

# Des Particules à l'Univers

L<sub>2</sub> MPM - promotion 2007  
Soutenance du 13 Juin 2008

*Astéroïdes Baptistina et l'extinction des dinosaures*  
Aude Imberdis & Lucie Le Beillan

*Radioactivité  $\alpha$  et effet tunnel*  
Laëtitia Demouiller & Isabelle Mouton

*Le Boson de Higgs*  
Vincent Bilyk & Simon Clevers

*Evolution des Galaxies*  
Aline Devillers & Emilie Havard

*Les Quasars*  
Mélissa Boulenger & Laurie Courtial

*Rayonnement fossile*  
Aymeric Haché & Camille Vauthrin

*L'antimatière*  
Antoine Gauthier

*Détection des ondes gravitationnelles*  
Pierre-Nicolas Mauger & Etienne Reith

*Formation de la terre*  
Mohamed-Amine Bekkal

*Les accélérateurs de particules*  
Cheikh maoualainine Larabas

*L'évolution de l'Univers*  
Caroline Delabye



# Astéroïdes Baptistina et l'extinction des dinosaures

Imberdis Aude  
Le Beillan Lucie

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub> MPM, Promotion 2007-2008.*

## Abstract

The study of the sementary layer of the K-T boundary, as well as the study of the phenomena linked to the dinosaurs' extinction, get the researchers to think about a meteorite impact. It comes from the Baptistina family, which was created 160 millions years ago. Because of the Kirkwood gaps and the Yarkovsky effect, this meteorite left his orbit and followed a trajectory to the Earth. 65 millions years ago, it crashed in Chicxulub

## 1. Introduction.

L'extinction des Dinosaures, mais aussi des fougères géantes et des ammonites à la fin du Secondaire fut provoquée par un phénomène à l'échelle astronomique qui modifia l'écosystème pendant plusieurs milliers d'années, déversant d'énormes quantités de gaz carbonique dans l'atmosphère et ensevelissant les terres sous des millions de tonnes de cendres. Cette extinction massive d'environ 70% des espèces vivantes, datant d'il y a 65 millions d'années, marque la limite entre le Crétacé et le Tertiaire (notée K- T). L'une des hypothèses avancées est l'action conjointe des gigantesques éruptions basaltiques du Deccan en Inde et de l'impact d'un petit corps céleste de 10 km de diamètre, plus probablement un astéroïde qu'une comète, dont l'effet sur une biosphère déjà éprouvée par les épanchements basaltiques des Trapps du Deccan a été déterminant pour la crise K-T.

La chute d'une météorite, sur la Terre à la fin de l'ère secondaire (Crétacé), aurait provoqué de multiples incendies, et de la poussière qui envoyée dans l'atmosphère a diminuée le rayonnement solaire ayant pour conséquences de bloquer la photosynthèse et de refroidir la surface de la Terre durant près de 10 ans. S'ajoute à ce cataclysme le fait que l'acide sulfurique en suspension dans l'atmosphère créa une diminution de la quantité d'ozone et déversa sur le monde une pluie acide durant des années, acidifiant la surface des océans et tuant les derniers végétaux qui avaient survécus.

Au cours de notre exposé, les objets célestes prendront différents noms selon leur localisation : météorites, lorsqu'ils ont traversé l'atmosphère terrestre, et astéroïdes lorsqu'ils sont situés dans l'univers.

De plus, nous traiterons seulement l'impact de la météorite sur la Terre, et très peu des conséquences biologiques.

## 2. Preuves d'un impact météoritique.

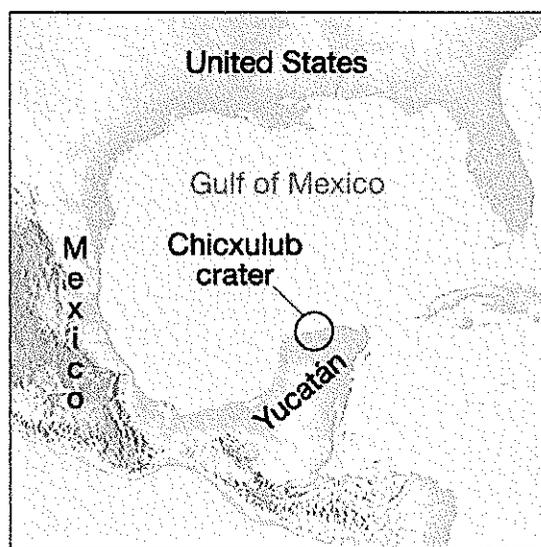
Une fine couche de sédiments a été observée à la base des argiles noires de la limite Crétacé Tertiaire. L'étude détaillée de cette couche a permis aux chercheurs de découvrir de nombreux indices d'un impact météoritique à cette période.

Une des premières preuves apportée par les chercheurs est l'apport brutal et massif d'iridium pendant cette période. Sur Terre la concentration en iridium est en moyenne de  $0,05\mu\text{g}/\text{kg}$  dans la croûte terrestre, elle est donc très pauvre en ce métal, contrairement aux météorites qui sont jusqu'à 10000 fois plus concentré en iridium. Cette singularité a été découverte en plusieurs endroits sur la Terre (au Canada, aux Etats Unis, en Espagne, en France, dans les Balkans, en chine et en Nouvelle Zélande) en 1980 par les chercheurs de Caltech et les Alvarez (le père, Luis, qui a reçu un prix Nobel de physique et Walter). Ils avancent alors l'hypothèse qu'une météorite de 10km de diamètre, tombée sur la Terre il y a 65 millions d'années, aurait fait passer la quantité d'iridium de 0,03 parties par milliard à 500 parties par milliard.

A la suite de cette découverte, d'autres études et analyses ont été effectuées sur d'autres traces d'éléments rares comme le Platine, le rhénium, l'osmium et le nickel. Il a alors été remarqué que leur concentration était anormale par rapport à celle trouvée habituellement sur la croûte terrestre.

Le rapport iridium/argent calculé est identique à celui des chondrites carbonées de type I : Ce sont les météorites les plus primitives, très voisines de l'abondance en éléments de la nébuleuse présolaire. Elles sont composées en général d'environ 40% d'olivine, 30% de pyroxène, 10% de plagioclases (éléments communs avec toutes les chondrites carbonées) et 3 à 5% de carbone, 20% d'eau qui est spécifique à ce type de chondrites. [1]

On été trouvés également dans la couche de sédiments, de nombreux quartz choqués : ce sont des petits grains de quartz dans lesquels on trouve des défauts de cristallisation. Leur structure clivable est connue pour les quartz ayant subi un choc important. Dans une vaste zone autour du point supposé de l'impact, les argiles de la limite K-T contiennent des quartz présentant un aspect particulier au microscope. Les fines stries entrecroisées sont le témoignage d'une modification de la structure cristalline sous l'effet d'un choc intense.



**Fig. 1** : localisation du cratère dans la péninsule du Yucatan

Enfin, la preuve la plus significative fut la découverte, en 1991, d'un cratère situé sur la péninsule du Yucatan au Mexique (Fig. 1). Une équipe américaine de l'Université Rhodes Island observe de grandes quantités de sphérules près de Haïti et en concluent que le lieu d'impact était le cratère de Chicxulub. Les impactites, les roches issues de la collision de météorites avec la Terre, ont été étudiées et datées par la méthode  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  qui donne un âge de 65 millions d'années. Les chercheurs ont évalué qu'un tel cratère avait dû être creusé par une météorite de 10 à 12km de diamètre percutant la Terre sous un angle de 20 à 30 degrés et à 20 km par seconde. Le diamètre initial a été estimé à plus de 260 km.

Ces indices sont considérés comme des preuves d'un impact météoritique. Selon Stephen K. Donovan de l'Université jamaïcaine des West Indies : « l'extinction massive du Crétacé-Tertiaire ne pourrait pas être attribuée à une cause terrestre ». En 1990, D Raup publia une courbe d'extinction des espèces en fonction du diamètre du cratère d'impact. Mais un seul cratère correspondait à un tel phénomène : celui de Chicxulub.

De plus une autre découverte a permis d'établir que cette météorite, qui s'est écrasée sur le site de Chicxulub il y a 65 millions d'années, aurait 90% de chance d'avoir été le résultat de l'impact d'un des géocroiseurs de la famille des Baptistina.

### 3. Création et étude de la famille Baptistina.

Les membres d'une équipe de recherche, dont les Dr. William Bottke et David Nesvorný du SwRI (Southwest Research Institute) de l'Université de Boulder dans le Colorado ainsi que le Dr. David Vokrouhlický de l'université Charles de Prague, se sont intéressés en 1991 à l'étude d'un amas d'astéroïdes qu'ils décident d'appeler Baptistina.

Les familles d'astéroïdes sont définies par Patrick Michel, spécialiste des petits corps du système solaire à l'observatoire de Nice, comme étant des objets célestes partageant les mêmes propriétés spectrales. Leur composition et caractéristiques proches sont un signe montrant leur appartenance à une même famille.

Le travail de ces chercheurs était en particulier de déterminer comment les fragments de Baptistina ont affecté la Terre et la Lune. Ils ont listé plusieurs centaines de membres dans la famille, puis les ont classés selon leur taille et leur distance au soleil. Un constat fut établi par William Bottke : « *là sur notre diagramme, nous avons littéralement vu un trou* » [2]. Ce qui l'amena à déduire que des astéroïdes manquaient.

Afin de déterminer leur trajectoire, des simulations sur ordinateur ont accompagné les observations pour étudier l'évènement de rupture de Baptistina et ses conséquences. Celles-ci consistent en un modèle qui simule des collisions entre astéroïdes à partir d'autres collisions déjà connues, de la connaissance des mouvements, des masses et des tailles des objets composant la famille, et des données orbitales.



**Fig.2** fragmentation de l'astéroïde et création de la famille Baptistina

Grâce à ces simulations, les membres de l'équipe ont pu déterminer le scénario de la création de la famille.

Il y a 160 millions d'années, un petit astéroïde d'environ 60 km de diamètre entre en collision, à plusieurs milliers de km/h avec un congénère beaucoup plus massif, de 170 km de diamètre (fig. 2). Elle s'est produite dans la région la plus interne de la ceinture principale d'astéroïdes, entre les planètes Mars et Jupiter. Celui de 170 km a explosé en fragments qui commencent à se disperser d'où la création de la famille Baptistina. Elle compte selon les estimations, plus de 300 corps de plus de 10 km et 140000 corps de plus de 800 mètres qui ont des orbites similaires.

Les chercheurs ont abouti à cette conclusion en analysant les données de plusieurs fragments de cet objet dont celui de l'astéroïde 298 Baptistina : le vestige du plus gros astéroïde de cette famille, a été découvert par Auguste Charlois, un astronome français de l'observatoire de Nice, le 9 septembre 1890. Cet astéroïde principal qui a un diamètre de 40 km de large, se situe dans la Ceinture des astéroïdes.

**Tab.1** *Caractéristiques de 298 Baptistina : (déterminées en août 2005)*

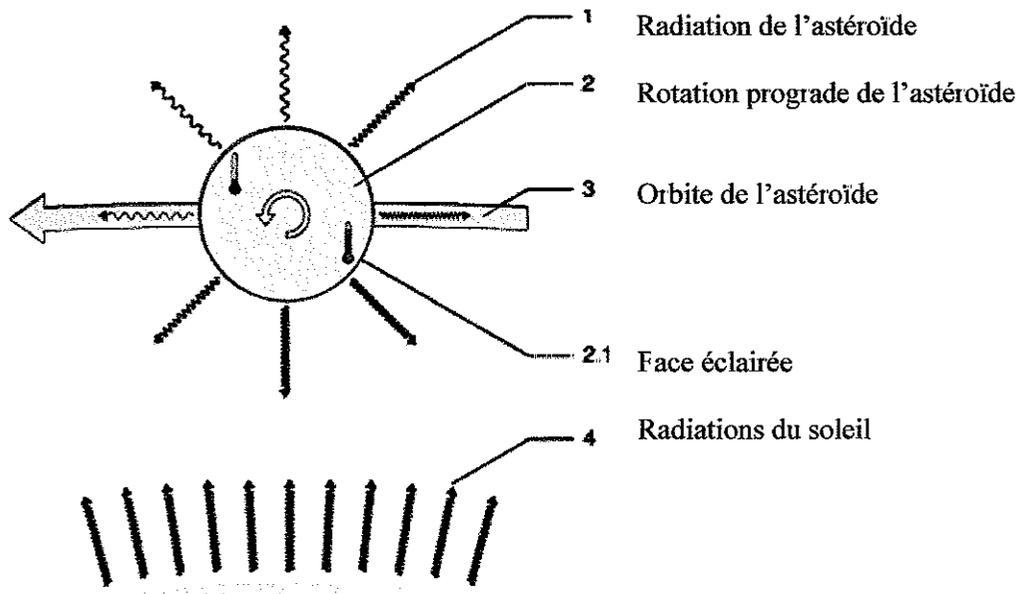
Demi grand axe	2,264 ua
Aphélie	2,480 ua
Périhélie	2,047 ua
Excentricité	0,096
Période de révolution	3,406 ans
Vitesse orbitale moyenne	19,75 km/s
Inclinaison	6.28°

#### 4. Déviation de l'astéroïde sur Terre.

Après leur création dans la ceinture principale d'astéroïdes, les différents fragments de cette nouvelle famille ont dévié de leur trajectoire à cause de l'effet Yarkovsky<sup>1</sup>. La simulation du groupe de recherche du SwRI est un meilleur modèle que les précédents, car il tient compte de cet effet.

Les orbites évoluent lentement en raison des forces thermiques produites quand les astéroïdes ont absorbé la lumière du soleil et réémis l'énergie sous forme de chaleur (fig. 3). En effet, les radiations venant du soleil éclairent une seule face de l'astéroïde ce qui entraîne une différence de température avec la face non éclairée. Il y a par conséquent différence entre les quantités de chaleur réémises par l'astéroïde ; plus de photons sont reçus sur la face éclairée et donc plus d'énergie est réémise. Ceci permet une rotation prograde de l'astéroïde, c'est à dire qu'il effectue une rotation dans le même sens que son mouvement orbital. Agissent alors sur lui, des forces et des couples qui modifient lentement sa trajectoire et sa vitesse de rotation. Cet effet se produit sur des astéroïdes qui ont un diamètre inférieur ou égal à 20km, ce qui correspond au diamètre de l'astéroïde de la famille des Baptistina qui s'est écrasé à Chixculub.

<sup>1</sup> Consulter le site internet WIKIPEDIA et FUTURA-SCIENCES



**Fig.3** schéma de l'effet Yarkovsky

Les différents fragments ont en conséquence migrés sous cet effet et 20% de plus de 1 km de diamètre ont atteint une zone où l'influence de la gravité de Mars et Jupiter modifie les orbites et entraîne ces objets hors de la ceinture d'astéroïdes.

La distribution des demi grands axes des astéroïdes (assimilables à leur période orbitale, lorsque leur excentricité est faible) fait apparaître des zones clairement dépourvues d'astéroïdes, appelées Lacunes de Kirkwood<sup>2</sup>.

Ces lacunes apparaissent pour les demi grands axes de l'astéroïde où le rapport entre sa période et celle de Jupiter est une fraction entière. Il y a ainsi résonance dans la ceinture principale d'astéroïdes entre Mars et Jupiter.

Les lacunes principales se produisent en résonances 3:1, 5:2, 7:3 et 2:1. Par exemple un astéroïde situé dans la lacune 5:2 tourne 5 fois autour du soleil, pendant que Jupiter n'a fait que 2 tours. La région centrale de la ceinture d'astéroïdes peut être divisée en trois zones:

- la zone I s'étend de la résonance 4:1 soit un demi grand axe de 2,06 ua à la résonance 3:1 (2,5 ua)
- la zone II part de la fin de la résonance 3:1 à la résonance 5:2 (2,82 ua)
- la zone III de la résonance 5:2 à la résonance 2:1 (3,8 ua)

La famille d'astéroïdes Baptistina se trouvant dans la zone I (son demi grand axe étant de 2,264 ua), certains astéroïdes ont pu être éjectés de la ceinture d'astéroïdes vers la région interne du système solaire à cause des résonances 4:1 ou 3:1.

En particulier, un fragment de 10 à 20 km de diamètre a pénétré dans l'atmosphère terrestre entre 20 et 60 km/s et s'est écrasé dans la péninsule du Yucatan, 100 millions d'années après la fragmentation de la famille. Aucune échelle n'étant établie pour l'intensité de l'impact des météorites, la comparaison a été faite avec l'intensité de l'explosivité des volcans. Ainsi l'intensité de l'impact a été évaluée à VEI 8. L'Indice d'Explosivité Volcanique (VEI) est une échelle logarithmique qui va de 0 à 8.

De plus, l'énergie dégagée lors de sa collision avec la Terre est estimée à cent mille milliards de tonnes ( $10^{15}$  tonnes) de TNT soit  $4,6 \cdot 10^{24}$  Joule.

<sup>2</sup> Consulter le site internet WIKIPEDIA

## 5. Conclusion.

Les simulations mathématiques de l'équipe de recherche du SwRI ont également montré qu'il y avait une probabilité de 70% pour que le cratère lunaire Tycho, un cratère de 85 kilomètres qui s'est formé il y a 108 millions d'années, avait été également produit par un grand fragment de Baptistina. D'autres astéroïdes ont frappé les planètes Mars et Vénus.

Leurs analyses des impacts sur la Terre et la Lune suggèrent qu'entre -200 et -100 millions d'années, le nombre des impacts d'astéroïdes de plus de 1 kilomètre de diamètre a doublé. Selon Patrick Michel à chaque fois que l'on a une collision de grande ampleur dans la ceinture d'astéroïdes, il se produit ensuite une augmentation des impacts météoritiques dans le système solaire interne. Le travail des membres de l'équipe de Bottke confirme ainsi l'hypothèse selon laquelle le Soleil, Mercure, Vénus, Mars, la Terre et la Lune auraient subi une telle augmentation à la suite de la formation de la famille Baptistina.

## Références

- [1] A. Carion, *Les météorites et leurs impacts*, collection S, 1993.
- [2] W. Bottke, extrait d'une interview dans l'article sur la famille Baptistina publiée dans la revue, *Sciences et Vie*, 1083, 74-80, 2007.
- [3] article, "An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor," publié dans l'édition du 06 Septembre 2007 de *Nature*.

# Radioactivité alpha et effet tunnel

Demouiller Laëtitia  
Mouton Isabelle

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008.*

## Abstract

The tunnel effect was discovered in 1928 by George Gamow in order to explain the fact that a particule alpha can escape from the kernel of the atom during the radioactivity alpha, while the strengths of attraction of the kernel are very strong

## 1. Introduction.

En mécanique quantique l'effet tunnel est un phénomène permettant à une particule de franchir une barrière de potentiel infranchissable en mécanique classique. Ce phénomène fut introduit par Gamow en 1928 pour expliquer la radioactivité alpha. Indépendamment de Cordon et Gamow, le prix Nobel de physique a été remis, en 1986, à Heinrich Rohrer et Gerd Binnig pour leur travaux sur l'effet tunnel et l'application qu'ils ont inventaient en 1981 : le microscope à effet tunnel .

## 2. Historique : de la mécanique ondulatoire à la mécanique quantique

Louis de Broglie, en 1924, grâce à son hypothèse de dualité onde corpuscule, fournit les bases de la nouvelle théorie en quelque sorte la réciproque du postulat d'Einstein selon lequel, la lumière possède une structure ondulatoire et corpusculaire qui pouvait se manifester, selon les circonstances, soit comme une particule, le photon, soit comme une onde électromagnétique. De Broglie a été frappé par l'hypothèse de Bohr affirmant que les atomes ne sont stables que si les électrons occupent des orbites « stationnaires » correspondant à des états d'énergie discontinus. Pour lui, ces orbites évoquent les ondes stationnaires, telles que celles qui peuvent être observées pour la lumière. Comme cette dernière présente une structure corpusculaire à ses propriétés ondulatoires, pourquoi l'électron et avec lui toute autre particule ne posséderait-il pas une structure ondulatoire associée à ses propriétés corpusculaire ? Ainsi, toute particule en mouvement se propagerait également à la façon des ondes. Par analogie avec le photon, Louis de Broglie associa ainsi à chaque particule libre d'énergie  $E$  Eq. (1) et de quantité de mouvement  $p$  Eq. (2) fonction d'une fréquence  $\nu$  et d'une longueur d'onde  $\lambda$ .

$$\begin{cases} E = h\nu & (1) \\ p = \frac{h}{\lambda} & (2) \end{cases}$$

Cependant, dans le cas d'un corpuscule de matière, ce n'est plus une vibration lumineuse, ni un champ électromagnétique qui se propage, mais une grandeur physique, qui sera appelée « fonction d'onde ». Par analogie avec l'optique géométrique, de Broglie pose les premiers principes d'une nouvelle mécanique applicable aux mouvements des corpuscules, mais, de son propre aveu, cette théorie nouvelle doit être améliorée.

En 1925 l'Autrichien Erwin Schrödinger exauce le souhait de Louis de Broglie. Il développe mathématiquement l'analogie entre le mouvement d'une particule et la propagation d'une onde, et obtient la fameuse équation Eq. (3) qui porte son nom qui permet de calculer comment se propagent ces « ondes de matière », et remplit ainsi le même rôle que la relation fondamentale de la dynamique en mécanique classique.

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V\psi = E\psi \quad (3)$$

L'interprétation physique correcte de la fonction d'onde de Schrödinger ne fut donnée qu'en 1926 par Max Born. En raison du caractère probabiliste qu'elle introduisait, la mécanique ondulatoire de

Schrödinger suscita initialement de la méfiance chez quelques physiciens de renom comme Albert Einstein, pour qui « Dieu ne joue pas aux dés ».

Cette équation sera utilisée quelques années plus tard par Gamow pour exprimer mathématiquement l'effet tunnel.

### 3. Radioactivité alpha

En 1898 Rutherford a découvert que la radiation du sel d'uranium a deux composantes, nommés rayon  $\alpha$  et  $\beta$ . Ils sont identifiés plus tard comme les noyaux d'hélium pour les rayons  $\alpha$ , et les électrons pour les rayons  $\beta$ . En effet il a fallu dix ans afin que Rutherford puisse conclure que les rayons  $\alpha$  sont des atomes d'hélium doublement ionisés. Pour cela il s'est basé sur les mesures du rapport  $e/m$  et de la charge électrique des particules  $\alpha$ , ainsi que sur l'observation du spectre caractéristique de l'hélium. Il fait passer des rayons  $\alpha$  dans un tube à décharge et étudie les raies spectrales produites, il en conclut que le rayonnement  $\alpha$  est constitué de noyaux d'hélium. La source de particules  $\alpha$  la plus connue est le radium, découvert par Marie Curie, utilisé par Rutherford pour son expérience de diffusion précédemment décrite.

L'origine de la radioactivité  $\alpha$  est une instabilité globale du noyau de l'atome qui se stabilise en éjectant ces deux protons et deux neutrons. La désintégration  $\alpha$  se caractérise par Eq. (4):



Au cours de la désintégration  $\alpha$ , un noyau lourd instable  $X$  expulse deux noyaux plus légers : un noyau d'hélium que nous appelons particule  $\alpha$  et un noyau fils, généralement dans un état plus excité que nous notons  $Y$ .

Par exemple l'uranium 238  $U$  peut se désintégrer, selon Eq. (5), en un noyau fils le thorium 234  $Th$  et en un noyau d'hélium  $He$ .



La désintégration  $\alpha$  vérifie :

- la conservation du nombre de charges donc  $Z=Z'+2$
- la conservation du nombre de masse d'où  $A=A'+4$

La radioactivité  $\alpha$  concerne, mise à part quelques exceptions, tous noyaux lourds à partir du numéro atomique  $Z$  égal à 82 et dont le nombre de masse atomique  $A$  est supérieur à 200.

La référence au site Internet est placée en note de bas de page<sup>1</sup>

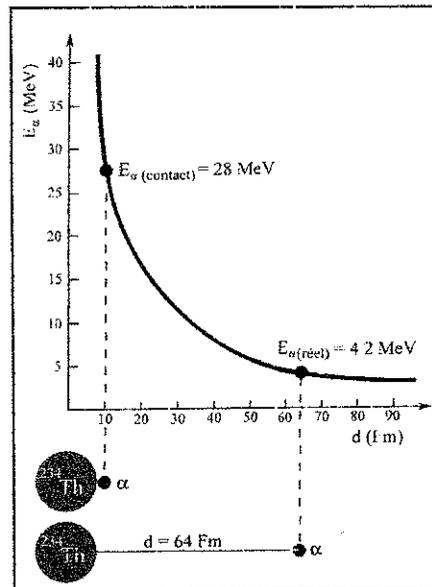
### 4. Découverte de Gamow

Bien avant 1920, l'énergie des particules  $\alpha$  avait été mesurée, grâce à leur déviation par de puissants aimants. Pour l'uranium 238, par exemple, on avait trouvé une valeur de 4,2 millions d'électronvolts (4,2 MeV). On savait, par ailleurs, que ces particules étaient émises par un noyau de charge initiale positive et égale, en valeur absolue, à 92 fois celle de l'électron ( $Z_U = 92$ ). Dès que la particule alpha, de charge également positive ( $Z=2$ ) était sortie de ce noyau, elle avait subi une puissante répulsion électrostatique de la part du noyau restant, de charge  $Z_r=90$ . Cette répulsion était à l'origine d'au moins une partie de l'énergie cinétique observée pour cette particule.

Ils constatèrent que l'explication du phénomène était correcte, mais lorsque l'on tentait d'expliquer qualitativement l'énergie observée, les valeurs expérimentales ne correspondaient pas aux valeurs théoriques. En effet, l'énergie due à la répulsion électrostatique pouvait facilement être calculée puisque la force électrique avait agi depuis la séparation des deux corps chargés, la particule  $\alpha$  et le noyau fils  ${}^{234}Th$ . Mais, compte tenu de la dimension de celui-ci, que l'on pouvait estimer d'après les expériences de Rutherford, et les études qui avaient suivi, le calcul montrait que la seule répulsion électrostatique aurait dû communiquer aux particules  $\alpha$  une énergie d'environ 28 millions d'électronvolts, plus de six fois supérieure à celle que l'on observait. L'énergie réelle, de 4,2 MeV, correspondait à une répulsion électrostatique qui aurait commencé, non pas lorsque la particule était encore en contact du noyau fils, mais lorsqu'elle s'en était déjà éloignée d'une distance de  $64 \cdot 10^{-15}$  m,

<sup>1</sup><http://belpois.chez-alice.fr/dossiers/mecaq/index.php>

égale à environ six fois le rayon du noyau de  $^{234}\text{Th}$ . Tout se passait donc comme si la particule  $\alpha$  s'était « matérialisée » à cette distance du noyau comme nous pouvons le voir (Fig. 1). Ce raisonnement aboutissait à une impossibilité, une nouvelle énigme



**Fig. 1 :** Répulsion électrique dans l'émission alpha

La courbe représente l'énergie potentielle d'une particule  $\alpha$  dans le champ de répulsion électrostatique d'un noyau de thorium 234 en fonction de la distance séparant ces deux corpuscules. Elle indique que si la particule subissait la répulsion électrique du noyau  $^{234}\text{Th}$  qu'elle vient de quitter à partir de la distance de 10 fm correspondant à la somme des rayons des deux partenaires, elle serait observée (très loin de ce noyau) avec une énergie cinétique égale à 28 MeV. Son énergie cinétique réelle (4,2 MeV) indique qu'elle n'a subi la répulsion électrostatique qu'à partir d'une distance d'environ 64 fm.

Ainsi à l'intérieur du noyau, la particule alpha est soumise à de très importantes forces nucléaires. La forme exacte du potentiel à l'intérieur du noyau (région où la particule alpha est fortement attirée par ce dernier), est inconnue. Nous allons admettre que le potentiel dû au noyau est nul au-delà du rayon  $R$  du noyau. En dehors du noyau, la force dominante est la force de Coulomb. Sachant qu'après la désintégration la particule fille porte la charge  $Z'e$  (où  $Z=Z'+2$  est le nombre de charges de la particule mère, puisque la particule alpha porte la charge  $2e$ ), le potentiel de Coulomb auquel est soumise la particule alpha est, en fonction de sa distance  $r$  au centre du noyau

Cette énigme que la mécanique classique s'avérait incapable d'expliquer, la mécanique ondulatoire allait la résoudre, et c'est au physicien russe George Gamow que reviendrait le mérite de cette explication. Gamow élabore une théorie de l'émission  $\alpha$  en partant des hypothèses que la particule préexiste au sein du noyau d'uranium et qu'elle possède une structure ondulatoire. Tant que la particule  $\alpha$  reste à l'intérieur du noyau d'uranium, elle se comporte comme une onde prisonnière de ce noyau. Mais la seule prison qui puisse retenir une onde est un puits de potentiel. Dans le cas d'un système composé de la particule  $\alpha$  et du noyau fils  $^{234}\text{Th}$  dans le noyau de  $^{238}\text{U}$ , ce puits est creusé au sommet d'une « butte » de potentiel représentant l'énergie électrostatique de répulsion dont nous avons parlé ci-dessus. Un tel puits symbolise une attraction. Ici, il s'agit de celle que subit la particule  $\alpha$  de la part de l'ensemble du noyau auquel elle appartient que l'on peut représenter par la (Fig. 2)

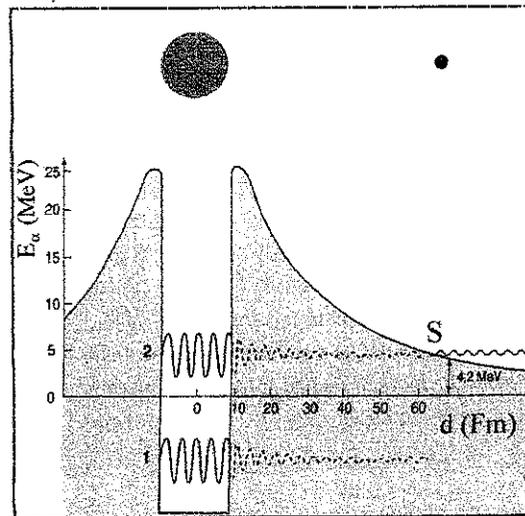


Fig. 2 : Emission  $\alpha$  par effet tunnel.

L'onde de matière représentant la particule  $\alpha$  est donc prisonnière dans ce puits de potentiel comme une onde lumineuse qui serait piégée entre deux miroirs. Elle va d'un bord à l'autre, et les réflexions qui se succèdent aboutissent à la formation d'une onde « stationnaire ». Ce sont les propriétés de cette onde stationnaire qui réagissent celles de la particule  $\alpha$  à l'intérieur du noyau. En effet, contrairement à un corpuscule classique, qui se heurterait indéfiniment aux murs de sa prison sans jamais pouvoir s'évader, l'onde a une probabilité, faible mais non nulle, de pénétrer à l'intérieur du mur de potentiel délimitant sa prison. Cependant, elle se retrouve alors avec une énergie négative, ce qui implique que son amplitude va diminuer exponentiellement en fonction de l'espace parcouru. C'est ce que l'on appelle une onde « évanescente ».

Grâce à sa nature ondulatoire, la particule  $\alpha$  peut s'échapper du puits de potentiel où elle est retenue prisonnière par les forces nucléaires en traversant la barrière de potentiel sous forme d'une onde « évanescente ». Elle ne subit la répulsion électrostatique qu'à « sa sortie du tunnel », c'est-à-dire à partir d'une distance de 64Fm.

Deux cas de figure vont maintenant se présenter, selon l'énergie que possède la particule  $\alpha$  au sein du noyau, cette dernière étant comptée en prenant comme référence le fond du puits.

- Si cette énergie est telle qu'elle correspond à une énergie négative à l'extérieur du noyau (cas 1, Fig. 2), l'onde évanescente va effectivement s'évanouir dans les profondeurs du mur de potentiel. La particule ne sera jamais émise.
- En revanche, si cette énergie correspond à une énergie positive à l'extérieur du noyau (cas 2, Fig 2), l'amplitude de l'onde « évanescente » diminuera jusqu'à un point S où la particule retrouverait une énergie positive. En atteignant ce point, l'onde redevient une onde normale, qui se propage avec une amplitude constante. Le carré de cette amplitude en un point donné fournit la probabilité de présence de la particule en ce point. Cette probabilité sera sans doute faible, mais non nulle. Grâce à sa nature ondulatoire, la particule  $\alpha$  a réussi à franchir la barrière de potentiel qui s'opposait à la sortie. Elle reparait « à l'air libre » très loin du bord du noyau, conformément à ce que laissait supposer la mesure de son énergie cinétique. La particule semble s'être évadée en creusant un tunnel. C'est pourquoi cet effet a été appelé « effet tunnel ».

La théorie de Gamow expliquait, non seulement l'énergie des particules émises, mais aussi les principales caractéristiques de l'émission alpha. Le calcul montrait qu'au sein d'un noyau d'uranium, une particule  $\alpha$ , ou plutôt son onde associée, se heurtait des milliards de fois par seconde aux murs de sa prison. A chaque fois, elle avait une probabilité infinitésimale de s'échapper, d'après l'interprétation de Gamow cette probabilité dépend fortement de la largeur de la barrière de potentiel traversée. Plus celle-ci est faible plus la probabilité de sortie est forte. Cela signifie que lorsque la particule  $\alpha$  part de haut dans le puits de potentiel, ses chances de s'échapper sont considérablement

accrues. Le caractère hypothétique de l'émission  $\alpha$ , c'était la preuve tangible de la validité des hypothèses de la mécanique quantique

## 5. Effet tunnel

Au niveau théorique le comportement tunnel n'est pas fondamentalement différent du comportement classique de la particule quantique face à la barrière de potentiel (Fig3); elle satisfait à l'équation de Schrödinger, équation différentielle impliquant la continuité de la fonction d'onde et de sa dérivée première dans tout l'espace. De même que l'équation des ondes électromagnétiques mène au phénomène des ondes évanescentes, de même la fonction d'onde rencontre des cas où l'amplitude de probabilité de présence est non nulle dans des endroits où l'énergie potentielle est supérieure à l'énergie totale.

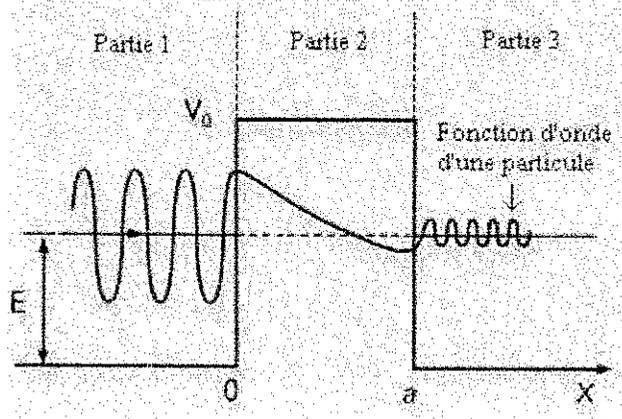


Fig. 3 : Barrière de potentiel

Lorsque la propagation se fait selon l'axe Ox l'équation de Schrödinger indépendante du temps peut se réécrire sous la forme de l'équation Eq. (6).

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V)\psi = 0 \quad (6)$$

Les solutions de cette équation sont respectivement pour les parties 1, 2 et 3 les équations Eq. (7), Eq. (8) et Eq. (9).

- Pour la partie 1

$$\psi = a_1 e^{jk_1x} + a_2 e^{-jk_1x} \text{ avec } k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (7)$$

- Pour la partie 2

$$\psi = b_1 e^{K_1x} + b_2 e^{-K_1x} \text{ avec } K = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} \quad (8)$$

- Pour la partie 3

$$\psi = c_1 e^{jk_2x} + c_2 e^{-jk_2x} \text{ avec } k_2 = k_1 = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (9)$$

Où  $E$  est l'énergie cinétique et  $m$  la masse de la particule  $\alpha$  et  $V_0$  est la hauteur de la barrière. Selon la mécanique quantique, la probabilité de transmission est égale au carré du rapport des amplitudes de ondes propagées vers la droite après et avant la barrière selon l'équation Eq. 10.

$$T = \left| \frac{c_1}{a_1} \right|^2 \quad (10)$$

Qui peut être calculée en appliquant les conditions de continuité aux deux limites de la barrière  
L'expression est une équation complexe de  $k_1$ ,  $k_2$  et  $K$  et l'épaisseur  $a$  de la barrière.

## 6. Conclusion

Si, au niveau mathématique l'évaluation de l'effet tunnel peut parfois être simple, l'interprétation que l'on cherche à donner aux solutions révèle le fossé qui sépare la mécanique classique, domaine du point matériel suivant une trajectoire définie dans l'espace-temps, de la mécanique quantique où la notion de trajectoire simple disparaît au profit de tout un ensemble de trajectoires possibles, dont des trajectoires où le temps apparaît complexe ou imaginaire pur ... où les vitesses deviennent imaginaires. On notera à ce propos que la durée de traversée tunnel d'une particule à travers une barrière quantique a été, et est encore, le sujet d'âpres discussions.

## Références

[1] R. Bimbot, *Histoire de la radioactivité*, Vuibert/Adapt, 2006

# Le Boson de Higgs

Vincent Bilyk et Simon Clevers

Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008

## Abstract

Born in the early fifties, the standard model is the theory which sums up the present state of our knowledge in particle physics. But this theory asserts that particles might exist with or without mass. It also predicts phenomena with a probability of over one hundred per cent, which would be a nonsense. In order to make up for those weaknesses, physicists Brout, Englert and Higgs have conceived of a particle, called Higgs boson, which - through its field - is capable of giving mass to all particles as well as to itself. The coherence of the model now depends on this boson. So in a little while, with the bringing out of the powerful LHC, a particle accelerator, we'll soon know whether the boson is a mere fantasy or the key to modern physics.

## 1. Introduction ou le Boson de Higgs : une nécessité du modèle standard

### 1.1 Qu'est-ce que le modèle standard ?

Développé depuis le début des années 50, ce modèle théorique de la physique des particules a pour but d'expliquer les interactions entre celles-ci et les différentes forces qui gouvernent la nature. Ce modèle néglige cependant la plus faible des quatre forces fondamentales connues à ce jour, à savoir l'interaction gravitationnelle qui n'a quasiment aucune influence sur les particules en raison des très faibles masses mises en jeu. Mais il décrit d'une manière encore jamais égalée les trois autres interactions qui sont la force forte (responsable de la cohésion du noyau), la force faible (responsable par exemple de la désintégration Béta) et la force électromagnétique (qui permet entre autre la formation de molécules). Ces deux dernières interactions sont unifiées au sein du modèle standard en une seule et même force appelée « électrofaible ». C'est en cette unification que réside la nécessité d'introduire le boson de Higgs.

Tab. 1 : Principales particules élémentaires du modèle standard<sup>1</sup>

### • TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •

Matière		ATOME	NOYAU	NUCLÉONS (Protons & Neutrons)	Quarks
FERMIONS		LEPTONS <small>peuvent se déplacer librement</small>		QUARKS <small>particules de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.</small>	
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe</p> <p>Première Famille</p>	<p><b>ELECTRON</b></p> <p>Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p>	<p><b>NEUTRINO ELECTRON</b></p> <p>Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.</p>	<p><b>BAS</b></p> <p>Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.</p>	<p><b>HAUT</b></p> <p>Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.</p>	
	<p><b>MUON</b></p> <p>Un compagnon plus massif de l'électron.</p> <p>Deuxième Famille</p>	<p><b>NEUTRINO MUON</b></p> <p>Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p>	<p><b>ETRANGE</b></p> <p>Un compagnon plus lourd du "Bas".</p>	<p><b>CHARME</b></p> <p>Un compagnon plus lourd du "Haut".</p>	
	<p><b>TAU</b></p> <p>Un compagnon encore plus lourd que le Muon.</p> <p>Troisième Famille</p>	<p><b>NEUTRINO TAU</b></p> <p>Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p>	<p><b>BEAUTÉ</b></p> <p>Un compagnon encore plus lourd du "Bas".</p>	<p><b>VÉRITÉ ou TOP</b></p> <p>Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".</p>	
BOSONS VECTEURS <small>Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.</small>		<p><b>PHOTON</b></p> <p>Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p><b>GLUON</b></p> <p>Porteur de la force "forte" entre Quarks.</p>	<p><b>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W<sup>-</sup>, W<sup>+</sup> et Z<sup>0</sup></b></p> <p>Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives.</p>	
<p><b>BOSON DE HIGGS ?</b></p> <p>Hypothétique</p>		<p>Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"</p>		<p><b>GRAVITON ?</b></p> <p>Hypothétique</p>	

<sup>1</sup> Article Wikipédia sur les particules élémentaires.

Le modèle standard implique différentes particules dont les principales sont données dans le tableau ci-dessus (Tab.1). En physique des particules, un boson de jauge est un boson qui agit comme porteur d'une interaction élémentaire. Plus spécifiquement, les particules élémentaires dont les interactions sont décrites par une théorie de jauge exercent l'une sur l'autre des forces par échange de bosons de jauge. Le modèle standard en décrit trois sortes : les photons sont les bosons de jauge de l'interaction électromagnétique, les bosons  $W^{\pm}$  et  $Z^0$  ceux de l'interaction faible et les gluons (g) ceux de l'interaction forte.

## 1.2 Symétrie de jauge

L'unification de la force faible et électromagnétique repose sur le principe de jauge qui fait appel à une branche des mathématiques appelée théorie des groupes de Lie. Prenons l'exemple le plus simple qui est le groupe des rotations d'un cercle. Un élément de ce groupe est une rotation d'angle donné, par exemple la rotation de l'aiguille d'une horloge que l'on tourne manuellement d'un angle donné. Un groupe a plusieurs propriétés mathématiques :

- Le résultat de deux rotations effectuées l'une après l'autre est aussi une rotation : si l'on tourne l'aiguille d'une horloge avec un premier angle, puis qu'on continue à la tourner avec un deuxième angle, le résultat est le même que celui obtenu en la tournant d'un coup avec la somme des deux angles.
- Propriété d'associativité et commutativité : Le résultat de trois rotations effectuées successivement est le même, peu importe l'ordre dans lequel elles sont réalisées.
- Le groupe contient ce qu'on appelle l'élément neutre : rotation d'angle 0 (l'aiguille reste à sa place).
- Pour toute rotation d'angle donné, il existe une rotation d'angle contraire. En les effectuant l'une après l'autre, on obtient la rotation d'angle 0.

La symétrie est la propriété d'un système physique qui ne change pas lorsqu'on lui fait subir une certaine transformation. C'est en imposant à la théorie l'invariance par les transformations de jauge que l'on introduit les interactions. Pour l'interaction électrofaible, on impose que la théorie soit invariante par les transformations de jauge du groupe SU(2) et U(1). Le groupe U(1) est le groupe de rotations du cercle ; le chiffre 1 signifie qu'il agit sur un espace unidimensionnel de nombres complexes, la lettre U, initiale d'unitaire, signifie que le module des nombres complexes est égal à 1. Un seul paramètre suffit pour identifier tout élément de ce groupe : on dit alors qu'il a un seul générateur. Le groupe SU(2) est le groupe spécial unitaire des matrices de nombres complexes avec deux lignes et deux colonnes, il a trois générateurs, il suffit donc de trois nombres pour exprimer tout autre élément du groupe. Leur produit, SU(2)xU(1), a donc quatre générateurs, et on s'attend à ce que quatre particules de jauge véhiculent les interactions. Une partie du groupe SU(2) se combine avec une partie du groupe U(1) pour former le groupe U(1) de l'électromagnétisme, ce qui reste de SU(2)xU(1) décrit l'interaction faible. En d'autres termes, un générateur de SU(2) se combine avec le générateur d'U(1) pour donner le photon. L'autre combinaison orthogonale donne le boson  $Z^0$ . Les deux autres générateurs de SU(2) décrivent les bosons de jauge  $W^{\pm}$  et  $W^{\pm}$ .

## 1.3 L'interaction électrofaible

Proposée en 1961 par Sheldon Glashow, selon les idées de Julian Schwinger, l'unification de la force électromagnétique et faible pose de nombreux problèmes, notamment en raison de la différence de leurs distances d'action. En effet, la force électromagnétique peut agir sur des distances infinies contrairement à l'interaction faible qui a une portée d'action très limitée.

En raison de ces distances d'action, les particules véhiculant ces forces, les bosons vecteurs, doivent nécessairement avoir des masses très différentes : environ 80 fois la masse d'un proton pour les bosons  $W^{\pm}$  et  $Z^0$  (vecteurs de l'interaction faible) et nulle pour le photon (boson de la force électromagnétique). Or, dans cette théorie, les bosons de jauge sont tous de masses nulles ce qui impliquerait que les interactions aient une portée infinie ; cela est vrai pour la force électromagnétique, mais incorrect pour l'interaction faible. Pour combiner ces deux interactions aux portées et intensités si différentes, il faut introduire de nouvelles particules. Plusieurs modèles ont été établis pour pallier

ce problème. Le plus simple d'entre eux, le mécanisme de Higgs, n'introduit qu'une particule supplémentaire : le boson de Higgs.

## 2. Mécanisme de Higgs-Brout-Englert

Apparu en 1964 dans les équations de deux théoriciens, François Englert et Robert Brout (Université Libre de Bruxelles), le mécanisme de Higgs doit son nom à celui qui l'a proposé six semaines après, Peter Higgs (Université d'Edinburgh). Ce mécanisme a été incorporé à la théorie basée sur la symétrie de jauge du groupe  $SU_L(2) \times U_Y(1)$  pour former la théorie électrofaible. Il permet de provoquer la brisure de symétrie pour les basses énergies et ainsi de générer une masse pour les  $W^\pm$  et  $Z^0$ . Une brisure de symétrie est généralement associée à une transition de phase, c'est-à-dire à l'évolution d'un système physique d'une phase à une autre. Le terme "phase" se réfère aux descriptions possibles d'un certain système physique lorsque l'on fait varier certaines des caractéristiques (température, etc....) dont il dépend. Le concept du mécanisme de Higgs repose sur l'introduction d'un nouveau champ, le champ de Higgs qui permet de préserver la symétrie à haute énergie et d'expliquer la brisure de la symétrie à basse énergie. Pour cela il a été introduit de telle sorte que les particules puissent interagir avec lui aux basses énergies (celles actuelles de l'univers). Autrement dit pour les hautes énergies, lorsque la symétrie est rétablie, les particules n'interagissent plus avec ce champ et de ce fait n'ont plus de masses (comme il est supposé l'être à l'instant du big bang). Le mécanisme permet de régler un autre problème en offrant une interprétation de la masse de toutes les particules comme une interaction avec ce nouveau champ. Les particules interagissent avec une intensité proportionnelle à leur charge (de couleur). Le boson de Higgs est le quanta d'un champ de Higgs. Ce serait le type d'interaction des particules avec le champ de Higgs qui leur donnerait leur masse en leur ajoutant de l'énergie, c'est-à-dire un boson de Higgs selon l'équation Eq. (1) :

$$E = m^2 H^2 + A H^4 \quad (1)$$

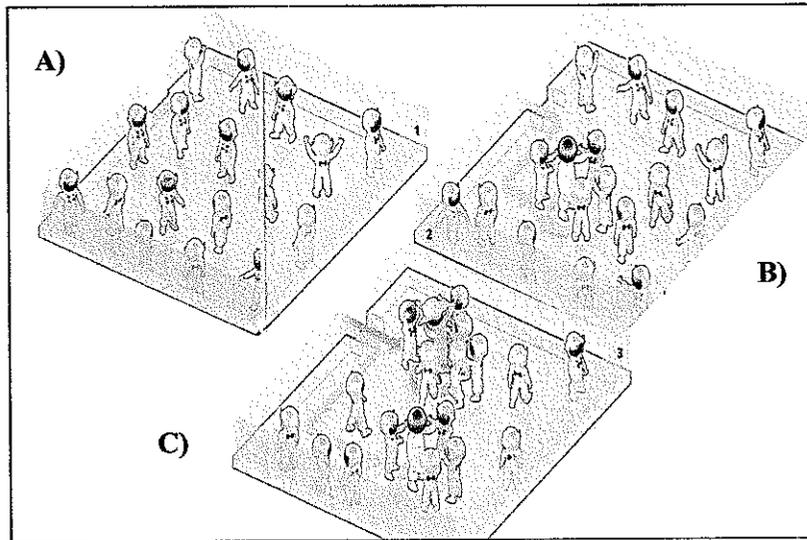
où  $H$  représente le champ de Higgs et  $A$  une constante. Par exemple, la masse du boson  $Z^0$  serait due au fait qu'il ait "absorbé" le boson de Higgs acquérant ainsi de la masse. L'origine de la différence de couplage, ou d'intensité, entre les différentes particules et le champ de Higgs n'est pas connue à ce jour. Par exemple on n'explique pas pourquoi le photon n'interagit pas avec le champ de Higgs et donc ne possède pas de masse. Le boson de Higgs, la particule associée à ce champ, n'est qu'une conséquence mathématique obligée du mécanisme de Higgs.

## 3. Illustration du mécanisme de Higgs

Pour imaginer le mécanisme, le chercheur David Miller propose de faire une analogie entre le mécanisme de Higgs et une petite fête de type cocktail<sup>2</sup>. Supposons que dans une pièce qui représente le vide, des invités soient répartis uniformément. Cela forme le champ de Higgs (Fig. 1a). Si une personnalité entre dans la pièce, les gens en train de discuter près d'elle s'agglomèrent autour. Elle a alors plus de mal à bouger, un peu comme si elle avait une masse plus importante (Fig. 1b). Cette personnalité représente une particule qui interagit avec le champ de Higgs. Plus la personne est connue, plus il y a de gens qui s'agglutinent autour d'elle (Fig. 1c). Ainsi la masse des particules est proportionnelle à l'intensité de l'interaction entre les particules et le champ de Higgs. On imagine maintenant que quelqu'un lance une rumeur dans la pièce. Des petits groupes se forment pour discuter de la rumeur et la propagent. C'est un peu comme si la rumeur acquérait elle-même une masse. Cette rumeur représente le boson de Higgs.

---

<sup>2</sup> Consulter le site : <http://www.hep.ucl.ac.uk/~djm/higgsa.html>.



**Fig.1 :** Illustration du mécanisme de Higgs [1] : a) Les invités, répartis uniformément, représentent le champ de Higgs ; b) une personne peu connue « acquiert » peu de masse ; c) Une personnalité connue « acquiert » de la masse en circulant à travers ces invités. Les personnalités représentent les particules qui circulent dans le champ de Higgs.

#### 4. Le boson de Higgs

Le boson de Higgs est en quelque sorte une conséquence mathématique du mécanisme de Higgs. Cette particule n'a encore jamais été observée à ce jour et tout ce que l'on peut dire sur le boson n'est que purement théorique. Certaines propriétés du Higgs ont cependant été prévues : ainsi le boson de Higgs est une particule neutre de spin nul. Il interagit avec son propre champ et acquiert donc lui aussi une masse mais la théorie ne nous permet pas de la déterminer. Néanmoins certaines expériences ont permis de poser quelques contraintes sur sa masse : une limite supérieure a pu être fixée à  $1 \text{ TeV}/c^2$  et la limite inférieure actuelle expérimentale est de  $114,1 \text{ GeV}/c^2$ . D'après les mesures les plus récentes, il y aurait 95 chances sur 100 que la masse de ce dernier soit inférieure à  $0,144 \text{ TeV}$ .

##### 4.1. Détection du boson de Higgs

Le LHC<sup>3</sup>, Large Hadron Collider, installé entre la Suisse et la France, sera d'ici peu (juillet 2008), avec ses 27 km de circonférence, le plus puissant accélérateur du monde, capable de délivrer une puissance de près de 14 TeV, soit largement supérieure à l'énergie supposée du boson de Higgs. Celui-ci est donc bien plus performant que son prédécesseur, le Tevatron, situé aux Etats Unis (d'une circonférence de 6 km), capable de délivrer une puissance de 2 TeV (il n'est donc pas exclu que lui aussi puisse trouver le boson de Higgs).

Le principe du LHC consiste à faire s'entrechoquer des particules de matières afin d'observer les nouvelles particules qui naissent de ces collisions. Ces particules sont propulsées magnétiquement dans un tube, le fameux anneau de l'accélérateur, les unes tournant dans un sens, les autres à l'opposé. Lorsqu'elles ont emmagasiné la quantité d'énergie nécessaire, on les dévie de leur trajectoire afin qu'elles entrent en collision frontale au sein d'un détecteur. Avec ses dizaines de millions de capteurs (140 millions pour le plus gros détecteur), celui-ci enregistre, dans toutes les directions et dans un rayon de plusieurs mètres, le passage de milliers de particules issues de chaque collision. C'est ce travail qui sera réalisé pour tenter de découvrir le boson de Higgs.

Les difficultés rencontrées à la détection du Higgs sont essentiellement dues au fait qu'on ne connaisse pas sa masse avec précision. On suppose toutefois qu'elle serait de l'ordre de 200 fois la masse du

<sup>3</sup> Site du LHC (<http://lhc.web.cern.ch/lhc>).

proton autour de 100GeV mais il pourrait être beaucoup plus massif. Or plus les particules sont massives plus leurs durées de vie sont courtes. Le boson de Higgs se désintègre quasi-instantanément, on ne peut donc que détecter ses produits de désintégration qui dépendent de sa masse.

Le Higgs se désintégrera le plus souvent en une paire de  $Z^0$ , une paire  $W^+$  et  $W^-$  ou une paire de quarks top-antiquark top ( $t - \bar{t}$ ). Si sa masse est plutôt de l'ordre de cent à cent cinquante fois celle du proton, il se désintégrera surtout en une paire de quarks  $b - \bar{b}$  (antiquark  $b$ )

#### 4.2 Modes de production du boson de Higgs

Il est intéressant de savoir comment le boson de Higgs est produit parmi les 800 millions de collisions par seconde prévues au LHC. Le boson de Higgs n'apparaîtra que dans une collision sur 70 000 milliards, soit une fois toutes les 90 secondes. Les cinq principaux modes de production du boson de Higgs (H) au LHC sont :

- le processus par fusion de gluons (Eq. (2)) :

$$g + g \rightarrow H \quad (2)$$

donnant une boucle de quark (Fig.3a). Ce processus par fusion de gluons est le mode dominant jusqu'à environ 1 TeV. Mais il n'est à considérer que dans la région de masse intermédiaire grâce à la présence d'un W ou d'un Z associé plus facilement détectable.

- le processus par fusion des boson  $W^\pm$  et  $Z^0$  (Eq. (3) et Eq. (4)) :

$$q + q \rightarrow q + q + W^{(\ast)} + W^{(\ast)} \rightarrow q + q + H \quad (3)$$

ou :

$$q + q \rightarrow q + q + Z^{0(\ast)} + Z^{0(\ast)} \rightarrow q + q + H \quad (4)$$

avec  $W^{(\ast)}$  et  $Z^{0(\ast)}$  représentent un boson virtuel respectivement de  $W^\pm$  et  $Z^0$  (Fig.3b) et  $q$  un quark quelconque. Ce mode de production du boson devient de plus en plus important par rapport au mode de production du boson de Higgs par la fusion des gluons au fur et à mesure que la masse du Higgs augmente.

- le processus de production associée à une paire  $q - \bar{q}$  (Eq. (5))

$$\bar{q} + q \rightarrow H + \bar{q} + q \quad (5)$$

où  $q$  est un anti-quark quelconque et avec les quarks de l'état initial majoritairement légers (Fig.2).

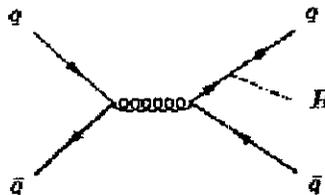


Fig.2 : Production du boson de Higgs en association avec  $q - \bar{q}$  (quarks légers).

- le processus de production associée à une paire  $q \bar{q}$  (Eq. (6)) :

$$g + g \rightarrow q + \bar{q} + H \quad (6)$$

produit majoritairement des quarks lourds (Fig 3d).

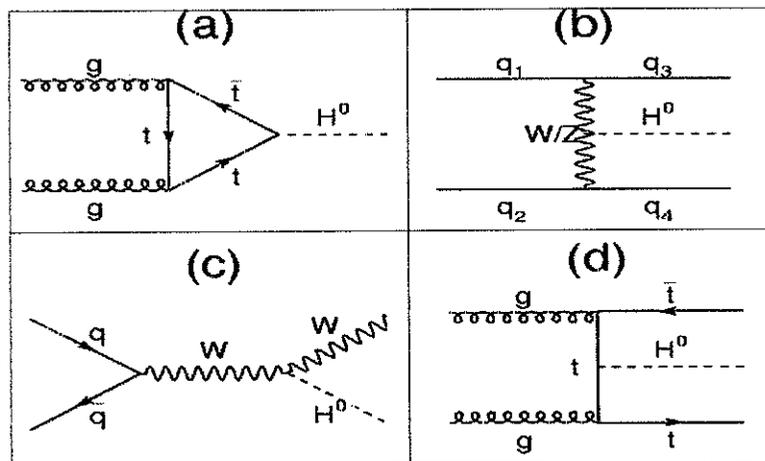
La production du boson de Higgs avec une paire de  $t \bar{t}$  (t quark top) ou un boson  $W^\pm$  ou  $Z^0$  est bien plus faible mais donne néanmoins des états finaux qui sont relativement faciles à détecter grâce à la signature supplémentaire provenant de la désintégration des particules accompagnant les désintégrations.

- Le processus de production associée avec  $W^\pm$  ou  $Z^0$ , Eq. (9) et Eq. (8) :

$$\bar{q} + q \rightarrow W^\pm \rightarrow W^\pm + H \quad (\text{fig.3c}) \quad (7)$$

ou

$$\bar{q} + q \rightarrow Z^0 \rightarrow Z^0 + H \quad (8)$$



**Fig.3** : production du boson de Higgs dans les collisionneurs hadroniques<sup>4</sup>. a) La fusion des gluons b) Fusion des bosons d'échange c) production associée avec le boson W ou le boson Z d) production associée avec des quarks lourds.

## 5. Conclusion

Actuellement, toute la physique des particules repose sur la théorie du boson de Higgs. Les expériences menées au LHC permettront de déterminer si celui-ci est réel. Si c'est le cas, cela validera la théorie du modèle standard. Dans le cas contraire, tout serait remis en question et l'ensemble de la physique des particules devrait être à repenser même si l'existence de théories se passant de ce boson ont déjà été élaborées. Le LHC permettra en plus, grâce aux 14 TeV d'énergie qu'il est susceptible d'atteindre, d'aller au-delà du modèle standard (qui ne prédit la physique que jusqu'à 1 TeV) et de confirmer des théories comme la supersymétrie « la Susy » qui ne prédit non pas un, mais cinq bosons de Higgs dont le plus léger d'entre eux ressemble à celui du modèle standard.

### Références

[1] François Englert, Boson de Higgs. La "particule de Dieu" à portée de main, *Sciences et Vie*, **1088**, 54-70, 2008.

<sup>4</sup> Site sur la physique du Higgs au LHC (<http://www.hep.lu.se/atlas//thesis/egede/thesis-node6.html>)

# Evolution des galaxies

Devillers Aline – Havard Emilie

*Des particules à l'Univers L2 MPM, Promotion 2007-2008*

## Abstract

This contribution is devoted to galaxies evolution and their formation. Some models will be introduced to describe their shape evolution. Their spatial evolution will be discussed.

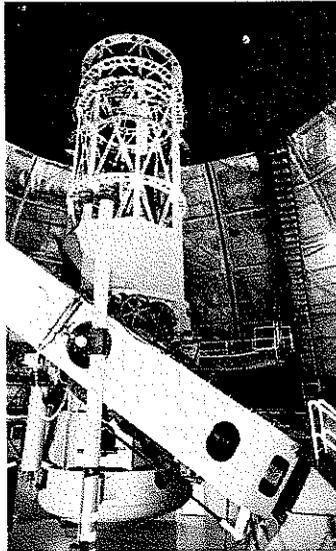


## 1. Introduction

Nous allons, lors de cet exposé, essayer de vous présenter l'évolution des galaxies. Pour cela, nous allons d'abord parcourir un petit historique sur les galaxies, dans un second temps aborder leur naissance, suivie d'une brève description des différents types de galaxies. Nous allons ensuite nous intéresser à différents modèles traitant de l'évolution des formes des galaxies, puis de leur évolution spatiale.

## 2. Historique

Avant le XXe siècle, le terme de galaxie n'existait pas. Les observateurs savaient distinguer les étoiles et les comètes, tout autre objet céleste d'aspect diffus était qualifié de "nébuleuses". C'est au XVIIe siècle que Galilée observa grâce à une lunette la bande blanchâtre qui traverse le ciel : la Voie Lactée, il découvrit qu'il s'agissait en fait d'un grand nombre d'étoiles faiblement lumineuses. Dans un traité écrit en 1755, Kant affirma avec raison que notre nébuleuse pourrait être un corps en rotation composé d'un nombre énorme d'étoiles liées par la gravitation, comme les planètes du système solaire mais avec des échelles beaucoup plus grandes. Kant [1] pensa alors que certaines des "nébuleuses" visibles dans le ciel pourraient être des nébuleuses distinctes de la notre. En 1845, grâce à son télescope beaucoup plus grand que ceux de la même époque, William Parsons distingua les nébuleuses elliptiques des nébuleuses spirales. En 1918, Harlow Shapley [2] détermine la taille de la Voie lactée. Il l'estime à environ 300 000 années lumières. C'est en 1920 que le terme "galaxie" apparaît. Edwin Hubble confirma en 1924 qu'après des mesures faites à l'aide du nouveau télescope Hooker (fig.1) de 2,50m, les galaxies sont des "univers îles", c'est-à-dire des objets à part entière dans l'Univers et non des objets appartenant à notre galaxie comme on le pensait à l'époque. Il commença par classer les galaxies qu'il voyait par analogie de forme. Il en déduisit la séquence dite de Hubble.

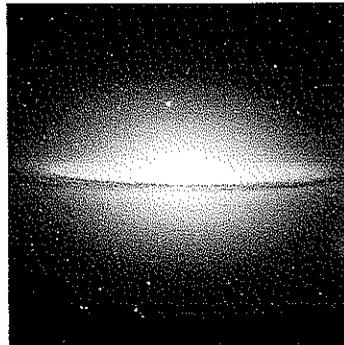


**Fig 1 :** *Télescope Hooker*

### **3. Les différents types de galaxies**

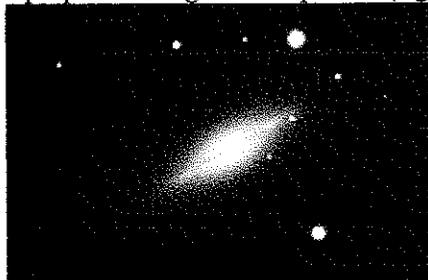
Les galaxies diffèrent par leurs formes, il est donc possible de les différencier. Aujourd'hui, on distingue quatre grands types de galaxies :

- Les galaxies elliptiques constituent environ 15% des galaxies et possèdent une forme plus ou moins sphérique ( fig. 2).



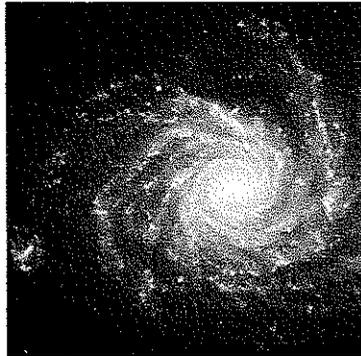
**Fig. 2 :** *Galaxie elliptique M49*

- Les galaxies lenticulaires représentent environ 20% des galaxies et constituent une classe intermédiaire entre les galaxies elliptiques et les galaxies spirales (fig. 3).



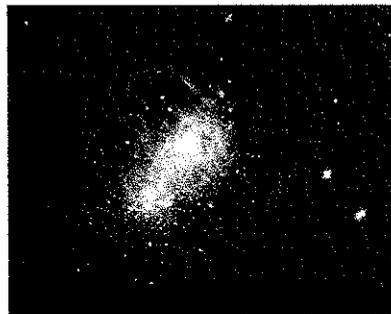
**Fig. 3 :** *Galaxie lenticulaire NGC 5866*

- Les galaxies spirales constituent environ 60% des galaxies. Elles possèdent un noyau et un disque. C'est le cas de la Voie Lactée. Parmi ces galaxies spirales, il existe les galaxies spirales normales et les galaxies spirales barrées. (fig. 4)



**Fig. 4 :** *Galaxie spirale NGC 1232*

- Les galaxies irrégulières représentent entre 3 et 5% des galaxies et sont d'apparence chaotique. (fig. 5)



**Fig. 5 :** *Galaxie irrégulière NGC 4214*

#### **4. Naissance des galaxies**

A la suite de Kant, Laplace [3], beaucoup de scientifiques supposent qu'au tout début de l'Univers, il n'y avait que des nuages de gaz et de poussières. L'Univers aurait ensuite commencé à se structurer. Le Big-bang aurait généré de la matière grâce à la nucléosynthèse, qui se serait alors répartie de manière irrégulière dans l'Univers : certaines zones furent alors plus denses que d'autres. Les grandes structures telles que les galaxies se seraient ainsi formées en 1 Milliard d'année environ par un ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaires dont la cohésion est assurée par la gravitation. Elles présentent une grande diversité de tailles et de formes ; leur diamètre est compris entre 2000 et plus de 500 000 années lumière. Les étoiles se formeraient par condensation de nuages de gaz présents. Ce phénomène tendrait donc à diminuer la présence de ce gaz dans le milieu interstellaire au cours de l'évolution des galaxies.

#### **5. Les différents modèles de l'évolution des formes des galaxies**

Dans les années 1930, après des nombreuses observations, Edwin Hubble [4] découvrit la présence de galaxies en dehors de la notre. En constatant des différences de formes, il entreprit de les classer. Pour cela, il créa le diagramme de Hubble, qui, selon lui, est représentatif de l'évolution des galaxies au cours du temps. Sur ce diagramme (fig. 6), les galaxies décrivent une évolution de la gauche vers la droite.

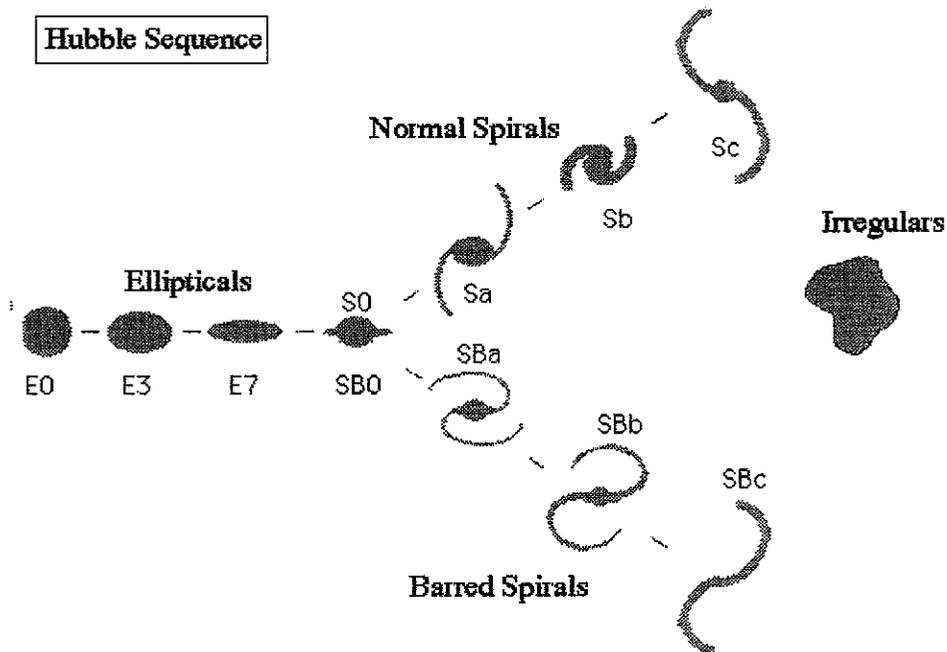


Fig. 6 : *Diagramme de Hubble*

Cette séquence se décompose en trois branches :

- La première branche regroupe les galaxies de type elliptique classées selon leur étirement, les plus étirées se situant à droite de la première branche. Leur évolution aboutit à une galaxie de type lenticulaire.

Cette première branche se divise ensuite en deux :

- Soit les galaxies évoluent en galaxies de type spirale normale, les galaxies ayant un noyau plus petit et des bras plus ouverts sont vers la droite.
- Soit elles évoluent en galaxies de type spirale barrée suivant le même schéma que les spirales normales ( petit noyau et bras plus écartés du centre sont à droite).

En d'autres termes, les galaxies apparaîtraient d'abord dans un état presque homogène et organisé sous la forme d'ellipse, d'où leur nom de galaxies elliptiques. Elles ne développeraieent qu'ensuite des structures plus complexes telles que les bras spiraux. Les galaxies elliptiques seraient donc de jeunes galaxies et les galaxies spirales, des structures plus anciennes. Remarquons que dans ce diagramme, les galaxies irrégulières ont été classées à part par Hubble. Elles n'auraient donc, a priori, pas d'évolution particulière.

Dans les années 1960, Olin Eggen, Donald Lynden-Bell et Allan Sandage [5] ont élaboré un autre modèle. A la différence de la classification de Hubble, ce modèle ne présente pas d'évolution des galaxies en fonction du temps, en effet, celui-ci se base sur le taux de production des étoiles au sein des galaxies. Selon ce modèle, le type d'une galaxie devrait s'acquies dès le début de sa formation et ne pourrait changer au cours du temps. Les différents types de galaxies seraient la résultante de l'interaction entre la formation des étoiles et la dynamique des galaxies. Les galaxies elliptiques se formeraient grâce à un taux de natalité des étoiles très élevé : le gaz constituant la galaxie se condenserait donc entièrement en astres et un disque n'aurait pas le temps de se former. Les étoiles se concentreraieent en donnant une forme sphérique aux galaxies. En ce qui concerne les galaxies spirales, les grands nuages de gaz qui les constituent s'effondreraieent sur eux même produisant ainsi des étoiles. Cependant, ce taux de production est plus faible que pour les galaxies elliptiques. Sous l'effet de la force centrifuge, le gaz tournerait de plus en plus vite lui faisant adopter une forme de disque en rotation. Selon ce modèle, les galaxies elliptiques ne seraient donc pas nécessairement les précurseurs des galaxies spirales proposé par le modèle de Hubble. Des modélisations numériques ont été réalisées

afin de valider ce modèle, néanmoins, ce scénario ne leur résiste pas. Les simulations numériques ne confirment donc pas la théorie ELS.

En résumé, Hubble présente une évolution des galaxies au cours du temps, selon leur forme. En revanche, le modèle ELS affirme que la forme des galaxies est déterminée dès leur formation grâce au taux de production des étoiles et n'évolue plus par la suite. De nos jours, d'autres théories prédominent dans la communauté scientifique. Certains scientifiques, tels que Françoise Combes<sup>1</sup> de l'Observatoire de Paris pensent que le diagramme de Hubble évoluerait à l'envers, c'est-à-dire de droite à gauche. Elle pense également que par accréation de gaz, elles pourraient temporairement repartir de gauche à droite. En effet, elle appuie sa théorie sur l'observation de l'âge des étoiles. Ainsi, les galaxies elliptiques et lenticulaires seraient constituées en majeure partie d'étoiles vieilles et de peu de jeunes. Au contraire, les galaxies spirales sont essentiellement constituées de jeunes étoiles. D'autres scientifiques, tel que Avishai Dekel de l'université Hébraïque de Jérusalem et Gary Mamon chercheur de l'institut d'astrophysique de Paris [6], affirment que les galaxies elliptiques résulteraient de la collision de galaxies spirales. Finalement, on constate que plusieurs théories sont proposées sur l'évolution de la forme des galaxies. Cependant, des doutes persistent car aucune des théories n'a été confirmée par les simulations numériques ou par l'expérience.

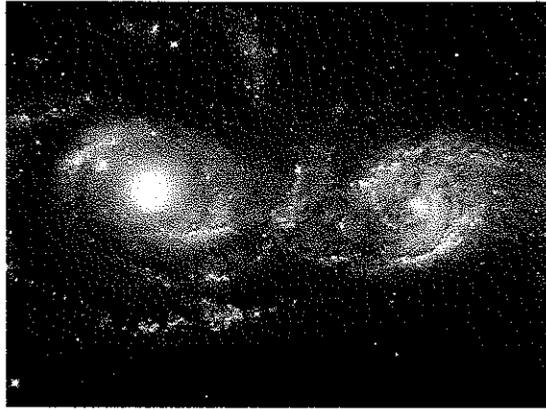
## **6. Evolution spatiale des galaxies :**

Les observations ont montré que les galaxies ont tendance à se regrouper au sein de "colonies" que l'on nomme amas ; une galaxie n'est jamais isolée. De plus, les amas de galaxies sont séparés par d'immenses zones de vide. La dimension des amas de galaxies peut varier entre moins de 360 000 années lumière et plus de 28 800 000 années lumière. Parmi les amas les plus connus, il y a le Groupe local dans lequel se situent la Voie Lactée et la galaxie d'Andromède. On trouve également l'amas de la Vierge ou encore le superamas de Persée.

La rencontre entre deux galaxies serait un phénomène relativement courant en raison de l'attraction gravitationnelle qui s'exerce entre deux galaxies d'un même amas. Les galaxies interagissent d'autant plus que la densité dans l'amas est grande. Une collision (fig. 7) se produirait lorsque les deux galaxies se heurteraient avec une vitesse suffisante pour pouvoir poursuivre leur chemin. Pierre Alain Duc<sup>1</sup> (Chercheur au CNRS) affirme que la collision de deux galaxies ne donne pas lieu à une grande catastrophe cosmique. La probabilité de rencontre entre deux étoiles serait tellement faible que les galaxies passeraient simplement l'une à travers l'autre, les étoiles seraient très éloignées les unes des autres. Ce phénomène n'entraînerait donc aucun effet majeur sur les étoiles. En outre, il y aurait une conséquence sur la forme globale des galaxies dans la mesure où le gaz et la poussière interagiraient (le gaz serait comprimé très violemment). Des galaxies en collision se mettraient à briller fortement. De l'interaction gravitationnelle résulteraient d'intenses forces de marées qui affecteraient complètement la forme des galaxies. Les simulations numériques de telles collisions montrent que le résultat peut être la formation de bras spiraux dans l'une des deux galaxies. De plus, après une collision, les galaxies peuvent voir leur trajectoire déviée. Françoise Combes<sup>2</sup>, quant à elle, affirme qu'un très grand nombre de collisions au cœur d'un amas de galaxie peut avoir un effet important dans la morphologie des amas. Lorsque la collision se fait à une vitesse "lente", il pourrait y avoir fusion de deux galaxies. Cette interaction serait la plus violente. La fusion se produirait lorsque l'énergie de rotation concernant les deux galaxies avançant l'une sur l'autre ne serait pas suffisamment élevée pour permettre la libération d'une galaxie de l'influence de l'autre. C'est pourquoi dans la plupart des cas, les deux galaxies fusionneraient en une galaxie unique plus grande. Les éléments responsables d'un phénomène de fusion seraient très nombreux, c'est pourquoi aujourd'hui les recherches sont axées sur ces paramètres. Il y a également le cannibalisme galactique qui est une fusion de deux galaxies lorsque l'une est plus petite que l'autre. Effectivement, dans ce cas, la galaxie la plus grande resterait identique et la plus petite serait démantelée à l'intérieur de l'autre. Ce serait le cas de la Voie Lactée et de la galaxie du Sagittaire. D'après Pierre Alain Duc, la fréquence des collisions aurait été plus importante dans le passé de l'Univers.

<sup>1</sup> Consulter sur le site de planet astronomy (recherche google avec planetastronomy)

<sup>2</sup> Consulter sur le site de Françoise Combes (recherche google avec F Combes)



**Fig. 7 :** *Collision de galaxies*

## **7. Conclusion**

Nous avons donc vu différents modèles présentant l'évolution de forme et l'évolution spatiale des galaxies. Edwin Hubble fut le précurseur de cette étude, en effet, il fut le premier à observer des différences morphologiques et établit le premier modèle de classification. Par la suite, d'autres modèles ont vu le jour tel que le modèle ELS. L'observation de collisions et de fusions a souligné une perturbation morphologique des galaxies et des amas. Cependant, les simulations numériques concernant l'évolution morphologique des galaxies ne corroborent pas les théories proposées. Les recherches sont donc à poursuivre afin d'obtenir une théorie valide.

## **Références**

- [1] **E. Kant**, *Théorie du Ciel*, 1755.
- [2] **H. Shapley**, *Big Galaxy*, 1918.
- [3] **E. Kant, P.S.Laplace**, *Exposition du système du monde*, 1796.
- [4] **E. Hubble**, *Realm of nebulae*, 1936.
- [5] **O. Eggen, D. Lynden-Bell, A. Sandage**, *Evidence from the motions of old stars that the galaxy collapsed*, 1962.
- [6] **A. Dekel et G. Mamon**, *Lost and found dark matter in elliptical galaxies*, 2005.

# Les Quasars

Par Boulenger Mélissa et Courtial Laurie

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008*

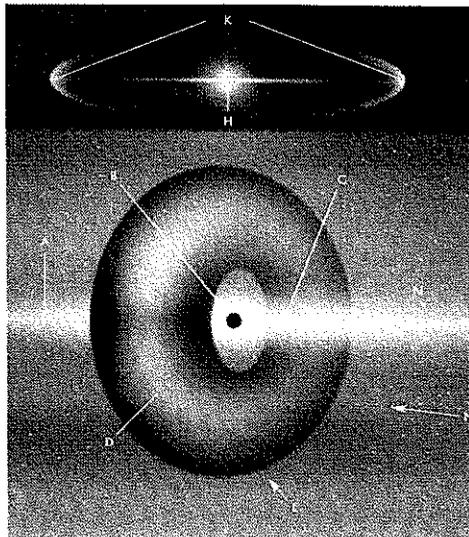
## Résumé

Quasars are celestial objects, involontary discovered in the 50's during a research on radio-waves. They set out difficult properties to be interpreted such as a huge luminosity coming from a small space, accompanied by an important redshift, which questions theorie about universe's evolution. Nevertheless, they could provide the proof of black holes'existence

## 1. Historique.

L'émission lumineuse d'une galaxie résulte en partie de la somme de chaque rayonnement lumineux des milliards d'étoiles qu'elle renferme. Jusque dans les années 1940, les astronomes pensaient que les galaxies étaient des objets relativement tranquilles, et qu'aucun phénomène violent, hormis les explosions de supernovae, ne s'y produisait [1]. Mais à partir de 1943, l'astronome américain Carl Seyfert commença à attirer l'attention du monde scientifique sur des phénomènes étranges qui se déroulaient dans les noyaux de certaines galaxies spirales. Depuis les astronomes ont découvert de diverses façons l'activité des noyaux des différents types de galaxies et toute une variété de noms visant à les identifier est apparue : radiogalaxies, galaxies de Seyfert, blasars<sup>1</sup>, quasars. Toutefois, on retient aujourd'hui qu'il s'agirait en fait de différentes manifestations d'objets appartenant à une même famille, celle des noyaux galactiques actifs ou de son nom anglais AGN pour Active Galactic Nuclei

L'astronome Peter D. Barthel a proposé une théorie qui unifierait, d'une certaine façon, tous les AGN ; ces objets appartiendraient donc tous à une classe unique et leurs différences de caractéristiques ne seraient pas réelles, mais dues à une orientation différente de l'observateur par rapport à la source comme le montre la figure ci dessous (Fig 1) [2]



**Fig.1 : LES MEMBRES D'UNE MÊME FAMILLE**

*Le modèle unifié des noyaux galactiques actifs : jet qui s'éloigne (A), moteur central (B), jet qui se rapproche (C), disque (D), galaxies hôte (H), lobes radio (K)*

*Blazars, quasars et radiogalaxies seraient selon cette hypothèse, un seul et même type d'objet vu dans des perspectives différentes l'observateur voit une radiogalaxie (L), un quasar (M), un blazar (N).*

<sup>1</sup> Les blazars ont une plus grande intensité d'onde radio, les galaxies de Seyfert présentent de nombreuses raies d'émission très élargie et les radiogalaxies sont toujours elliptiques avec d'immenses lobes radio.

Trente ans après leur invention, les radiotélescopes ont permis en 1960 de découvrir les quasars. Les premières observations conclurent à une source radio sans objet visible associé. L'emploi de petits télescopes et du télescope Lovell utilisé comme interféromètre a permis de déterminer leur diamètre angulaire et de constater que ce dernier était très faible. Des centaines de quasars ont été répertoriés dans le catalogue Third Cambridge publié en 1959 par le « Radio Astronomy Group » de l'université de Cambridge.

En 1960, la source radio 3C 48 fut finalement associée à un objet visible. Les observations optiques laissaient à penser qu'une pâle étoile bleue demeurait à l'endroit d'où émanaient les sources radios tandis que le spectre obtenu présentait une irrégularité qui défiait toute interprétation. L'hypothèse émise par l'astronome anglo-australien John Bolton parlant d'un grand « redshift » (décalage vers le rouge) fut rejetée.<sup>2</sup>

Une autre source radio, 3C 273, fit avancer les recherches en 1962 ; elle allait subir cinq occultations par la Lune. Grâce aux mesures effectuées par Cyril Hazard et John Bolton durant l'une des occultations, en utilisant le radiotélescope de Parkes, Maarten Schmidt put identifier l'objet d'un point de vue optique. Il obtint son spectre optique en utilisant le télescope Hale (5,08 m) sur le mont Palomar. Celui-ci révéla les mêmes raies d'émission étranges que 3C 48 ; les raies de l'hydrogène étaient décalées vers le rouge de 15,8 % ! Ce qui signifiait que 3C 273 s'éloignait à la vitesse de 47 000 km/s d'après la loi d'Hubble.

Le mot « quasar » fut inventé par l'astrophysicien chinois Hong-Yee Chiu dans la revue *Physics Today* de mai 1964, pour décrire ces incompréhensibles objets qui devenaient populaires peu après leur découverte, mais qui ne se désignaient uniquement par leur appellation complète ; quasi-stellar radio source : [3]

*« Pour l'instant, le mot plutôt maladroit et indéterminable de « quasi-stellar radio source » est utilisé pour décrire ces objets. Comme la nature de ces objets nous est complètement inconnue, il est difficile de leur donner une nomenclature courte et appropriée, même si leurs propriétés essentielles viennent de leur nom. Par esprit pratique, la forme abrégée « quasar » sera utilisée tout au long de cet article. »*

## 2. Caractéristiques.

La nature des quasars n'est pas aujourd'hui encore totalement élucidée. Grâce aux observations, les astronomes ont pu déterminer que les quasars constituent le cœur de 3 à 4 % des galaxies. Certains quasars présentent des lobes radio et bien qu'ils aient été découverts grâce à leurs rayonnements, ils émettent en fait dans tous les domaines de longueur d'onde : rayons visibles, rayons X, ultraviolets et gamma [4]

Les quasars sont des objets d'apparence similaire aux étoiles en raison de leur luminosité intrinsèque élevée, environ 1 000 fois plus brillants qu'une galaxie comprenant 100 milliards d'étoiles. Toutefois leur rayonnement est non thermique car la lumière du quasar ne suit pas la loi de Planck sur les corps noirs, ce qui est une preuve que ces rayonnements ne sont pas d'origine stellaire. [5]

Le quasar qui apparaît le plus brillant dans notre ciel est l'hyper lumineux 3C 273, dans la constellation de la Vierge. Il possède une magnitude apparente d'environ 12, mais sa magnitude absolue est de -26,7. Cela signifie qu'à une distance de 10 pc, soit ~ 33 al, cet objet lui paraîtrait dans le ciel aussi fortement que notre Soleil. La luminosité de ce quasar est donc  $2 \times 10^{12}$  fois plus forte que celle de notre Soleil, ou environ 100 fois plus forte que la lumière totale d'une galaxie géante, telle que notre Voie lactée [6]

Tous les spectres observés montrent des décalages vers le rouge noté  $z$  allant de 0,06 à 6,4

$$z = (\lambda_{\text{observé}} - \lambda_{\text{émise}}) / \lambda_{\text{émise}} \quad (1)$$

Ce décalage vers le rouge amène dans des régions observables du spectre les parties qui se trouveraient autrement dans l'ultraviolet lointain, inobservables avec les télescopes au sol.

La raie dominante, la plus intense des spectres de quasars est la raie  $\alpha$  de la série de Lyman de l'Hydrogène; non décalée, cette raie correspond à une longueur d'onde de 1216 angströms, soit à de

<sup>2</sup> <http://fr.wikipedia.org/wiki/Quasar>

l'ultraviolet. Dans la plupart des quasars, on observe cette raie avec une longueur d'onde aux environs de 5500 angströms, soit la zone vert-jaune du spectre visible d'où un décalage de 3,5. [7]  
Le pic de luminosité a été observé aussi loin que 9 000 A, soit un décalage de 6,41.<sup>3</sup>

Dans de nombreux cas, les raies d'émission sont élargies, ce qui indiquerait que certaines zones du gaz qui entourent le quasar se déplaceraient par rapport à d'autres avec des vitesses parfois de 10 000 kilomètres par seconde, comme si elles étaient animées d'un violent mouvement de rotation.

Ce qui rend les quasars encore plus incompréhensibles c'est qu'ils dégagent une énorme quantité d'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques en provenance d'une faible région. En effet, les variations de brèves périodes observées dans la luminosité des quasars signifient que cette région possède un diamètre d'une journée lumière, soit à peu près de même dimension que notre système solaire ! [8]

Or, justement l'énigme est là : comment un objet qui brille comme cent, voir mille galaxies réunies peut-il mesurer le centième du diamètre d'une seule ? Et comment interpréter cet important décalage vers le rouge ?

### 3. Interprétation du décalage vers le rouge.

Il existe plusieurs hypothèses de départ conduisant chacune à une explication différente du phénomène, c'est pourquoi les théories suivantes sont toutes sujet à controverse.

La première et la plus acceptée par la communauté astronomique est celle donnée par Edwin Hubble en 1929 qui relie l'effet Doppler Fizeau à l'expansion de l'univers. [9] La loi de Hubble énonce que les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à leur distance. Autrement dit, plus une galaxie est loin de nous, plus elle semble s'éloigner rapidement. La vitesse de récession  $v$  des galaxies étant connue par effet Doppler la loi de Hubble s'écrit simplement par :

$$cz = H_0 d \quad (2)$$

où  $H_0$  est la constante de Hubble, la lettre  $H$  étant utilisée en l'honneur de Hubble,  $c$  la célérité de la lumière et  $z$  le décalage spectral. L'indice  $0$  est utilisé pour indiquer que la valeur de la constante est mesurée aujourd'hui. Celle-ci n'est en effet pas constante dans le temps et était différente par le passé. Cependant seule sa valeur actuelle peut être estimée et vaut environ  $71 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

Au moyen de cette équation les astronomes en ont déduit que les quasars seraient les objets les plus éloignés ; ceux dont le décalage vers le rouge est le plus important seraient proches de l'horizon cosmologique, à la limite de l'Univers observable.

On recense aujourd'hui près de 100 000 quasars, le plus proche de nous serait à 240 mégaparsecs (~ 780 millions d'années lumière) et le plus éloigné, CFHQS J2329-0301, à quatre giga parsecs (~ 13 milliards d'al), aux limites de l'univers observable.<sup>4</sup>

Toutefois cette relation reste linéaire pour de petites distances et doit subir des corrections pour les grands décalages spectraux. Or, les quasars font partis des objets à fort décalage

D'après la Fig. 2 plus on augmente  $z$  et plus on s'éloigne de la loi d'Hubble, en pointillés sur le dessin. Cette théorie peut donc être inappropriée à notre sujet ainsi que les résultats qui en découlent.

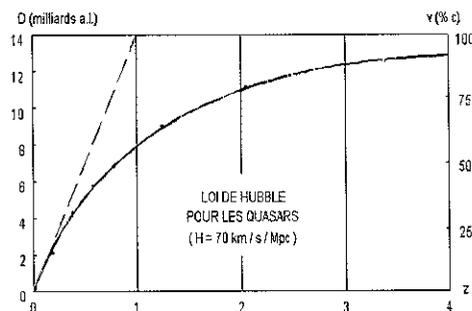


Fig. 2 : Loi d'Hubble

<sup>3</sup> <http://www.astr.ua.edu/keel/agn/quasar40.html>

<sup>4</sup> <http://209.85.135.104/search?q=cache:VkGKfBAkyH4J:legnome.net/2007/06/07/quasar-cfhqs-i2329-0301-un-phare-pour-eclairer-le-jeune-univers/+CFHQS+J2329-0301&hl=fr&ct=cnk&cd=3&gl=fr>

Opposé à la relation entre décalage vers le rouge et effet Doppler, l'astronome Halton Arp a publié des photos de galaxies et de quasars qui d'après ses observations ne seraient pas si loin de nous [10]. L'une de ses observations concerne la galaxie NGC 7603 et un Quasar relié par un pont de matière.

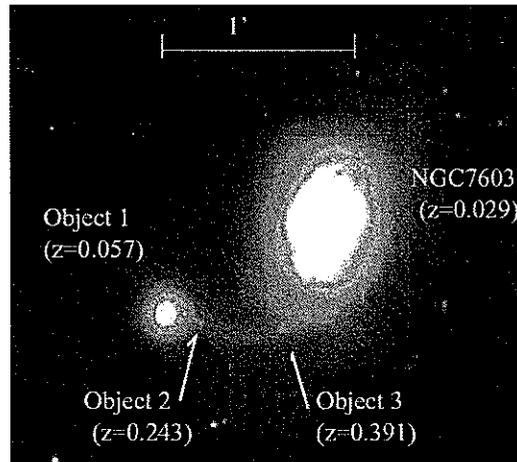


Fig. 4 : Photo infrarouge du couple NGC 7603 et un Quasar

D'après la loi d'Hubble ces deux objets devraient se trouver à peu près à la même distance et par conséquent posséder le même décalage. Or la galaxie possède un décalage  $z=0,029$  tandis que le Quasar possède un décalage  $z=0,057$ . Leurs décalages étant très différents, leur proximité apparente ne serait due qu'à un alignement fortuit dans l'axe de visée. Sauf que des observations de M.Lopez-Corredoira et Carlos M.Gutiérrez ont révélés la présence, dans l'axe principal de ce pont de matière, de deux autres quasars avec des décalages incohérents. L'objet nommé 2 possède un décalage de  $z=0.243$ , l'objet nommé 3 possède un décalage  $z=0.391$  et le pont de matière possède un décalage  $z=0.030$  quelle que soit la zone de mesure. Il est donc très difficile d'admettre que seul le hasard permettrait un alignement aussi particulier de ces cinq objets. La probabilité étant de l'ordre de  $10^{-9}$  Il n'existe aucune explication satisfaisante à ce phénomène.

D'autres théories jaillissent, notamment celle de Greenstein et Schmidt ; la lumière des quasars proviendrait de galaxies très compactes que leur gravité déporterait la lumière vers le rouge. Ils pensaient que pour décaler la lumière, la pesanteur des galaxies suffirait, elles n'auraient pas besoins d'être lointaines [11]. Ce phénomène peut s'expliquer au moyen de la relativité générale lorsqu'on considère le photon comme une particule et on parle alors de décalage d'Einstein. En considérant le photon comme une particule, Albert Einstein avait proposé la loi du décalage par l'équation suivante [12] :

$$\Delta f/f \equiv \frac{f_{\text{étoile}} - f_{\text{terre}}}{f_{\text{étoile}}} = \frac{GM_s}{Rc^2} \quad (3)$$

où  $M_s$  est la masse de l'astre et  $R$  la distance entre le centre de l'astre et du photon

Mais la relativité générale s'applique aussi au cas où le photon est considéré comme une onde et donc ne subit pas la gravitation. En effet, la relativité prévoit qu'une masse déformerait plus ou moins l'espace autour d'elle selon sa proportion et par conséquent courberait le trajet optimal que la lumière doit parcourir pour arriver jusqu'à nous, augmentant ainsi sa distance et par conséquent sa longueur d'onde. Dès lors, plus la lumière passerait au voisinage d'astres importants et plus son décalage vers le rouge augmenterait sans pour autant que l'objet dont elle proviendrait ne soit loin.

Ainsi, quelle que soit la nature considérée du photon la relativité générale prévoit un décalage vers le rouge des longueurs d'onde sans rapport avec la distance des objets étudiés

Jean-Claude Pecker et Jean Pierre Vigier, astrophysiciens français, proposent un scénario plus original, celui de la « lumière fatiguée » [13] La lumière se fatiguerait le long de son parcours et perdrait de l'énergie en interagissant avec des particules de très faible masse ; chaque interaction serait

faible, mais l'effet cumulé suffisant. Un photon qui perd de l'énergie oscille de moins en moins vite et voit sa longueur d'onde augmenter. L'effet attendu est un déplacement vers le rouge du spectre de la lumière. Toutefois, cette théorie échoue à expliquer le rayonnement fossile à 3K pour un spectre de corps noir, c'est pourquoi elle reste controversée.

Enfin, on peut évoquer un autre effet découvert par le professeur Jacques Moret-Bailly, il s'agit d'un effet optique nommé Creil abréviation de : coherent Raman effect on incoherent light<sup>5</sup>. Cet effet stipule que lorsqu'une source lumineuse émet à travers une couche de gaz, son spectre se trouve décalé proportionnellement avec la couche de gaz que cette lumière a eu à traverser pour arriver jusqu'à l'observateur. Les quasars étant enveloppés d'une couche importante de gaz, ce phénomène pourrait s'appliquer provoquant ainsi un important décalage vers le rouge impliquant que ces objets ne seraient donc pas si lointains.

#### **4. Théories sur le fonctionnement d'un quasar.**

Contrairement à l'explication du décalage vers le rouge, les théories sur le fonctionnement d'un quasar semblent convergées vers une seule : celle d'un trou noir en leur centre. Il n'empêche que la physique des trous noirs reste un domaine très sensible, c'est pourquoi les astronomes ont tenté d'émettre d'autres hypothèses qu'en au fonctionnement des quasars.

L'une d'entre elle est l'énergie nucléaire, comme celle provoquée au cœur de notre Soleil. Ce dernier convertit cents millions de tonnes d'hydrogène en noyaux d'hélium par seconde. Toutefois ce mécanisme est peu efficace pour alimenter un quasar car un kilogramme d'hydrogène ne cède que sept grammes sous forme d'énergie lumineuse or, en un an, le quasar a besoin de désintégrer l'équivalent de dix fois notre soleil. Si le phénomène dure cents millions d'années, un milliard de masse solaire devrait disparaître en lumière, tout ceci se produisant dans un tout petit volume. Or de telles étoiles ne peuvent tenir dans si petit volume car elles finiraient par implorer [14]. De plus, nous avons précédemment expliqué que le rayonnement des quasars n'est pas d'origine stellaire. Ce mécanisme ne répond donc pas à notre problème.

Une autre théorie plus probable serait celle de l'énergie de gravitation ; cette méthode de récupération d'énergie serait très importante d'autant plus que le corps qui attire serait massif et que l'on s'approcherait très près de lui. Les trous noirs seraient des objets capables d'engendrer, dans des espaces de la taille du système solaire, plus de mille fois la luminosité de la galaxie hôte, pour une masse de plusieurs dizaines ou centaines de millions de soleils.

Le trou noir serait un astre dont le champ de gravité serait tellement intense qu'aucun rayonnement ne pourrait s'en échapper. L'hypothèse du trou noir massif situé au centre des quasars, émise par les astrophysiciens russes Yakov Zeldovich et Novikov ainsi que l'Américain Salpeter, est adoptée de nos jours [15]. Leur formation requerrait une colossale quantité de matière confinée dans une région suffisamment petite pour que seule la gravitation règne. Le centre des galaxies est le lieu idéal où s'observe précisément une importante concentration d'étoiles entourées de grandes quantités de gaz qui migrent vers la région centrale : le noyau. Avant d'être engloutie, la matière attirée par le trou noir tomberait sur celui-ci en spiralant, et en formant un « disque d'accrétion ». Cette matière serait accélérée à des vitesses extrêmes. Le trou noir ne pouvant émettre par lui-même de lumière, et ainsi être détecté, ce serait la matière située autour de lui qui serait responsable d'émissions de lumière dans toutes les longueurs d'ondes. Ce serait durant cette phase que le disque d'accrétion rayonnerait une importante quantité d'énergie. En chutant, la matière tourbillonnerait de plus en plus vite, de telle sorte qu'elle éviterait l'absorption immédiate dans le trou noir. En se rapprochant progressivement du trou noir, les frottements porteraient le disque en état d'incandescence, l'énergie ainsi produite s'échapperait par la surface perpendiculairement au disque sous forme d'ultraviolets car la température atteint près du centre serait supérieure à 100 000 K.

---

<sup>5</sup> <http://cosmosgate.free.fr/index.php?page=creil>

## 5) Modèle théorique représentatif d'un quasar.

La distance entre les quasars et notre galaxie s'élèverait à une dizaine de milliards d'année lumière, ainsi ils auraient existé dans les premiers milliards d'années de l'Univers. La matière environnant au quasar ayant été consommé dans les premiers temps de l'existence des galaxies, les trous noirs qu'elles renferment seraient beaucoup plus sages, faute d'être alimentés par un important disque d'accrétion. Le disque d'accrétion serait de l'ordre de deux ou trois années lumières. En raison de la vitesse très importante à laquelle graviterait la matière aux bords intérieurs du disque juste avant d'être engloutie, des rayons gamma très énergétiques seraient émis par des faisceaux tournant dans l'espace. Ainsi, lorsque ces faisceaux croiseraient la trajectoire de la Terre, nous pourrions les percevoir. La Fig 5 ci-dessous représenterait la coupe d'un quasar.

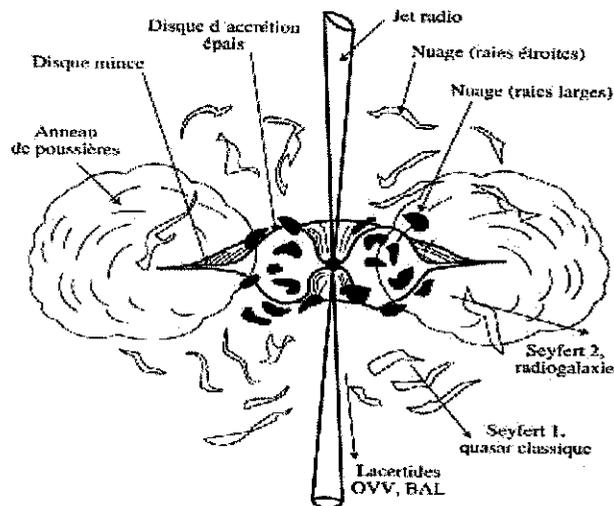


Fig. 5 : Représentation schématique d'une coupe de quasar

Aucune étoile ne pourrait exister à cet endroit puisqu'elle serait détruite par les forces de marée. En effet le trou noir est tellement massif que la différence d'accélération gravitationnelle entre deux points induirait une force de marée qui tendrait à étirer les objets passant à proximité. Une étoile serait ainsi disloquée en approchant d'un trou noir.

Vers la périphérie du disque d'accrétion, seraient émis les rayons X. Cette émission correspondrait à environ 10 % de l'énergie totale. La température s'élèverait ici à quelques millions de degrés, et les vitesses atteindraient le tiers de celle de la lumière. Depuis la Terre, on peut observer la présence d'un rayonnement ultraviolet, ce qui permet de supposer la présence de gaz très chaud.

A l'extérieur du disque d'accrétion, une sphère renfermerait des nuages denses de gaz et de poussières à mouvements internes rapides. Ils seraient la cause de l'élargissement des raies du spectre, dans les domaines du visible et de l'infrarouge. De part et d'autre de la sphère, à une distance de quelques centaines d'années lumière, ces nuages seraient moins denses, les mouvements internes ralentiraient, ce qui aurait pour conséquence une émission de raies plus fines.

Une forte concentration de matière, de la forme d'un tore, entourait le disque d'accrétion. Ce tore, estimé à une distance de plusieurs dizaines ou centaines d'années-lumière, se situerait dans le même plan que le disque et tournerait autour de lui.

Un énorme champ magnétique serait engendré par le trou noir de part de sa masse et de sa rotation, ce serait notamment pour cette raison que le trou noir acquerrait les propriétés d'un puissant aimant. Les lignes de force de ce champ se situeraient dans les deux directions perpendiculaires au plan du disque d'accrétion. Une partie de la matière située dans la sphère éloignée du centre, serait canalisée par ces lignes de force du champ magnétique et expulsée violemment en formant des jets de

matière, perpendiculaires au disque, et émettant dans les ondes radio. Ces lobes seraient gigantesques et atteindraient parfois des tailles supérieures celle de la galaxie hôte. [16]

Les masses aspirées par le trou noir tourbillonneraient et finiraient par disparaître. Lorsque l'approvisionnement tomberait en dessous d'un certain seuil, tout s'arrêterait et le trou noir deviendrait inactif. Ce serait le cas de notre Voie lactée où un quasar y existerait presque « endormi ». En 1992, une équipe française aurait découvert dans la direction du centre galactique, situé dans la constellation du Sagittaire, une source de radio compact. De plus, le satellite « Infrared Astronomical Satellite » aurait relevé deux millions d'étoiles rouges dans un petit volume de cinq années lumière et du gaz y tournerait avec frénésie comme saisi par un objet central très massif.<sup>6</sup>

Lorsque les quasars ont été découverts, les astronomes espéraient que leur étude permettrait de choisir entre les différents modèles cosmologiques. Toutefois, la complexité à interpréter toutes les observations établies, remettrait en cause la théorie de l'expansion de l'univers et tout particulièrement son âge. L'étude des quasars permettrait néanmoins d'envisager l'évolution des galaxies et par extension celle de l'univers.

## Références :

- [1]: L. Parravicini-L. Viazzo, *Les Mystères de l'Univers*, page 23, édition de Vecchi
- [2]: Gianluca Ranzini, *Etoiles et galaxies*, de la page 72 à la page 75, publié en Mai 2002 par les éditions Proxima
- [3]: Hong-Yee Chiu, *Physics Today*, Mai 1964
- [4]: L. Parravicini-L. Viazzo, *Les Mystères de l'Univers*, page 23, édition de Vecchi.
- [5]: *Atlas du ciel*, édition Gründ, 2003
- [6]: Maarten Schmidt, *Astar-like object with large red-shift*, Nature 197, 1040, publié en 1963.
- [7]: Article de Patrick Osmer, *Les quasars. des témoins du début de l'Univers*, page 166 à 177 du livre *Vie et mort des étoiles*
- [8]: L. Parravicini-L. Viazzo, *Les Mystères de l'Univers*, page 25, édition de Vecchi
- [9]: *la loi de Hubble*, The Columbia Encyclopedia, Sixth Edition 2008
- [10]: Halton Arp, *Quasars, redshift and controversies*, publié en 1987
- [11]: Daniel Kunth, *Les Quasars*, collection Dominos, édition Flammarion.
- [12]: E. Einstein, L. Infeld, B. Hoffmann, *Gravitational Equations and the Problem of Motion*, Annals of Mathematics, 1938
- [13]: K. Thorne, *Black Holes and Time Warps*, 1994, WW Norton & Company
- [14]: Daniel Kunth, *Les Quasars*, collection Dominos, édition Flammarion.
- [15]: Jean-Pierre Luminet, *Le Destin de l'Univers, Trous noirs et énergie sombre*, page 462, éditions Fayard
- [16]: Philippe Véron, *Les Quasars*, collection Que sais-je

---

<sup>6</sup>[www.larecherche.fr/content/articledumois/listweb%3Falone+d%C3%A9couverte+chandra+%c3%A9quipe+fran%C3%A7aise+quasar+centre+voie+lact%C3%A9e&hl=fr&ct=clnk&cd=3&gl=fr](http://www.larecherche.fr/content/articledumois/listweb%3Falone+d%C3%A9couverte+chandra+%c3%A9quipe+fran%C3%A7aise+quasar+centre+voie+lact%C3%A9e&hl=fr&ct=clnk&cd=3&gl=fr)

# Rayonnement fossile

Haché Aymeric, Vauthrin Camille

*Des particules à l'univers L2 MPM, Promotion 2007-2008*

## Abstract

The Cosmic Microwave Background is a radiation coming from the big bang's explosion which can be observed nowadays. It might be able to propagate since the recombination era, 380 000 years after the big bang, because during this periode, the light could propagate at last.

It had been accidentally discovered in 1964 by Penzias and Wilson at the same time as Dicke and Peebles who studied this topic. This radiation had been yet predicted by Gamow in 1948 to 5 K. This cosmic radiation obeys to the black body law and can confirm the big bang's existence. Most satellites as COBE and WMAP, have been sent to measure more precisely this radiation. A next satellite, Planck, will be sent in July 2008.

## 1. Introduction

La notion de rayonnement fossile (ou rayonnement cosmologique) est apparue lors de la théorie dite du Big Bang. Cette théorie est celle issue des observations de E. Hubble qui caractérisent un décalage vers le rouge des galaxies lointaines. Elle nous décrit alors la « naissance » de l'univers comme une explosion dans laquelle seraient créés le temps et l'espace. Cette explosion est suivie de plusieurs phases que nous décrirons pour trouver l'origine du rayonnement fossile. Puis, nous expliquerons comment celui-ci fut découvert totalement par hasard. Enfin nous approfondirons les caractéristiques de ce rayonnement et quels moyens ont été mis en jeu pour l'observer et en apprendre plus sur ce sujet.

## 2. Origines du rayonnement fossile

Afin, d'expliquer l'origine du rayonnement cosmologique, il nous faut décrire les différentes phases qui ont suivies le Big Bang. Au cours de celles-ci se sont produits des interactions pouvant nous informer sur ce rayonnement. [1]

Aux premiers instants après l'explosion du Big Bang, la physique actuelle n'est plus applicable, on utilise alors des concepts de la mécanique quantique. Cette théorie de la gravité quantique n'étant pas encore découverte, l'ère de Planck laisse place à de nombreuses spéculations

Suit alors la phase de l'inflation cosmique ( $10^{-35}$  secondes après l'ère de Planck), pour laquelle la motivation initiale était de proposer un processus provoquant l'homogénéisation et l'isotropisation de l'Univers. Alan Guth fut le premier à évoquer un scénario réaliste. En 1982, l'inflation permit également de montrer des petits écarts de l'homogénéité, comportant les germes des grandes structures astrophysiques. Depuis l'observation détaillée du fond diffus cosmologique, les modèles d'inflations sont sortis considérablement renforcés.

La phase d'inflation se compose d'une expansion extrêmement rapide de l'univers, à l'issue de laquelle la dilution causée par cette expansion rapide est telle qu'il existe plus aucune particule dans l'univers, mais celui-ci est rempli d'une forme d'énergie très homogène. Cette énergie se convertit alors en particules qui vont très vite se mettre à interagir et à s'échauffer. Le mécanisme général de l'inflation est parfaitement compris mais celui de ces deux dernières phases fait toujours l'objet de nombreuses recherches.

Puis vient l'ère de la grande unification, qui consiste à dire que les forces électromagnétiques faible et forte ne sont que des aspects différents d'une seule et unique interaction: La grande unification. Celle-ci commence à  $10^{-33}$  secondes et se manifeste à  $10^{16}$  GeV.

Ensuite a lieu la baryogénèse où matière et anti-matière existaient en quantité strictement identiques dans l'Univers. Or les observations actuelles indiquent que l'anti-matière est quasiment absente de l'Univers. Ceci montre donc qu'à un moment donné il y avait un léger excès de matière par rapport à l'anti-matière. Puis matière et anti-matière se sont annihilées en quantités strictement égales, laissant un très léger surplus de matière qui s'était formés. Comme la matière ordinaire est formée de particules appelées baryons cette phase est appelée baryogénèse. Le processus de cette phase n'est pas bien connu, la température varie de  $10^3$  à  $10^{16}$  Gev.

L'Univers refroidit, cependant électrons et photons continuent d'interagir, mais plus les neutrinos qui cessent d'interagir entre eux. Il existe donc un fond cosmologique de neutrinos présentant des caractéristiques semblables à celles du fond diffus cosmologique. Cette phase constitue le découplage des neutrinos.

La température de l'Univers dépasse 0,5Mev ( 5 milliards de degrés) correspondant à l'énergie de masse des électrons. Au delà de cette température, les interactions entre électrons et photons créent des pertes d'électrons-positrons qui s'annihilent spontanément mais sont sans cesse recréées. En dessous de 0,5Mev la quasi totalité des paires s'annihilent en photons, laissant place à un très léger excès d'électrons. Cette phase s'appelle annihilation électrons-positrons.

A une seconde la nucléosynthèse primordiale commence, l'Univers est constitué d'un plasma d'électrons et de noyaux atomiques. A haute température les noyaux atomiques ne peuvent exister, l'Univers est alors en présence d'un mélange de protons, de neutrons et d'électrons. Ce n'est que lorsque la température descend en dessous de 0,1Mev que les nucléons peuvent se combiner pour former des noyaux atomiques. Il ne peut se former que des noyaux atomiques plus léger que le lithium. Ainsi seuls les noyaux d'hydrogène, d'hélium et de lithium sont produits. Cette phase dure trois minutes.

L' Univers à cette époque est devenu suffisamment dense pour que la lumière puisse s'y propager puisque le principal obstacle à sa propagation était la présence d'électrons libres. Lors du refroidissement de l'Univers les électrons libres se combinent aux noyaux atomiques pour former des atomes. Cette époque porte pour cette raison le nom de recombinaison qui a lieu 380 000 ans après le Big Bang. On parle aussi de découplage entre matière et rayonnement. La lueur du fond diffus cosmologique a pu se propager jusqu'à nous depuis cette époque. Afin de résumer le déroulement du Big Bang, voici un schéma récapitulatif<sup>1</sup>(Fig 1)

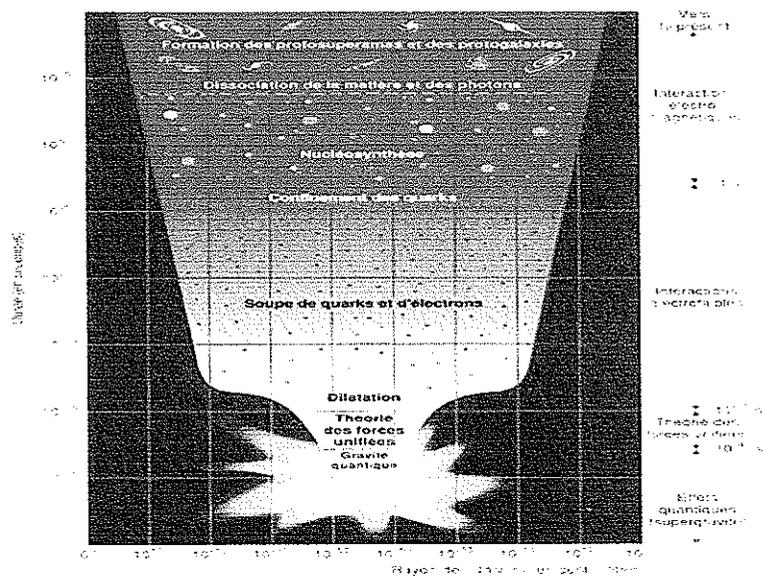


Fig.1 :Schéma récapitulatif des premiers instants après le Big Bang.

<sup>1</sup>[Http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine de l'univers](http://fr.wikipedia.org/wiki/Origine_de_l'univers)

### 3. Découverte du rayonnement fossile.

En 1964, les radio-astronomes Penzias et Wilson qui travaillaient pour les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, disposent d'une antenne qui devait servir à la communication. Pour mesurer le rayonnement dans le domaine radio de la voie lactée, ils souhaitaient transformer cette antenne en radio-télescope. C'est alors que par hasard, lors du calibrage, ils découvrent accidentellement un bruit d'origine inconnue sur la longueur d'onde 7,35 cm, ce qui correspond à une température de 7,5 K. [2]

Après études ils déduisent qu'il ne pouvaient pas s'agir du signal émis par la voie lactée qu'ils cherchaient à découvrir. Penzias mentionne ses découvertes au radio-astronome Berni Burke qu'il lui apprend que James Peebles a prédit l'existence d'un rayonnement à quelques kelvins. Mais également qu'une équipe de l'université de Princeton, formée de Dicke, Roll, Wilkinson, est en train de construire une antenne pour le détecter. Penzias prend alors contact avec Dicke et ils décident de publier conjointement deux articles. L'un signé de Penzias et Wilson décrivant la découverte du rayonnement fossile et l'autre signé par Peebles et l'équipe de Dicke en décrivant les conséquences cosmologiques.

Penzias et Wilson reçurent chacun  $\frac{1}{4}$  de prix Nobel de physique en 1978 pour leur découverte.<sup>1</sup> Mais ce ne sont pas les seuls à obtenir un prix Nobel pour le rayonnement fossile, en effet deux cosmologistes, John Mather et George Smoot, ont reçus en 2006 pour leurs travaux sur le rayonnement fossile, qui confortent en particulier la théorie du Big Bang. Des recherches basées principalement sur les données recueillies par le satellite COBE, lancé en 1989 par la Nasa.<sup>2</sup>

Auparavant, d'autres études ont été menées pour tenter de prouver l'existence d'un rayonnement fossile.

En 1957, dans sa thèse de doctorat, l'astronome russe Tigran Shmaonov de l'Institut de Physique Générale publia dans le journal soviétique "Instruments et méthodes expérimentales" une analyse rendant compte des sources possibles de bruits à la longueur d'onde de 3.2 cm. Il réalisa cette expérience au moyen d'un instrument proche de celui utilisé des années plus tard par Penzias et Wilson, mais beaucoup moins sensible. Il concluait ses mesures et trouva la température du rayonnement de fond à  $4 \pm 3$  K.

En analysant les raies d'absorption de l'étoile  $\zeta$  Ophiuchi, l'astronome McKellar découvrit la double raie du radical nitrile (ou cyanide, des molécules constituées de carbone et d'azote). Elle ne pouvait se former que si la lumière était absorbée par une molécule CN en rotation excitée à une température d'environ 2.3 K. Bien sûr à cette époque, personne ne pensa à la possibilité que cette molécule puisse être excitée par le rayonnement fossile. En fait, personne n'avait même imaginé à cette époque que l'Univers primordial puisse être chaud. Cette équipe avait donc découvert dès 1941 un effet indirect du rayonnement fossile.

### 4. Observation du rayonnement fossile

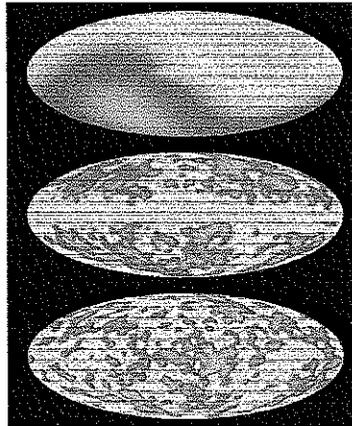
Les mesures faites par Penzias et Wilson permettaient d'affirmer que ce rayonnement était approximativement celui d'un corps noir et isotrope à 10% près. Cette mesure d'isotropie demandait d'être affinée et le rayonnement du corps noir confirmé pour donner des bases solides à la théorie. De nombreuses mesures ont été effectuées depuis aussi bien sur la Terre ferme que par ballon sonde ou avion. Ceci permit de montrer que le rayonnement cosmologique présentait une isotropie de température au moins au 10 millièmes. Cependant, une mesure plus précise apparue encore indispensable. Il s'agit d'analyser la première image de l'Univers vieille d'environ 15 milliards d'années qui nous permettra de nous renseigner sur l'origine des structures que nous observons aujourd'hui.

<sup>1</sup>[http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1978/](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1978/)

<sup>2</sup>[http://www.cite-sciences.fr/francais/ala\\_cite/science\\_actualites/sitesactu/question\\_actu.php?langue=fr&id\\_article=6883](http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/science_actualites/sitesactu/question_actu.php?langue=fr&id_article=6883)

La précision requise par de telles mesures n'étaient pas sans poser de problèmes, il s'agissait de détecter uniquement les fluctuations du rayonnement cosmologique et donc d'éliminer les fluctuations dues à d'autres phénomènes.

Le premier phénomène à éliminer est celui dû à l'effet Doppler, ensuite il s'agit d'éliminer les rayonnements dus aux différentes poussières interstellaires. Pour cela on se sert d'un marqueur : l'Hydrogène. Une fois ces phénomènes éliminés on obtient la carte de rayonnement totale dépourvue au maximum des fluctuations non cosmologiques (Fig.2).



**Fig.2** :Cartes planisphères faites à partir des données du satellite COBE du rayonnement cosmologique fossile, à trois fréquences différentes. L'échelle des couleurs correspond à des fluctuations de température du spectre de corps noir correspondant.

Le fond diffus cosmologique a été observé à plusieurs reprises par deux satellites (COBE et WMAP). Le satellite COBE<sup>1</sup> (cosmic background explorer) lancé le 18 novembre 1989 est parti avec plusieurs objectifs dont la recherche d'éventuelles anisotropies du rayonnement cosmique dans la gamme des micro-ondes, la mesure de son spectre, la détection du rayonnement infrarouge cosmique, et l'étude des rayonnements astrophysiques locaux.

Le satellite dispose pour cela de trois instruments principaux:

- DMR(Differential Microwave Radiometer) chargé de mesurer les fluctuations de température du rayonnement cosmologique.
- FIRAS (Far InfraRed Absolute Spectrometer) qui détermine la forme du spectre de ce rayonnement.
- DIRBE ( Diffus InfraRed Background Experimental) qui détecte et qui analyse les spectres des objets célestes primordiaux (étoile ou galaxies nées quelques centaines de millions d'années après le Big Bang).

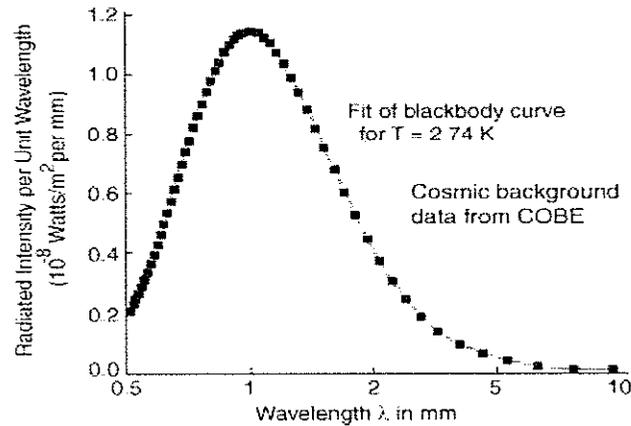
Les premiers résultats obtenus par le satellite en 1990 confirmèrent la nature thermique du rayonnement cosmologique par la concordance mesurée entre le spectre de celui-ci et celui d'un corps noir à  $2,735 \pm 0,06$  K. Ceci confirme la théorie proposée dans le cas du Big Bang. Les premières mesures du DMR ont permis de calculer la vitesse de la Terre par rapport au rayonnement cosmologique  $627 \pm 22$  km s<sup>-1</sup> et de donner une valeur précise de la température de celui-ci  $2,726 \pm 0,010$  K. La publication la plus importante fut la carte des rides du temps, photo de l'Univers il y a environ 15 milliards d'années.

Des anisotropies ont alors été pour la première fois détectées dans le rayonnement cosmologique, révélant des fluctuations de températures.

Le plus frappant est l'uniformité du signal reçu par COBE (Fig.3). Ce rayonnement fossile est donc un test de l'expansion isotrope de l'Univers ainsi que de l'homogénéité de la densité de matière.

Une inhomogénéité de matière dans une certaine région de l'espace doit conduire à un décalage spectral vers le rouge de l'hydrogène.

<sup>1</sup>[Http://www.nimbustier.net/tipe/cobe/intro.html](http://www.nimbustier.net/tipe/cobe/intro.html)



**Fig.3 :** Signal fournit par le satellite COBE, ayant la même allure que celui d'un corps noir à 2,73 K.

Puis le satellite WMAP<sup>1</sup> (Wilkinson microwaves anisotropy probe) fut lancé le 30 juin 2001, celui-ci permis au chercheur de la NASA (National Aeronautics and Space Administration) de tirer un nouveau portrait de la lueur du fond cosmologique cette nouvelle image donne une valeur précise de l'âge de l'Univers de 13,7 milliards d'années avec une marge d'erreur de 1%. Il se dilate à la vitesse  $72 \text{ Km s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ .

La lumière que nous voyons aujourd'hui sous forme de rayonnement cosmologique a voyagé pendant plus de 13 milliards avant de nous atteindre. Ces nouvelles données observées par WMAP étaient cohérentes avec la théorie du Big Bang et celle de l'inflation.

Les astrophysiciens utilisent un peu moins de 80% de la carte pour calculer leurs paramètres cosmologiques, une large bande centrale dont le traitement est jugé trop peu sûr est mise de côté.

D'après les mesures de WMAP l'Univers c'est « réionisé » au redshift (décalage vers le rouge) ce qui est en accord avec la présence de galaxies et de quasars à très haut redshift, ainsi qu'avec leurs compositions chimiques.

On peut retrouver l'antenne de Wilson et Penzias ainsi que les deux satellites et leur signal observé sur la figure ci-dessous. (Fig.4).

Nous avons maintenant la preuve que ces objets s'étaient déjà formés moins d'un milliards d'années avant le Big Bang, ils étaient à cette époque considérablement enrichis en éléments lourds (carbone, oxygène, azote, ...).

Le satellite européen Planck<sup>2</sup> doit être lancé fin juillet 2008 ( en parallèle avec le satellite Herschel). Sa mission sera de dresser des cartes d'une précision inégalée du rayonnement fossile micro-onde dans lequel baigne notre univers. Il sera sensible à des variations de température de quelques millièmes de degrés et cartographier l'ensemble du ciel dans neuf longueurs d'onde. Le satellite Planck nous permettra d'en savoir beaucoup plus sur la nature de la matière noire, « masse manquante » de l'Univers, et sur sa quantité, de même qu'il livrera bon nombre de clés pour mieux comprendre la nature de l'énergie noire et l'expansion de l'Univers.

<sup>1</sup>[http://www.cidehom.com/science\\_at\\_nasa.php?\\_a\\_id=119](http://www.cidehom.com/science_at_nasa.php?_a_id=119)

<sup>2</sup>[http://www.esa.int/esaCP/SEM\\_SGPRMTWE\\_France\\_0.html](http://www.esa.int/esaCP/SEM_SGPRMTWE_France_0.html)

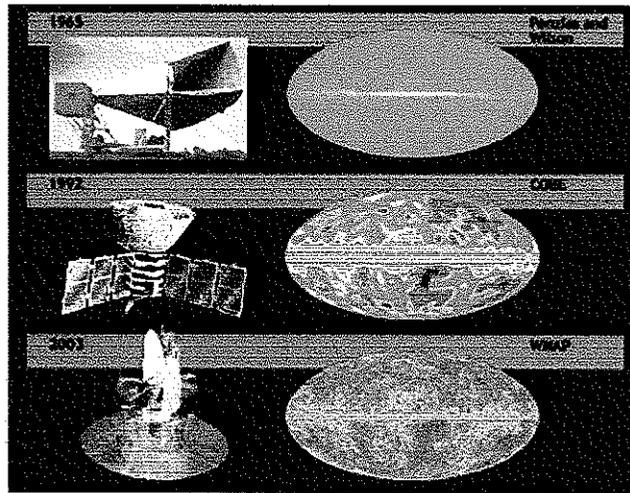


Fig.4 : Le rayonnement fossile observé par l'antenne et les deux satellites COBE en 1992 et WMAP en 2003.

## 5. Conclusion

La théorie du Big Bang suppose qu'au tout début de la création de l'Univers, la matière et le rayonnement étaient en équilibre thermique, à très haute température et pendant un temps limité. Puis l'expansion de l'Univers a refroidi ce plasma ultra-dense et ultra-chaud jusqu'à une température où les électrons libres ont pu former les cortèges électroniques des noyaux créant ainsi les atomes. Les radiations produites lors de l'explosion initiale doivent donc continuer à exister dans l'Univers, mais à température très basse. Lorsque les astronomes vérifièrent l'existence d'un rayonnement parfaitement isotrope à 2,7 K, le modèle de l'explosion primordiale devint incontournable et il est devenu maintenant le Modèle Standard de la Cosmologie.

Vers l'avenir, il nous reste nombreux sujets à découvrir sur ce rayonnement cosmologique notamment avec le satellite Planck qui sera lancé en juillet 2008 qui devrait nous renseigner sur la matière noire ou manquante de l'Univers.

Il existe également un autre rayonnement à découvrir, celui des neutrinos, qui se produit lors de la phase de découplage des neutrinos qui serait semblable au rayonnement fossile, mais il n'a pas été encore découvert.

### Références :

[1] Philippe Miné, *Bizarre Big Bang*, Belin, 2000.

[2] George Smoot, Keay Davidson, *Les rides du temps*, Flammarion, 1994.

# L'Antimatière

Antoine Gautier

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008*

## Résumé

In 1928, Dirac discovery an equation. This equations predicted that all of the fundamental particles in nature must have a corresponding "antiparticle." In 1995 scientists created the first anti-hydrogen atom at the CERN research facility in Europe by combining the anti-proton with a positron

## 1. Dirac et l'antimatière:



**Fig. 1 :** photo de Paul Dirac

L'histoire de l'antimatière commence en 1928, quand Paul Adrien Maurice Dirac, 1902-1984, physicien britannique (Fig. 1), qui étudie le comportement de l'électron autour de l'atome, suppose, à partir des équations de la physique quantique et de la relativité, l'existence d'une particule qui est encore inconnue : l'antiélectron, appelé plus tard positron. Celui-ci doit être la copie conforme de l'électron, à ceci près que sa charge électrique doit être l'exacte opposée de celle de l'électron. L'antimatière peut être montrée mathématiquement de façon simple de nos jours. Pour cela il faut partir de la relation de l'énergie d'une particule en relativité qui est :

$$E^2 = p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4 \quad (1)$$

Où E représente l'énergie, p la quantité de mouvement, c la célérité de la lumière et m la masse de la particule.

A partir de Eq. (1), on exprime la relation de l'énergie qui nous donne :

$$E = \pm (p^2 \cdot c^2 + m^2 \cdot c^4)^{1/2} \quad (2)$$

Cette relation permet de montrer qu'une particule possède une énergie qui lui est propre ainsi que son opposé, ce qui montre qu'il y a une antiparticule d'énergie exactement opposée.

La prédiction de l'existence de l'antimatière par Dirac fut confirmée quatre ans plus tard. En 1932, le positron est découvert lors d'une expérience par un scientifique nommé Anderson.

## 2. Qu'est ce que l'antimatière ?

Selon les théories actuelles de la physique, toutes les particules de la matière (électrons, protons, neutrons, etc.) posséderaient des doubles «symétriquement opposés». La seule différence entre les particules subatomiques et leur «antiversion», c'est que leurs propriétés électriques et magnétiques seraient inversées. Pour l'électron avec sa charge négative, il existerait donc une particule, appelé l'antiélectron (ou positron) aux propriétés identiques mais possédant une charge positive. Le proton, le neutron, le neutrino et toutes les autres particules possèdent ainsi des doubles : antiproton, antineutron, antineutrino, etc. Toutes ces antiparticules forment l'antimatière.

Particules de matière et d'antimatière ne peuvent cohabiter ensemble. Lorsqu'elles se rencontrent, elles disparaissent dans un éclair de lumière. Leur masse est aussitôt convertie en énergie, comme le décrit la formule d'Einstein :

$$E=mc^2$$

E représentant l'énergie, m la masse et c la célérité de la lumière.

En mariant un antiproton à un positron, on obtient le plus simple de tous les antiatomes : l'antihydrogène. Cependant, toutes ces antiparticules ont une durée de vie extrêmement courte puisque aussitôt qu'elles entrent en contact avec de la matière ; c'est la destruction instantanée. Dans la nature, l'antimatière est extrêmement rare. Certaines antiparticules, comme le positron, sont parfois produites naturellement lors de la désintégration de certaines substances radioactives. La plupart des antiparticules, comme l'antiproton et l'antineutron, n'existent pas à l'état naturel sur notre planète. Ils peuvent cependant être produits dans des laboratoires de physique nucléaire.

## 3. La synthèse de l'antimatière:

Le plus grand centre de recherche sur l'antimatière s'appelle le CERN. Il est situé à Genève en Suisse.

Durant les 20 dernières années, les scientifiques du CERN ont utilisé les antiparticules de nombreuses façons dans leur travail quotidien. Les antiparticules peuvent être produites en faisant entrer en collision des particules subatomiques. Avant d'être distribuées aux diverses expériences de physique, les antiparticules doivent être isolées, rassemblées et stockées pour régler leur énergie au niveau approprié.

En 1995, les scientifiques du CERN, réussirent à synthétiser le premier atome d'antimatière en combinant un positron avec un antiproton, ils arrivèrent donc à créer pour la première fois l'atome le plus simple de l'antimatière : l'anti-hydrogène.

La première "usine à antiproton indépendante", le Décélérateur d'Antiprotons, appelé aussi AD, est opérationnelle au CERN depuis l'an 2000.

Elle produit les antiprotons de basse énergie, nécessaires pour toute une série d'études, dont la synthèse d'atomes d'antihydrogène - la création d'antimatière.

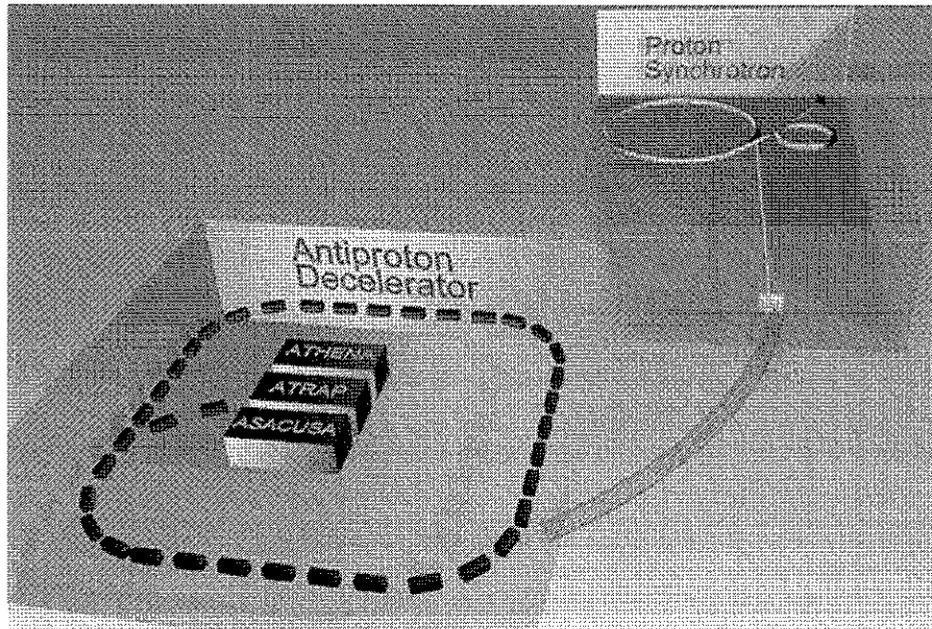
## 4. Fonctionnement de l' AD :

Le Décélérateur d'Antiprotons est une machine très particulière comparée à ce qui existait déjà au CERN et dans d'autres laboratoires dans le monde. Jusqu'à récemment, une "usine à antiparticules"

consistait en une chaîne de plusieurs accélérateurs, chacun accomplissant l'une des étapes nécessaires à la production d'antiparticules. Ce grand défaut ne permettait pas aux scientifiques de bien pouvoir étudier l'antimatière.

C'est pourquoi le CERN décida de construire une nouvelle machine : le AD (Fig. 2).

L'anneau de l'AD est approximativement un cercle d'une circonférence de 188 m. Il consiste en une chambre à vide froide entourée d'une longue séquence de pompes à vide, aimants, cavités radiofréquences, instruments à haute tension et circuits électroniques.



**Fig. 2** :schéma représentant le voyage de l'antiparticule créer du décélérateur (anitproton decelerator) jusqu'à la chambre à vide (proton synchrotron)

Chacune de ces pièces a sa fonction spécifique :

- Les antiprotons circulent à l'intérieur de la chambre à vide de manière à éviter tout contact avec la matière ordinaire (comme les molécules d'air) et de s'annihiler. Le vide doit être optimal et, dans ce but, plusieurs pompes à vide, qui extraient l'air, sont placées autour de la chambre.
- Des aimants sont également placés tout autour. Il y a deux types d'aimants : les dipôles (qui ont un pôle Nord et un pôle Sud, comme les aimants en fer à cheval bien connus) permettent de modifier la direction de mouvement et assurent que les particules restent sur leur trajectoire circulaire. On les appelle aussi "aimants de courbure". Des quadripôles (qui ont quatre pôles) sont utilisés comme "lentilles". Ces "aimants de focalisation" assurent que la taille du faisceau soit inférieure à la taille de la chambre à vide.
- Les champs magnétiques peuvent modifier la direction et la taille du faisceau mais pas son énergie. Pour cela, il faut un champ électrique : il est fourni par les cavités radiofréquence qui produisent de hautes tensions de manière synchronisée avec la rotation des particules autour de l'anneau.

Les antiparticules doivent être créées à partir d'énergie. Cette énergie est obtenue avec des protons qui ont auparavant été accélérés dans le PS. Ces protons sont projetés dans un bloc de métal, appelé cible. Nous utilisons des cibles de cuivre ou d'iridium, essentiellement parce qu'elles sont faciles à refroidir. L'arrêt brutal des telles particules énergétiques libère une quantité énorme d'énergie dans un petit volume, le chauffant à de telles températures que des particules de matière et d'antimatière sont créées spontanément. Dans environ une collision sur un million, une paire proton-antiproton est formée. Cependant, étant donné qu'environ 10 milliards de milliards de protons heurtent la cible (environ une fois par minute), cela fait environ 10 millions d'antiprotons qui prennent la direction de l'AD. Les antiprotons sont produits pratiquement à la vitesse de la lumière, mais tous n'ont pas exactement la même énergie (ce qu'on appelle la dispersion en énergie). De plus, ils se propagent aléatoirement dans toutes les directions, tentant aussi de s'échapper par les côtés (oscillations transversales). Des aimants de courbure et de focalisation s'assurent qu'ils restent sur la bonne trajectoire, au milieu de la chambre à vide, alors qu'ils commencent à faire la course autour de l'anneau.

À chaque tour, les champs électriques élevés à l'intérieur des cavités radiofréquence commencent à décélérer les antiprotons. Malheureusement, cette décélération augmente la taille de leurs oscillations transversales : si on ne fait rien pour y remédier, tous les antiprotons sont perdus lorsqu'ils entrent finalement en collision avec les parois de la chambre à vide.

Pour éviter cela, deux méthodes ont été inventées: le refroidissement stochastique et le refroidissement par électrons. Le refroidissement stochastique (ou "aléatoire") fonctionne mieux à hautes vitesses (proches de la vitesse de la lumière,  $c$ ) et le refroidissement par électrons fonctionne mieux à petites vitesses (toujours rapides, mais seulement 10 à 30 % de  $c$ ). Leur but est de diminuer la dispersion en énergie et les oscillations transversales du faisceau d'antiprotons.

Finalement, lorsque la vitesse des antiparticules a atteint environ 10% de la vitesse de la lumière, le groupe comprimé d'antiparticules (appelé un "paquet") est prêt à être éjecté. Le cycle de décélération est terminé : il a duré environ une minute. Un puissant aimant à déflexion rapide est enclenché en moins d'un millionième de seconde et, au tour suivant, tous les antiprotons suivent une nouvelle trajectoire, qui les conduit dans les chambres à faisceau de la ligne d'extraction. Là, de nouveaux aimants dipolaires et quadripolaires dirigent le faisceau vers une expérience. Et voilà comment nous devons faire pour pouvoir étudier l'antimatière et ses propriétés.

## 5. Peux-t-il y avoir des applications pratiques de l'antimatière?

L'antimatière est déjà utilisée en médecine : la tomographie par émission de positrons (TEP), permet de visualiser certaines parties du corps sans y entrer. À basses énergies, les annihilations électron-positron peuvent être utilisées pour révéler les fonctionnements du cerveau. En imagerie médicale TEP, les positons proviennent de la désintégration de noyaux radioactifs incorporés dans un fluide spécial injecté dans le patient. Les positons s'annihilent alors avec les électrons des atomes voisins. Comme l'électron et le positon sont pratiquement au repos lorsqu'ils s'annihilent, il n'y a pas suffisamment d'énergie d'annihilation pour recréer des paires particule-antiparticule, même les plus légères (l'électron et le positon), et l'énergie sort sous forme de deux rayons gamma émis en directions opposées pour conserver la quantité de mouvement. Ce qui permet par la suite d'obtenir une image 3D du corps et des organes.

En s'annihilant avec la matière, l'anti-matière libère une quantité considérable d'énergie. Un kilogramme d'antimatière contient à peu près autant d'énergie qu'une centaine de million de tonnes de charbon. Cette propriété en ferait un carburant idéal. Au niveau énergétique, on estime qu'il faudrait environ un microgramme d'antimatière pour propulser un vaisseau spatial de 1500 tonnes vers Mars. Cependant l'antimatière reste très difficile à produire, tous les antiprotons produits au CERN pendant une année fourniraient suffisamment d'énergie pour allumer une ampoule électrique de 100 watts pendant trois secondes.

Le coût de fabrication de l'antimatière qui est considéré comme le principal obstacle à son utilisation. En effet, il en coûterait aujourd'hui environ 25 milliards de dollars et il faudrait plus de 1000 ans pour produire un micro-gramme d'antimatière.

## **6. Conclusion :**

Dirac a donc prédit de manière juste, l'existence de chaque anti-particule pour chaque particule existante. Aujourd'hui, l'équipe de scientifique du CERN étudie l'antimatière grâce au AD, mais encore a l'heure actuelle, l'antimatière possède encore beaucoup de zones d'ombre.

## **Références :**

C-D ROM :  
Encyclopédie Hachette 2004

Internet:  
site internet du CERN  
[www.wikipedia.net](http://www.wikipedia.net)  
site internet de science Nasa

# Détection des ondes gravitationnelles

Pierre-Nicolas Mauger

Etienne Reith

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008*

## Résumé

Gravitational waves are ripples in space time produced by accelerating massive bodies. They were predicted by the theory of general relativity and have not yet been directly observed. That's why gravitational wave detectors are working all over the world and will soon be sent into space. The detection of these waves is important because on the one hand it will bring us the proof that they exist and on the other hand it will allow scientists to develop a new way to study the universe.

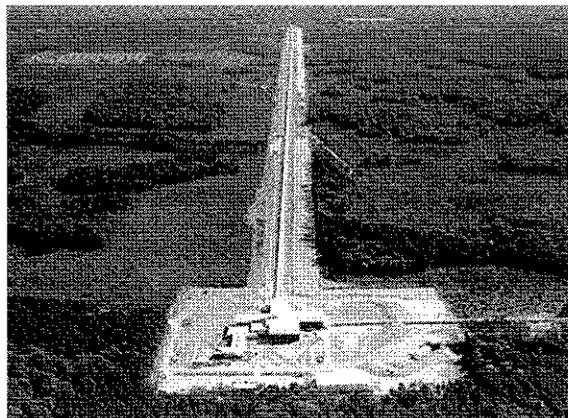
## 1. Introduction historique

En 1915, Albert Einstein présente sa théorie de la relativité générale [1] dont découlent les ondes gravitationnelles. Afin de prouver l'existence de tels phénomènes Joseph Weber, un physicien américain, développa dans les années 1960 le premier détecteur à ondes gravitationnelles : un détecteur à barres résonnantes à température ambiante.



**Fig. 1 :** *weber travaillant sur son détecteur*

Ses résultats concluants à l'existence des ondes furent cependant remis en cause faute de confirmation observationnel et il faut attendre 1974 pour obtenir une preuve indirecte de leur existence grâce à l'observation du pulsar binaire PSR B1913+16 par Hulse et Taylor [1] (le prix Nobel leur fut décerné en 1993 pour cette découverte). C'est plus tard, en 1992, que fut développé par Kip Thorne, Ronald Drever et Rainer Weiss le projet LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), premier détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles afin d'obtenir des preuves observationnels directes. Aujourd'hui 4 autres interféromètres semblables aux deux du projet LIGO sont en fonctionnement dans le monde et poursuivent le même objectif : VIRGO (projet franco-italien), GEO600 (projet anglo-allemand), TAMA300 (projet japonais) et AIGO500 (projet australien).



**Fig. 2 :** Vue aérienne du détecteur *LIGO*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <http://www.ligo.caltech.edu/>

Cependant aucune onde gravitationnel n'a encore été observé, c'est pourquoi le lancement du projet LISA, un interféromètre spatial plus performant que ceux situés sur terre et sur lequel travail l'ESA et la NASA, est prévu pour 2013.

## 2. Qu'est ce qu'une onde gravitationnelle?

Depuis qu'Einstein énonça sa théorie de la relativité générale, on considère le temps et l'espace comme un tout non dissociable liés par la constante de la vitesse de la lumière. Toute masse dans l'espace déforme l'espace temps. Lorsque cette masse est accélérée, la déformation de l'espace temps résultante va se propager a la vitesse de la lumière. C'est ce qu'on appelle une onde gravitationnelle.

On peut aussi noter qu'à l'inverse, toute masse se déplacera sous l'effet d'une onde gravitationnelle.

Cependant, l'intensité d'une onde gravitationnelle est très faible comparée aux ondes électromagnétiques par exemple. De ce fait, seules les accélérations de masses colossales sont susceptibles de générer des ondes gravitationnelles observables. C'est le cas des explosions de supernovæ, de systèmes binaires spiralant, la formation de trous noirs, la collision d'objets très massifs tels les étoiles a neutrons, de sources périodiques comme des pulsars,....

## 3. Systèmes de détections:

### 3.1. Barres de Weber

La première tentative visant a détecter les ondes gravitationnelles fut réalisée par Joseph Weber dans les années 60 [3]. Il utilisa un dispositif constitué d'un cylindre métallique de 1,5 tonnes suspendu dans le vide (Fig. 1). Il espérait ainsi qu'une brève déformation du cylindre due au passage d'une onde gravitationnelle le ferait osciller a sa fréquence propre, à l'instar d'une cloche que l'on frappe et qui oscille. Des capteurs piezzo-électrique transformaient toute vibration mécanique du cylindre en un signal électrique. Ce système étant très sensible aux conditions extérieures telles les petites secousses sismiques, Weber entreprit de construire un second détecteur de ce type a 1000 kilomètres du premier. Si un signal était enregistré par ces deux détecteurs en même temps, on pouvait raisonnablement penser qu'il s'agissait du passage d'une onde gravitationnelle.

En 1970, Weber annonça qu'il avait détecté des coïncidences qui pouvaient s'expliquer par des ondes gravitationnelles provenant du centre de notre galaxie (Fig. 3) [4]. Malheureusement, ce résultat ne fut jamais confirmé puisqu'aucun autre laboratoire équipé de dispositifs similaires ne purent aboutir à ce même résultat.

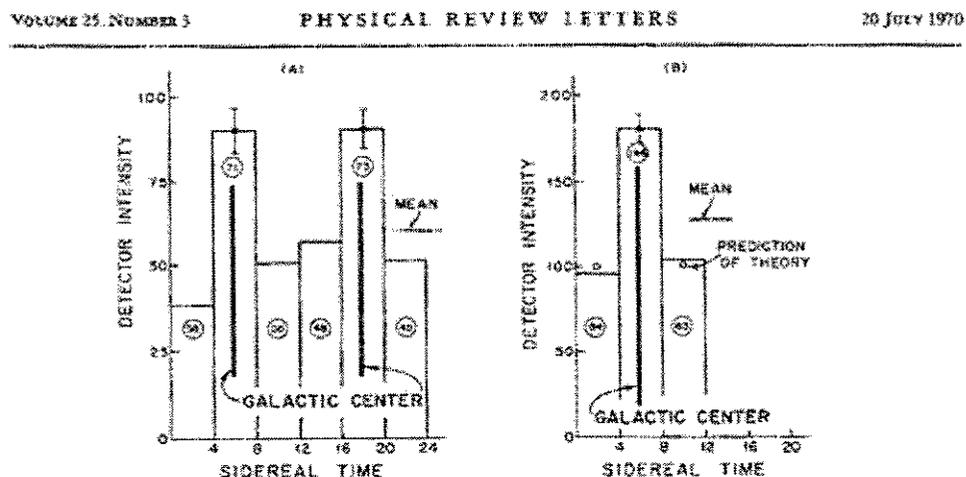


FIG. 1. (a) 24-h histogram of detector intensity versus sidereal time. (b) 12-h histogram of detector intensity versus sidereal time. The circled numbers are the numbers of coincidences in each bin.

**Fig. 3 :** diagramme publié en 1970 par Weber présentant ces observations : on observe sur la figure de gauche 2 pics d'intensité supposés correspondre à la détection d'ondes gravitationnelles produites par le centre de notre galaxie

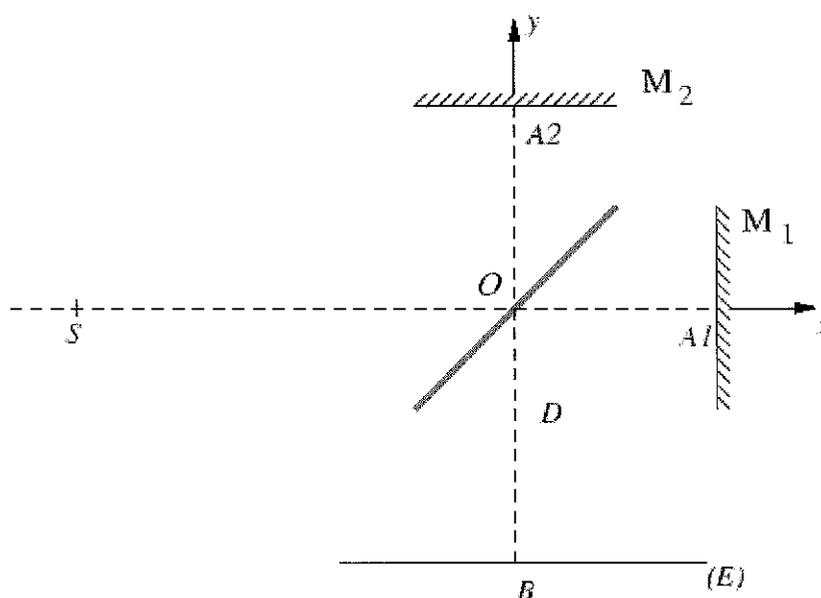
Aujourd'hui encore, ce type de détecteur à masse résonnante est utilisé, tel Explorer sur le site du CERN près de Genève. Ce détecteur est composé d'une barre cylindrique de 2270kg, mesure 3m de long et 60cm de diamètre. Ces caractéristiques sont déterminées pour que la fréquence de résonance de la barre de métal soit celle présumée des ondes gravitationnelles (qui dépendent de leur source). Pour que ces détecteurs soient performants, il faut réduire au maximum les bruits parasites qui peuvent être de trois natures différentes: mécanique, électronique, thermique. Pour cette dernière, on refroidit Explorer à 2,5K.

Même avec des avancées technologiques en cryogénie et sur la sensibilité des capteurs utilisés, il apparaît très vite que les détecteurs de masse résonnante auraient peu de chances de détecter des ondes gravitationnelles.

Un nouveau type de détecteur est alors mis au point, utilisant le principe de l'interférométrie.

### 3.2. Détecteurs interférométriques

Les détecteurs interférométriques fonctionnent sur le principe de l'interféromètre de Michelson (Fig. 4) [4].



**Fig. 4 :** interféromètre de Michelson

La lumière provenant de la source (S) est séparée en deux faisceaux (OA1 et OA2) par le miroir plan semi réfléchissant situé en O. La lumière se réfléchit ensuite sur les miroirs M1 et M2 puis est recombinaée en O par le miroir semi réfléchissant. On observe ensuite en B une figure d'interférences composée de franges sombres et brillantes. Si la lumière provenant des deux bras est en phase (c'est-à-dire si la lumière à parcouru la même distance dans les deux bras) alors on observe une tache brillante au centre du détecteur. Au contraire si les signaux ne sont pas en phase alors la tache brillante ne sera plus au centre. Pour les détecteurs interférométriques la lumière parcourt la même distance dans les deux bras sauf lors du passage d'une onde gravitationnelle, ce qui permet leur détection.

Cependant la nature des ondes gravitationnelles (notamment la faiblesse de leur interaction : il faut être capable de mesurer des variations de longueur de l'ordre de  $10^{-18}$  m !) impose aux détecteurs interférométriques un grand nombre d'améliorations par rapport à ce montage de base.

La première est l'augmentation du trajet parcouru par la lumière dans les bras de l'interféromètre grâce à des cavités Fabry-Perot (système optique constitué de 2 surfaces partiellement réfléchissantes à haut coefficient de réflexion) ou le signal effectue une centaine d'aller retour. Avec ce principe une variation de longueur très faible est multipliée par le nombre d'aller et de retour et est donc plus facilement détectable. Pour améliorer la précision des mesures les bras où circule le signal sont placés sous ultra-vide ( $10^{-7}$  mbar) afin d'éviter la variation d'indice de milieu qui dévierait la lumière. De plus la distance parcourue par la lumière implique une importante puissance lumineuse. Par exemple pour VIRGO (interféromètre franco-italien situé près de Pise) la puissance lumineuse du laser utilisé est de

20W puis est artificiellement amenée à 1kW grâce à une cavité Fabry-Perot.

Un autre problème important concernant la précision est l'isolation sismique du système. VIRGO par exemple est équipé d'atténuateur sismique très performant composé des plusieurs filtres mis au point pour les besoins du projet sur lesquels sont suspendus les miroirs et qui les isole des vibrations sismiques de fréquence supérieure à 10hz.

Ces détecteurs sont donc autant un challenge technique que scientifique mais ils ont cependant des défauts comme le fait qu'ils ne peuvent détecter les ondes gravitationnelles sur une grande plage de fréquence (seulement aux alentours de 100hz) à cause des vibration provenant du sol. C'est pourquoi un nouveau type de détecteur est nécessaire.

### 3.3. Le projet Lisa:

Le « Laser Interferometer Space Antenna » est un projet commun entre la Nasa (agence spatiale américaine) et l'Esa (agence spatiale européenne). Contrairement aux projets précédents, Lisa sera un détecteur non plus situé sur Terre, mais gravitant autour du Soleil, dans l'espace. Par cette méthode, les scientifiques espèrent s'affranchir des contraintes liées au bruit sur Terre. En effet, les sources les plus probables d'ondes gravitationnelles émettraient à des fréquences extrêmement basses (en dessous de 10 milliHertz) (Fig. 5). A cette fréquence, il est impossible sur Terre de ne pas être gêné par le bruit due, entre autre, aux ondes sismiques, et ce même avec des systèmes d'isolation performants. Cependant, d'autres facteurs seront à prendre en compte, telle la dérive des satellites ou encore les perturbations due aux vents solaires.

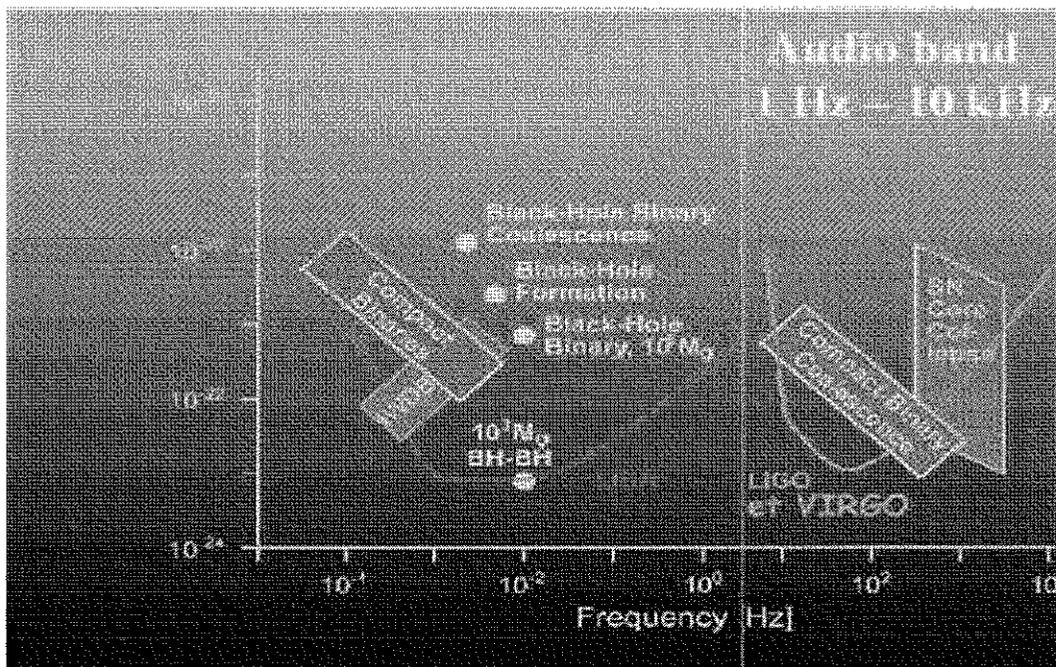
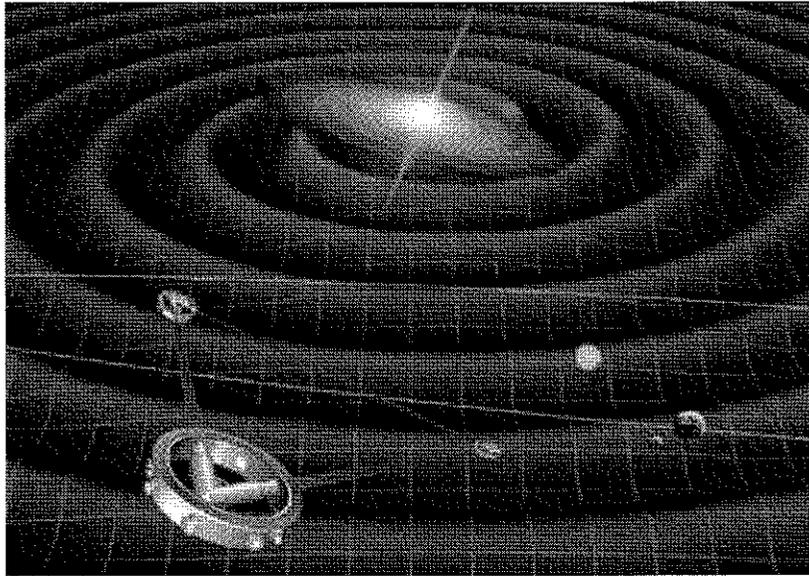


Fig. 5 : Fréquence supposées des ondes gravitationnelles en fonction des sources

Lisa est donc composé de 3 satellites formant un triangle équilatéral de 5 millions de kilomètres de côté situés à 50 millions de kilomètres de la Terre, compromis entre liaison radio et perturbations gravitationnelles. Le centre de ce triangle suivra la Terre sur son orbite avec un retard de  $20^\circ$  (Fig. 6). Chaque satellite contient deux télescopes de 30 centimètres de diamètre pour la transmission et l'émission des faisceaux laser. Ils possèdent également un banc optique interférométrique de type Michelson. Le cœur du satellite est composé d'un capteur inertiel lié à une masse étalon sensible aux ondes gravitationnelles: les infimes déplacements de cette masse par rapport à la sonde seront mesurés grâce aux interféromètres. Ce système devrait permettre à Lisa la détection des ondes gravitationnelles jusqu'à  $10^{-3}$  Hz.



**Fig. 6 :** Vue d'artiste représentant le système Lisa<sup>2</sup>

#### 4. Conclusion

L'observation des ondes gravitationnelles va compléter de manière importante l'observation des ondes électromagnétiques (ondes lumineuses, radio et micro-ondes, rayons gamma et X) ainsi que des astroparticules (rayons cosmiques, neutrinos). Leur étude permettra de révéler des aspects de l'univers jusqu'alors inconnus et d'étendre le domaine d'observation jusque dans les régions assombries par la poussière et masquées par d'autres phénomènes. De plus, contrairement aux outils d'observation classique qui n'observent qu'une étroite région du ciel, les détecteurs d'ondes gravitationnelles sont omnidirectionnels et permettent d'observer en permanence l'ensemble de l'univers

Les processus cosmiques comme les explosions de supernova, les collisions, la fusion de systèmes binaires, la rotation des pulsars, l'interaction avec des trous noirs, la création de l'univers lui-même lors du big-bang, génèrent des ondes gravitationnelles. Leur observation est la seule manière d'obtenir des informations sur les masses impliquées lors de ces processus violents.

La masse totale de l'univers, évaluée à partir de la masse des objets observables, de la poussière et des gaz résiduels du vide cosmique, représente moins de 10% de la masse qui permettrait d'expliquer le mouvement des galaxies. Les ondes gravitationnelles étant engendrées par les mouvements de larges masses, il est probable que leur observation fournira des informations fondamentales sur le problème de «la masse manquante de l'Univers».

De plus, les ondes gravitationnelles étant en théorie les ondes associées aux gravitons (boson hypothétique qui transmettrait la force de gravitation), leur détection permettrait de confirmer l'existence de ces particules.

Chaque nouvel instrument d'observation de la nature a permis de réaliser des découvertes sans précédent qui ont enrichi le champ de nos connaissances et souvent révolutionné notre vision du monde. Ainsi, il devrait en être de même pour les détecteurs d'ondes gravitationnelles.

#### Références:

- [1] **Albert Einstein**, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Annalen der Physik*, 1916, p.769–822
- [2] **R. Hulse, J. Taylor**, *The Astrophysical Journal*, 195, 1975, L51.
- [3] **J. Weber, J. Wheeler**, *Review of Modern Physics*, 29, 1957, p509
- [4] **J. Weber**, *Physical Review Letters*, 24, 20 juillet 1970.
- [5] **M. May, A-M Cazaba**, *Optique, cours et problèmes résolus*, Dunod,1996.



# Formation de la terre

Mohamed-Amine BEKKAL

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008.*

## Abstract

Earth's the third planet from the Sun and is the largest of the terrestrial planets in the Solar System in diameter, mass and density. It is also referred to as *the Earth*, Planet Earth, *the World*, and Terra

Home to millions of species, including humans, Earth is the only place in the universe where life is known to exist. Scientific evidence indicates that the planet formed 4.54 billion years ago, and life appeared on its surface within a billion years. Since then, Earth's biosphere has significantly altered the atmosphere and other abiotic conditions on the planet, enabling the proliferation of aerobic organisms as well as the formation of the ozone layer which, together with Earth's magnetic field, blocks harmful radiation, permitting life on land.

## 1. Introduction.

La grande diversité des planètes du système solaire s'est mise en place en quelques dizaines de millions d'années il y a 4,55 milliards d'années. L'une des conséquences de cette histoire très ancienne pour la planète Terre est d'abriter encore aujourd'hui des conditions compatibles avec l'existence et le développement de la vie. Mars est la seule autre planète où ces conditions pourraient avoir été momentanément réunies, il y a plus de 4 milliards d'années. L'observation et l'étude des corps du système solaire ainsi que l'analyse en laboratoire des météorites et des roches lunaires et terrestres permettent de reconstituer cette aventure, depuis la naissance du Soleil dans un nuage de gaz et de poussières jusqu'à la Terre actuelle.

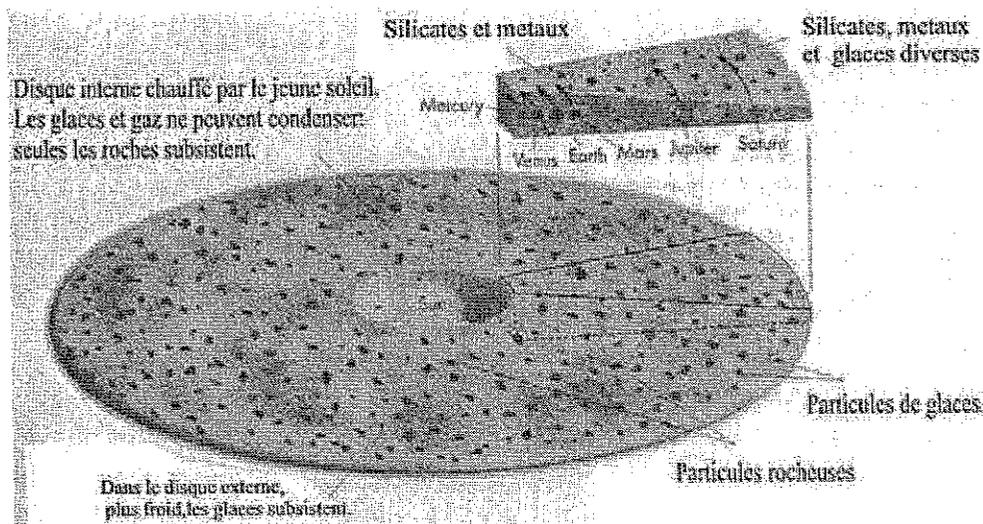
## 2. La naissance de la planète Terre.

On ne peut pas parler de la naissance de la planète terre sans parler de la formation du soleil et de son système. En effet, la naissance de notre planète est due à l'effondrement, il y a 4,57 milliards d'années d'un nuage interstellaire (mélange froid de gaz et de poussières minérales) sur lui-même, qui a sûrement été possible grâce à l'explosion d'une supernova voisine (c'est une étoile massive très brillante, de courte durée de vie, où sont synthétisés des éléments chimiques lourds), La matière va ensuite se concentrer progressivement vers le coeur du gigantesque tourbillon provoqué par l'effondrement, pour former peu à peu le protosoleil (nom donné au soleil lors de la création de notre système solaire). L'hypothèse de l'existence de la nébuleuse primitive a été émise en 1755 par Emmanuel Kant et un modèle similaire fut proposé en 1796 par Pierre-Simon Laplace. Aujourd'hui les scientifiques sont d'accord pour affirmer que la nébuleuse primitive est à l'origine de la formation des planètes.

Cette nébuleuse est formée de gaz et de poussière. Petit à petit, elle se refroidit pour former un disque. Le refroidissement de ce disque entraîne la transformation de minuscules grains de métal (alliage de fer et nickel), de silicate, de glace qui flottent dans le gaz restant. Cette étape dure quelques millions d'années. Ces particules solides, dont la taille est environ du micron, vont ensuite se coller afin de former des grains de l'ordre du centimètre. Ces grains centimétriques vont s'entrechoquer pour devenir des blocs de plus en plus gros, de plusieurs kilomètres, puis de plusieurs centaines de kilomètres de rayon, on les appelle alors les embryons planétaires. Ce processus d'accrétion qui dure environ 10 millions d'années permet le regroupement de toutes les poussières initiales. Mais il faudra

encore quelques millions d'années, et plusieurs chocs énormes pour que le système solaire devienne celui que l'on connaît

Concernant la formation de la planète Terre, nous assistons à deux phénomènes: la stratification, puis l'accrétion. En effet, dès ses premiers instants, la nébuleuse, protoplanétaire subit une stratification, dont les deux phénomènes importants sont la condensation et l'évaporation. Ces deux phénomènes sont contrôlés par la température qui évolue au cours du temps, mais aussi par la distance à laquelle se situe le soleil (plus on est proche plus la température est élevée, ainsi que la gravité plus forte et la lumière). Par le processus de stratification les éléments les plus légers s'éloignent du Soleil central et formeront par la suite les planètes géantes, instaurant donc en leur sein une gravité plus forte que les planètes telluriques (les planètes telluriques sont Mars, Vénus, la terre et Mars et elles se distinguent des planètes géantes par leur diamètre, leur masse plus faible et leur densité plus importante et leur situation plus proche du Soleil). Cela permet aux planètes géantes de capturer les gaz, tels que l'hélium et l'hydrogène, dans leur champ gravitationnel. Quand on se rapproche du Soleil et que l'on se situe dans la zone où se formera la Terre, c'est-à-dire à 1 unité astronomique (distance Terre-Soleil actuelle,) on trouve des éléments plus lourds, tels que les silicates, l'olivine, le pyroxène ou bien l'alliage fer-nickel. En effet; à cette distance, la température, qui est comprise entre 1500 et 2000 Kelvin, permet la stabilité de ces éléments. Cependant, d'après les observations faites sur les météorites les plus primitives (par exemple : les chondrites qui sont des météorites pierreuses, jamais fondues, riches en chondres : objets généralement sphériques, de taille voisine du millimètre, constitués principalement d'olivine et/ou pyroxène pauvre en calcium) on a constaté que ces grains plus lourds peuvent se déplacer vers des zones chaudes ou froides (plus ou moins éloignées du Soleil), à cause des mouvements turbulents du gaz du disque et de l'intense rayonnement du protosoleil. (Fig.1).

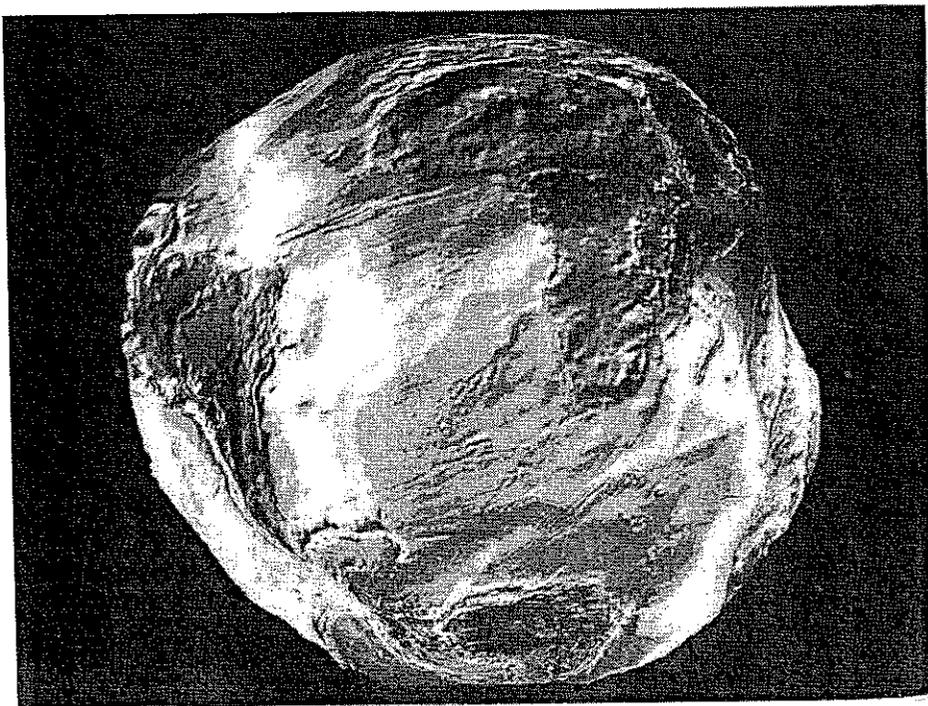


**Fig.1** La température joue un rôle important dans la stratification de la nébuleuse protoplanétaire

Puis vient l'accrétion qui elle, se fait en deux temps, avec d'abord « collage » des poussières entre elles sous l'effet des forces de surface, puis, lorsque le rayon de cette formation devient égal au rayon de capture gravitationnelle, on obtient une croissance de la planète : en effet, la croissance est due à la capture de matière par un astre sous l'effet de la force gravitationnelle. L'expression de la force gravitationnelle est donnée par l'équation suivante : Eq. (1) où G est la constante gravitationnelle, d est la distance entre les masses m1 et m2 des corps mis en jeu :

$$F = \frac{G \cdot m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad (1)$$

Ces grains se situent dans le plan médian du disque et passent ainsi de petits grains à des planétésimaux, dont la taille est de l'ordre du kilomètre. A ce stade, le disque ne contient quasiment plus de poussières, mais plusieurs millions de planétésimaux qui circulent et qui, selon leur vitesse, leur trajectoire et leur force d'attraction, s'évitent ou s'entrechoquent pour former des embryons de planètes de plusieurs centaines de kilomètres de diamètre. Pendant cette période, les gros planétésimaux grossissent plus vite que les petits, du fait que leur force d'attraction gravitationnelle plus élevée : quelques dizaines d'embryons de la taille de la Lune ou de Mars sont alors formés. Puis, l'accrétion devient faible, car les probabilités de rencontre diminuent avec la raréfaction des objets, ce qui conduit à la formation des planètes telluriques, de composition chimique variée. La Terre est issue de l'accrétion de planétésimaux et d'embryons de planètes qui ont connecté des matériaux formés à des distances comprises entre 0.5 et 2.5 unités astronomiques. La formation de la Lune est, quant à elle, due à la collision de la Terre, et d'un embryon de la taille de Mars : les débris qui se sont mis orbiter se sont ensuite regroupés pour former la Lune. Les cratères sur la Lune et la Terre sont les traces ultimes de l'accrétion. Ils témoignent également de la longue période de bombardement météoritique subit par la Terre. Ces derniers chocs lui ont communiqué une énergie colossale. En effet à chaque choc, la température augmente et fait fondre les roches sur une épaisseur plus ou moins grande. Un océan de magma apparaît alors : cette fusion a atteint, en quelques dizaines de millions d'années, des matériaux de plus en plus profonds. Les éléments les plus denses, tels que le fer ou le nickel, se sont rassemblés pour mieux se séparer du magma silicaté, puis se regroupent en gros dôme qui, sous leur poids, migrent vers le centre de la Terre. Un noyau liquide est ainsi créé en quelques millions d'années. L'océan de magma se refroidit et se solidifie pour former le manteau, puis les premières croûtes superficielles. La planète est donc formée mais n'est pas encore vivable (Fig. 2)



**Fig. 2 :** Les chocs engendrés par l'accrétion ont pour résultat la formation d'une Terre de forme inégale. On peut le constater aujourd'hui en simulant l'inexistence des océans

### 3. La Terre et La vie

Au début, les planètes étaient froides et chacune possédait une enveloppe d'hydrogène et d'hélium (gaz légers). A mesure que chacune se contractait sous l'effet de sa propre gravité (poids), le centre se réchauffait jusqu'à devenir un noyau incandescent.

Toujours selon des hypothèses, notre planète, avait un noyau en fusion sur lequel flottaient les matières plus légères, qui formaient ainsi une croûte solide. Au début, il n'y avait rien sur cette croûte, et la Terre ne possédait pas d'atmosphère. Celle-ci a dû s'échapper vers l'espace de la même façon que les vapeurs d'un liquide en ébullition. En effet, les gaz de l'atmosphère primitive, l'hélium et l'hydrogène, étaient suffisamment légers pour échapper à la force d'attraction de la Terre sous l'effet du rayonnement intense du Soleil, et la plus grande partie de ces gaz s'est perdue dans l'espace.

#### 3.1 Formation de l'atmosphère terrestre

À mesure que la Terre se refroidissait, d'énormes quantités de méthane, d'ammoniac, de vapeur d'eau et de gaz carbonique furent expulsées du centre de la Terre vers l'extérieur. Cela constitua la première atmosphère de la Terre. Cette atmosphère, agissant comme une serre, permit de réduire la perte de chaleur de la Terre vers l'espace et notre planète demeura ainsi assez chaude pour que puisse naître la vie. Sa température se situait probablement entre 15 et 30 °C. Ensuite, il y a environ 4,5 milliards d'années, la vapeur d'eau s'est condensée pour former les océans. Le gaz carbonique se combina à des minéraux et fut absorbé par les océans, et il fut utilisé par les premiers êtres vivants. L'azote est resté dans l'atmosphère parce que cet élément réagit peu avec les autres. Il y a 3 milliards d'années, l'atmosphère contenait encore peu d'oxygène. Des réactions chimiques compliquées entre le méthane, l'ammoniac, l'eau et le rayonnement solaire donnèrent naissance à une couche d'ozone. Celle-ci joue un rôle important dans l'évolution de la vie sur Terre, car elle empêche une grande partie des rayons solaires ultraviolets, rayons nuisibles à la vie, d'atteindre le sol. Les premières plantes apparurent il y a 2 milliards d'années et transformèrent une grande partie du gaz carbonique en oxygène. Ce processus se poursuit toujours et l'atmosphère d'aujourd'hui contient environ 78 % d'azote et 21 % d'oxygène.

#### 3.2 Composition de l'atmosphère et sa structure

L'atmosphère terrestre peut être considérée, à un instant donné, comme un mélange thermodynamique d'air sec et de vapeur d'eau. Les particules liquides, solides, liquides ou mixtes en suspension dans l'atmosphère constituent l'aérosol atmosphérique. Ces particules jouent un rôle primordial dans les phénomènes de condensation (nuages) et de formation de cristaux de glace, ainsi qu'à différents processus physico chimiques dans l'atmosphère. Leur concentration varie de plusieurs puissances de 10 (de plusieurs ordres de grandeurs) en fonction du lieu et du temps ; en concentration élevée, elles constituent un facteur de pollution. La composition chimique de l'atmosphère, sa température, ou les phénomènes qui y sont observés présentent des discontinuités marquées lorsque l'altitude augmente. Ces discontinuités correspondent à des couches homogènes dont les propriétés évoluent de façon continue. Nous pouvons voir sur le schéma suivant les différentes couches de notre atmosphère actuelle : troposphère, stratosphère, mésosphère, thermosphère (Fig. 3). Nous y trouvons également la situation de la couche d'ozone, ainsi que l'évolution de la température quand l'altitude augmente.

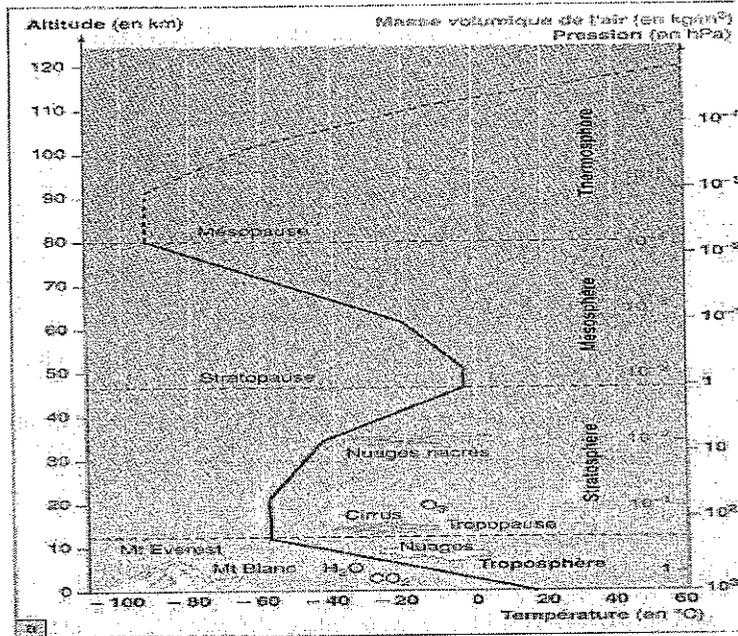


Fig. 3 Les différentes couches de l'atmosphère actuelle

#### 4. Conclusion

##### 4.1 Composition et structure de la Terre

La Terre est une planète vivante, dont on estime l'âge de 6 milliards d'années, mais les plus vieilles roches connues ont moins de 4 milliards d'années. Les plus vieux fossiles d'organismes recueillis à ce jour ont moins de 3,9 milliards d'années. D'un diamètre de 12 756 km, elle possède des plaques lithosphériques mobiles et des volcans encore actifs.

70,90 % de sa surface est occupée par les mers et seulement 29,10 % par les cinq continents. Sa densité qui est de 5,5 est supérieure à toutes les autres planètes. Le globe terrestre est constitué de trois zones : l'écorce, le manteau (composé de trois couches) et le noyau. (Fig 3)

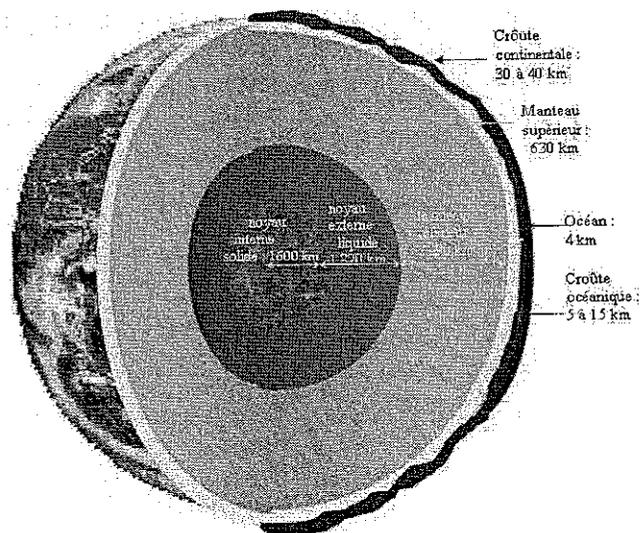


Fig. 3 : Composition de la terre

La Terre est divisée en plusieurs couches qui possèdent des propriétés chimiques et sismiques différentes:

- 10 à 400 km: Manteau supérieur
- 400 à 650 km: Région de transition
- 650 à 2890 km: Manteau inférieur
- 2890 à 5150 km: Noyau externe
- 5150 à 6378 km: Noyau interne

La croûte est plus mince sous les océans que sous les continents. Le noyau interne et la croûte sont solides tandis que le noyau externe et le manteau sont liquides. Le noyau est principalement composé de fer (ou d'un alliage de fer/nickel). Les températures dans le centre du noyau peuvent atteindre 7200 °C, plus chaud qu'à la surface du Soleil. Le manteau inférieur est probablement constitué essentiellement de silicium, magnésium et d'oxygène avec du fer, du calcium et de l'aluminium. Le manteau supérieur est composé d'olivène et de pyroxène (fer, magnésium et silicate) ainsi que de calcium et d'aluminium. Notre connaissance de la composition du manteau est uniquement due aux échantillons du manteau supérieur qui nous parviennent grâce à la lave des volcans. La croûte est composée de quartz (dioxyde de silicium) et d'autres silicates

#### 4.2 Quelques caractéristiques de la Terre

- Accélération de la pesanteur :  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- Masse :  $5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- Diamètre à l'équateur : 12 756 km
- Composition : Principalement du fer et de la roche
- Densité moyenne (eau = 1) : 5,52
- Gravité à l'équateur : 1 g
- Période de rotation sidérale (1 journée Terrienne) : 23 h 56 min 4 s
- Période de révolution sidérale (1 année Terrienne) : 365 j 6 h 9 min
- Distance moyenne du soleil (où la distance Terre-Soleil vaut 1) : 1 ( $149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$ )
- Température : De  $-90^\circ\text{C}$  à  $+58^\circ\text{C}$
- Nombres de satellites : 1
- Atmosphère : 77% d'azote, 21 % d'oxygène, quantités mineures d'argon, de dioxyde de carbone, d'eau, et trace d'autre des gaz.
- Vitesse de libération à l'équateur : 11 km/s
- Inclinaison sur l'écliptique :  $0^\circ$

#### Références

- <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>
- <http://www.neufplanetes.org>
- <http://www.futura-sciences.com>
- <http://spacehole.free.fr/>
- <http://planet-terre.ens-lyon.fr>

# Les accélérateur de particules

Cheikh maoualainine Larabas

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008*

## Abstract

Particle accelerators are used to produce high-energy particle beams (elementary particles or different types of nuclei) in laboratories. These beams can be focused on a target (or the centre of a detector, in the case of a collider), providing physicists with intense and controlled collisions for matter science research.

## 1. Introduction .

Les accélérateurs de particules sont des instruments qui utilisent des champs électriques et/ou magnétiques pour amener des particules chargées électriquement à des vitesses élevées. En d'autres termes ils communiquent de l'énergie aux particules.

On en distingue deux grandes catégories : les accélérateurs linéaires et les accélérateurs circulaires.

## 2. les accélérateur linéaires (linac).

L'accélérateur linéaire fut conçu à la fin des années 1920. Un champ électrique alternatif accélère les particules en leur communiquant un mouvement rectiligne. Les particules traversent une série de tubes métalliques creux dans un cylindre sous vide. Les particules se déplacent en groupes. Chaque paquet est soumis à une impulsion lorsqu'il passe d'un tube à l'autre (Fig1). Théoriquement, on peut construire un accélérateur linéaire d'énergie quelconque. Le plus grand accélérateur linéaire à électrons du monde est celui de l'université Stanford, avec une longueur de 3,2 km. Il peut accélérer des électrons à une énergie de 20 GeV (20 milliards d'électronvolts ou giga électronvolts). Il est conçu pour provoquer des collisions entre deux faisceaux de particules accélérées par des rotations et gardées provisoirement dans des anneaux de stockage.

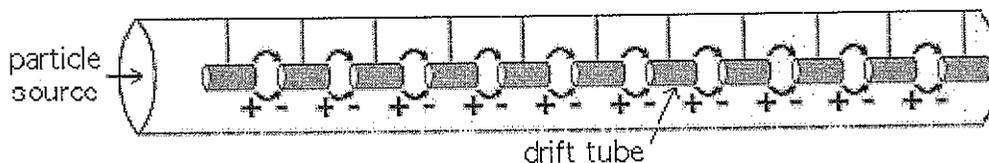


Fig 1 : mode de fonctionnement d'un linac

## 3. les accélérateurs circulaires .

À énergie égale, les accélérateurs circulaires ont des dimensions inférieures à celles des accélérateurs linéaires. Parmi les accélérateurs circulaires, on peut citer : le cyclotron, le bêatron, le synchrotron et le collisionneur à anneaux de stockage. Deux familles d'accélérateurs se distinguent vraiment pour ce genre de parcours d'accélération : les cyclotrons et les synchrotrons.

### 3.1 les cyclotron :

En 1939, le physicien américain Ernest O Lawrence obtint le prix Nobel de physique pour un important progrès dans la conception des accélérateurs. En effet, il avait développé le *cyclotron*, premier accélérateur circulaire. Le cyclotron est constitué de deux chambres à vide accolées et en forme de D (comme : D). Un champ magnétique uniforme est produit par un puissant électroaimant. Les particules chargées sont accélérées avant de pénétrer dans le cyclotron. Sous l'action du champ magnétique, elles acquièrent un mouvement circulaire uniforme (vitesse constante). Lorsqu'elles passent d'un D à l'autre, elles sont accélérées et augmentent donc leur énergie cinétique, et le rayon de leur trajectoire augmente également.

Dans un cyclotron, lorsque les particules ont une vitesse proche de la vitesse de la lumière, leur masse augmente de façon notable, selon la théorie de la relativité. Il est alors plus difficile de les accélérer en raison du déphasage des impulsions d'accélération entre les D. Une solution fut suggérée en 1945 par le physicien soviétique Vladimir I. Veksler et par le physicien américain Edwin M. McMillan : ils inventèrent le *synchrocyclotron* ou *cyclotron isochrome*. Avec cet appareil, l'oscillateur (générateur de radiofréquences) qui accélère les particules entre les D est automatiquement ajusté pour rester en phase avec les particules en accélération. Pour augmenter l'énergie d'un synchrocyclotron, il faut augmenter sa taille, car les particules ont alors un besoin croissant d'espace pour pouvoir suivre leur trajectoire circulaire. Le plus grand synchrocyclotron est le phasotron de 600 m de diamètre, installé au Joint Institute for Nuclear Research (JINR) de Dubna, en Russie : il accélère les protons à plus de 700 MeV et possède des aimants de 6 984 tonnes.

Le plus puissant cyclotron du monde, le K1200, fut mis en service en 1988 au National Superconducting Cyclotron Laboratory, à l'université de Michigan. Cet appareil peut accélérer des noyaux à une énergie proche de 8 GeV.

### 3.1 les synchrotrons :

Le *synchrotron* est le plus récent et le plus puissant des accélérateurs circulaires. Un synchrotron est constitué d'un tube en forme de grand anneau à travers lequel les particules se déplacent. Le tube est entouré d'aimants qui maintiennent les particules en son centre. Les particules pénètrent dans le tube après avoir été accélérées à plusieurs millions de eV. Elles sont accélérées en un ou plusieurs points de l'anneau à chaque fois qu'elles ont accompli un tour complet dans l'accélérateur. Pour que les particules restent sur une orbite fixe, les forces des aimants sur l'anneau sont augmentées avec le gain d'énergie des particules. En quelques secondes, les particules atteignent des énergies supérieures à 1 GeV et sont éjectées pour des expériences ultérieures ou sur des cibles qui génèrent différentes particules élémentaires lorsqu'elles sont frappées par des particules accélérées. Le principe du synchrotron peut être appliqué aux protons ou aux électrons. La plupart des grands dispositifs sont cependant des synchrotrons à protons.

Le premier accélérateur qui a dépassé la limite de 1 GeV est le *cosmotron*, synchrotron à protons du Laboratoire national de Brookhaven à New York. Des synchrotrons à protons du Cern (en Suisse) et de Brookhaven produisent des particules de 30 GeV. Celui de Serpoukhov a un rayon de 235 m et libère des protons de 70 GeV. Actuellement, les deux plus grands synchrotrons à protons sont ceux du Cern, avec 400 GeV, et de Fermilab (États-Unis), avec 500 GeV. Ces dispositifs sont équipés d'une série d'aimants et de lentilles magnétiques. En 1983, le synchrotron de Fermilab a été équipé d'aimants supraconducteurs qui ont permis d'obtenir des champs magnétiques beaucoup plus forts que ceux qui sont générés par des aimants classiques. Ce synchrotron a ainsi produit des protons à 1 TeV, ce qui en fait l'accélérateur le plus puissant dans le monde. En 1989, le Cern mit en service le grand collisionneur à électron-positron (LEP), constitué d'un anneau de 27 km et pouvant accélérer les électrons et les positrons à des énergies de 50 GeV.

## 4. principes physiques :

Le principe du cyclotron provient d'Ernest Lawrence, qui en 1929 élabora le concept théorique de cet accélérateur. Il existe plusieurs types de cyclotron dépendamment de la méthode utilisée pour accélérer les particules qui furent conçues au cours des années. Toutefois, le principe de base reste essentiellement le même (Fig2).

Lorsqu'elles sont à l'intérieur des chambres, les particules ne sont pas influencées par le champ électrique. Lorsqu'elles traversent d'une chambre à l'autre, elles subissent alors l'influence du champ électrique qui leur procure alors l'accélération. Pour obtenir une accélération efficace, il faut que la demi-période du courant alternatif soit égale à la période orbitale semi-circulaire de la particule accélérée.

En terme d'équations, la force exercée sur la particule de charge  $q$  et de masse  $m$ , pour une orbite circulaire de rayon  $r$  dans un champ magnétique  $B$  sera donnée par:

$$F = qvB = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

Le temps requis pour effectuer une orbite est donné par:

$$t = \frac{\pi R}{v} = \frac{m\pi R}{qB} \quad (2)$$

Ainsi, la fréquence dit 'fréquence de résonance du cyclotron' est donnée par :

$$f_0 = \frac{1}{2t} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (3)$$

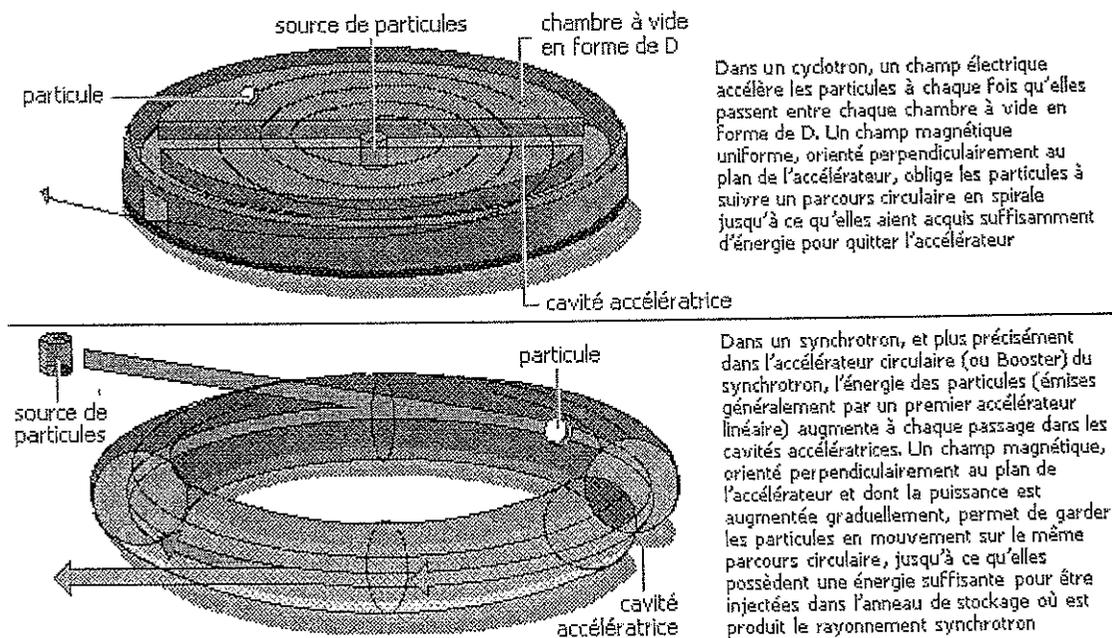


Fig 2 : principes physique des accélérateurs circulaires

Historiquement, l'utilisation du cyclotron a permis la découverte de plusieurs particules fondamentales.

Les cyclotrons peuvent accélérer des particules chargées comme les protons, deutons et des ions lourds chargés positivement ou négativement, mais ils ne peuvent être utilisés pour accélérer des électrons.

De nos jours, les cyclotrons «classiques» ne sont plus utilisés pour la recherche de nouvelles particules élémentaires. Cependant, certains centres utilisent encore des synchrocyclotrons et des cyclotrons à champ azimutal variable, comme l'accélérateur TRIUMF, en Colombie-Britannique, pour la recherche sur les ions lourds.

Les cyclotrons sont également utilisés dans le domaine médical, vu leur simplicité et leur grosseur de conception, en radiothérapie pour le traitement des cancers.

La découverte de nouvelles particules nécessite des accélérateurs capables de produire des particules accélérées à de plus hautes énergies que ce type d'accélérateurs. Il a donc fallu inventer un nouveau genre d'accélérateurs: les synchrotrons.

Contrairement au cyclotron, le champ magnétique n'est pas appliqué sur toute la surface circulaire, mais uniquement sur la circonférence. Le fonctionnement du synchrotron repose sur le principe que les particules sont accélérées sur un parcours circulaire lorsqu'elles traversent un champ électrique résonnant sur un intervalle à chaque révolution qu'elles effectuent. L'intervalle sur lequel l'accélération est appliquée aux particules est similaire à la chambre d'accélération d'un accélérateur linéaire. Cependant, dans le cas d'un synchrotron, le courant alternatif est appliqué seulement sur l'intervalle et non sur tout le parcours des particules. Plus l'énergie augmente, plus la fréquence du signal alternatif appliqué sur l'intervalle doit augmenter, pour maintenir l'accélération constante. Simultanément, le champ magnétique appliqué sur l'intervalle doit être augmenté pour garder un rayon constant.

Afin d'obtenir une trajectoire circulaire et un flux de particules constant, un champ magnétique doit être généré par des électroaimants tout le long de la trajectoire du faisceau de particules.

L'utilisation des synchrotrons a permis la découverte de nombreuses particules élémentaires qu'il n'aurait pas été possible de découvrir avec des accélérateurs de plus basse énergie. Ce type d'accélérateur a également permis d'obtenir des preuves expérimentales d'éléments constituant encore plus fondamentaux comme les quarks.

Aujourd'hui, plusieurs centres de coopération internationale utilisent les synchrotrons pour effectuer des collisions à très hautes énergies afin de sonder l'infiniment petit et comprendre les composantes de la matière. On peut classer les synchrotrons par les particules qu'ils accélèrent. Principalement, il y a ceux qui accélèrent des électrons (comme le LEP) et ceux qui accélèrent des protons (comme le SPS).

## 5. Conclusion

L'accélération des particules est un domaine de recherche bien actif. Afin de parvenir à accélérer des particules à des énergies supérieures, les scientifiques devront innover pour concevoir des accélérateurs plus performants à un coût inférieur et avec des dimensions moins importantes. Avec le développement de nouvelles technologies, comme les aimants supraconducteurs et l'informatique, il sera possible de concevoir et de simuler des collisions avec plus de précisions, pour parvenir à élaborer des accélérateurs encore plus puissants.

## Références

*The Columbia Encyclopedia*, <http://www.bartleby.com/65/pa/partaccl.html>

<http://fr.wikipedia.org>

*feynman.phy.ulaval.ca/mar/leau/pp/04accelerateurs/AccelerateursdeParticules.htm*

CHARNOT, H. et al, *Operational Experience With The Cern Hadron Linacs*, PS Division, CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland

*Accelerator Physics*, S.Y. Lee, World Scientific, 1999, ISBN 981-02-3709-X

# **L'évolution de l'univers**

Caroline Delabye

*Des particules à l'Univers L<sub>2</sub>MPM, Promotion 2007-2008*

## **Résumé**

My subject is development of universe. I start speaking of it creating: the big bang, with four stages: era hadronique, era leptonique, era radiative and the last which continues today, era stellar. I speak next components which form our galaxy, then the formation of stars, planets, and our sun. Universe is always in perpetual development.

## 1. Introduction.

L'évolution de l'univers un sujet vaste. Mais l'univers ne serait pas, sans sa création: le big bang. Il y a donc plus de 15 milliard d'années, le big bang arriva, entraînant avec lui une cascade de formation différentes. Les premières furent celles des étoiles, et de certaines planètes, puis vient la formation du soleil, et celle de notre Terre.

C'est donc avec ces principales formations, que nous découvrirons, l'évolution de notre Univers, malgré ça perpétuelle évolution.

## 2. Le big bang.

Le Big Bang, ce mot a été utilisé pour la première fois par un détracteur de la théorie. Avant cette théoriz été connue sous le nom de de « Modèle de Friedmann-Lemaitre », ou « Cosmologie de FLWR » . C'est George Gamov, élève de Friedmann, qui, en 1948 présente les bases du big bang telle que nous la connaissons. Le big bang, contrairement à ce que tout le monde croit, n'est pas un explosion, mais une expansion de l'univers.

Au début le big bang, part d'un milieu très dense et extrêmement chaud, concentré en un seul point, qui est moins gros qu'un atome. En ce point, les particules sont dissociées, et les éventuelles associations sont très instables. Ensuite le big bang. Suit alors l'expansion de l'univers, les particules s'éloignent des unes des autres par répulsions mutuelles, et cet ensemble commence à refroidir. Chaque particules va alors se diviser plusieurs fois en un temps de plus en plus long. Il existe 4 étapes, selon les particules formaient

L'expansion continu, puis les quarks apparaissent quelques instant après le big bang. La température est alors de  $10^{36}$  K et l'Univers a un diamètre comparable à celui d'un proton. L'expansion se poursuit lentement accompagné d'une chute de la température. A  $10^{13}$  K, vers un milliardième de seconde, l'interaction est trop forte obligeant les quarks à s'associer et former des ensembles complexes. Deux types de hadrons sont alors formés: les mésons formaient d'un quarks et d'un antiquarks, et les baryons formaient de trois quarks. Les bayons, les plus connus sont le proton et le neutron. La force nucléaire forte est toute puissante, les quarks perdant alors leur liberté, et se retrouvent emprisonnés dans les hadrons.

\_ L'ère hadronique commence ainsi et va durer un dix milliardième de seconde. Cette période est dominée, par des réactions qui transforme hadrons en photons et inversement. A  $10^{13}$  K, l'équivalence entre masse énergie est en jeu de manière permanente, c'est-à-dire, que dès qu'une particule et son antiparticule se rencontrent, elles s'annihilent. Leur masse est convertie en énergie sous la forme de deux particules dont l'énergie totale est égale à la masse du couple particule-antiparticule. Les réactions de production et d'annihilation ne vont pas durer. Car l'énergie moyenne des photons est déterminée, par la température de l'Univers. L'expansion continue, avec la baisse de température qu'il l'entraîne. L'énergie moyenne des photons décroît, pour passer sous le seuil nécessaire pour créer un couple de baryons. Par contre la réaction inverse se poursuit. Les baryons sont alors annihilés, sans aucun ne soit produit. Le nombre de particule chute alors, c'est ainsi qu'il y a disparition des neutrons et protons. Mais il n'y a pas disparition complète des protons et des neutrons.

\_ L'ère leptonique commence a un dix milliardième de seconde. Il est composé de deux évènements. Le premier événement important est le découplage des neutrinos , qui se produit lorsque la température atteint les 10 milliards de kelvins, à quelques dixièmes de seconde. Auparavant, les neutrinos étaient constamment en interaction avec le reste des particules par le biais de la force nucléaire faible. Cette force a une portée limitée, elles ne s'appliquent qu'aux particules proche. Or, du fait de l'expansion, la distance moyenne entre particules augmentent de plus en plus. Quand la distance moyenne est devenue trop grande, l'interaction est trop faible, donc il n'y a plus rien qui relie les neutrinos au reste de la matière. Les neutrinos ne sont donc plus du tout attirer par les autres particules, et se comportent comme s'ils étaient seuls. On dit qu'ils se découplent de la matière. Le deuxième événement important est l'annihilation des électrons et des antiélectrons, qui se produit

lorsque l'Univers est âgé d'environ une seconde. Vers un milliard de kelvins, la température passe sous le seuil de création de la paire électron- antiélectron, comme pour le couple baryon, dans l'ère hadronique. Ce phénomène entraîne la disparition des électrons et des antiélectrons. De la même manière qu'il n'y a pas eu disparition complète des baryons, il n'y a pas non plus disparition complète des électrons, par contre il y a disparition totale des antiélectrons. A la fin de l'ère leptonique, il y a disparition totale de l'antimatière. L'Univers est constitué uniquement de matière ordinaire, formée de protons, de neutrons et d'électrons. Ainsi, le mélange initial constituait de proton et de neutron, en proportion égal, subit une diminution des neutrons pour favoriser une augmentation de protons. Les baryons restent eux, dans une quantité semblable, car les électrons, encore assez nombreux, interagissent avec les protons pour former des neutrons. Mais avec la disparition des électrons, les protons et neutrons se trouvent isolés. Petit à petit les neutrons, se transforment en protons, et la proportion va changer au fur et à mesure. A la fin de l'ère leptonique, la matière va être dominée par les protons.

— L'ère radiative ou l'ère du rayonnement, commence avec la disparition des électrons et de leurs antiparticules. L'Univers est maintenant dominé par les photons. La température est toujours en baisse, elle atteint à présent le milliard de kelvins, lorsque l'Univers est âgé d'une centaine de seconde. C'est pendant cette période que se produit, l'une des étapes les plus importantes, la nucléosynthèse primordiale, la formation de noyaux à partir des protons et des neutrons, qui jusque là étaient libres. Les protons et les neutrons ont tendance à s'associer pour former des noyaux atomiques simples, comme le deutérium qui vient de l'association d'un proton et d'un neutron, ceci est dû à la force nucléaire forte. Ces regroupements ne sont pas très stables, tant que les photons sont assez énergétiques pour casser les liaisons créées. Lorsque la température descend sous le milliard de kelvin, les liaisons internes des noyaux ne se cassent plus, car les photons ne sont plus assez énergétiques. Les fusions se succèdent et forment des structures de plus en plus complexes, mais la complexification ira que jusqu'à deux protons associés à deux neutrons. L'Univers étant toujours en expansion rapide, la nucléosynthèse dure un temps très court durant lequel il y a toutes les conditions requises. Ainsi seuls les noyaux les plus légers sont produits, pour les plus lourds, il faudra attendre l'arrivée des premières étoiles. L'Univers est constitué de deux éléments principaux, à la fin de la nucléosynthèse primordiale, l'hydrogène et l'hélium-4. Suite à la proportion des neutrons par rapport aux protons, on a ainsi une proportion d'un hélium pour 12 protons, l'hélium-4 étant constitué de deux protons et de deux neutrons. Si l'on considère les masses, l'Univers est alors composé de 25% d'hélium et de 75% d'hydrogène.

— L'ère stellaire ou recombinaison et rayonnement. La prochaine grande étape est la recombinaison, elle se produit lorsque l'Univers est âgé de 380 000 ans et que sa température est tombée à 3000 K. On dit que l'Univers est opaque aux photons, c'est parce que les photons ont une durée de vie trop courte, ils n'ont pas le temps de se déplacer. Le changement se produit lorsque la température de l'Univers atteint les 3000 degrés. L'énergie moyenne des photons passe alors sous le seuil de la liaison électron-proton. Les couples formés ne sont plus dissociés par le rayonnement. Les composés alors obtenus sont stables. La lumière n'a plus d'obstacle, et les photons se propagent sans entrave. L'Univers devient transparent et le rayonnement se découple de la lumière. Ce découplage a laissé une trace qui est encore observable de nos jours. En effet, comme il ne peut être absorbé, ce rayonnement qualifié de fossile emplît toujours encore l'Univers. Cependant, sa température a changé. En effet, depuis l'époque de la recombinaison, la taille de l'Univers a été multipliée par un facteur 1000. La température du rayonnement fossile a donc été divisée par ce même facteur. Comme elle était d'environ 3000 kelvins à l'époque, l'Univers actuel doit être baigné d'un rayonnement à environ trois kelvins.

### **3. Étoiles et planètes.**

#### **3.1. Vie d'une étoile.**

La naissance d'une étoile se passe au plus profond d'un nuage de gaz, constitués principalement de molécule d'hydrogène. Il se forme dans ses nuages, des régions de plus forte densité, qui sous l'effet de leur propre attraction se contracte. On appelle cela des noyaux nuageux, ils peuvent contenir des milliers de molécules de dihydrogène par centimètre cube. Leurs noyaux deviennent si denses que les

radiations thermique ne peuvent plus s'en dégager. La chaleur augmente alors. Les noyaux deviennent alors plus dense et plus chauds jusqu'à ce que l'hydrogène fusionne en hélium dans la région centrale, une quantité géante d'énergie est alors libérée. Une étoile est née. Le gaz n'est pas entièrement utilisé, les poussent ce gaz dans différentes direction pour se faire de la place. Un disque de poussière et de gaz se forment autour de l'étoile avec ce qui reste. L'étoile une fois, à l'état d'adulte, continue de brûler de l'hydrogène en son centre, et d'émettre de la lumière. Toutes les étoiles vont mourir de manière différentes, dépendamment de leur taille. Celle qui ont une masse semblable au Soleil, vont brûler le gaz en leur centre, ce qui augmentera leur taille, ainsi que leur chaleur. Elles deviendront alors des géantes rouges. A la fin de sa vie, elles deviennent instables, et émettent des jets de lumière irréguliers. Leurs couches extérieur sont alors éjectées, c'est ce qu'on appelle des nébuleuses planétaires, il reste leur noyau appelé naine blanche, il peut rester ainsi encore un million d'année, puis s'éteindre définitivement. Les étoiles plus massives, lorsqu'elles grossissent, épuise le gaz de leur noyau. Leur centre restent chaud, alors que les couches supérieurs refroidissent, ce qui provoquent une explosion des couches extérieures. Pendant ce phénomène la lumière émise est tellement grance qu'elle pourrait éclairer une galaxie au complet. Le noyau reste aussi dense qu'avant, il deviendra un une étoile à neutrons ( pulsar ) ou un trou noir.

### 3.2. Accrétion des planètes.

Le comportement de la partie gazeuse du nuage ( hydrogène et hélium ) a du être différent du comportement de la plus lourde partie du nuage ( poussière ). Les parties gazeuses se sont échappées dans l'espace alors que les parties rocheuses et métalliques sont restées sur place. Ces éléments s'entre choquent et s'assemblent, ce qui les font grossir. C'est ce qu'on appelle l'accrétion. Plus l'élément est gros plus son attraction sera forte, il attirera les autres et deviendra une planète. Ainsi il ne reste plus que des grosses planètes, trop éloignées pour s'attirer. Les planètes géantes ont conservé autour de leur noyau une atmosphère gazeuse proche du nuage interstellaire alors que les petites planètes proches du Soleil ont vu cette atmosphère dispersée sous des puissantes vents solaire. Le début de la formation du système solaire date de 4,6 milliards d'années. C'est en 10 millions d'années que les planètes ont atteint leur taille actuelle. Mais le bombardement d'accrétion, a en fait duré 600 millions d'années. Ce phénomène a été caractériser par des cratères, sur les planètes. Plus précisément sur la Terre, ces impacts de météorites ont été effacé au cours du temps à cause de la tectonique des plaques et de l'action de l'atmosphère ( l'érosion atmosphérique ).

### 4. Naissance du Soleil.

Voici environ 4 500 millions d'années, notre Soleil naissait. Sa naissance commencent entre les étoiles, où se trouve des nébuleuses, immense nuage, très froid et peu dense, sombre de poussières et d'hydrogène. A cause d'un phénomène inconnu, sûrement l'explosion d'une super nova, le nuage se fractionne en plusieurs petits nuages, qui s'effondrent sur eux-même, avec l'impact de l'explosion. De ce fait chaque petits nuages se condensent peu à peu. On peut expliquer cela aussi, car les nuages se mettent à tourner sur eux-même, donc les éléments périphériques migrent vers le centre, d'où l'augmentation de la densité. Si la théorie est exacte, le Soleil est né en même temps que d'autres étoiles d'un groupe. La température du centre augment en même temps que la densité car la chaleur est le résultat de la collision des atomes entre eux. Peu à peu, ce nuage mille fois plus gros que l'ensemble de notre système solaire se condense jusqu'à obtenir la taille de notre Soleil. Il est entouré d'un immense halo de gaz et de poussière, il se mit à tourner sur lui même de plus en plus vite. Pendant ce processus, son centre devient de plus en plus chaud, jusqu'à atteindre plusieurs milliers de degré. Quand le nuage formant le Soleil atteint, une température de 10 millions de degrés centigrades, les noyaux d'hydrogène fusionnent entre eux, pour donner de l'hélium, entraînant ainsi une production importante d'énergie. Cette réaction thermonucléaire a débuté il y a 4,5 millions d'années, et à chaque seconde elle brûle plus de 4 millions de tonnes d'hydrogène. C'est cette réaction, qui nous fournit chaleur, et luminosité.

### 5. Conclusion.

Donc j'ai essayé de vous faire découvrir l'évolution de l'Univers, mais il reste en perpétuelle évolution.

On peut se demander, comment sera notre Univers, dans des millions d'années? Je vous ai montré la théorie actuelle, sur la création de l'Univers, mais il reste des points obscures à celle-ci. Non seulement, elle n'est pas encore approuvée, par tous, mais il existe aussi plusieurs théories dont je n'ai pas parlé. On peut penser que la communauté scientifique découvrira d'autres théories, ou réussira à éclaircir les points obscurs de celle-ci. Même peut-être de nouveau modèle de formation du système solaire, avec l'évolution des outils scientifiques.

Fiche bibliographique:

<http://www.interstars.net/index.php?article=soleil>

<http://www.syti.net/Evolution.html>

<http://cosmbranche.free.fr/Evolution.html>

<http://homepage.mac.com>

<http://www.astronomes.com>