expérience: 1 $fb^{-1} = 10^{33} cm^{-2} s^{-1}$
- Bkg: bruit de fond (background)
- Sig + Bkg : signal + bruit de fond

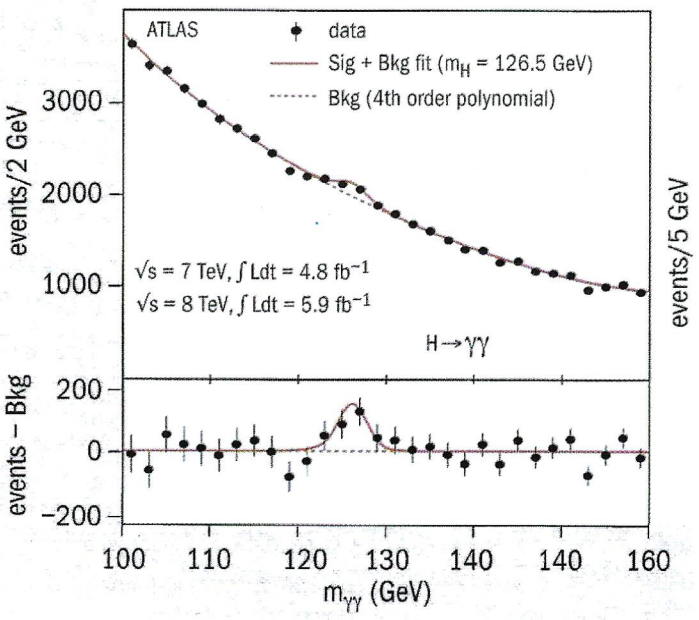


Fig-II-11

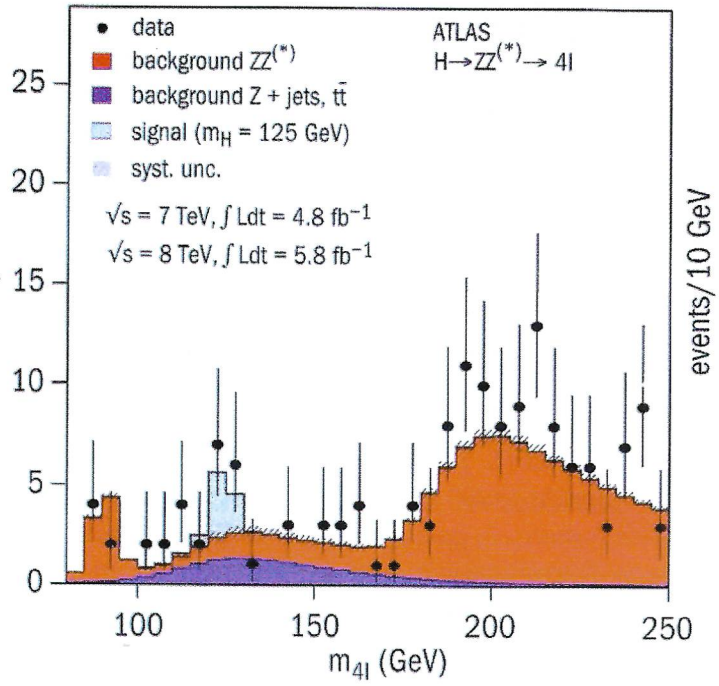


Fig-II-12

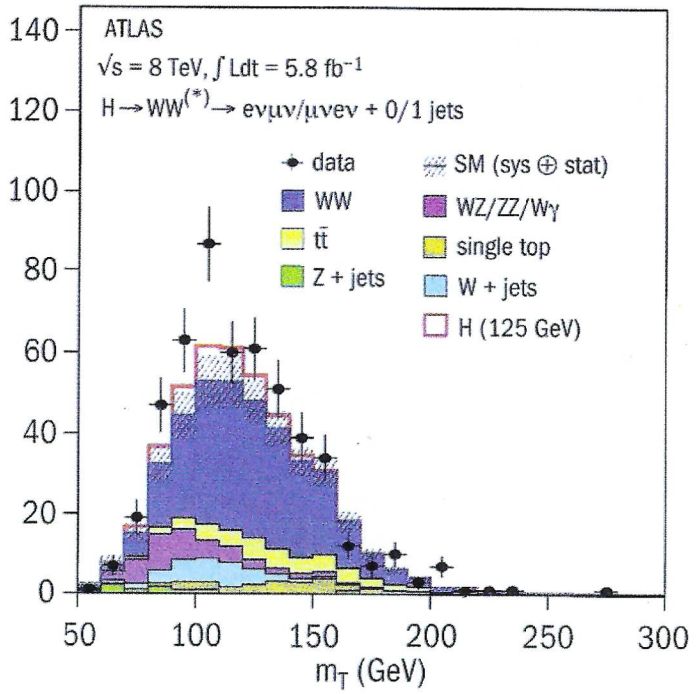


Fig-II-13

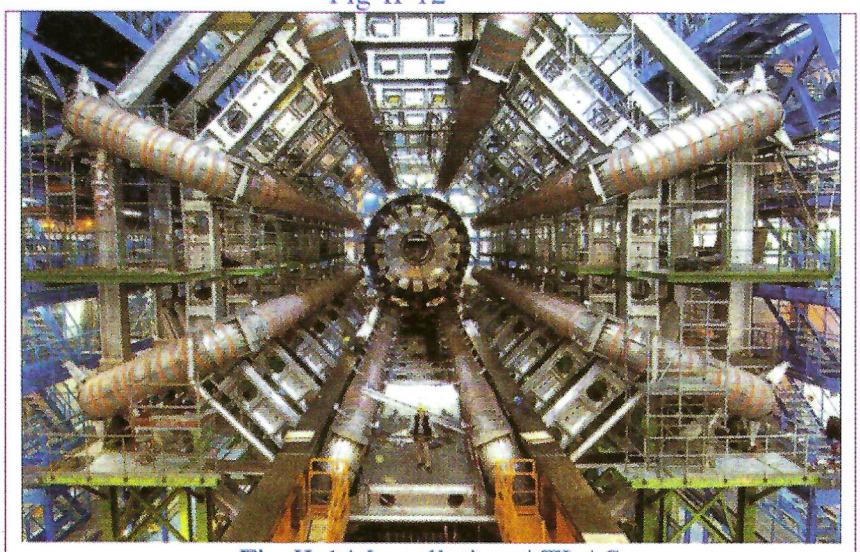


Fig-II-14 Installation ATLAS
(Photo Oerlikon - Courrier CERN sept 2012)

Commentaires :

* Pour le signal H → γγ la résolution dépend du point d'émission des photons γ (au centre ou en avant du détecteur) et de l'efficacité du processus $\gamma \rightarrow e^+e^-$. L'analyse du bruit de fond est très rigoureuse. La masse estimée pour H vaut 126,5 GeV; écart-type: 4,5 σ (σ: déviation standard).

* H → 4 ℓ (ℓ = lepton, soit $e^{\pm}$, soit $\mu^{\pm}$). Les points expérimentaux ont rassemblé les données 2011 et 2012. Pic de la masse : 125 GeV ; estimation à 3,4 σ (résultats joints à la publication quelques jours après le séminaire du 4 juillet).

On note la présence très significative du signal pour une masse à 125 GeV; 5,9 σ: probabilité d'un événement dû à une fluctuation qui donnerait un tel excès: 1 sur 600 millions de chances. Cet ensemble prouve la découverte d'une particule, un boson scalaire, de spin 0 (Réf. Phys. Lett.B arXiv; 1207.7214V1 [hep-ex])

2) La recherche CMS du boson de Higgs

L'article du CMS (Compact Muon Solenoïd) nous rappelle que la recherche du boson de Higgs dans le cadre du "Modèle standard", en raison de l'absence d'une pierre d'angle fondant le cadre courant de description des forces et des particules élémentaires, a pris quelque quarante ans; l'idée qui conduisit à l'annonce du 4 juillet 2012: plus de 20 ans!

Le succès de la recherche du boson de Higgs est un véritable tribut offert aux milliers de physiciens du CMS et d'ATLAS et à toutes les générations "d'étudiants" qui ont travaillé sous forme de propositions, d'articles scientifiques, touchant à ce projet "aux frontières", hors du commun.

Le même article rappelle que les limites relatives au boson de Higgs, "s'il existe", ont été établies à la fois par le "Large Electron-Positron Collider" (LEP) du CERN et le Tevatron du "Fermilab" soit le domaine de 114,4 - 127 GeV. Le 4 juillet 2012, la collaboration CMS a présenté les recherches en vue du boson de Higgs du Modèle Standard à partir de cinq modes distincts

γγ, ZZ → ℓ ℓ ℓ ℓ 1 2	WW → ℓ ν, ττ, et bb 3 4 5	ν désigne le neutrino accompagnant le lepton ℓ, τ lepton de la famille (e μ τ) et b le quark de "beauté".

La combinaison de ces 5 analyses révèle un excès d'événements au-dessus du bruit de fond attendu, avec une significativité de 5,0 σ pour la masse de 125,5 GeV.

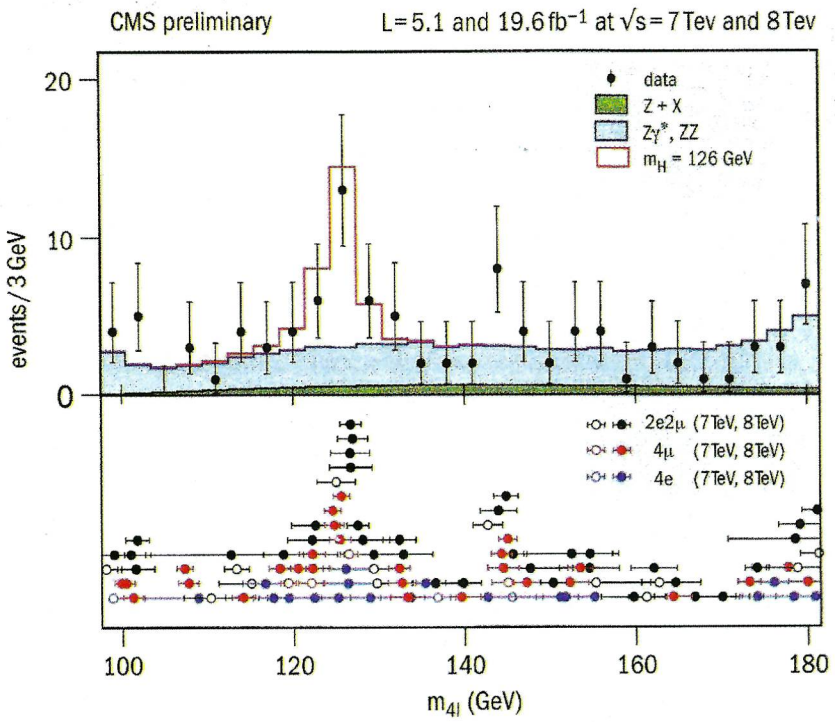


Fig-II-15 Distribution des évènements à 4 leptons au CMS
(Courrier CERN mai 2013)

Naissance d'un boson de Higgs : aux rencontres de Moriond (mars 2013):

- les performances du LHC: on a obtenu dans ce domaine, au cours du second semestre 2012 quatre fois plus de données à 8 TeV que le volume utilisé dans les analyses ayant conduit à la découverte;
- l'amélioration des mesures de masses qui ont bénéficié d'une meilleure résolution d'énergie et de quantité de mouvement;
- la mise en évidence (à 3σ) d'une production du boson de Brout-Englert-Higgs à partir d'une fusion de bosons vectoriels;
- la coïncidence des caractères du boson BEH avec les attentes du Modèle Standard en termes de spin (0), de parité P (façon dont son l'image-miroir se comporte), donc parité positive;
- ATLAS et CMS ont confirmé que $J^P = (0^+)$;
- les couplages relatifs des mécanismes de production et de désintégration;
- tout cela est consistant avec le niveau de précision attendu par rapport au Modèle Standard.

CMS et ATLAS ont bien trouvé "un boson de Higgs". Ultérieurement, des améliorations et de nouvelles performances de LHC (ou autres accélérateurs) seront nécessaires pour saisir les interactions du boson de Higgs à un niveau plus profond.
Mais dès maintenant, il est clair que ce boson - découvert par ATLAS et CMS - est un précieux fil conducteur avec lequel nous pouvons espérer éclaircir quelque peu certains mystères scientifiques restants de l'Univers: il est certain que ce boson scalaire - et son champ correspondant donc - jouent un rôle important non seulement dans "l'inflation cosmologique" qui marque les premiers instants de l'Univers, mais aussi dans l'accélération de son expansion récemment mise en évidence par les Supernovae 1A (et à de grandes distances, leur éclat plus faible que ne laissait supposer leur distance).

Sur le premier point, l'inflation, il ne faut pas oublier que des travaux de Brout, Englert et Higgs lui-même, ont été inspirés par les questions de "brisure spontanée de symétrie", dont celle de l'inflation. Tout ceci met en évidence l'importance de la physique des particules et de leurs interactions avec la cosmologie moderne. Rappelons enfin que l'absence définitive de la découverte du boson BEH au LHC aurait impliqué une correction radicale du Modèle Standard, avec d'immenses retombées.

"Les observations initiales des collaborations ATLAS et CMS (2012) étaient fondées sur la désintégration H en paires γγ - WW et ZZ*. Elles confirment les prévisions suivant lesquelles le mécanisme BEH est responsable des masses des bosons W et Z, tandis que le photon reste sans masse.*
Actuellement, à partir de l'analyse des résultats 2011 et 2012, les deux collaborations portent leur attention sur un nouveau test: que le champ BEH confère également leurs masses aux fermions, précisément les quarks $b\bar{b}$ et les leptons $\tau^+\tau^-$. Les résultats ATLAS et CMS confirment ainsi le couplage des bosons BEH avec les fermions" (Courrier CERN - janv-fév 2014 - "LHC Physics")

"La découverte d'un boson de Higgs est plus probablement le commencement d'une histoire que sa fin" (Lisa RANDALL, s'inspirant d'une phrase historique de Winston CHURCHILL).

III GRANDES UNIFICATIONS ET BRISURES DE SYMETRIES. L'INFLATION DE L'UNIVERS

III-1 LA THEORIE "GRAND-UNIFIEE"

La "théorie grand-unifiée" (GUT :Grand Unified Theorie) cherche à englober complètement, à "unifier" les interactions forte et électrofaible. Dans cette configuration - avant l'inflation - l'Univers ne possède que deux forces : la gravitation et une "superforce unifiée". Cette théorie "GUT" a été proposée dans les années 1970 par **Sheldon Glashow** et **Howard Georgi** ; elle prévoit que les trois interactions: forte, faible et électromagnétique sont unifiées au-dessus de 10^{14} GeV. En d'autres termes, si des particules entrent en collision à des énergies supérieures à 10^{14} GeV soit 10^{11} TeV, les interactions forte, électromagnétique, faible seraient indiscernables. Pendant très longtemps, GUT a été purement spéculative. Il n'y a aucun moyen direct de contrôler des expériences en laboratoire (10^{10} "LHC") dans ce domaine d'énergie inaccessible aux accélérateurs terrestres (sauf, bien sûr,.expériences spatiales audacieuses).

Deux séries des contributions théoriques ont attiré l'attention:

- La "théorie grand-unifiée" implique l'existence de bosons dont la masse varie d'une théorie à l'autre
- L'inflation.

III-2 UNE TRANSITION DE PHASE

Mais nous devons évoquer d'abord "la théorie super grand-unifiée" : beaucoup de physiciens suspectent qu'à des énergies supérieures à 10^{19} GeV, les quatre interactions fondamentales sont unifiées ; ce qui signifie que si des particules entrent en collision à des énergies colossales, il n'y aura aucune différence entre l'origine et le comportement des interactions gravitationnelle, électrofaible et forte de la collision. Nous pouvons dire aussi qu'au temps $t = 10^{-43}$ seconde, tandis que la température atteint 10^{32} kelvins - nous justifierons plus loin ces trois paramètres cosmiques : temps, énergie, température - au temps $t = 10^{-43}$ seconde donc, pour une énergie inférieure à 10^{19} GeV, il se produit une "transition de phase", une "brisure spontanée de symétrie", telle que la force de gravitation se trouve gelée, "figée", par rapport à la superforce unifiée des 3 interactions. A titre de comparaison, les lois physiques qui décrivent un liquide comme l'eau sont invariantes par rotation. Ainsi le liquide possède une symétrie de révolution. Cependant lorsque le liquide gèle et devient un cristal, les atomes vont se placer le long de certains axes. La symétrie de révolution est brisée dans cette transition de phase. La force super grand-unifiée gouverne, avant le temps de Planck, la soupe très chaude de particules qui remplit l'espace-temps dit "initial". Mais nous n'avons aucune théorie adéquate qui unifie aujourd'hui les quatre interactions. Le chapitre suivant "De quelques nombres cosmiques" fera apparaître d'autres obstacles plus essentiels.

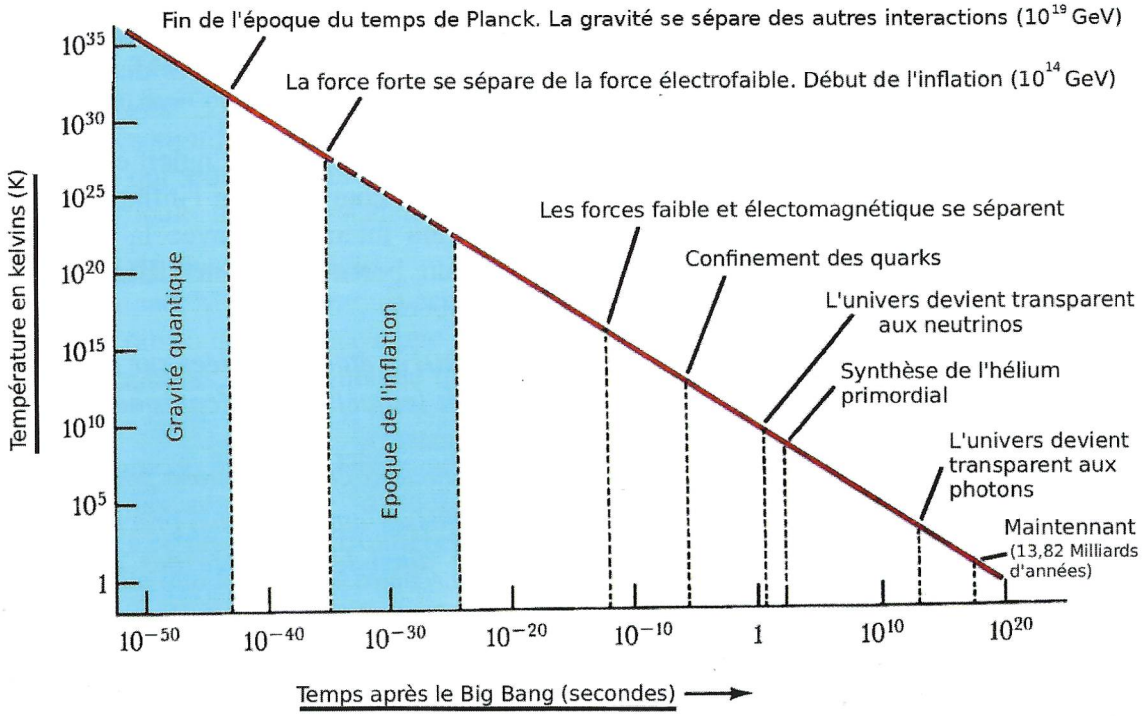


Fig-III-1 Réf "Universe" (loc.cit.) p 566

III-3 L'INFLATION DE L'UNIVERS

En 1979, Alan GUTH, 32 ans, physicien des particules au Centre de l'Accélérateur Linéaire de Stanford, "SLAC" en Californie, s'intéresse à la manière dont les forces peuvent être unifiées, précisément "la théorie grand-unifiée". Ses calculs le conduisent à l'idée de "l'inflation cosmique". Depuis lors, la théorie de l'inflation de GUTH a répondu à plus de questions au sujet de l'Univers, "de sa première seconde", que ce qu'il avait initialement imaginé.
On appelle "ère inflatoire" une ère d'énorme et soudaine expansion de l'Univers. A l'instant $t = 10^{-35}$ seconde après le Big Bang, la température de l'Univers, de 10^{32} K s'est abaissée à $T \approx 10^{27}$ K pour une énergie moyenne caractéristique de 10^{14} GeV. La température $T = 10^{28}$ K caractérise l'ère de "pré-inflation". Les 3 forces d'interaction: forte, électromagnétique, faible sont encore unifiées. Selon A. Guth et sa théorie perfectionnée par **Andréi Linde** de l'Institut P.N. Lebedev, à Moscou et **Paul Steinhardt** et **Andréas Albrecht**, de l'Université de Pennsylvanie, au-dessous de cette température, disons à 10^{27} kelvins, la brisure spontanée et soudaine de symétrie qui sépare l'interaction forte de l'interaction électrofaible entraîne, en 10^{-32} seconde, une croissance exponentielle, une "inflation" rapide de l'Univers: la taille de celui-ci aurait augmenté d'un facteur supérieur à 28 ordres de grandeur. A partir de l'instant $t = 10^{-11}$ seconde, la température de l'Univers, descendue à 10^{15} K pour une énergie moyenne de 100 GeV va provoquer la brisure finale de symétrie. Les particules et antiparticules existantes se sont annihilées et écartées dans un Univers immense qui ressemble à un vide parfait.
Des compléments et des questions sur l'inflation de l'univers sont proposées au chapitre VI.

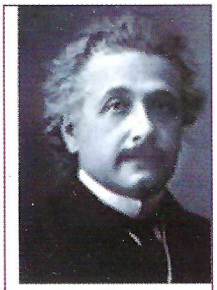
IV LES NOMBRES COSMIQUES. CERTITUDES ET INCERTITUDES

IV-1 INTRODUCTION

Comme physicien, notre domaine de recherche relève essentiellement de l' "infiniment petit" et, par corrélation de l' "infiniment grand": le cosmos, source de rayons cosmiques - ceux que nous avons étudiés à 500 mètres sous terre, dans les mines de fer de May-sur-Orne - source également de toutes les radiations lumineuses, ou autres (neutrinos, ondes gravitationnelles en cours d'exploration).


Fig-IV-1
Max Planck

Pour Max Planck (1858 - 1947), toute recherche expérimentale et théorique est, d'abord, "une question posée à la Nature". La mensuration, la mesure, est le relevé de sa réponse. "Une théorie physique décrit le résultat des expériences et pas la nature des choses" (Niels Bohr (1885 - 1962). Max Planck est l'un des grands génies de la science qui s'est le plus intéressé aux liens entre les "Deux Infinis" de Blaise Pascal.
La conscience déchirée, il lança, le 14 décembre 1900, dans une communication à la Société allemande de physique "l'hypothèse quantique" comme un défi tragique pour résoudre une grave difficulté de la thermodynamique classique.
Toute sa vie, il chercha un moyen mathématique d'éliminer cette hypothèse qu'il considérait comme un pur artifice.
Selon cette "hypothèse bouleversante", les échanges d'énergie entre radiation et matière - par émission ou absorption - ne peuvent se faire que "par quanta d'énergie" de grandeur $h\nu$: h étant la "constante de Planck": $h = 6{,}6260755\ (\pm 40)\ .10^{-34}$ joule.seconde et ν la fréquence de l'onde associée.
En réalité, la date du 14 décembre 1900 marque les débuts de la "Physique quantique".


Fig-IV-2
Albert
Einstein

Albert Einstein (1879 -1955), à partir de la découverte de l'effet photo-électrique, applique la notion de quantum d'énergie à la lumière. Il introduit le concept de "photon", ou "grain de lumière" porteur de l'énergie quantique $E = h\nu = hc/\lambda$; c désignant la célérité de la lumière dans le vide, λ la "longueur d'onde", $\lambda = c/\nu$.
Introduite en "thermodynamique statistique moderne (quantique)", la théorie des quanta permet d'évaluer la température moyenne de la surface solaire (5800 kelvins) et celle des étoiles. La relativité générale d'Einstein, élaborée entre 1913 et 1916, conduit à traiter ensemble l'espace et le temps à la manière d'un "continuum".
En raison des effets quantiques, cependant, l'image continue de l'espace et du temps va s'effondrer aux très petites distances et aux intervalles de temps très courts: quatre constantes fondamentales vont introduire "les structures de la cosmologie et les limites de la connaissance".

IV-2 AUTRES POINTS DE DEPART

Quatre constantes fondamentales - reconnues comme telles en physique classique et quantique - vont engendrer autant de nombres cosmiques

a) La constante de gravitation G, introduite par **Isaac Newton** (1642 - 1727), est telle que la force F d'interaction attractive entre deux masses M et m distantes de r s'exprime par $F = GMm/r^2$

$G = 6{,}67259(85).10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$ Le chiffre entre parenthèses désigne l'incertitude sur les 2 derniers chiffres;

b) c est la célérité de la lumière dans le vide $c = 299.792.458\ m.s^{-1}$;

c) La constante de Planck h est souvent remplacée par $\hbar = h/2\pi = 1{,}054571726(47)10^{-34}$ J.s;

d) k, constante de Bolzmann (1844 - 1906) est telle que l'énergie cinétique d'une molécule ponctuelle prend la valeur la plus probable E =kT où T désigne la température absolue exprimée en kelvins, tandis que son énergie moyenne vaut 1/2 kT **par degré de liberté**: $k = 1{,}3806488(13).10^{-23}\ J.K^{-1}$. Certains nombres sont, en un sens, plus efficaces que les mots pour nous transmettre l'immensité de l'Univers et la petitesse de ses composants "L'Univers est écrit en langage mathématique" (Galilée).

IV-3 LES NOMBRES COSMIQUES

1 - Longueur de PLANCK: Nous pouvons vérifier que l'expression $L_P = \sqrt{\hbar G/c^3}$ est une longueur au prix d'une analyse dimensionnelle simple (voir encadré).

2 - Temps de Planck: Cette dimension cosmologique est parcourue par la lumière en un temps $\tau_P = L_P/c$ soit $\tau_P = 5{,}391.10^{-44}$ seconde. On ramène souvent ce temps à $\tau_P = 10^{-43}$ seconde; ce temps de Planck est la "**limite** d'exploration physique" du scénario cosmologique concentré dans une "hypersphère" de "rayon L_P".

Démonstration

$[\hbar] = J.S = ML^2T^{-2}.T = ML^2T^{-1}$

$[G] = [F]L^2M^{-2} = MLT^{-2}L^2M^{-2} = M^{-1}L^3T^{-2}$

D'où $[\hbar G] = L^5T^{-3}$

$[\hbar G/c^3] = L^5T^{-3}/L^3T^{-3} = L^2$

On a bien $\sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = [L]$; **$L_P = 1{,}6.10^{-35}$ m**

En deça du temps de Planck, la physique devient inopérante, ne pouvant distinguer le passé, du présent, de l'avenir. Les physiciens reconnaissent que l'incertitude quantique, découverte par Werner Heisenberg, constitue dans la nature "une source fondamentale de connaissance inaccessible" dans la limite actuelle relative à la gravitation quantique.

La théorie quantique pure décrit les lois de la physique aux échelles atomique et subatomique, en ignorant complètement les lois de la gravitation. La théorie de la relativité générale décrit comment se comporte l'espace-temps à grande échelle, produisant ce que nous appelons la gravitation. Pendant longtemps les deux théories ont résisté à toute tentative d'unification. Dans l'état actuel des arguments finalisés, le meilleur agrément "théorie - expérience" est obtenu pour un espace à 11 dimensions. Le choix des onze dimensions est confirmé par la théorie "super-grande unifiée" appelée "super-gravité". Plus récemment, Edouard Witten, de Princeton, mathématicien "Médaille Fields 1990", a montré qu'au moins sept "dimensions cachées" doivent être ajoutées à l'espace-temps ordinaire pour pouvoir prendre en compte les quatre interactions fondamentales. Même si les "onze dimensions" sont le plus souvent privilégiées, certains théoriciens argumentent en faveur de "vingt-six dimensions". Une prédiction importante de la super-gravité est que chaque type de particule ordinaire doit avoir un "partenaire supersymétrique". En terme de gravitation quantique, en lien avec la relativité générale, il faudrait souligner l'œuvre magistrale et définitive (aux dires de Madame Yvonne Choquet-Bruhat) de **Bryce Dewitt**. Les deux tomes de cette œuvre ont pu être publiés juste avant son décès en 2011, aux Etats-Unis. Une analyse spécifique dans "Auvergne-Sciences" consacrée à Bryce Dewitt serait précieuse, s'agissant, d'après Y. Choquet-Bruhat (de l'Académie des Sciences), de l'authentique successeur d'Einstein.

Si, par la pensée, nous remontons l'échelle des temps, nous devons nous arrêter pour le modèle à 4 dimensions lorsque nous atteignons l'instant de Planck $\tau_P = 10^{-43}$ seconde. D'une part, nous n'avons aujourd'hui aucune théorie adéquate qui unifie complètement les quatre interactions avant $t = 10^{-43}$ seconde. Ainsi, nous n'avons aucun moyen de savoir ce qui se passe, c'est-à-dire comment l'Univers se comporte dans la période plus jeune que le temps de Planck, ou, ce qui revient au même, lorsque la dimension de l'Univers est inférieure à la longueur de Planck $L_P = 1{,}6.10^{-35}$ mètre.

En définitive, le temps, en relativité, n'est pas une grandeur physique absolue: nous ne pouvons donc pas affirmer qu'il existe un temps que nous pouvons connaître avant $t = 10^{-43}$ seconde. C'est cela qui se présente comme une **certitude**.

<<Nous sommes installés sur un perchoir fragile, quelque part entre "les deux infinis de Blaise Pascal" - auxquels est venu se joindre avec Pierre Teilhard de Chardin et Von Neuman l'infini de la complexité -; nous sommes là, utilisant la puissance des télescopes pour voir très loin, et la haute technologie des microscopes et des accélérateurs de particules pour scruter l'Univers des petites dimensions.>>

Cependant, pour rendre significatifs pour tous, les nombres cosmiques souvent énormes, nous avons besoin de deux mots : "Imagination et Humilité" (d'après James D.Stein "Les nombres qui définissent notre Univers" cité par "Courrier CERN décembre 2011).

3 - Energie de Planck: En 1927, justement, le physicien allemand Werner Heisenberg (1901 - 1976), l'un des fondateurs de la mécanique quantique, dans le prolongement des travaux de Louis de Broglie et Erwin Schrödinger, établit "un principe d'incertitude". Suivant ce principe, contrairement à ce qui est admis en physique classique, l'énergie, la quantité de mouvement, les localisations spatiale et temporelle d'une particule ne peuvent, en mécanique quantique, se voir attribuer ensemble une valeur déterminée, mais présentent un certain "flou". Par exemple, les quantités Δp_x, Δx, ΔE, Δt, peuvent être considérées comme des "extensions" intrinsèques des grandeurs p_x, E, … ou encore comme des limitations fondamentales.

Mathématiquement, les relations d'incertitude s'expriment ainsi :

$\Delta p_x . \Delta x \geq \hbar$ $\quad$ $\Delta E . \Delta t \geq \hbar$

Cette dernière inégalité permet d'associer au temps de Planck τ_p, pris comme extension de la fluctuation Δt, l'énergie E_P, elle-même extension de la fluctuation ΔE, définie par $E_p = \hbar / \tau_p \cong 10^{-34}/10^{-43} = 10^9$ joules. Rappelons que 1 électron-volt $\equiv$1eV=1,6.10^{-19} joule. 10^9 joules correspondent à environ 10^{19} GeV = 10^{16} TeV.

Les "rayons cosmiques" les plus puissants détectés sur satellite atteignent 10^{11}TeV (1 tera électron-volt =10^{12}eV) tandis que l'énergie obtenue à l'accélérateur LHC (Large Hadron Collider) est actuellement de 8 TeV.

4 - Enfin la température cosmique "au temps de Planck": se déduit de la relation thermodynamique de Boltzmann, qui prévoit un terme énergétique 1/2 kT par degré de liberté. Pour un espace cosmique à trois dimensions, nous aurions ainsi une énergie moyenne de 3/2 kT. On se réfère le plus souvent au maximum de la distribution (valeur plus probable) soit E = kT.

En 1926, le physicien suédois Oskar Klein a repris les travaux de Franz Kaluza pour les rendre compatibles avec la mécanique quantique: les particules sont identifiées à des vibrations spécifiques d'un "espace en boucle" compact à cinq dimensions.

Quoi qu'il en soit de ces prévisions ou conjectures, pour le problème qui nous concerne dans ce paragraphe: à savoir le lien "Energie - Température", aux fins de contribuer à une évaluation des paramètres cosmologiques, nous utiliserons la relation simplifiée E = kT.



Fig-IV-3
Ludwig
Boltzmann

Elle définira la température de la "bulle cosmique" à un ordre de grandeur près" (sauf non-linéarité"), soit T = E/k pour k = 1,380.10^{-23} JK^{-1} et E = 10^9 J $\rightarrow$ T $\cong$ 10^{32} kelvins: température extrême de la "bulle cosmique".

5 - Conclusion relative à ces nombres cosmiques: ainsi, la constante de Planck, grandeur physique spécifique de la théorie quantique, associée à la constante de gravitation et à la vitesse de la lumière (données classiques), associée également au **principe d'incertitude de Heisenberg**, et à l'intuition maîtresse de Boltzmann, pionnier de la mécanique statistique classique, nous fournit des **"paramètres naturels" de la cosmologie**.

L'échelle de PLANCK (-10^{-35} mètre) peut-elle être atteinte? Plusieurs ordres de grandeur la séparent des échelles qui peuvent être obtenues aujourd'hui par les accélérateurs les plus puissants. Calculons en effet la longueur d'onde λ associée à un proton de 8 TeV. Cette longueur d'onde est définie par $\lambda = h/p$. Or p se déduit de la relation d'Einstein: $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ (c = célérité de la lumière). A très haute énergie $E^2 \cong p^2c^2$ soit $E \cong pc$. D'où $\lambda = hc/E$. Soit $\lambda_{8TeV} = 10^{-19}$ m = 10^{16} fois la longueur de PLANCK.

Cependant, il y a peut-être un espoir ! En effet, **Vahan Gharibyan** de DESY, Hambourg, dans un article de Physical Review Letters de 2012 (109 141103) s'est inspiré de la diffusion "Compton laser" de leptons issus d'accélérateurs courants ou futurs, grâce aux relations de dispersion prévues par plusieurs modèles de gravité

quantique. Il en résulte que la **variation effective d'indice de réfraction de l'espace** pourrait être détectable. Pour des électrons de 6 GeV à "Petra III", l'échelle de 10^{-31} mètre pourrait être atteinte, tandis qu'au futur collisionneur de leptons, à 250 GeV, l'échelle de PLANCK pourrait être visée. Cette échelle de Planck visée pourrait être considérablement abaissée si notre Univers a 7 dimensions d'espace supplémentaires, soit un total de 11 dimensions: dix d'espace et une de temps.
Plus généralement, des modèles munis de plus larges extensions spatiales pourraient apporter une solution au "problème de la hiérarchie de masses" relatif à la grande différence entre l'échelle 10^2 GeV et l'échelle de Planck 10^{19} GeV. En postulant la présence de n extra-dimensions, l'échelle de Planck à 4+n dimensions deviendrait naturellement proche de l'échelle électrofaible. Dans ces modèles, les gravitons, médiateurs de l'interaction gravitationnelle, sont produits en association avec un jet de hadrons: les gravitons d'interaction extrêmement faible échapperaient à l'observation, conduisant à la signature d'un monojet dans l'état final. Des particules de matière noire donneraient la même signature [réf. Collaboration ATLAS, ATLAS - conf - 2012 - 147 et Courrier CERN janvier-février 2013 p6]… perspectives qui transformeraient notre vision scientifique du Cosmos....et **INTERROGATION SUR LE MYSTERE DE L'ORIGINE DE L'UNIVERS !**

De toute façon : "*avis de brouillard sur l'aurore du Monde*" (Etienne Klein).

V LE RAYONNEMENT COSMOLOGIQUE (OU FOSSILE) MICRO-ONDE ET LE MODELE STANDARD DE L'UNIVERS

V-1 INTRODUCTION

Le rayonnement fossile micro-onde ("The cosmic microware background" dit "CMB") est une des ressources essentielles des cosmologistes dans leur investigation sur l'évolution de l'Univers depuis les "premiers instants" accessibles scientifiquement.

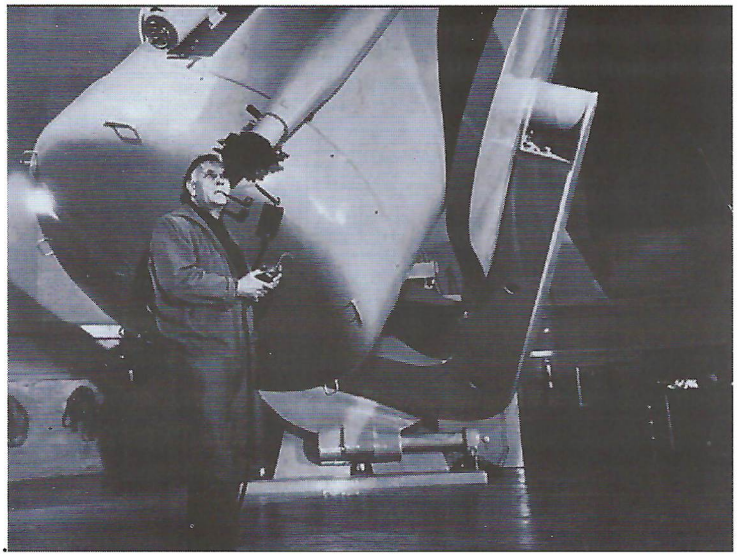


Fig-V-1 Edwin Hubble

a. Le premier fait cosmologique fut établi par **Edwin Hubble** et ses continuateurs, avec la double formulation sur des bases expérimentales et théoriques:
- effet Doppler et décalage vers le rouge des galaxies pour la **vitesse v de récession;**
- découverte des céphéides et détermination de la Loi de Heavitt sur leur lien "période de variation et intensité lumineuse absolue, ou magnitude absolue", d'où **connaissance de leur distance d**;
formulation donc d'une relation de proportionnalité entre la distance d de toute galaxie et sa vitesse radiale de fuite ou récession v suivant la formule $v = H_o d$ (H_o constante de Hubble).
Cette loi traduit directement l'expansion de l'Univers à des vitesses d'autant plus grandes que leur distance est éloignée (par rapport à la bulle cosmique).

b. Le deuxième fait cosmologique pressenti en 1960 par **A. Gdorochkevitch** et **Igor Novikov**, résulte de la découverte accidentelle due à deux jeunes chercheurs : **Arno Penzias** et **Robert Wilson.** A l'aide d'une antenne de plusieurs mètres de hauteur, propriété des Laboratoires BELL - qui servait précédemment comme récepteur de télécommunication pour la série de satellites "Echo" - avec cette antenne à très faible bruit, Penzias et Wilson s'attendent à détecter des signaux importants autour de la longueur d'onde $\lambda = 21$ cm correspondant au renversement du spin électronique de l'atome d'hydrogène sous l'action du moment magnétique de son noyau (transition hyperfine).

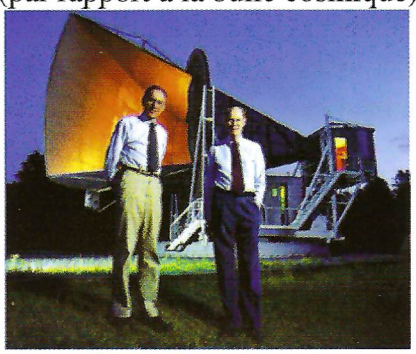


Fig-V-2 Arno Penzias et Robert Wilson devant l'antenne qui a permis la découverte du rayonnement cosmolgique fossile



Fig-V-3 George Gamow

L'Univers est transparent à cette longueur d'onde.Orientant leur antenne dans toutes les directions, ils découvrent un signal de bruit de fond isotrope (ce signal correspond à 1 % du brouillard qui apparaît sur un écran de télévision si nous nous déplaçons vers un canal inutilisé).

Après de multiples vérifications et refroidissement de la source à l'hélium liquide, Penzias et Wilson choisissent d'opérer à la longueur d'onde λ = 7,35 cm, longueur d'onde à laquelle le rayonnement galactique est censé être négligeable. Le fond radio à 7,35 cm est identique en intensité dans toutes les directions. Au début de 1965 : démontage, nettoyage, remontage, contrôles : le bruit de fond continue à se révéler constant dans le temps, à toutes directions, sans variations journalières ni saisonnières. Penzias et Wilson apprennent qu'en 1948 **Ralph Alpher** et **Robert Hermann**, s'appuyant sur une idée de **George Gamow** avaient émis l'idée que l'Univers initial de Hubble, en expansion, devrait être baigné dans "son rayonnement de corps noir" de quelques kelvins. Hypothèse confirmée par l'abbé **Georges Lemaître**, qui avait posé les fondements d'un Univers évolutif. Les températures du rayonnement du corps noir, nom scientifique du fond de rayonnement diffus, est évalué de 10 à 5 kelvins. Penzias et Wilson s'adressent au groupe de cosmologistes de Princeton pour étude théorique.

La température qu'ils observent T = 3,5 kelvins et "la propriété de corps noir = récepteur et émetteur intégral" demandent à être précisées. La théorie quantique de Planck prévoit, pour un corps noir, une énergie moyenne <E> =hν / exp(hν/kT -1), la longueur d'onde du maximum de la distribution étant donnée par la relation de WIEN : $\lambda T = b$ où $b = 2{,}89789.10^{-3}$ mètre par kelvin $\cong 2{,}90.10^{-3}$ mK^{-1}.

Les plus récentes données, obtenues grâce au satellite COBE (COsmic Background Explorer) montrent que le "rayonnement cosmologique" suit de très près le spectre de Planck, avec la température caractéristique T = 2,735 ± 0,01 kelvins, pour une longueur d'onde correspondant au maximum: λ_m=1,063 mm.

c. Les étapes d'une cosmologie de précision. Après sa découverte par Penzias et Wilson, "nobelisés à juste titre", le rayonnement fossile cosmique micro-onde a été "vu" et étudié par trois générations successives de satellites: COBE (pendant 4 ans), Wilkinson Microwave Anisotropy Probe : WMAP (pendant 7 ans) et "Planck" (2009-2014) mais il faut préciser d'abord l'état des lieux (d'après Simon Prunet et François Bouchet in "Pour la science" Juin 2003 p.44-49). Après la phase extrêmement chaude (10^{32} kelvins) et ses premiers développements jusqu'au début de l'inflation (10^{27} kelvins) puis la double séparation des interactions forte et électrofaible, l'Univers désormais régulier - globalement - et plat, se dilate paisiblement et voit se former successivement : "la soupe des particules", "la création de la matière", puis les premiers éléments (hydrogène, hélium): c'est la fin des trois premières minutes. L'Univers, à cette époque, devait comprendre un "plasma", milieu "gazeux" globalement neutre, où les électrons sont arrachés aux atomes: c'est l'ionisation.

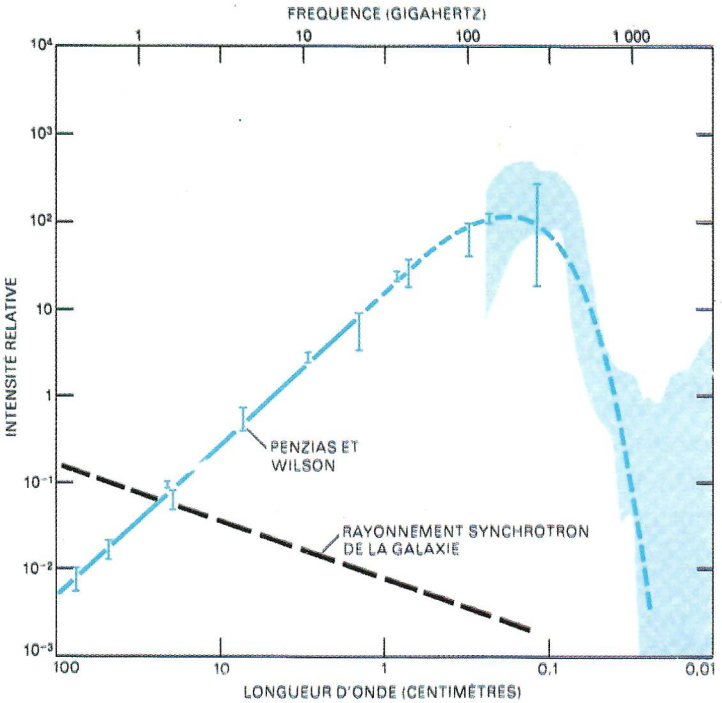


Fig-V-4 "L'Univers : des faits aux théories"
(Richard A. Muller - Pour la Science p 42)

Ce plasma est en équilibre thermodynamique - tandis qu'aujourd'hui, dans le Cosmos, à cause des grandes distances astronomiques et de l'extrême rareté de la matière intersidérale : des étoiles chaudes - plus ou moins - des nuages de plasma brûlants, des nébuleuses glaciales, cohabitent sans que leurs températures ne s'équilibrent globalement. Un tel plasma en équilibre devrait rayonner suivant la loi du corps noir. Son spectre, celui de Planck, ne dépend que de la température.

Pour Gamow, en se diluant sous l'influence de l'expansion de l'Univers, le plasma se refroidit au-dessous de sa température d'ionisation. Dans la situation "plasma", photons et électrons interagissent constamment. Ces collisions ne permettent pas aux photons de se propager au-delà d'une fraction de millimètre: l'Univers est

"opaque". Quand le plasma se refroidit, il devient un gaz neutre qui "libère" les photons, lesquels constituent le rayonnement de corps noir caractéristique de la température dite de recombinaison "électrons-atomes".

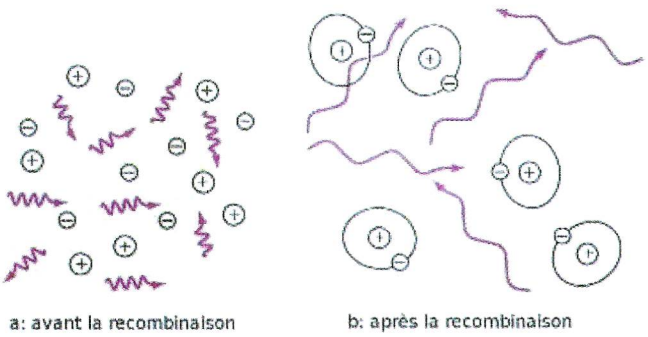


Fig-V-5 (Universe loc. cit. p.535)

Cette température de recombinaison, voisine de 3000 kelvins, correspond donc à celle d'un Univers "transparent": nous devrions alors le recevoir dans toutes les directions du ciel; mais l'expansion cosmique, suite à l'effet Doppler, décale ce rayonnement vers les grandes longueurs d'ondes sans - propriété cruciale - perturber la forme du spectre du corps noir. C'est ainsi que Gamow était parvenu à un corps noir refroidi à 5 kelvins... température et corps noir que Penzias et Wilson, sans le vouloir, avaient ramené à celle du rayonnement fossile micro-onde, que leurs successeurs ont fixé à ≅ 2,7 kelvins.

V-2 PREMIERES EXPLORATIONS SPATIALES : LE SATELLITE COBE (d'après Alain Riazuelo in "Pour la science" Avril 2009 P.34-39.)

Dès 1990-1992, le satellite COBE confirma l'hypothèse de base: le fond diffus cosmologique micro-onde est bien "l'écho lumineux" du Big Bang et précisément de sa phase inflatoire. La température de cet écho est proche de 2,7 kelvins.

En 1992, COBE révèle l'existence d'infimes variations de température, d'amplitude environ 1 pour 100 000, soit des écarts de quelques dizaines de microkelvins sur la carte.
Ces fluctuations sont la trace de minuscules variations de densité dans le plasma primordial.
Leur origine ? D'immenses ondes acoustiques ont parcouru l'Univers et se sont lentement déstabilisées par la gravité.

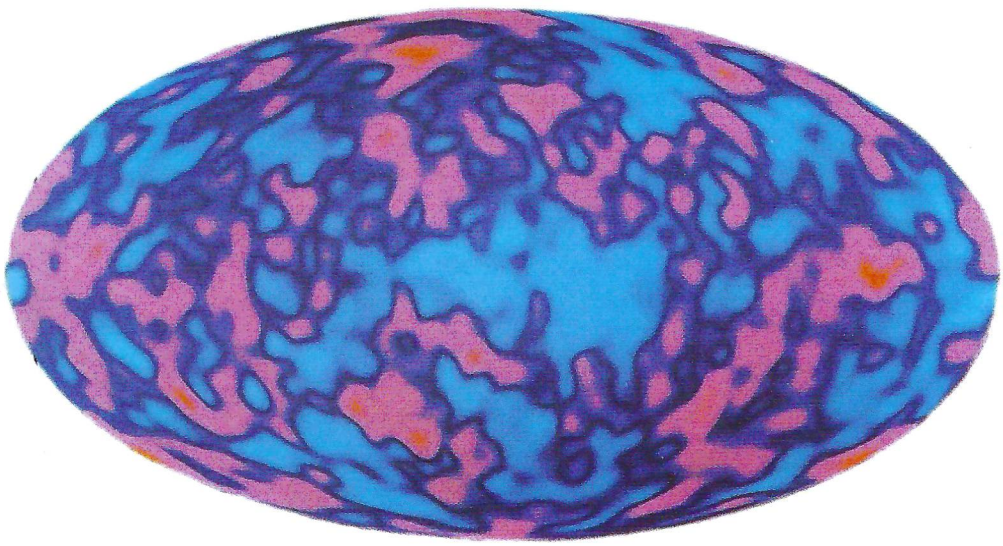


Fig-V-6 Carte de Cobe. Première image de l'écho du Big Bang

Les zones en sur-densité se contractent sur elles-mêmes par gravitation. Elles donneront naissance aux grandes structures du Cosmos: nébuleuses, galaxies. D'où l'intérêt du fond cosmologique : les ondes acoustiques imprimées dans ce fond permettant de déterminer la structure de l'Univers dès les trois cent quatre-vingt mille premières années - tout comme les ondes à la surface du soleil conduisent à la détermination de la structure des couches qui la composent. Sur la carte relevée par Cobe (Fig-V-6), on peut détecter les "grumeaux" qui, plus tard, donneraient naissance aux galaxies et autres grandes structures de l'Univers. L'amplitude et la taille des oscillations de plasma telles qu'elles sont transcrites sur la carte du fond cosmologique, dépendent d'une part de l'allure des vagues "imprimées" par le Big Bang via le paradigme inflatoire, d'autre part des propriétés du gaz ionisé qui remplissait l'Univers si près du Big Bang (380 000 ans). Les deux responsables scientifiques de la mission COBE reçurent le Prix Nobel de Physique 2006: **John Mather** et **George Smoot**.

V-3 LES RESULTATS ESSENTIELS DU "WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY WAVE"

Pourtant, la comparaison des deux images vues respectivement par COBE et WMAP (2003) illustre la faible résolution de COBE. WMAP est à la fois plus sensible et plus précis, lancé d'autre part au niveau du point de Lagrange L_2, zone d'une stabilité dynamique particulière, à un million cinq cent mille kilomètres (extremum d'énergie potentielle).

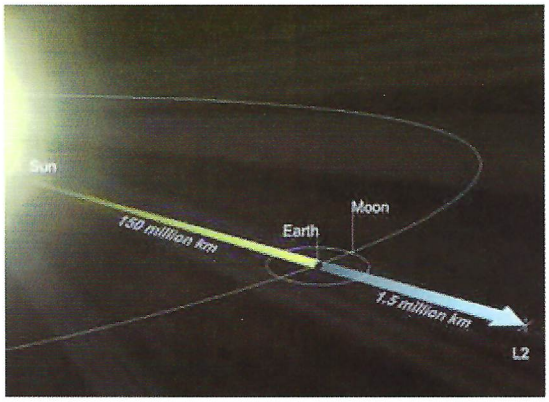


Fig-V-9

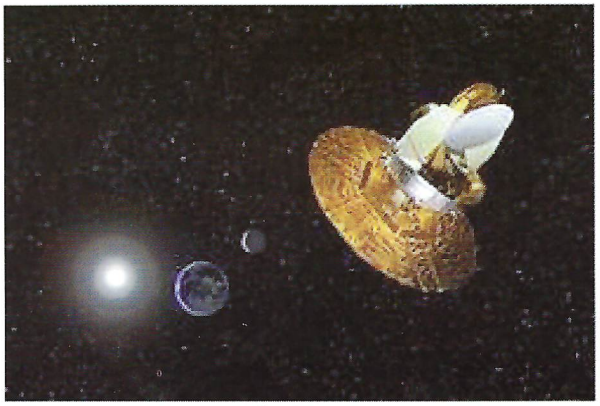


Fig-V-10

On voit que de ce point, la terre, la lune et le soleil seront toujours situés dans des directions très proches et dans le "dos" du satellite WMAP. L'analyse de trois années d'observations du "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe" et de ses implications pour la cosmologie a été publiée par la revue "The Astrophysical Journal", supplément série n° 170 de Juin 2007 (32 pages). C'est bien avec WMAP que s'est développé ce qu'on appelle "le modèle standard de la cosmologie", par référence au modèle combien plus précis de la "physique des particules". Nous nous efforçons d'extraire de l'Astrophysical Journal un exposé simplifié des données les plus caractéristiques.

a) Retenons d'abord le principe de l'exploration du bruit de fond micro-onde par la collaboration WMAP (22 co-auteurs représentés par D.N. Spergel. 15 Universités ou Institutions sont représentées).

La loi du spectre de puissance ΛCDM (CDM pour Cosmic Dark Matter, Matière Noire Cosmique, tandis que Λ rappelle la densité d'énergie sombre) permet d'extraire non seulement les premiers paramètres cosmologiques de WMAP, mais aussi de nombreux résultats astronomiques tels que: lentilles gravitationnelles, amas stellaire, supernovae...

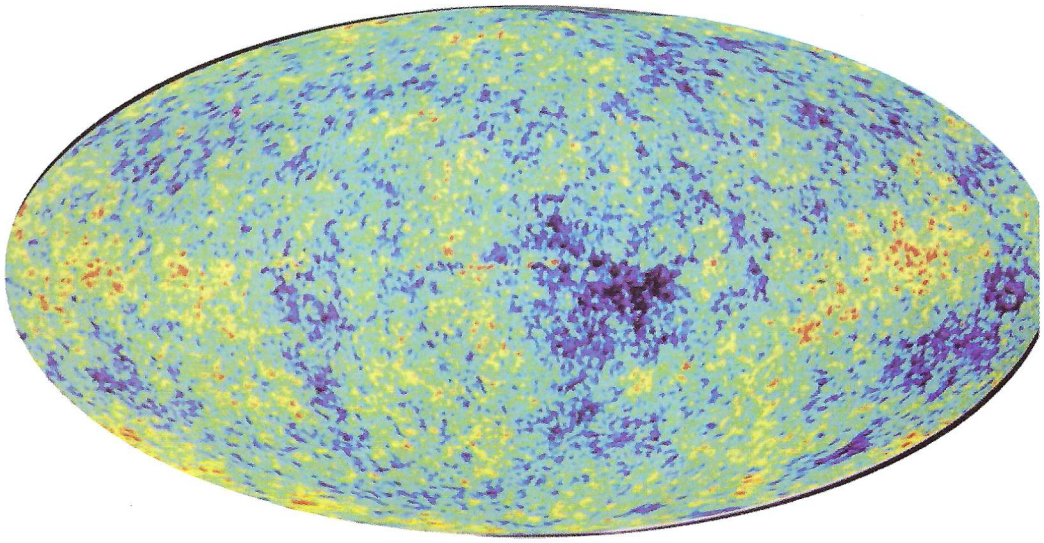


Fig-V-11 Carte de Willkinson - ESA - Collaboration WMAP

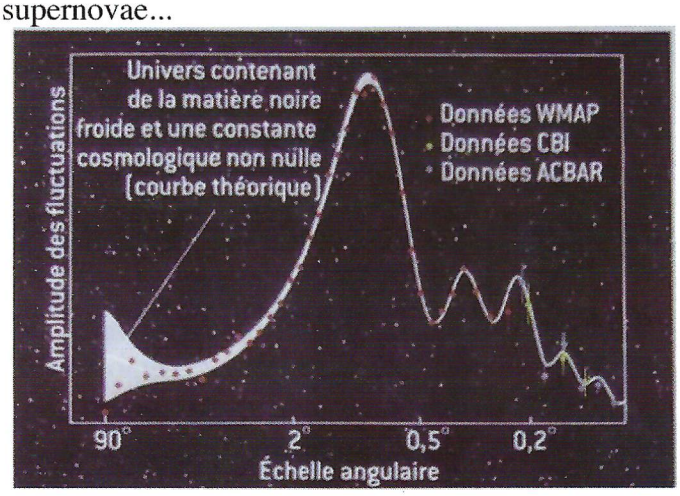


Fig-V-12a

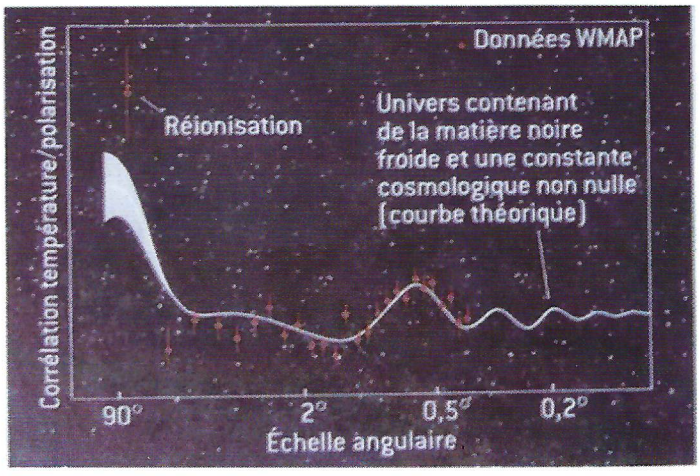


Fig-V-12b

WMAP dossier "Pour la Science" juin 2003 p.47

Les paramètres cosmologiques sont déduits de l'analyse de Fourier, analyse harmonique des fréquences angulaires l. Dans ce modèle l'Univers est spatialement euclidien, plat (sans courbure intrinsèque), homogène et isotrope sur de larges échelles. Il est composé de matière ordinaire, de radiation, de matière noire et possède une constante cosmologique (le paradigme "inflation" explique l'homogénéité , l'isotropie, l'absence de courbure en introduisant lors d'une époque proche du Big-Bang, la première époque d'expansion accélérée). Les fluctuations primordiales dans ce modèle sont adiabatiques, presque invariantes d'échelle par rapport aux fluctuations aléatoires gaussiennes.

Six paramètres cosmologiques : densité de matière, densité d'atomes, vitesse d'expansion de l'Univers, amplitude des fluctuations primordiales, leur dépendance d'échelle et la profondeur optique de l'Univers suffisent à prédire les propriété statistiques du ciel micro-onde mesuré par WMAP en plusieurs centaines de milliers de points du ciel.

b) Les paramètres cosmologiques utilisés dans l'analyse

Nous relevons particulièrement, parmi les 20 paramètres pris en compte :

- Le facteur d'expansion de Hubble $H_0 = 100\ h$ Mpc-1 km.s-1

(Mpc-1 = par million de parsec où 1 parsec = 3,06 années-lumière.

- La densité de matière ordinaire, ou densité baryonique $\omega_b = \Omega_b h^2$
- La densité de matière noire froide $\omega_c = \Omega_c h^2$
- La masse totale des familles de neutrinos Σm_ν
- La courbure spatiale Ω_k
- La densité d'énergie sombre Ω_{DE}
- L'amplitude des fluctuations de matière en théorie linéaire S-Z $8h^{-1}$Mpc (σ_8: amplitude de matière en théorie linéaire = fluctuations / $8h^{-1}$Mpc)
- La "marginalisation" du bruit de fond parasite constitué par l'effet Sunyaev - Zel'dovich, dans lequel des photons du rayonnement fossile accroissent leur énergie via l'effet Compton inverse, c'est-à-dire par diffusion sur les "électrons chauds" de l'amas galactique, suite à un processus de réionisation.
- Enfin "la profondeur optique I de réionisation".

c) Les résultats de WMAP

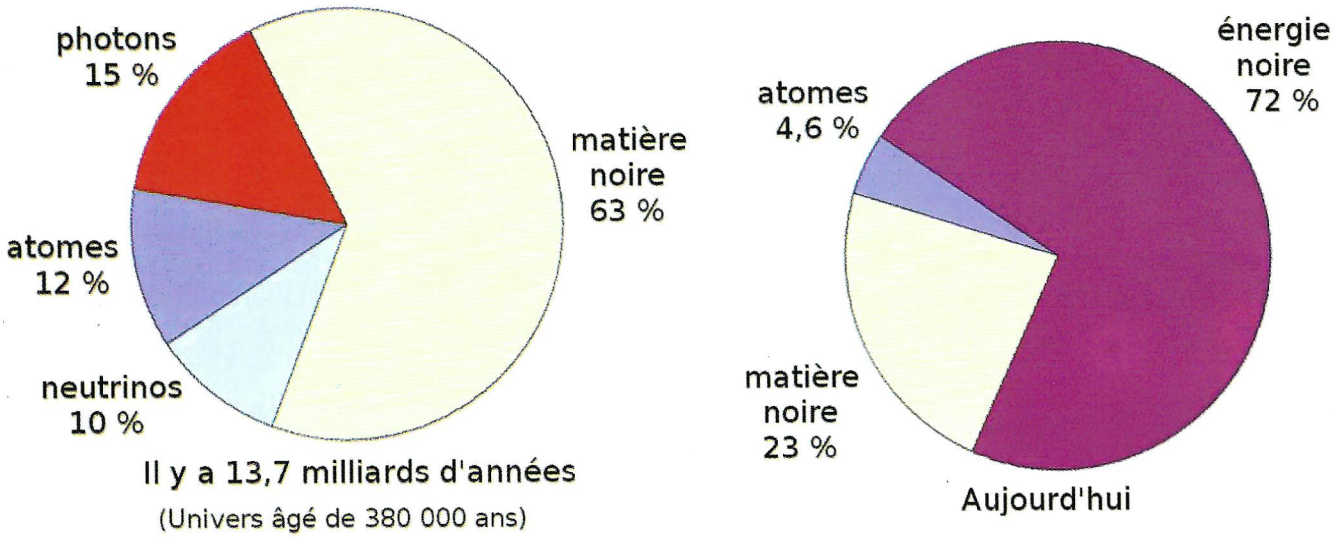


Fig-V-13

La répartition matière-énergie de l'Univers déduite des observations de WMAP sur le fond cosmique micro-onde est représentée sur les deux graphiques ci-dessus.

d) Autres résultats : H_0 (constante de HUBBLE et âge de l'Univers)

- Constante de HUBBLE: ΛCDM de WMAP conduit à $H_0 = 73{,}2$ (+3,1 / -3,2) kms^{-1} ; cette valeur est compatible avec celle déduite par d'autres chercheurs des lentilles gravitationnelles telles que B 1608 + 656 : 79 (+7 / -6) également avec celle déduite des amas d'étoiles, et des Céphéides sur galaxies proches.
- L'âge de l'Univers : $1/H_0 = 13{,}73$ (+0,16 / -0,15) milliards d'années.
- Les autres résultats sont comparés directement à ceux, très récents, de Planck.

VI L'ENFANCE DE L'UNIVERS : LES NOUVELLES APPORTEES PAR L'OBSERVATOIRE SPATIAL "PLANCK" - QUESTIONS

a. Le 16 avril 2009, la fusée Ariane V emportait dans sa coiffe, "Herschel", le plus grand télescope spatial jamais lancé, avec son miroir de 3,5 mètres de diamètre, et "Planck".

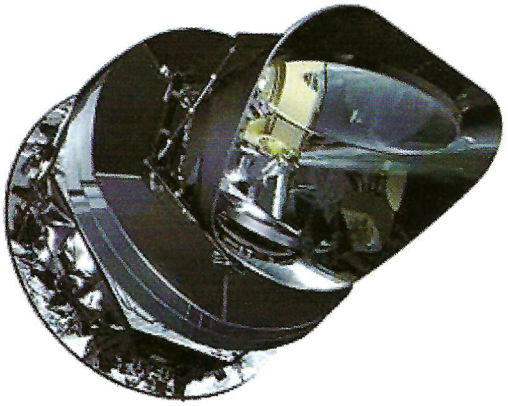


Fig-VI-1 Le télescope Planck-Herschel

Herschel doit observer l'Univers dans l'infra-rouge et les longueurs d'ondes millimétriques. "Planck" a pour mission prioritaire d'observer avec une précision jamais égalée "l'enfance de l'Univers", grâce à l'exploration très fine du rayonnement fossile cosmologique, en respectant des contraintes extrêmes : ce fond diffus micro-onde rayonne à 2,7 kelvins, juste au-dessus du zéro absolu : c'est le rayonnement le plus froid de l'Univers. Tout comme pour WMAP, il n'est donc pas question de le placer sur une orbite voisine de la Terre, où "Planck" serait constamment chauffé par le soleil ; le meilleur moyen, une fois encore, est de le placer à l'abri non seulement du soleil, mais également de la Terre et de la Lune. "Planck" et "Herschel" seront donc placés, mais séparément, en orbite autour du point de Lagrange L_2, à 1,5 million de kilomètres au-delà de l'orbite terrestre. De ce point proche et à moindre coût, la Terre, la Lune et le Soleil seront toujours dans des directions très proches, et dans le dos des observatoires. Mais, spécialement pour "Planck", cela ne suffit pas. Même si trois panneaux d'isolation séparent dans "Planck", l'étage du scientifique du reste du satellite, à l'ombre du soleil, la zone sensible sera quand même à la température de 70 kelvins. Le refroidissement suivant, crucial, et intérieur notamment à la partie "haute fréquence" ou HFI de "Planck", donc indépendant du fluide extérieur, est assuré par un système d'origine quantique, à savoir la **"dilution isotopique" de l'hélium3** - qui obéit à la statistique de Fermi-Dirac - **dans l'hélium 4**, qui suit la statistique de Bose-Einstein : ce processus engendre une température de 0,1 kelvin !: ("Planck" consommera pendant l'intégralité de sa mission trois années de consommation mondiale d'hélium 3 !). La moitié de la puissance fournie par des panneaux solaires, soit 800 watts, sera dépensée pour évacuer 0,1 watt.

L'instrument haute fréquence (High Frequency Instrument : HFI) couvre des fréquences comprises entre 100 et 857 GHz : "Planck" est idéalement conçu en vue de tester le lien "matière noire - formation d'étoiles". Le satellite est aussi, nous l'avons vu, le représentant de la troisième génération dont le but premier est la mesure de l'anisotropie du rayonnement diffus micro-onde

"Planck" observe le ciel dans neuf bandes de fréquences : de 30 à 857 GHz avec une très haute sensibilité et résolution angulaire abaissée, par rapport à WMAP, de 31 à 5 minutes d'arc.

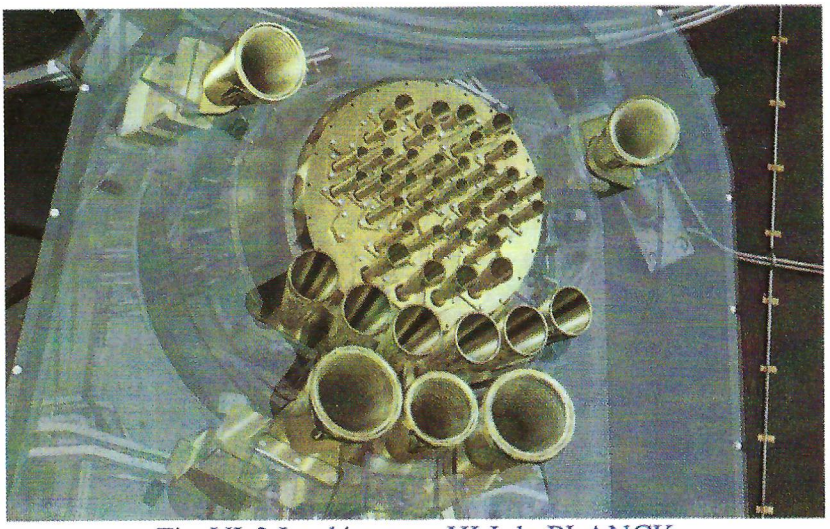


Fig-VI-2 Le détecteur HLI de PLANCK
(Pour la Science mai 2013 - réf.ESA Médialab)

- L'instrument basse fréquence (LFI) couvre les bandes : 30, 44 et 70 GHz au moyen d'amplificateurs radiométriques (22) refroidis à 20 kelvins.
- L'instrument haute fréquence (HFI) couvre les bandes 100, 143, 217, 353, 545 et 857 GHz au moyen de 48 bolomètres refroidis donc à 0,1 K. La polarisation du rayonnement est mesurée à toutes les fréquences, sauf les 2 bandes les plus hautes. Une combinaison de refroidissement radiatif et trois refroidisseurs mécaniques produit le niveau de température requis par les détecteurs et l'optique.

HFI, y compris le refroidissement à 0,1 K, est réalisé en France ; LFI en Italie.
Les centres DPC (data processing centers) vérifient et calibrent les résultats et assurent la réalisation des cartes.
La sensibilité globale obtenue par "Planck" est dix fois supérieure à celle de WMAP.



Fig-VI-3 Pont de gaz chauds entre les deux amas galactiques Abell 399 et Abell 401.

Crédit : effet Suyaev-Zel'dovich (orange).
ESA et collaboration PLANCK ; image optique : STGCI Digitized Sky Garvey

"Planck" va se révéler comme outil extrêmement puissant dans l'identification des objets froids qui peuplent le milieu interstellaire et la mesure très fine de leurs températures. Dans cette tâche, "Planck" s'est allié avec "Herschel", observatoire lancé par ESA en même temps que lui. "Herschel" n'est pas un télescope d'arpentage ; il est conçu pour observer des objets froids, en inspectant à la fois une seule partie du ciel : il se focalise donc sur des zones très limitées, tandis que "Planck" explore et pointe le ciel entier : "Planck" et Herschel" sont très complémentaires. Depuis son lancement, "Planck" a fonctionné parfaitement. Les deux instruments, HFI et LFI, dès janvier 2011, avaient sondé l'intégralité du ciel presque trois fois dans les neuf canaux de fréquences.

1) Le 11 janvier 2011, la collaboration "Planck", plus de 200 astrophysiciens appartenant à 82 Départements Universitaires mondiaux et Instituts de recherche spatiale, publiait son premier catalogue de sources astronomiques compactes

2) Le 18 août 2011, les mêmes auteurs publiaient les cartes "Planck"

Premiers résultats "XVIII" : "Les anisotropies du rayonnement cosmologique "CIB" infrarouge et son spectre de puissance".

En vue de cette étude du rayonnement cosmologique infrarouge, "Planck" a utilisé les cartes de six régions du ciel à émission de poussière galactique faible, sur une surface totale de 140 degrés-carrés. La collaboration Planck a utilisé de plus les observations à la longueur d'onde de 21 cm de l'hydrogène H_I comme traceur de l'émission due à des nuages galactiques poussiéreux. Ce dernier spectre à 21 cm était fourni par le télescope "Green Bank GBT" tandis que la bande à 143 GHz de Planck éliminait la contribution du rayonnement fossile micro-onde.

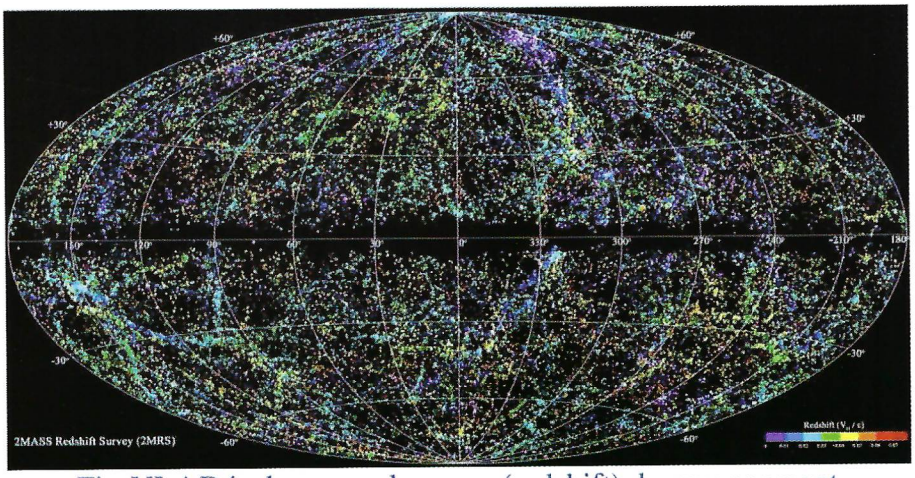


Fig-VI-4 Décalage vers le rouge (redshift) du rayonnement cosmologique infra-rouge

La collaboration "Planck" a obtenu les cartes d'anisotropie de CIB, lesquelles révèlent les structures produites par l'émission cumulative de décalage vers le rouge élevé (effet Doppler, des poussières et nuages galactiques et des galaxies engendrant des étoiles).

On doit s'attendre à une importante corrélation croisée entre les cartes CIB, l'effet de lentille gravitationnelle et le rayonnement cosmologique micro-onde.

"Planck" a mis en lumière une autre propriété du milieu interstellaire: les grains de poussière ont un mouvement de rotation propre, comme un "spin": ces fins agrégats de matière apparaissent un peu plus gros que les molécules de CO_2: pour la première fois, "Planck" a été en mesure de reconstruire leur spectre haute fréquence et de confirmer ainsi leur rotation propre. Ce qui ouvre un champ tout à fait nouveau pour les astronomes.

3) Que nous dit "Planck 2013" sur l'expansion de l'Univers et sur l'Inflation ? (d'après la revue Nature/News des 21 et 26 mars 2013)

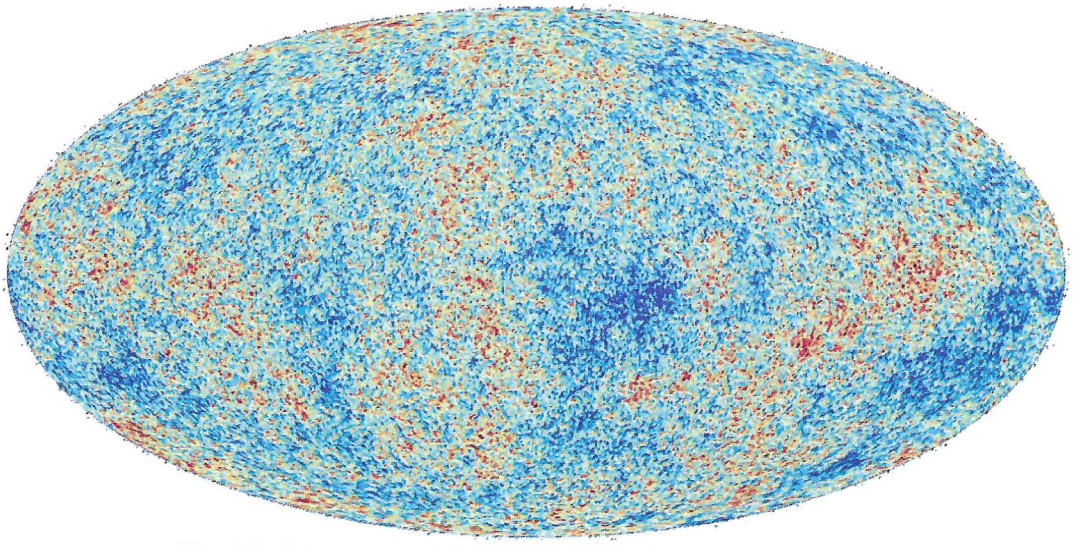


Fig-VI-5 Carte de Planck - ESA - Collaboration Planck

Pour certains astronomes, "Planck" nous délivre "l'ultime carte aux trésors". En couronnant cinquante années d'études du "CMB", le 21 mars 2013, la collaboration "Planck" a "sorti" la carte de la plus haute précision jamais réalisée sur le rayonnement cosmique micro-onde, nous offrant ainsi le rougeoiement faible mais sans ambiguïté du Big-Bang.

"Planck" nous a livré, "claquée" une image de l'Univers en bas âge. Deux surprises, par rapport à "Wilkinson Map Anisotropy Probe" : les très petites fluctuations imprimées sur cette carte nous révèlent un Univers dont l'expansion est légèrement plus lente que prévu par les explorations de COBE, aussi bien que de WMAP. Tout repose évidemment sur la détermination, à partir de l'analyse du rayonnement fossile cosmologique "exprimé" par "Planck", de la constante de Hubble H_0: **H_0 = 67,15 kilomètres par seconde par million de parsecs.**

L'Univers est ainsi plus vieux que prévu par WMAP : 13,82 milliards d'années. Les calculs déduits de la carte montrent ainsi que le nombre de "saveurs" ou familles de neutrinos qui peuplent l'Univers se limite sans doute à trois : une quatrième famille de neutrinos correspondrait à une expansion plus rapide. Une remarque est proposée dans "Nature/News" du 26 mars 2013 par Ananyo Bhattacharya : "La valeur de la constante de Hubble, qui décrit la vitesse d'expansion de l'Univers, est également étonnamment faible, comparée aux estimations des autres techniques astronomiques: amas stellaires, quasars, supernovae. Peut-être avons-nous ici une légère indication en faveur d'une "nouvelle physique qui serait en jeu". Incertitude?

Toujours dans "Nature/News" du 26 mars 2013, James Dwyer s'exprime ainsi: *<<Pour la plus grande part, les résultats de "Planck" s'harmonisent parfaitement avec "le modèle standard de la cosmologie" et permettent une mesure la meilleure possible de ses paramètres. Dans le modèle standard, l'Univers est décrit comme homogène et isotrope au niveau des très grandes échelles et la structure du cosmos est le résultat de la lente croissance des très petites fluctuations de densité qui se présentent immédiatement après le Big-Bang>>.*
En même temps, l'extraordinaire qualité des résultats de "Planck" met en évidence de subtiles anomalies dans la carte du bruit de fond cosmologique micro-onde, qui constituent un challenge par rapport aux véritables fondements de la cosmologie. La plus sérieuse anomalie est un déficit dans le signal des grandes échelles angulaires du ciel, signal qui est d'environ 10 % plus faible que ce que voudrait le modèle standard. D'autres anomalies ont trait à ce qui a déjà été souligné (WMAP notamment): ces autres anomalies en effet, concernent la différence significative du signal CMB observé dans les deux hémisphères opposés du ciel, d'une part, et un "spot froid" anormalement important. Ces nouvelles images de "Planck" suggèrent que certains aspects du modèle cosmologique demandent à être repensés, évoquant la possibilité que la genèse du cosmos, sur les plus grandes échelles de l'Univers, pourrait être plus complexe que prévu !

Que le modèle ΛCDM ait pu produire des résultats qui s'accordent bien avec les observations courantes voire excessivement complexes, n'exclut pas qu'il puisse contenir des imperfections, traduites par exemple dans les grandes échelles angulaires, par le fait que les points expérimentaux sont presque tous au-dessous de la courbe du spectre de puissance.

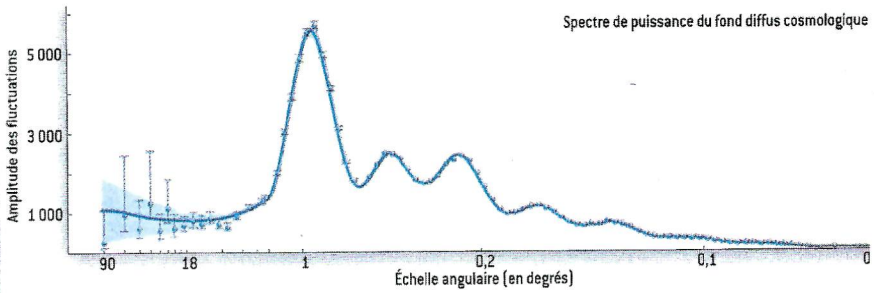


Fig-VI-6 "Pour la Science" mai 2013
Source ESA et collaboration PLANCK HFI/LFI

Pour quelle cause ? Pour Alain Riazuelo ("Pour la Science" mai 2013) "l'hypothèse la plus prudente serait d'imaginer un problème dans le traitement des données brutes". Cet effet était visible dans les données moins précises de "WMAP", mais peut-être faut-il rappeler à ce sujet que H.K. Eriksen et *al*, dans un article sur la "Réanalyse" des trois années WMAP" avaient souligné "l'importance d'un haut degré d'exigence de sophistication de l'algorithme de traitement de données très complexes", et mis en cause, notamment, le problème de précision posé par ΛCDM aux larges échelles angulaires.
Pour être objectif en ce qui concerne la collaboration "Planck" HFI/LFI, elle comprend désormais sept des auteurs de la "Réanalyse" dont H.K. Eriksen.

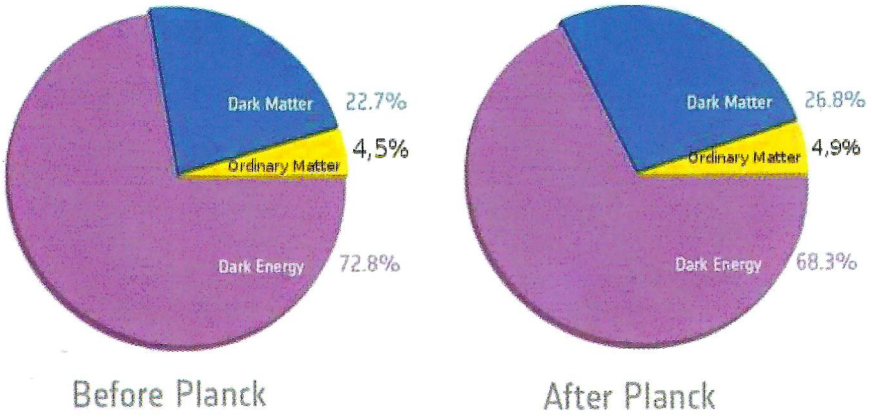


Fig-VI-7

La figure ci-contre (Fig-VI-7) compare les résultats de synthèse déduits du spectre de puissance, pour Planck : Energie sombre, Matière ordinaire, Matière noire... et les compare avec ceux de WMAP

La figure suivante (Fig-VI-8) donne la distribution de Matière noire (carte ciel entier)

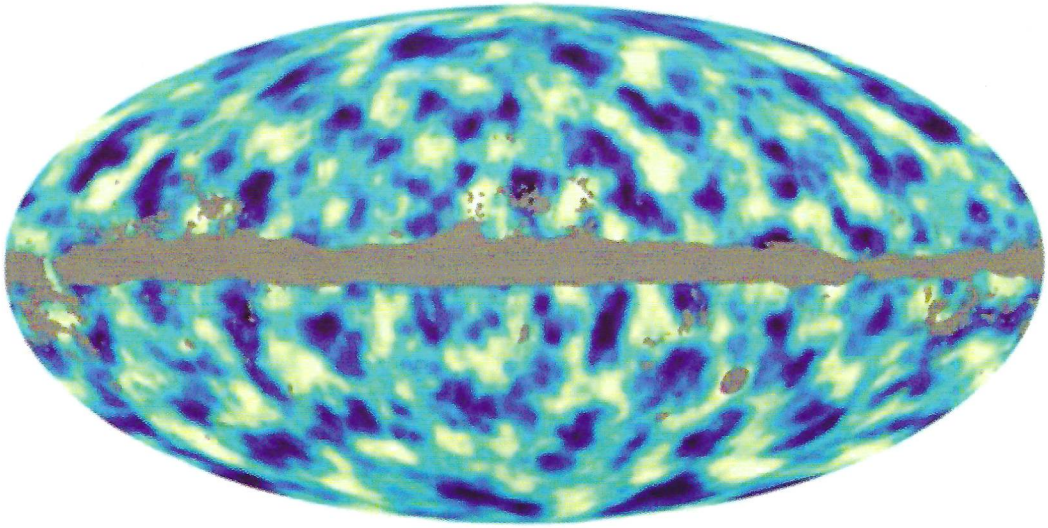


Fig-VI-8 (Crédit ESA et Collaboration Planck)

4) RESUME : certitudes et incertitudes

Heidegger, nous rappelle le philosophe George Steiner, a raison de dire que les sciences sont extrêmement triviales. Elles n'ont que des réponses... et Steiner, passionné de sciences - il vit à Cambridge (U.K.), citadelle scientifique avec son impressionnante liste de Prix Nobel - répondait ainsi à Martin Heidegger: "Ne pas comprendre est merveilleux. Poser des questions est l'oxygène de l'être".
C'est le sentiment qui prédomine lorsque nous comparons les certitudes, les questions et les incertitudes, et que nous comparons les avis prononcés ou recueillis par Marc Peplow dans la revue "Nature/News" des 21 et 26 mars 2013. Nous traduisons dans l'ordre (ou le désordre).

- Age de l'Univers : 13,82 milliards d'année. La carte du fond diffus cosmologique nous révèle même que le nombre de saveurs de neutrinos traversant l'Univers se limite probablement à trois: s'il y en avait eu quatre, l'Univers se serait développé plus vite durant ses premiers moments.
- Tous les résultats de "Planck" représentent des raffinements par rapport aux nombres obtenus par les précédentes missions, telles que Wilkinson Microware Anisotropy Probe. Le point où le vaisseau spatial "Planck", fouillant le ciel à partir d'une orbite située à 1,5 million de kilomètres, nous livre le fondement le plus nouveau, se trouve dans les arguments qu'il apporte en faveur de la théorie dominante: celle qui décrit le premier instant qui suit le Big-Bang. La théorie, connue comme inflation, tient en ce que durant

10^{-32} seconde d'une expansion "inimaginablement rapide", l'Univers croît depuis la dimension d'un "point" subatomique, jusqu'à celle d'une "grappe de raisin" et qu'il continue son expansion dans une paix majestueuse. Ce sursaut suivi d'une croissance paisible pourrait aider à comprendre pourquoi l'Univers que nous voyons aujourd'hui est si homogène sur les plus grandes échelles cependant criblées d'agrégats, de filaments et d'embryons de galaxies.

- Par contre, Jo Dunkley, astrophysicien de l'Université d'Oxford, Royaume Uni, et qui a travaillé sur les résultats de "Planck et "WMAP" estime d'une part que "Planck" "*pourrait avoir trouvé qu'il y a quelque chose de nettement faux dans l'inflation tandis que nous avons une nouvelle évidence d'une réalité de l'expansion*".
- De Marc Peplow : <<*Dans la minute qui suit la bouffée d'inflation, des particules telles que protons et électrons forment un chaudron de proto-matière et les photons commencent à rebondir "comme des balles de ping-pong". Ce n'est que 380 000 ans plus tard, alors que le plasma chargé s'est refroidi en atomes neutres, que ces photons ont été en mesure de voler librement. Aujourd'hui, ils ont composé le rayonnement fossile micro-onde, et ils transportent avec eux l'empreinte des fluctuations quantiques qui demeureront dans l'Univers inflatoire*>>.
- Observées dans la carte comme de très petites variations autour d'une température moyenne de 2,7 kelvins, les fluctuations provoquent des altérations dans la densité de matière, lesquelles, dans leur phase ultime, feront 'boule de neige" dans les galaxies. "*Toutes les structures que nous voyons dans l'Univers viennent de ces petites perturbations*" (Paul Schellard, cosmologiste de la collaboration Planck à l'Université de Cambridge, Royaume Uni).
- L'inflation, proposée par Alan Guth en 1980, maintenant physicien au Massachusetts Institute of Technology à Cambridge, prédit que le domaine des variations de température devrait suivre une courbe en cloche - une distribution Gaussienne régulière. "*Les cosmologistes ont trouvé des nuances dans des missions précédentes: la distribution ne serait pas si régulière, suggérant qu'un autre processus est impliqué dans l'inflation de l'Univers. Mais jusqu'à présent, les résultats de températures de "Planck" semblent presque parfaitement Gaussiens, et les théories standards de l'inflation semblent donner toute sécurité*".
- Mais l'affaire cosmologique n'est pas close. On observe quelques détails qui ne semblent pas être à leur place dans la carte de "Planck": une étrange parcelle froide par exemple, et une grande proportion de spots chauds d'un côté du ciel. D'autre part, l'évaluation par "Planck" de la constante de Hubble, qui décrit la vitesse d'expansion de l'Univers est remarquablement basse par rapport aux autres techniques astronomiques: peut-être est-ce la trace d'une esquisse de nouvelle physique !
- La pleine confirmation de l'inflation - principe qui sert de guide - dépendra des propriétés détaillées des photons du rayonnement fossile micro-onde. La soudaineté du moment de l'inflation devrait avoir provoqué la vraie genèse de l'espace-temps, résultant en ondes gravitationnelles. Celles-ci, en retour, devraient avoir laissé des traces dans la polarisation des photons. La collaboration "Planck" espère repérer les résultats de cette polarisation en 2014. "*Si nous découvrons les ondes gravitationnelles, nous aurons le Prix Nobel - c'est un énorme défi*" (George Efstahiou, directeur du Kavli Institute for Cosmology de Cambridge, U.K.) l'un des leaders du programme Planck... Mais le signal extrêmement faible de polarisation peut se trouver hors d'atteinte des détecteurs de "Planck". Charles Lawrence, du Jet Propulsion Laboratory, Pasadena (NASA), responsable scientifique de "Planck" aux USA, pense "*qu'il faudra peut-être un autre télescope spatial pour "finir le job", ou peut-être même une mission, dans plusieurs décades, aux fins de détecter directement les ondes gravitationnelles*".

Si nous faisons abstraction des problèmes d'asymétrie, confirmés par Planck, après WMAP, Lawrence nous permet de conclure: "*En termes de variation de température, les astronomes doivent être satisfaits de "Planck": avec lui, ils ont pressé et obtenu tout le "jus" du CMB, et ils trouvent que ce jus est très bon, même s'il laisse quelques questions hors d'atteinte. Nous avons une assez bonne idée de ce qu'est l'Univers. Mais nous n'avons pas la plus faible idée de l'autre question : pourquoi existe-t-il ?*" ajoutant joyeusement "*c'est plutôt amusant !*"

Quant à nous, nous sommes subjugués, émerveillés par sa beauté.

VII CONCLUSION - QUESTIONS

1) Bien que les événements tels que l'inflation laissent leur empreinte sur la carte du rayonnement fossile micro-onde, des messages plus directs de nature différente ont pu laisser la trace de leur intervention.

- Les neutrinos primordiaux pourraient constituer de bons candidats en tant que messagers d'un Univers très jeune, mais leur très basse énergie moyenne et surtout leur infime section efficace d'interaction les rend indétectables.
- Les ondes gravitationnelles sont un candidat d'un très grand intérêt comme témoin de cet Univers très jeune. La théorie de la relativité générale d'Einstein prévoit que de telles distorsions de l'espace-temps se propagent à la vitesse de la lumière. Bien que l'étude des variations de période des systèmes de pulsars doubles étroitement liés ait prouvé leur existence, leur détection directe demeure un défi, y compris pour "Planck". D'après certains chercheurs, certaines extensions du Modèle Standard des particules "attendent" les conséquences d'une inflation hybride de l'Univers qui serait engendrée par les propriétés (amplitude, spectre) de ces ondes gravitationnelles primordiales.

2) L'interprétation du "spot froid" du rayonnement fossile micro-onde s'est posée depuis WMAP, "spot froid" confirmé par Planck. Quelle est son origine ? Plusieurs hypothèses ont été évoquées, aucune ne semble s'imposer.

a) Caractère non-Gaussien qui altère la radiation dès son émission, 380 000 ans après le Big-Bang, 200 millions d'années après le CMB.

Ou:

b) La radiation observée aurait pu être modifée pendant son voyage sur des millions d'années, depuis les régions extérieures de l'Univers... jusqu'au.... point de Lagrange L_2... Par exemple, un photon CMB peut gagner de l'énergie en tombant dans le puits de potentiel d'une région dense, tel qu'un amas de galaxies. Normalement, il pourrait perdre la même quantité d'énergie quand il se déplace hors de cette aire. Cependant, sous l'effet de l'énergie sombre, le puits de potentiel devient moins profond avec le temps cosmique, et la perte d'énergie du photon ne compense pas totalement le gain initial pour le photon CMB. Cet effet subtil, connu comme "effet retard intégré de SACHS-WOLFE", contribuerait à un spot chaud sur la carte CMB dans la ligne de vol de l'amas galactique. Réciproquement, dans le cas opposé d'une région spatiale importante de vide, l'influence totale sur un photon CMB contribuerait à un spot froid. Lawrence Rudnik et *al*, dans Astrophysics Journal (réf. http://arxiv.org/abs/0704.0908), L. Rudnik donc, de l'université de Minnesota, a appliqué l'effet de SACHS-WOLFE, cette fois au groupe de 1,8 million de sources radio individuelles grâce à l'Observatoire National de Radio Astronomie VLA (Very Large Array). En lissant ces observations jusqu'à une résolution de quelques degrés, pour un espace presque vide de matière, Rudnik et ses collègues avaient estimé ce grand vide à quelques millions d'années de lumière de "côté" nécessaire pour expliquer le "spot froid". Il s'agissait alors du spot froid de "WMAP" mais on le retrouve dans le CMB de "Planck". Quoi qu'il en soit le spot froid reste une énigme cosmologique. Mais peut-être devons-nous nous en tenir à la conclusion de James Dwyer, dans "Nature/News" du 21 mars 2013 : "*La Genèse du Cosmos, au niveau des plus grandes échelles de l'Univers observable, doit être plus complexe que ce que nous pensions*"... Un élément de solution, ou au contraire de difficulté, ou d'ébranlement de la cosmologie, n'est-il pas posé par la découverte d'une structure géante, large de 4 milliards d'années de lumière, par l'équipe des chercheurs de l'Université de Central Lancashire, au Royaume Uni. Il s'agit de Huge (énorme)-LQG, ensemble de 73 quasars rassemblés... L'Univers est-il vraiment spatialement homogène ? Selon "Le principe cosmologique", les structures les plus importantes ne doivent pas dépasser 1,2 milliard d'années-lumière…

Dernière question posée par Alain Riazuelo dans "Planck géomètre de l'Univers primordial" ("Pour la Science" mai 2013). La comparaison pour la densité d'énergie sombre, de la valeur de "Planck" avec les valeurs des explorations précédentes: proviennent-elles d'une évolution du traitement de données brutes, ou vraiment d'évolution temporelle de cette densité d'énergie sombre, ce qui signifierait dans ce dernier cas une accélération croissante de l'expansion de l'Univers ! Alain Riazuelo conclut prudemment: "*la confiance à accorder à ce résultat reste à évaluer*" !

Les observations de Planck jettent pour la première fois un pont entre les sciences de l'infiniment petit et l'infiniment grand, entre la cosmologie et la physique quantique. Mais le modèle cosmologique standard est loin

d'avoir atteint l'état de complétude et d'harmonie de la physique quantique. L'avertissement de Lucrèce demeure aujourd'hui d'une brûlante actualité:
"*La vigueur de son esprit le porta très loin - au-delà des murailles enflammées du monde - d'où il est revenu, victorieux, nous enseigner ce qui peut naître et ce qui ne le peut pas*" (Lucrèce: "De la Nature" 98-55 avant notre ère).



HUGE - LQG (73 quasars !)
(Réf. Royal Astronomical Society
Chercheurs de l'Université de Central Lancashire - Royaume Uni)

Mystères non résolus

L'expansion de l'Univers semble s'accélérer. Est-ce dû à la constante cosmologique d'Einstein ? Sinon les expérimentations révèleront-elles une nouvelle force de la nature ou même de nouvelles dimensions (cachées) de l'Univers ?

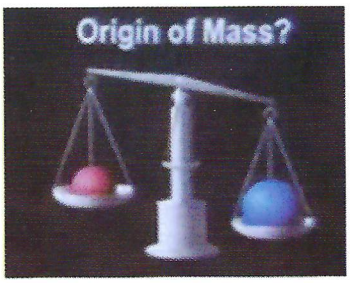




La matière et l'antimatière furent créées lors du Big-Bang. Pourquoi ne voyons-nous que la matière et seulement les quantités minuscules d'antimatière que nous fabriquons au labo et quand nous observons dans les rayons cosmiques ?

D'invisibles formes de matière constituent la plus grande partie de la masse observée dans les galaxies ou les amas de galaxies. Cette matière noire est-elle constituée de nouveaux types de particules qui interagissent très faiblement avec la matière ordinaire ?





Dans le Modèle Standard, pour que les particules aient une masse il faut qu'il existe une particule appelée "Boson de Higgs", dont un exemplaire vient d'être découvert. La théorie de "Supersymétrie" est-elle correcte en prédisant plus qu'un type de boson de Higgs ?

ParticleAdventure.org
CPEPweb.org

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES (dans l'ordre d'apparition dans le texte)

(1) Robley D. EVANS "The atomic Nucleus" (expérience "neutrons" Chadwick - Ed Mc Graw Hill 1955 p.19)
(2) Jean-Pierre SARMANT "Dictionnaire de Physique" - Hachette 1988
(3) Louis et Madeleine AVAN "Physique Moderne" - Ed SNRI "La Maîtrise des Eléments" 1992
(4) Jean-Claude MONTRET "Les Particules Elémentaires" - Auvergne-Sciences Déc 2002
(5) Courrier CERN janv-fév 2014 "Astroparticles Physics". LHC Physics
(6) CMS Collaboration 2011 - arxiv 1112.5100v2 - Courrier CERN mars 2012 p.8
(7) Jean ILIOPOULOS - "Pour la Science" nov 2007 pp.102 et 92
(8) Bernard VALEUR "Lumière et Luminescence" - Belin 2005
(9) Courrier du CERN nov 2009 p.27 (Jets hadroniques DELPHI)
(10) William J. KAUFMANN "Universe" - Ed W.H. Freeman and Company, New York 1994 pp.535, 565-566
(11) LHC Collaboration 2013 - arxiv 1303.2614 (hep-ex)
(12) BI. ABELEV et al. - ALICE Collaboration 2012 - arxiv 1207.0900 (nucl-ex)
(13) Noël RUSSEL (Univ. Michigan) - Courrier CERN janv/fév 2008
(14) François ENGLERT - "Les Dossiers de la Recherche" mai 2011 (le boson de Higgs. La particule manquante)
(15) YOUNG et FREEDMAN - "University Physics" - Addison Wesley 1996 p.1443
(16) Alan GUTH et Paul STEINHARDT "L"Univers: des Faits aux Théories". Préface Jean-Claude PECKER: "L'Univers Inflatoire" - Bibliothèque "Pour la Science" 1988
(17) ATLAS: "Les Reflets de la Physique" N°14 mai 2009
(18) "Clermont Demain" nov 2013
(19) ATLAS: CERN http://atlas.ch
(20) ATLAS Collaboration et CMS Collaboration - Courrier CERN sept 2012
(21) Jean ORLOFF "Reflets de la Physique" déc 2013-janv 2014
(22) Oelikon graph - Courrier CERN sept 2012
(23) Max TÜRLER. Compilation - Courrier CERN mai 2013
(24) James STEIN. Compilation - Courrier CERN déc 2011
(25) Van GHARIBIAN. Physices Letters 2012 (109 - 141 - 103)
(26) ATLAS Conf - 2012 - 1147. Courrier CERN janv-fév 2013
(27) Richard MÜLLER "L'Univers: des Faits aux Théories". Loc cit p.142
(28) D.N. SPERGEL - Dépt of AstrophysicalSciences - Princeton University + 21 signataires: "Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: Implications for Cosmology" in "The Astrophysical Journal Supplement Series" 170 - 377 408 - juin 2007
(29) H.R. ERIKSEN (Univ. Oslo + Jet Propulsion Laboratory + California Institute of Technology, Pasadena) + 13 signataires: "A Re-Analysis of the Three-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe. Temperature Power Spectrum an Likelihood" in "DraftVersion feb S.2008" (réf arxiv astro-ph / 0606088v2 - 2 oct 2006)
(30) PLANCK Early Results XVIII "The Power Spectrum of Cosmic Infrared Background Anisotropy" in "Astronomy and Astrophysics" (manuscript accepted 17 june 2011 - pub 18 aug 2011)
(31) Alain RIAZUELO - "Pour la Science" avr 2009 (WMAP)
(32) Alain RIAZUELO - "Pour la Science" mai 2013 - réf ESA et Medialab
(33) Crédit: effet Sunyaev-Zeidovich / ESA et Collaboration
(34) PLANCK Michel Gendraud - Champ BEH / Poème
(35) Auteurs de "Nature News" - "Observatoire Planck" 21 et 26 mars 2013
(36) Ananyo Bhattachania
(37) James Dwyer
(38) Georges Steiner
(39) Marc Perlow
(40) Jo Dunkley
(41) Georges Efstathiou
(42) Charles Lawrence

Tous impliqués dans la "Collaboration PLANCK"

(43) Don Lincoln - Pour la Science " Au cœur des quarks" Juin 2013
(44) "Particle Physics booklet" extracted from the Review of Particle Physics - J Beringer et *al.* (Particle Data Group) - Physical Review D.86,010001 (2012). Réf http//pdg.lbl.gov/pdgmail (Lawrence Berkeley National Laboratory and CERN).
(45) ParticleAdventure.org.

REMERCIEMENTS

L'auteur de ce numéro spécial d'Auvergne-Sciences tient à remercier Monsieur le Président de l'Adasta, Henri Bouffard, ainsi que tous les responsables de l'association et les membres du comité de rédaction pour l'honneur qu'ils lui ont fait de proposer un tel document, inspiré par les événements qui ont marqué deux des avancées scientifiques majeures des années 2012 - 2013.

- La première grande découverte, la mise en évidence expérimentale d'un boson BEH, sanctionnée par le Prix Nobel de Physique attribué le 8 octobre 2013 à François Englert et Peter Higgs, nous réjouit d'autant plus qu'une équipe du Laboratoire de Physique Corpusculaire IN2P3 / CNRS de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand ayant à sa tête François Vazeille, Directeur de Recherche Emérite au CNRS, chef de projet ATLAS, a participé depuis plus de 20 ans à la conception, au développement, à la mise en œuvre de cet immense détecteur, à la réalisation logistique et au déroulement, nuit et jour, du programme effectif qui a abouti à la découverte essentielle au Modèle Standard de Physique des Particules, celle du maillon manquant qui assure la structure cohérente de l'Univers: le (un) boson BEH, non pas lui-même, mais grâce au champ dont il est la trace fugitive: 10^{-25} seconde...Epopée scientifique, humaine, technologique merveilleuse !

- La deuxième grande découverte, fruit d'une épopée moins spectaculaire mais, à notre sens comparable en profondeur, n'a pas concerné directement des scientifiques de notre Région: sauf que, fraternité des deux Infinis de Pascal, à moyen terme, les perspectives et les **questions posées** par les premiers résultats de l'Observatoire Planck (âge de l'Univers, familles de neutrinos, anomalies spectrales dans le Rayonnement Cosmologique Fossile, quelques dissymétries, problème des ondes gravitationnelles) peuvent évoquer un jour des questions communes, ou "connexes"! au prix de trois règles d'or: imagination, rigueur de recherche, humilité.

Nous avons essayé d'introduire, à partir d'une mise en perspective historique aussi simple que possible, sans formalisation théorique abstraite, ces deux grands thèmes des infinis pascaliens. Il nous arrive de nous émerveiller devant certaines similitudes technologiques: dans les deux cas, maintien d'un dispositif à très basse température, au-dessous de la température du Rayonnement Cosmologique Fossile (2,7 kelvins):

- 1,9 K au LHC, pour refroidir 1800 aimants supraconducteurs
- 0,1 K dans la partie la plus sensible du détecteur PLANCK, assurée dans un petit volume de détecteurs Haute Fréquence, par une dilution isotopique He_3 dans He_4. Dans les deux cas: sommet technologique. Mais dans le second cas, nous sommes à un million cinq cent mille kilomètres de la Terre.

Merci de tout cœur aux membres du Laboratoire de Physique Corpusculaire de Clermont-Ferrand: François Vazeille, Bernard Michel, Jean Castor, Jeanine Pellet, Ana Teixeira, pour l'aimable communication de documents précieux.

Merci aux membres du Comité de Rédaction pour leurs critiques amicales, pour leurs questions: ces contributions ont fait évoluer notre "maquette".

Merci à Michel Gendraud pour son illustration originale du champ BEH et pour le poème final. "*Ils disent plus qu'un long discours*", affirmait Paul Valéry.

Merci très amical à Mélanie et à Jean-Claude Capelani pour la réalisation de la "première de couverture", souvenir de notre visite au CERN les 10 et 11 décembre 2013.

Enfin, merci particulier, signe d'une profonde reconnaissance, à Philippe Choisel, Rédacteur en Chef, et à Annie-Michelle Baudin, pour le soin apporté à l'élaboration graphique et à l'édition finale du document (ils en ont vécu toutes les phases!).

Ce numéro spécial, dans son contenu scientifique, les informations qu'il propose et les questions qu'il pose, est évidemment offert à la critique du lecteur. Merci, de tout cœur, pour cette forme précieuse d'enrichissement mutuel.

Chamalières, le 27 février 2014

PETITE HISTOIRE D'UN LABORATOIRE DE RECHERCHE

Par Jean-Claude CAPELANI

Sans l'aide précieuse de **Louis et Madeleine Avan**, je n'aurais pu raconter la création d'un laboratoire de recherche à Clermont Ferrand, intitulé « Laboratoire de Physique Nucléaire » puis « Laboratoire de Physique Corpusculaire ». Qu'il me soit permis en préambule de remercier mes Maîtres, mes Amis, mes Référents, sans qui je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui. Aussi, le texte qui suit fait référence aux informations données par Louis et Madeleine Avan.

Les deux clichés qui suivent, mieux que des discours, disent ce que fut cette période de gestation 1959-1969.

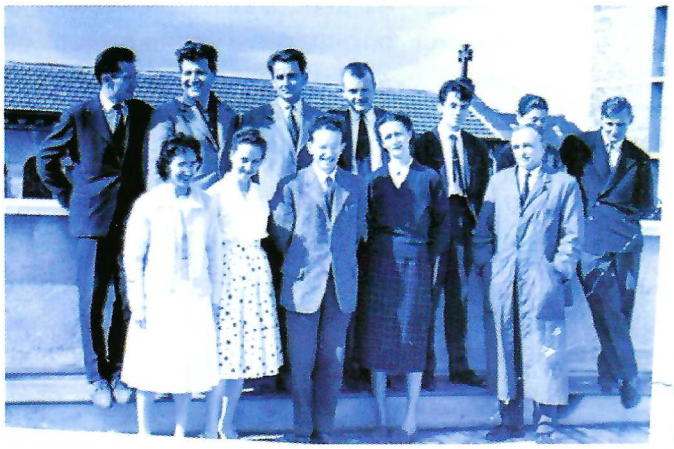


Photo 1 (voir noms en fin d'article)

La première photographie, prise sur la terrasse de la Faculté des Sciences de l'avenue Carnot, face à la chapelle des Dominicains, réunit tous les collaborateurs de Louis et Madeleine Avan et les élèves du Diplôme d'Etudes Supérieures de Physique, autour du Doyen émérite **Emmanuel Dubois**, en blouse de travail.

Louis et Madeleine Avan : *« lors de notre nomination comme "Maîtres de conférences" à la Faculté des Sciences de Clermont Ferrand, le Directeur Général des Enseignements Supérieurs, le Recteur **Maurice Bayen** m'avait convoqué à Paris pour me prévenir que venant des Rayons Cosmiques sous terre, il ne fallait pas imaginer développer une recherche en physique nucléaire ou corpusculaire ».*

C'était en octobre 1957, arrivée à Clermont Ferrand de Louis et Madeleine Avan et rencontre avec le Doyen Dubois, intrépide et autoritaire, ami personnel du Directeur Général qui leur déclare : *« vous ferez de la recherche en Physique Corpusculaire et votre laboratoire s'appellera pour simplifier "Laboratoire de Physique Nucléaire". Je vous financerai sur les crédits du Département et de la Faculté ».*

Le groupe qui apparaît sur la photo 1 « Promotion 1959-1960 » s'intéresse aux radiations ionisantes, y compris d'origine radioactive, détectées par la technique des émulsions nucléaires. Précisément sur le toit de l'avenue Carnot, à la nuit tombante, une machine électrostatique permet à -10000 volts, de capter les ions atmosphériques de l'avenue, qui forment les dépôts actifs de l'Uranium et du Thorium ; les trajectoires des particules alpha sont spectaculaires : l'avenue est polluée ! par le rejet de combustibles trop riches en résidus de radioactivité naturelle.

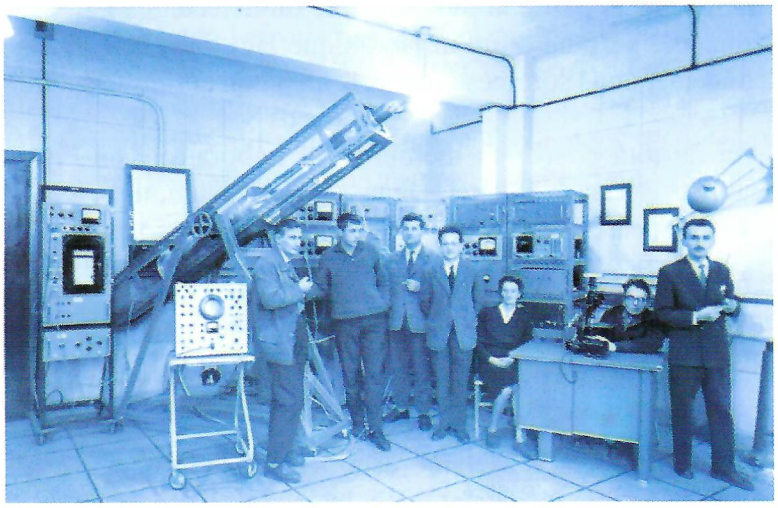


Photo 2 (voir noms en fin d'article)

La photo 2 marque une évolution, dès 1960, sous l'impulsion de **Paul Keller**, à gauche, chargé de recherche au CNRS en Physique Corpusculaire, mis à la disposition de Louis et Madeleine Avan à partir de Strasbourg par le Directeur Général du CNRS. L'équipe entreprend la réalisation symbolique d'un « télescope de Cerenkov ». Ce sera le début de l'équipement électronique du laboratoire, certes modeste, grâce aux contributions du Département de Physique et surtout à l'appui enthousiaste du Commissariat à l'Energie Atomique de Saclay personnalisé par son Directeur **Jean Debiesse**.

De plus, sur ce cliché (photo 2), apparaissent déjà les premiers Doctorants : **Pierre-Yves Bertin**, **Lionel Hugon** et, assis près du microscope, **Jean Faïn**. Le quatrième, **Guy Roche**, figure sur le premier cliché, au deuxième rang en n° 3 à partir de la gauche. A droite de la seconde photo, **Guy Durand**, professeur agrégé au lycée Blaise Pascal, a effectué un travail théorique sur le rayonnement de Cerenkov… Quatre doctorants pour un jeune laboratoire, c'est remarquable. Des projets de thèses de doctorat d'Etat furent proposées:

- à Pierre-Yves Bertin: "Un faisceau de photons de rayonnement de freinage durci en énergie" (soutenance en juillet 1966 - Présidence d'honneur: R. Hofstadter).

- à Jean Faïn: "L'émission de noyaux d'hélium 3 ou 4 d'énergie élevée dans les interactions induites par des protons d'énergie de 570 MeV" (soutenance en mars 1968 - Président: Louis Leprince-Ringuet).

- à Guy Roche: "Importance de la correction coulombienne dans le phénomène de production de paires par des rayons gamma de 2 à 20 MeV" (soutenance en mars 1968 - Président: Louis Leprince-Ringuet).

- Lionel Hugon prépare sa thèse au CERN sous la direction de **Monsieur Spieghel**.

Ces quatre thèses qui vont se finaliser, marquent déjà la volonté de développer des relations nationales et internationales. Pourtant le laboratoire est encore très jeune !

La poursuite du développement de ce laboratoire conduit les responsables à prendre la décision d'inaugurer provisoirement un programme de contrats de recherche fondamentale avec le CEA et la Direction de Recherches et Moyens d' Essais, en maintenant le cap de la spectrométrie et de la détection (notamment détecteurs solides de traces). Ces collaborations, dans leur esprit, s'accordent parfaitement avec la direction des recherches du laboratoire à cette époque : les interactions électromagnétiques, ... doivent servir et serviront uniquement au financement de postes de chercheurs - à titre provisoire en attendant leur titularisation - et à l'équipement du laboratoire.

Dans le même ordre d'idée, pendant plusieurs années, des élèves-ingénieurs CNAM sont accueillis en stage à plein temps. Le remontage de la grande chambre de Wilson et de ses bobines de champ magnétique venant du laboratoire de **Louis Leprince-Ringuet** et la réalisation d'une chambre à « streamers » sont des exemples, parmi d'autres, de leurs travaux.

Arrive l'année 1962, année commémorative du tricentenaire de la mort de **Blaise PASCAL**.

Initialement, le laboratoire n'est pas dans le « programme officiel » des manifestations. Il est soutenu par le Doyen Emmanuel Dubois, avec cependant l'accord oral - sans financement - du Doyen en exercice de la Faculté des Sciences, qui donne son haut patronage.... Des amis précieux aident à la réalisation de cette manifestation : le Doyen **Gaston Meyniel** de la Faculté Mixte de Médecine et de Pharmacie, Madame le Professeur **Louise Blanquet** et les collaborateurs des deux équipes.

Ce sera le **Congrès International de Physique Nucléaire et de Médecine Nucléaire**, en hommage à Blaise Pascal (1623 – 1662) à Clermont Ferrand du 28-06 au 03-07-1962.



Photo 3: verso de la plaquette en lave émaillée offerte à chaque congressiste.

Le CNRS sollicité met définitivement à la disposition des organisateurs un poste de secrétaire et recommande d'ouvrir un numéro de compte postal spécial du Congrès International. Le financement sera couvert par l'organisation conjointe des deux laboratoires d'une exposition de matériel scientifique et médical et même de neutronique, le tout dans les locaux de la Faculté des Sciences. Les deux équipes assurent la logistique en toute simplicité.

350 congressistes seront présents, appartenant à 37 Nations. Parmi eux:

- deux Prix Nobel : **Robert Hofstadter** de Stanford et **Cécil Franck Powell** de Bristol
- Le Recteur **Jean Roche** de l'Académie des Sciences
- **Francis Perrin** Haut-Commissaire à l'Energie Atomique
- **Bernard Grégory** futur Directeur Général du CERN
- beaucoup de membres de l'INSERM dont les Professeurs **Burgeat** et **Constant Burg**.

Le congrès s'est déroulé en deux temps :

1) Le temps nucléaire et corpusculaire (essentiellement corpusculaire). Retenons à titre d'exemples :

- La conférence de **Bernard Grégory** sur le nouveau rôle des Accélérateurs dans les sujets essentiels de physique des particules
- Les contributions de **Monsieur et Madame Chiu**, astrophysiciens sino-américains sur un sujet nouveau : « *l'astrophysique des neutrinos* »
- La conférence solennelle du Recteur **Jean Roche** sur le "*Rôle de la technologie des radiations en médecine moderne*"



Photo 4: Faculté des Sciences avenue Carnot

- La conférence de **Robert Hofstadter** sur "*l'analyse spatiale de la charge du proton par diffusion d'électrons de haute énergie*"
- La conférence d'**Etienne Borne** sur "*De Pascal à Teilhard de Chardin*".

Pour le soir les organisateurs avaient prévu un concert d'orgue. **Marcel Dupré,** Grand Maître Mondial, organiste de Saint Sulpice à Paris, Directeur du Conservatoire National de Musique, sollicité à cette occasion, avait accepté à titre gracieux en l'honneur de Blaise Pascal. La cathédrale était bondée et l'Evêque de Clermont-Ferrand donna accès au grand chœur en raison de l'afflux des scientifiques et des médecins.

Pour l'anecdote, **Francis Perrin**, rationaliste, vint se placer à droite et joyeusement près de **Monseigneur Pierre de la Chanonie** qui lui expliqua, avant le concert, l'histoire de la cathédrale et celle de ses vitraux.

2) Après une journée de repos et de visite de l'Auvergne pour certains, le deuxième temps reprit le lendemain avec la Médecine Nucléaire, cette fois dans l'amphithéâtre Chaumerliac de la Faculté de Médecine, tandis que les scientifiques avaient utilisé l'amphithéâtre Ampère et en parallèle l'amphithéâtre Fresnel.

Cette deuxième phase, tout aussi riche, fut l'occasion de discussions et d'ateliers sur « l'action médicale des radiations » : diagnostics, traitements, perspectives des nouvelles technologies : accélérateurs, générateur de neutrons, production de radio-éléments à vie brève.

Ainsi se terminait dans l'enthousiasme d'une grande communion scientifique (au sens large), le Congrès International de Médecine et de Physique Nucléaire. La réalisation et la diffusion des actes du congrès par la maison d'édition G. de BUSSAC (5 volumes) ont nécessité ensuite une année de travail.



Photo 5 - recto de la plaquette en lave émaillée

Quel fut le bilan de ce congrès de 1962 ?

Non point une « révolution scientifique » mais "*un grand moment de partage de la science qui se fait*" (Francis Perrin) et de convivialité.

Chaque congressiste reçut une "lave émaillée symboliquement illustrée" et un exemplaire , au choix, des « Pensées » ou des « Provinciales ».

Printemps 1965-1966: date cruciale pour le Laboratoire dirigé par Louis et Madeleine AVAN :

Bernard Grégory, Directeur Général du CERN effectue, au nom du CNRS, une visite d'une semaine pour analyser les objectifs et les capacités scientifiques de chacun des membres - une vingtaine de personnes -. Au terme de cette véritable "inspection", Louis AVAN est convoqué devant la Commission Nationale du CNRS. Le laboratoire, définitivement orienté vers la Physique Corpusculaire, est reconnu officiellement comme habilité à être soutenu par le CNRS : mise à disposition d'équipements importants, examen positif de nouvelles candidatures de jeunes chercheurs, et très vite, promotion de deux chercheurs devenus titulaires du Doctorat de Sciences Physiques, comme "Chargés de Recherche au CNRS", sans compter le renforcement de l'équipe par deux professeurs: Didier Isabelle et Jean Combes.

Le laboratoire s'oriente désormais, au-delà des interactions électromagnétiques, vers les interactions fortes dans le cadre de relations internationales : CERN, Darmstadt,....

Le laboratoire vit paisiblement et en plein travail les journées de mai 1968. Pendant ces événements, **Jean-Claude Montret**, nouveau doctorant, se rend à Stanford (U.S.A.) à l'invitation du Professeur Hofstadter: le lot d'émulsions nucléaires ILFORD-G5 que transporte Jean-Claude bénéficiera de son irradiation par un faisceau de muons réalisé à l'accélérateur SLAC. En septembre de la même année, **François Vazeille**, jeune ingénieur chimiste, futur pionnier du projet ATLAS, entre au laboratoire.
Toujours en 1968, se trouvent en pleine élaboration les thèses qui seront soutenues dans les années suivantes:
- **Jean-Pierre Alard**: mai 1971
- **Jacky Augerat**: juin 1972
- **Jean Castor**: novembre 1975

... avec comme membres du jury, présidents ou examinateurs invités: Hubert Reeves, Jean Yoccoz, Louis Leprince-Ringuet, H.A. Olsen (Norvège).

Louis AVAN rappelle:

"Nos responsabilités personnelles par rapport à l'Enseignement Technologique Supérieur laissent à nos collaborateurs la tâche d'animation du laboratoire... Nous rejoindrons le CNAM de Paris en 1972.



Photo 6 - Le laboratoire aux Cézeaux

*Avec beaucoup de joie, nous verrons ensuite nos brillants anciens élèves, **Jean-Claude Montret**, **Bernard Michel**, devenir Directeurs éminents d'un Laboratoire de Physique Corpusculaire désormais associé officiellement à l'IN2P3 et au CNRS, un laboratoire au rayonne-ment international: ATLAS, ALICE, LHC_b, Berkeley, Williamsburg. Nous sommes pleins d'admiration pour ce que le « Labo » est devenu .*
Ce qu'il est aujourd'hui n'a rien à voir avec ce que nous avons connu : la réalité du Laboratoire de Physique Corpusculaire d'aujourd'hui est le fruit du talent, de l'initiative, de l'imagination, de la rigueur, mis au service de projets audacieux que nous ne pouvions imaginer. D'où notre respect profond pour l'œuvre telle qu'elle se présente aujourd'hui, pour elle et pour ses acteurs : chercheurs, ingénieurs, techniciens, administrateurs : 150 personnes ! C'est magnifique.

Ce que nous avons fait, simplement :

Poser un théorème d'existence, humblement, obstinément

et

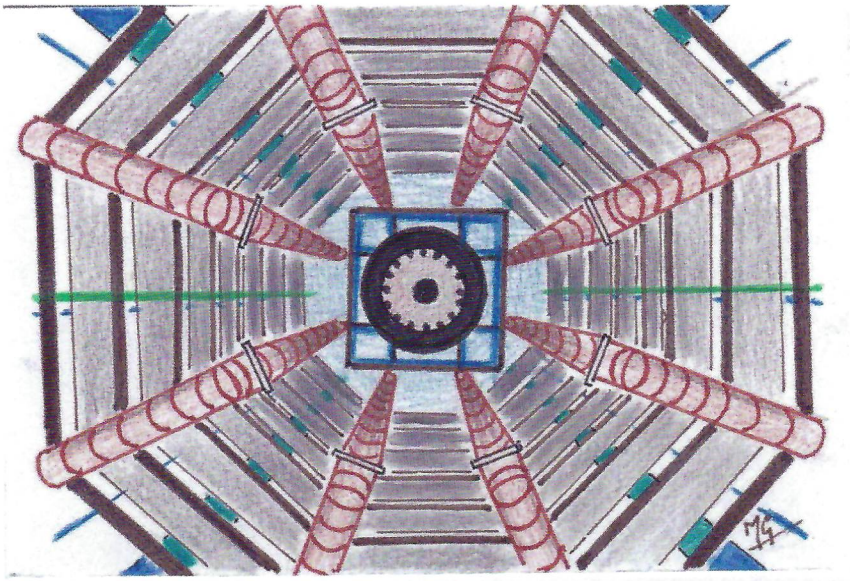
*de toutes nos forces : **SERVIR**".*

Les personnes des photos 1 et 2

Photo 1 en haut : Daniel Campedelli, Lionel Hugon, Claude Dubois, Fernand Marcheix, Michèle Hamant (partiellement masquée), Paul Keller

En bas: Marie-Claude Bosc, Anne-Marie Mérigot, Louis et Madeleine Avan, Doyen Emmanuel Dubois

Photo 2: Paul Keller, Pierre-Yves Bertin, Lionel Hugon, Louis et Madeleine Avan, Jean Faïn (assis au microscope), Guy Durand



SOUVENIR D'UNE VISITE AU LHC

Au bout de ses études, l'Homme pensa que la matière ne pouvait avoir de masse que par interaction avec un champ dont la détection du boson confirmerait l'existence. Trois théoriciens furent les pères de cette idée. Pour répondre, l'Homme décida de concentrer en un point une énergie extrême, qu'il entoura de conditions extrêmes.

Un choc frontal entre protons à peine moins rapides que la lumière ferait jaillir cette énergie. Des tubes les conduiraient à la collision dans un vide poussé, les électroaimants supraconducteurs qui les guideraient seraient proches du zéro absolu. Objets de toutes les attentions, les fugaces particules infinitésimales lâchées dans l'énergie du choc seraient observées par des yeux gigantesques, des capteurs en immeubles de cinq étages.

L'homme plaça le tout dans un tunnel circulaire, entre lac et montagne. Pour ce coup de marteau inouï, il assembla les diversités. La matière était l'hydrogène pour les protons, l'hélium pour la cryogénie et nombre d'éléments surgis du tableau périodique pour le reste. L'énergie venait par interconnexion électrique, des chutes d'eau, de la combustion du gaz fossile, de la fission de l'uranium, et du vent et des marées. L'intelligence était planétaire, venue de l'est et de l'ouest, de l'Europe et des antipodes et de l'Auvergne.

C'était il y a six ans. Aujourd'hui, un boson est détecté, et le Prix Nobel de Physique 2013 vient de récompenser les deux pères encore vivants de l'idée de départ, François Englert et Peter Higgs

Michel Gendraud

Vidal/Vichy

Louis Avan, membre de l'ADASTA,
aux lecteurs du numéro spécial d'Auvergne-Sciences: "L'Enfance de l'Univers"- Mars 2014

Dans le document final que nous avons remis pour édition le 27 février 2014, nous écrivions en page 45, nous inspirant des articles de la revue britannique "Nature/News" des 21 et 26 mars 2013:

"*La soudaineté du moment de l'inflation cosmologique* - telle que deux points de l'espace séparés de 1 mètre au début de cette inflation se retrouvent en 10^{-32} seconde séparés d'au moins 10^{27} ou 10^{28} mètres ! - *cette inflation donc devrait avoir provoqué la véritable genèse de l'espace-temps, résultant en ondes gravitationnelles. Celles-ci, en retour, devraient avoir laissé des traces dans la polarisation des photons* (du rayonnement cosmologique fossile: CMB)".

La collaboration "Planck" espérait repérer les résultats de cette polarisation en 2014… Mais nous ajoutions, suivant en cela le doute d'un des leaders du programme "Planck":

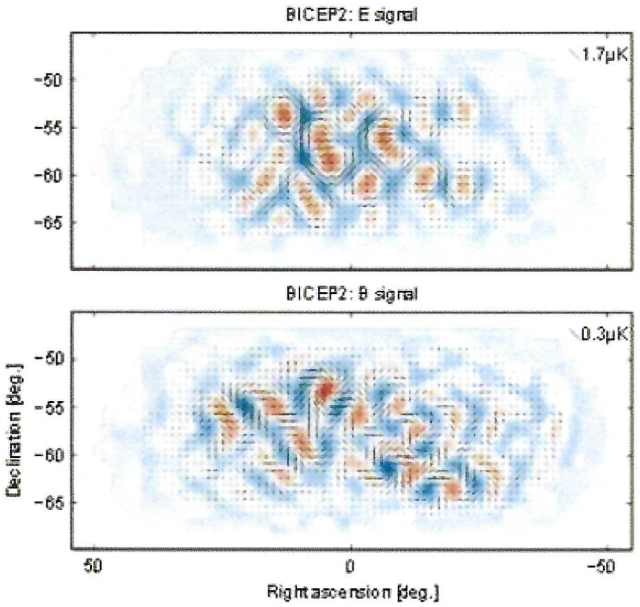
"*Mais le signal extrêmement faible de polarisation peut se trouver hors d'atteinte des détecteurs 'Planck'.*"

Or le lundi 17 mars 2014 - il y a une semaine - deux astrophysiciens américains, **John M. Kovacs** (Harvard - Smithsonian) et **Clément Pryke** (Minesota), représentant 47 astrophysiciens du programme "BICEP 2", installé sur la base antarctique "Amunsen - Scott" du Pôle Sud, ont annoncé l'essentiel des résultats obtenus en 2 années d'observations. L'article "preprint" est disponible (19 pages) sur "arxiv: 1403.3985V2". Cet article ne va pas manquer de donner lieu à des analyses critiques internationales serrées; les auteurs du programme Antarctique U.S. s'efforcent d'y parer. S'il était définitivement confirmé, il ne s'agit rien moins que de la découverte essentielle des "**ondes gravitationnelles primordiales**", que l'article intitule: "Inflationary gravitational wave" (IGW, onde gravitationnelle inflationnaire). Bien sûr il ne s'agit pas d'une mesure directe des ondes gravitationnelles, mais de leur **empreinte** dans le rayonnement cosmologique fossile.

Les photons du rayonnement cosmologique fossile (le Cosmic Microwave Background: CMB) voyagent en ligne droite: vus de face, leur champ électromagnétique $\vec{E}$, $\vec{B}$ peut osciller suivant des directions privilégiées: c'est la "Polarisation". Les ondes gravitationnelles "IGW" engendrées par l'inflation vont provoquer des "anisotropies locales", induisant notamment des processus tourbillonnaires. Les astrophysiciens de BICEP 2 ont analysé les tourbillons du mode magnétique *B*, éliminant tous les biais et artefacts possibles.

Le dispositif expérimental de BICEP 2 comporte un télescope d'ouverture 26 cm dont le "réfracteur" est logé dans un cryostat refroidi à l'hélium liquide. Son plan focal comporte 512 antennes structurées en réseau monolithique, connectées à autant de détecteurs-senseurs. Les bolomètres à 150 gigahertz sont sensibles individuellement à des températures voisines de ≈ 300 microkelvins. Enfin BICEP 2 est complété par un "SQUID": dispositif d'interférence quantique supraconducteur multiplexé.

Le ciel a été exploré au cours de 17 000 expositions réparties sur une durée totale de 590 jours. L'aire explorée: 390 degrés-carrés. Les cartes les plus profondes de polarisation CMB sont réalisées avec un bruit de fond moyen de 87 nanokelvins sur des pixels de 1° x 1°.



Conclusion: L'excès de tourbillonnage de polarisation sur le mode *B* (magnétique) est incompatible avec l'absence d'ondes gravitationnelles inflatoires, avec une significativité de 5 écarts-types.

Sauf mise en évidence, par exemple, d'une source extérieure perturbatrice, nous serions en présence d'une découverte majeure, établissant un lien profond entre gravitation quantique et relativité générale.

D'après le "preprint" soumis à publication.
(figures de polarisation de BICEP2 -
arxiv: 1403.3985V2 page 9)

Louis Avan

Le 23 mars 2014