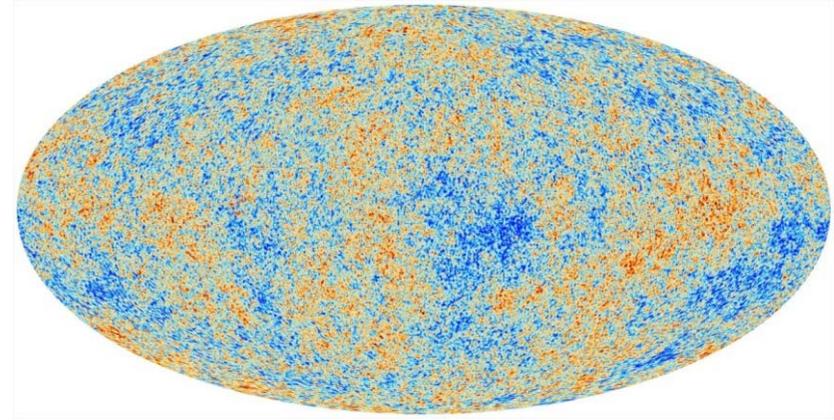
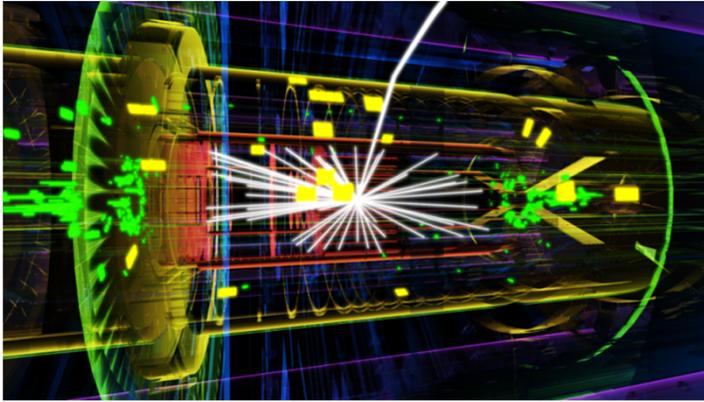


Petit voyage vers les deux infinis



Vendredi 13 (!) décembre 2013

Maison pour Tous d'Ergue Armel, Quimper



Nicolas Arnaud

(narnaud@lal.in2p3.fr)



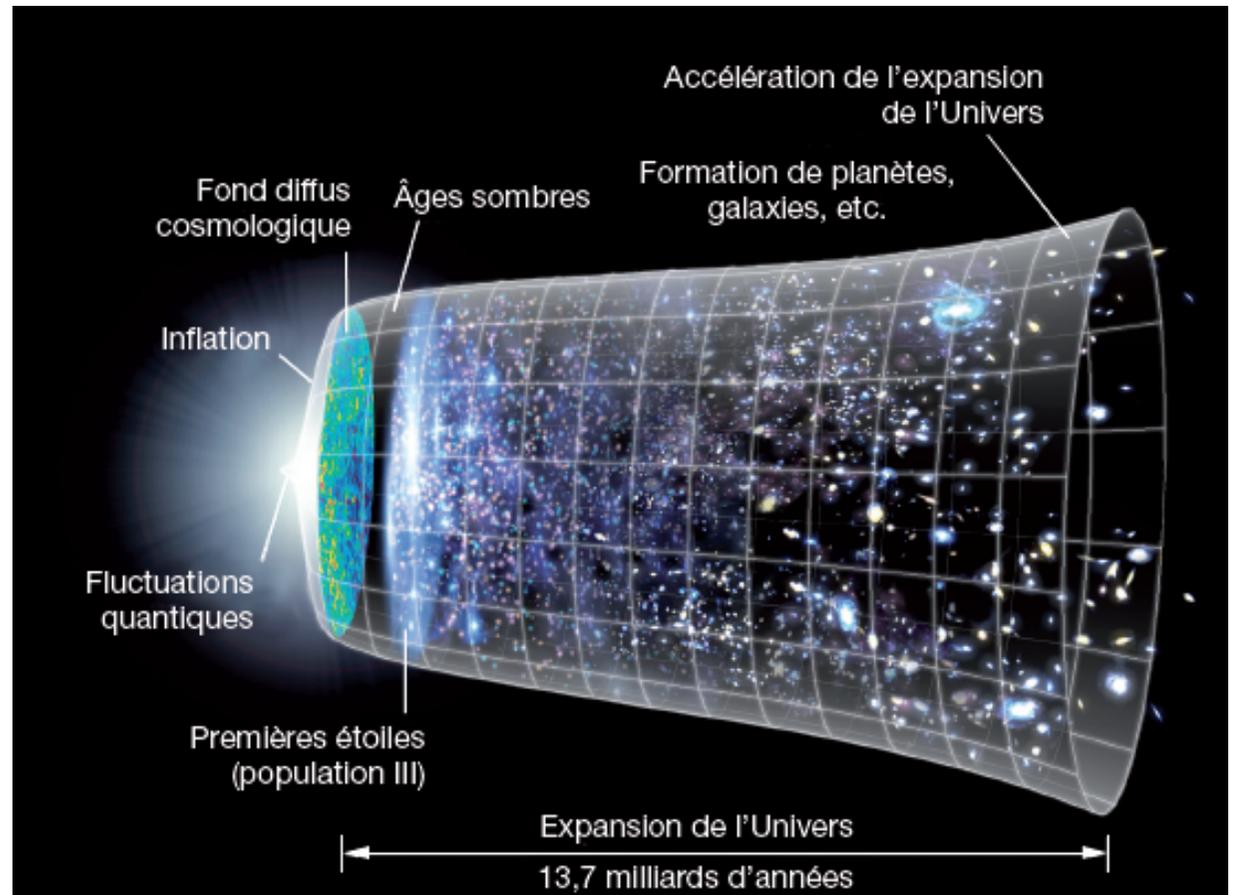
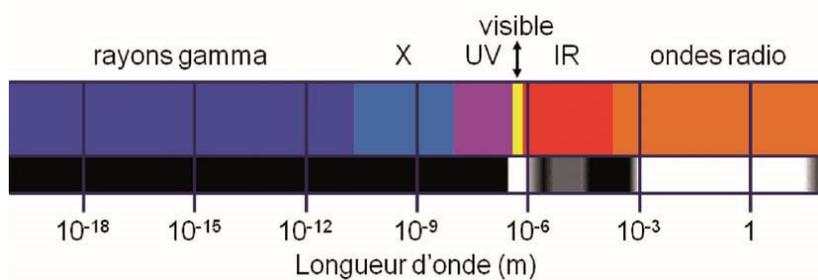
Comprendre le monde,
construire l'avenir®



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

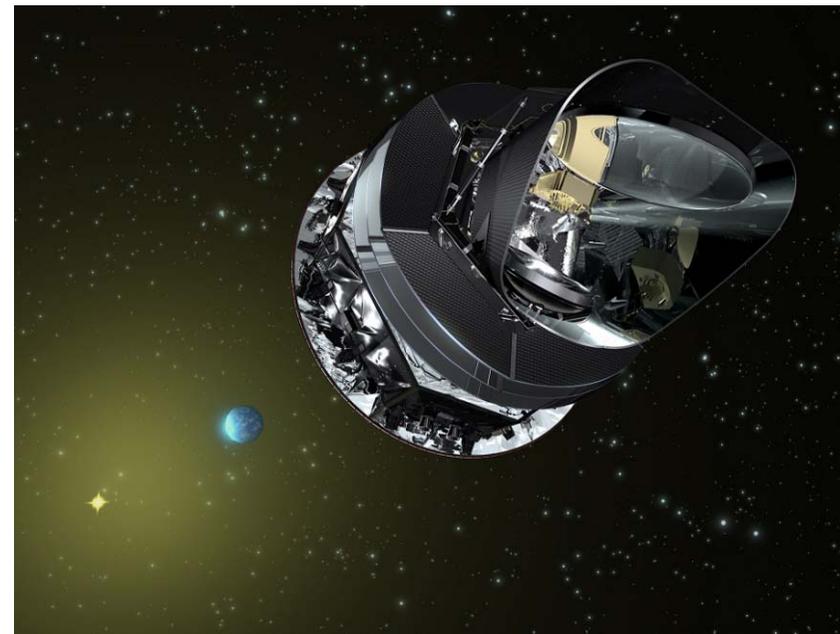
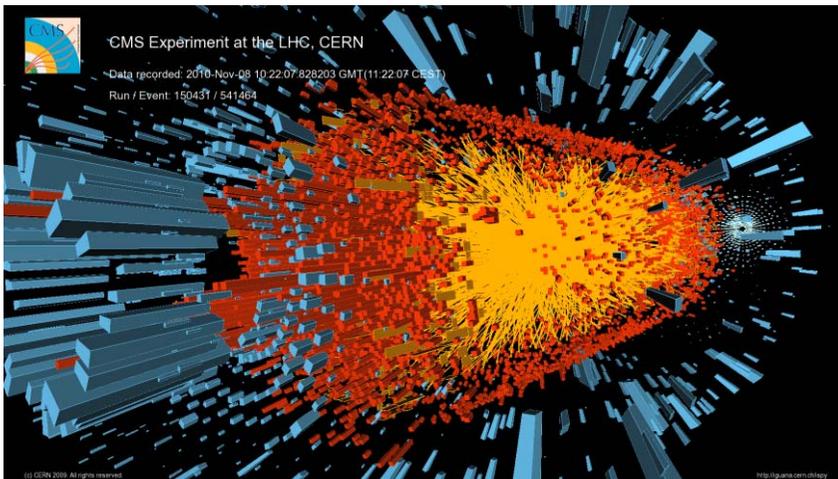
Un voyage dans le temps

- -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 du (très) froid au (très) chaud

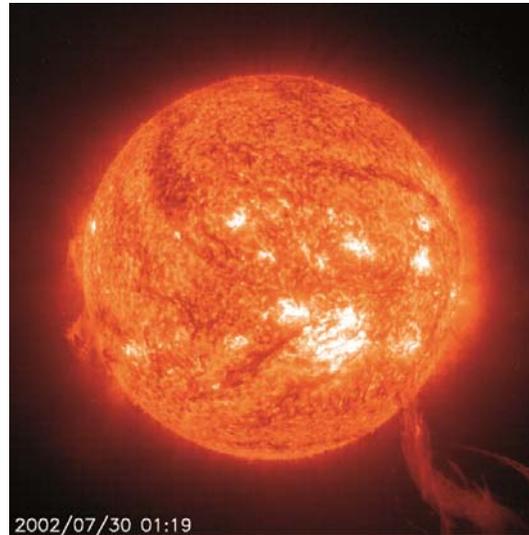
- **0,1 K** (-273,05°C)
- 1,9 K
- 2,7 K
- ...
- **1600 milliards de degrés Celsius**
- Température \leftrightarrow Energie
- **Densité d'énergie**



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 !

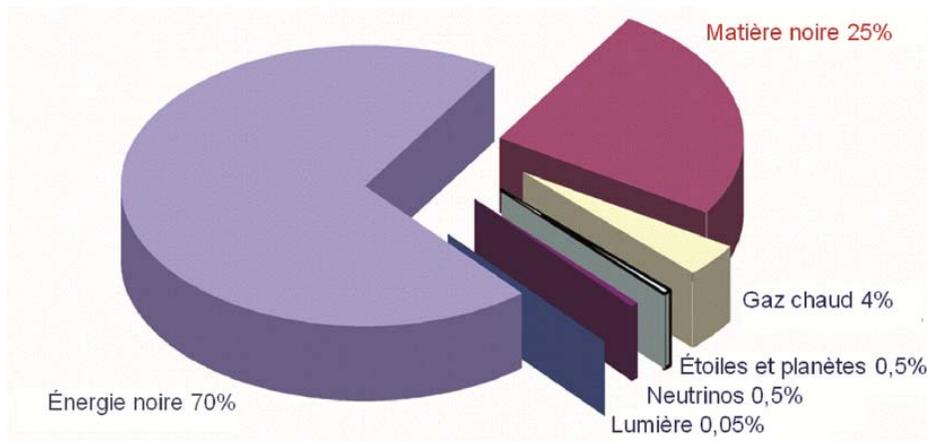
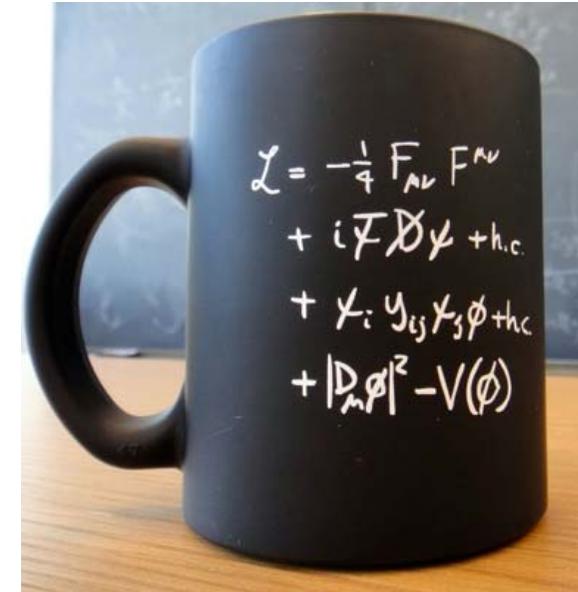
- Des **intensités très variées**

- 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 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
LEPTONS	e Électron	μ Muon	τ Tauon
	ν_e Neutrino électronique	ν_{μ} Neutrino muonique	ν_{τ} Neutrino tauique
QUARKS	u Up	c Charm	t Top
	d Down	s Strange	b Bottom

Gravitation
Attraction universelle, planète, galaxie.
GRAVITON ?

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

Interaction électromagnétique
Électricité, magnétisme, lumière, effet de serre, acoustique, chimie.
PHOTON

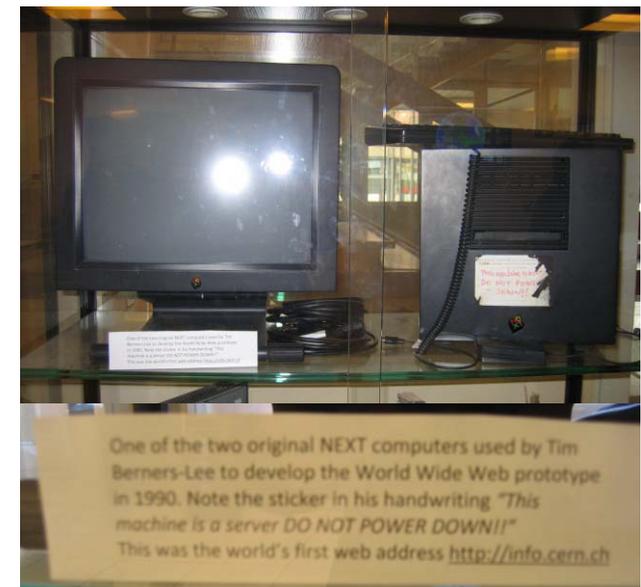
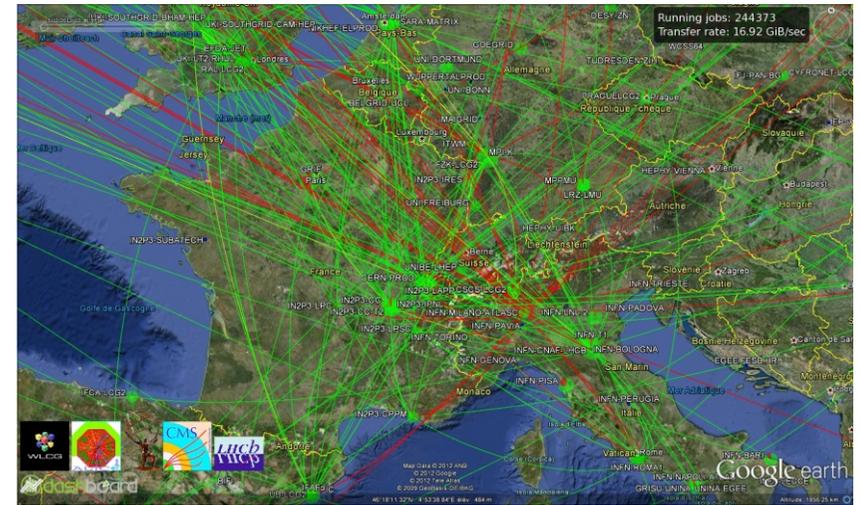
Interaction forte
Cohésion des protons et des neutrons.
GLUON

10¹⁶m : ÉTOILE
10¹⁵m : NOYAU ATOMIQUE
10¹⁴m : ATOME
10¹³m : CRISTAL
1m : OBJET
10⁷m : TERRE

10²⁶m : UNIVERSE

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**

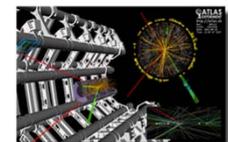
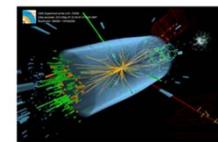


Un voyage dans la communauté scientifique

- 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=2313>

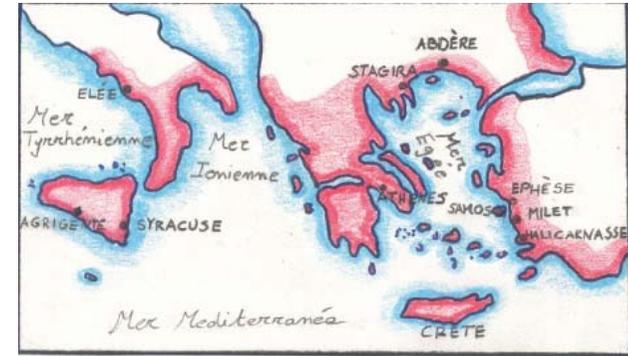
L'infinitement petit

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

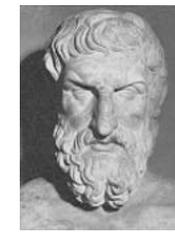
- **L'atome est un concept vieux de 2500 ans !**
→ Les philosophes cherchent à expliquer la Nature
(« *Physis* » en Grec)



- **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



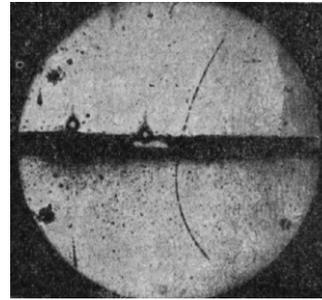
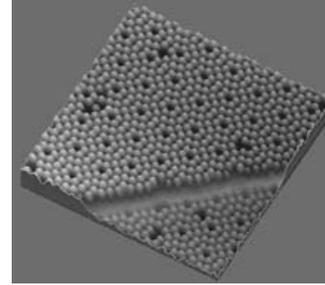
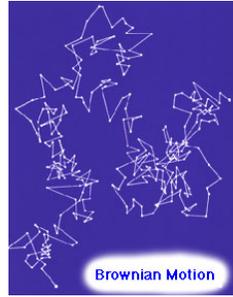
- **XVII^{ème} – XVIII^{ème} siècle** : les premiers chimistes

- **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

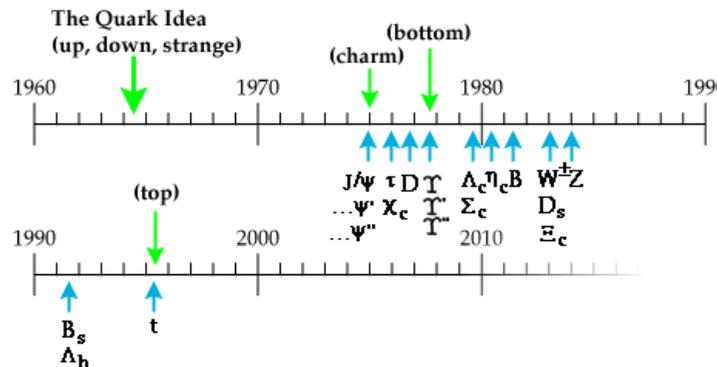
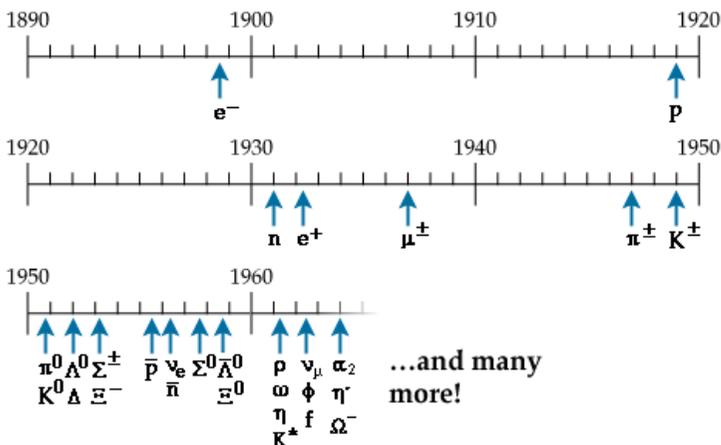


Une (très) brève histoire des particules

- **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^{ère} 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) !

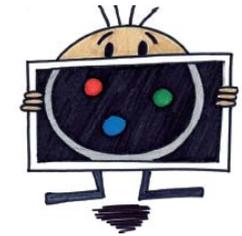


Une (très) brève histoire des particules

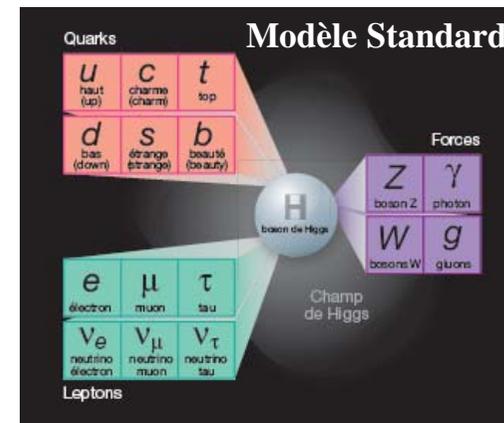
- La plupart de ces nouvelles particules sont faites de 2 ou 3 quarks
→ Il n'y a que **6 quarks au total**

De **compliquée**,
la situation
redevient **simple** !

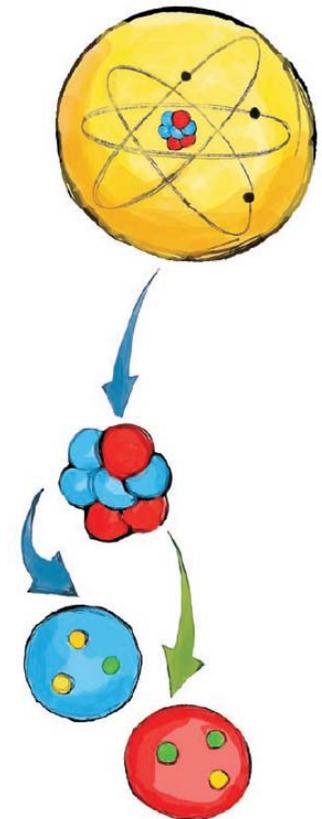
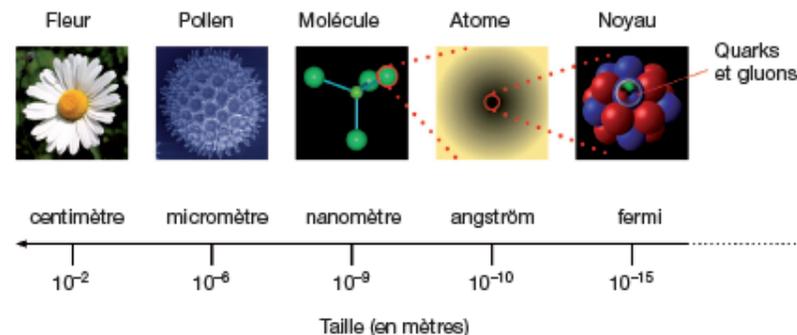
- Les constituants du noyau, les nucléons (protons et neutrons), sont formés de 3 quarks
- L'électron et les quarks sont des **particules élémentaires** qui n'ont pas de structure interne (pour l'instant !?)



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

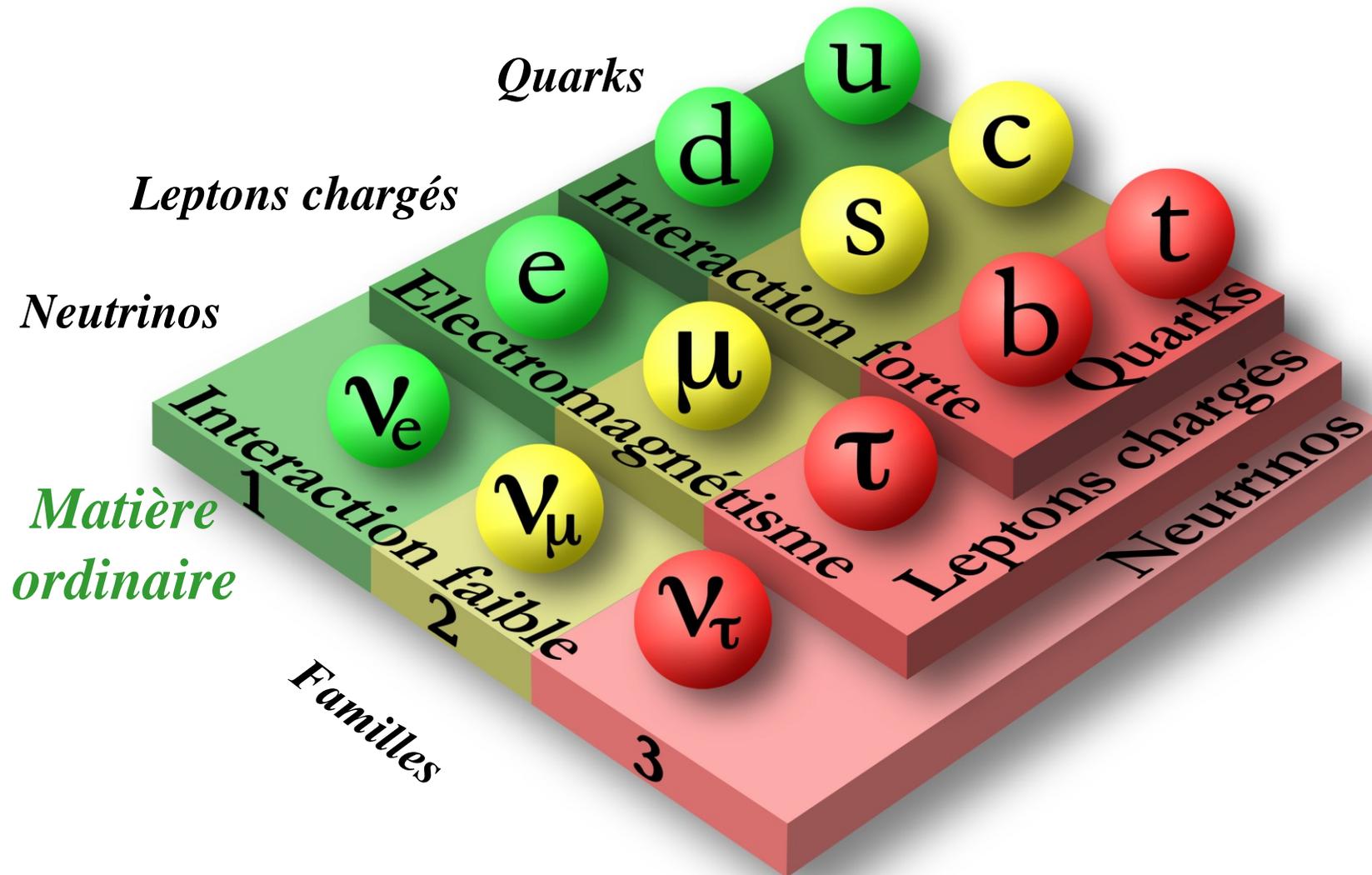


- Elles sont soumises à **3 forces** :
 - l'**interaction forte**
 - l'**interaction faible**
 - la **force électromagnétique**



Bilan (1/2)

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



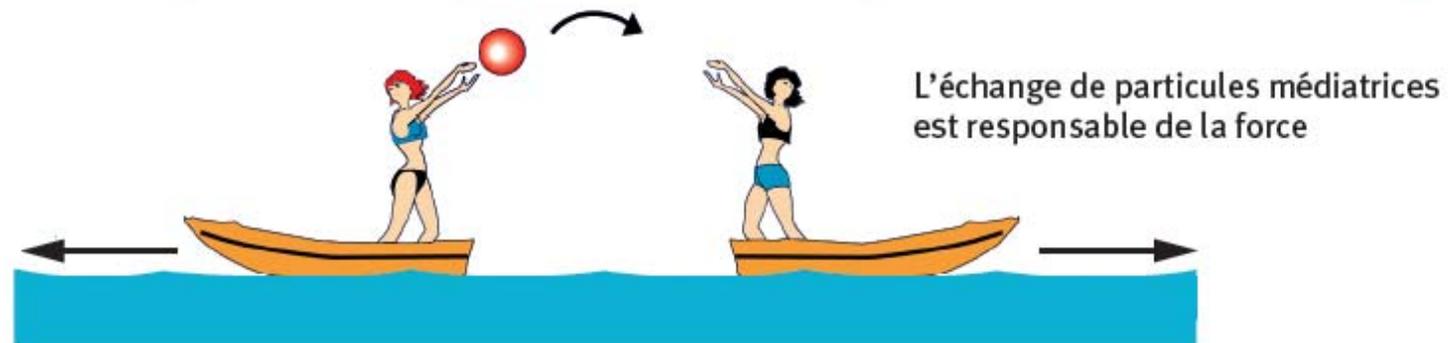
- A chaque particule de **matière** est associée une particule d'**antimatière**

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	~ 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 ? (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

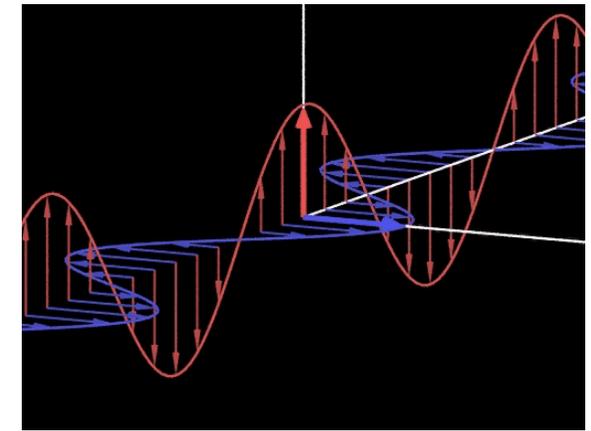
L'infinitement grand

Introduction

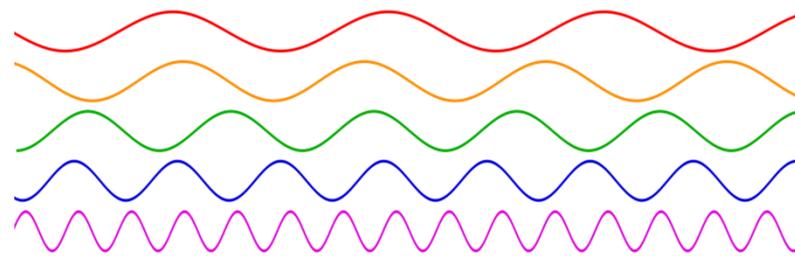
- La **cosmologie** étudie la structure et l'évolution de l'Univers
- **Âge** ?
- **Passé ? Avenir** ?
- **Composition** ?
- Science basée sur l'**observation** à (très très très) grande distance
- **Utilisation de tous les « messagers » possibles** – dont **la lumière**
- Nécessité d'anticiper toutes 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

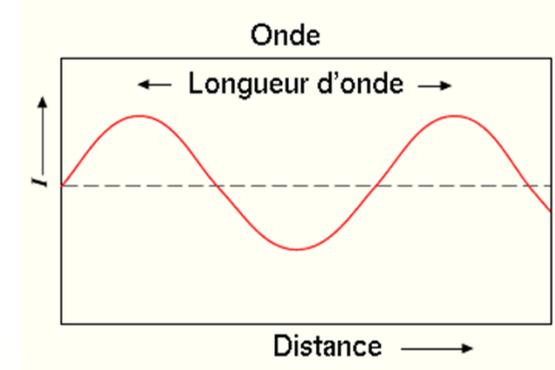
- Principal moyen d'**observer l'Univers**
 - Autres messagers : neutrinos, ondes gravitationnelles ...



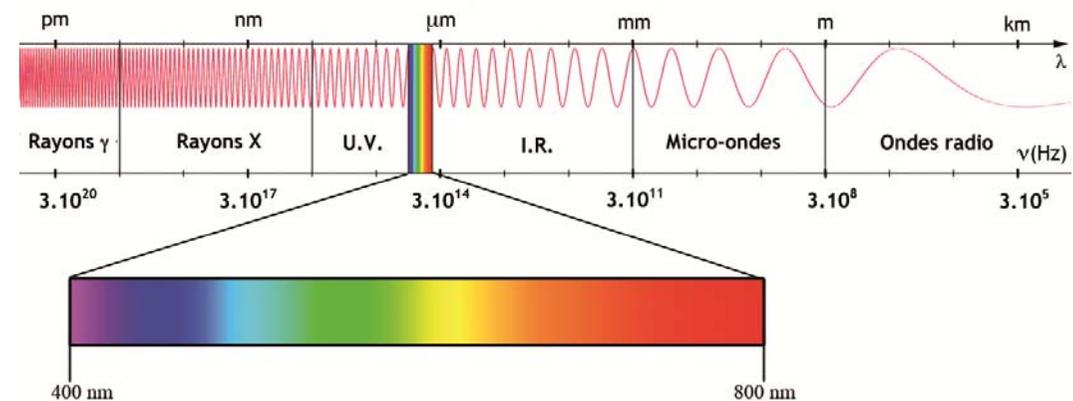
- **Onde électromagnétique**
 - Période T [seconde]
 - Fréquence ν [hertz]
 - Longueur d'onde λ [mètre]
 - Vitesse c [mètre/seconde]



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

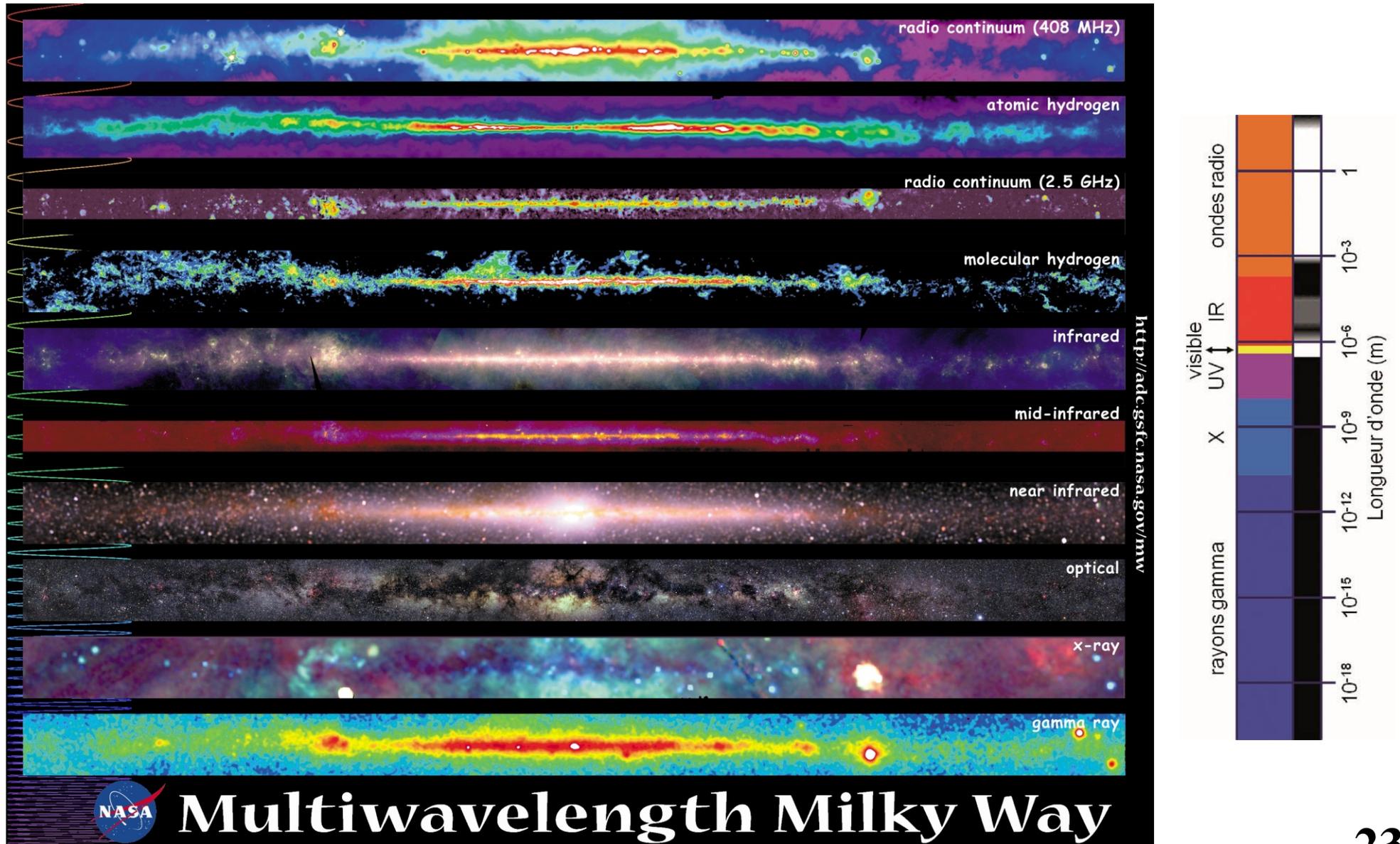


- **Le spectre électromagnétique**
va bien au-delà du domaine visible



Observation multi-longueurs d'ondes

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



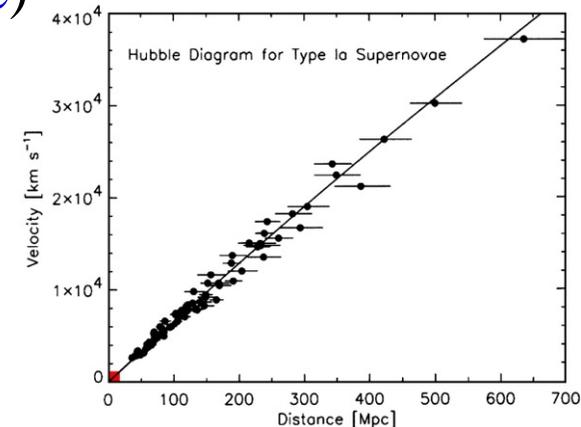
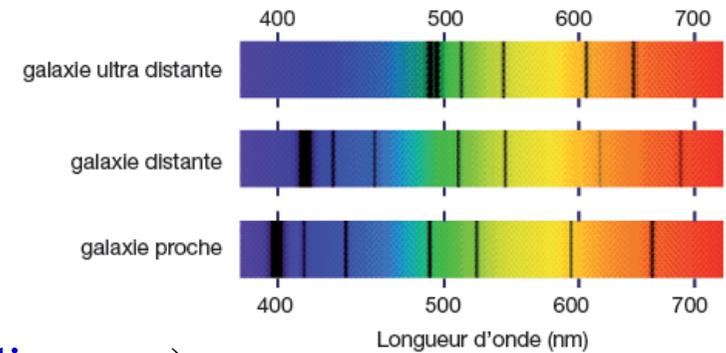
La lumière

- **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 »

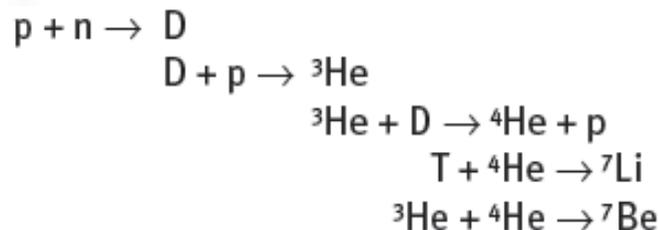
Terre-Lune	1,3 seconde-lumière	Distance étoile la plus proche	4,3 années-lumière
Terre-Soleil	8 minutes-lumière	Taille de la Voie Lactée	100 000 années-lumière
Taille du système solaire	1 jour-lumière	Âge de l'Univers	13,7 milliards d'années

Big-bang et Modèle Standard cosmologique

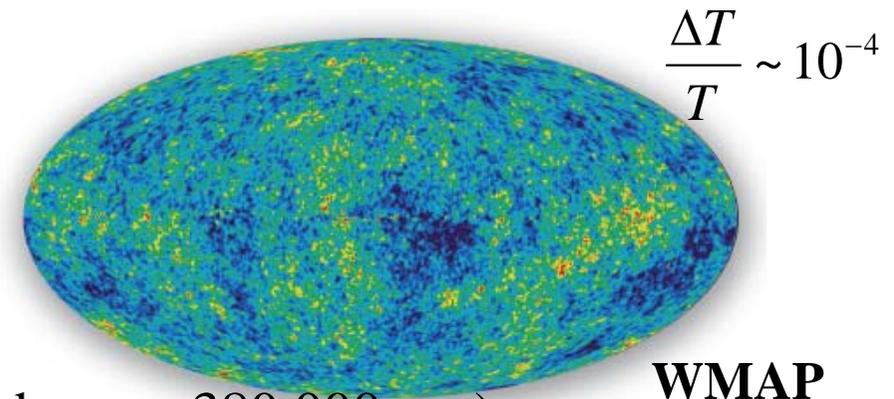
- Force de **gravitation** domine
- **Décalage vers le rouge** des raies spectrales
 → « fuite » des galaxies d'autant plus rapide que ces dernières sont éloignées (**vitesse \propto distance**)
 → **dilatation globale de l'espace-temps**
- **Abondance des éléments légers** créés dans les premières minutes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



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

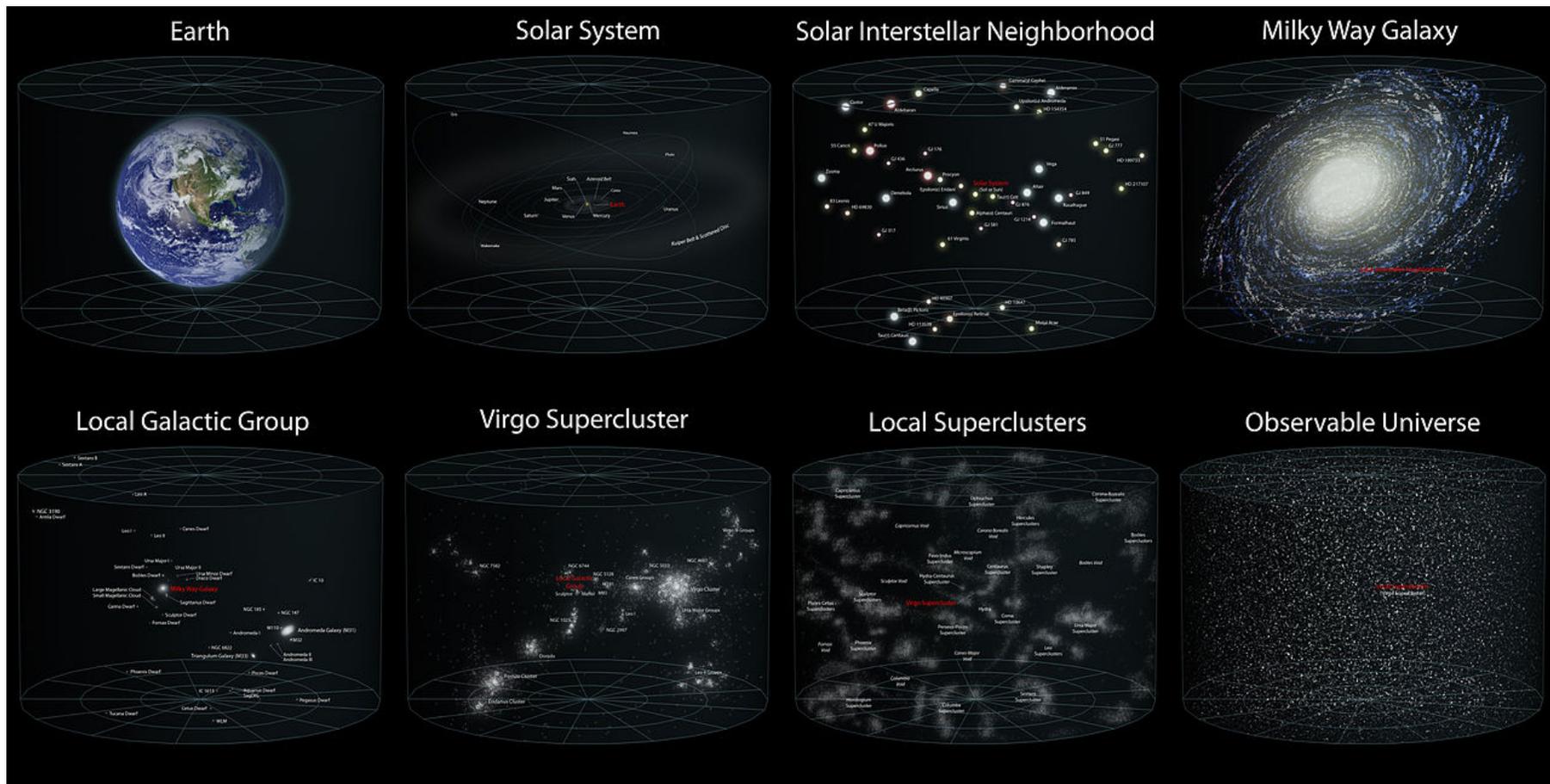


- **Rayonnement de fond cosmologique**
 → Corps noir à $\sim 2,7$ K
 → Photons émis lors de la recombinaison (\sim Big bang + 380 000 ans)
 → Isotropie remarquable ; les inhomogénéités annoncent les grandes structures



Univers homogène et isotrope ?

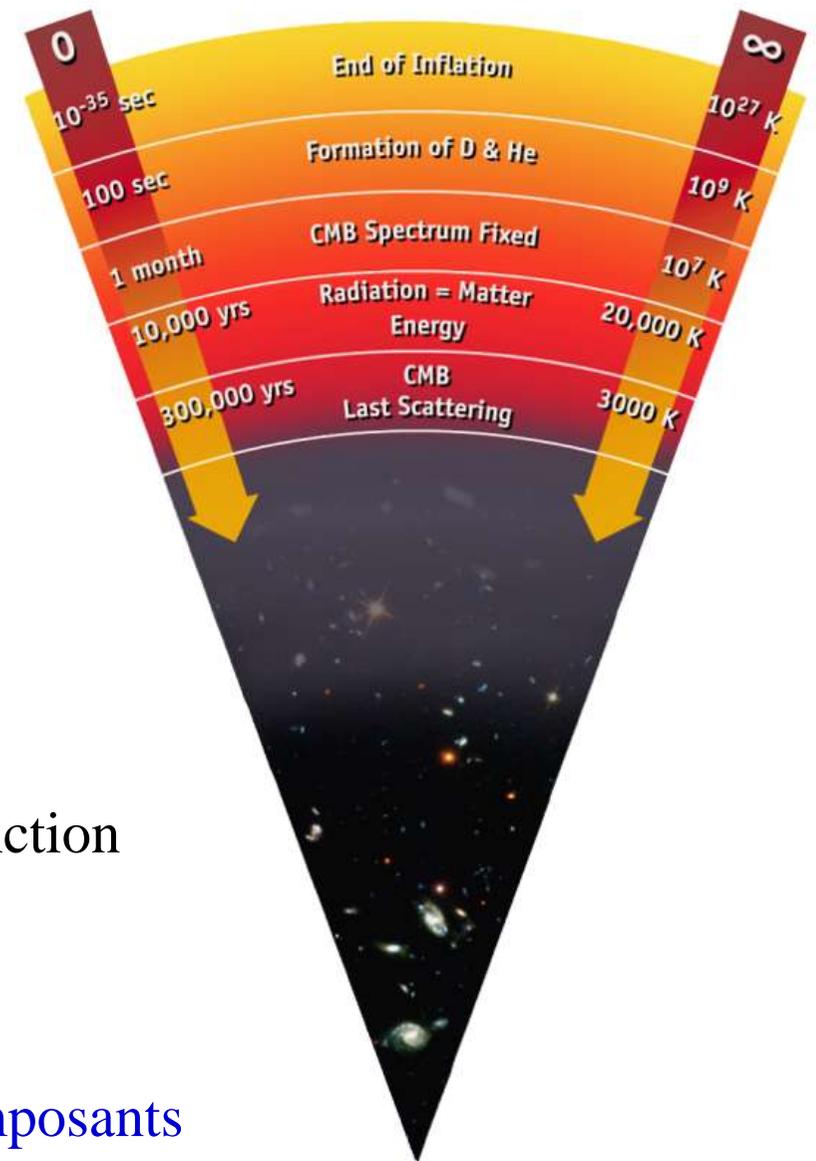
- **Homogène** : caractéristiques identiques partout
- **Isotrope** : aucune direction privilégiée
- **Vérifié à grande échelle !**
 - Contrairement à « l'Univers environnant » qui lui est franchement inhomogène



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

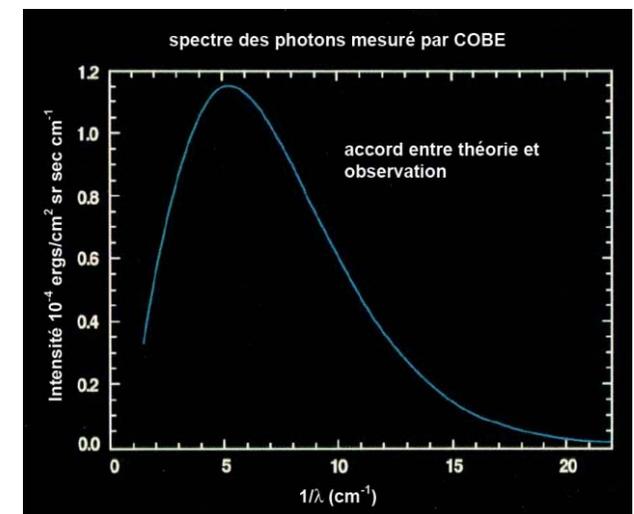
Le rayonnement de fond cosmologique

- 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.



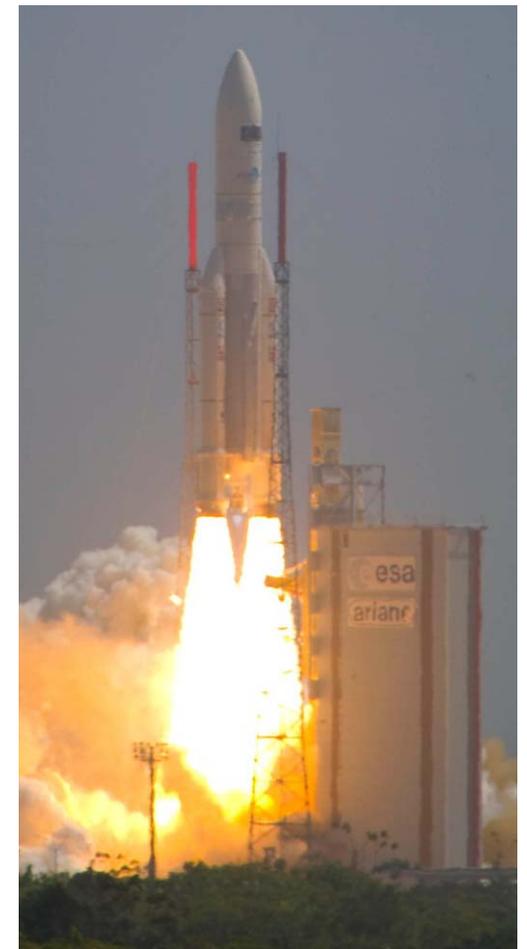
Température du CMB

- 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 ~ 1100
→ La température des photons CMB est maintenant d'environ **2,7 K**
 - Environ 410 photons du CMB / 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



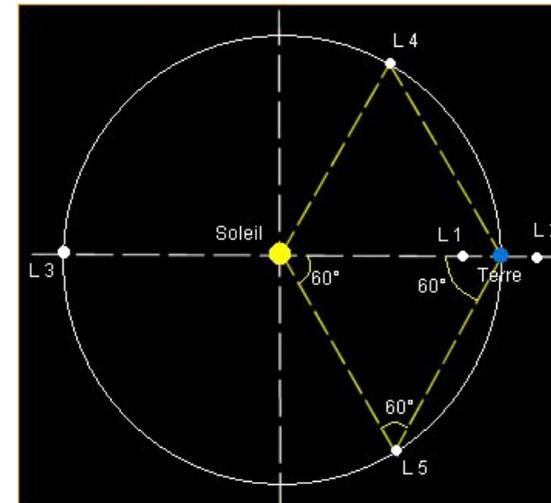
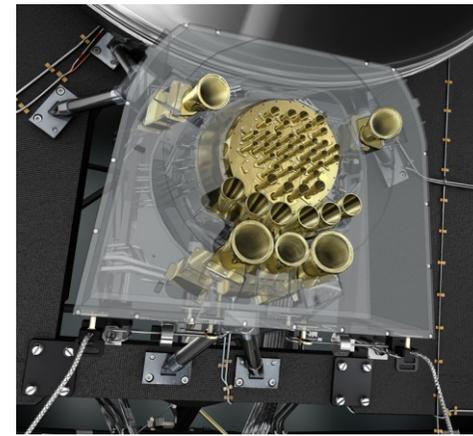
La mission Planck

- 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^{ème} 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

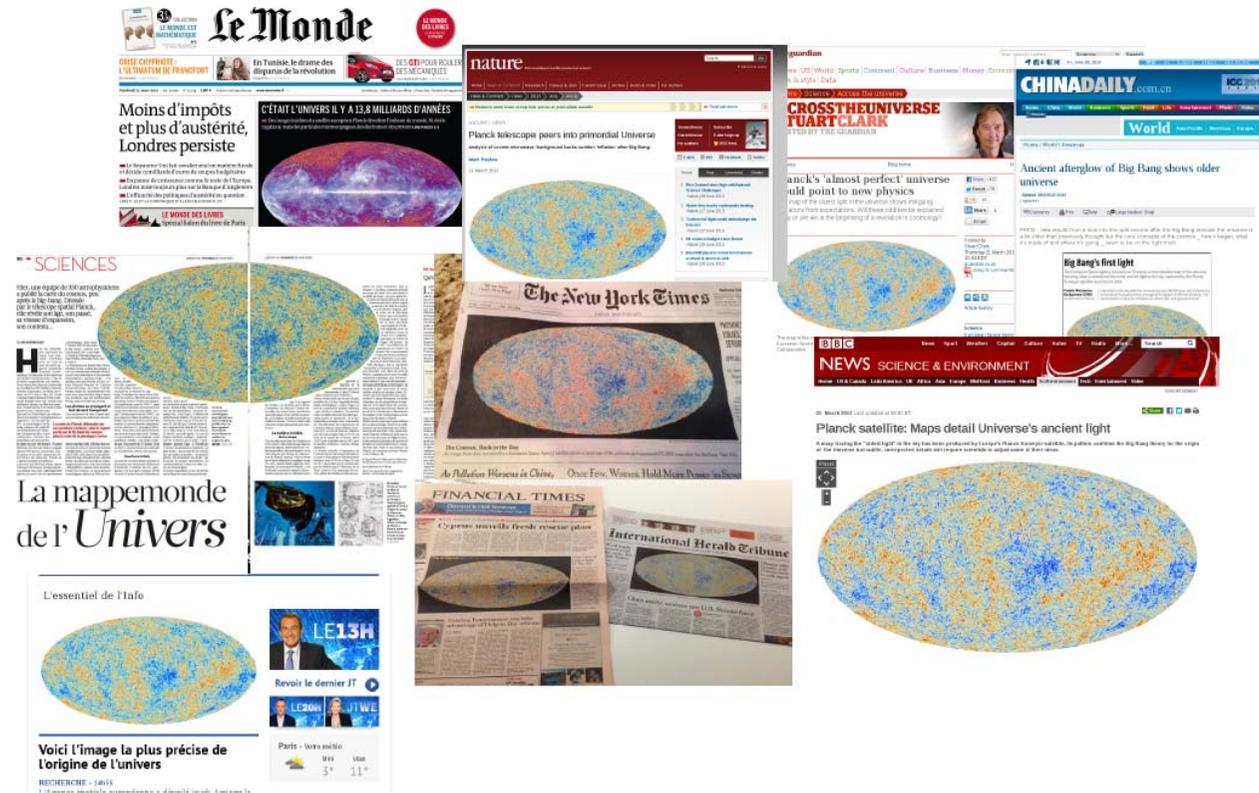
- **Détecteurs** : des **bolomètres** capables de mesurer le très faible dépôt d'énergie laissé par un photon (par exemple du CMB)
- Système **cryogénique** extrêmement sophistiqué
 - Les bolomètres les plus froids sont à **0,1 K**
- Satellite envoyé au « **point de Lagrange L2** » du système Soleil-Terre
- **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



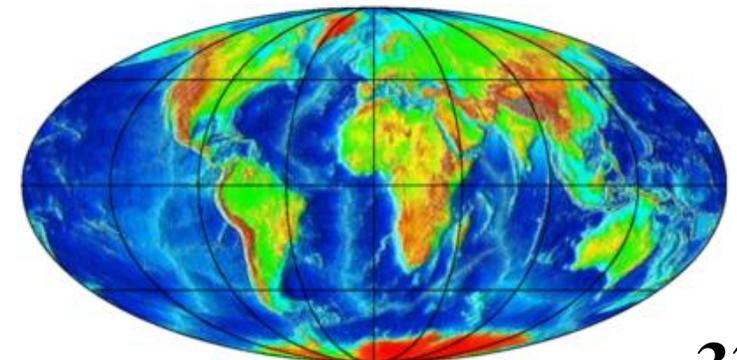
Film « Planck en action »

Résultats cosmologiques : 21 mars 2013

- Information largement reprise dans **les médias**



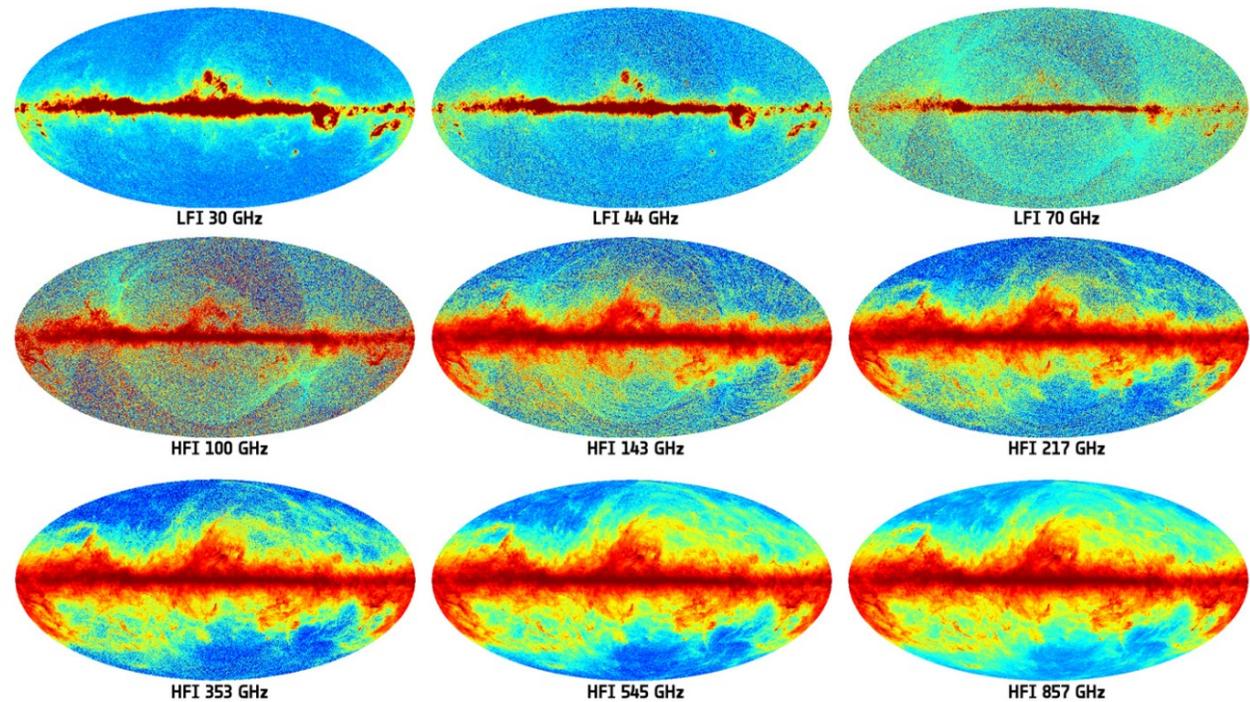
- **Cartes du ciel « ovales »**
 - Voici l'équivalent pour un planisphère terrestre
 - La carte inclut toutes les directions possibles
 - Chaque direction n'est présente qu'une seule fois



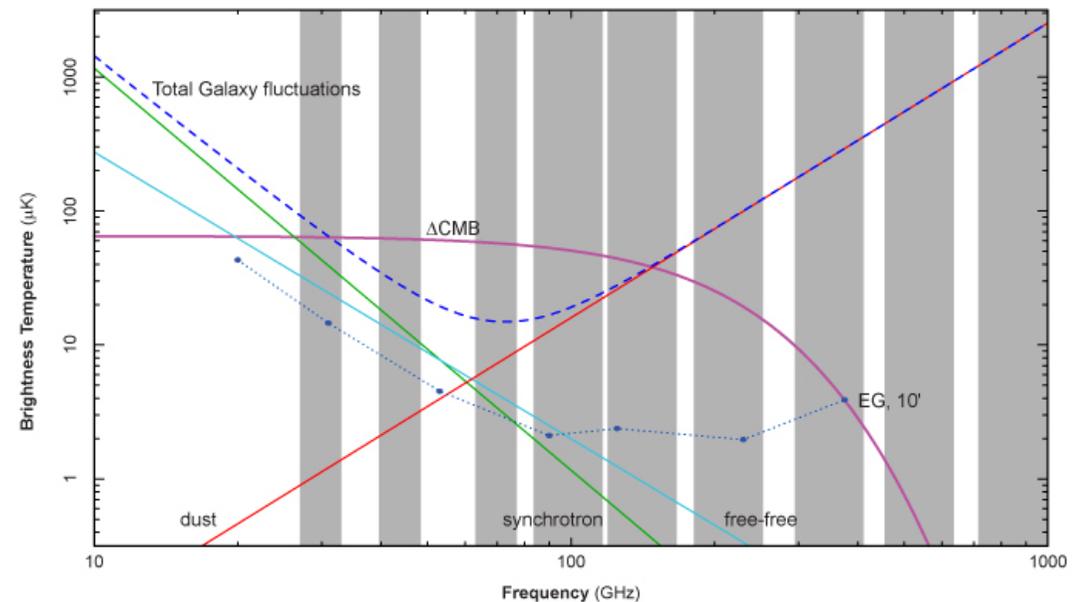
Le ciel vu par Planck

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

Planck all-sky foreground maps

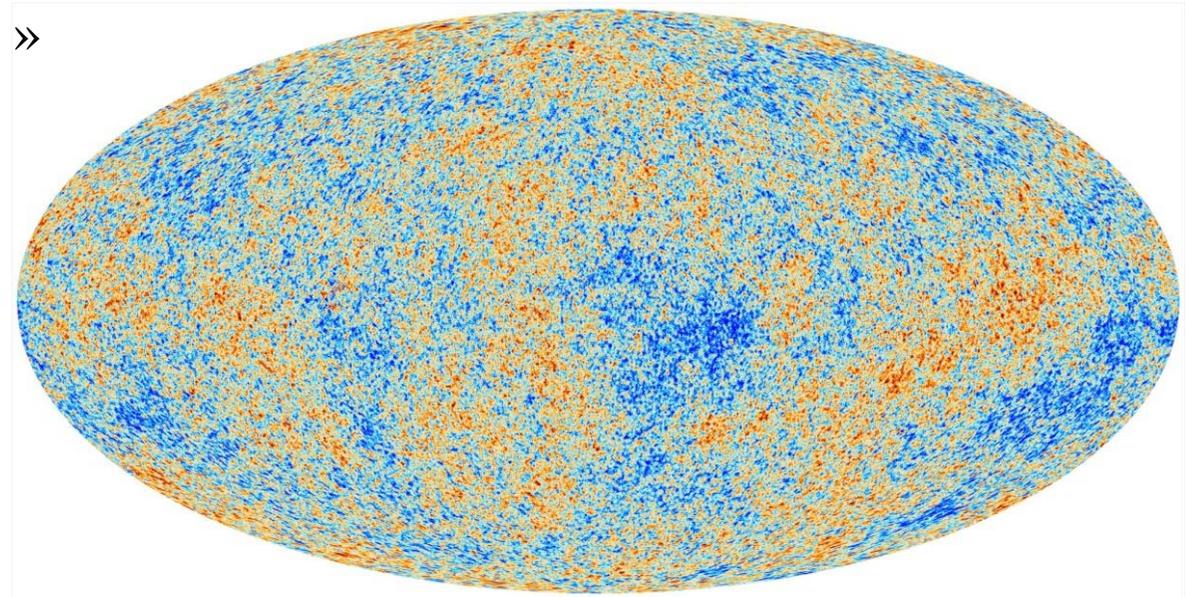


- Contributions du signal et des bruits de fond en fonction de la fréquence
 - Il faut contrôler les sources de bruit de fond pour les séparer du CMB



Résultats du satellite Planck

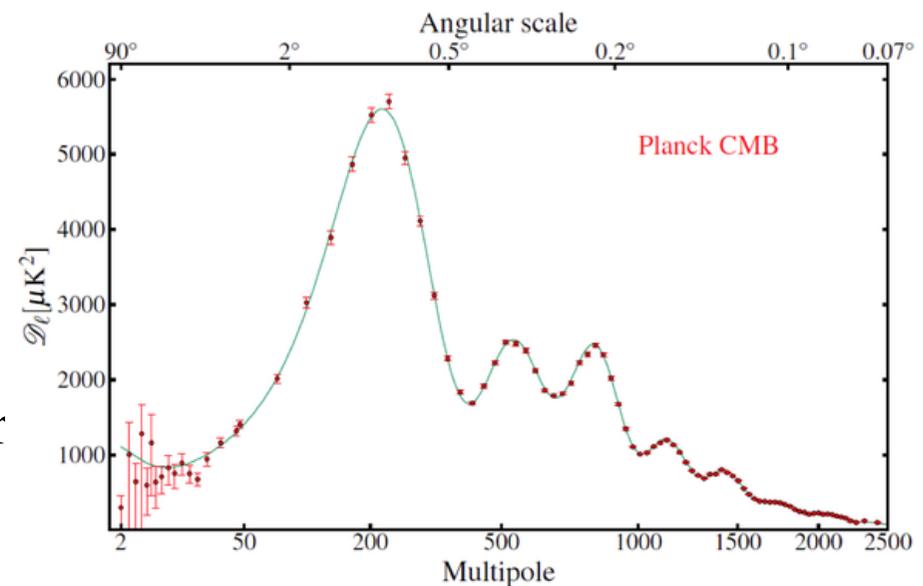
- « La première lumière de l'Univers »



- Traitement mathématique sophistiqué

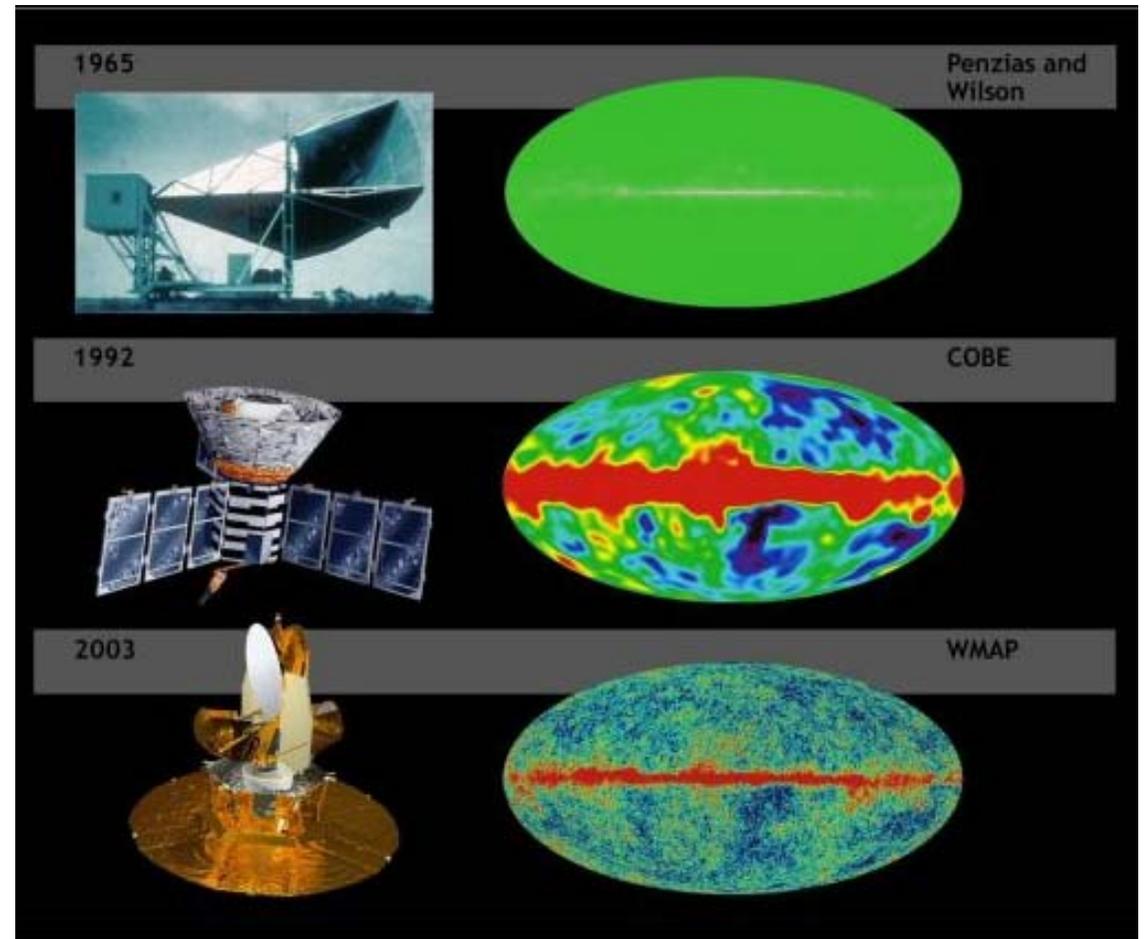
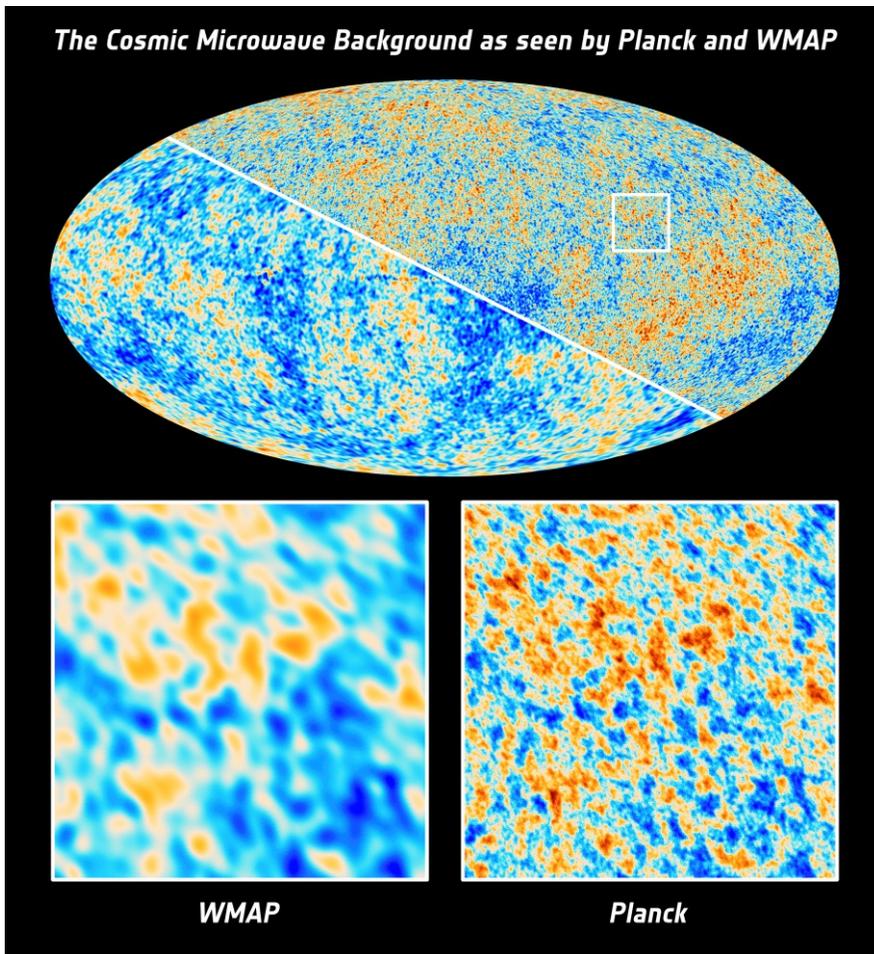
→ « Spectre de puissance »

- 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

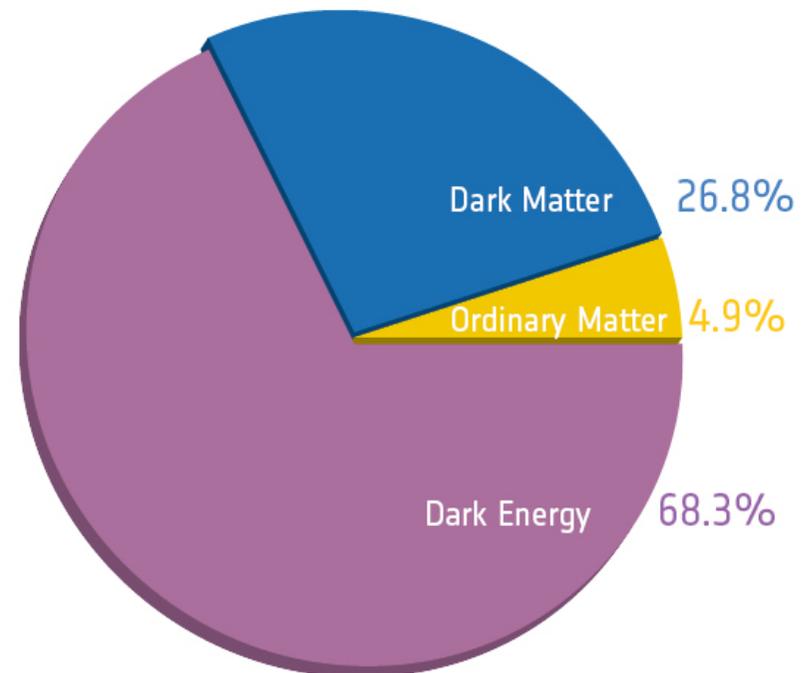
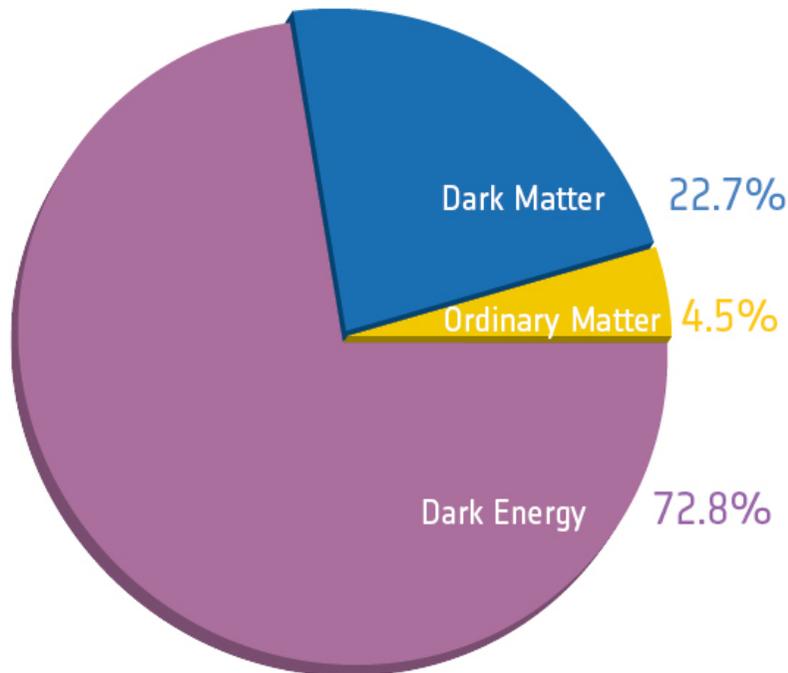
- **Penzias & Wilson** (1965)
- **Satellite COBE** (1992)
- **Satellite WMAP** (2002)
- **Satellite Planck** (2013)

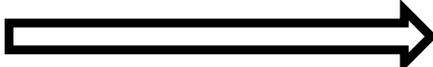


Interprétation des résultats de Planck

- Composition de l'Univers
 - Mesures plus précises

Matière ordinaire
Matière noire
Energie noire

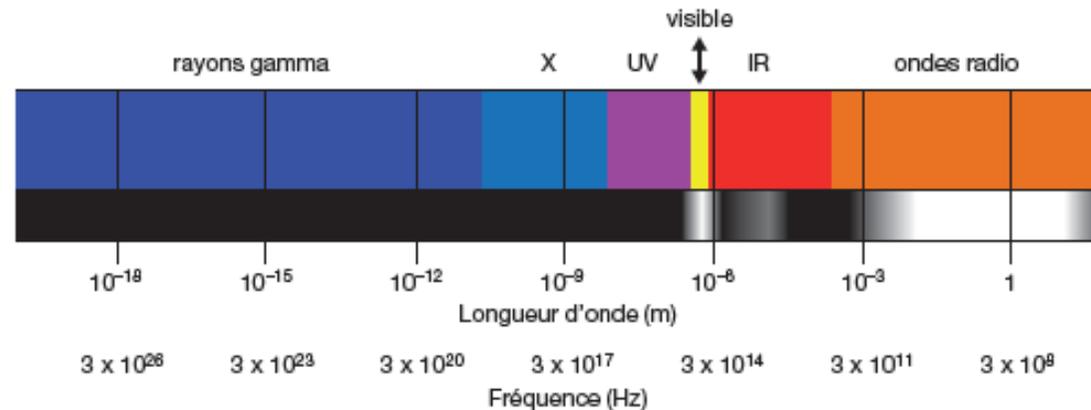


Avant Planck  **Après Planck**

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

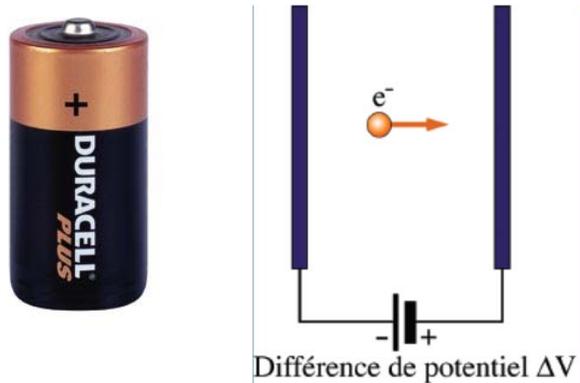
- Moyens :

- la force électromagnétique
- la relativité restreinte

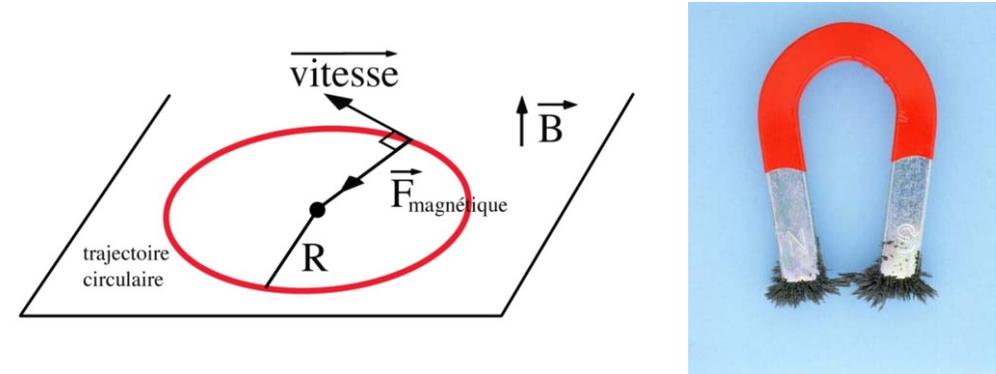
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \wedge \vec{B})$$
$$E = mc^2$$

Les accélérateurs de particules

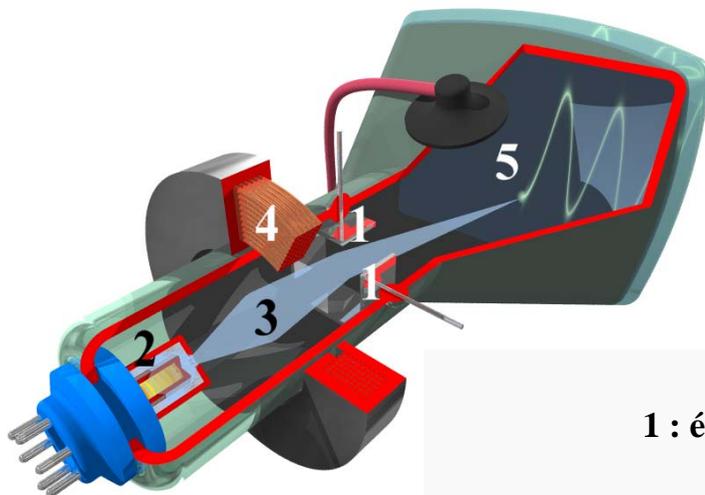
- On accélère des particules chargées à l'aide d'un champ électrique



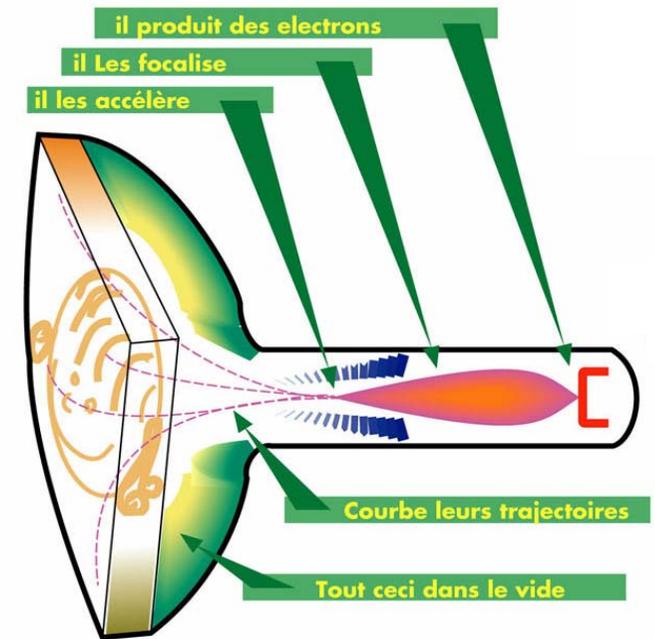
- On les pilote avec des champs magnétiques



→ 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



Intermède gourmand ...

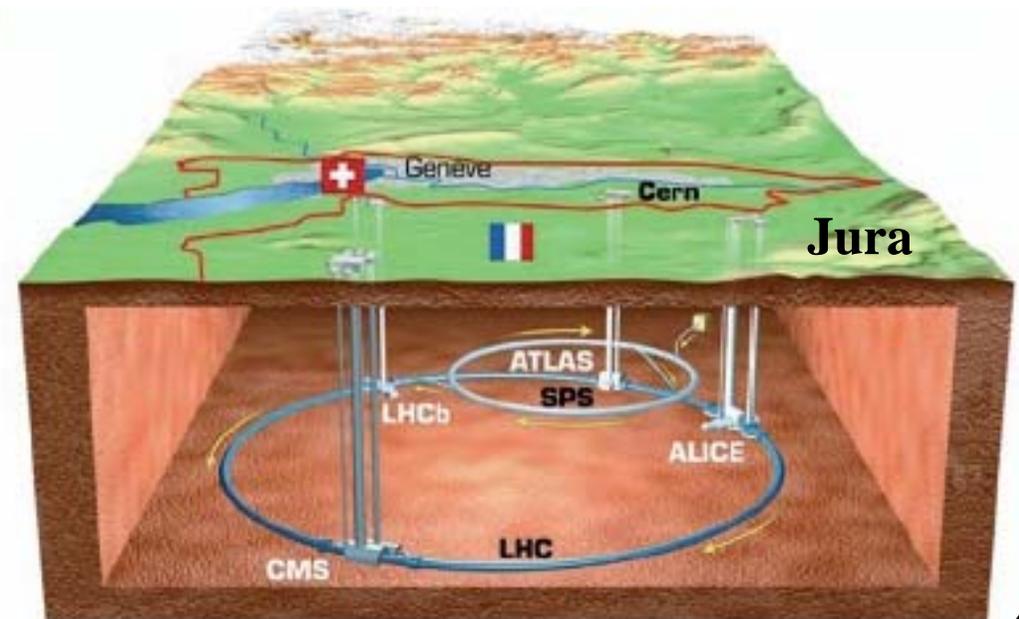


Le LHC



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

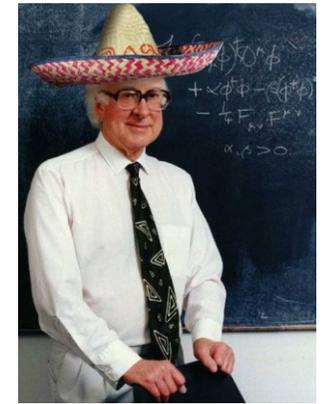
- **Des cathédrales de métal et d'électronique !**
 - Dimensions de **plusieurs dizaines de mètres**
 - Poids de **plusieurs milliers de tonnes** (\approx Tour Eiffel)
- Des **millions de canaux électroniques** reçoivent des informations lors des collisions
 - **Les particules déposent de l'énergie en 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**



Taille des détecteurs **ATLAS** et **CMS**



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 !!!!!



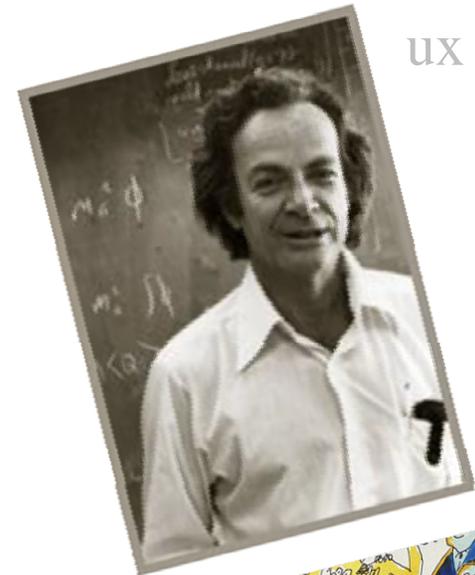
Le boson de Higgs



- 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 des fermions
- Petit problème de la masse des bosons
- Le boson de Higgs
- Problème de la masse des bosons

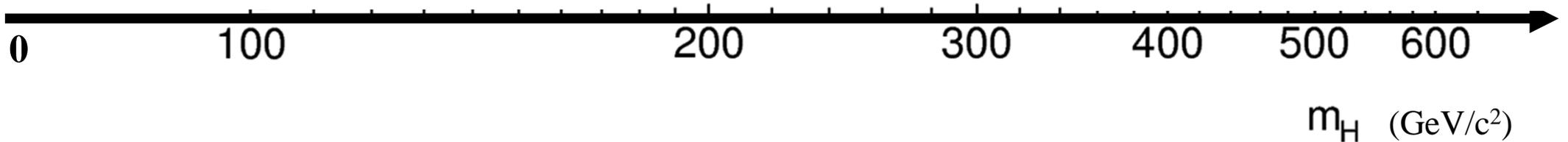


ux !



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”

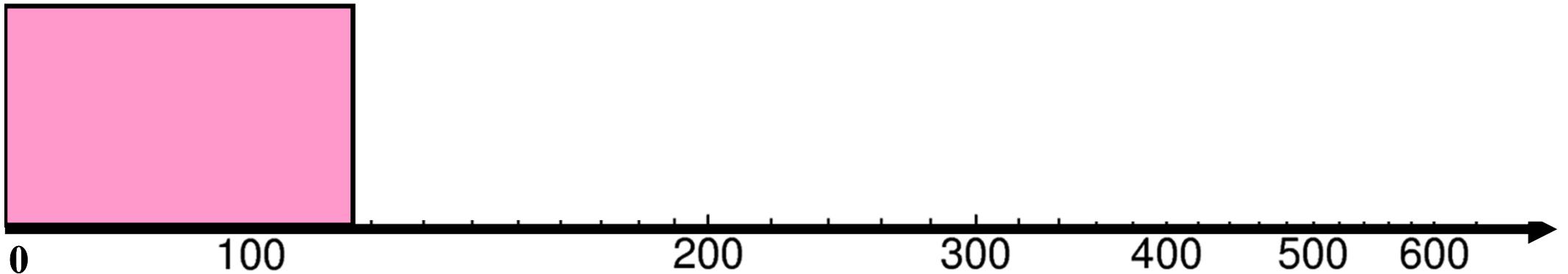
Energie actuelle de collisions au LHC : 8 “Téra [10^{12}] électron-Volt” (**TeV**)

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

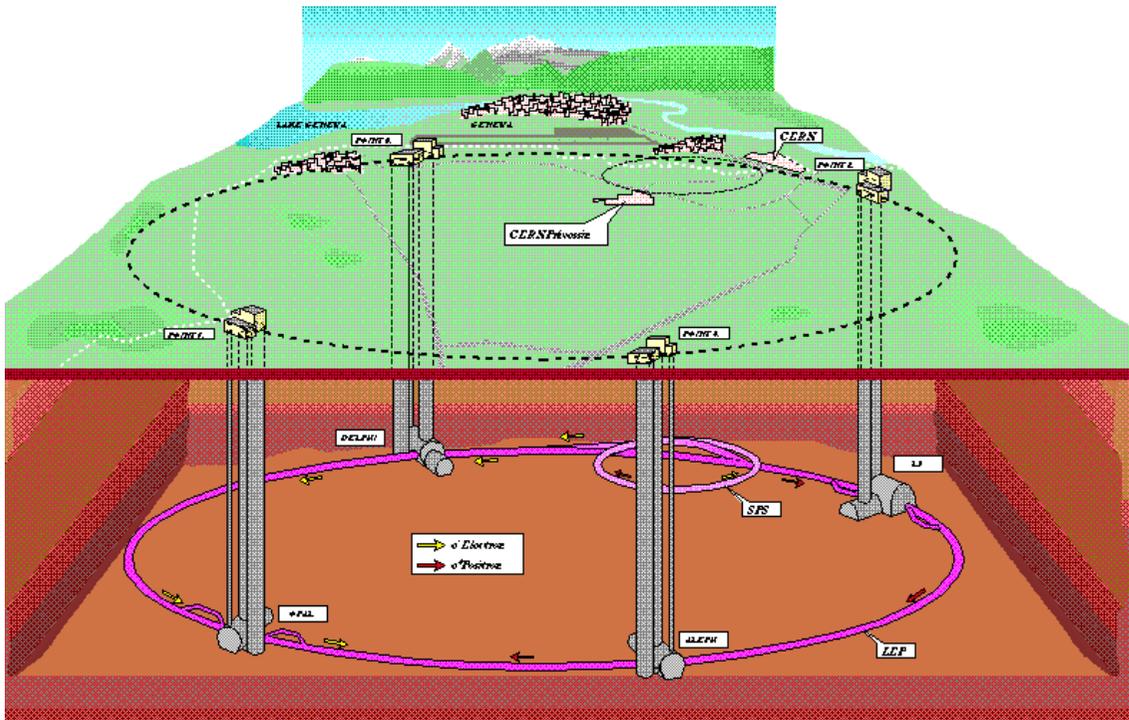
La chasse au boson de Higgs

LEP

1989-2000

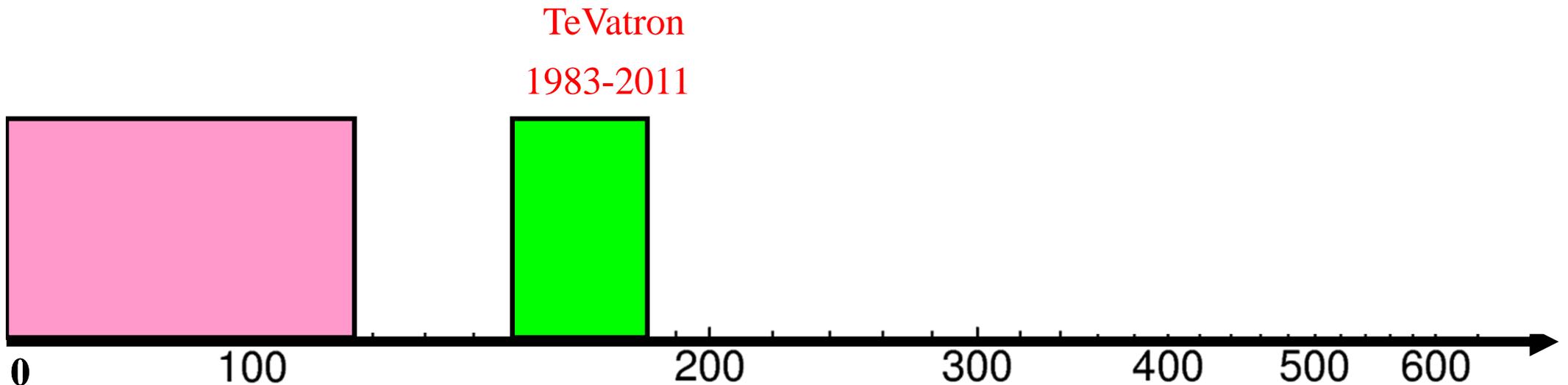


m_H (GeV/c²)



Le LEP au CERN
(près de Genève)

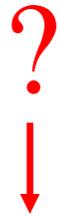
La chasse au boson de Higgs



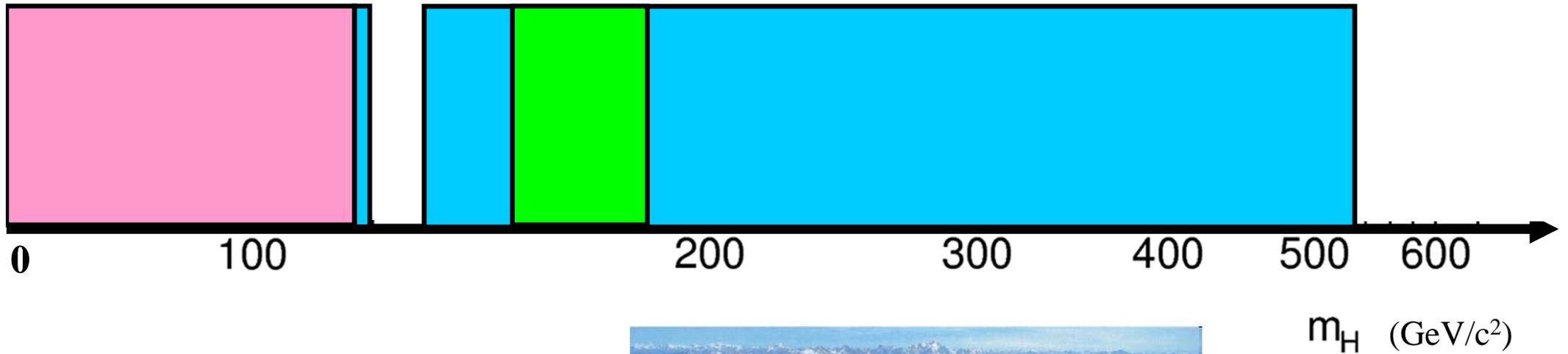
Le TeVatron
à Fermilab
(près de Chicago)



La chasse au boson de Higgs



LHC
2009-2011



Le LHC au CERN
(près de Genève)



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

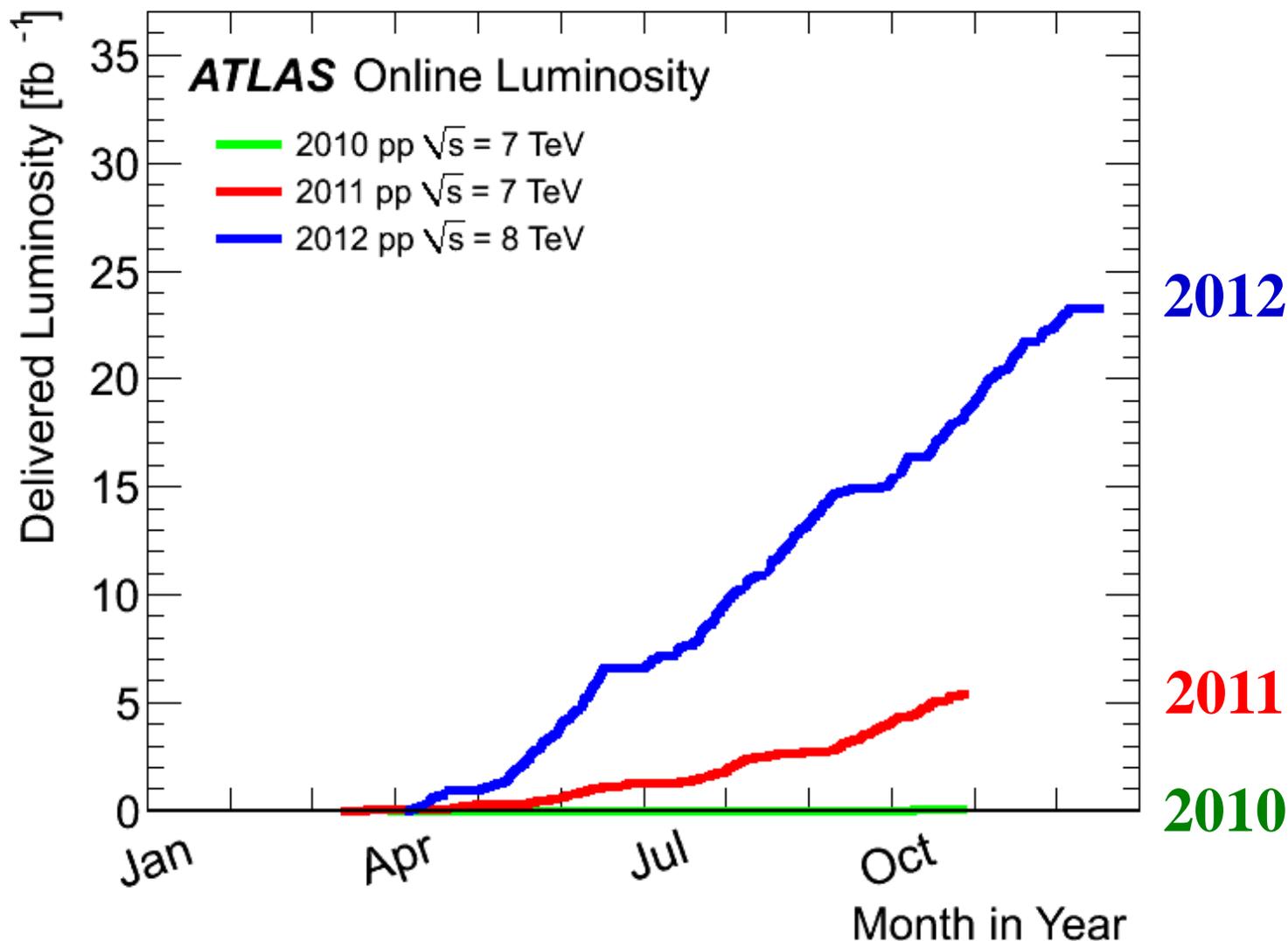
François Englert et Peter Higgs



" 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

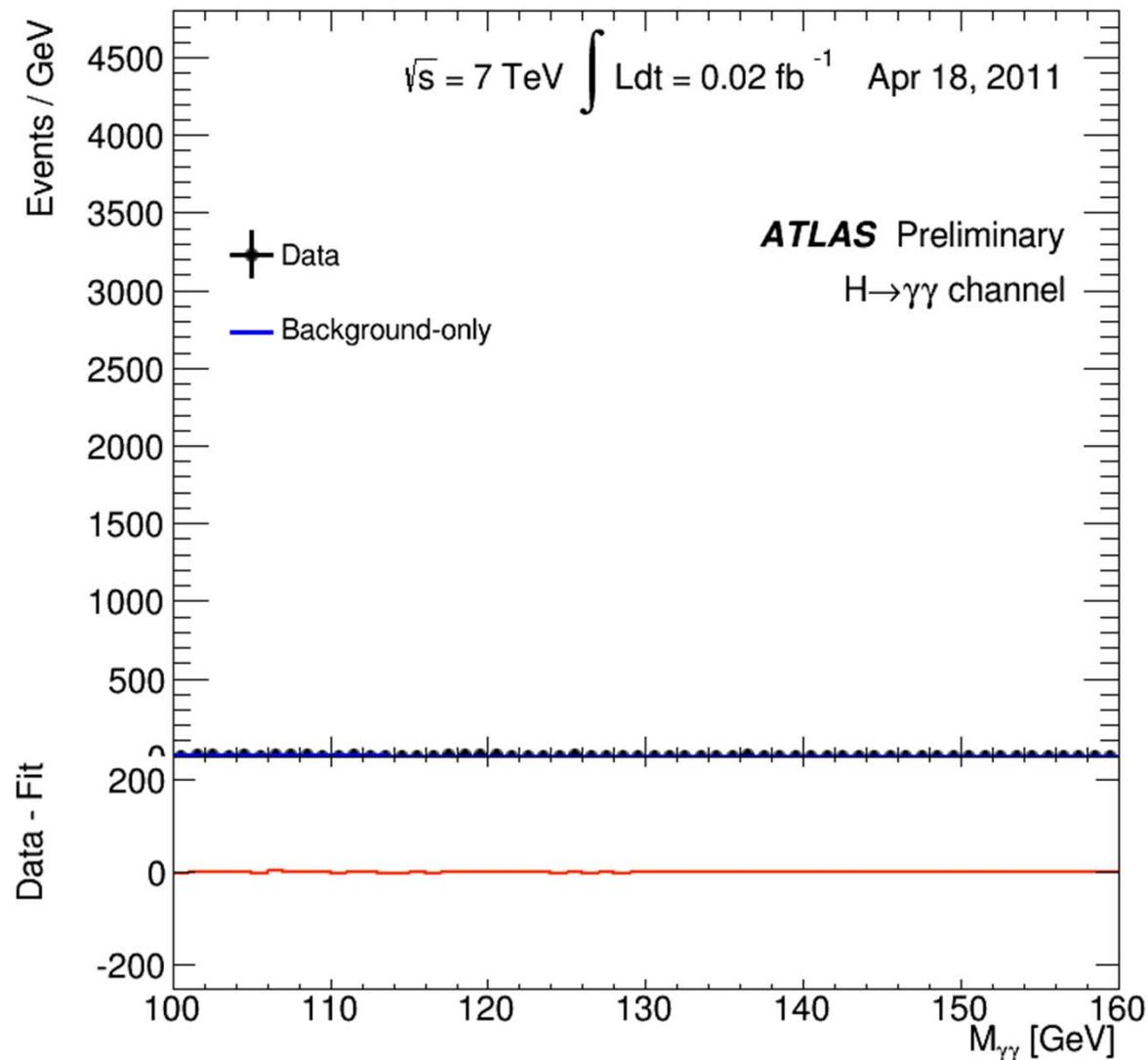
- La « **luminosité** » mesure la **quantité de données récoltées** par une expérience



- 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** ...

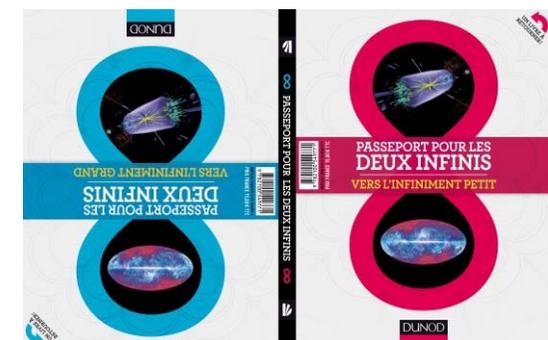


- ... à mesure que la **quantité de données analysées augmente** au cours du temps

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/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



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

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



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

*Cern : Organisation européenne pour la recherche nucléaire

Conférences dans les lycées

Cosmos à l'Ecole

Formations d'enseignants

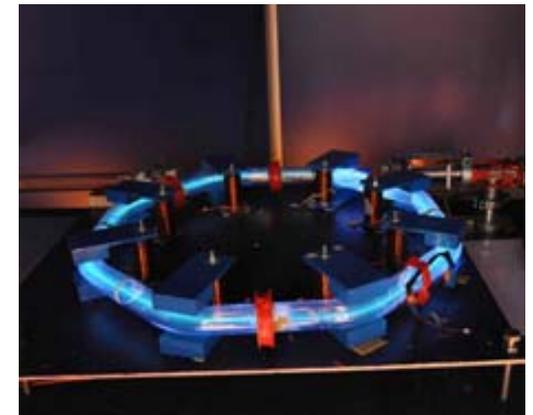
Masterclasses

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

10²⁶ m : L'UNIVERS

10¹⁶ m : TERRE

1 m : OBJET

10⁻¹⁰ m : CRISTAL

10⁻¹⁰ m : ATOME

10⁻¹⁴ m : NOYAU ATOMIQUE

10⁻¹⁵ m : PROTON

10⁻¹⁵ m : NEUTRON

10⁻¹⁶ m : MATIÈRE

LEPTONS
Particules insensibles à l'interaction forte.

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
e électron	μ muon	τ tau
ν _e neutrino électronique	ν _μ neutrino muonique	ν _τ neutrino tauique

QUARKS
S'assemblent en triplets ou en paires, sont chargés pour former les particules subatomiques.

1 ^{re} famille	2 ^e famille	3 ^e famille
u haut / up	c charm / charme	t top
d bas / down	s strange / étrange	b beauty / beauté

Les interactions fondamentales

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

- Gravitation**
Attraction astronomique, planètes, galaxies.
GRAVITON?
- Interaction faible**
Désintégrations radioactives.
Z⁰, W⁺, W⁻
- 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.

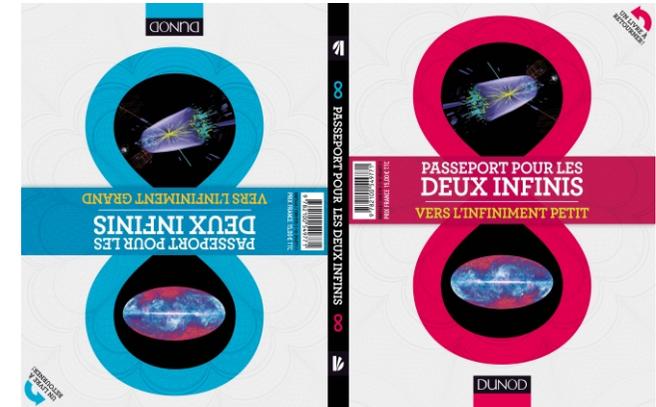
- Gravitation de l'atome jusqu'à la galaxie
- Interaction électromagnétique de la lumière à la chimie
- Interaction forte de la matière à la physique nucléaire
- Interaction faible de la radioactivité à la physique des particules

Les 4 particules de la physique fondamentale sont présentées dans le tableau ci-dessus. Le tableau ci-dessous présente les particules de matière et de force.

http://www.lal.in2p3.fr

Le passeport pour les 2 infinis

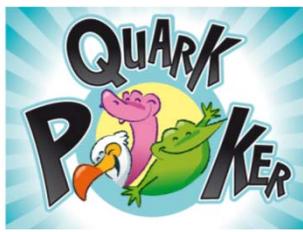
- Un livre **réversible** de 192 pages couleur (Dunod)
 - Côté **pile** : **vers l'infiniment petit**
 - Côté **face** : **vers l'infiniment grand**
- **Courts articles** (2 pages)
 - **Principales notions du domaine**
 - **Description des grandes expériences actuelles** (Planck, LHC, etc.)
 - Quelques 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, ≥ 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

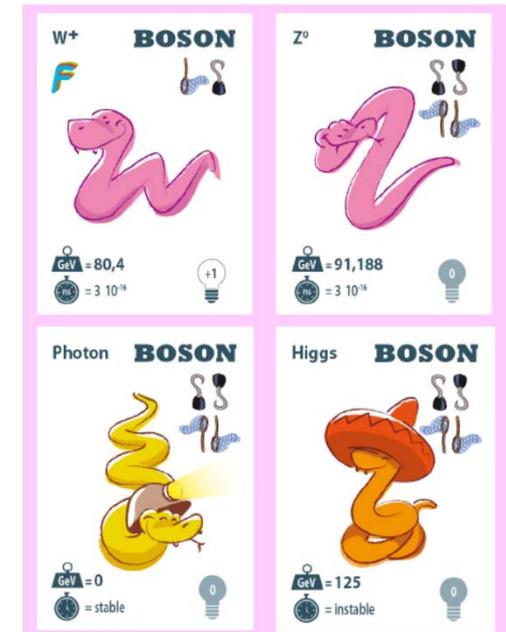




Le Quark poker



- 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



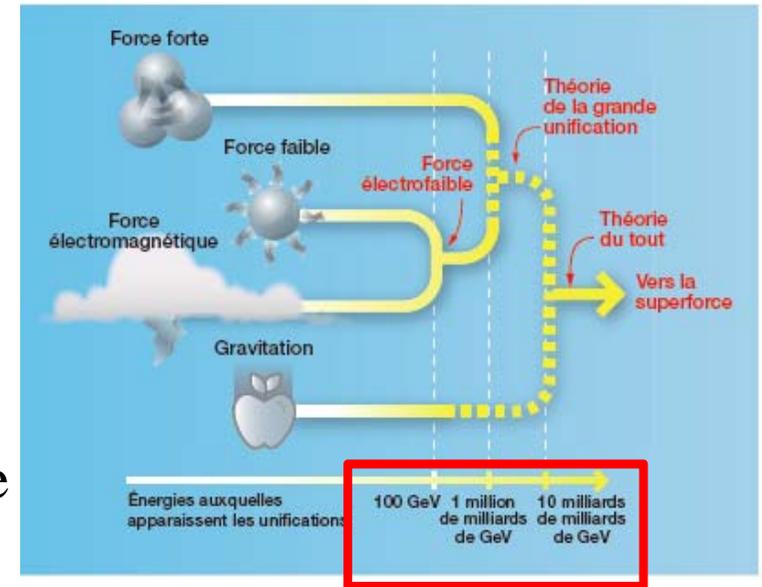
Pour en savoir plus sur le LHC

- 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>

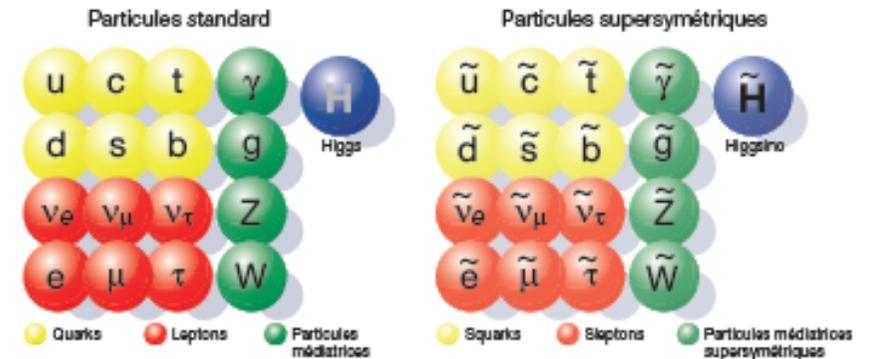
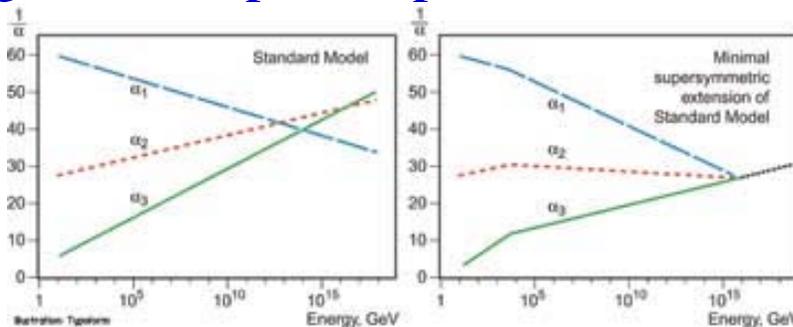
Questions ouvertes

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]



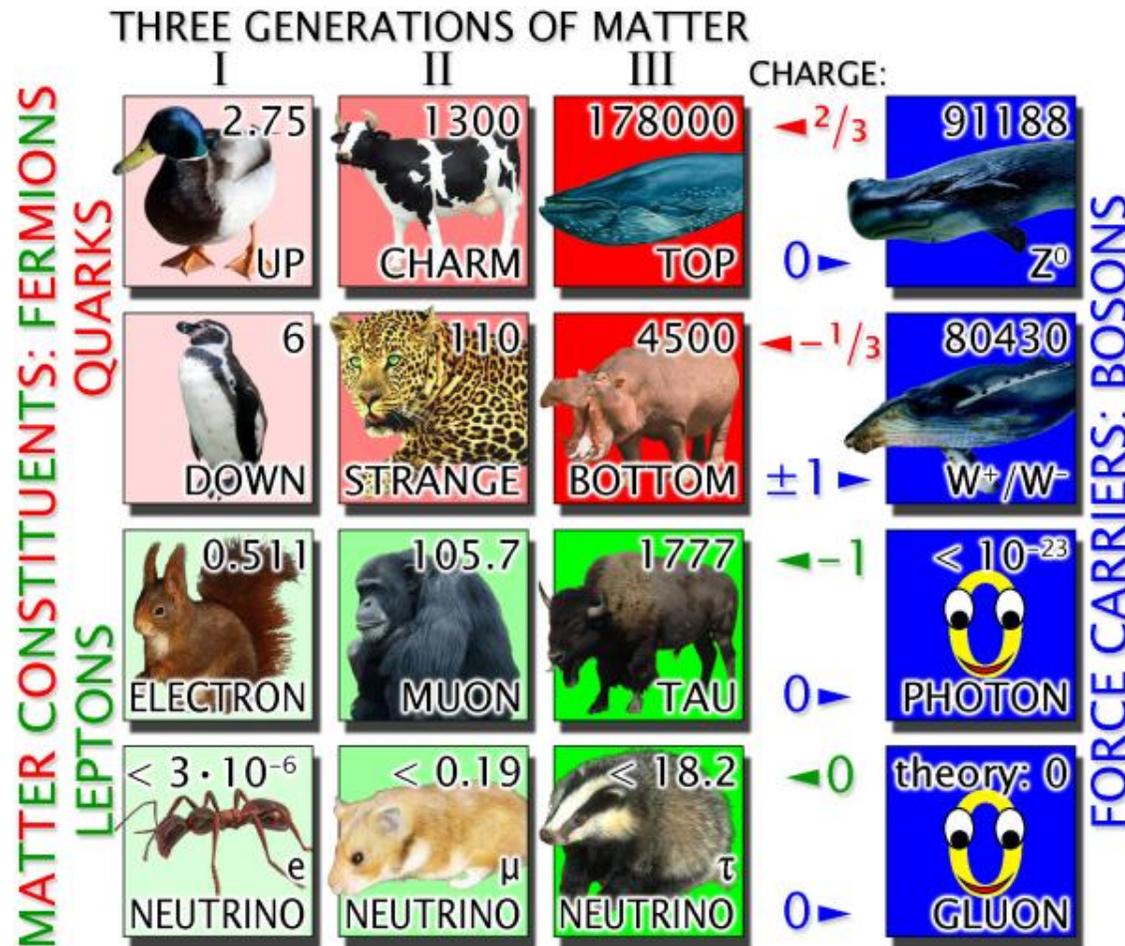
- Les unifications suivantes auraient lieu à des **échelles d'énergie extrêmes**
 - Très difficile de tester des théories unifiées
 - Désintégration du proton pas observée ($\tau > 10^{32}$ années)



- **Pas de théorie actuellement satisfaisante**
 - Le Modèle Standard ne permet pas l'unification
 - **Nouvelle physique** : supersymétrie, 4^{ème} génération, etc.

La diversité des masses des particules élémentaires

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

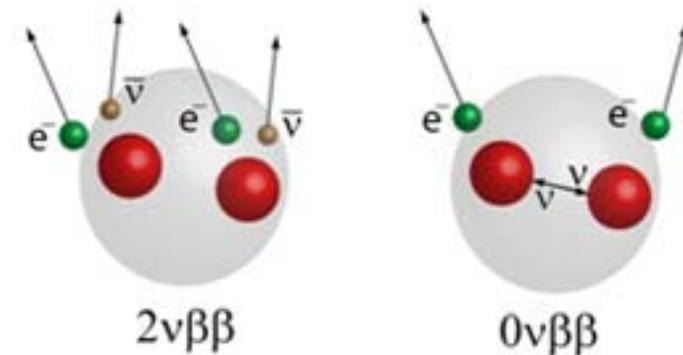
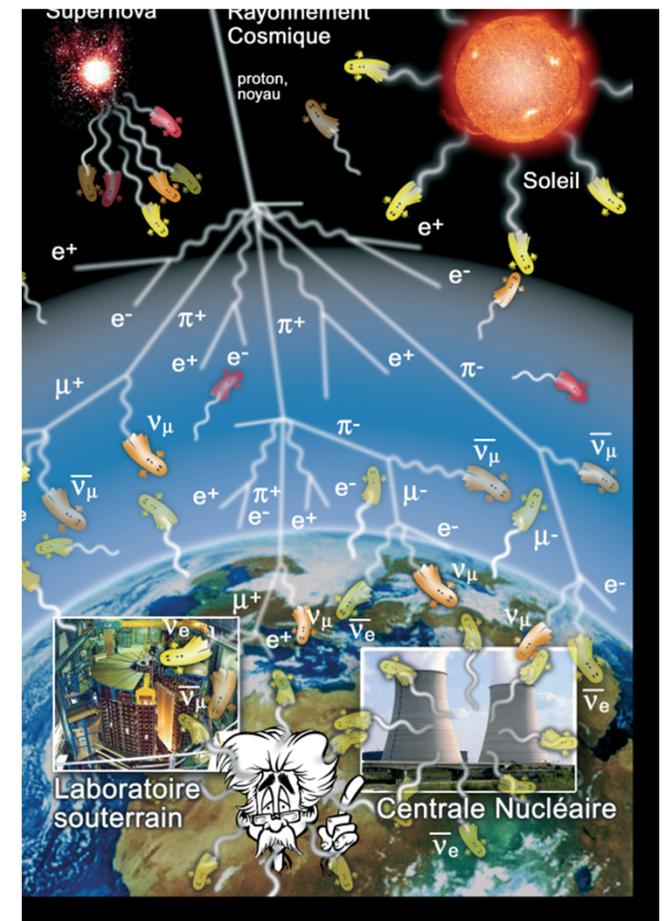


ALL MASSES IN MEV;
ANIMAL MASSES
SCALE WITH
PARTICLE MASSES

The Standard Model
fundamental particle zoo

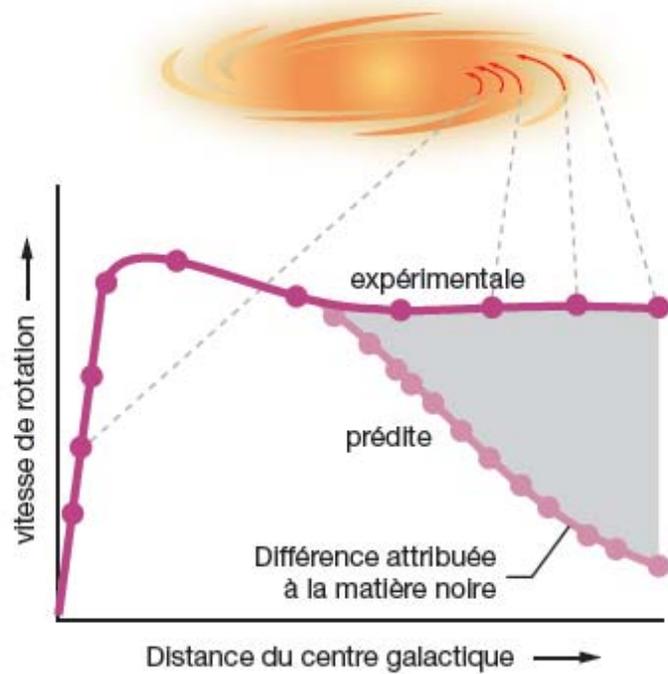
Les neutrinos

- 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 ?

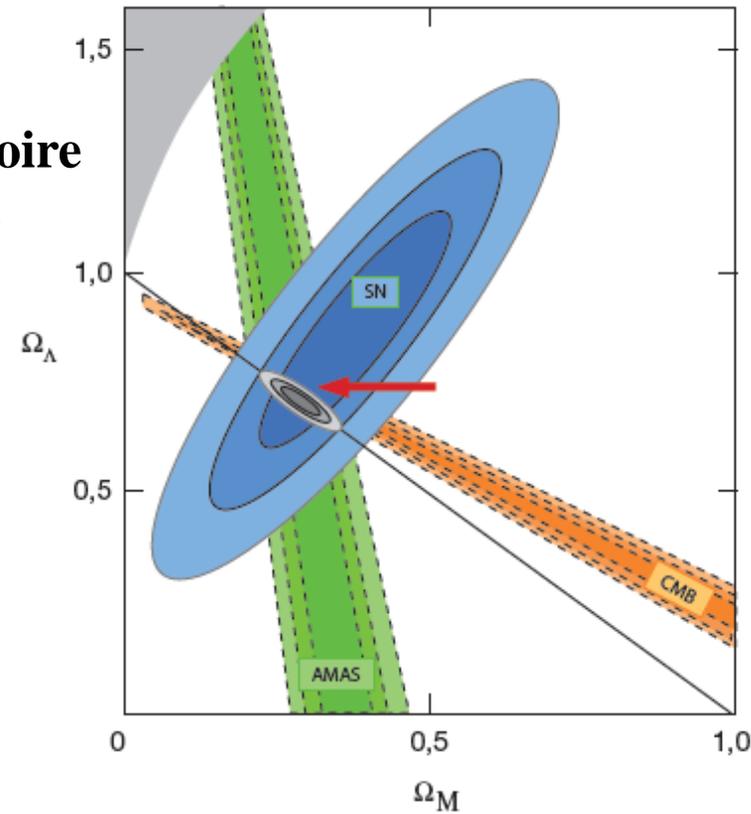


Matière noire & énergie noire

- Origine et constitution inconnues

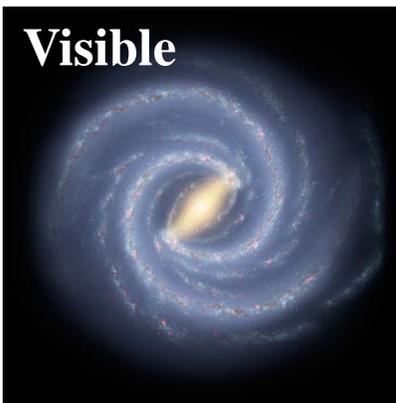


Énergie noire
~ 70%



Matière
~ 30%

Densité : ~ 3 atomes d'H / m³

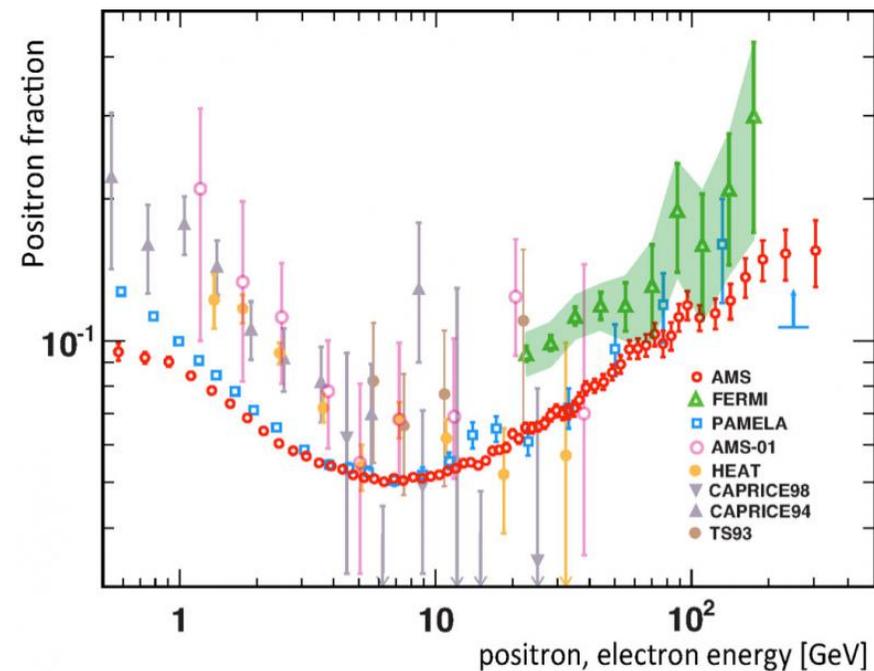
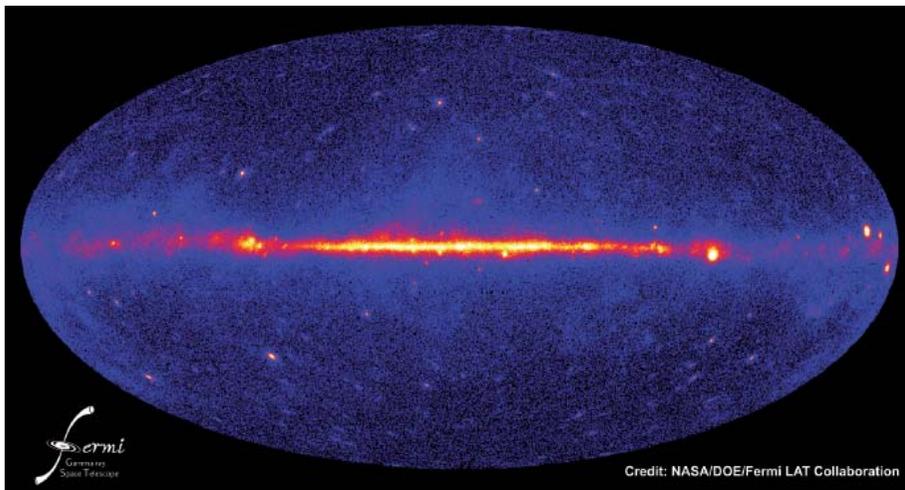


Représentations de la Voie lactée



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

