

Où en sommes-nous dans la construction de l'« édifice » de la Physique ?

(Physique = connaissance « structurée »
de tout ce qui est mesurable dans la nature,

ou alors on peut se reporter à la définition donnée par E. Fermi :
« Physics is what physicists do late at night ... »)

« Fatti non foste a viver come bruti, ma per seguir virtute e conoscenza »

(Dante Alighieri – Inferno, canto XXVI)

Dante Alighieri - Divina Commedia /Inferno Canto XXVI

Et, tout d'abord de quoi est constitué cet « édifice » de la Physique ?

- des **particules élémentaires**

(16 (+2?) dans l'état actuel des connaissances)

- des forces (**interactions**) qui s'exercent entre elles

(4 connues à ce jour)

- et enfin des **lois fondamentales** qui gouvernent
ces interactions entre particules élémentaires

L'Édifice de la Physique

Les **particules élémentaires**, « building blocks » de tout l'édifice, interagissent donc entre elles suivant (au moins) les **quatre types d'interactions (ou forces) connues à ce jour** : **gravitationnelle, électromagnétique, nucléaire-faible et nucléaire-forte.**

Les **lois fondamentales** qui gouvernent ces interactions entre particules élémentaires se situent dans un **cadre théorique** actuellement constitué par la **Relativité (Restreinte et Générale) d'Einstein** et par la **théorie Quantique.**

En voici une représentation symbolique hautement artistique ...

La relativité et la théorie quantique

Les lois fondamentales

La gravitation

L'interaction
électro-
magnétique

L'interaction
faible

L'interaction
forte

Une « cinquième
force » ?

Les particules élémentaires

(à lire du bas vers le haut)

A) Les principales découvertes expérimentales

- 1) la découverte des différentes particules élémentaires
- 2) la découverte des 4 interactions fondamentales

- 3) la découverte de la radioactivité naturelle (H. Becquerel 1896; Pierre et Marie Curie 1898), et artificielle (Irène et Frédéric Joliot-Curie 1937)
- 4) la découverte de l'effet photo-électrique (Hertz 1887)
- 5) la découverte des rayons X (W.C. Röntgen 1895)
- 6) la découverte des rayons cosmiques (Viktor Hess 1912, Pierre Auger 1930)
- 7) la découverte de la supraconductivité (H. Kamerlingh Onnes 1911)
- 8) la découverte du CMB (Cosmic Microwave Background : $\lambda \approx 1.8 \text{ mm}$ et $T \approx 2.73 \text{ }^\circ \text{ K}$) (Penzias et Wilson 1968)

B) La découverte des lois fondamentales de la physique

1) la découverte des différentes particules élémentaires

- **l'électron (e^-)** (J.J. Thompson 1897 - Millikan 1907)
 - **le muon (μ^-)** (C.D. Anderson et S.H. Neddermeyer 1936)
 - **le tau (τ^-)** (M. Perl et al. 1975)
 - **le neutrino-e (ν_e)** (F. Reines et C.L. Cowan 1956)
 - **le neutrino-mu (ν_μ)** (L. Lederman, M. Schwartz et J. Steinberger 1962)
 - **le neutrino-tau (ν_τ)** (Byron Lundberg et al. 2001)
 - (- **le proton** (Ernest Rutherford 1919))
 - (- **le neutron** (Chadwick 1932))
 - **les quarks ((u,d)(1967) (s,c)(1975) (t,b) (1994,1977))**
 - **le photon (γ)** (Hertz 1887 - Einstein 1905)
 - **le Z^0 , le W^+ et le W^-** (C. Rubbia et al. 1983)
 - **le gluon** (1981 au Collisionneur PETRA à DESY/Hambourg)
-
- **le boson de Higgs ?**
 - **les particules « super-symétriques » ?**
 - **le graviton ?**

D'autre part, puisque à chaque particule correspond une anti-particule (« antimatière »), il est bon de rappeler au moins les premières qui ont été découvertes :

- **l'anti-électron (ou « positron »)** (C.D. Anderson, P. Blackett and J.P.S. Occhialini, 1932)
- **(l'anti-proton (E. Segrè and O. Chamberlain 1955))**

En outre un grand nombre de nouvelles particules :

π^\pm (Lattes, Occhialini and Powell, 1947), π^0 , K^\pm , Λ , K^0 ,
 Ξ^- , Σ^\pm , K_{LS} , Σ^0 , Ξ^0 , Ω^- ,

et « résonances » :

Δ^{++} , ρ , η , K^* ,

ont été découvertes depuis la fin des années 40.

Cependant toutes ces particules (de même que le proton et le neutron) ne sont plus considérées comme élémentaires puisque constituées de quarks (et de gluons).

Voici les **particules élémentaires** du « **Modèle Standard** »

Fermions (*) (spin =1/2) (particules de matière)	Leptons			Quarks		
	e^- ν_e	μ^- ν_μ	τ^- ν_τ	u (up) d (down)	C (charm) S (strange)	t (top) b (bottom)
Bosons (médiateurs des interactions) (spin =1) --> (spin =0) -->	γ (photon) Z^0 W^- W^+ gluons (8) <div style="text-align: center;">Higgs (?)</div>					

(*) Ainsi que leurs « anti-particules » : e^+ , μ^+ , τ^+ , etc.

Toutes les particules du Modèle Standard sont sensibles à l'interaction faible (exceptés le photon (γ) et les gluons), ainsi qu'à l'interaction électromagnétique lorsqu'elles sont chargées (plus le photon (γ)), tandis que seuls les **quarks** et les **gluons** sont sensibles à l'interaction **forte**.

2) la découverte des 4 interactions fondamentales

- l'interaction gravitationnelle (depuis toujours !)
- l'interaction électro-magnétique
(électricité : par Thalès de Millet en 600 avant JC;
magnétisme terrestre : par des savants Chinois vers l'an 1040)
- l'interaction nucléaire forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques (E. Rutherford 1919)
- l'interaction nucléaire faible, qui est responsable de la désintégration β et, inversement, de l'interaction des ν 's avec la matière ordinaire (F. Reines et C.L. Cowan 1956)



Voici **l'intensité relative**, ainsi que **le rayon d'action**
des **4 Forces Fondamentales**

Type de Force	Forte	Electro-magnétique	Faible	Gravitation-nelle
l'intensité relative (dans l'interaction p-p)	1	1/100	1/1000000	1/10 ³⁹ (1 suivi de 39 zéros!)
le rayon d'action	(1.5/10 ¹³) cm	infini	(2/10 ¹⁶) cm	infini

B) La découverte des lois fondamentales de la physique

- lois de la Gravitation (Galileo, Newton 1686 - Einstein 1917)
- lois de l'Électro-magnétisme (Maxwell (1865) -> QED)
- lois de l'Interaction Faible (Fermi 1934, Lee et Yang (1956) / Mme Wu (1957) -> V-A)
- lois de l'Interaction Forte (Yukawa 1936 -> QCD)

Modèle Standard
(Glashow, Weinberg et Salam)
(1972) (*)

Grande Unification ?
(Super-symétrie (SUSY), Théorie des cordes, etc.)

(*) plus la symétrie quarks-leptons : les 3 « familles » ou « générations » (GIM mechanism, etc.)

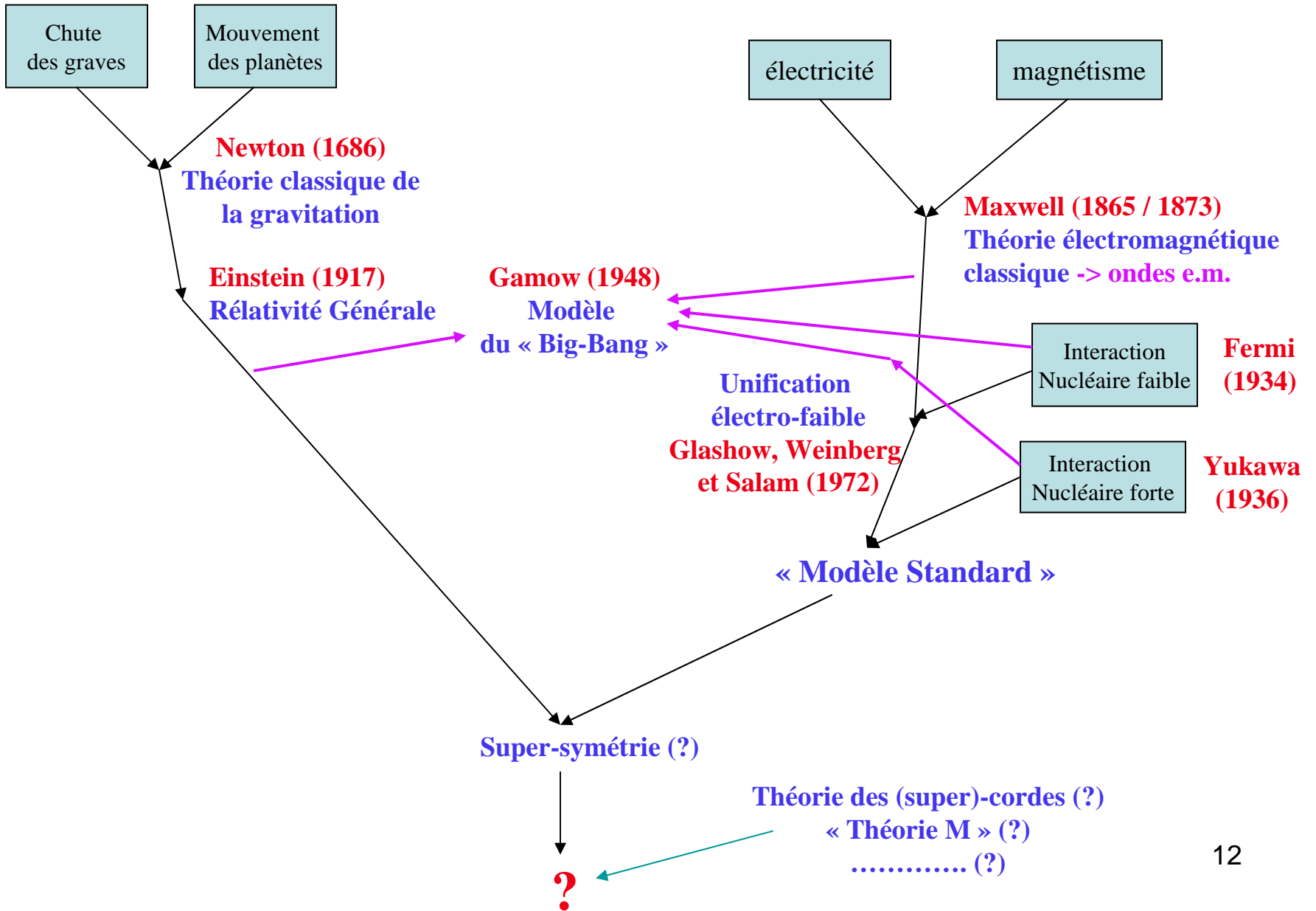
En outre la **Cosmologie moderne** s'est développée à partir de :

- la Relativité Générale (1917)
- la Loi de Hubble : expansion de l'Univers (1929)
- la physique des Particules Élémentaires

- Modèle du Big Bang

(A. Friedman (1922), G. Lemaître (1927 et 1931), G. Gamow (1948), etc.:
prédiction du CMB) 11

Schéma de l'évolution de la Physique



**Ces lois fondamentales s'inscrivent dans un cadre théorique
qui s'appuie sur deux piliers essentiels :**

1) la Relativité : Restreinte (1905) -> Générale (1917)

A. Einstein (et : Lorentz, Poincaré, Minkowski, De Sitter, Weyl, Friedmann-Robertson Walker, Schwarzschild, Chandrasekhar, Stephen Hawking, Penrose, T. Damour, ...)

2) la Mécanique Quantique -> la Théorie Quantique des Champs

Plank (1900), Einstein (1905), Bohr (1913), Sommerfeld (1915-1916),
de Broglie (1923), Schrödinger (1925), Max Born (1925-1926), Pascual Jordan (1925),
John Von Neumann (1926-1932), Heisenberg (1925-1927), Pauli (1925 et 1930),
Dirac (1927-28-30-31), Hermann Weyl (1929), Eugene Wigner (1931), Fermi (1934),
Einstein, Podolsky and Rosen (1935), Yukawa (1936), Majorana (1937),
Tomonaga (1943 et 1948), Pontecorvo (1947), Bethe (1947), H. Casimir (1948),
Schwinger (1948 et 1957), Feynman (1948, 1958 and 1969), Dyson (1949), Ward (1950,
1961 et 1964), Stükelberg (1953), Gell-Mann (1953, 1958), Yang and Mills (1954),
Nishijima (1955), Lee and Yang (1957), Salam (1957, 1961, 1964, 1968 and 1972),
Landau (1957), Leite Lopes (1958), Goldstone (1961), Glashow (1961, 1964 and 1968),
Cabibbo (1963), Bjorken (1964 and 1969), Higgs et al (1964), Gell-Mann and
Zweig (1964), Greenberg, Han and Nambu (1964), Kibble (1967), Weinberg (1967 and
1972), Faddeev and Popov (1967), Glashow, Iliopoulos and Maiani (GIM - 1970),
't Hooft (1971), P. Ramond, J.H. Schwarz and A. Neveu (1971), Veltman (1972),

K.G. Wilson (1971), B. W. Lee and J. Zinn Justin (1972), Kobayashi and Maskawa (1973), Gross and Wilczek ; Politzer (1973), Fritzsche, Gell–Man and Leutwyler (1973), Georgi and Glashow(1974), C. Pati and A. Salam (1973-1974), J.Ellis (1973), J.Wess and B.Zumino (1973), D. Nanopoulos (1973), P. Fayet (1974-1978), Iliopoulos (1974), H.Georgi, S.Dimopoulos (1981), etc.

Et, en vue d'essayer d'unifier :

la gravitation avec les trois autres interactions fondamentales

(relativité Générale) <-----> (Théorie Quantique des Champs)

« Grande Unification (TOE) »

Théodore Kaluza (1919) et Oskar Klein (1926), Gabriele Veneziano (1968), Y. Nambu, H.B. Nielsen and L. Susskind (1970), John Schwarz and Joël Scherk (1974) et Tamiaki Yoneya (1974), Alexander Polyakov (1980), Michael Green and John Schwarz (1984), Edward Witten (1990), Brian Greene, Seiberg and Witten (1994), Andrew Strominger and Cumrun Vafa (1996), Juan Maldacena (1997), Lisa Randall and Raman Sundrum (1999),

Une remarque-question :

- du « mariage » entre :

la **Mécanique Quantique** et la **Relativité Restreinte**



sont « nées »

les particules d'**anti-matière** (P.A.M. Dirac 1930)

(Anderson, Blackett et Occhialini 1932)

- du « mariage » entre :

la **Théorie Quantique des Champs** et la **Relativité Générale**



verra-t-on « naître »

les particules **super-symétriques** ?

L'évolution de notre Univers (en bref !)

Big Bang

(il y a 14 milliards d'années)

Univers très petit ($<10^{-33}$ cm) et très chaud ($> 10^{32}$ K)

peuplé de Photons -> neutrinos, électrons, quarks, gluons, Z^0 , W^- et W^+ , ... et de leurs « anti-particules »

toutes ces particules élémentaires sont libres et en équilibre thermique

(il n'y a pas encore d'états liés possibles)



début de l'expansion et donc du refroidissement



quarks --> protons et neutrons -->

--> noyaux atomiques primordiaux (Deutérium, Hélium, ...) -->

--> atomes correspondants (capture des électrons) -->



---> étoiles et galaxies

(production des éléments plus lourds que l'Hélium)

Aujourd'hui : but des accélérateurs de particules de plus en plus puissants -->

--> re-parcourir l'évolution de l'Univers en sens inverse,

en s'approchant progressivement des conditions du Big Bang.

et, un peu plus en détail ---->

L'évolution de notre Univers

Suivant le scénario « standard » du Modèle du Big Bang, notre Univers est né d'une explosion primordiale (justement le Big Bang) il y a environ 14 milliards d'années.

Au tout début l'Univers était extrêmement petit (moins de 10^{-33} cm) et extrêmement chaud (au moins 10^{32} ° Kelvin), mais avec le Big Bang son expansion a commencé, à un rythme d'abord très rapide (typiquement une augmentation de 35 ordres de grandeur en 10^{-32} sec : l'« inflation ») et ensuite beaucoup plus lent et cependant accéléré, tandis que simultanément sa température moyenne n'a cessé de décroître pour atteindre la température actuelle de 2.73 ° Kelvin (environ -270 ° C) -> CMB = Cosmic Microwave Background : $\lambda \approx 1.8$ mm et $T \approx 2.73$ ° K.

Au tout début l'Univers était essentiellement peuplé de photons, qui très rapidement (10^{-43} sec) par leurs interactions ont produit des neutrinos, des électrons, ainsi que des quarks et des gluons, des Z^0 , W^- et W^+ , ... en même temps que leurs « anti-particules ». Toutes ces particules élémentaires étaient libres et en équilibre thermique (il n'y avait pas encore d'états liés possibles).

Les quarks (et les gluons) résultant de la Baryogénèse^(*) (10^{-10} sec) se sont ensuite assemblés pour former les protons et les neutrons (10^{-4} sec), qui à leur tour ont commencé (≈ 1 sec) à constituer les noyaux atomiques des éléments les plus légers : Hydrogène, Deutérium, Hélium, Lithium, ... **et tout cela n'a guère pris plus que quelques minutes !** D'autre part la Leptogénèse^(**) et le découplage des neutrinos (fond cosmique) ont eu lieu en parallèle (1-10 sec). Il a fallu nettement plus de temps (environ trois cent mille ans) pour commencer à former les atomes par l'assemblage d'électrons résultant de la Leptogénèse et de noyaux atomiques, et encore plus de temps ($\approx 10^9$ années) pour commencer à former les étoiles et les galaxies qui peuplent notre Univers actuel ! Et c'est au cœur des étoiles, tel un creuset, que se poursuit la production des noyaux atomiques, à partir de l'Hydrogène et jusqu'au Fer, et même au-delà dans l'explosion des Supernovae, lorsqu'elles se transforment en étoiles à neutrons, voire même en trous noirs.

Au tout début de l'Univers les 4 forces (interactions) fondamentales étaient réunies dans une force unique, mais par la suite, lors de l'évolution de l'Univers, elles se sont différenciées : d'abord l'interaction gravitationnelle s'est singularisée (10^{-43} sec // 10^{19} GeV), suivie par l'interaction forte (10^{-38} sec // 10^{16} GeV) et enfin les deux restantes (électromagnétique et faible) se sont également séparées (10^{-10} sec // 100 GeV) pour donner lieu au scénario que nous connaissons aujourd'hui.

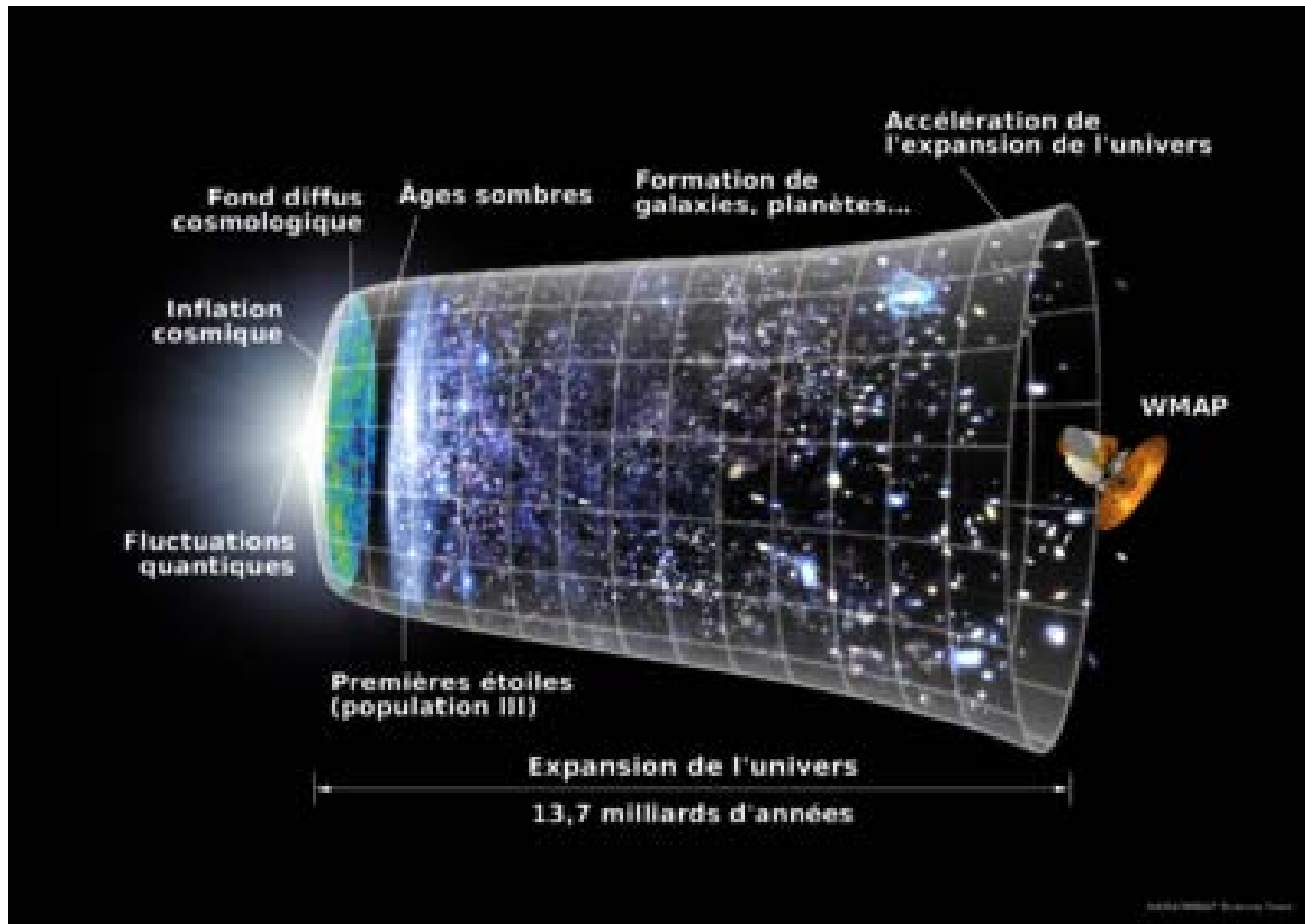
Or les physiciens, à l'aide d'accélérateurs de particules de plus en plus puissants, sont en train de **re-parcourir l'évolution de l'Univers en sens inverse**, en s'approchant progressivement des conditions de l'Univers au moment du Big Bang.

- (*) La Baryogénèse est le processus par lequel les quarks se sont tous annihilés avec les anti-quarks, sauf un par milliard (environ), qui se serait trouvé « célibataire » lors de leur production à la suite du Big Bang. L'ensemble de tous ces quarks « célibataires », ayant ainsi survécus au processus d'annihilation, ont ensuite constitué les protons et les neutrons de la matière ordinaire de notre Univers.**

- (**) La Leptogénèse est le processus par lequel les électrons se sont tous annihilés avec les anti-électrons, sauf un par milliard (environ), qui se serait trouvé « célibataire » lors de leur production à la suite du Big Bang. L'ensemble de tous ces électrons « célibataires », ayant ainsi survécus au processus d'annihilation, ont ensuite participé à constitution de la matière ordinaire de notre Univers.**

Ces processus de Baryogénèse et de Leptogénèse peuvent ainsi expliquer l'absence d'anti-matière dans notre Univers actuel, à condition toutefois d'être eux-mêmes prédits par une future vraie théorie, à partir de propriétés fondamentales des particules élémentaires.

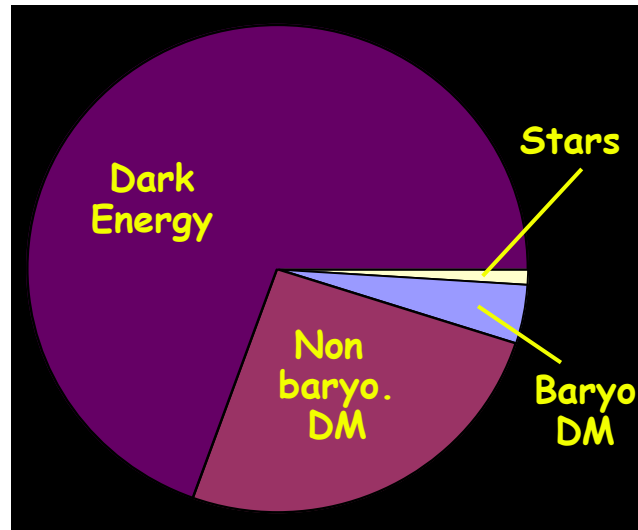
Voici une vue d'artiste de l'évolution de notre Univers :



Quelles preuves avons-nous de la validité du Modèle du Big Bang ?

- loi de Hubble (1929) -> expansion de l'Univers : motivation initiale
- découverte (1968) du CMB (Cosmic Microwave Background : $\lambda = 1.8$ mm et $T = 2.73$ ° K),
prédit par Gamow en 1948
- vérification expérimentale des pourcentages des éléments « primordiaux » : Hydrogène ($\approx 75\%$),
Deutérium ($\approx 2 \times 10^{-5}$), Hélium-3 ($\approx 3 \times 10^{-5}$), Hélium-4 ($\approx 24\%$), Lithium-6 ($\approx 10^{-12}$), Lithium-7 ($\approx 10^{-9}$)
- nombre de baryons / nombre de photons = $\eta = 6.14 (+/- 0.25) \times 10^{-10}$ (résultats des expériences WMAP
et Large Scale Survey, en très bon accord avec les prédictions du modèle standard de la cosmologie :
 $\eta = 6.1 (+/- 0.6) \times 10^{-10}$)
- preuve (indirecte) de l'« inflation » --> $\Omega = 1$ (Exp. WMAP, etc).

De quoi est composé notre Univers ?



- la « **Matière Visible** » (les étoiles) ne représente que quelques pour mille de la totalité de la masse-énergie présente dans notre Univers
- la « **Matière Noire** (ou sombre) » représente environ 1/3 de cette masse-énergie totale : une fraction mineure (environ 5 %) de cette matière noire est composée (comme les étoiles) de matière ordinaire, tandis que la partie restante devrait être constituée d'une matière d'un type nouveau, comme par exemple le « Neutralino », c'est-à-dire la plus petite des particules super-symétriques
- enfin l'« **Energie Noire** (ou sombre) », couvrant les 2/3 restants de la masse-énergie totale, serait le « moteur » du régime accéléré de l'expansion de notre Univers.
Sa nature est pour l'instant inconnue : énergie du vide (liée à la « constante cosmologique λ »), « quintessence », « fantôme -> Big Rip », ou Relativité Générale modifiée (théorie des cordes),...?

et quelle sera sa future évolution ?

Si le scénario actuellement privilégié se confirmait, alors notre Univers connaîtrait un régime d'expansion sans fin avec une température moyenne toujours en diminution, approchant le zéro absolu !

--> vers le « **Big Rip (= la Grande Sublimation)** » ?

(si l'accélération de l'expansion deviendra suffisamment violente, elle finira par dissoudre toute forme de matière, depuis les galaxies jusqu'aux protons !)

« Svanire è dunque la ventura delle venture »

(Eugenio Montale, Portami il girasole (1925) / Ossi di seppia)

Et maintenant un « message » :

Les « grandes crises » ... sources de progrès !

1) Expérience de Michelson et Morely (1879) :

La vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel !!!

--> Relativité restreinte (Einstein 1905)

2) Coïncidence : masse gravitationnelle = masse inertielle

(Galileo (1630) - Newton (1686) - Eötvös (1922))

--> Relativité Générale (Einstein 1917)

3) Paradoxe du Rayonnement du « corps noir »

**(« catastrophe de l'ultra-violet ») --> (Plank 1900) --> début de la
Physique Quantique**

4) Effet photoélectrique (Hertz 1887) ---> (Einstein 1905)

**Qu'est-ce que le LSM a déjà apporté
et que pourra-t-il encore apporter à l'avenir
à cette construction de l'édifice
de la Physique ?**

A) dans le passé :

- **expérience sur la « Durée de Vie du Proton » :**
 - une contribution sur le chemin vers la « Grande Unification » des interactions fondamentales**

- **expérience « Edelweiss I » :**
 - a) contribution à la cosmologie (par une recherche de Matière Noire)**
 - b) contribution à la « super-symétrie » (recherche du « Neutralino »)**

- **expériences « NEMO I et II et TGV I » :**
 - a) contribution à la consolidation du « Modèle Standard » par la mesure de la désintégration « Double-bêta avec 2 neutrinos émis »**

B) actuellement :

- expérience « Edelweiss II » :

- a) contribution à la cosmologie (par une recherche de Matière Noire)**
- b) contribution à la « super-symétrie » (recherche du « Neutralino »)**

- expériences « NEMO III et TGV II » :

- a) contribution à la consolidation du « Modèle Standard » par la mesure de la désintégration « Double-bêta avec 2 neutrinos émis », et cela pour plusieurs éléments « sources » de double désintégration bêta.**
- b) recherche de la valeur absolue de la masse du neutrino, ainsi que de sa nature (Neutrino de Majorana ($\nu = \text{anti-}\nu$) ou de Dirac ($\nu \neq \text{anti-}\nu$) ?) par la recherche de de la désintégration « Double-bêta sans neutrinos émis » -> théories au-delà du « Modèle Standard » -> Grande Unification**

C) dans le futur (au-delà de la poursuite et de l'achèvement des expériences Edelweiss II, NEMO III et TGV) :

*** Projet « ULISSE » (nécessitant une extension (x 20) du LSM) :**

- expérience « Super-NEMO » ($\approx 10 \times$ NEMO III)
- expérience « EURECA » (« Super-Edelweiss »)

Les finalités ici restent les mêmes, mais il s'agit

« d'aller plus loin », de manière à réaliser les conditions pour des découvertes fondamentales dans ce domaine.

*** Projet « MEMPHYS / LAGUNA » (nécessitant un nouveau laboratoire de dimensions géantes (\approx LSM x 300)):**

Finalités principales :

- reprise du « Proton-Decay », stimulé par des nouvelles prédictions de théories s'approchant de la Grande Unification
- propriétés « ultimes » des neutrinos, par l'étude très précise des Neutrinos venant de l'effondrement des Supernovae, du centre du Soleil, des rayons cosmiques dans l'atmosphère , et éventuellement ... du CERN par des faisceaux spécialement étudiés dans ce but.

(-> asymétrie matière anti-matière dans l'Univers : un mystère à comprendre!)

(-> étude du mécanisme d'effondrement des Supernovae (étoiles très massives))

Détecteurs Germanium au LSM

D'autre part un ensemble de 14 détecteurs Germanium fonctionnant à la température de l'Azote Liquide constituent probablement le 1er « parc » mondial du genre, en site souterrain profond, par le nombre, la taille et la pureté radioactive de ses détecteurs.

Le LSM a ainsi permis, depuis environ 25 ans, une étude très poussée de la radioactivité présente dans notre environnement, les datations les plus diverses (d'une dent de Neanderthal aux bouteilles de vins de Bordeaux de collection), ainsi que la sélection systématique des éléments nécessaires à la construction des autres détecteurs pour la recherche fondamentale.

Cette activité va très certainement se développer encore davantage dans les années à venir ...

Pour en savoir un peu plus sur :

- les différentes découvertes :
 - des particules élémentaires
 - des 4 forces (interactions) fondamentales
 - des lois qui gouvernent ces interactions
- la Relativité Restreinte
- la Relativité Générale
- la Physique Quantique
- le Modèle Standard
- l'évolution de l'Univers (Big Bang) ---> transp. 16 et 17
-
- Bibliographie « de base » :

à compléter ...

Les Sciences de la Nature

À chaque Discipline sa propre « échelle » :

- la Physique des Particules Élémentaires : $< 10^{-15}$ m
- la Physique Nucléaire : de 10^{-15} m à 10^{-14} m
- la Physique Atomique : de 10^{-10} m à 10^{-9} m
- la Physique du Solide : de 10^{-9} m à 10^{-7} m
- la Chimie : de 10^{-10} m à 10^{-7} m
- la Biologie : de 10^{-9} m à 10 m
- l'Astrophysique : de 1 Km à 10^{23} Km (= 10^{10} années-lumière)
- et enfin la **Cosmologie** qui s'étend sur toutes les échelles
et, d'une certaine façon, les relie entre elles.