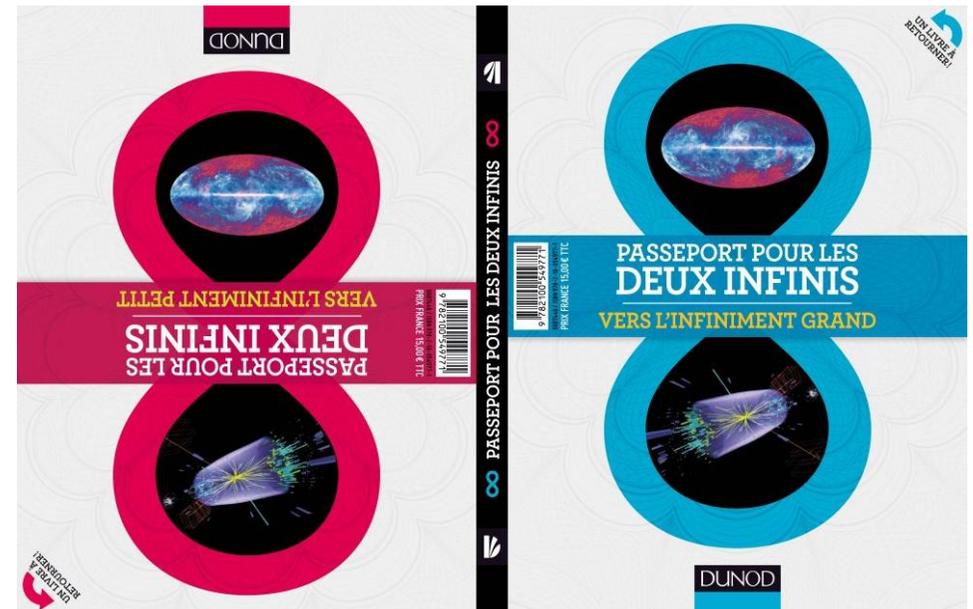
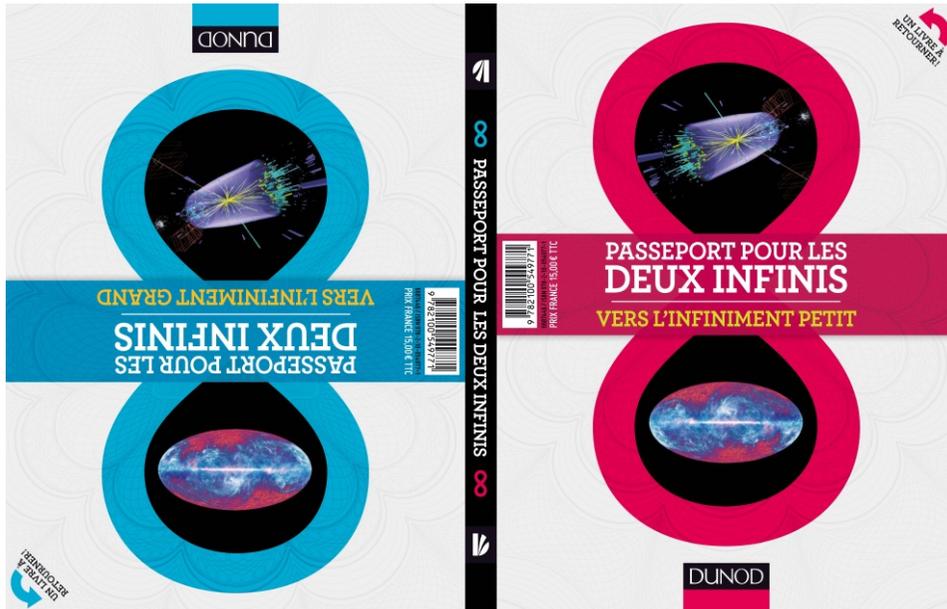


# Voyage vers les deux infinis ...

... N'oubliez pas votre Passeport !



16 octobre 2013 – Association le Kiosque Citoyen, Rennes

**Nicolas Arnaud**  
([narnaud@lal.in2p3.fr](mailto:narnaud@lal.in2p3.fr))

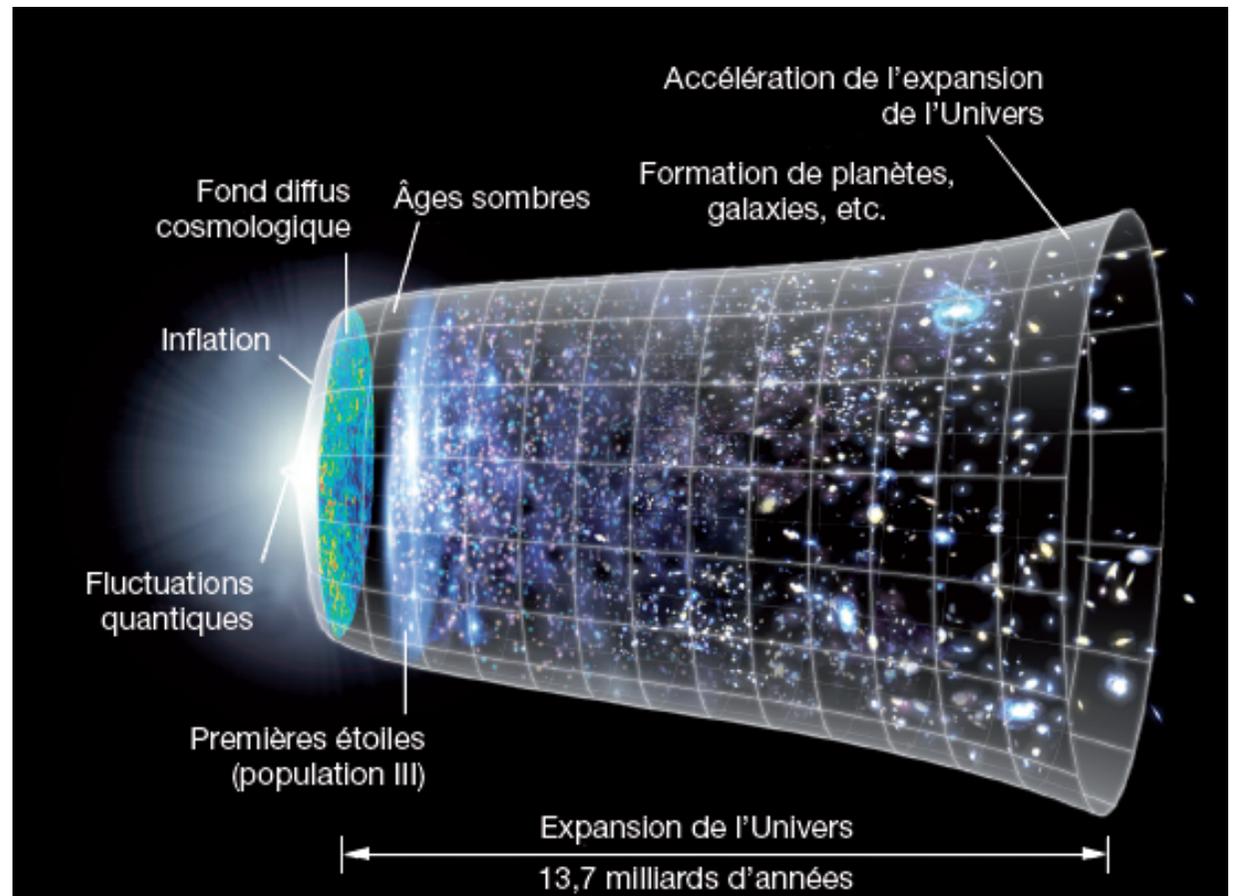
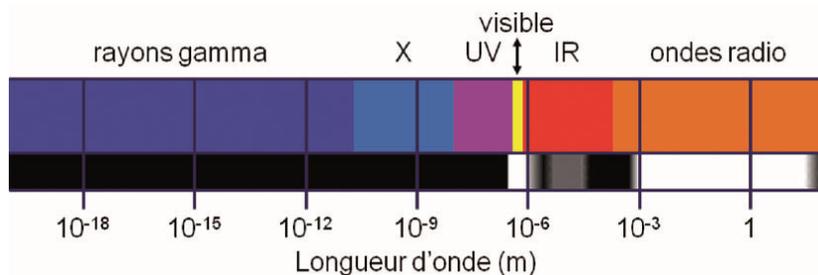


**Laboratoire de l'Accélérateur Linéaire**  
(CNRS/IN2P3 et Université Paris-Sud)



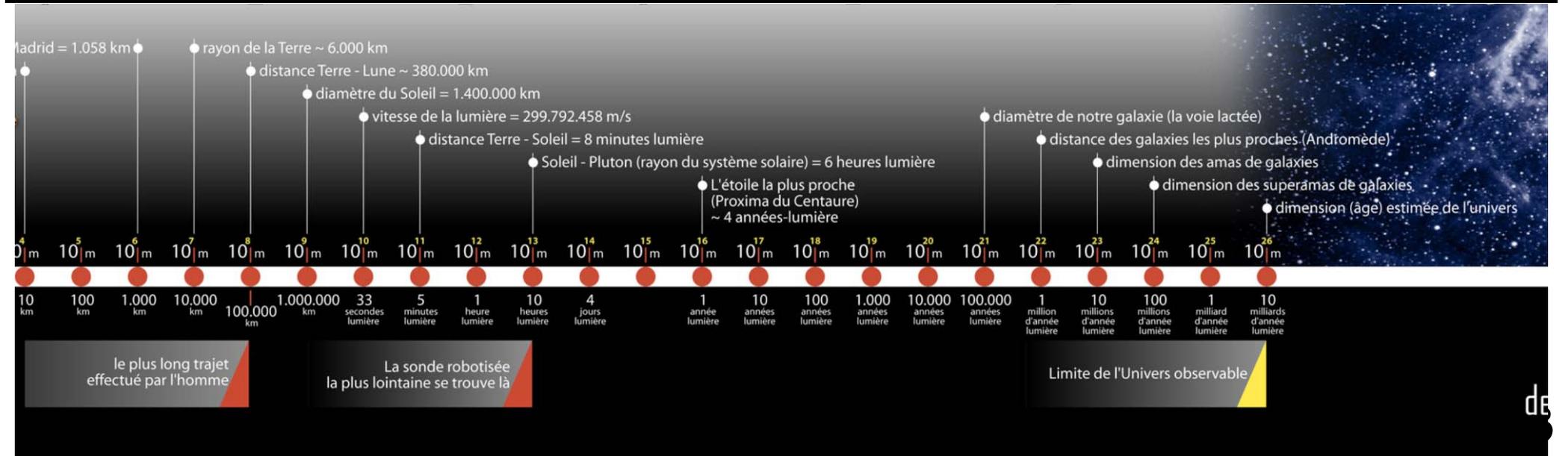
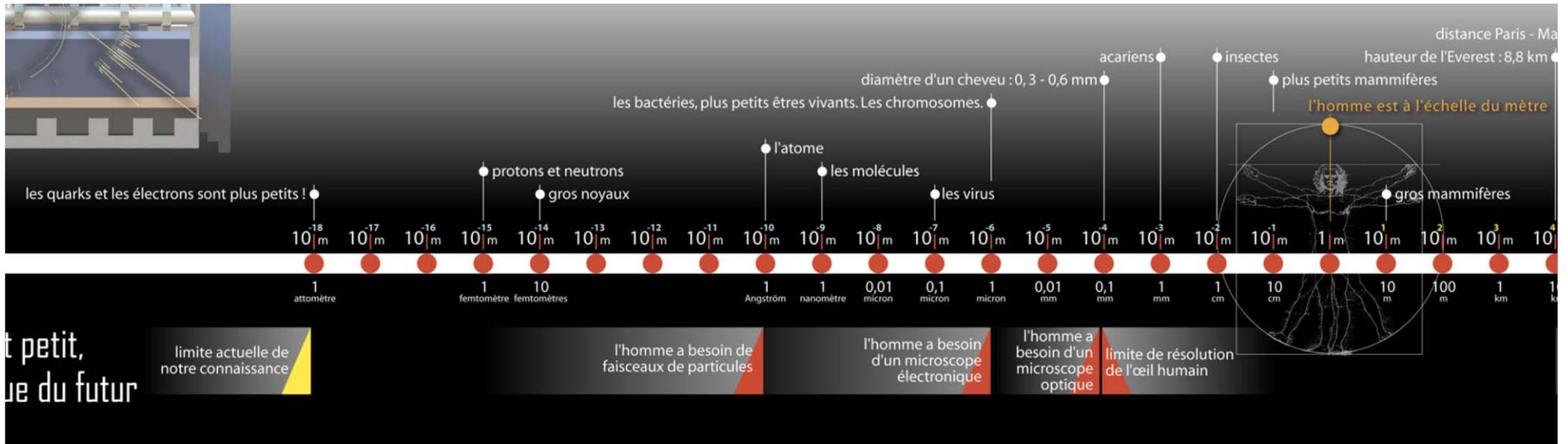
# Un voyage dans le temps

- -13,7 milliards d'années : le Big-bang
- -13,7 milliards d'années + 380 000 ans : émission du rayonnement de fond cosmologique (CMB)
- Antiquité
- Le XXe siècle
  - Développement continu de la « physique des deux infinis »
- 2012 & 2013
- Et demain ?



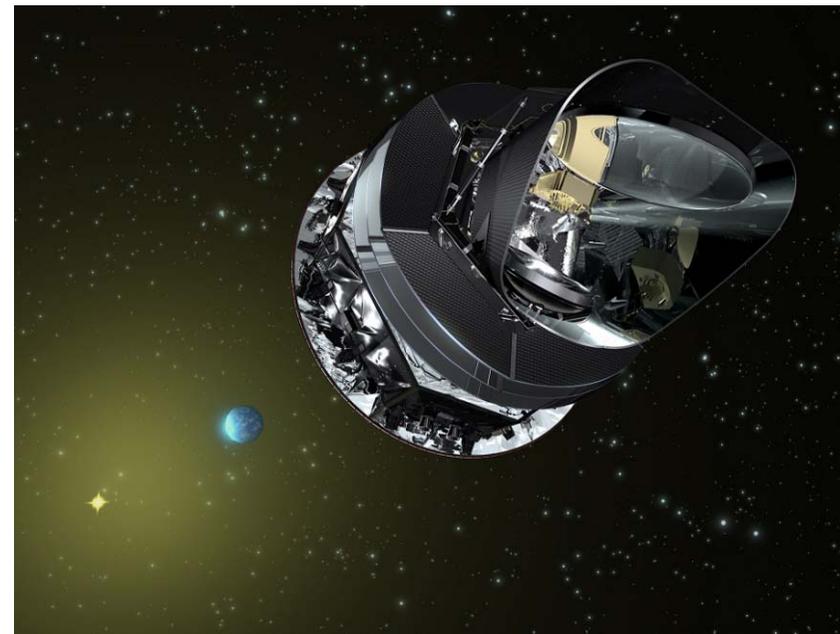
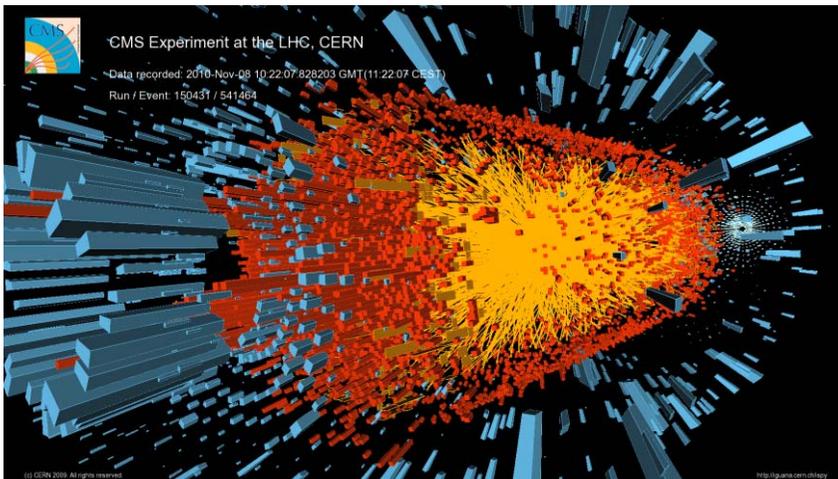
# Un voyage dans les échelles de distance

- $10^{-18} \text{ m} \rightarrow 10^{26} \text{ m}$



# Un voyage du (très) froid au (très) chaud

- **0,1 K** (-273,05°C)
- 1,9 K
- 2,7 K
- ...
- **1600 milliards de degrés Celsius**
- Température  $\leftrightarrow$  Energie
- **Densité d'énergie**



# Un voyage auprès des forces fondamentales

- **Quatre interactions fondamentales**

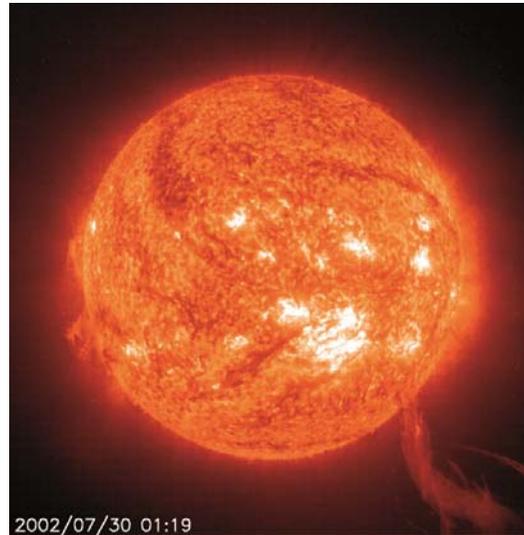
- Interaction forte
- Interaction électromagnétique
- Interaction faible
- Gravitation

- Des **portées très différentes**

- D'une fraction de la taille du noyau à l'infini !

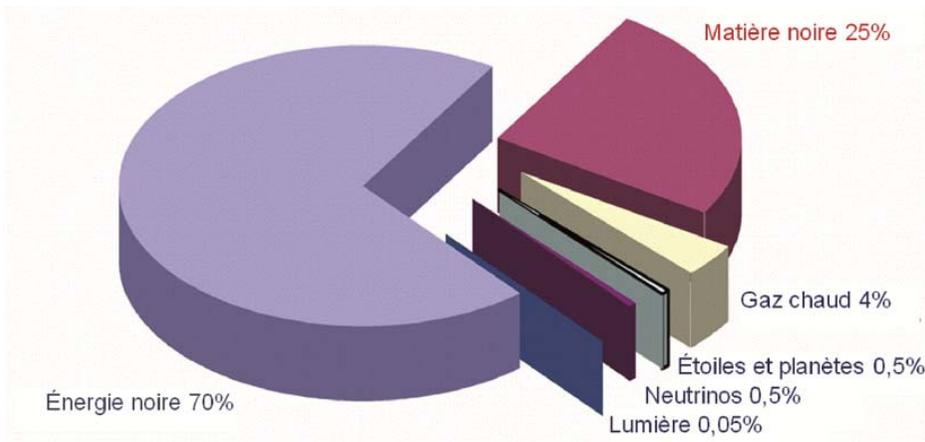
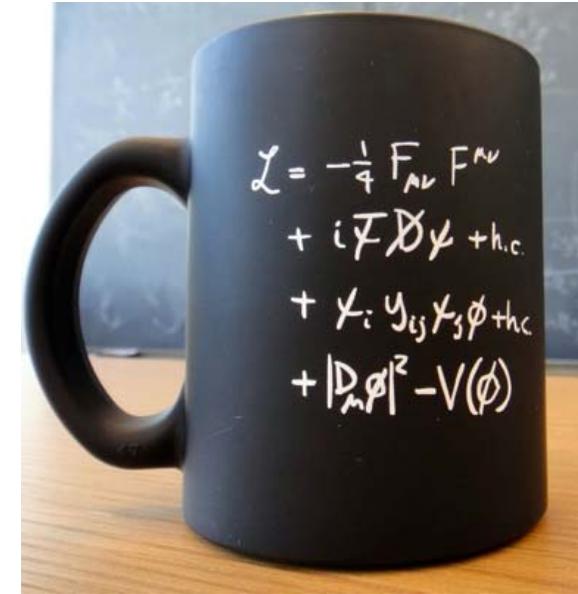
- Des **intensités très variées**

- 40 ordres de grandeur ( $10^{40}$ ) !



# Un voyage au-milieu des théories scientifiques

- La **relativité restreinte**
- La **mécanique quantique**
- Le **Modèle Standard de la physique des particules**
- **L'espace-temps**
- La **loi de la gravitation universelle**
- La **relativité générale**
- Le **Modèle Standard cosmologique**



## Composants élémentaires de la matière

Les interactions fondamentales

Il existe des particules associées aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

|                | 1 <sup>re</sup> famille          | 2 <sup>e</sup> famille           | 3 <sup>e</sup> famille           |
|----------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| <b>LEPTONS</b> | e<br>Électron                    | $\mu$<br>Muon                    | $\tau$<br>Tauon                  |
|                | $\nu_e$<br>Neutrino électronique | $\nu_{\mu}$<br>Neutrino muonique | $\nu_{\tau}$<br>Neutrino tauique |
| <b>QUARKS</b>  | u<br>Up                          | c<br>Charm                       | t<br>Top                         |
|                | d<br>Down                        | s<br>Strange                     | b<br>Bottom                      |

**Gravitation**  
Attraction universelle, pesanteur, orbites.  
GRAVITON ?

**Interaction faible**  
Désintégration radioactive.  
 $Z^0, W^+, W^-$

**Interaction électromagnétique**  
Électricité, magnétisme, lumière, ondes radio, ondes de télévision, cinéma.  
PHOTON

**Interaction forte**  
Cohésion des protons et des neutrons.  
GLUON

**1<sup>re</sup> famille**  
Ces particules ont été découvertes en 1929-1932. Elles sont les constituants de la matière ordinaire.

**2<sup>e</sup> famille**  
Ces particules ont été découvertes en 1936-1947. Elles sont instables et se désintègrent rapidement.

**3<sup>e</sup> famille**  
Ces particules ont été découvertes en 1961-1975. Elles sont les plus lourdes et les plus instables.

**LEPTONS**  
Particules constituées d'un lepton et d'un neutrino.

**QUARKS**  
S'associent en triplets au sein de hadrons (proton, neutron, mésons) et sont confinés par l'interaction forte.

**1<sup>re</sup> famille**  
Ces quarks ont été découverts en 1964-1965. Ils sont les constituants de la matière ordinaire.

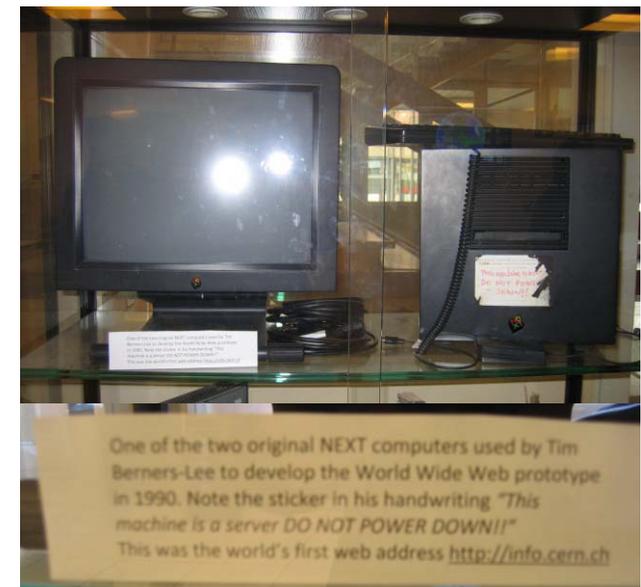
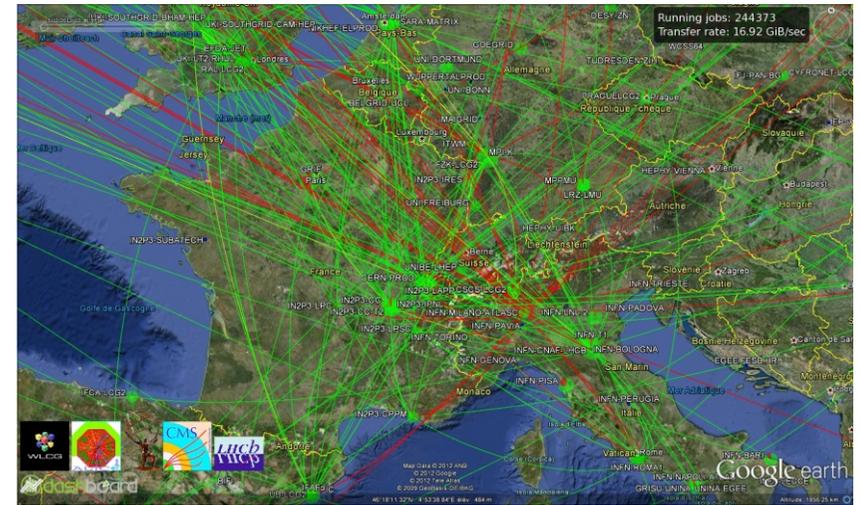
**2<sup>e</sup> famille**  
Ces quarks ont été découverts en 1974-1975. Ils sont instables et se désintègrent rapidement.

**3<sup>e</sup> famille**  
Ces quarks ont été découverts en 1975-1976. Ils sont les plus lourds et les plus instables.

**ATOMÈRE**  
Ces particules ont été découvertes en 1977-1981. Elles sont les constituants de la matière ordinaire.

# Un voyage au cœur des technologies

- Le **collisionneur LHC** et ses détecteurs associés
- Le **satellite Planck**
- **Une évolution incroyable des outils**
  - Expériences « à la main »  
→ **Tout analogique & numérique**
  - **Ordinateurs** : processeurs, stockage, réseaux, etc.
- **Des retombées multiples**
  - **Internet**
  - **Le GPS**

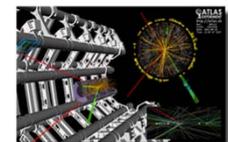
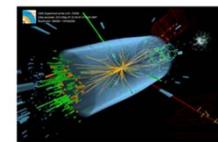


# Un voyage dans la communauté scientifique

- Les **théoriciens** « imaginent » des modèles
- Les **expérimentateurs** les « testent »  
→ Aller-retours incessants entre ces deux communautés scientifiques

## Exemple

- **1964** : proposition du « mécanisme de Higgs » par plusieurs équipes indépendantes
  - **2012** : découverte d'un nouveau boson massif au LHC
  - **2013** : en mars, ce boson devient un boson de Higgs  
en octobre, F. Englert et P. Higgs obtiennent le prix Nobel de physique
- Des « explorateurs-découvreurs » aux **grandes collaborations internationales** actuelles
  - **Une grande diversité de métiers**
    - **Physiciens, ingénieurs, techniciens, administratifs**
  - Prix, distinctions et récompenses



# Un voyage nécessairement limité

- Par la durée de cette conférence
- Par mes connaissances, forcément ... finies !
- Par mes sélections, interprétations, biais culturels, etc.
  
- Il existe **de nombreuses ressources pour aller plus loin**  
→ J'en parlerai brièvement à la fin de cette présentation
  
- **Un panorama de l'état des connaissances en physique des deux infinis**
  - En bonus : les principales questions ouvertes ...
  
- Prise en compte de **l'actualité récente** :
  - Zooms sur le **collisionneur LHC au CERN** et sur le **satellite Planck**
  
- En route !  
→ **N'hésitez pas à m'interrompre à tout moment ...**
  
- Transparents disponibles sur la page web  
<https://indico.lal.in2p3.fr/conferenceDisplay.py?confId=2272>



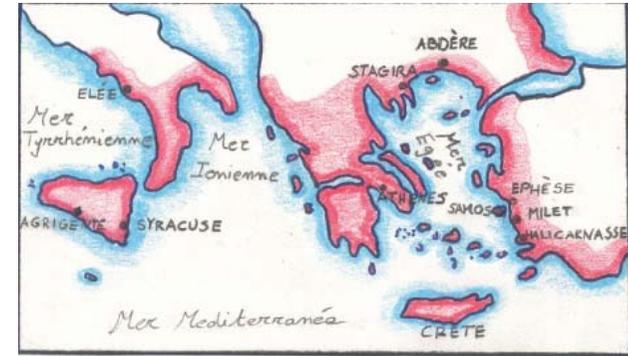
L'infinitement petit

# Introduction

- Etude des constituants les plus fins de la matière
  - Les particules élémentaires
    - **Insécables** : il n'existe pas d'objet plus petit
    - **Sans structure interne** : il n'y a « rien » à l'intérieur→ « Point matériel »
- } D'après nos connaissances actuelles
- Les interactions (« forces ») fondamentales qui agissent sur ces constituants
  - Plus on veut sonder la matière à de petites échelles, plus il faut d'énergie
    - Les accélérateurs de particules comme le LHC sont des « microscopes géants »
  - Plus l'énergie augmente et plus l'on « remonte le temps » vers le Big-bang
    - Liens entre l'infiniment petit et l'infiniment grand
  - **Modèle Standard** construit dans les années 1960-1970
    - Excellente description des résultats expérimentaux « sur accélérateurs »
    - Mais certainement pas la « théorie ultime » de l'infiniment petit

# Une (très) brève histoire des particules

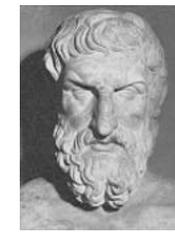
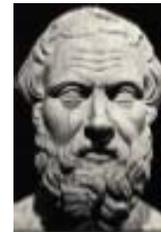
- **L'atome est un concept vieux de 2500 ans !**  
→ Les philosophes cherchent à expliquer la Nature  
(« *Physis* » en Grec)



- **Anaxagore** : « *Il y a quelque chose de chaque chose dans toutes les choses* »

- Atomisme : **Démocrite, Épicure, Lucrèce**

- « *Atoma* » signifie « *indivisible* » en grec
- Les atomes sont petits, élémentaires et pleins
- Les atomes se déplacent, s'assemblent et se séparent dans le vide, infini
- Il y a différents types d'atomes – les plus légers forment l'âme !
- Les atomes sont éternels et peuvent à l'infini former de nouvelles structures  
→ Vision du monde opposée au Christianisme ; elle tombe dans l'oubli



- **XVII<sup>ème</sup> – XVIII<sup>ème</sup> siècle** : les premiers chimistes

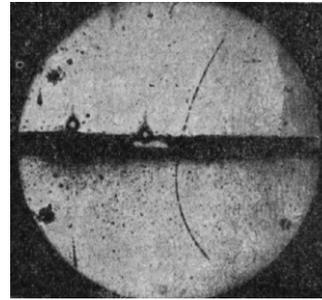
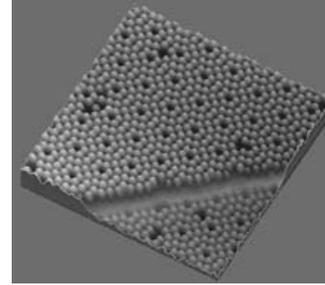
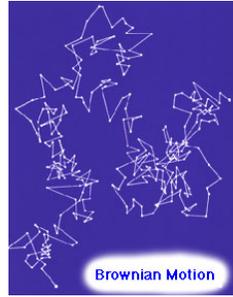
- **Boyle** : Une théorie scientifique valable est basée sur l'expérience
- **Lavoisier** : les molécules contiennent plus d'un élément chimique
- **Gay-Lussac** :  $2\text{H} + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$  ; les éléments chimiques sont à la base de la matière
- **Dalton** : chaque élément chimique est fait d'un type d'atome unique



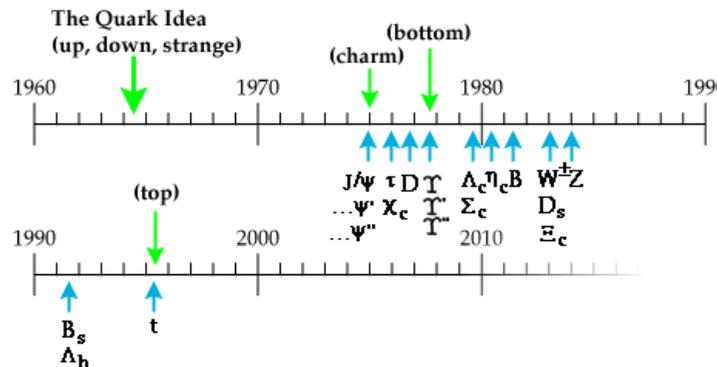
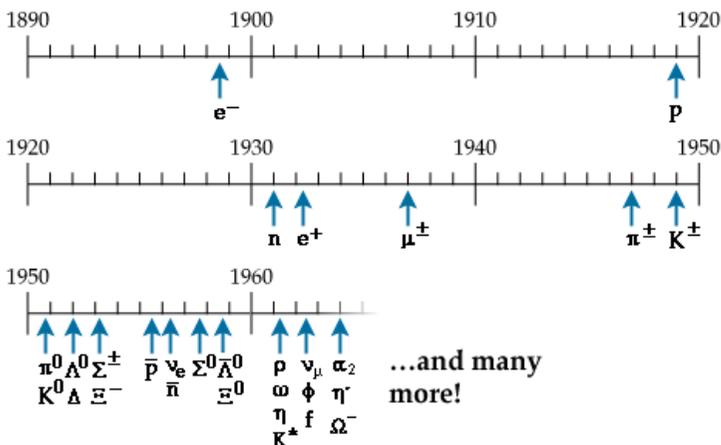


# Une (très) brève histoire des particules

- **1897** : Découverte de l'électron
- **1905** : Les atomes existent !
- **1909** : Découverte du noyau  
→ Les atomes sont presque vides !
- **1918** : Découverte du proton
- **1932** : Découverte du neutron
- **1933** : Découverte du positron  
→ 1<sup>ère</sup> particule d'antimatière
- **1936** : Découverte du muon



- Tout s'accélère **après la fin de la seconde guerre mondiale**  
→ Un vrai "zoo" de particules (plusieurs centaines) !



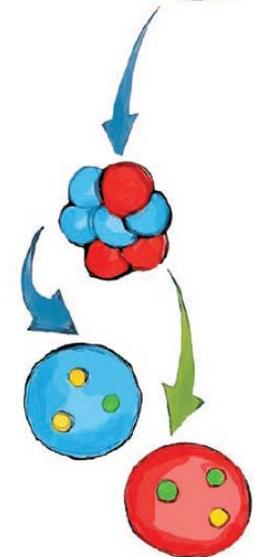
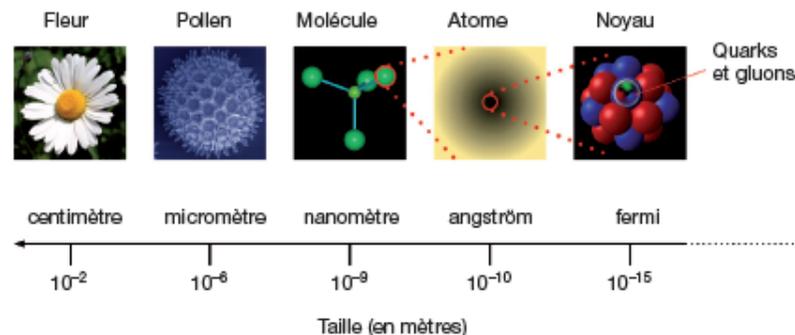
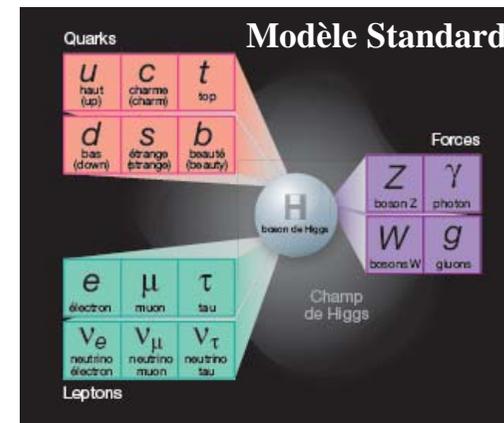
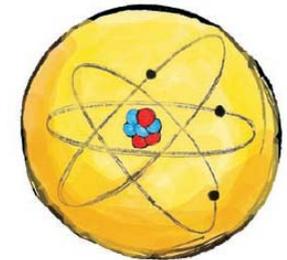
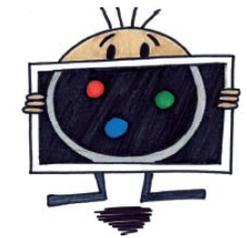
# Une (très) brève histoire des particules

- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks  
→ Il n'y a que **6 quarks au total**
- De **compliquée**,  
la situation  
redevient **simple** !

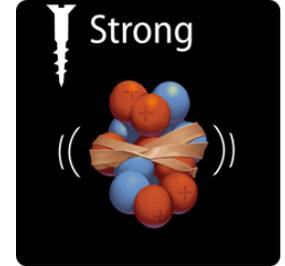
- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)

- Il y a **12 particules élémentaires** :
  - les **6 quarks**
  - l'**électron** et 2 « cousins » plus lourds, le **muon** et le **tau**
  - **3 neutrinos**

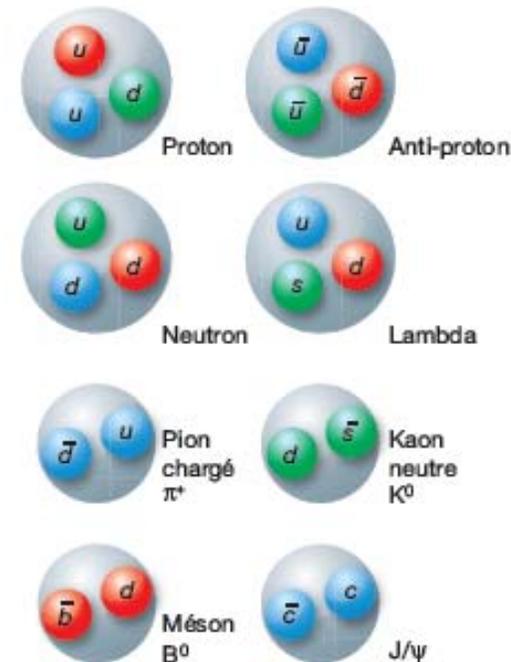
- Elles sont soumises à **3 forces** :
  - l'**interaction forte**
  - l'**interaction faible**
  - la **force électromagnétique**



# Interaction forte

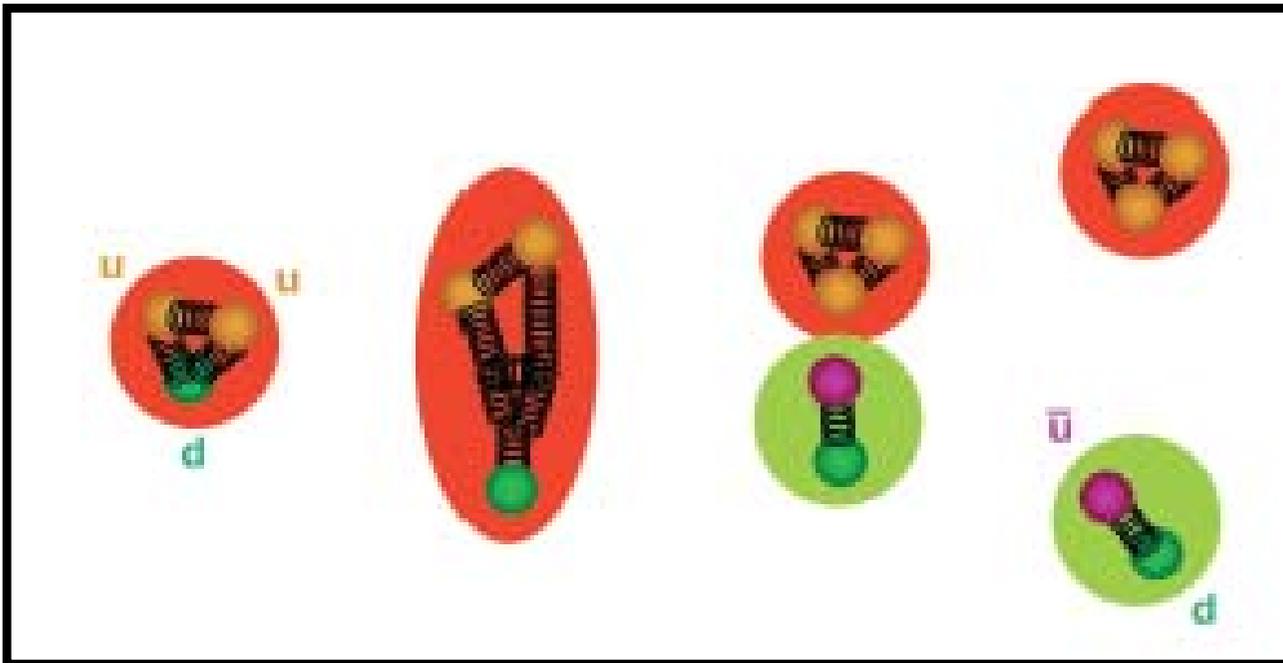


- **Nécessaire pour expliquer la cohésion des noyaux**
  - 2 protons séparés par la taille du noyau ressentent une force électromagnétique répulsive  $10^{10}$  fois supérieure à celle qui lie l'électron et le proton de l'atome d'H
- **Portée très limitée : à peine quelques diamètres de noyaux**
  - Durée associée  $\sim 10^{-23}$  s : temps caractéristique de l'interaction forte
- **Domine à l'échelle nucléaire**
  - 100 à 1000 fois plus intense que la force électromagnétique
- **L'interaction forte agit sur les quarks**
  - **Particules médiatrices** : les **gluons**
  - **Charge de « couleur »**
- **Trois couleurs : rouge, bleu, vert**
  - Chaque (anti)quark porte une (anti)couleur
  - **Les particules sont « blanches »**
    - **couleur + anti-couleur : mésons**
    - **les trois couleurs : baryons**
  - Les gluons sont eux-même colorés !
    - Interaction plus riche – et plus complexe ...



# Interaction forte

- Deux propriétés fondamentales
  - Confinement : impossible d'isoler un quark



Voici ce qui se passe quand on essaye d'arracher un quark à une particule  
→ Les « gluons » portent bien leur nom !

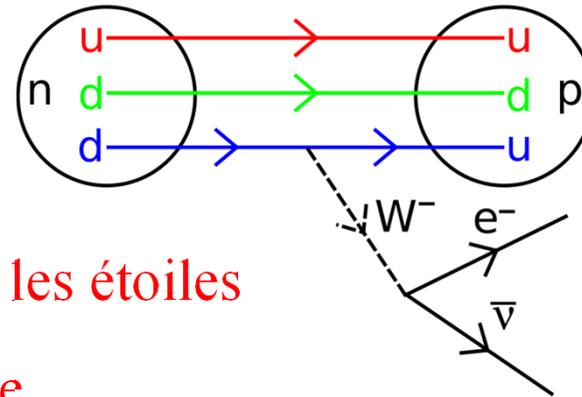
- Liberté asymptotique : l'intensité de la force diminue avec la distance

# Interaction faible



- Explique la radioactivité bêta ( $\beta$ )

→ Par exemple la désintégration du neutron :  
[Durée de vie du neutron :  $\sim 15$  minutes]



- Gouverne les réactions thermonucléaires dans les étoiles

- Portée encore plus faible que l'interaction forte

- A peine quelques centièmes de la taille du nucléon

→ Particules médiatrices  $\sim 100$  fois plus massives que le proton !

- Se désintègrent en un temps extrêmement court ( $\leq 10^{-24}$  s)

→ Interaction presque ponctuelle

- Environ  $10^{14}$  fois plus faible que l'interaction forte

- Charge faible : la « saveur » – exemple : chaque quark a une saveur différente

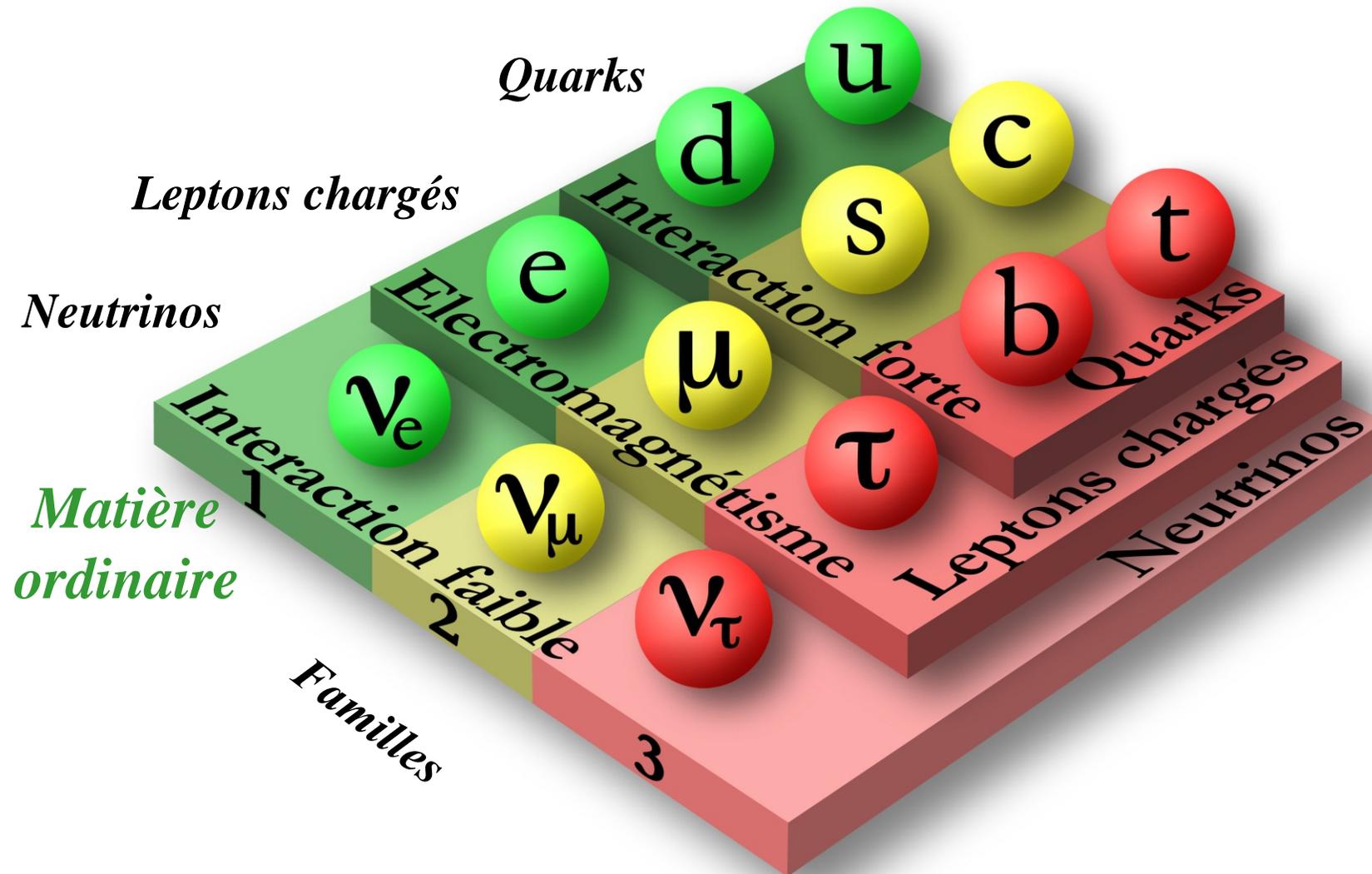
- Il n'existe pas d'états liés de particules dus à l'interaction faible

- L'interaction faible est aujourd'hui unifiée à haute énergie avec l'interaction électromagnétique

→ Voir plus loin

# Bilan (1/2)

- 12 particules élémentaires (des « fermions ») réparties en 3 familles



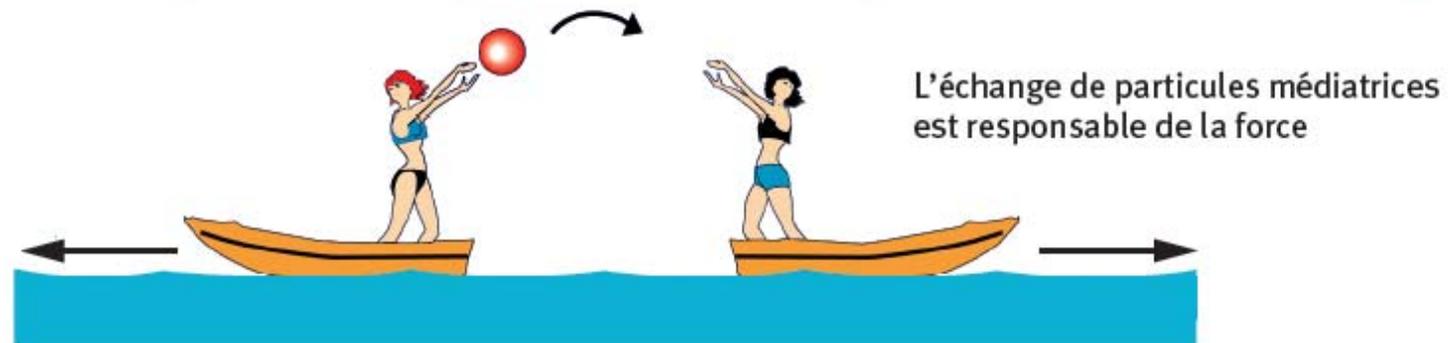
- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**

# Bilan (2/2)

- 3 interactions fondamentales
  - Gravitation **complètement négligeable** à l'échelle des particules élémentaires

## Les forces fondamentales

| Type                    | Intensité relative | Particules médiatrices             | Domine dans                     |
|-------------------------|--------------------|------------------------------------|---------------------------------|
| Force forte             | $\sim 1$           | Gluons                             | noyau atomique                  |
| Force électromagnétique | $\sim 10^{-3}$     | Photon                             | électrons entourant le noyau    |
| Force faible            | $\sim 10^{-5}$     | Boson $Z^0$ , $W^+$ , $W^-$        | désintégration radioactive bêta |
| Gravitation             | $\sim 10^{-38}$    | Graviton ?<br>(pas encore observé) | astres                          |



- Une particule est sensible à une force si sa charge associée est non nulle
- L'action d'une force opère par échange de particules médiatrices, des « bosons »
  - Plus le boson médiateur est lourd, plus l'interaction est à courte portée



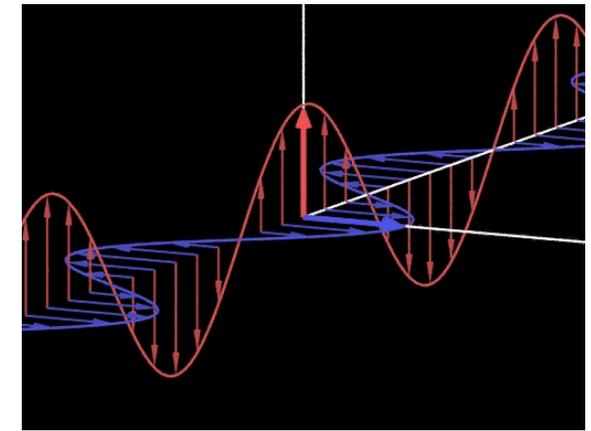
L'infinitement grand

# Introduction

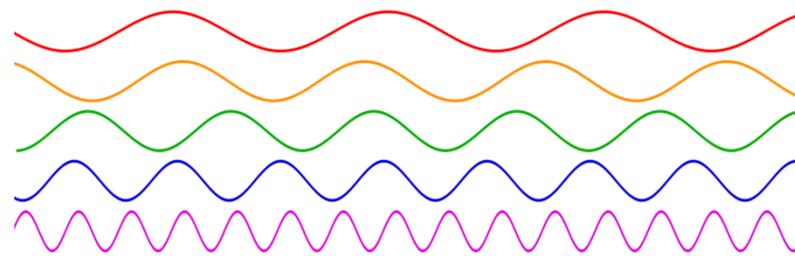
- La **cosmologie** étudie la structure et l'évolution de l'Univers
- **Âge** ?
- **Passé ? Avenir** ?
- **Composition** ?
- Science basée sur l'**observation** à (très très très) grande distance
- **Utilisation de tous les « messagers » possibles** – dont **la lumière**
- Nécessité d'anticiper toutes les **perturbations qui affectent les signaux reçus**, entre l'endroit de l'Univers où ils sont créés et la Terre où ils sont détectés
- Développement d'une théorie solide gouvernée par **une dizaine de paramètres**
  - **Le Modèle Standard cosmologique**
- Des faits expérimentaux n'ont pas d'explication dans ce cadre théorique
  - **Matière noire, énergie noire, asymétrie matière-antimatière**, etc.

# La lumière

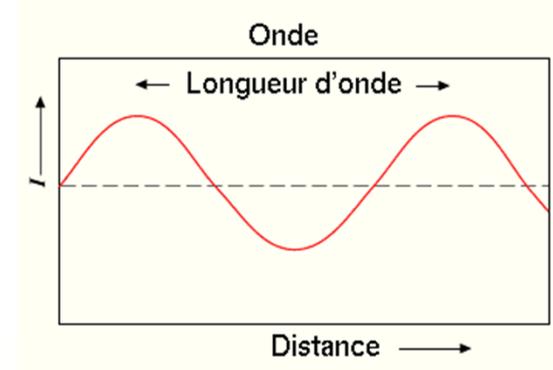
- Principal moyen d'**observer l'Univers**
  - Autres messagers : neutrinos, ondes gravitationnelles ...



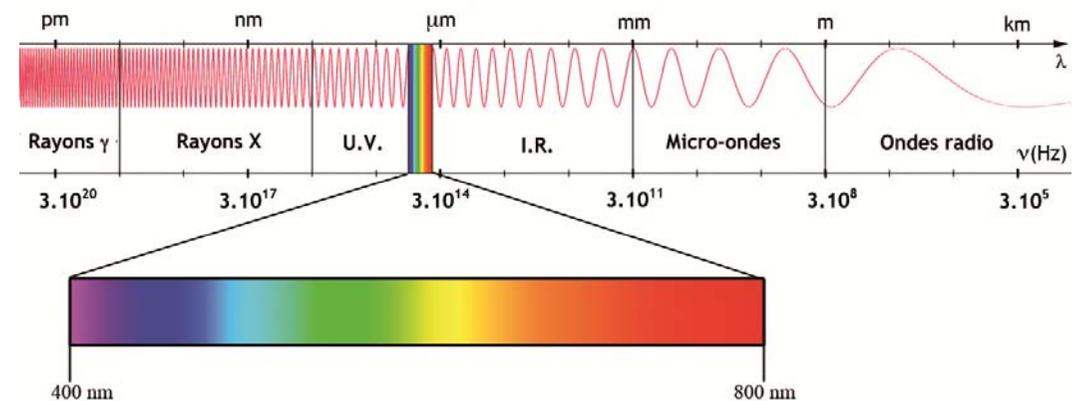
- **Onde électromagnétique**
  - Période  $T$  [seconde]
  - Fréquence  $\nu$  [hertz]
  - Longueur d'onde  $\lambda$  [mètre]
  - Vitesse  $c$  [mètre/seconde]



- Ces grandeurs sont reliées entre elles :  
 $T = 1/\nu$  ;  $\lambda = c \times T = c/\nu$

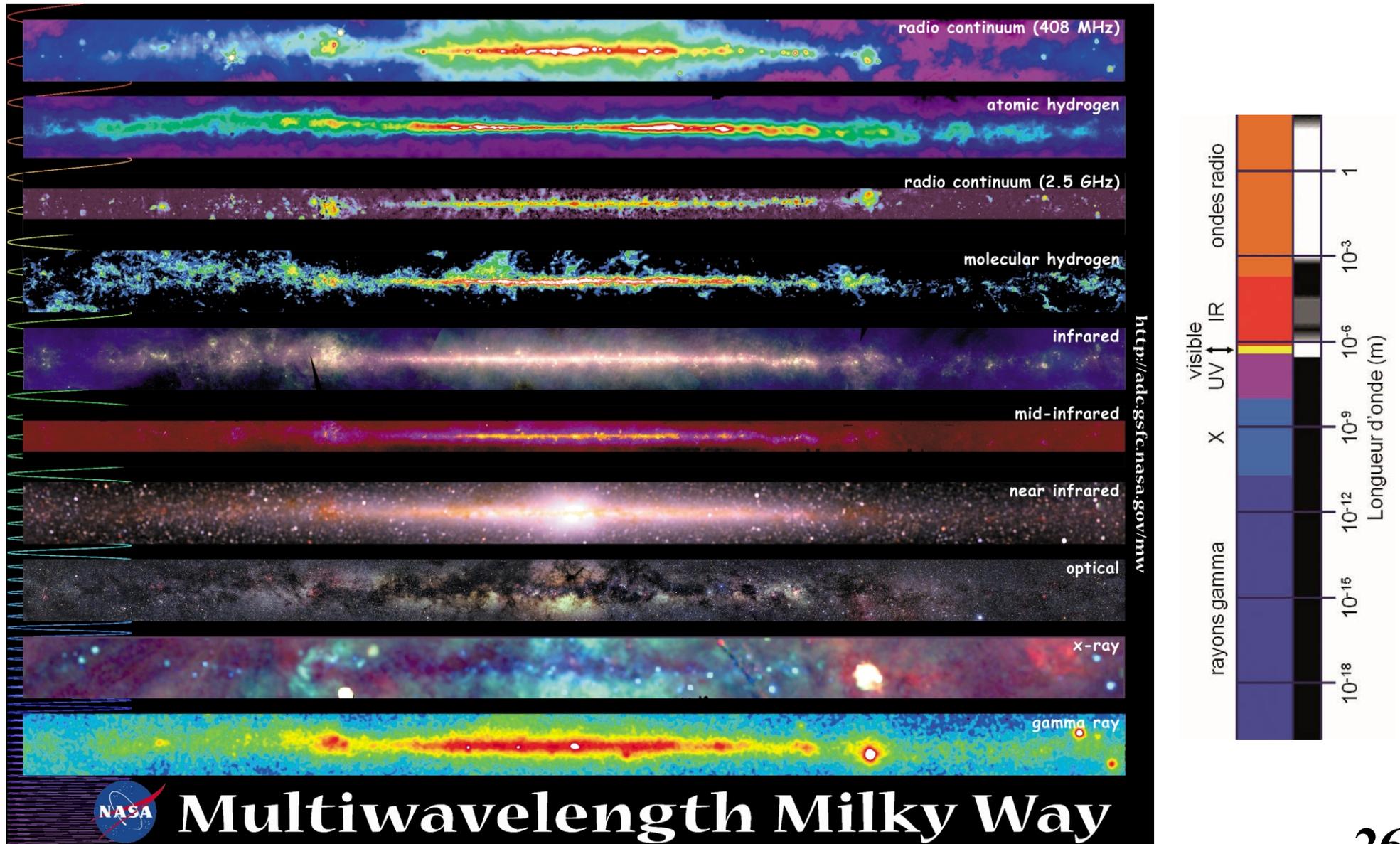


- **Le spectre électromagnétique**  
**va bien au-delà du domaine visible**



# Observation multi-longueurs d'ondes

- L'Univers apparait très différent selon la manière dont on le regarde



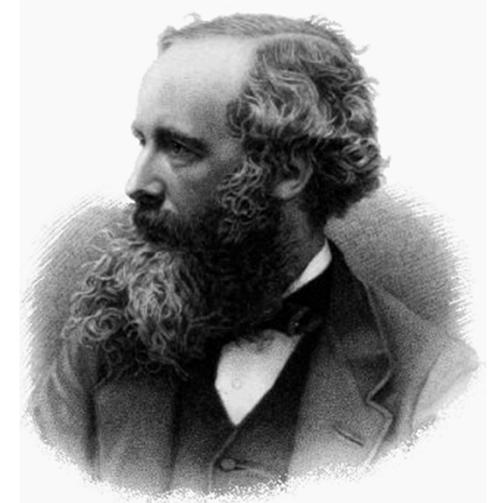
# La lumière

- **Vitesse de la lumière** (dans le vide)  $c = 299\,792\,458$  m/s
- La vitesse de la lumière est **finie**
  - **Voir loin c'est voir dans le passé**
- Unité de longueur adaptée pour **l'infiniment grand**
  - **Une année-lumière  $\approx 9\,461$  milliards de kilomètres !**
- **Quelques distances « typiques »**

|                                  |                     |                                       |                         |
|----------------------------------|---------------------|---------------------------------------|-------------------------|
| <b>Terre-Lune</b>                | 1,3 seconde-lumière | <b>Distance étoile la plus proche</b> | 4,3 années-lumière      |
| <b>Terre-Soleil</b>              | 8 minutes-lumière   | <b>Taille de la Voie Lactée</b>       | 100 000 années-lumière  |
| <b>Taille du système solaire</b> | 1 jour-lumière      | <b>Âge de l'Univers</b>               | 13,7 milliards d'années |

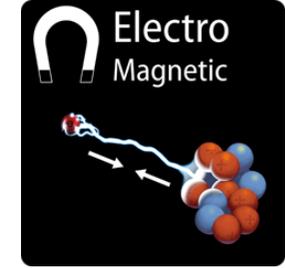
# L'électromagnétisme

- **James Clerk Maxwell** (1864) : « La convergence des résultats semblent montrer que lumière et magnétisme sont deux facettes d'une même substance et que la lumière est une perturbation électromagnétique qui se propage dans le champ selon les lois de l'électromagnétisme »



- **L'électricité et le magnétisme sont un seul et même phénomène dont les manifestations sont différentes**
- Les champs se propagent dans l'espace, sous forme d'ondes, et à la vitesse de la lumière, constante.
- Fondations de la **physique moderne**, de **l'ingénierie électrique**, de **l'astronomie**, des **communications radio**, de **la télévision...**
- **Einstein** parlant des travaux de **Maxwell** : « [Ce sont] les plus profonds et les plus fertiles en physique depuis l'époque de **Newton** »

# Électromagnétisme



- **Electrostatique**
- **Magnétisme** – dû au mouvement des charges électriques
- **Particule médiatrice** : le **photon** de **masse nulle**
- **Force répulsive** ou **attractive** selon que les charges sont ou non de même signe  
→ Bien que sa portée soit en principe infinie – force  $\propto 1 / (\text{distance})^2$ ,  
le **phénomène d'écrantage** la limite le plus souvent en pratique
  - **Exemple** : **dans 2 litres d'eau** « neutres » on trouve  $\sim 10^8$  C de charges négatives  
et autant de charges positives : les charges se compensent exactement  
→ Deux corps chargés ainsi et placés à un mètre de distance  
créeraient une force  $\sim$  au poids de la Terre pesée sur une autre Terre
- Cas de l'atome d'hydrogène dans l'état fondamental :  $F_{EM} / F_{Grav} \approx 10^{39}$  !!!
- **Gouverne les échelles atomiques et humaines**
  - Liaisons électrons – noyaux
  - Les structures ioniques (NaCl)
  - Les liaisons chimiques entre atomes d'une molécule
  - L'attraction entre les molécules d'un solide

# La mécanique céleste

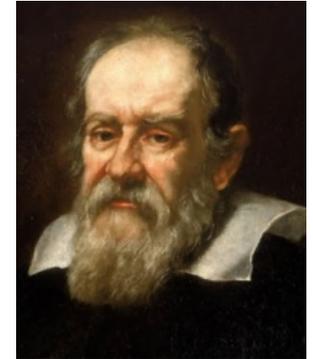
- Modèle **géocentrique** du système solaire (II<sup>ème</sup> siècle de notre ère) de **Ptolémée**
  - La Terre est au centre
  - Tous les « astres voyageurs » orbitent autour d'elle **selon des empilements complexes de sphères**



- Première remise en cause sérieuse : le modèle **héliocentrique** de **Copernic** (1543)



- **Galilée** : observations en contradiction avec la théorie de **Ptolémée** (1610)

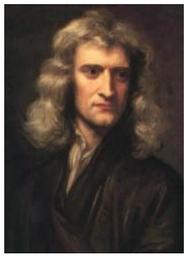


→ L'église catholique l'oblige à abjurer « l'erreur » de **Copernic**

- **Kepler** (1609-1619) : suppose un modèle héliocentrique & des orbites elliptiques



→ Il construit **trois** lois empiriques à partir desquelles il fait des prédictions confirmées par l'observation

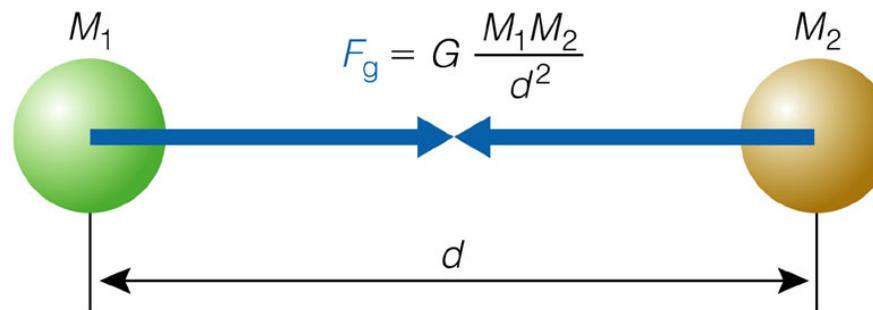


# Le génie de Newton



- **Loi de la Gravitation Universelle** (1687) :

« Deux masses ponctuelles s'attirent selon une force dirigée le long de la ligne les reliant. La force est proportionnelle au produit des deux masses et inversement proportionnelle au carré de la distance qui les séparent. »



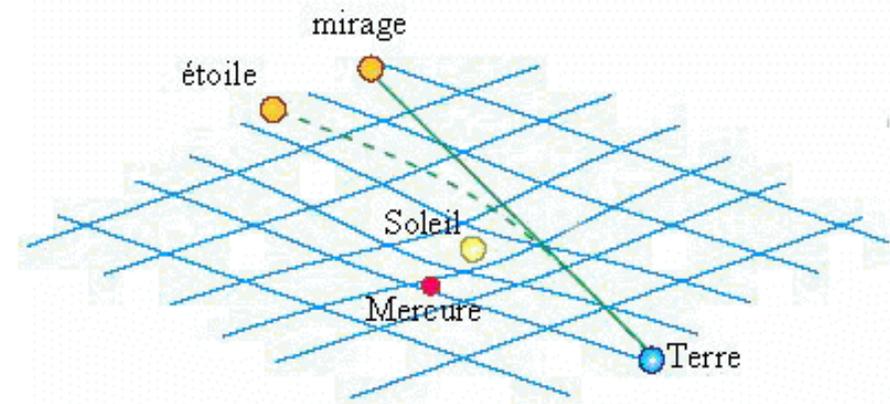
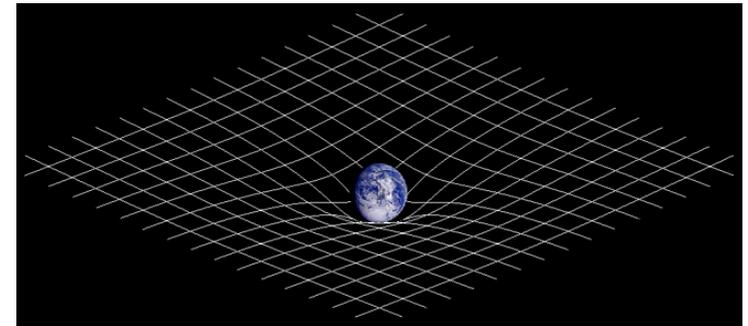
- **Simple** et **élegante**
- Explique les lois de **Kepler**
- Remplace la multitude de sphères nécessaires pour conserver la validité du modèle de **Ptolémée**

Règne sur la mécanique pendant plus de deux siècles

Toujours très utilisée aujourd'hui !

# La Relativité générale

- Einstein 1915-1917
  - Grossman, Hilbert
- Gravitation  $\leftrightarrow$  Courbure de l'espace temps
- Courbure de l'espace temps  $\leftrightarrow$  Densité d'énergie
- Généralisation de la théorie de la gravitation universelle de Newton
  - Explication de phénomènes dont la mécanique newtonienne ne rendait pas compte : avance du périhélie de Mercure, etc.
  - Prédiction de nouveaux effets : expansion de l'Univers, trous noirs, lentille gravitationnelle, etc.
- Jamais mise en échec depuis
  - A la base du **Modèle Standard cosmologique** que nous verrons plus loin
  - Friedman, Lemaître



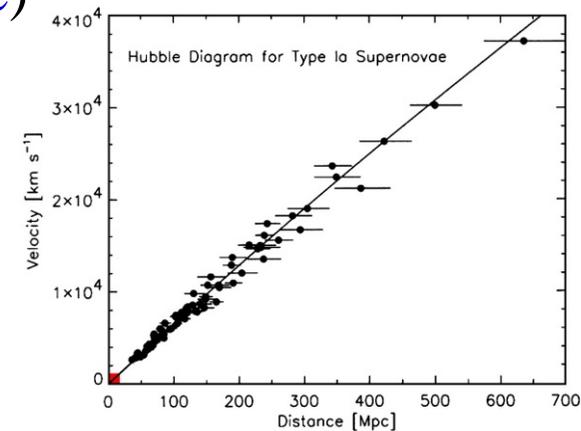
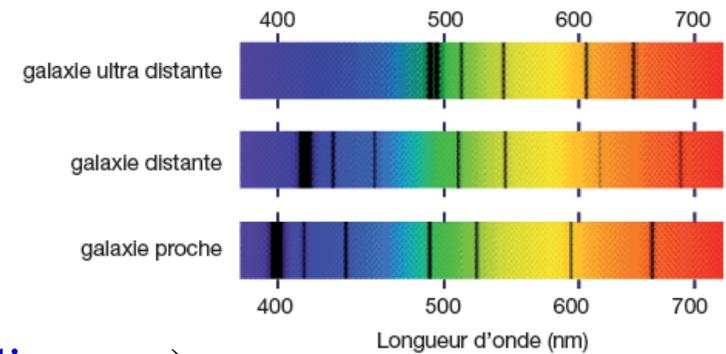
# Gravitation



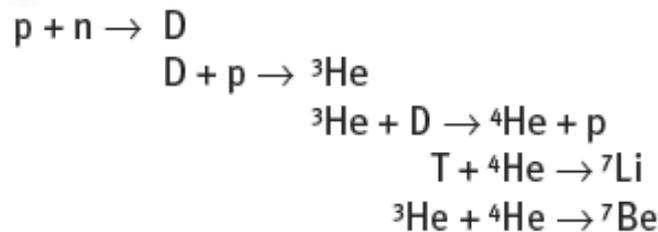
- **Seule force toujours attractive**  
→ Impossible de l'absorber, de la transformer ou de s'en protéger
- Force  $\propto 1 / (\text{distance})^2$  : **portée (vraiment) infinie** – pas « d'écrantage »
- Loi de la gravitation universelle (Newton) → Relativité Générale (Einstein)
- **Force extrêmement faible**  
→ Un aimant de frigo retient un clou attiré par la Terre entière !
- **Complètement négligeable à l'échelle des particules élémentaires pour des énergies « normales »**  
→ Importante au niveau de l'énergie de Planck  $E_p = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G}} \approx 10^{19} \text{ GeV}$   
→ Masse, temps ( $\approx 5,4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$ ) et longueur de Planck ( $\approx 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$ )
- **Domine aux échelles astronomiques**
- **Impossibilité de décrire la Relativité Générale et les trois autres interactions (force, faible, électromagnétique) dans un cadre théorique commun**  
→ Particule médiatrice hypothétique : le graviton de masse nulle

# Big-bang et Modèle Standard cosmologique

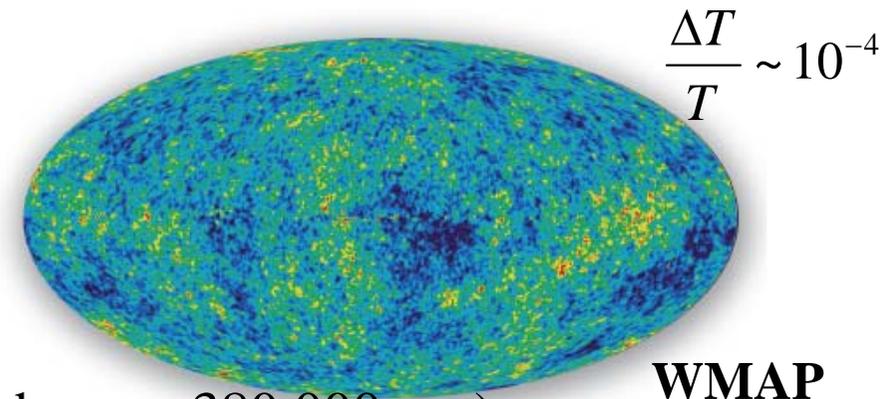
- Force de **gravitation** domine
- **Décalage vers le rouge** des raies spectrales  
 → « fuite » des galaxies d'autant plus rapide que ces dernières sont éloignées (**vitesse  $\propto$  distance**)  
 → **dilatation globale de l'espace-temps**
- **Abondance des éléments légers** créés dans les premières minutes après le Big-bang



| Noyau                  | Hydrogène | Deutérium | Hélium-3  | Hélium-4 | Lithium-7  |
|------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|------------|
| Proportion (en nombre) | 92 %      | $10^{-5}$ | $10^{-5}$ | 8 %      | $10^{-10}$ |

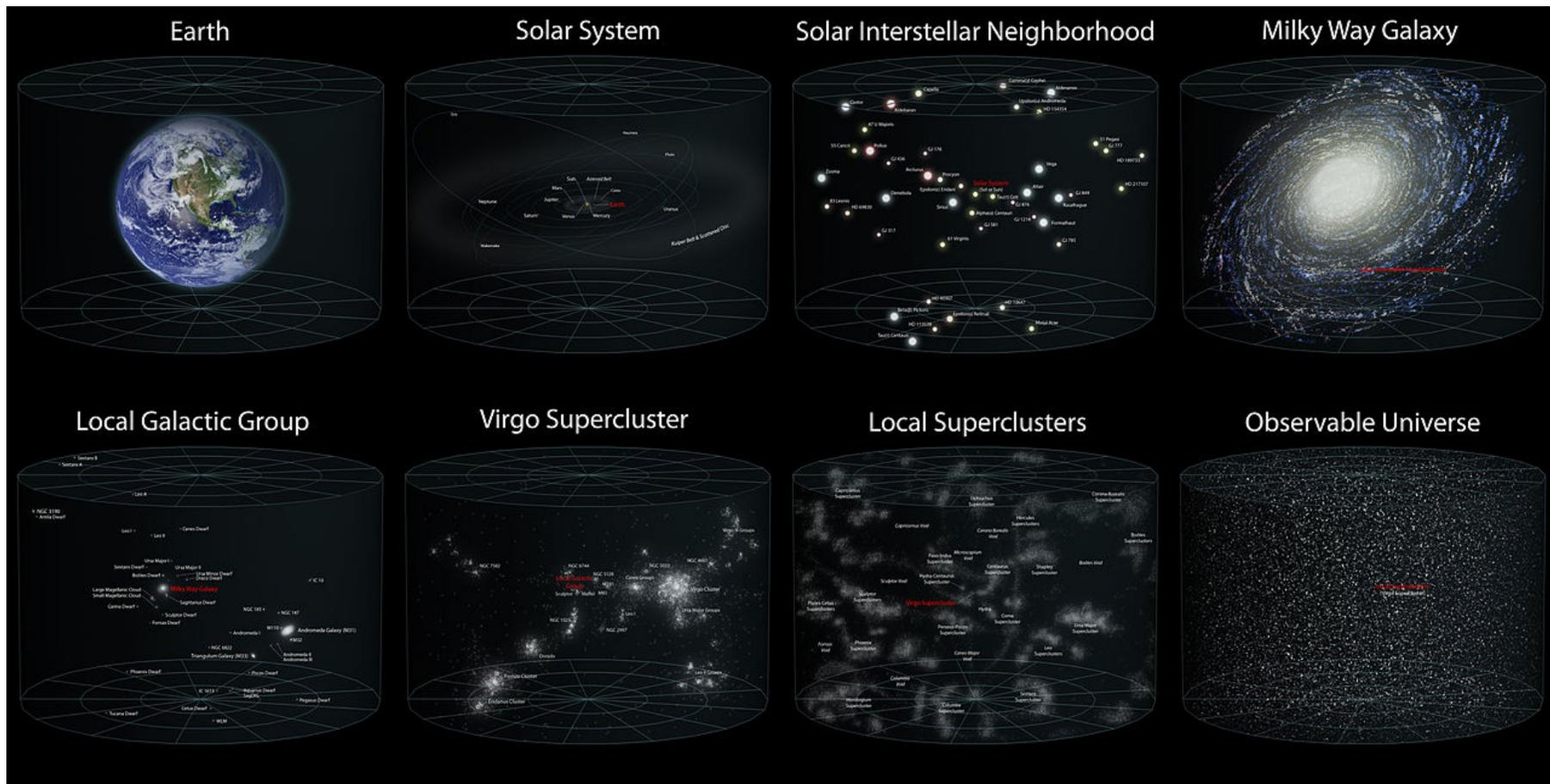


- **Rayonnement de fond cosmologique**  
 → Corps noir à  $\sim 2,7$  K  
 → Photons émis lors de la recombinaison ( $\sim$  Big bang + 380 000 ans)  
 → Isotropie remarquable ; les inhomogénéités annoncent les grandes structures



# Univers homogène et isotrope ?

- **Homogène** : caractéristiques identiques partout
- **Isotrope** : aucune direction privilégiée
- **Vérifié à grande échelle !**
  - Contrairement à « l'Univers environnant » qui lui est franchement inhomogène

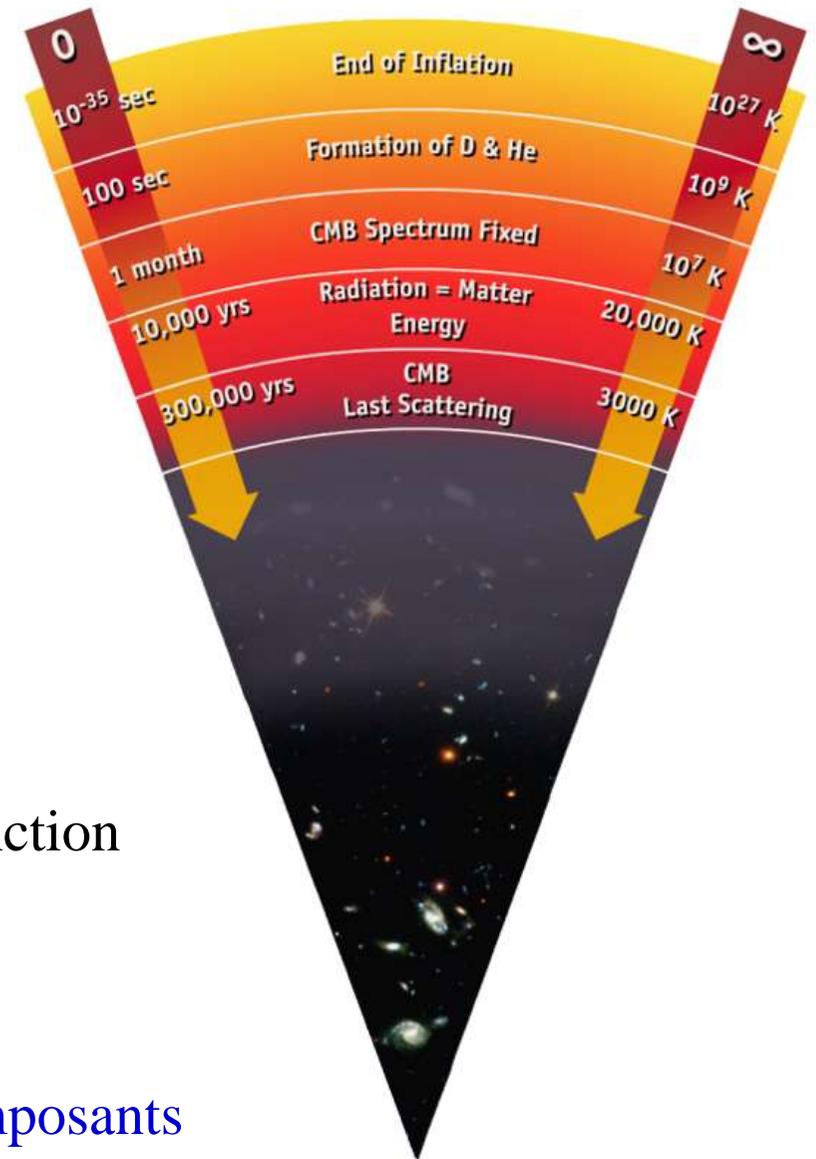




# Le satellite Planck et le rayonnement de fond diffus cosmologique (CMB)

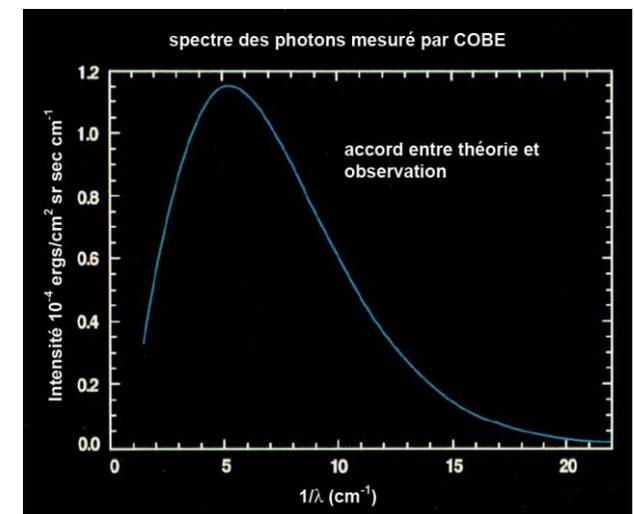
# Le rayonnement de fond cosmologique

- Une conséquence du Big-bang
- Emis lorsque l'Univers est devenu **transparent** après avoir suffisamment refroidi, **~380 000 ans** après le Big-bang
- Prédit à la fin des années **1940**
- Découvert (par hasard !) en **1965**
- On mesure les **anisotropies** de ce rayonnement, c'est-à-dire les variations de sa température en fonction de la direction d'observation
- **Une mesure clef de la cosmologie**
  - Fournit des informations sur l'ensemble des composants du **modèle cosmologique** : plasma primordial, géométrie et évolution de l'Univers, etc.



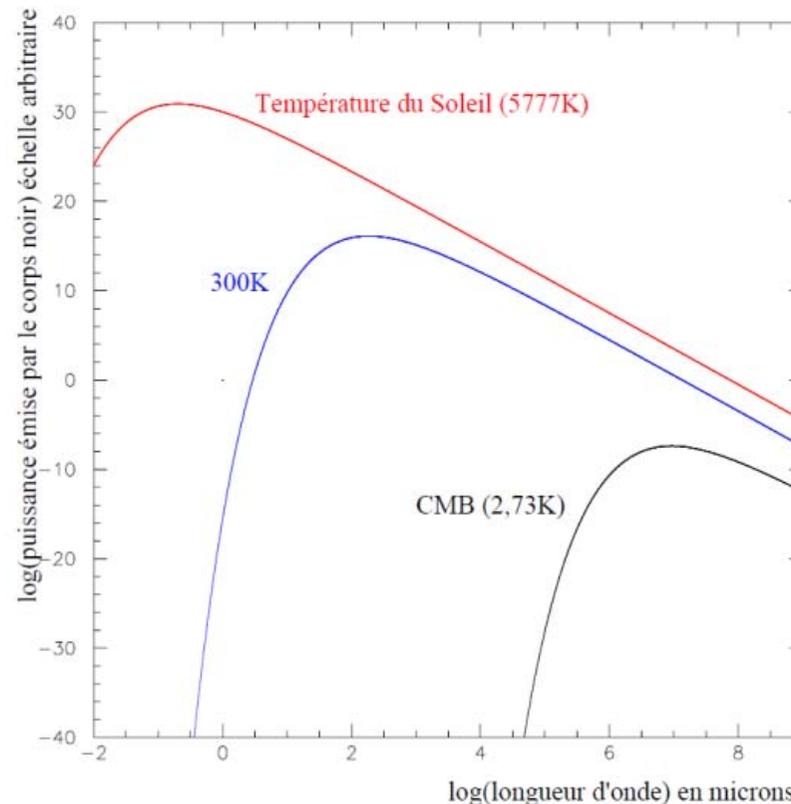
# Température du CMB

- Le CMB est un **rayonnement électromagnétique**, il est composé de **photons**
- **L'énergie d'un photon est proportionnelle à la fréquence du rayonnement, et donc inversement proportionnelle à sa longueur d'onde**
- On peut **traduire une énergie en terme de température équivalente**
  - **Facteur de conversion** :  $k \approx 1,4 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \approx 8.6 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$
- Les photons du CMB ont été émis quand l'Univers avait une température de  $\sim 3000 \text{ K}$ 
  - Depuis l'Univers s'est dilaté d'un facteur  $\sim 1100$   
→ La température des photons CMB est maintenant d'environ **2,7 K**
  - Environ 410 photons du CMB /  $\text{cm}^3$
- **Longueur d'onde de l'ordre du millimètre**
  - **Fréquence de un à quelques centaines de GHz**  
→ **Le « corps noir » le plus pur jamais observé**
- **Rayonnement quasi-uniforme dans toutes les directions**
  - Défi : mesurer ses (minuscules) anisotropies



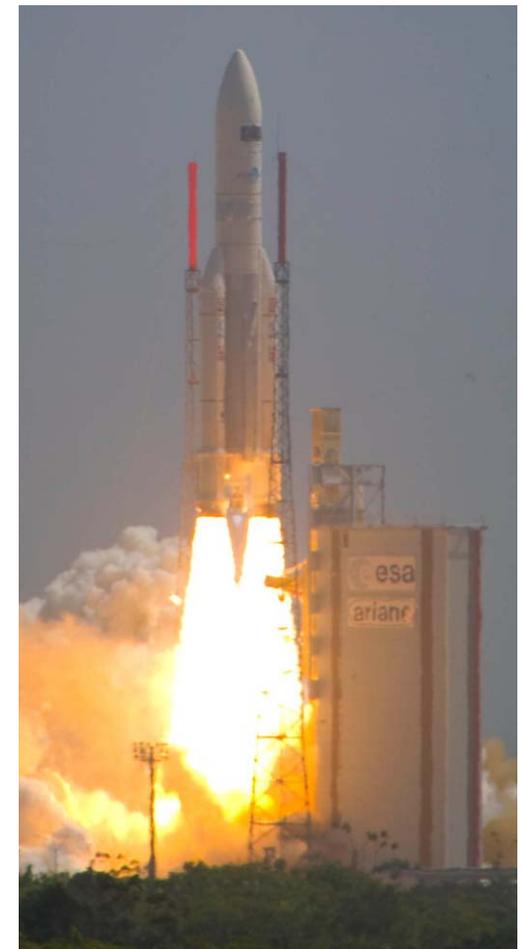
# Corps noir

- Un « corps noir » est un corps idéal qui absorbe tous les rayonnements qu'il reçoit et les réémet en totalité, dans un équilibre qui ne dépend que de sa température
- C'est **Max Planck** qui, dans les années 1900, a déterminé la forme mathématique du **spectre** de ce rayonnement, c'est-à-dire la manière dont l'intensité du rayonnement émis varie avec la fréquence (ou la longueur d'onde) d'émission. Ce spectre ne dépend que d'un paramètre, appelé **température du corps noir**
- Exemple : l'intérieur d'un four
- Plusieurs spectres de corps noir



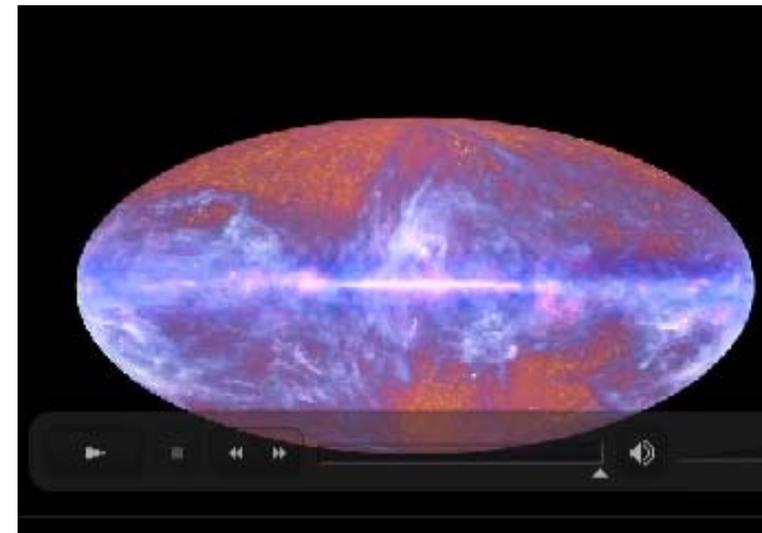
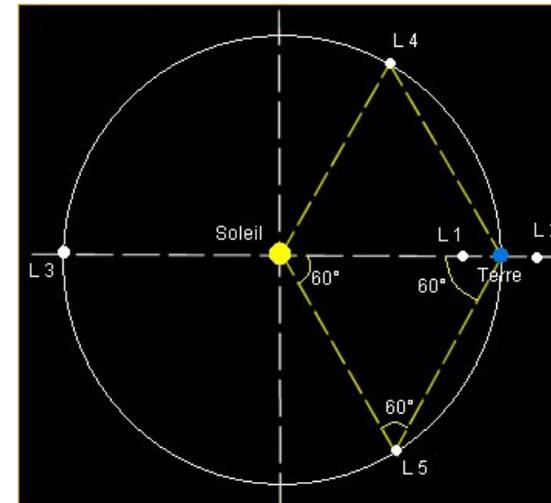
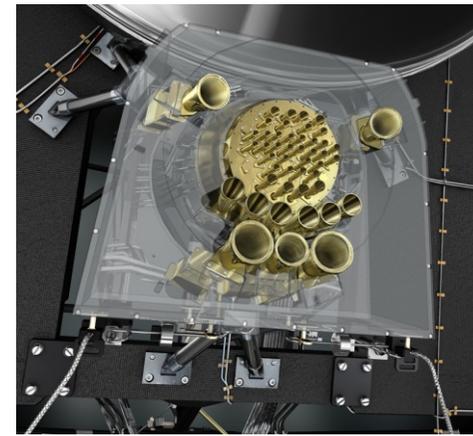
# La mission Planck

- Satellite de l'Agence Spatiale Européenne
  - **Collaboration internationale** dans laquelle la France a joué (joue) un rôle important
- But : balayer le ciel et **cartographier de la manière la plus précise possible les anisotropies du rayonnement de fond diffus cosmologique**
- **3<sup>ème</sup> génération de satellite** : après **COBE** et **WMAP**
  - **Expériences complémentaires** au sol et en ballon sonde
- **Plus de quinze ans de préparation**
- **Lancement par une fusée Ariane 5 le 14 mai 2009** – avec le satellite Herschel
  - **Observations du ciel jusqu'à janvier 2012** – **bien au-delà de la durée prévue**
- **Premiers résultats cosmologiques** (CMB, etc.) **publiés le 21 mars 2013**
  - **Points forts de Planck** : **meilleure précision, sensibilité à d'autres phénomènes**
  - Les résultats publics sont basés sur la moitié des données disponibles
    - D'autres annonces sont prévues dans les prochaines années



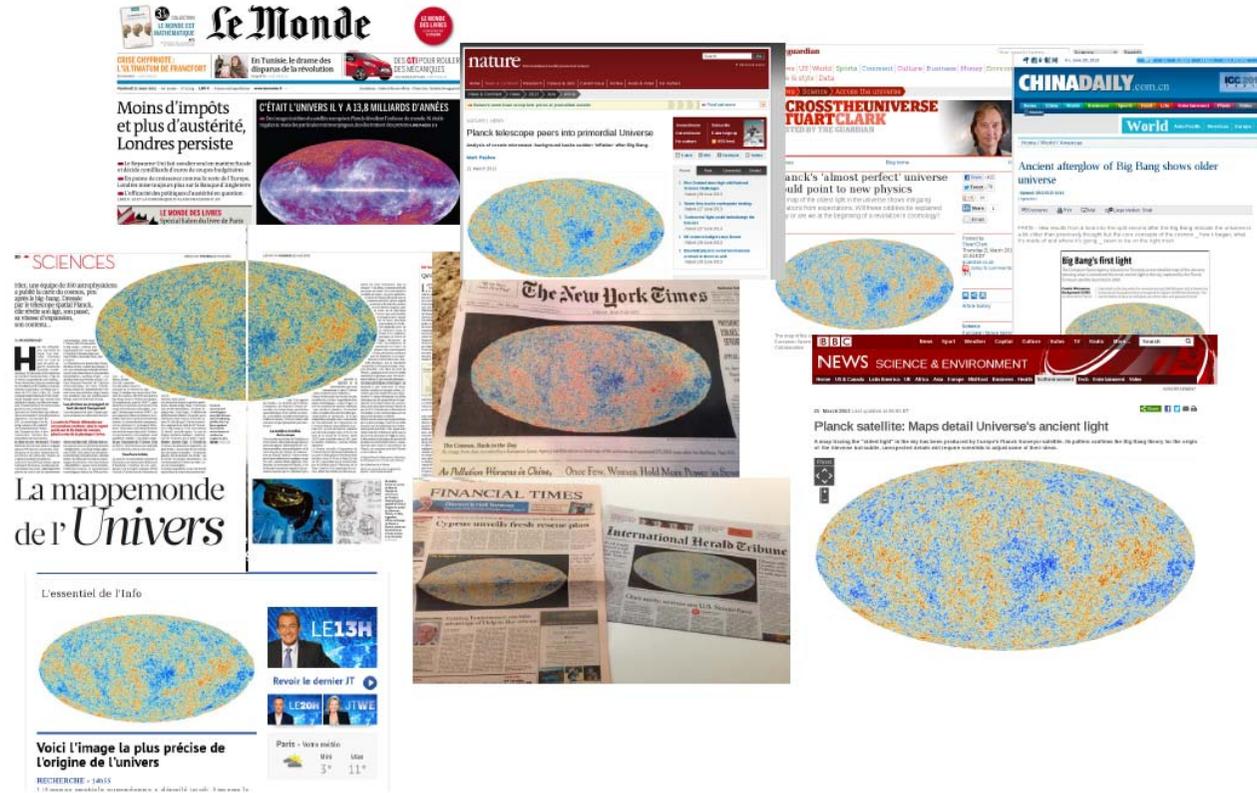
# Le satellite Planck

- **Détecteurs** : des **bolomètres** capables de mesurer le très faible dépôt d'énergie laissé par un photon (par exemple du CMB)
- Système **cryogénique** extrêmement sophistiqué
  - Les bolomètres les plus froids sont à **0,1 K**
- Satellite envoyé au « **point de Lagrange L2** » du système Soleil-Terre
- **Observation du ciel en continu**
  - Un tour par minute
  - Ciel complet couvert en sept mois
  - Environ cinq couvertures complètes du ciel
- **Observation à plusieurs longueurs d'onde**
  - Meilleure séparation du signal CMB d'avec les bruits de fond parasite



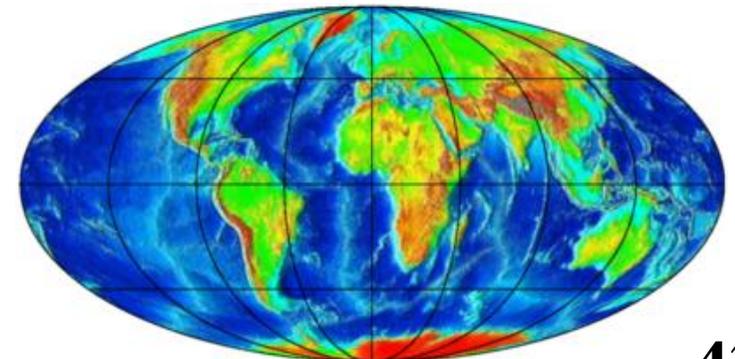
# Résultats cosmologiques : 21 mars 2013

- Information largement reprise dans **les médias**



- **Cartes du ciel « ovales »**

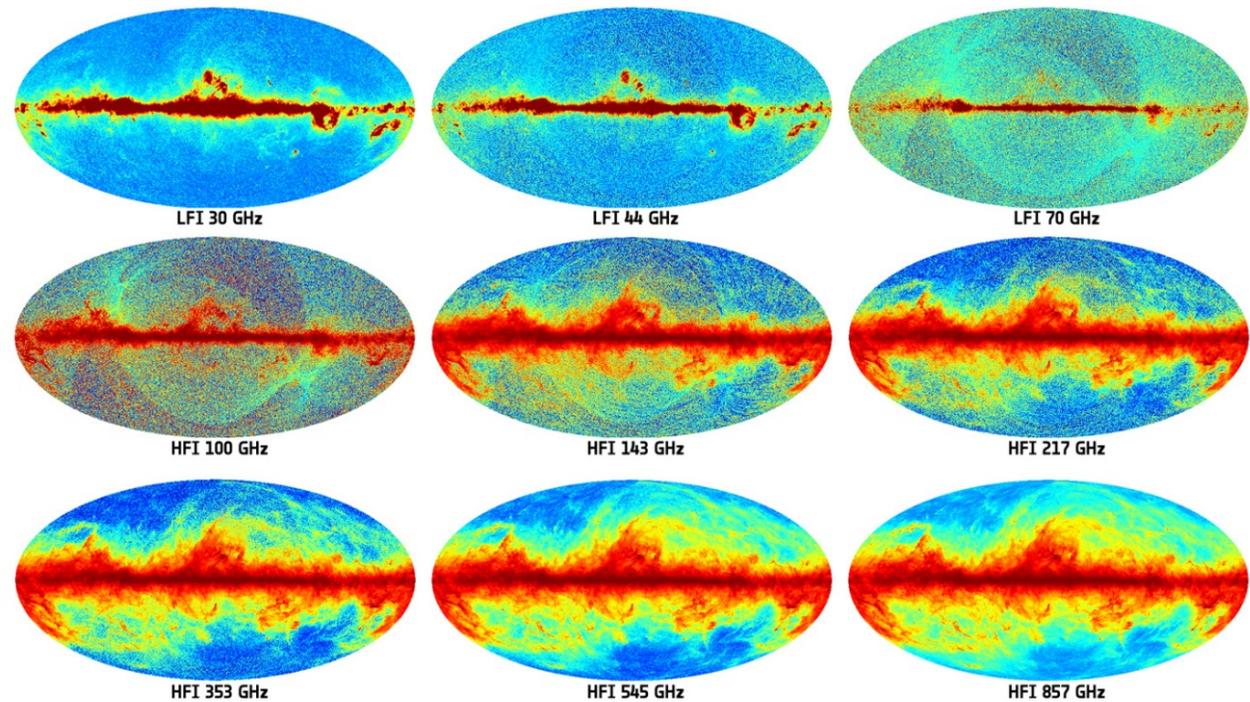
- Voici l'équivalent pour un planisphère terrestre
- La carte inclut toutes les directions possibles
- Chaque direction n'est présente qu'une seule fois



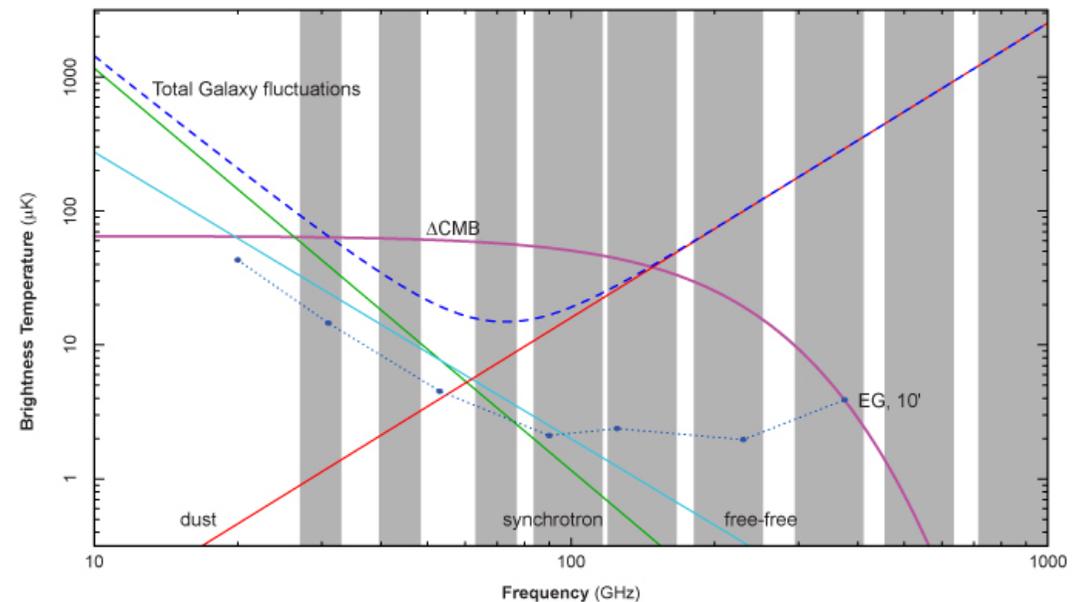
# Le ciel vu par Planck

- Neuf cartes à des fréquences différentes
  - 50 millions de pixels

Planck all-sky foreground maps

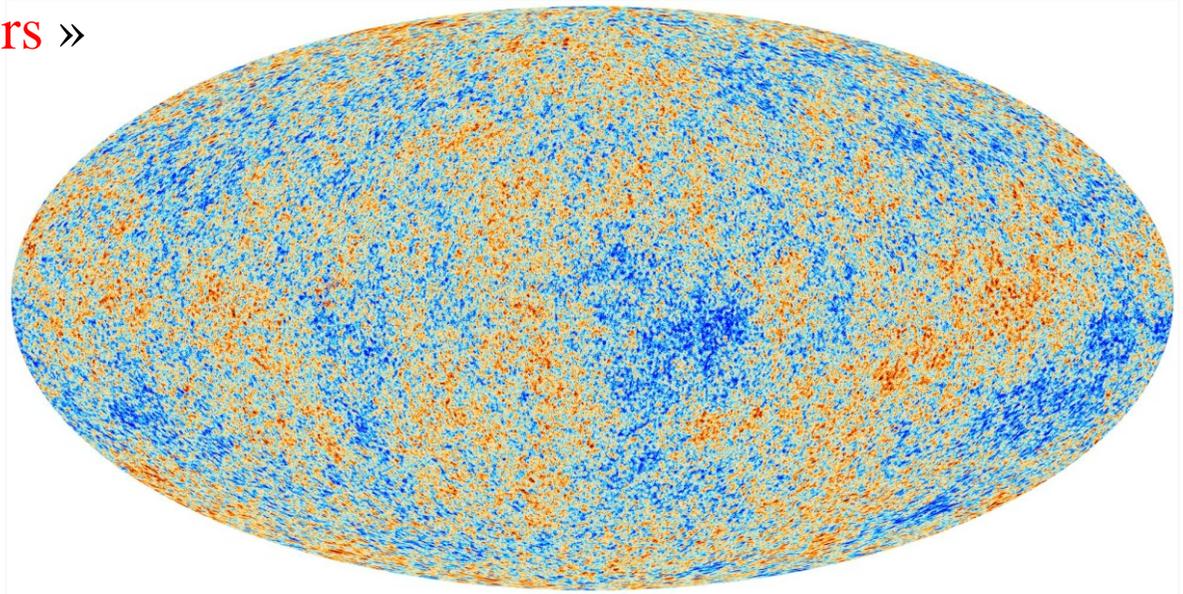


- Contributions du signal et des bruits de fond en fonction de la fréquence
  - Il faut contrôler les sources de bruit de fond pour les séparer du CMB



# Résultats du satellite Planck

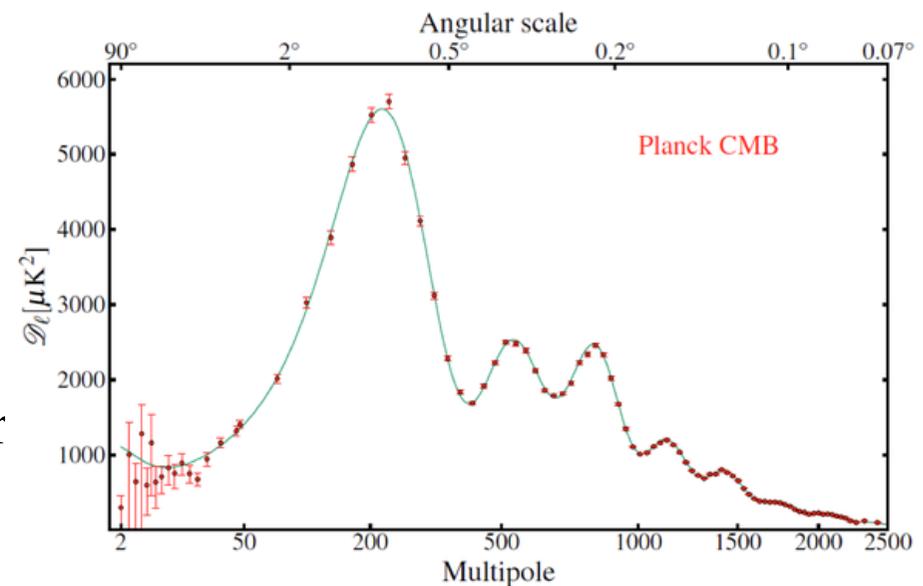
- « La première lumière de l'Univers »



- Traitement mathématique sophistiqué

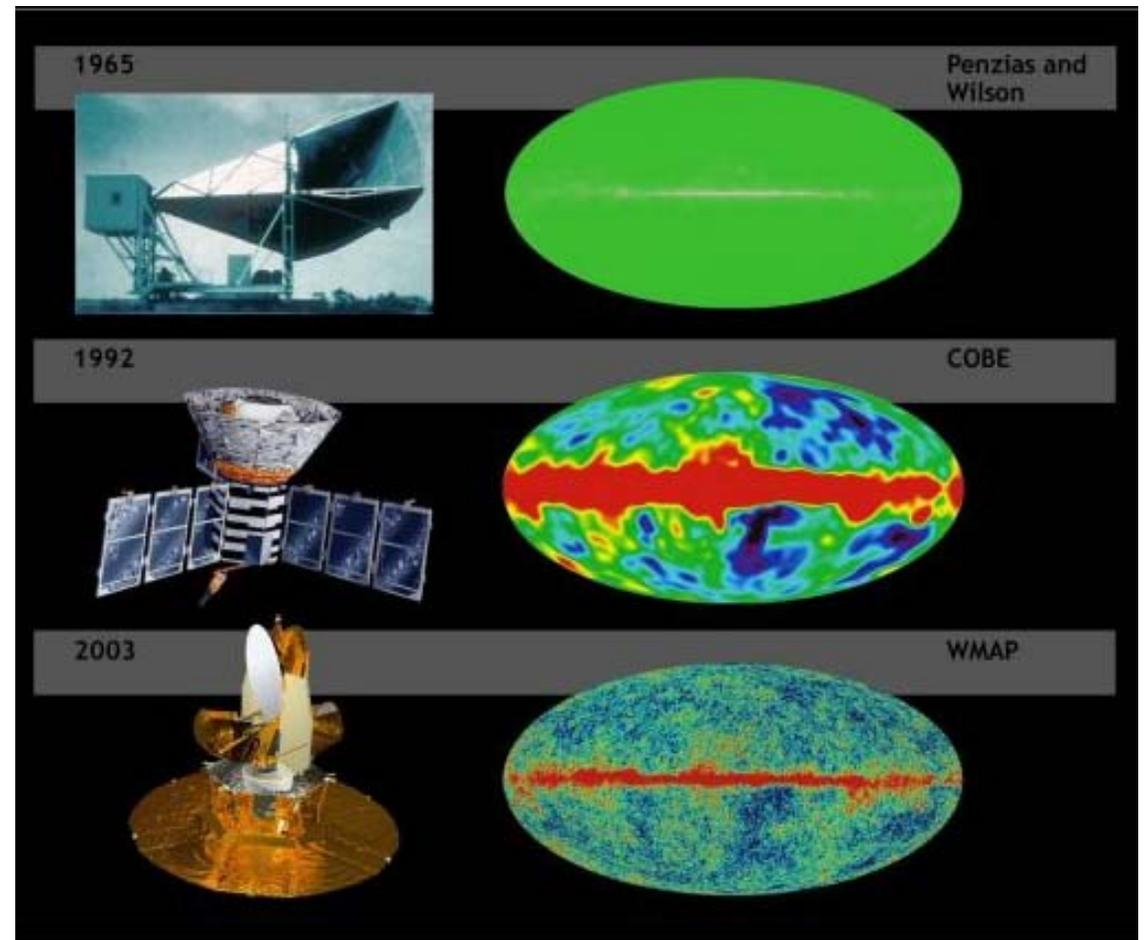
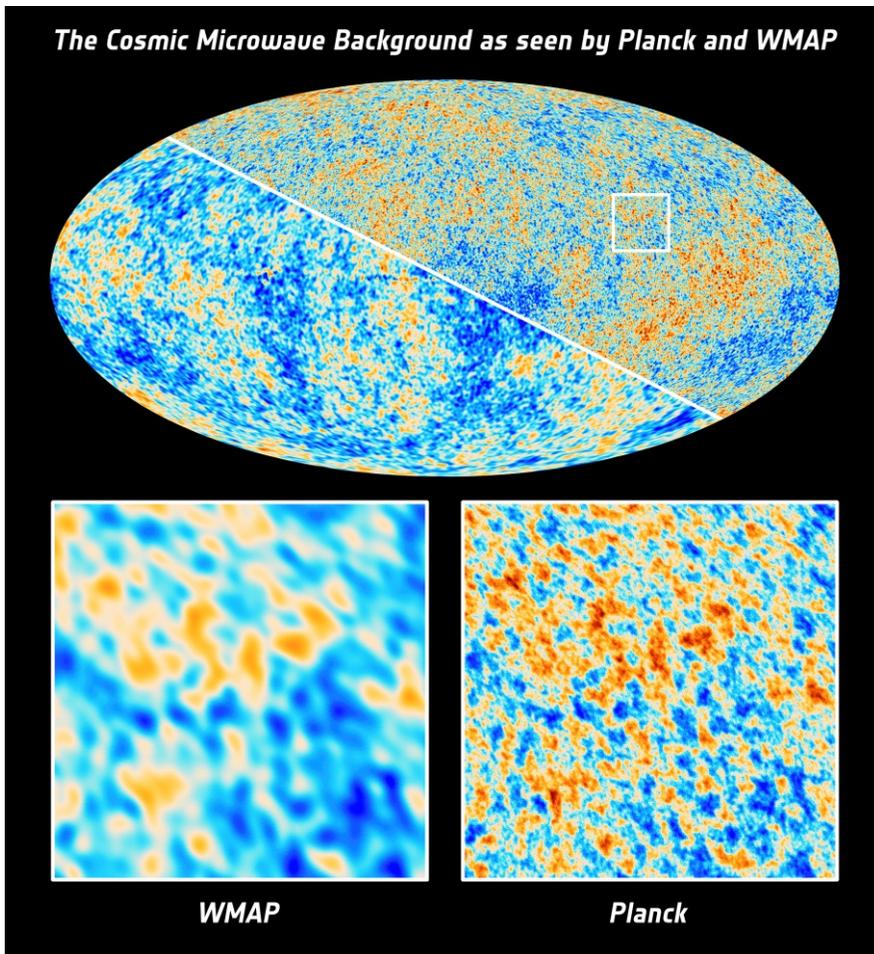
→ « Spectre de puissance »

- 1000 valeurs
- Les points sont les mesures
- La courbe est le résultat d'une procédure technique appelée « ajustement ». On détermine ainsi les valeurs des paramètres libres pour que le modèle « colle » le mieux possible aux données



# 50 ans de progrès dans la mesure du CMB

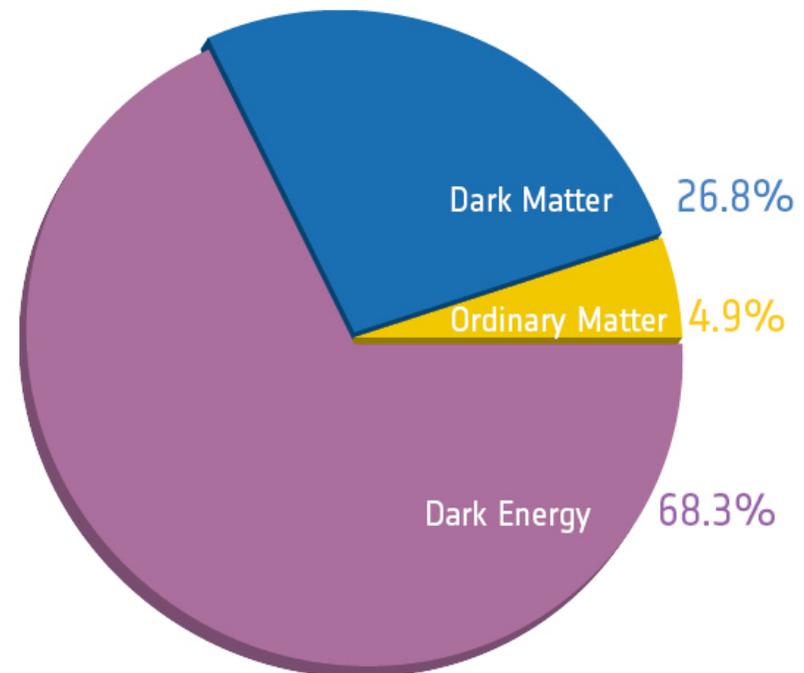
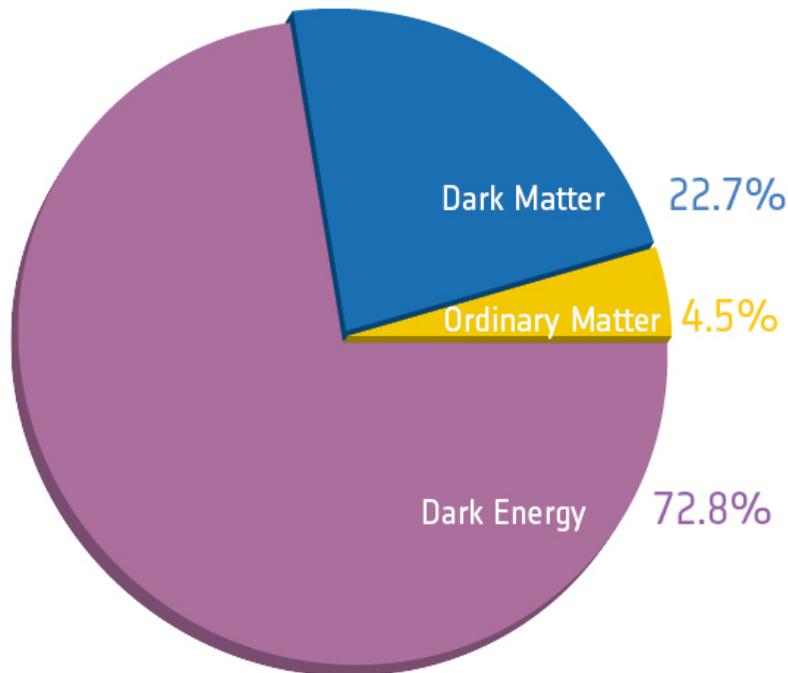
- **Penzias & Wilson** (1965)
- **Satellite COBE** (1992)
- **Satellite WMAP** (2002)
- **Satellite Planck** (2013)

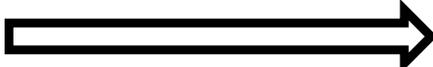


# Interprétation des résultats de Planck

- **Composition de l'Univers**
  - Mesures plus précises

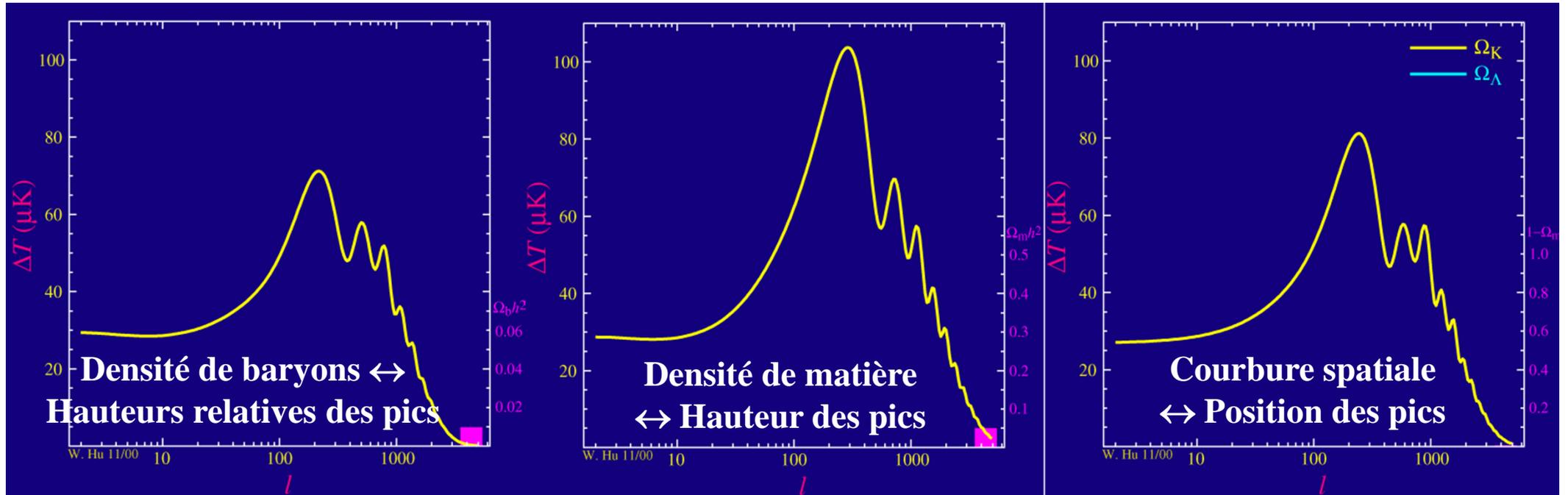
**Matière ordinaire**  
**Matière noire**  
**Energie noire**



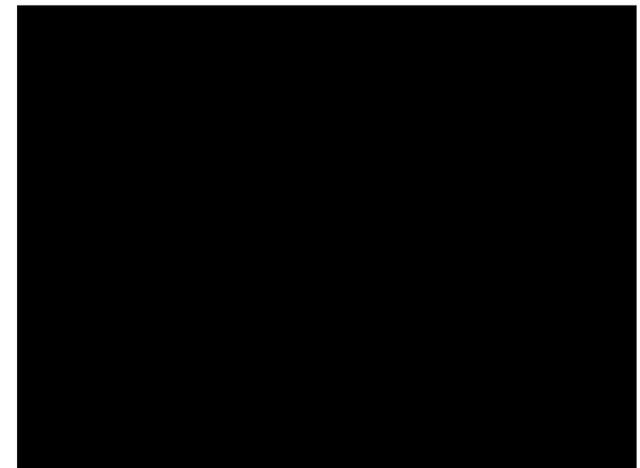
**Avant Planck**  **Après Planck**

# Interprétation des résultats de Planck

- La composition de l'Univers influence la forme du spectre de puissance du CMB



- Densité critique de l'Univers** : quelques protons /  $\text{m}^3$   
 $\rightarrow$  Univers « plat »
- Les fluctuations de densité apparues dans la « jeunesse » de l'Univers conduisent aux grandes structures observées aujourd'hui

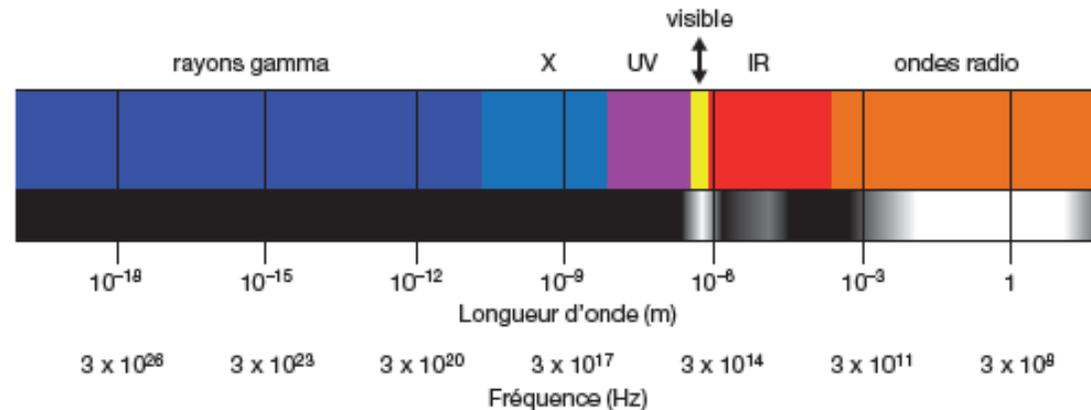




# A la recherche du boson de Higgs

# Les accélérateurs de particules

- Plus on veut sonder la matière aux petites échelles, plus il faut d'énergie  
→ Exemple des ondes électromagnétiques : énergie  $\propto 1 / (\text{longueur d'onde})$



- La plupart des particules sont instables  $\Rightarrow$  elles n'existent pas dans la Nature  
→ Il faut les produire artificiellement  
→ En grande quantité pour obtenir des mesures de qualité  
→ Les accélérer pour leur donner l'énergie souhaitée  
→ Les amener/créer au cœur des détecteurs construits spécialement pour les étudier

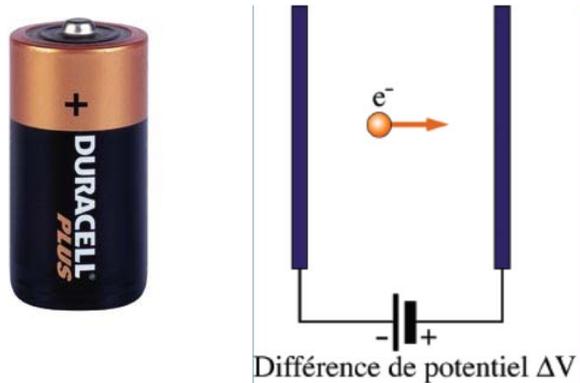
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

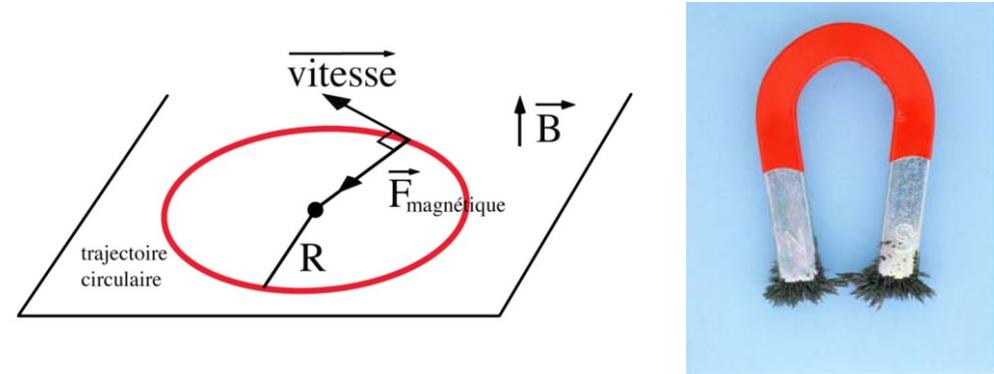
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

# Les accélérateurs de particules

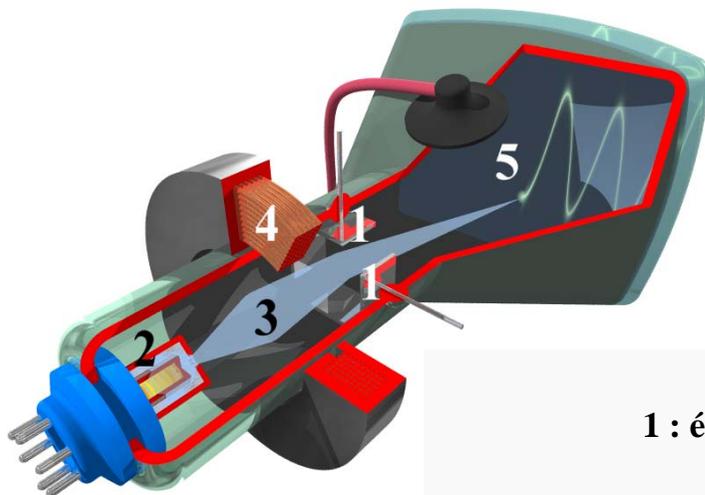
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



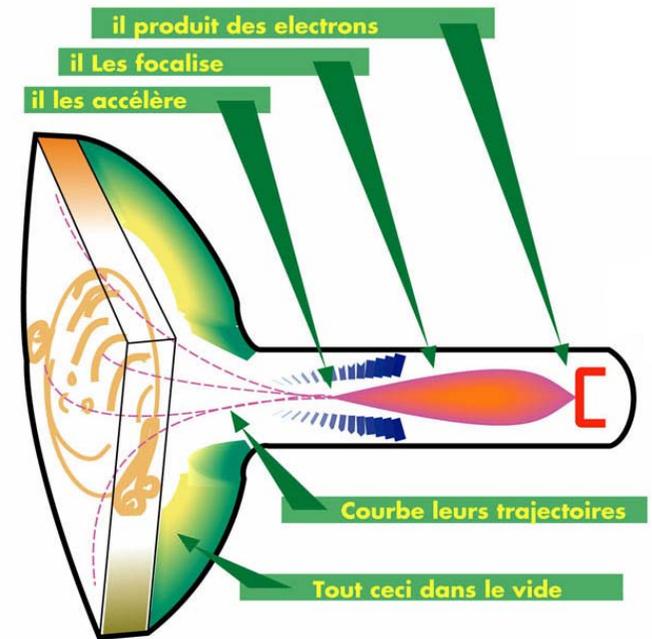
- On les pilote avec des champs magnétiques

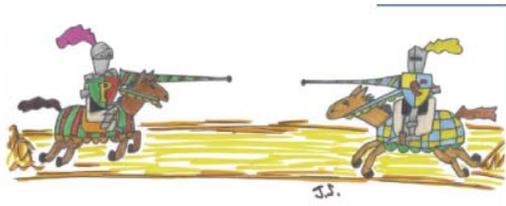


→ Les oscilloscopes et les tubes TV cathodiques sont des accélérateurs !

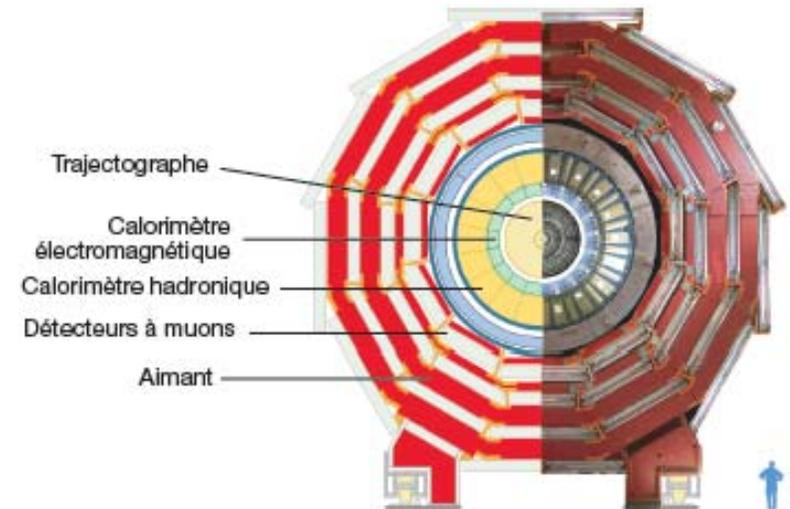
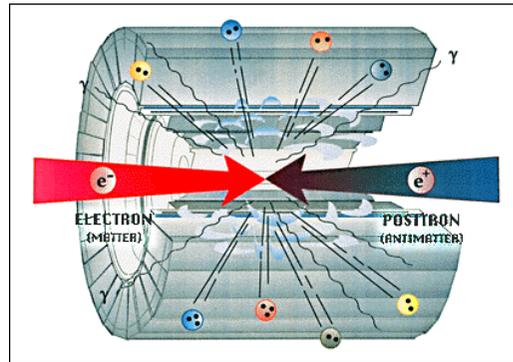
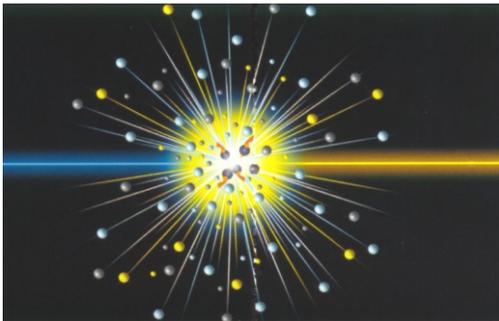
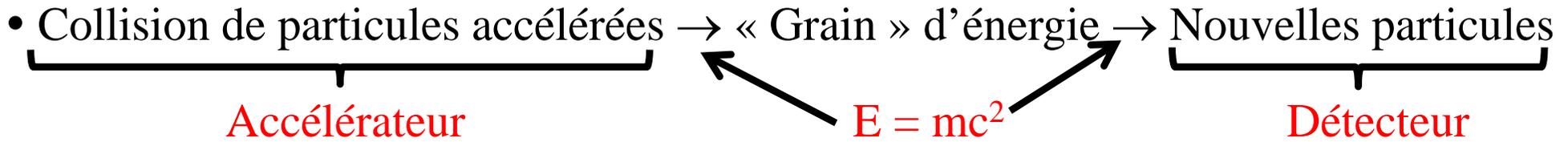
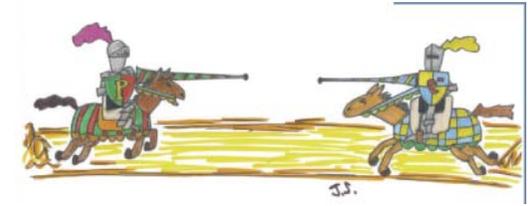


- Tube d'oscilloscope**
- 1 : électrodes déviant le faisceau
  - 2 : canon à électrons
  - 3 : faisceaux d'électrons
  - 4 : bobine pour faire converger le faisceau
  - 5 : face intérieure de l'écran recouverte de phosphore

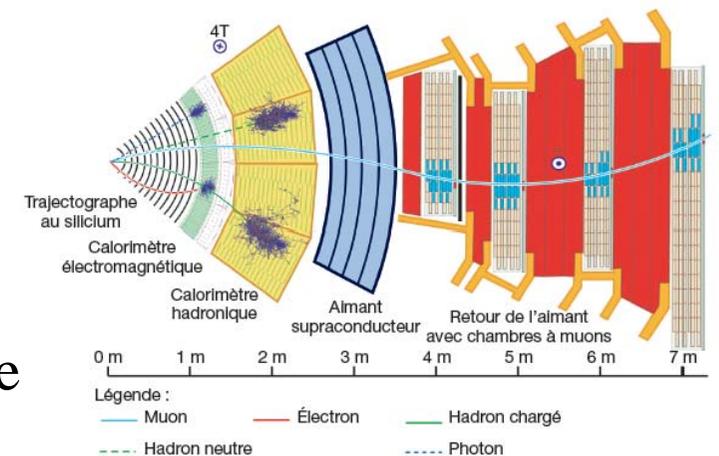




# Les collisionneurs



- **Accélération dans des sections droites**
- **Collisions dans des anneaux circulaires**
  - Taille de la machine « réduite »
  - **Particules produisent des collisions à chaque tour**
  - Les collisions « frontales » permettent d'utiliser au mieux l'énergie disponible
- **Précision d'horlogerie** au-milieu d'une grosse machine
  - Taille de la zone de collision : ~ **cm** (plutôt moins)
  - Taille de l'accélérateur : ~ **km** (plutôt plus)



# Intermède gourmand ...



# Le CERN

- Nom officiel : « **Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire** »

- **Plus grand laboratoire de physique des particules au monde** :

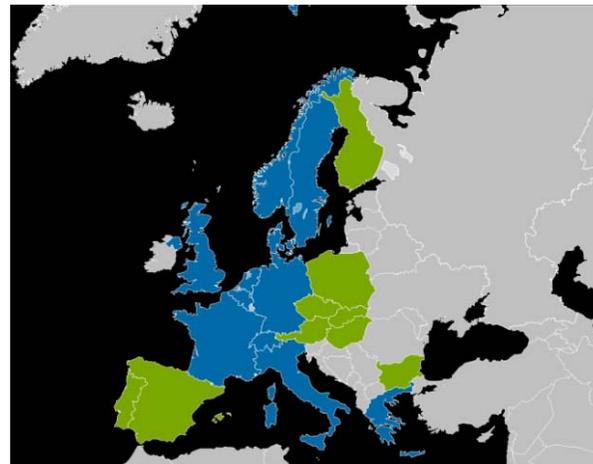
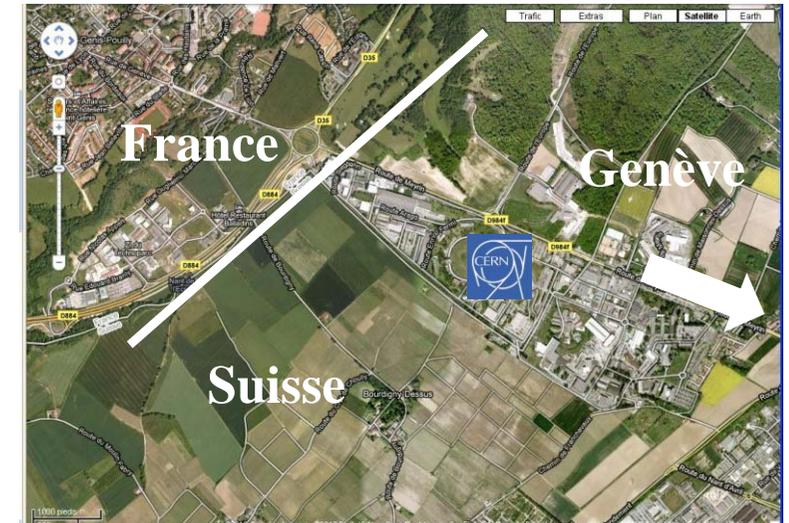
- ~ **3000** employés à plein temps
- ~ **6500** scientifiques y réalisent leurs expériences

- Créé le **29 septembre 1954**

- **Vingt états membres**

+ pays « observateurs »  
ou « participants »

- Le CERN est situé près de Genève, à cheval sur la frontière franco-suisse



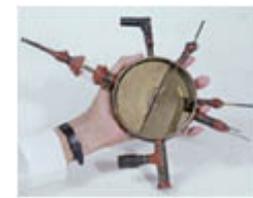
**Pays fondateurs**

**Pays devenus  
membres ensuite**

- **Internet a été inventé au CERN au début des années 1990 !**

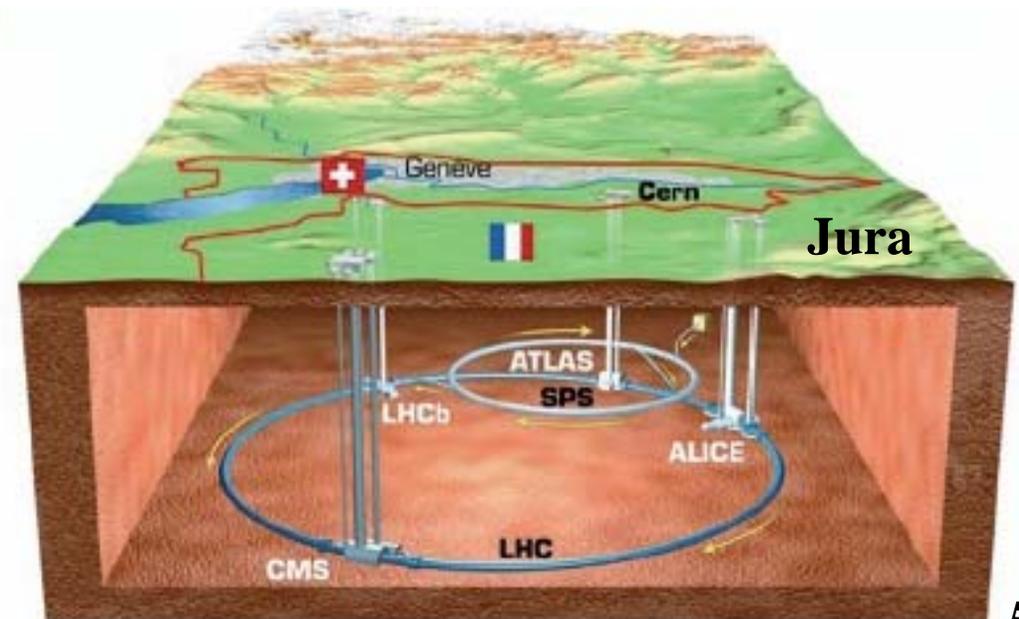


# Le LHC



L'ancêtre :  
Lawrence  
(1930)

- Anneau quasi-circulaire de **~27 km de circonférence** creusé à **~100 m sous terre**
- **2 faisceaux de protons** (ou d'ions Pb selon les périodes ) y circulent en sens opposé
- **Ils se croisent au centre de 4 détecteurs géants** (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) où se produisent les collisions dont les produits sont étudiés par les physiciens
- Les particules sont accélérées par tout une série d'accélérateurs en amont ; la dernière phase de ce processus a lieu dans l'anneau LHC lui-même



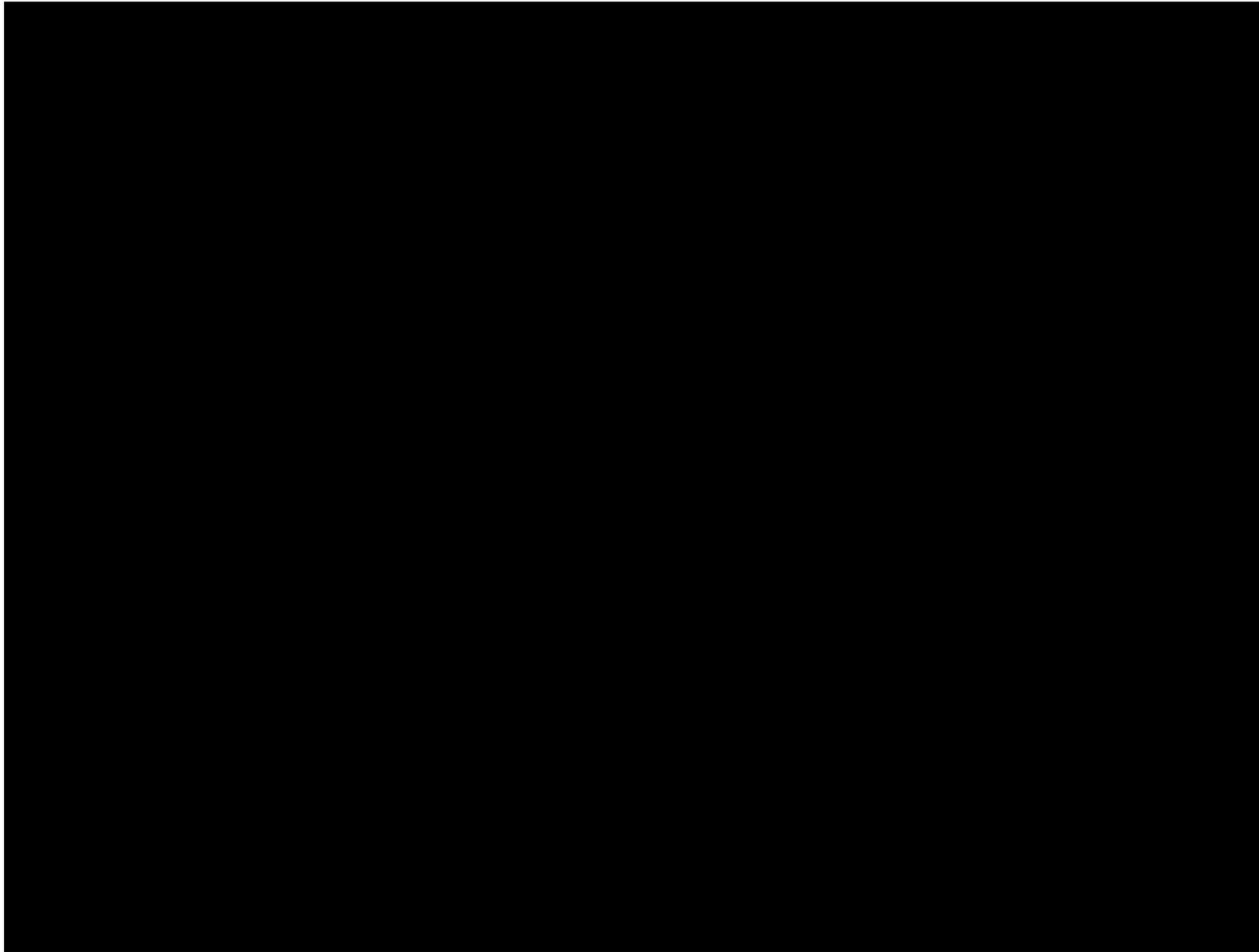
# Le LHC en quelques chiffres

- **Consommation d'électricité** : ~ 400 GWh/an (5% de la consommation de la SNCF)
- Les particules accomplissent **11 000 tours / seconde** à la **vitesse de la lumière**
- La **pression** dans le tube à **vide** est **10 fois inférieure à celle sur la Lune**
- Les **aimants** sont au nombre de **9 300** environ ; ils sont refroidis à **-271,3°C**  
→ **Plus froid que l'espace intersidéral !**

**En fonctionnement nominal** (pas encore atteint) :

- **Les particules se croiseront ~ 40 millions de fois par seconde** dans les détecteurs et chaque interaction produira **~ 20 collisions proton-proton**
- Il y aura **~ 300 000 000 000 000 de protons** en même temps dans le LHC
- **L'énergie stockée** dans le **faisceau** équivaudra à celle de **80 kg** de TNT  
**aimants** **240 kg**
- L'énergie nominale des collisions est **14 TeV** (**8 TeV actuellement**)

# Accélération des particules au LHC

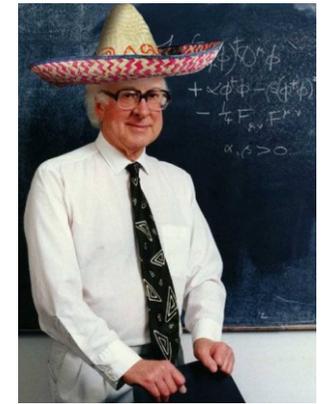


# Un petit tour du côté des détecteurs du LHC

- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
  - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
  - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** ( $\approx$  Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
  - **Les particules déposent de l'énergie en traversant les différents détecteurs ; ces dépôts sont convertis en signaux électriques puis lus**
  - Surfaces/volumes actifs, câbles, alimentations, etc.
- **Volume total de données :  $\sim$  plusieurs Encyclopédia Universalis / seconde**
  - Impossible de tout conserver
  - **Tri en temps réel des événements : drastique et très performant**
- Données stockées et analysées au moyen de **milliers d'ordinateurs** répartis dans des **centaines de centres de calcul du monde entier**
- Chaque collaboration du LHC compte **plusieurs milliers de membres**



# Le boson de Higgs



- **Motivation théorique** au départ :  
« quelque chose » doit donner leur masse aux particules élémentaires
- **Sans ingrédient supplémentaire, la théorie échouerait à décrire la Nature** :  
toutes les particules voyageraient à la vitesse de la lumière !  
→ Une conséquence (parmi d'autres) : elles seraient sans masse ... **Ce qui est faux !**
- **Postulat** : un « champ » (dit de **Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble**) emplirait tout l'espace et interagirait avec les particules  
**interaction**  $\Rightarrow$  **ralentissement**  $\Leftrightarrow$  **masse** (vitesse < vitesse de la lumière)
- Plus une particule ralentit sous l'effet de ce champ, plus elle est massive.
- **Peter Higgs** : si ce mécanisme est vrai, il doit exister une particule « associée »  
→ Le fameux **boson de Higgs**
- **Problème** : le boson de Higgs est la pierre angulaire du **Modèle Standard** mais il n'a pas encore été découvert !!!!!

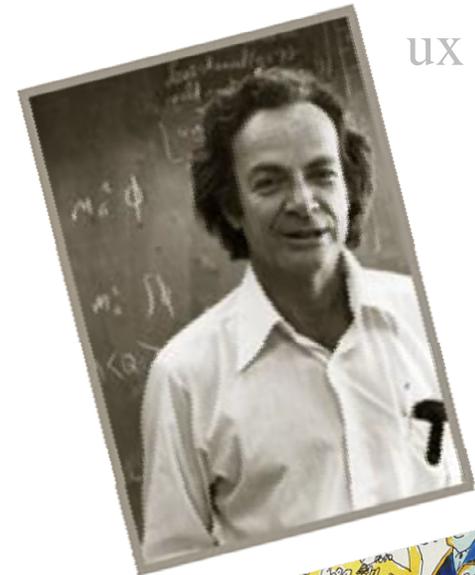
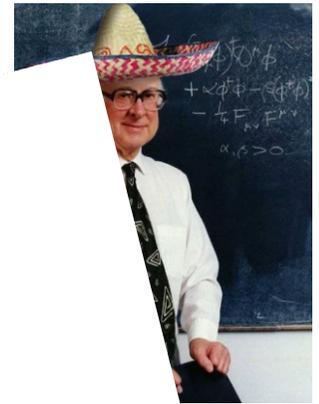


# Le boson de Higgs

- Motivation théorique au départ :  
« quelque chose » doit donner une masse

- Sans innovation, on ne peut pas résoudre le problème
- ▶ **Do you want to be famous?**
- ▶ **Do you want to be a king?**
- ▶ **Do you want more than the nobel prize?**
- **Then solve the mass Problem -**  
**R.P. Feynman**

- Problème de la masse
- Petit problème de la masse
- Problème de la masse

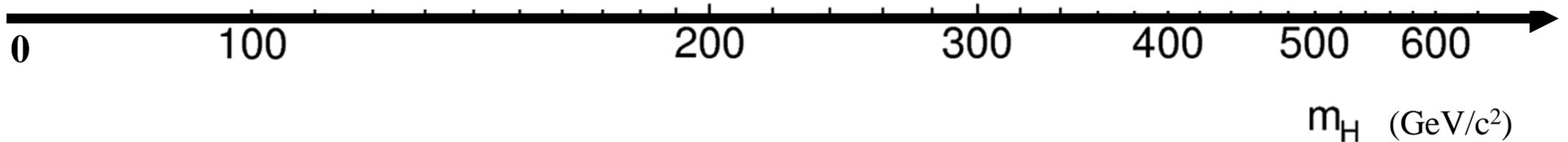


ux !



Le boson de Higgs est la pierre angulaire du Modèle Standard  
mais il n'a pas encore été découvert !!!!

# La chasse au boson de Higgs



- Toutes les propriétés du boson de Higgs sont prédites par la théorie sauf sa masse

- Théorie  $\Rightarrow m_H < 1000 \text{ GeV}/c^2$

Nota bene :  $1 \text{ GeV}/c^2 = 1.8 \times 10^{-25} \text{ kg}$  (en gros la masse d'un proton)

**GeV** = “Giga [ $10^9$ ] électron-Volt”

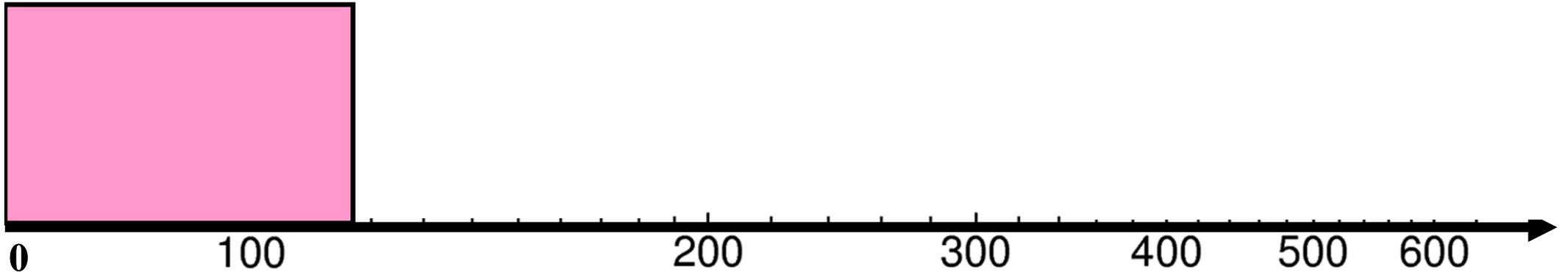
Energie actuelle de collisions au LHC : 8 “Téra [ $10^{12}$ ] électron-Volt” (**TeV**)

- Une poignée de bosons de Higgs créés par minute au LHC
  - Et seule une (très) faible fraction de ces événements sont identifiables

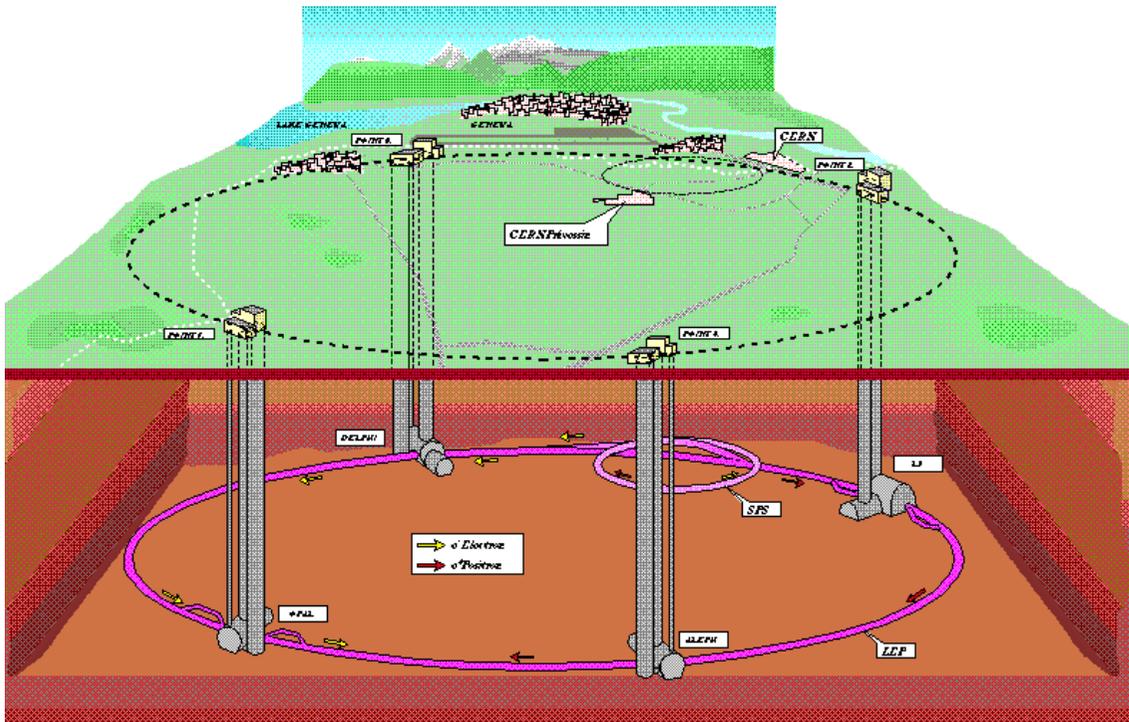
# La chasse au boson de Higgs

LEP

1989-2000

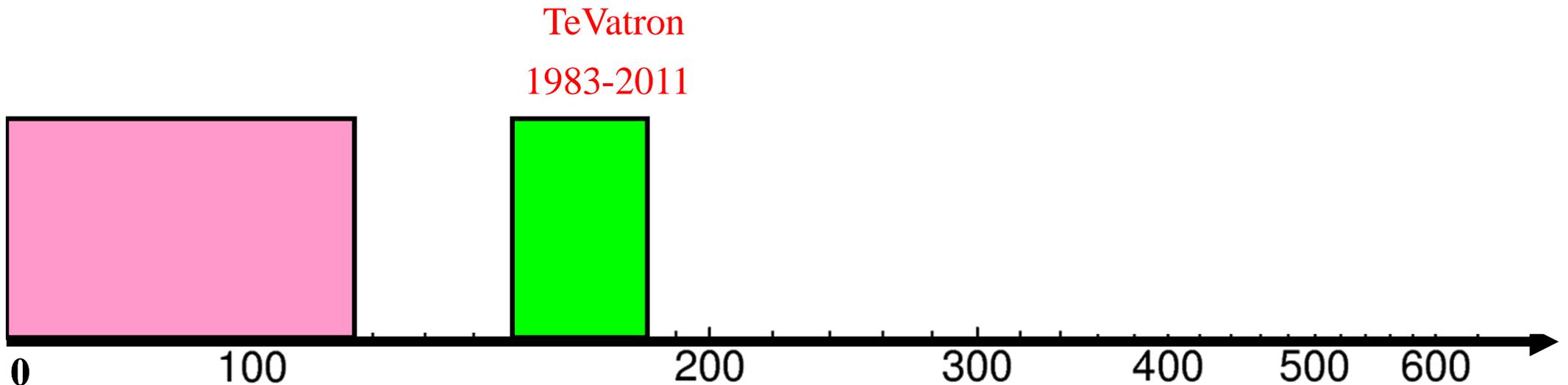


$m_H$  (GeV/c<sup>2</sup>)



Le LEP au CERN  
(près de Genève)

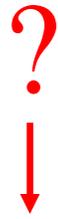
# La chasse au boson de Higgs



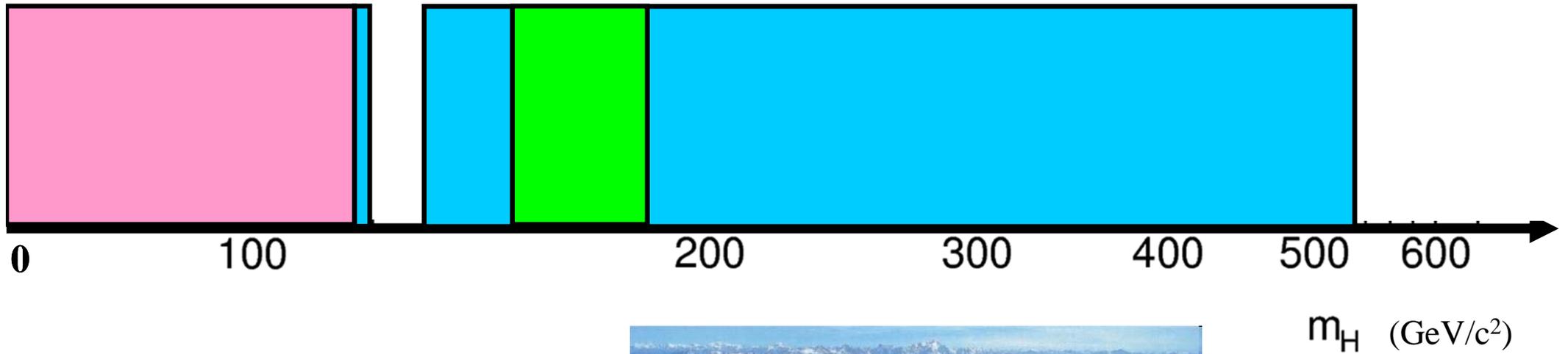
Le TeVatron  
à Fermilab  
(près de Chicago)



# La chasse au boson de Higgs



LHC  
2009-2011

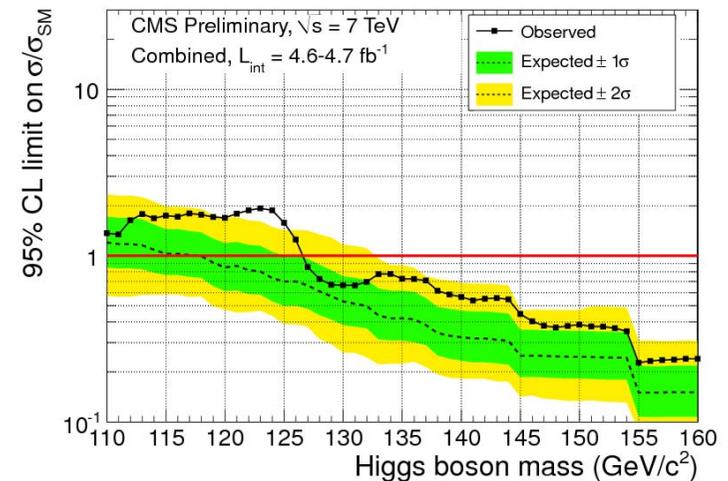
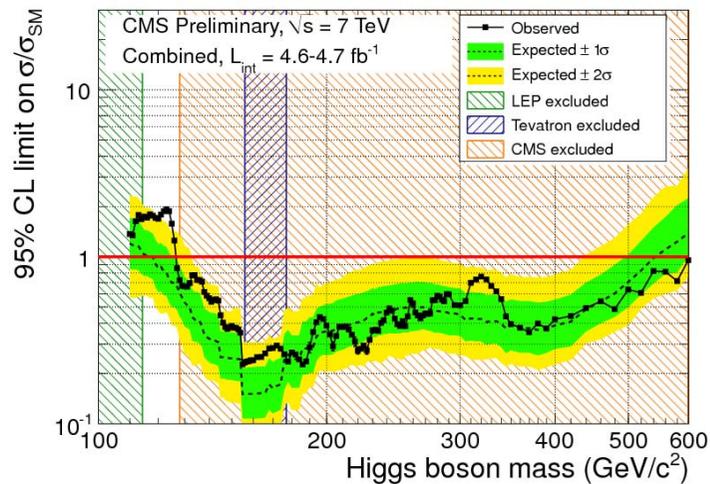


Le LHC au CERN  
(près de Genève)

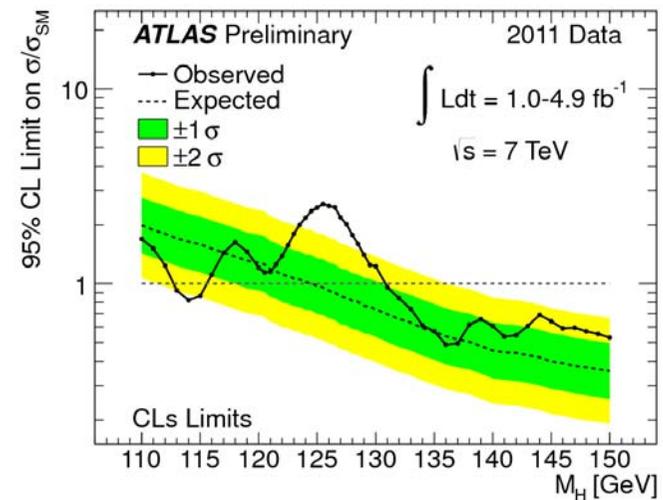
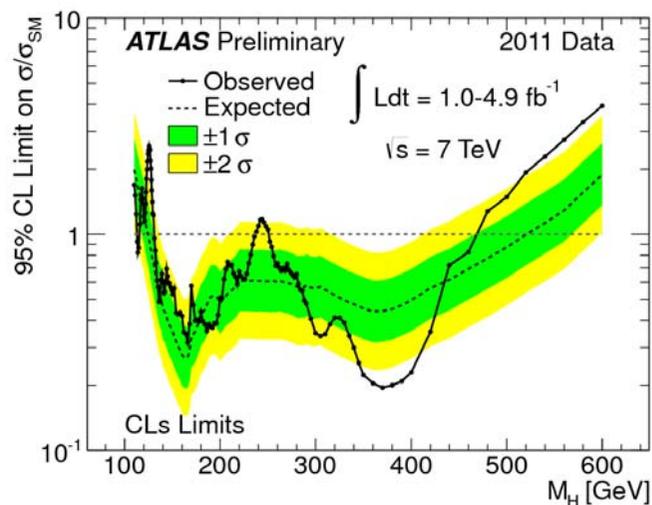


# Résultats en décembre 2011

- Résultats de l'expérience **CMS** sur les données 2011



- Résultats de l'expérience **ATLAS** sur les données 2011



# 4 juillet 2012

- Présentation des nouveaux résultats des expériences ATLAS et CMS  
→ Communiqué de presse : <http://press.web.cern.ch/press/PressReleases/Releases2012/PR17.12F.html>

« Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu »



- C'est l'accélérateur LHC qui a « offert » cette découverte aux expériences !
- Que montrent les données ?
- Et maintenant ?

4 Juillet 2012



# 2013

- 14 mars : mise à jour pour les « conférences d'hiver » des résultats annoncés en 2012
  - Nouveau communiqué de presse :

<http://press.web.cern.ch/fr/press-releases/2013/03/de-nouveaux-resultats-indiquent-que-la-particule-decouverte-au-cern-est-un>

« De nouveaux résultats indiquent que **la**  
particule découverte au CERN est **un** boson de Higgs »

- 8 octobre : l'aboutissement d'une recherche de 49 ans ...



**Le Prix Nobel de Physique 2013** a été décerné à

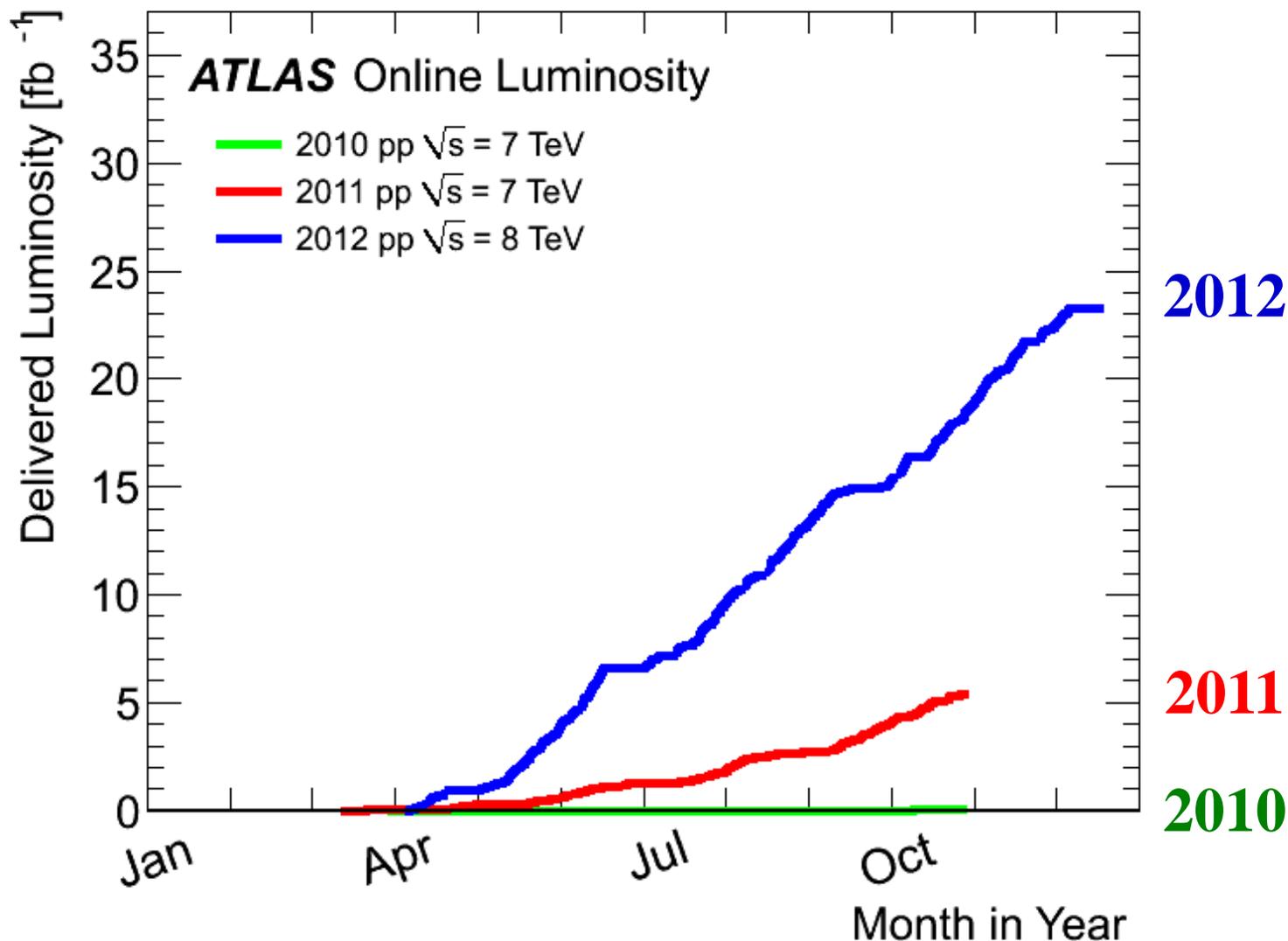
*François Englert et Peter Higgs*



" for the theoretical discovery of a mechanism that  
contributes to our understanding of the origin of mass of  
subatomic particles, and which recently was confirmed through  
the discovery of the predicted fundamental particle, by the  
**ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider** "

# Quantité de données accumulée par ATLAS

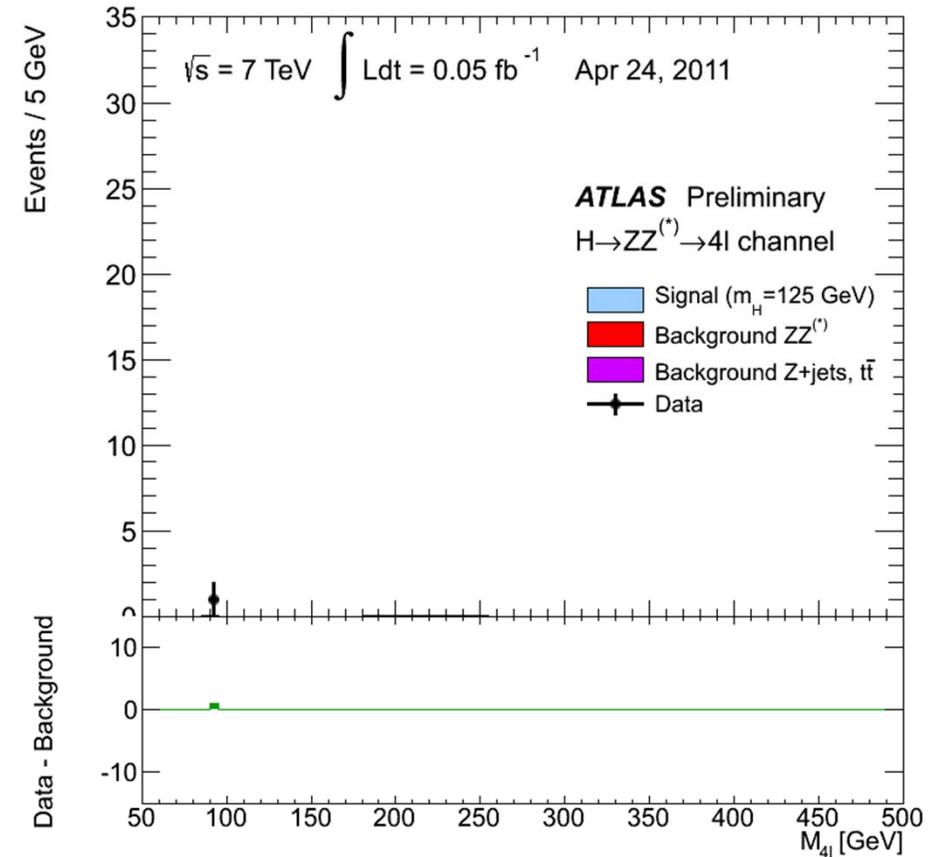
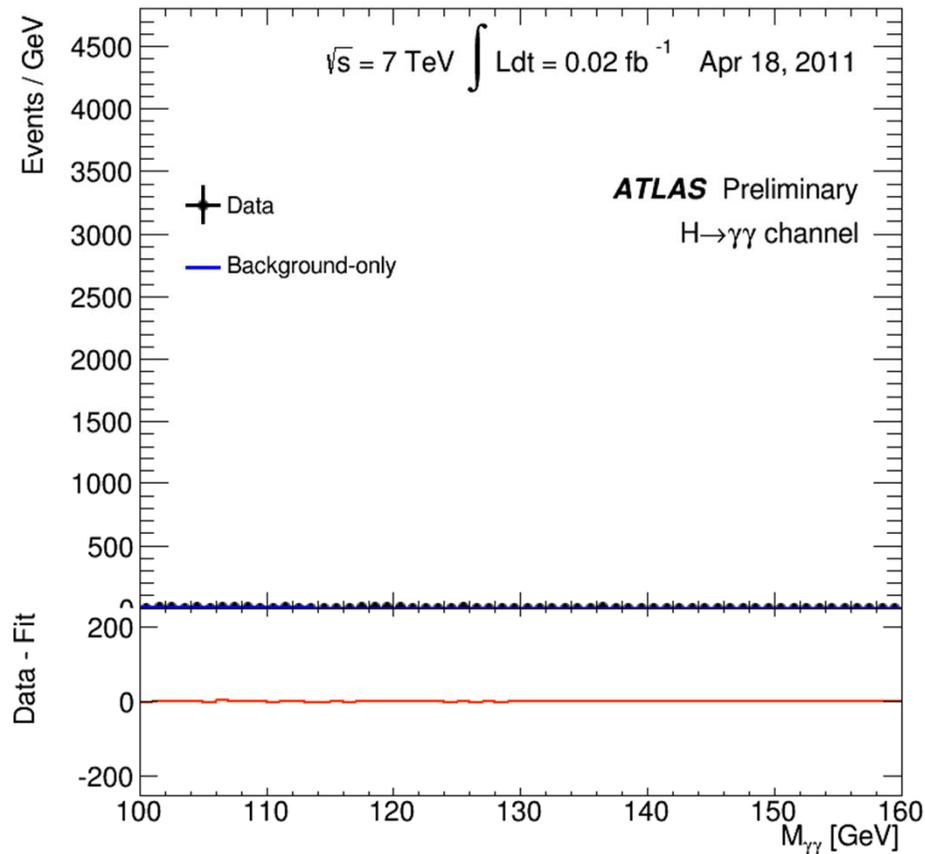
- La « **luminosité** » mesure la quantité de données récoltées par une expérience



- La **précision** d'une mesure dépend de la racine carrée de la statistique accumulée

# La puissance de la statistique à l'œuvre !

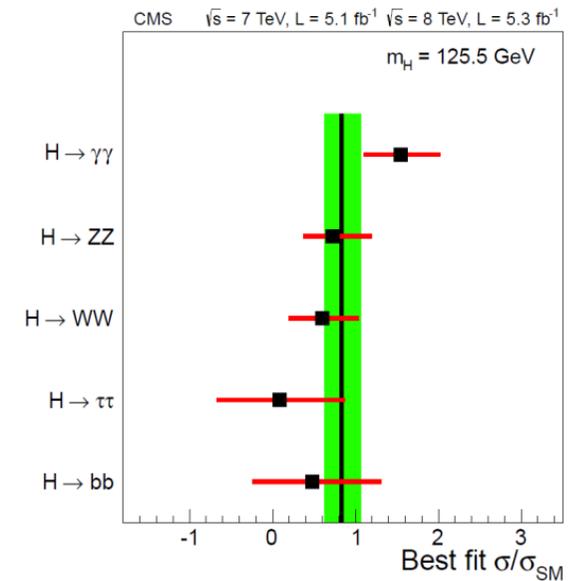
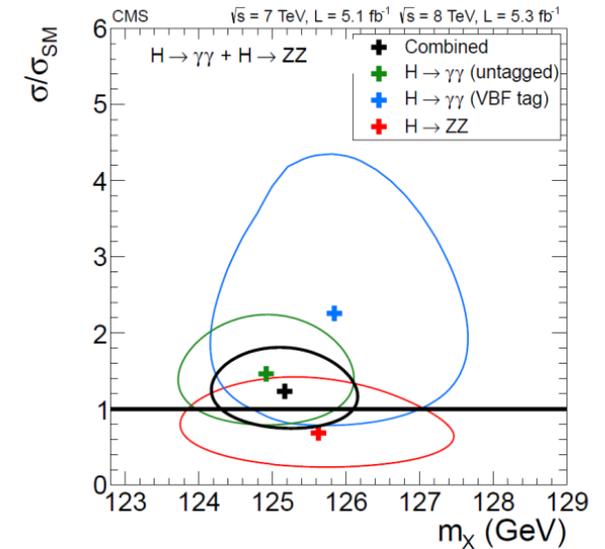
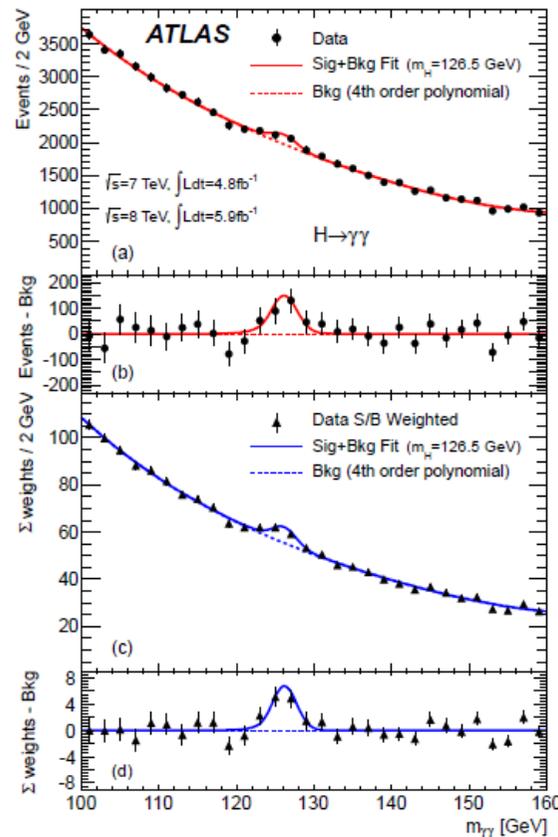
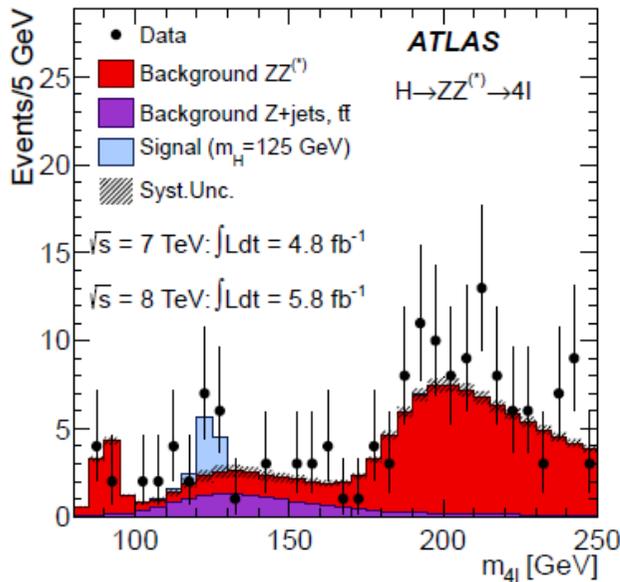
- Le **signal** laissé par « un » boson de Higgs sort peu à peu du **bruit de fond** ...



- ... à mesure que la quantité de données analysées augmente au cours du temps

# Résultats d'ATLAS et de CMS

- Choix de graphiques « arbitraire »  
→ Les deux expériences ont des résultats compatibles



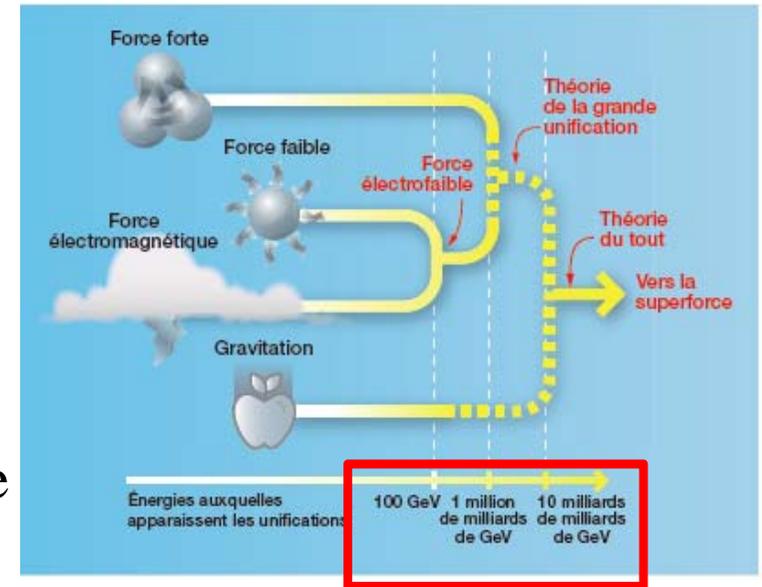
- Signal vu dans plusieurs canaux indépendants
- Nouveau boson, le plus massif jamais observé
- Propriétés mesurées en accord avec celle d'un « boson BEH standard »  
→ A suivre !



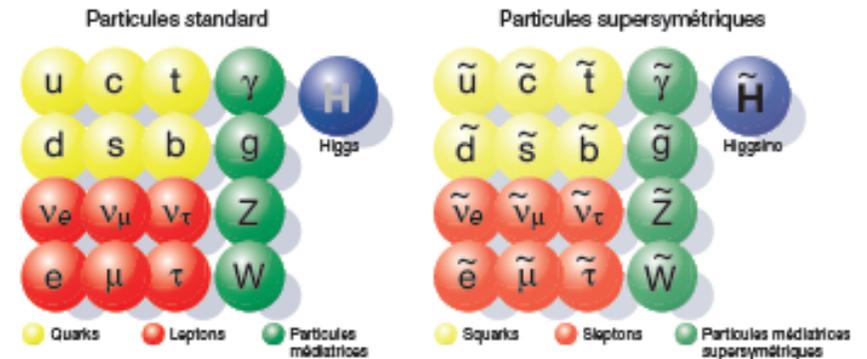
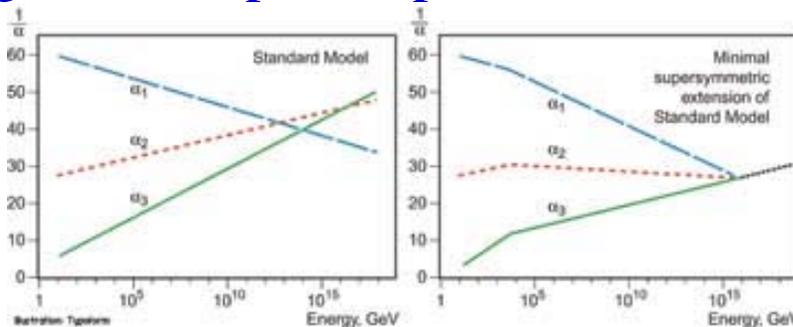
# Questions ouvertes

# Unification des forces

- **Un des moteurs du développement de la physique**
  - **Newton** : pesanteur + mécanique céleste
  - **Coulomb** :  $F_{\text{électrostatique}} \propto 1/r^2$  comme la gravitation
  - **Maxwell** : électrostatique + magnétisme
  - **Einstein** : espace & temps
  - **Glashow-Weinberg-Salam** : interaction électrofaible [Nobel de physique 1979]



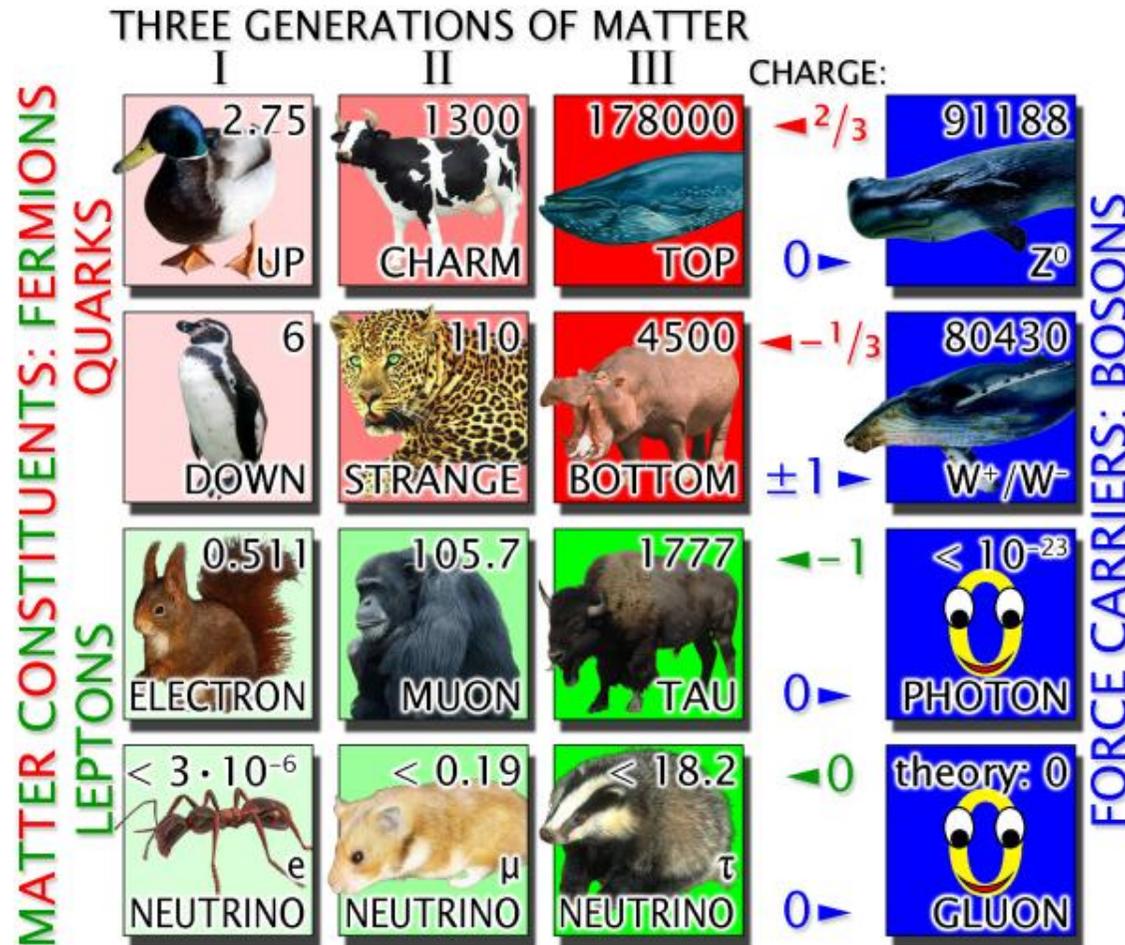
- Les unifications suivantes auraient lieu à des **échelles d'énergie extrêmes**
  - Très difficile de tester des théories unifiées
  - Désintégration du proton pas observée ( $\tau > 10^{32}$  années)



- **Pas de théorie actuellement satisfaisante**
  - Le Modèle Standard ne permet pas l'unification
  - **Nouvelle physique** : supersymétrie, 4<sup>ème</sup> génération, etc.

# La diversité des masses des particules élémentaires

- Pourquoi le champ de Higgs agit-il de manière différente sur ces particules ?

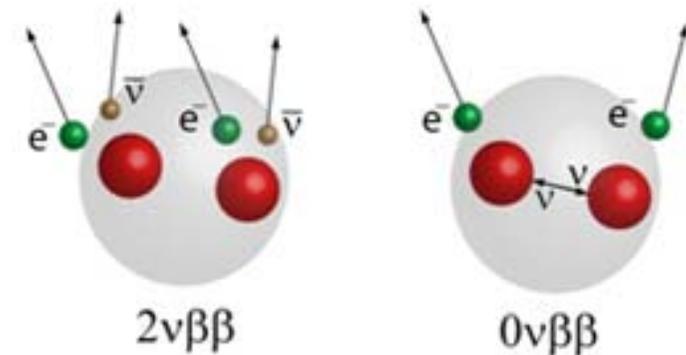
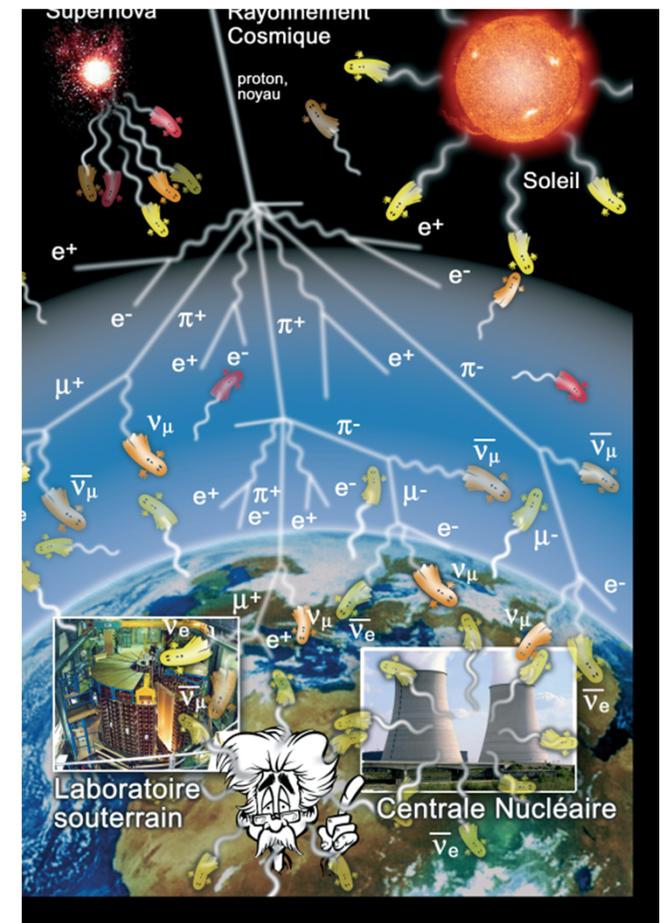


ALL MASSES IN MEV;  
ANIMAL MASSES  
SCALE WITH  
PARTICLE MASSES

The Standard Model  
fundamental particle zoo

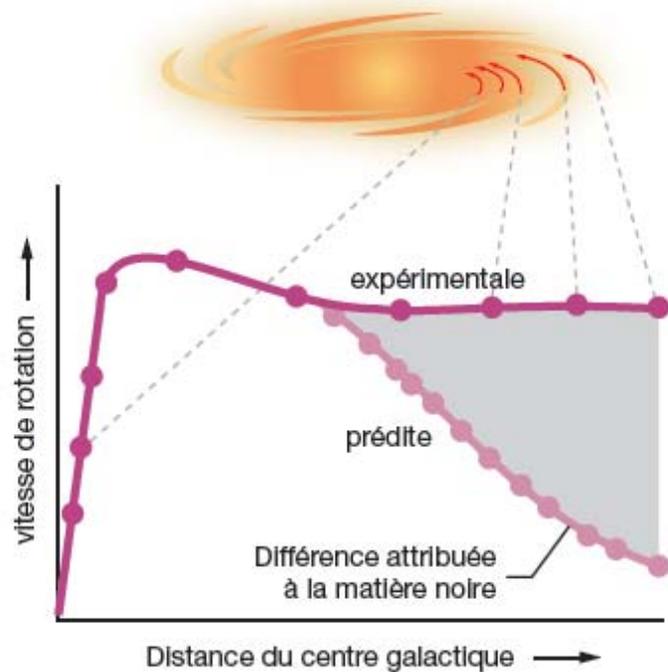
# Les neutrinos

- D'où vient la masse des neutrinos ?
- Particules « inventées » en 1930 par Pauli
- Finalement découvertes en 1956 (Raines & Cowan)
- Elles baignent l'Univers mais interagissent très peu avec la matière  $\Rightarrow$  presque indétectables
- Sans masse pour le Modèle Standard
  - En contradiction avec l'expérience :  
les neutrinos ont des masses très faibles mais non nulles  
 $\rightarrow$  Phénomènes « d'oscillations » observés depuis 1998
- Nature du neutrino
  - Le neutrino est-il sa propre antiparticule ?

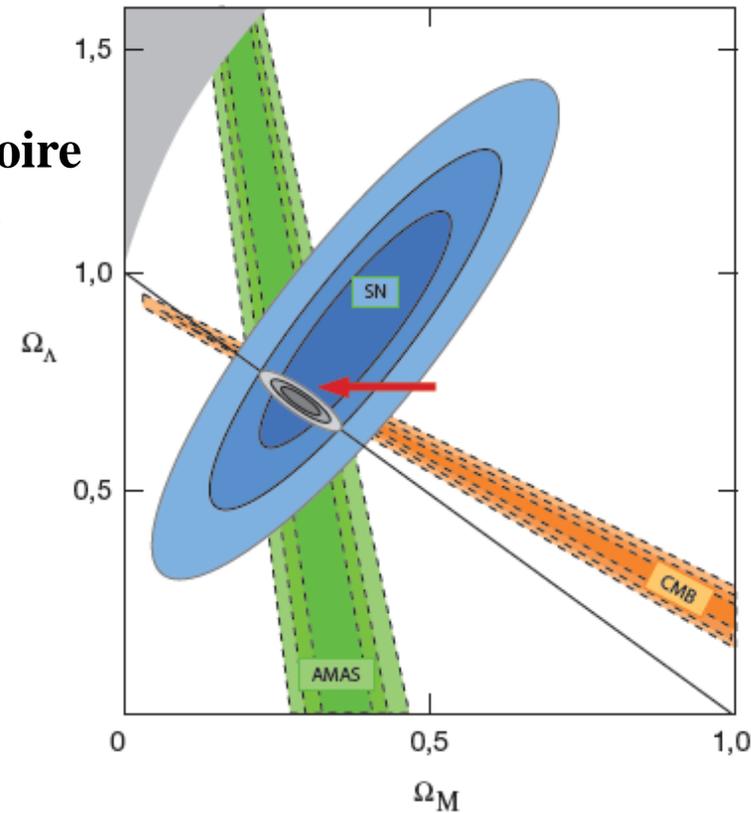


# Matière noire & énergie noire

- Origine et constitution inconnues

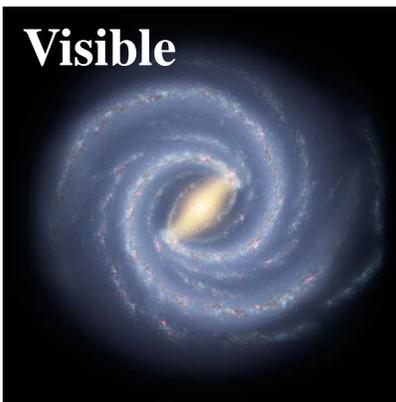


Énergie noire  
~ 70%



Matière  
~ 30%

Densité : ~ 3 atomes d'H / m<sup>3</sup>

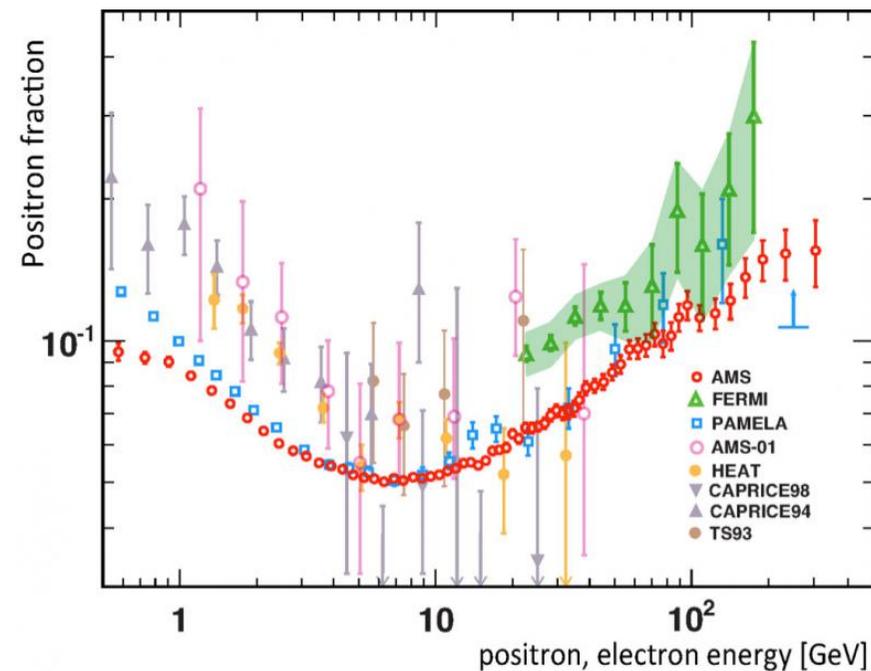
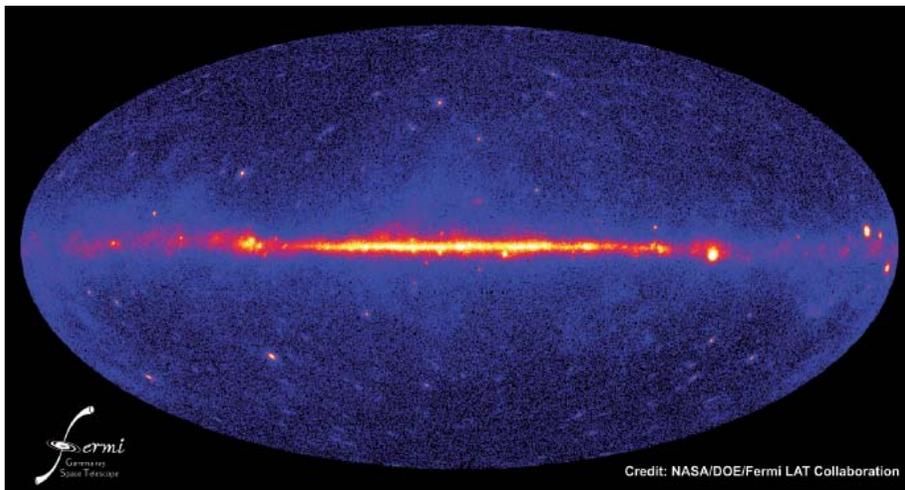


Représentations de la Voie lactée



# Où est passée l'antimatière dans l'Univers ?

- Matière et antimatière ont été créées en quantités égales lors du Big bang
- Matière & antimatière s'annihilent  
→ Un milliardième de la matière créée a survécu
- Pas de trace d'antimatière dans l'Univers observable  
→ Univers fait de matière  $\Leftrightarrow$  matière a prédominé sur l'antimatière : pourquoi ?



- Asymétrie matière-antimatière observée en physique des particules (K, B)
  - ☺ Résultats expérimentaux conformes aux prédictions théoriques ...
  - ☹ ... mais effet bien trop faible pour expliquer l'asymétrie dans l'Univers !

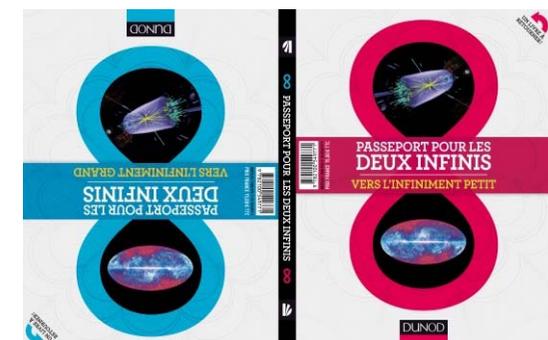
# L'inflation a-t-elle existé ?

- Les observations montrent un **Univers homogène et isotrope**
  - **Exemple : la température du CMB** est pratiquement constante sur tout le ciel
  - **Comment est-ce possible alors que certaines régions n'ont pas pu avoir de « contact » entre elles, étant trop éloignées ?**
- **D'où viennent les petites fluctuations du CMB qui, en se développant, ont donné les objets astronomiques actuels ?**
- C'est pour répondre, entre-autres, à ces questions que **la théorie de l'inflation** a été proposée aux débuts des années 1980
  - **Juste après le Big-bang ( $10^{-36}$  s  $\rightarrow$   $10^{-33}$  s ou  $10^{-32}$  s), l'Univers aurait grandi d'un facteur énorme ( $\times 10^{26}$ , voire beaucoup plus) sous l'effet d'une mystérieuse substance accélératrice**
  - **Tout l'Univers observable proviendrait d'une petite région et aurait donc une origine commune !**
- Les observations cosmologiques les plus récentes (en particulier les résultats de Planck) sont en accord avec les prédictions de l'inflation
  - **D'autres conséquences de l'inflation doivent encore être testées**
  - Un tel scénario ne fait actuellement pas l'unanimité parmi les physiciens

Ressources pour  
aller plus loin

# Education et vulgarisation à l'IN2P3 et au LAL

- Des pages web de l'IN2P3-CNRS : l'Ecole des deux infinis  
[http://www.in2p3.fr/physique\\_pour\\_tous/aulyce/introduction.htm](http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulyce/introduction.htm)  
[http://www.in2p3.fr/physique\\_pour\\_tous/aulyce/media/ecole2infinis.pdf](http://www.in2p3.fr/physique_pour_tous/aulyce/media/ecole2infinis.pdf)
- L'affiche des composants élémentaires de la matière  
<http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/index.html>
- La revue de vulgarisation «Élémentaire»  
<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr>  
→ Nouveau projet : le « Quark poker »
- Le « Passeport pour les 2 Infinis »  
<http://www.passeport2i.fr>
- Le site LHC-France  
<http://www.lhc-france.fr>
- Etc.



# L'Ecole des Deux Infinis de l'IN2P3



## Conférences dans les lycées: la science en partage

Les conférences dans les lycées (Nepal\*) constituent avant tout une rencontre privilégiée entre les jeunes et les physiciens de l'IN2P3 et du CEA. L'occasion pour les lycéens:

- d'explorer la physique nucléaire, la physique des particules ou la cosmologie;
- de discuter ouvertement avec les chercheurs ou ingénieurs de la recherche et ses métiers.

Elles peuvent être éventuellement complétées par une visite dans un laboratoire de l'Institut.

Les conférences Nepal ont reçu l'aval de la Direction des lycées et collèges et du doyen de physique-chimie de l'inspection générale, ainsi que le soutien de l'Union des professeurs de physique et de chimie (UdPPC), anciennement Union des physiciens (UDP).



## pluie de rayons cosmiques sur les lycées! Cosmos à l'école :

À tout instant la Terre est bombardée par des particules en provenance de l'Univers. Étudier ces particules au lycée, c'est possible!

Fruit d'un partenariat entre le dispositif ministériel *Sciences à l'école* et l'IN2P3, l'opération *Cosmos à l'école* permet l'étude des rayons cosmiques grâce à des détecteurs mis à disposition dans les lycées.

Chaque lycée participant reçoit par ailleurs le parrainage d'un chercheur de l'IN2P3 et un accompagnement pédagogique par le réseau de *Sciences à l'école*.

Des cahiers pédagogiques et de ressources sont disponibles sur le site de *Sciences à l'école*: [www.sciencesalecole.org](http://www.sciencesalecole.org)

## Masterclasses: chercheurs d'un jour

En quoi consiste le quotidien d'un physicien travaillant sur une expérience du LHC, l'accélérateur de particules le plus puissant au monde?

Faire partager à des lycéens pendant une journée la vie de chercheur en physique des particules et les initier aux méthodes de travail des grandes collaborations internationales, tel est l'objectif des *Masterclasses*.

Les sessions se déroulent au sein d'un laboratoire de l'IN2P3. Au programme : un cours d'introduction à la physique des particules, l'analyse de données réelles produites au Cern\* à Genève puis la mise en commun des résultats des élèves avec ceux des classes d'autres pays grâce à une vidéoconférence animée depuis le Cern. Les résultats finaux sont confrontés à ceux des physiciens.

Les *Masterclasses* sont pilotées au niveau européen par le Cern et le réseau Eppog. Elles sont coordonnées en France par l'IN2P3. Actuellement, 90 instituts de 15 pays participent à ce projet. [www.physicsmasterclasses.org](http://www.physicsmasterclasses.org)



## Labos ouverts : au cœur de la science

C'est ici l'occasion de découvrir les lieux où se « fait » la science. Les élèves pourront rencontrer les chercheurs, les ingénieurs ou les techniciens de l'IN2P3 qui travaillent auprès des accélérateurs, sur des projets spatiaux, des expériences sous-marines, dans des laboratoires souterrains...

Dernière ces expériences et instruments hors-norme, les recherches portent aussi bien sur les particules les plus élémentaires que sur la matière noire, les neutrinos, les rayons cosmiques, l'énergie noire, la première lumière de l'Univers, les rayons cosmiques, les trous noirs...

\* « Noyaux et particules au lycée »

## Formations d'enseignants: dépasser les frontières

Depuis plusieurs années, le Cern organise chaque année, en partenariat avec l'IN2P3 et le dispositif *Sciences à l'école*, un stage de formation national destiné aux enseignants souhaitant développer des projets autour de la physique des particules. D'autres stages d'un à trois jours sont également mis en place par les laboratoires de l'IN2P3 sur tout le territoire et couvrent de nombreux thèmes: les particules élémentaires, le nucléaire et ses applications, les mystères de l'Univers...

## Passeport pour les deux infinis: un outil, un réseau



Construit autour d'un livre réversible qui dresse un panorama des sujets liés au monde des particules et de l'astrophysique, *Passeport pour les deux infinis* c'est:

- un outil pédagogique adapté aux programmes;
- un dispositif invitant les enseignants à développer avec leurs élèves des activités dans le domaine de la physique de l'infiniment petit ou de l'infiniment grand;
- l'opportunité pour les élèves de rencontrer des chercheurs, visiter de hauts lieux scientifiques et voyager dans l'univers des particules.

Au *Passeport pour les deux infinis* est associée une plate-forme d'échanges en ligne où les professeurs peuvent obtenir le livre gratuitement: [www.passeport2i.fr](http://www.passeport2i.fr)

\*Cern : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Conférences dans les lycées

Cosmos à l'Ecole

Formations d'enseignants

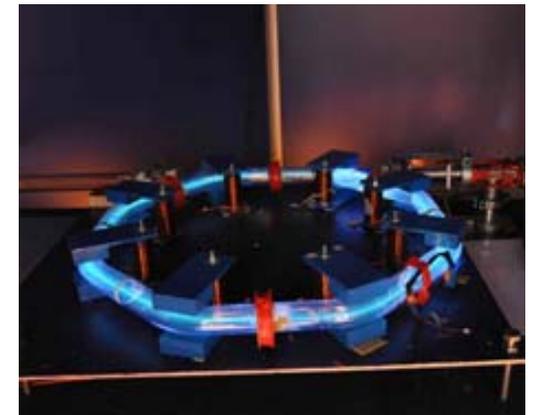
Masterclasses

Visites de laboratoires

Passeport pour les deux infinis

# Le LAL & la communication

- **Visites grand public** et de **scolaires** sur demande  
<http://indico2.lal.in2p3.fr/indico/categoryDisplay.py?categId=123>
- Participation chaque année aux **Masterclasses** du **CERN**  
<http://www.physicsmasterclasses.org/index.php?cat=country&page=fr>
- La revue de vulgarisation « **Élémentaire** »  
<http://elementaire.web.lal.in2p3.fr>
- Le « **Quark Poker** »  
→ **NOUVEAU !!!**
- Le « **Passeport pour les 2 Infinis** »  
<http://www.passeport2i.fr>
- **Sciences-ACO**  
<http://www.sciencesaco.fr>
- L'**affiche des composants élémentaires** de la matière  
<http://quarks.lal.in2p3.fr/afficheComposants/index.html>



# Composants élémentaires de la matière

**Composants élémentaires de la matière**

10<sup>26</sup> m : L'UNIVERS

10<sup>24</sup> m : GALAXIE

10<sup>22</sup> m : ÉTOILE

10<sup>7</sup> m : TERRE

1 m : OBJET

10<sup>-10</sup> m : CRISTAL

10<sup>-10</sup> m : ATOME

10<sup>-14</sup> m : NOYAU ATOMIQUE

10<sup>-15</sup> m : PROTON

10<sup>-15</sup> m : NEUTRON

10<sup>-16</sup> m : QUARKS

10<sup>-16</sup> m : LEPTONS

10<sup>-17</sup> m : PARTICULES ÉLÉMENTAIRES

À chaque particule correspond une antiparticule qui possède les mêmes caractéristiques. Le charge électrique d'une antiparticule est l'opposé de la charge de la particule correspondante.

**1<sup>re</sup> famille**  
Les membres de la 1<sup>re</sup> famille interagissent l'un avec l'autre par les forces électromagnétique et forte.

**2<sup>e</sup> famille**  
Particule qui agit sur le membre de la 1<sup>re</sup> famille par l'interaction faible. Elle agit sur elle-même par l'interaction forte.

**3<sup>e</sup> famille**  
Particule qui agit sur le membre de la 1<sup>re</sup> famille par l'interaction faible. Elle agit sur elle-même par l'interaction forte.

| LEPTONS                                 | 1 <sup>re</sup> famille             | 2 <sup>e</sup> famille             | 3 <sup>e</sup> famille |
|---|-------------------------------------|------------------------------------|------------------------|
| e<br>électron                           | e<br>muon                           | μ<br>tau                           | τ                      |
| ν <sub>e</sub><br>neutrino électronique | ν <sub>μ</sub><br>neutrino muonique | ν <sub>τ</sub><br>neutrino tauique |                        |
| QUARKS                                  | u<br>haut / up                      | c<br>charm / charme                | t<br>top               |
| d<br>bas / down                         | s<br>strange / étrange              | b<br>beauty / beauté               |                        |

**Les interactions fondamentales**

Il existe des PARTICULES ASSOCIÉES aux interactions fondamentales permettant leur propagation.

- Gravitation**  
Attraction universelle, planètes, galaxies.  
**GRAVITON**
- Interaction faible**  
Déintégration radioactive.  
Z<sup>0</sup>, W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>
- Interaction électromagnétique**  
Électricité, magnétisme, cohésion de l'atome et du cristal, lumière.  
**PHOTON**
- Interaction forte**  
Cohésion des protons et des neutrons.  
**GLUON**

Les 4 forces fondamentales sont responsables du fonctionnement de notre univers et de la vie.

- Gravitation de l'atome jusqu'à la gravitation des galaxies.
- Interaction électromagnétique de la lumière à la production de l'énergie électrique.
- Interaction faible de la radioactivité à la production de l'énergie nucléaire.
- Interaction forte de la cohésion des protons et des neutrons à la production de l'énergie nucléaire.

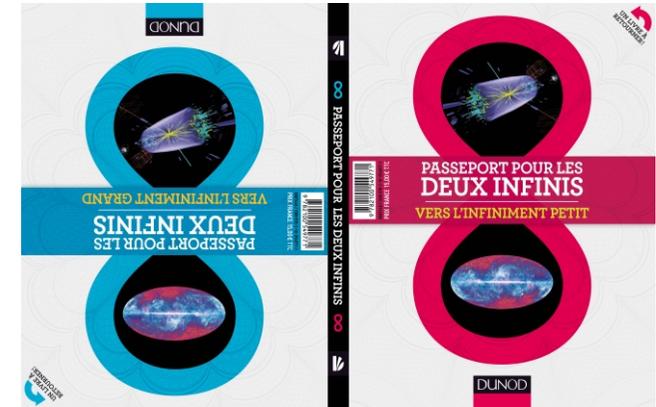
Les 4 particules de la première famille sont présentes dans la matière qui compose notre univers. Elles interagissent par les forces électromagnétique, gravitationnelle et forte.

http://www.in2p3.fr

IN2P3

# Le passeport pour les 2 infinis

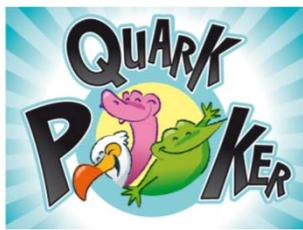
- Un livre **réversible** de 192 pages couleur (Dunod)
  - Côté **pile** : **vers l'infiniment petit**
  - Côté **face** : **vers l'infiniment grand**
- **Courts articles** (2 pages)
  - **Principales notions du domaine**
  - **Description des grandes expériences actuelles** (Planck, LHC, etc.)
  - Quelques fiches plus appliquées + un **glossaire** fourni pour conclure chaque partie
- **Plus de cinquante contributeurs** du CNRS, du CEA et de l'Université
- **Comité de rédaction de sept chercheurs et ingénieurs**
- **Première parution en 2010 ; seconde édition mise à jour pour la rentrée 2013**
- **Livre disponible gratuitement pour les enseignants du secondaire et du supérieur**  
→ **Site web** : <http://www.passeport2i.fr>
- **Fiches pédagogiques** élaborées par des professeurs à partir d'articles du livre
- **Rencontres** avec des enseignants et le grand public



# La revue Élémentaire

- **Revue de vulgarisation** (2003-2010)  
format A4,  $\geq 64$  pages, en couleur
- **Cible** : grand public avec une formation scientifique niveau secondaire
- **Fil rouge** : le LHC
- **De nombreux sujets abordés** :
  - Grandes questions scientifiques
  - Articles théoriques
  - Perspectives historiques
  - Développements technologiques
  - Retombées
- **8 numéros publiés**  
→ 1 thème central pour chaque numéro
- Tous disponibles sur le site de la revue

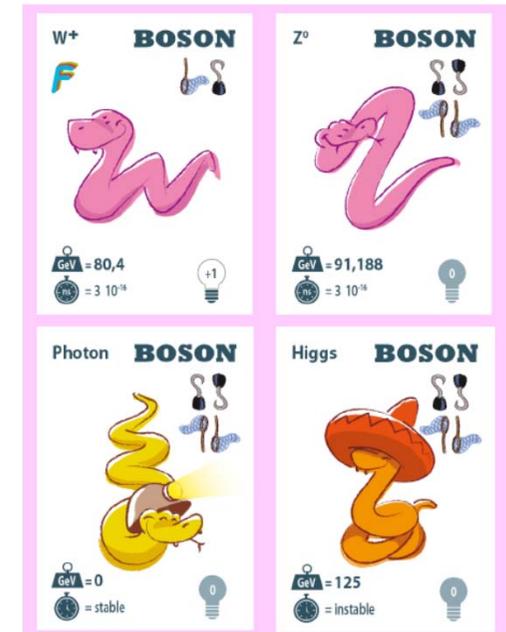




# Le Quark poker



- Où comment découvrir les particules élémentaires et leurs interactions de manière ludique : en jouant aux cartes et en s'amusant
- Le quark poker
  - 64 cartes représentant chacune une particule élémentaire
  - Des règles basées sur les lois de la physique
  - Plusieurs jeux possibles : 7 familles, poker, collisions
- Livre d'accompagnement
  - Passerelle entre les cartes et la physique
  - Complément au jeu
  - Peut se lire indépendamment
- Projet en cours de développement
  - Sortie à la rentrée 2013 !?
- Démonstration et test dans des classes de lycée
  - Contact : [elementaire@lal.in2p3.fr](mailto:elementaire@lal.in2p3.fr)



# Pour en savoir plus sur le LHC

- Le site **LHC-France**  
<http://www.lhc-france.fr>
- Site grand public du **CERN**  
<http://public.web.cern.ch/public/welcome-fr.html>
- Sites grand public des **expériences du LHC** :
  - ALICE <http://aliceinfo.cern.ch/Public/Welcome.html>
  - ATLAS <http://atlas.ch/>
  - CMS <http://cms.web.cern.ch/cms/index.html>
  - LHCb <http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>
- Films disponibles gratuitement sur le web :
  - Film “Bottle to Bang” produit et dirigé par Chris Mann (© CERN, 2008)  
<http://cdsweb.cern.ch/record/1125472>
  - Film « LHC First Physics » (© CERN video productions, 2010)  
<http://cdsweb.cern.ch/record/1259221>

