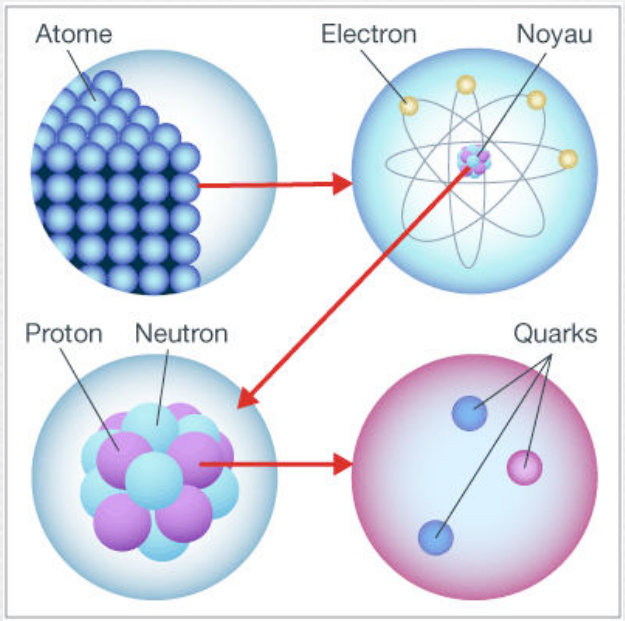
La connexion Physique des Particules/Cosmologie



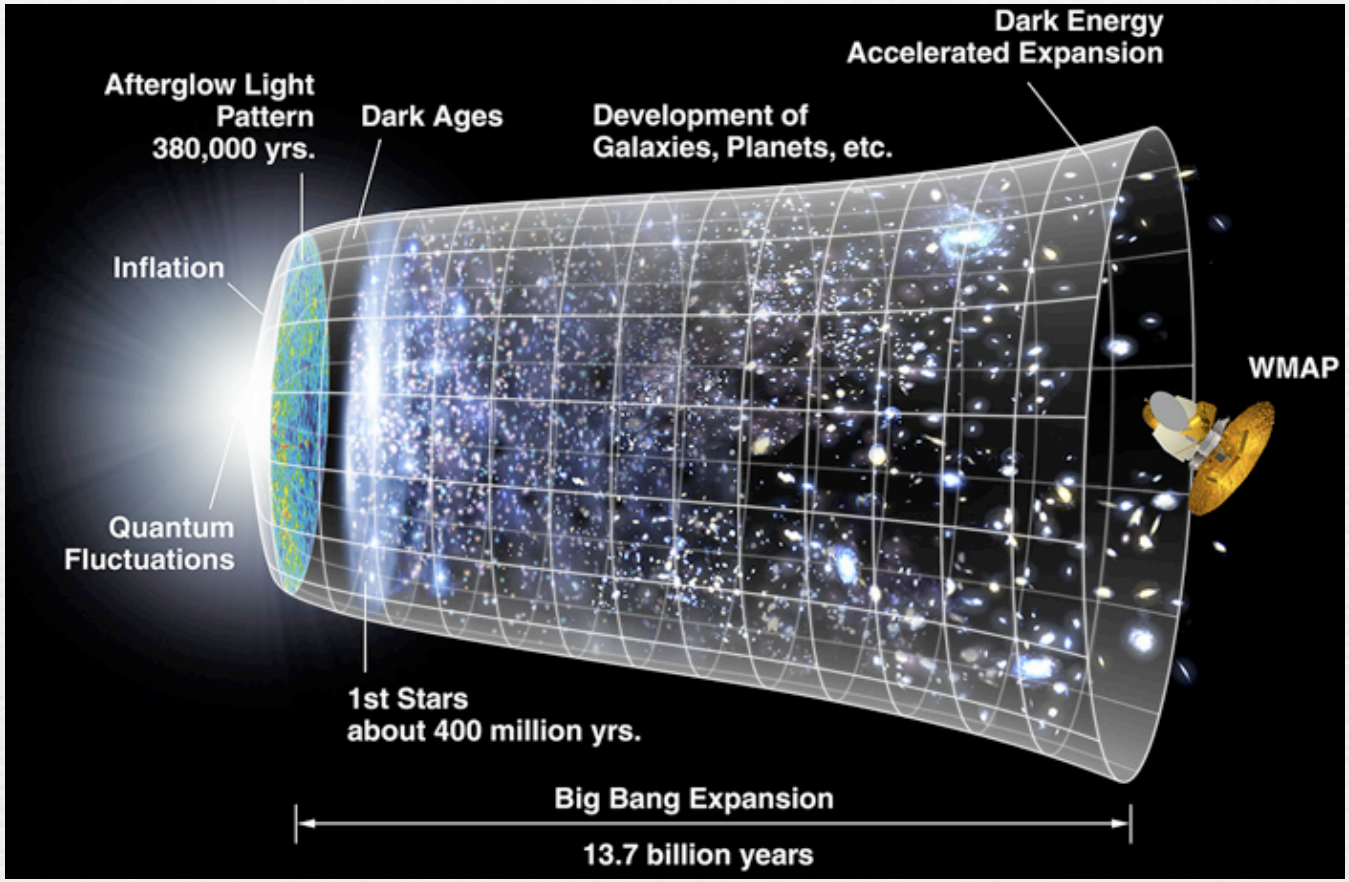
Géraldine SERVANT, CERN & IPhT CEA Saclay

Objet de la cosmologie: expliquer la structure et l'évolution de l'univers

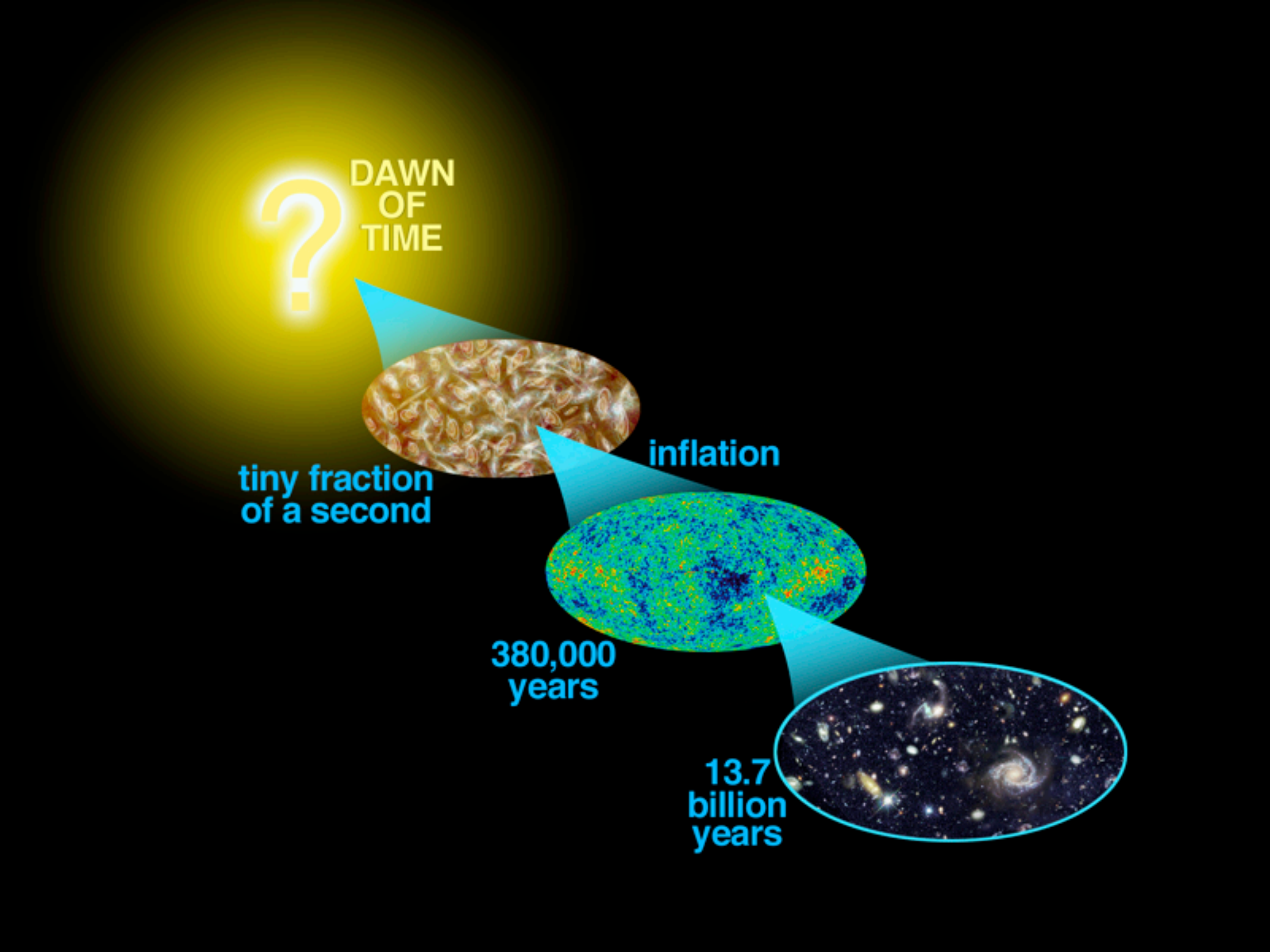
De quoi est-il constitué?

Comment se sont formées les grandes structures?

Quelles sont les lois qui régissent son évolution ?

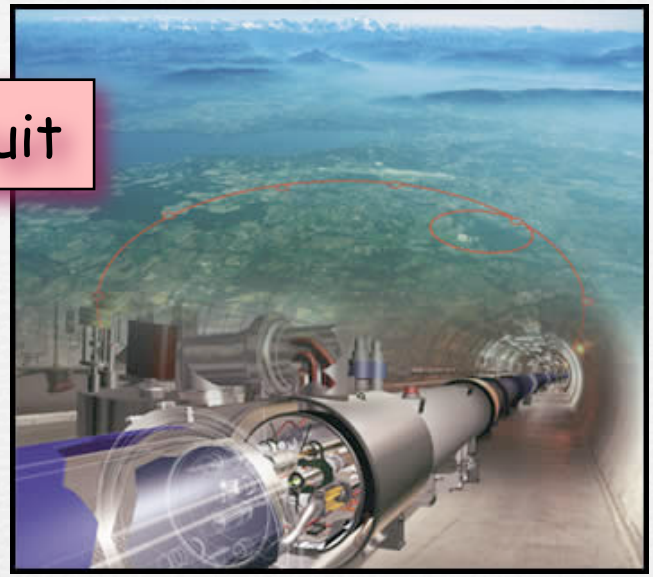


Au cours du 20ème siecle, nous sommes passés d'une connaissance quasi-nulle de notre univers à l'établissement d'un "modèle standard cosmologique"

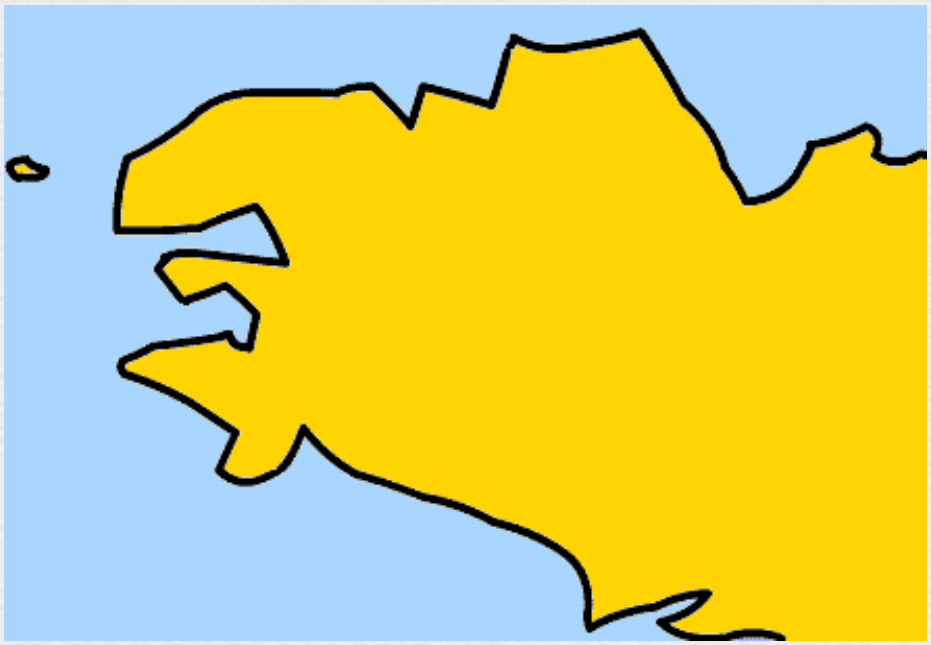

?
DAWN
OF
TIME
tiny fraction
of a second
inflation
380,000
years
13.7
billion
years

Le LHC (Large Hadron Collider)

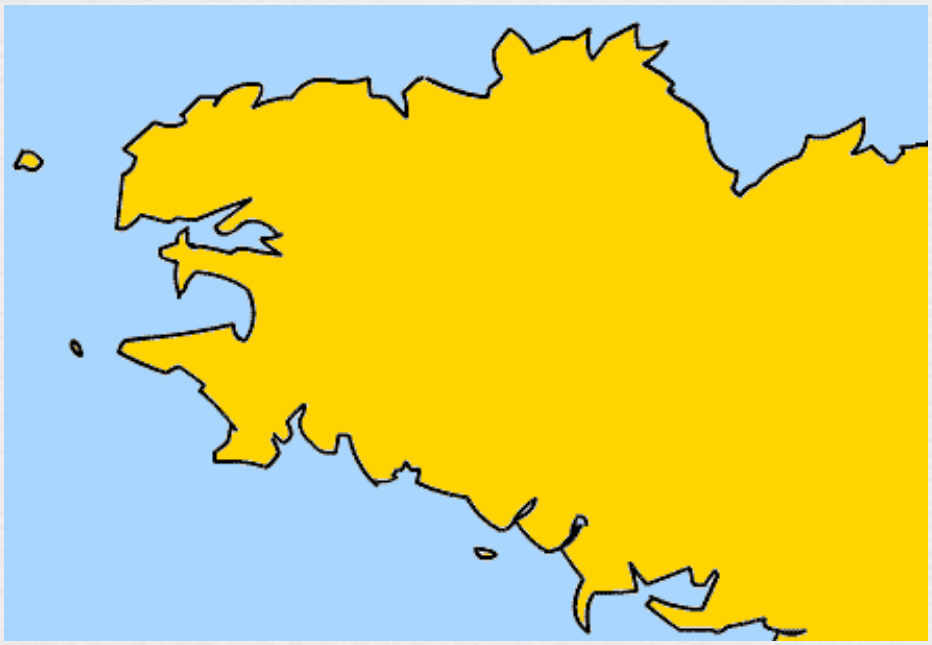
➔ Le LHC:Le plus grand microscope jamais construit



Plus d'énergie ⇛ possibilité d'étudier des détails de plus en plus fins



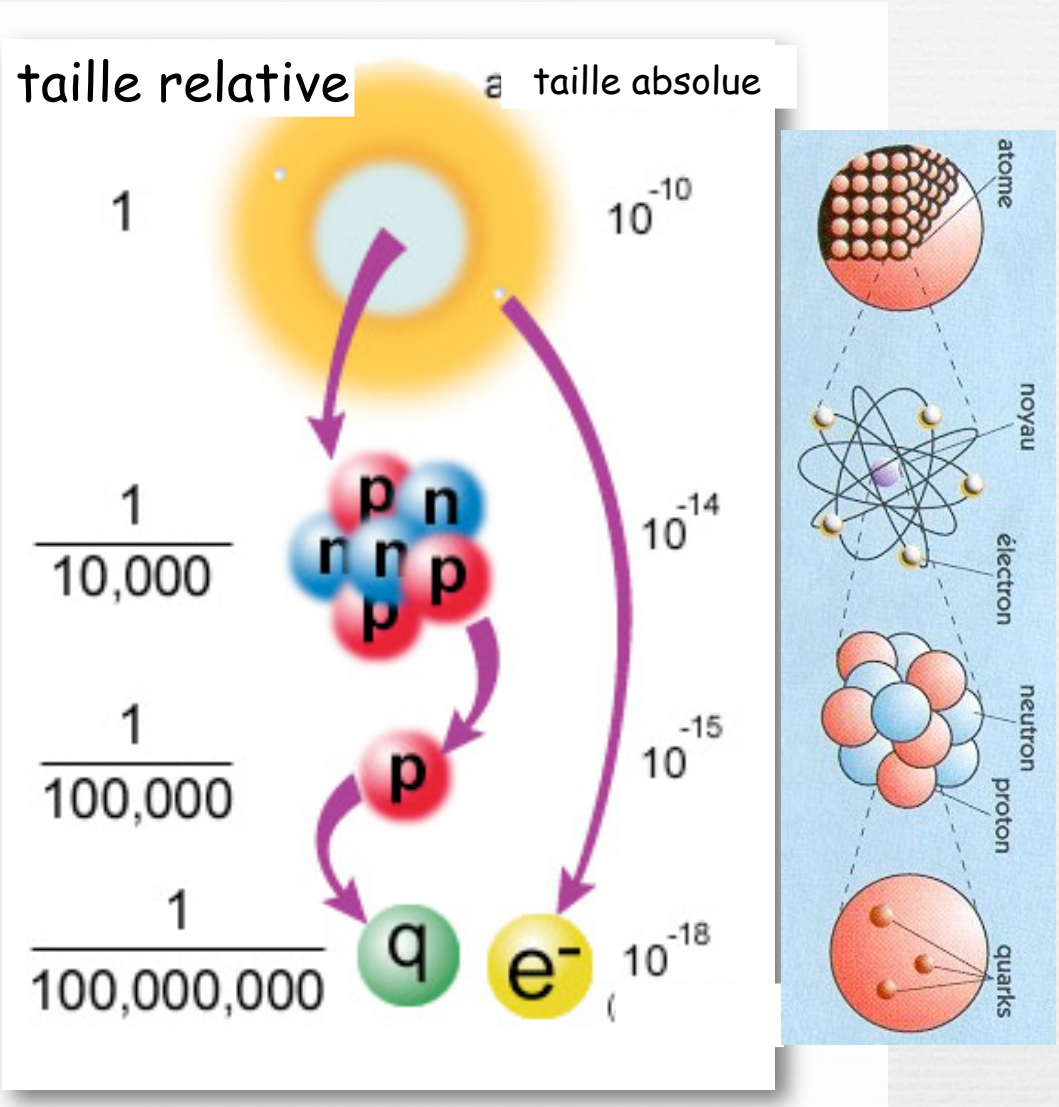
L = 400 km



L = 800 km

Les briques élémentaires de la matière

- La matière est faite de molécules ...
- Les molécules sont des assemblages d'atomes ...
- Les atomes sont composés d'un noyau et d'électrons ...
- Les noyaux sont faits de protons et de neutrons ...
- Protons et neutrons sont composés de quarks ...



Le volume d'un atome correspond à 100000000000000000000000 (24 zéros) fois le volume d'un électron ! La matière est formée de beaucoup de vide.

Sans ce vide, un être humain serait presque aussi lourd que le Soleil de notre Univers

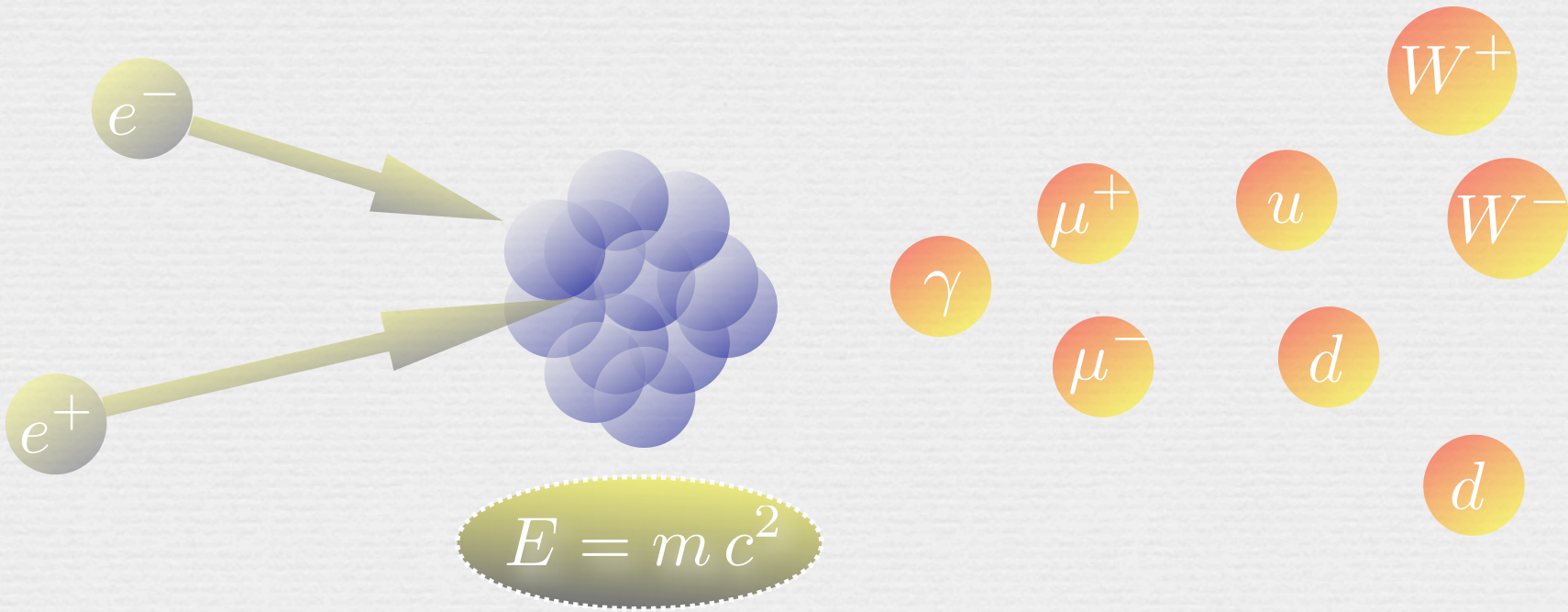
Création de matière à partir d'énergie

- ***Chimie : réarrangement de la matière***

  les différents constituants de la matière se réorganisent

$$CH_4 + 2\,O_2 \longrightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

- ***Physique des particules : transformation énergie ↔ matière***



électron-volt eV

L'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt.
Un électron-volt est donc égal à ... $1.6\,10^{-19}\mathrm{J}$

Mais combien ça pèse ?

les énergies du CERN : 1 TeV = 1000 millards d'eV = $10^{-24}\mathrm{kg}$

...mais en densité d'énergie... ça correspond à la masse de la Terre concentrée dans un cube de 1mm de côté!

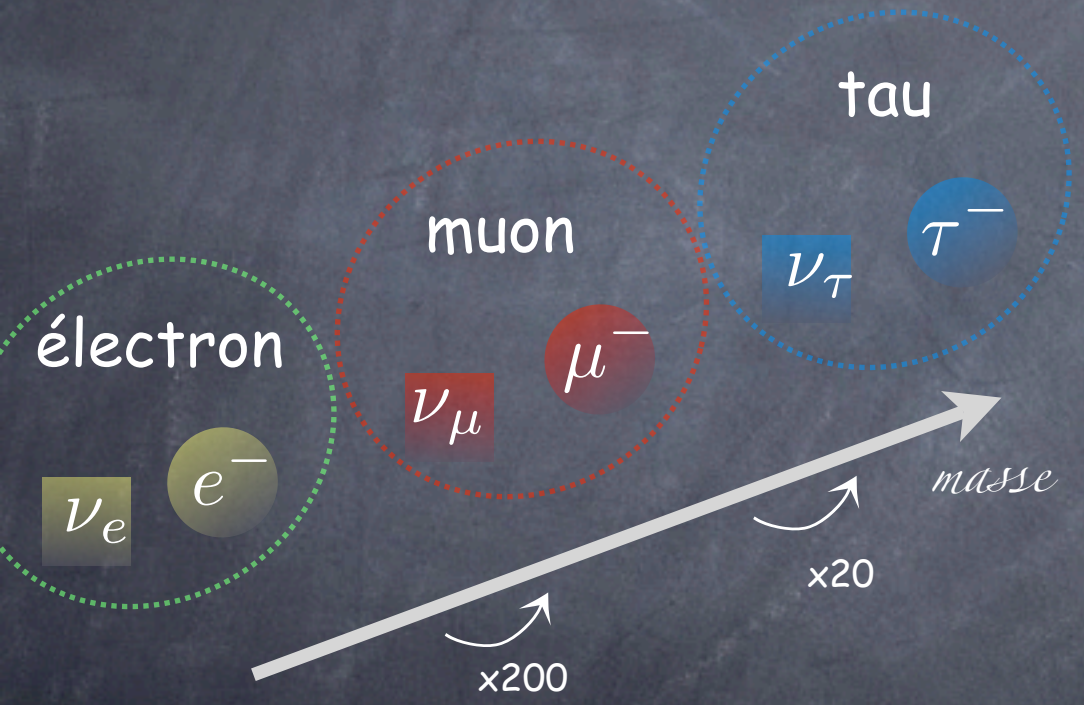
l'énergie cinétique d'un moustique : $10^{-3}\ J \sim 10^{16}\,\mathrm{eV} \sim 10^{4}\mathrm{TeV}$

Le Modèle Standard : la matière

Le code génétique de la matière

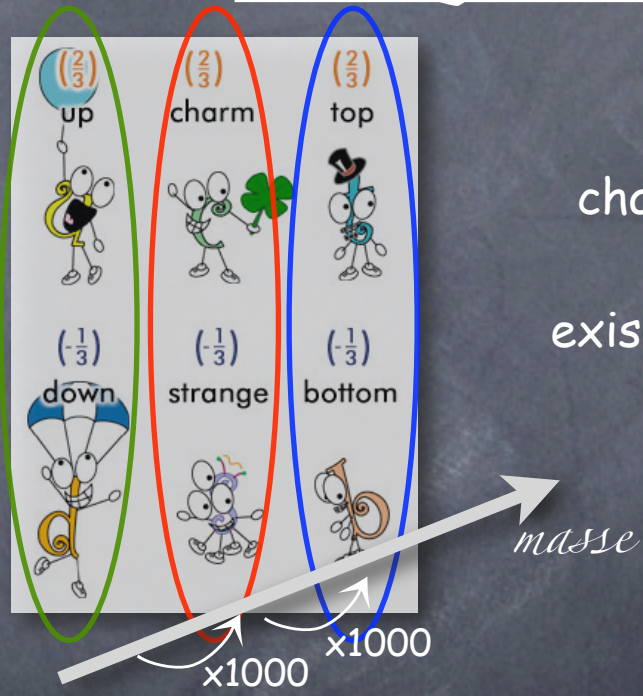
les briques élémentaires à partir desquelles sont faites toutes les autres particules

LES LEPTONS



pas d'états composites formés de leptons

LES QUARKS



chacun des six quarks existent en trois couleurs

états composites (objet blanc)

0 baryons

proton $p = (u, u, d)$

neutron $n = (u, d, d)$

0 mésons

+ antiparticules

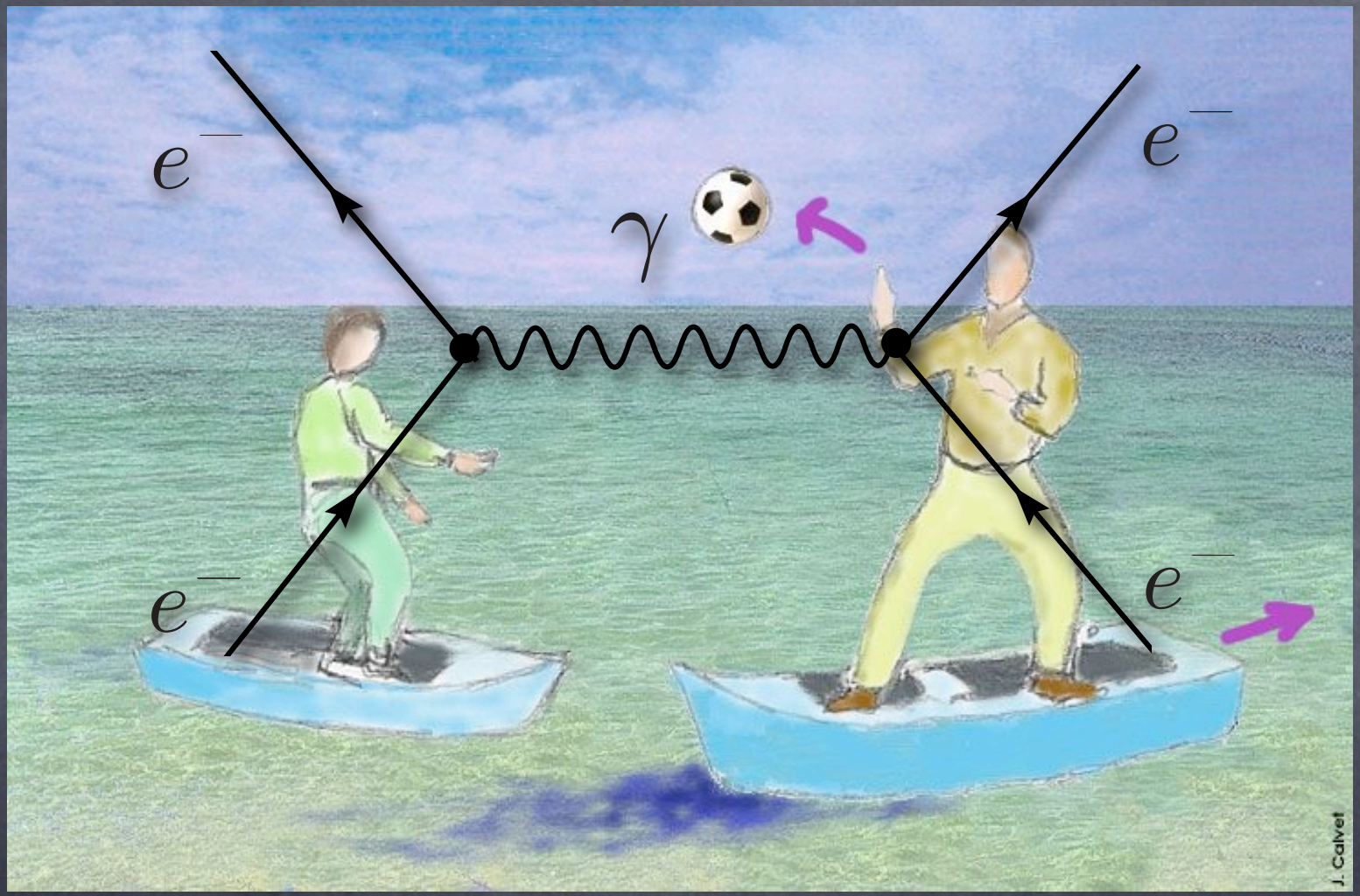
Le Modèle Standard : les interactions

- $U(1)_Y$ — *interactions électromagnétiques*
  - Photon γ
  - lumière, atomes, molécules
- $SU(2)_L$ — *interactions faibles*
  - bosons $W^{\pm}, Z^0$
  - désintégration β : $n \xrightarrow{W^{\pm}} p + e^- + \bar{\nu}_e$
- $SU(3)_C$ — *interactions fortes*
  - gluons g^a
  - noyaux atomiques
  - désintégration α : ${}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$

10^{-6} — 10^{-2} — 1

intensité

Les interactions entre les particules



Les particules élémentaires agissent les unes sur les autres par l'échange de bosons de jauge

Le Modèle Standard de la Physique des Particules

Forces | **Matière** | **"Milieu"**

$$\mathcal{L}_{\text{Standard Model}} = -F^{a}_{\mu\nu} F^{a\mu\nu} + (\lambda_{ij}\, \Psi_i \Psi_j\, h + h.c) + N_i M_{ij} N_j + |D_\mu h|^2 - V(h)$$

- $-F^{a}_{\mu\nu} F^{a\mu\nu}$: secteur de jauge
- $(\lambda_{ij}\, \Psi_i \Psi_j\, h + h.c)$: secteur de saveur
- $N_i M_{ij} N_j$: secteur des neutrinos (si Majorana)
- $|D_\mu h|^2 - V(h)$: secteur de la brisure de symétrie électrofaible

- un siècle pour le developper
- testé avec une précision impressionante
- décrit toutes les données experimentales en physique des particules

Le Modèle Standard de la Physique des Particules

Forces **Matière** **"Milieu"**

$$\mathcal{L}_{\text{Standard Model}} = - F^{a}_{\mu\nu} F^{a\mu\nu} + (\lambda_{ij}\, \Psi_i \Psi_j\, h + h.c) + N_i M_{ij} N_j + |D_\mu h|^2 - V(h)$$

secteur de jauge

secteur de saveur

secteur des neutrinos (si Majorana)

secteur de la brisure de symetrie electrofaible

- un siècle pour le developper
- testé avec une précision impressionante
- décrit toutes les données experimentales en physique des particules

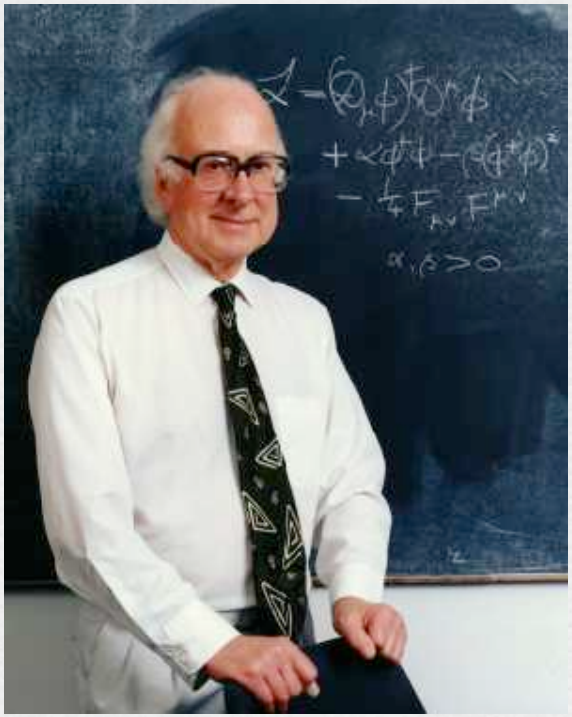
Le Higgs est la dernière pièce qui n'a pas été observée

et la porte vers les secteurs cachés de nouvelle physique

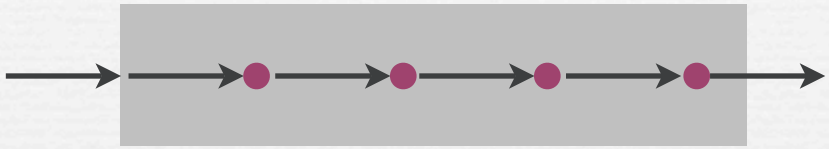
(c'est la seule particule fondamentale *scalaire*)

Quelle est l'origine de la masse des particules élémentaires?

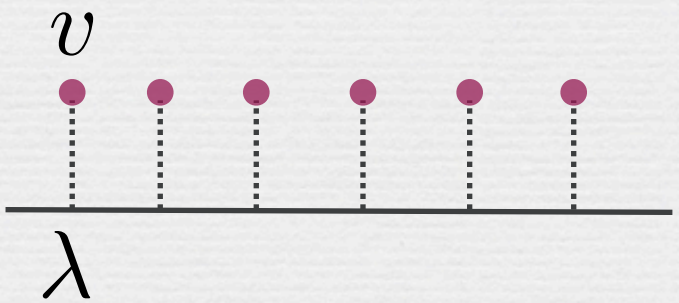
→ La recherche du Boson de Higgs



La lumière qui se propage dans un milieu matériel est ralentie par ses intéractions avec la matière



On peut concevoir le Higgs comme un milieu (le champ de Higgs) qui baigne tout l'univers. Les particules qui interagissent avec lui sont alors "ralenties". Cette interaction avec le Higgs leur donne une inertie ⇒ une masse.



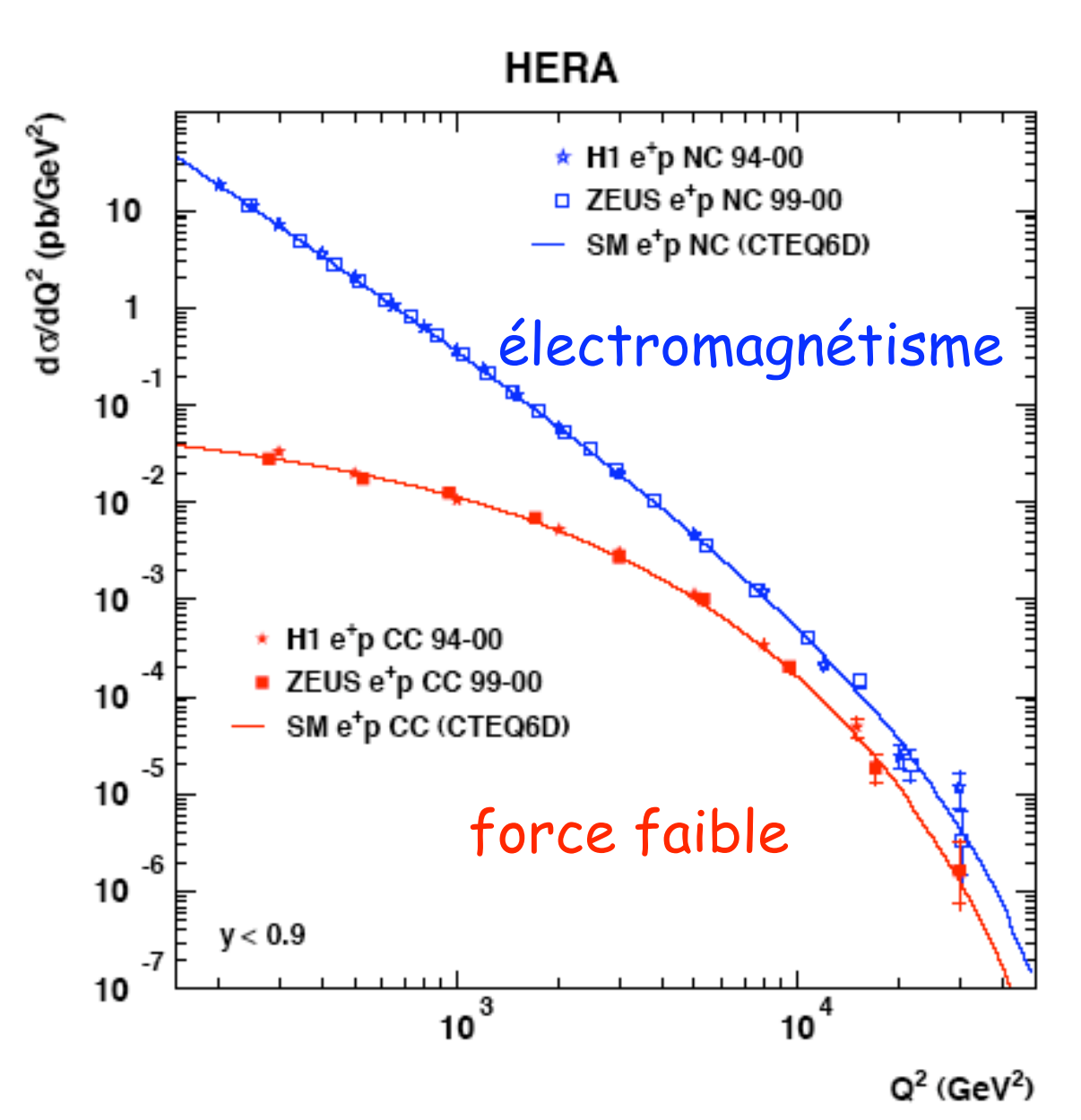
$$m \propto \lambda v$$

Le nombre "v" est une propriété universelle du champ de Higgs. La quantité "λ" est une caractéristique de la particule qui interagit avec le champ de Higgs. Les particules ayant une grande interaction ont une grande masse.

[M. Mangano]

Une analogie courante pour comprendre le mécanisme de Higgs

L'unification électrofaible



Détecter le Boson de Higgs

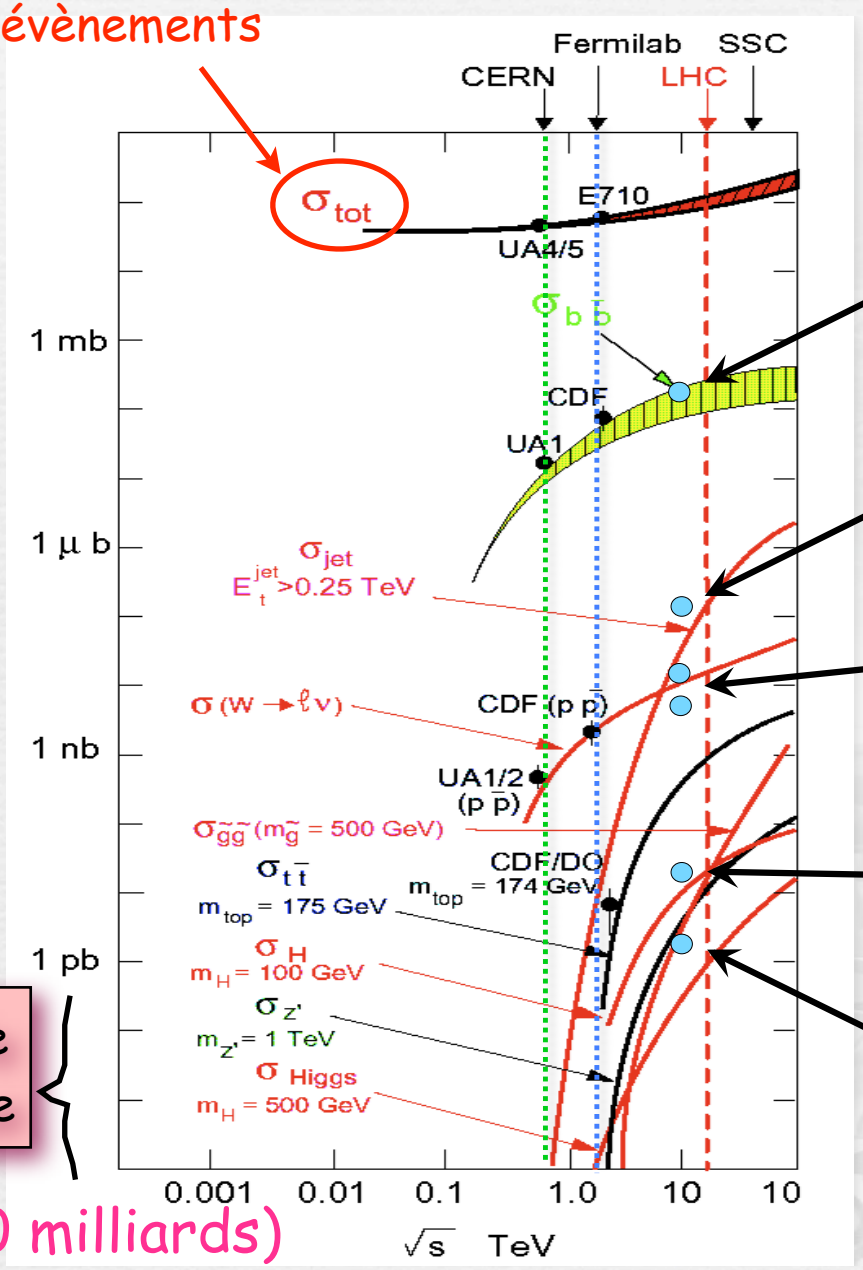
Comme tous les milieux, le champ de Higgs peut etre perturbé.

Lorsqu'on tape sur une table, on crée des ondes sonores.
De meme, lorsqu'on "tape" sur le champ de Higgs (ce qui est possible si on concentre beaucoup d'énergie dans un petit volume), on peut stimuler des "ondes" de Higgs, ces ondes se manifestent comme des particules, les fameux Bosons de Higgs.

Condition: L'énergie fournie doit etre supérieure a la masse du Higgs.
$\Rightarrow$ LHC

Taux d'évènements dans les collisionneurs hadroniques

Taux total d'évènements



10^{-3} b 1 mb

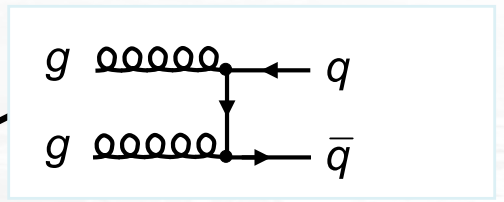
10^{-6} b 1 μ b

10^{-9} b 1 nb

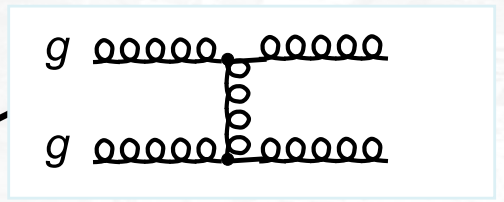
10^{-12} b 1 pb

nouvelle physique

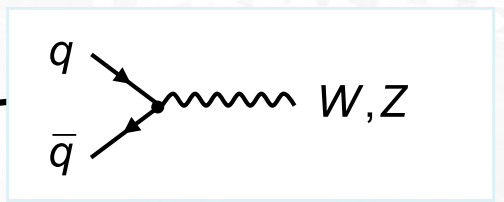
= 1/(10 milliards)



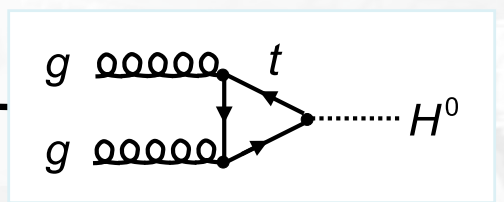
Quark-flavour production



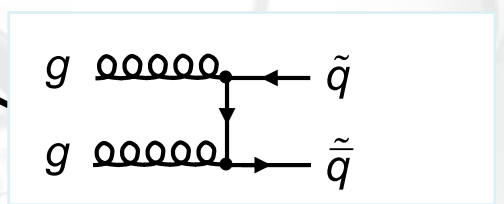
High-p_T QCD jets



W, *Z* production



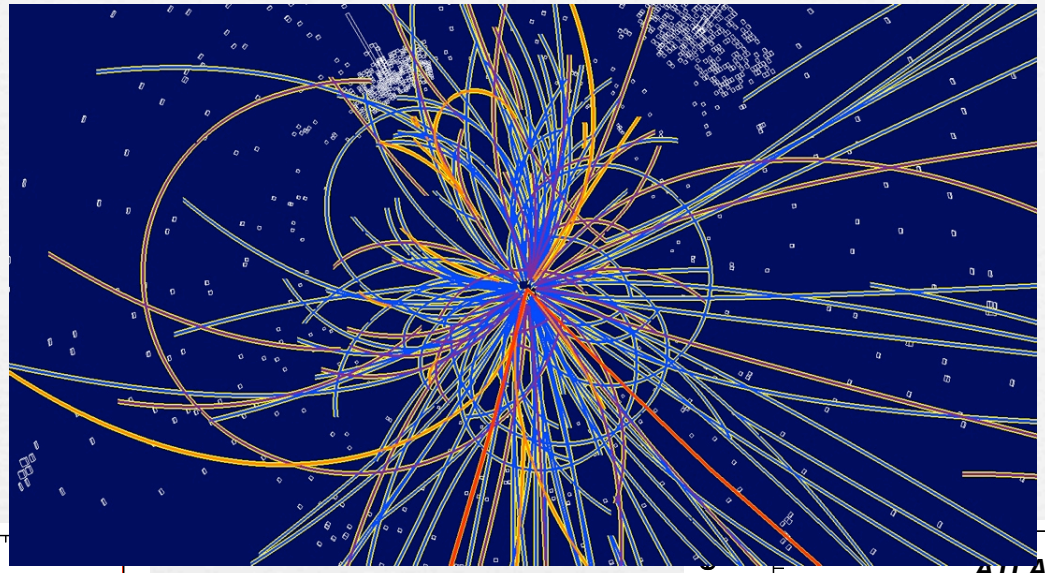
gluon-to-Higgs fusion

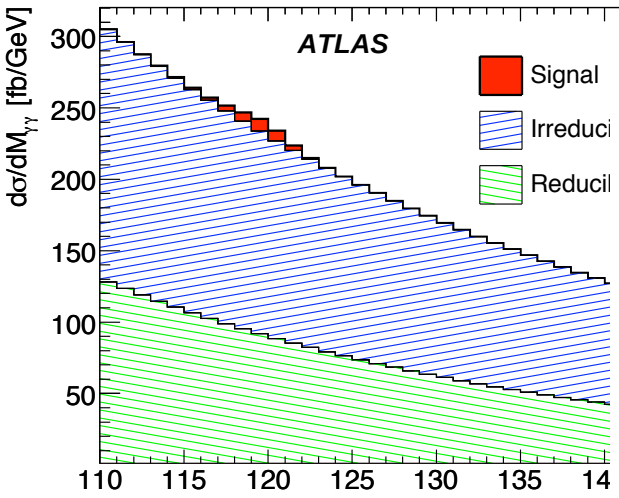


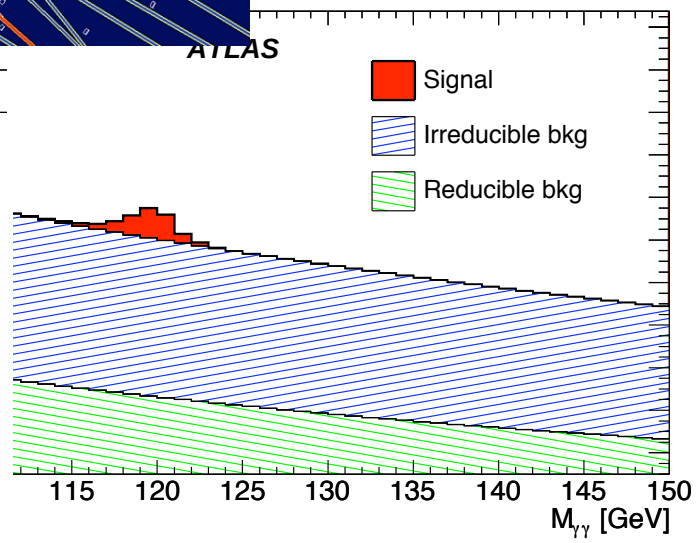
squarks, gluinos
(*m* ~ 1 TeV)

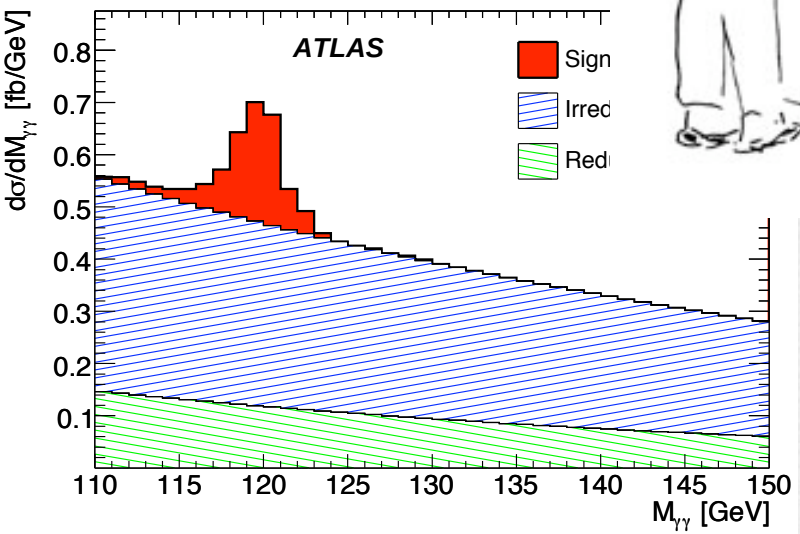
Rechercher le Higgs revient a chercher un grain de mais parmi 10 milliards ...

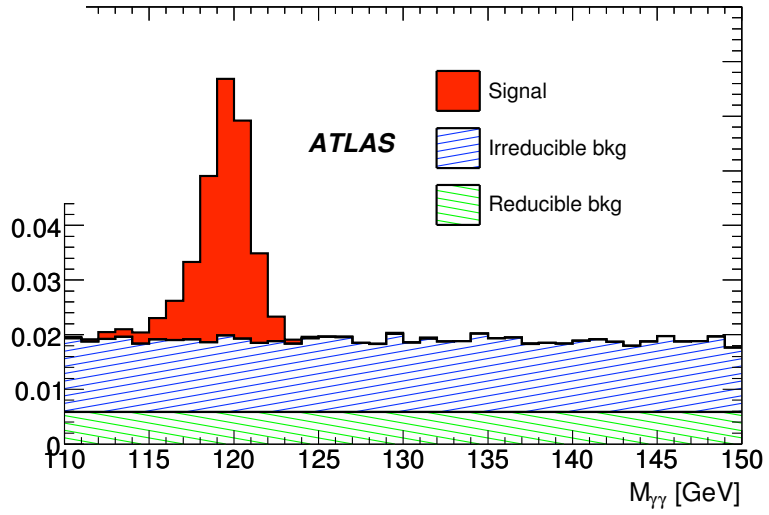
En pratique:




ATLAS
Signal
Irreduci
Reducil
dσ/dM$_{\gamma\gamma}$ [fb/GeV]


ATLAS
Signal
Irreducible bkg
Reducible bkg
M$_{\gamma\gamma}$ [GeV]


ATLAS
Sign
Irred
Redu
dσ/dM$_{\gamma\gamma}$ [fb/GeV]
M$_{\gamma\gamma}$ [GeV]


ATLAS
Signal
Irreducible bkg
Reducible bkg
M$_{\gamma\gamma}$ [GeV]

Quel serait notre univers si la symétrie électrofaible n'était pas brisée?

-Les particules élémentaires n'auraient pas de masse (quarks, leptons, bosons W et Z)

-masse des protons et neutrons légerement modifiée

-proton plus lourd que le neutron (en raison de la force electrostatique)!
le proton n'est plus stable et se désintègre en neutron.

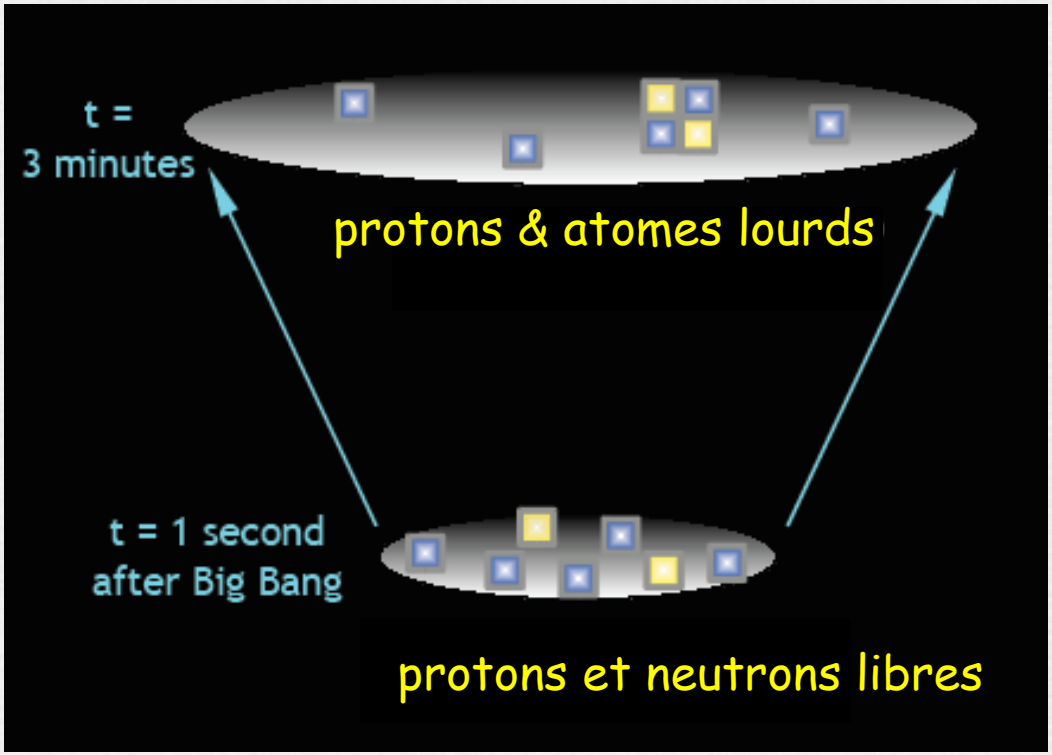
-> pas d'atome d'hydrogène

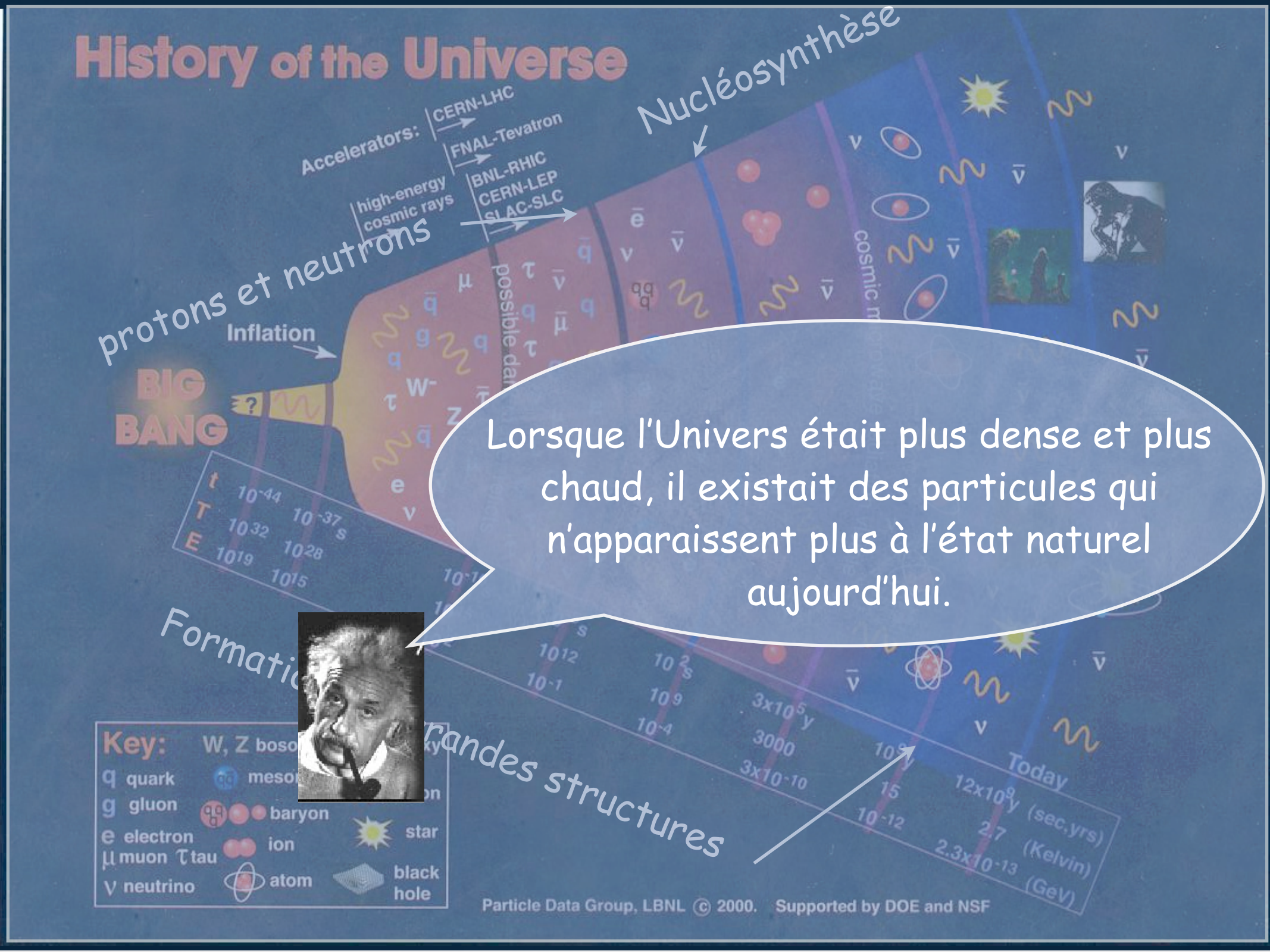
-> nucléosynthèse primordiale très différente

-> un univers profondément différent

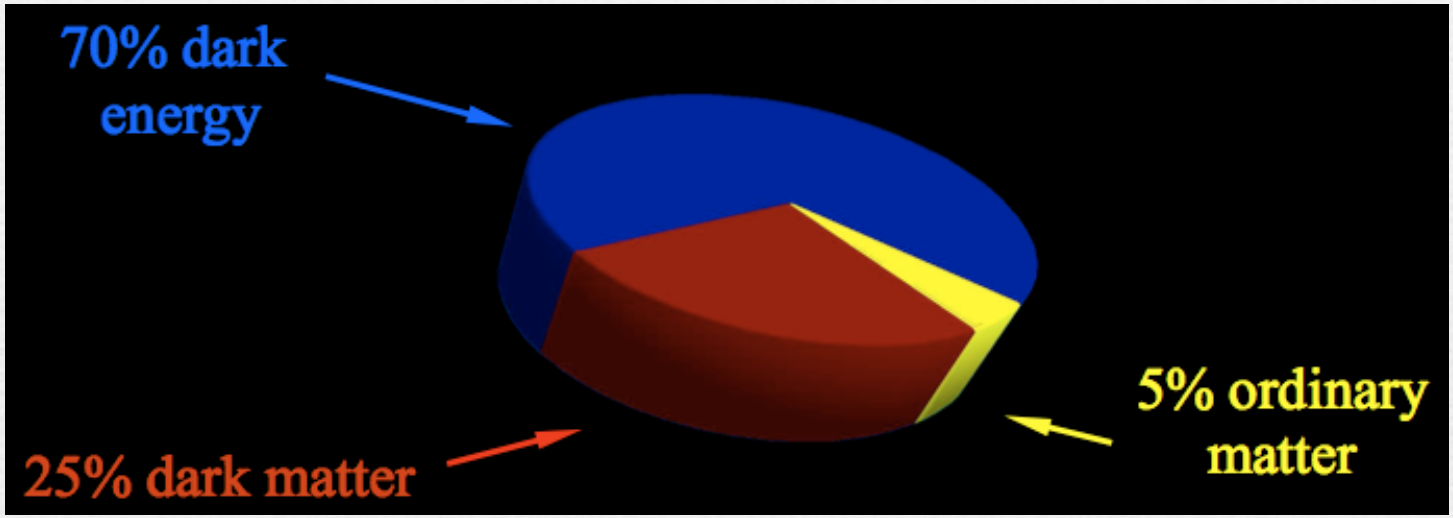
Du laboratoire aux premières minutes de l'Univers

Le modèle standard permet de reconstituer les premiers instants de l'Univers. Par exemple, il explique comment se forment les différents noyaux atomiques.




History of the Universe
Accelerators:
CERN-LHC
FNAL-Tevatron
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC-SLC
high-energy cosmic rays
Nucléosynthèse
protons et neutrons
Inflation
BIG BANG
?
possible dar
cosmic m
Lorsque l'Univers était plus dense et plus chaud, il existait des particules qui n'apparaissent plus à l'état naturel aujourd'hui.
Formatio
randes structures
Today
Key:
W, Z boso
q quark
g gluon
e electron
μ muon τ tau
ν neutrino
meso
baryon
ion
atom
star
black hole
Particle Data Group, LBNL © 2000. Supported by DOE and NSF

95 % de l'énergie de l'univers échappent à notre compréhension ...



Precision Cosmology

WMAP Cosmological Parameters

Model: lcdm+sz+lens

Data: wmap7

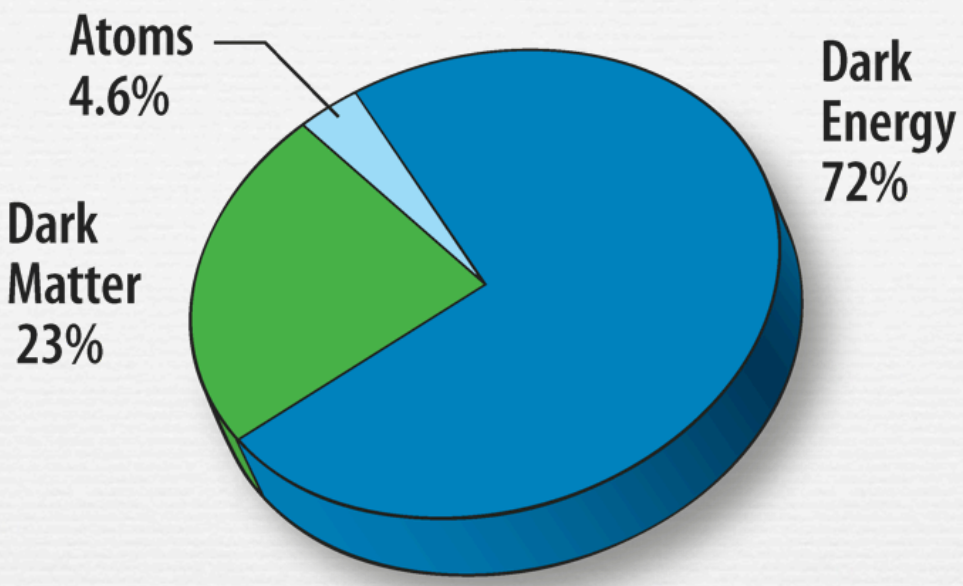
$10^2\Omega_b h^2$	$2.258^{+0.057}_{-0.056}$	$1-n_s$	0.037 ± 0.014
$1-n_s$	$0.0079 < 1-n_s < 0.0642$ (95% CL)	$A_{\rm BAO}(z=0.35)$	$0.463^{+0.021}_{-0.020}$
C_{220}	5763^{+38}_{-40}	$d_A(z_{\rm eq})$	14281^{+158}_{-161} Mpc
$d_A(z_*)$	14116^{+160}_{-163} Mpc	$\Delta^2_{\mathcal{R}}$	$(2.43 \pm 0.11) \times 10^{-9}$
h	0.710 ± 0.025	H_0	71.0 ± 2.5 km/s/Mpc
$k_{\rm eq}$	$0.00974^{+0.00041}_{-0.00040}$	$\ell_{\rm eq}$	137.5 ± 4.3
ℓ_*	302.44 ± 0.80	n_s	0.963 ± 0.014
Ω_b	0.0449 ± 0.0028	$\Omega_b h^2$	$0.02258^{+0.00057}_{-0.00056}$
Ω_c	0.222 ± 0.026	$\Omega_c h^2$	0.1109 ± 0.0056
Ω_Λ	0.734 ± 0.029	Ω_m	0.266 ± 0.029
$\Omega_m h^2$	$0.1334^{+0.0056}_{-0.0055}$	$r_{\rm hor}(z_{\rm dec})$	285.5 ± 3.0 Mpc
$r_s(z_d)$	153.2 ± 1.7 Mpc	$r_s(z_d)/D_v(z=0.2)$	$0.1922^{+0.0072}_{-0.0073}$
$r_s(z_d)/D_v(z=0.35)$	$0.1153^{+0.0038}_{-0.0039}$	$r_s(z_*)$	$146.6^{+1.5}_{-1.6}$ Mpc
R	1.719 ± 0.019	σ_8	0.801 ± 0.030
$A_{\rm SZ}$	$0.97^{+0.68}_{-0.97}$	t_0	13.75 ± 0.13 Gyr
τ	0.088 ± 0.015	θ_*	0.010388 ± 0.000027
θ_*	0.5952 ± 0.0016 °	t_*	379164^{+5187}_{-5243} yr
$z_{\rm dec}$	1088.2 ± 1.2	z_d	1020.3 ± 1.4
$z_{\rm eq}$	3196^{+134}_{-133}	$z_{\rm reion}$	10.5 ± 1.2
z_*	$1090.79^{+0.94}_{-0.92}$		

fraction of the total energy density in "dark energy"

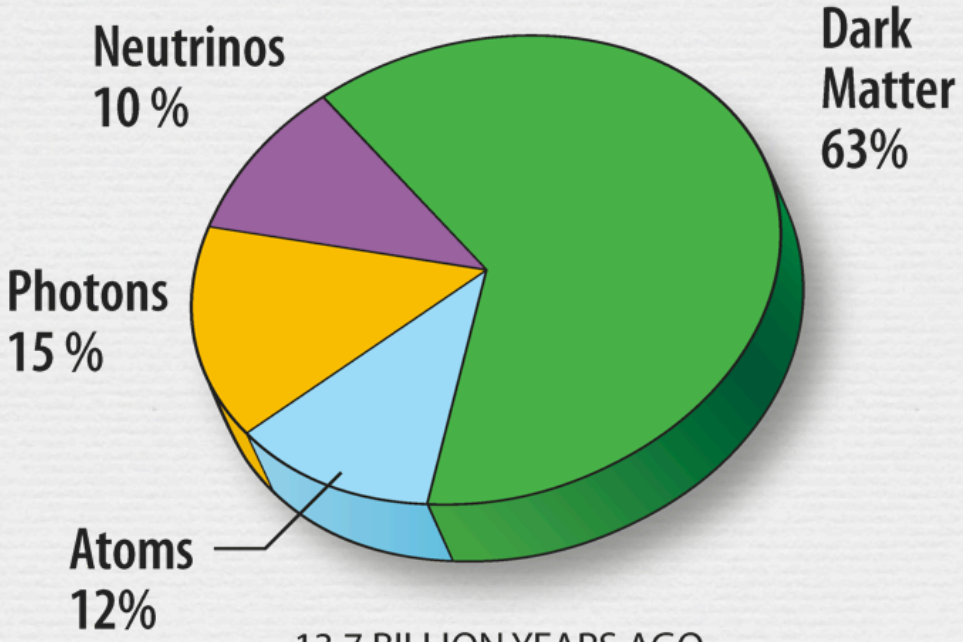
expansion rate

fraction of the total energy density in matter

age of the universe



TODAY



13.7 BILLION YEARS AGO

(Universe 380,000 years old)

Qu'est-ce-que la matière noire ?

Une forme de matière invisible et transparente (sans interaction avec les photons) mais qui se manifeste par ses effets gravitationnels.

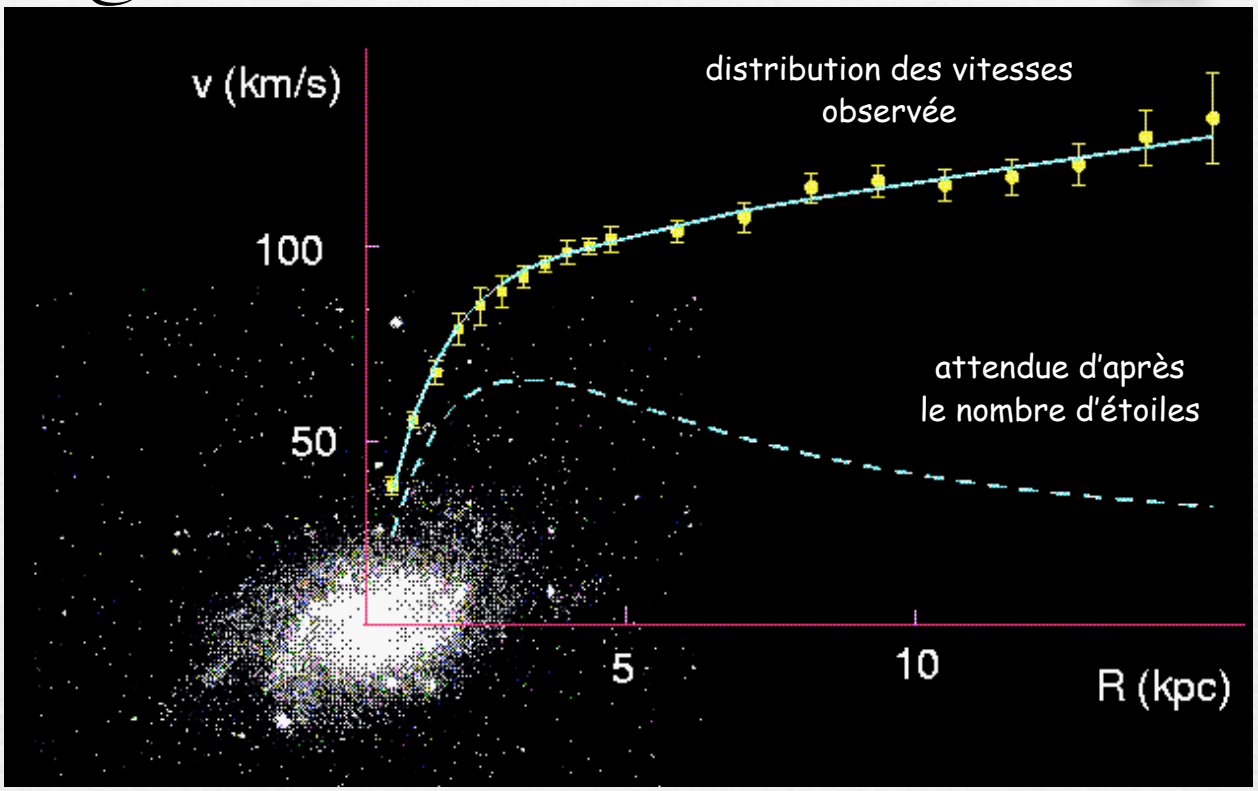
15% matière connue (1% étoiles, 14% gaz)

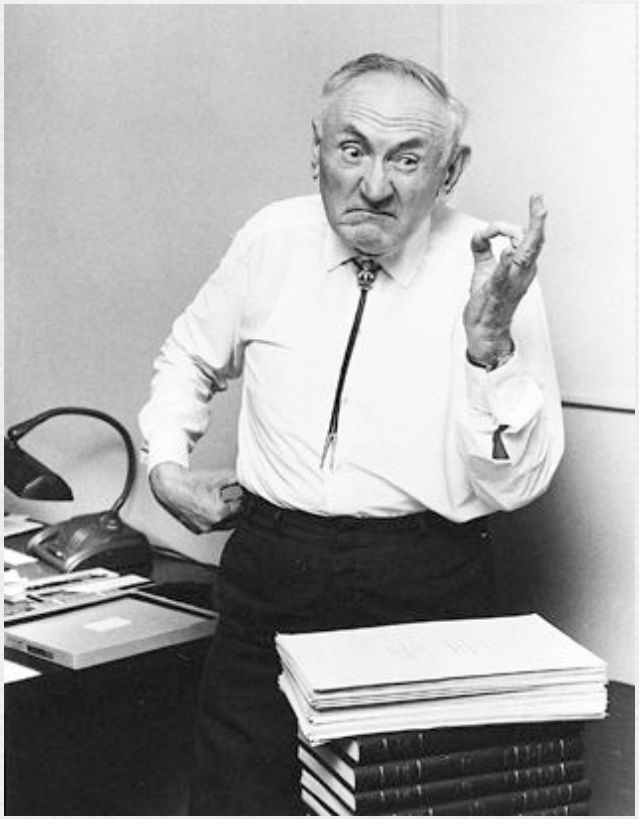
85% matière noire inconnue

Courbe de rotation des galaxies

$$M(r) \propto \frac{v^2 r}{G_N}$$

At large distances from the center, beyond the edge of the galaxy, the velocity would be expected to fall as 1/sqrt(r) if most of the matter is contained in the optical disk while it was observed to remain constant, implying the existence of an extended dark halo



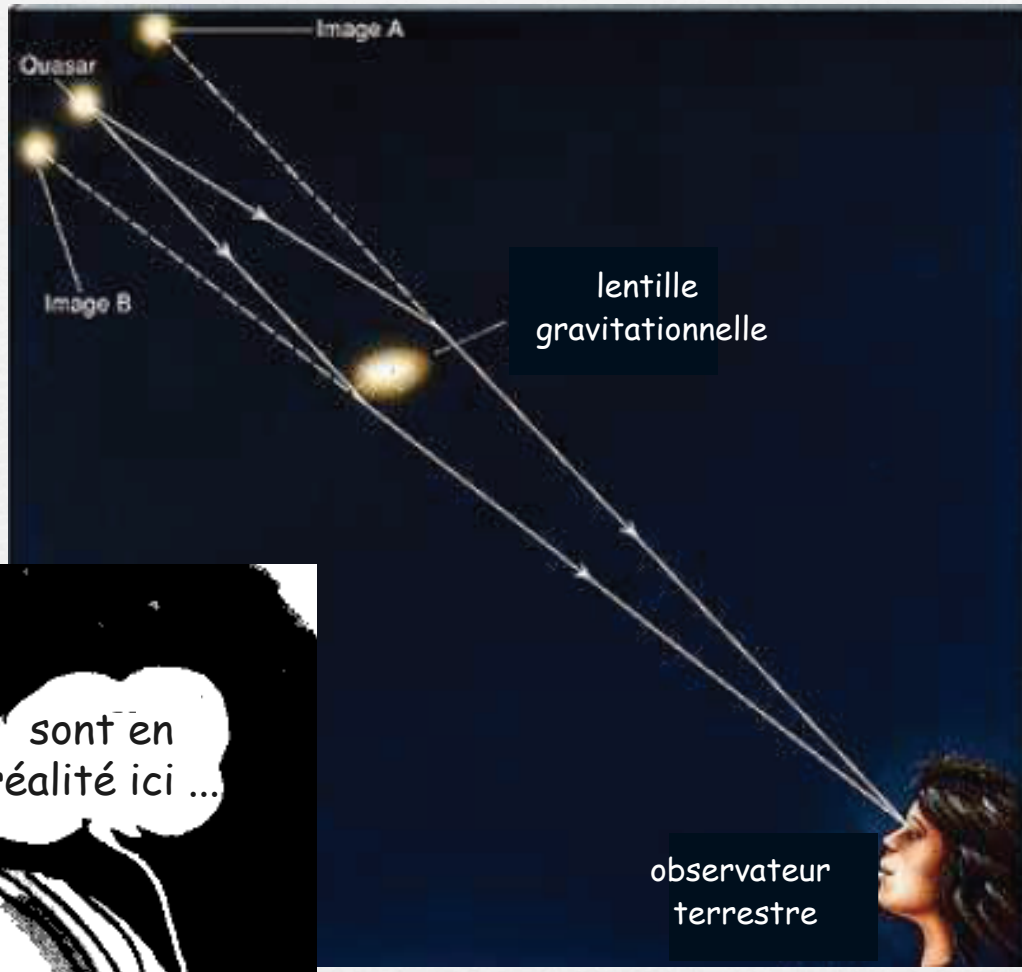


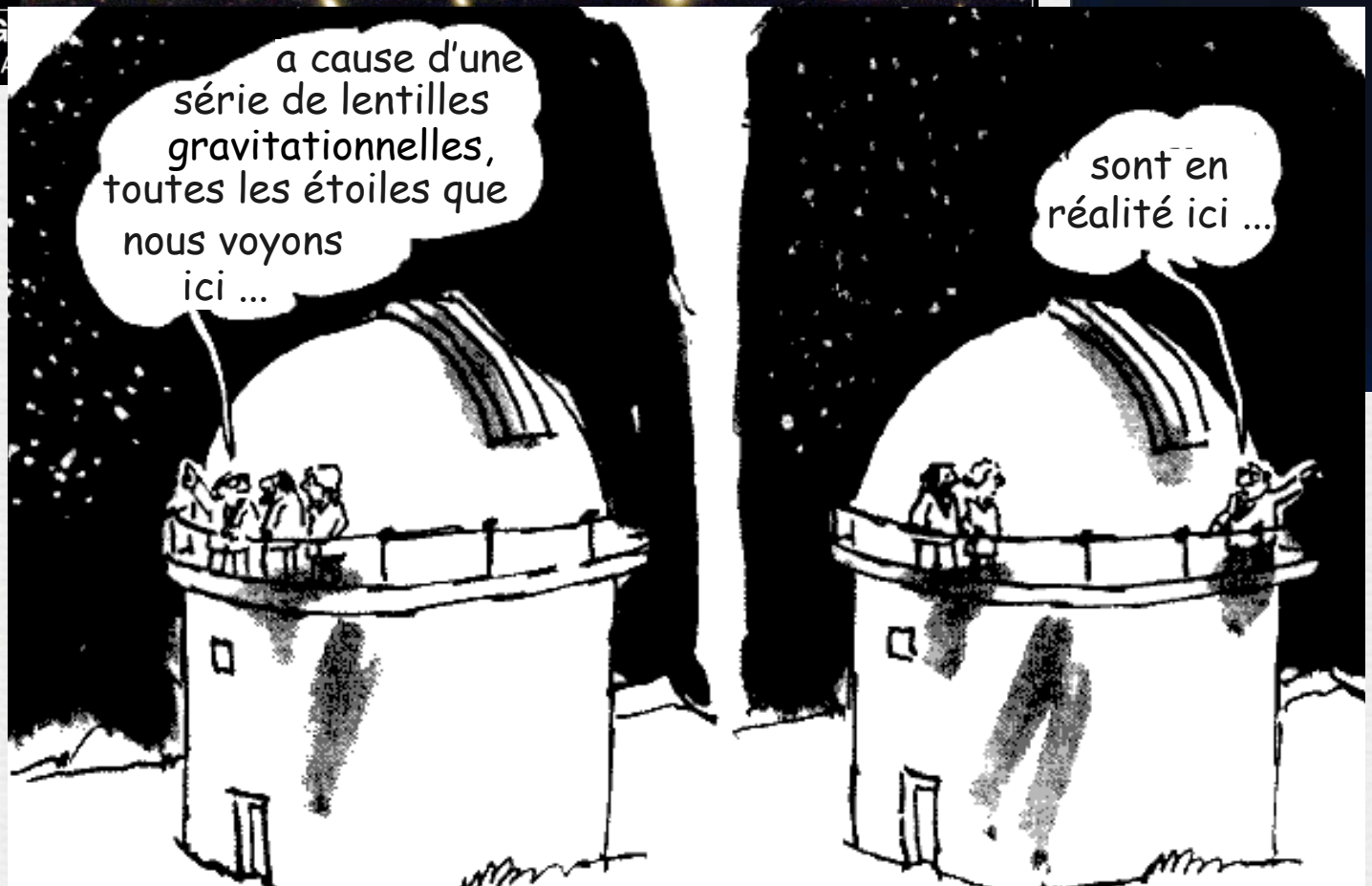
Zwicky

En 1933, Zwicky utilise les vitesses des galaxies dans les amas pour estimer la masse de ces amas.

La masse obtenue est beaucoup plus importante que celle des étoiles contenues dans les galaxies.

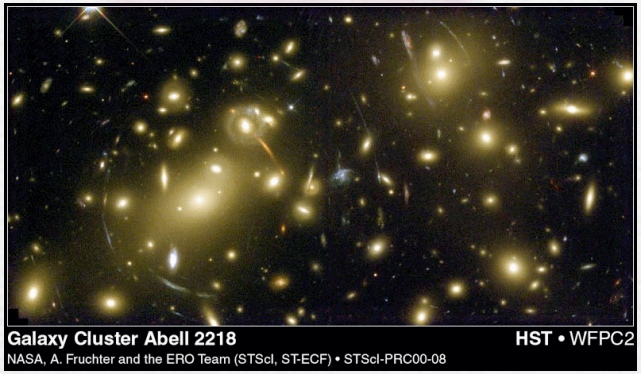
Lentilles gravitationnelles



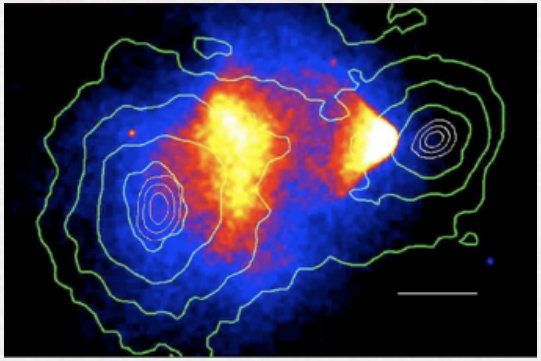


L'existence de matière noire (froide) repose sur un très grand nombre d'observations indépendentes; elle est nécessaire à toutes les échelles

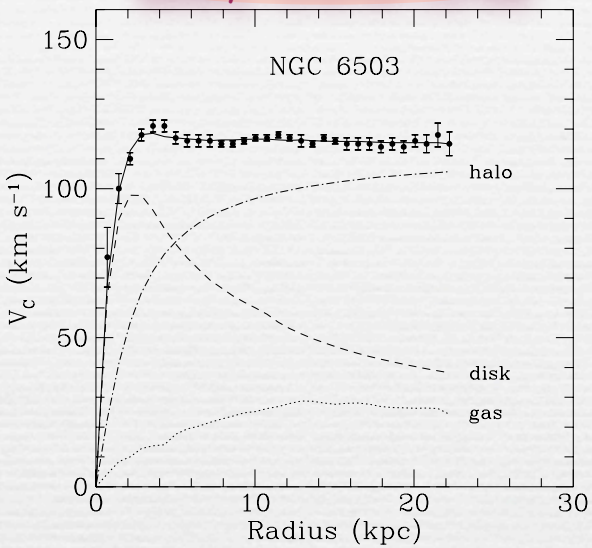
Gravitational lensing



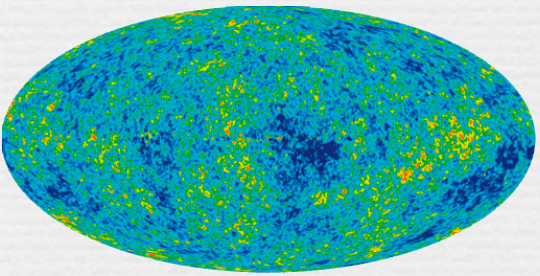
The "Bullet cluster": lensing map versus X-ray image

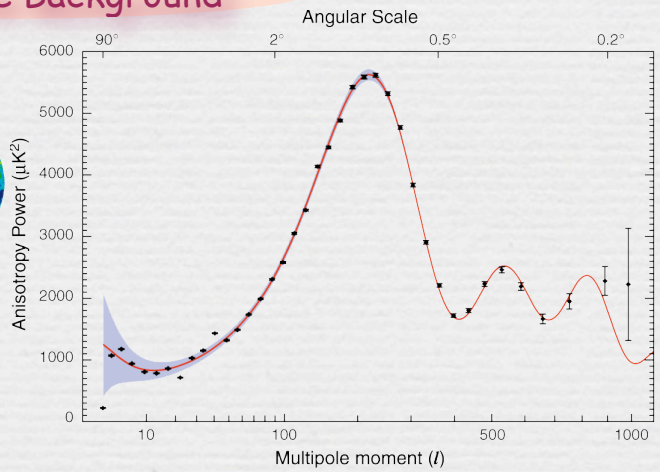


Galaxy rotation curves



Cosmic Microwave Background



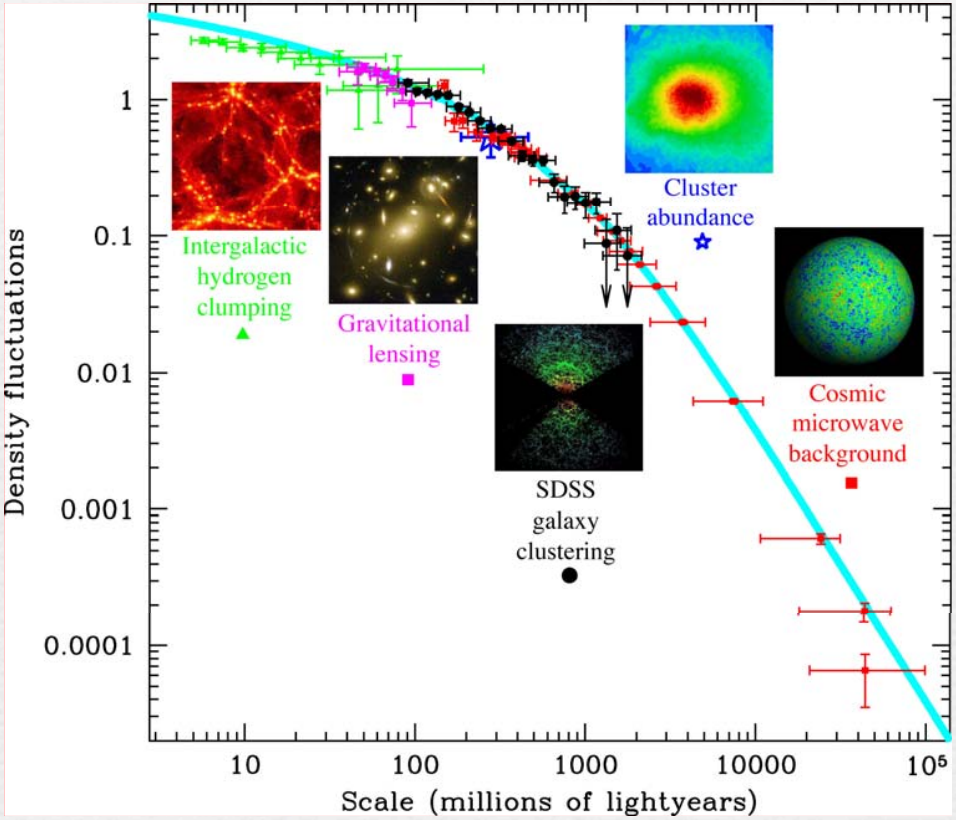


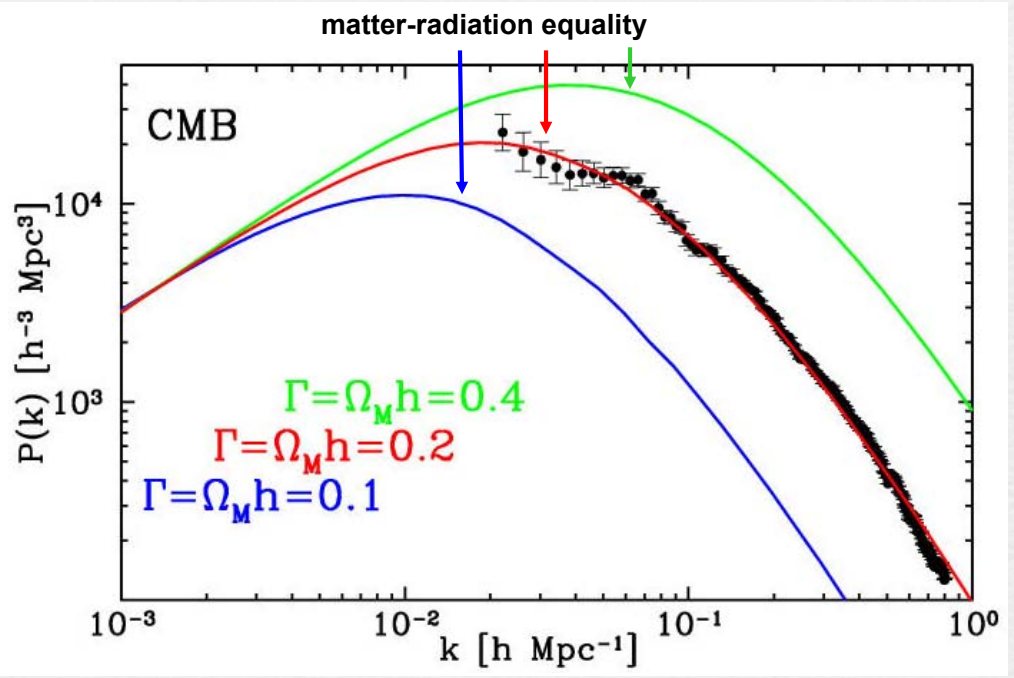
... etc

-> Fraction de la densité d'énergie de l'univers stockée dans la matière noire : 22%

Les propriétés de la matière noire sont très contraintes par les observations.

Le "spectre de puissance de la matière"
(=distribution en fonction de l'échelle)

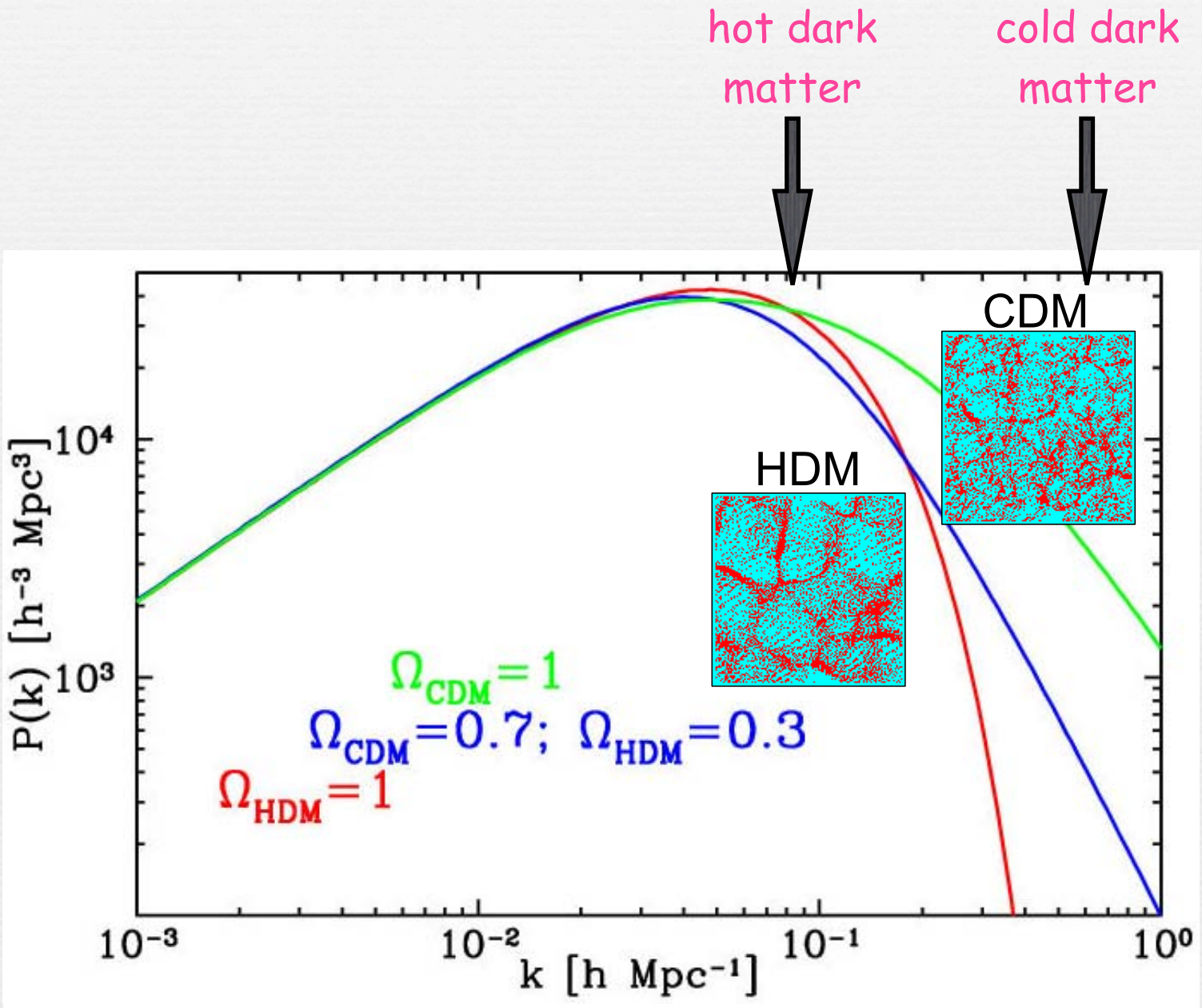




-> la matière noire n'est pas baryonique

Neutrinos ?

NON!

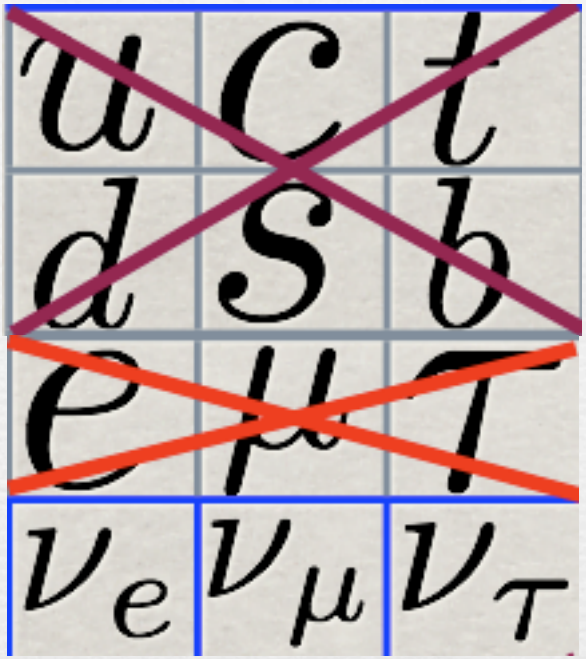


----> pas de candidat dans le Modèle Standard

Aucune particule du Modèle standard ne permet d'expliquer la matière noire

Matière

Forces



chargé/instable

baryonique

masse nulle

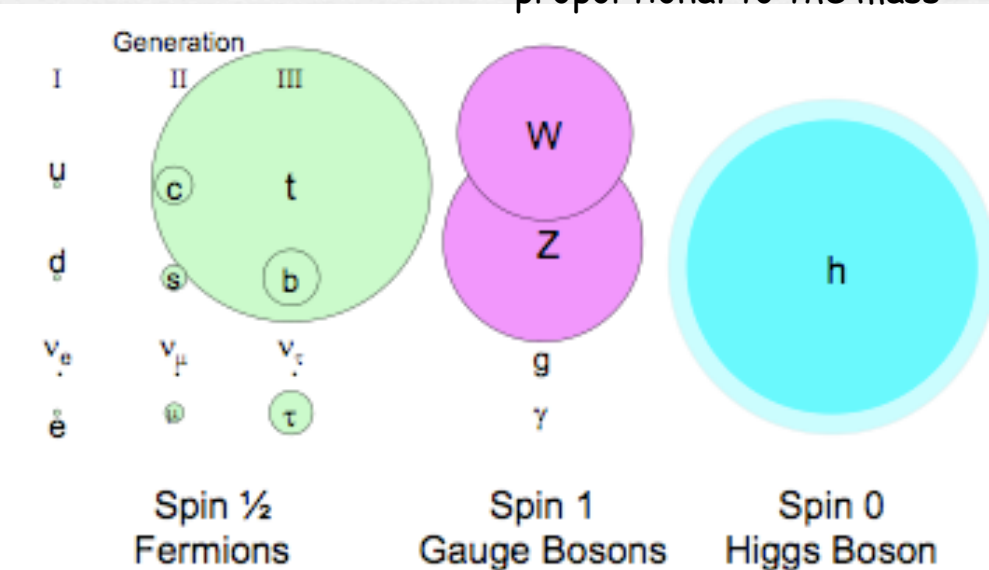
I II III

3 familles de matière

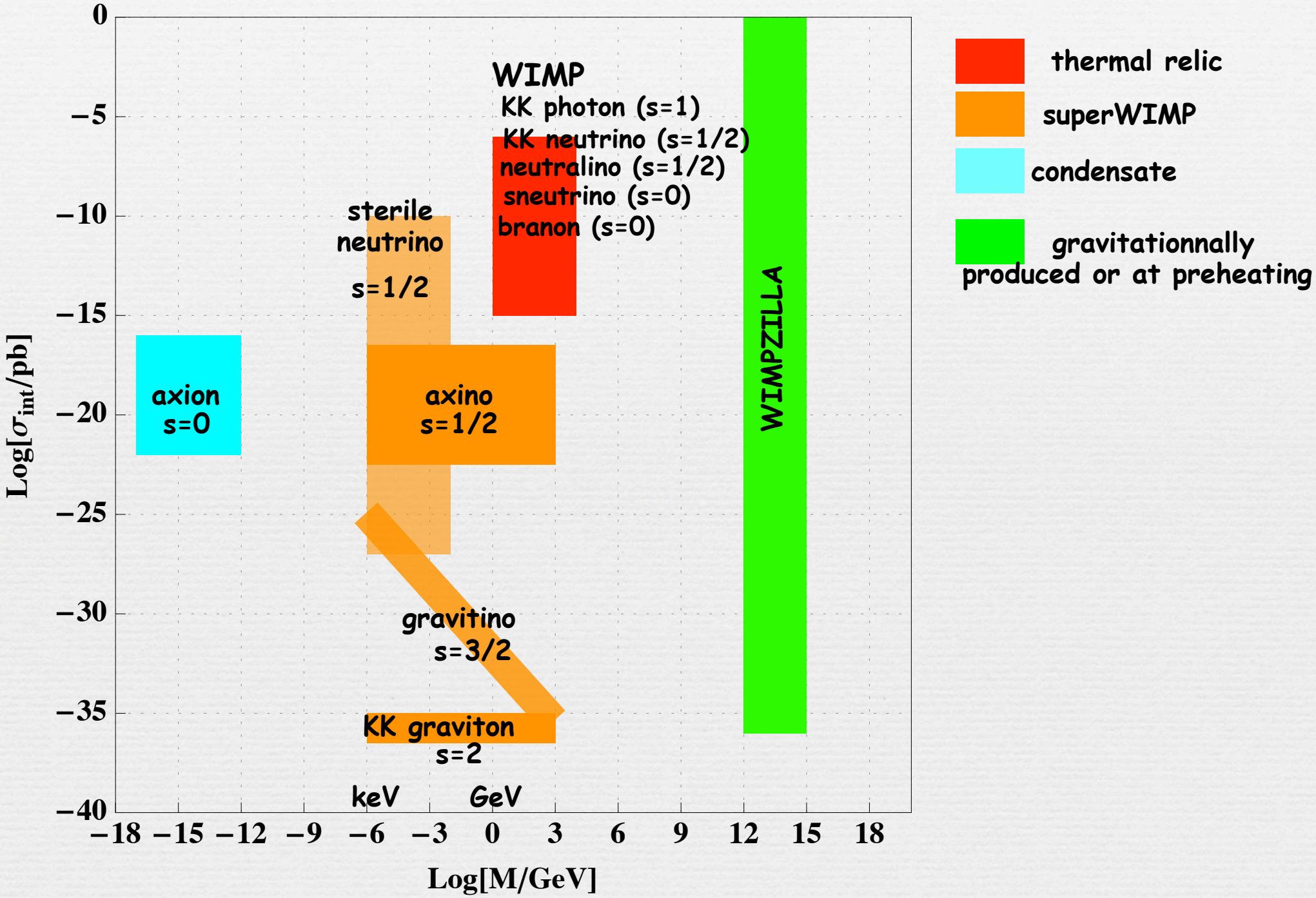
contribution to the energy budget of the universe

Particle	Ω	type
Baryons	4 - 5 %	cold
Neutrinos	< 2 %	hot
Dark matter	20 - 26 %	cold

radius of circle is proportional to the mass



Candidats

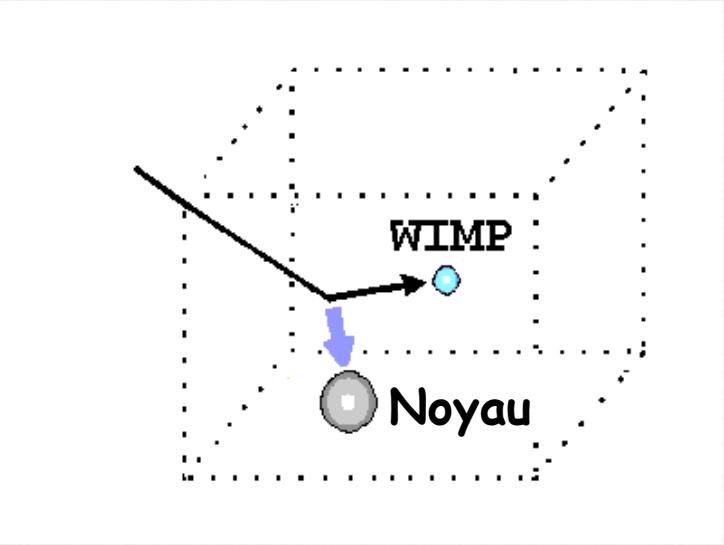

WIMP
KK photon (s=1)
KK neutrino (s=1/2)
neutralino (s=1/2)
sneutrino (s=0)
branon (s=0)
sterile
neutrino
s=1/2
axion
s=0
axino
s=1/2
gravitino
s=3/2
KK graviton
s=2
WIMPZILLA
keV
GeV
Log[σ_{int}/pb]
Log[M/GeV]
0
−5
−10
−15
−20
−25
−30
−35
−40
−18 −15 −12 −9 −6 −3 0 3 6 9 12 15 18
thermal relic
superWIMP
condensate
gravitationnally
produced or at preheating

Comment detecter la matière noire?

Détection directe: On peut "toucher" la matière noire

Détection indirecte: On peut "attraper" les particules émises par la matière noire

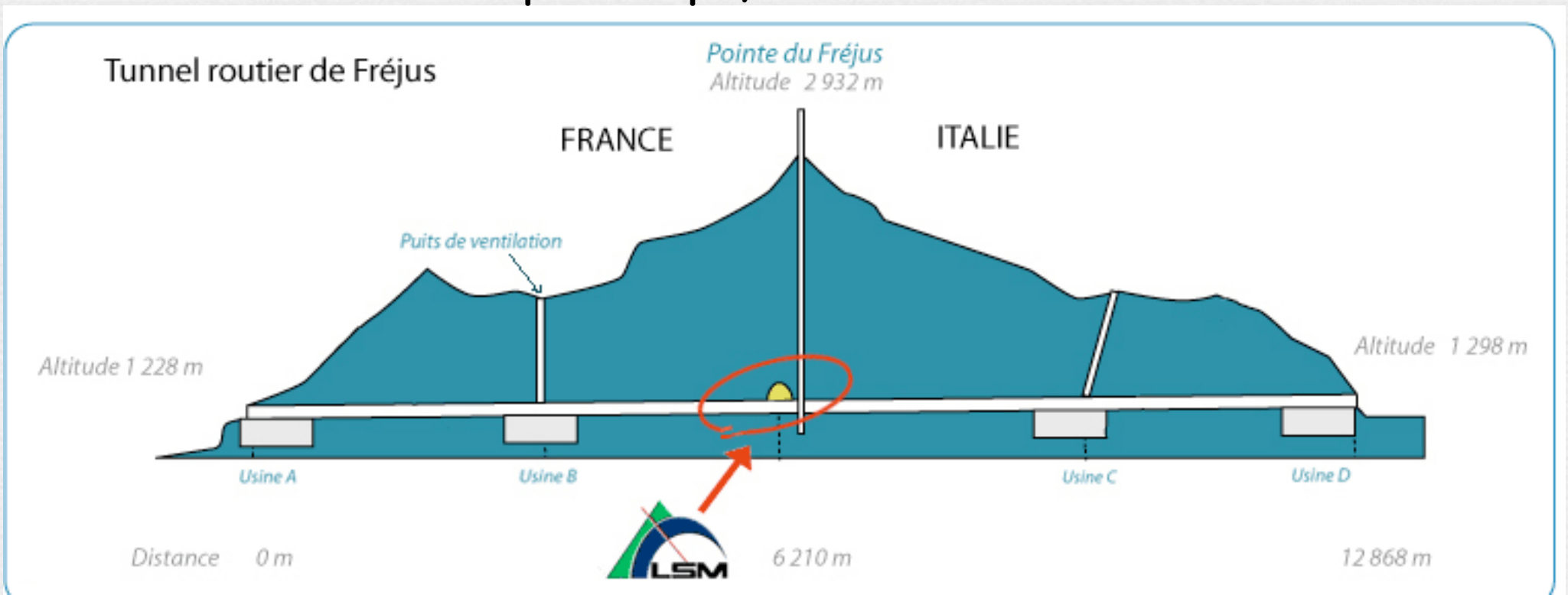
Détection directe



Nous sommes traversés par un "vent de WIMPS"

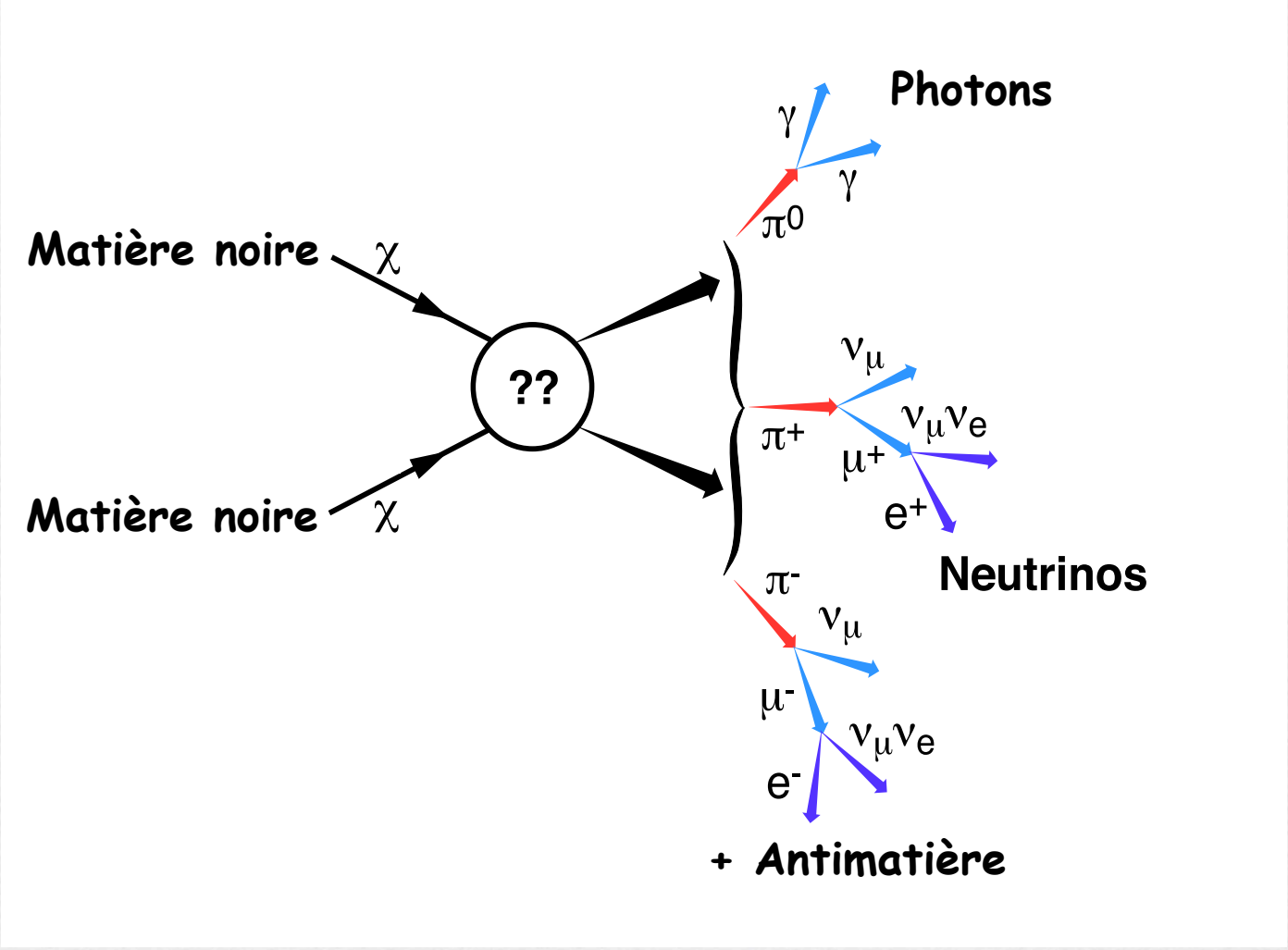
De nombreuses experiences (souterraines) cherchent a détecter les WIMPS en mesurant le mouvement des noyaux dus a la collision avec des WIMPs

par example, "EDELWEISS":



Détection indirecte

La matière noire peut produire des photons, électrons, protons, neutrinos, antiprotons, positrons :

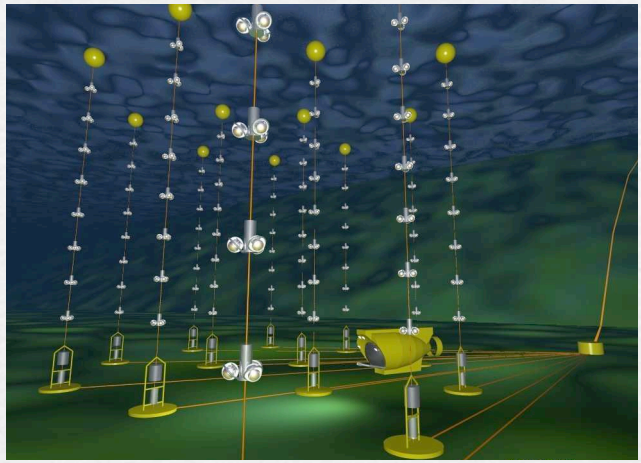


Détection indirecte

Recherche de neutrinos dans le Pole Sud

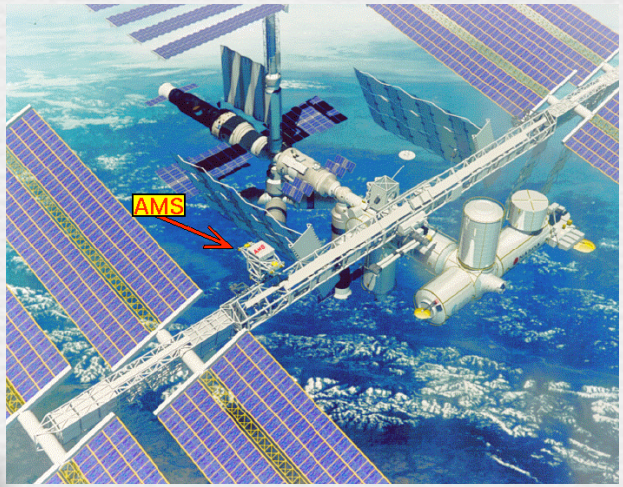
IceCube

dans la Méditerrannée ...



Antarès

Recherche d'antiprotons dans l'espace...



AMS

Détection indirecte

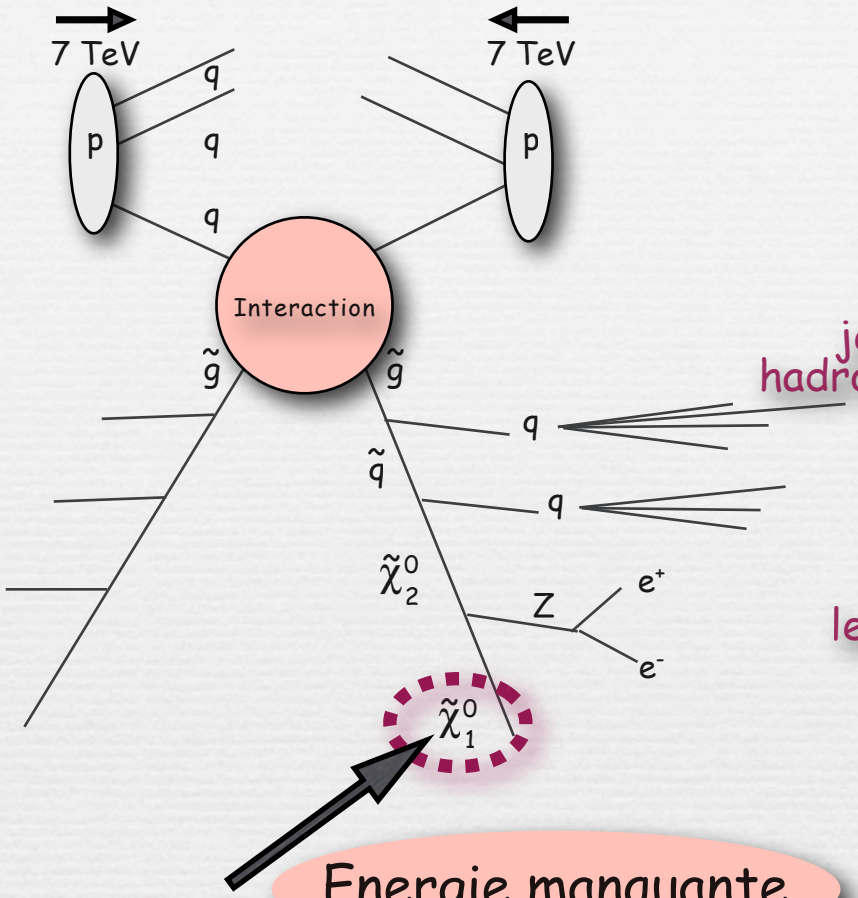
Recherche de photons sur Terre

Hess

et dans l'espace ...

Fermi

Production de la matière noire au LHC = Evènements "Energie Manquante"



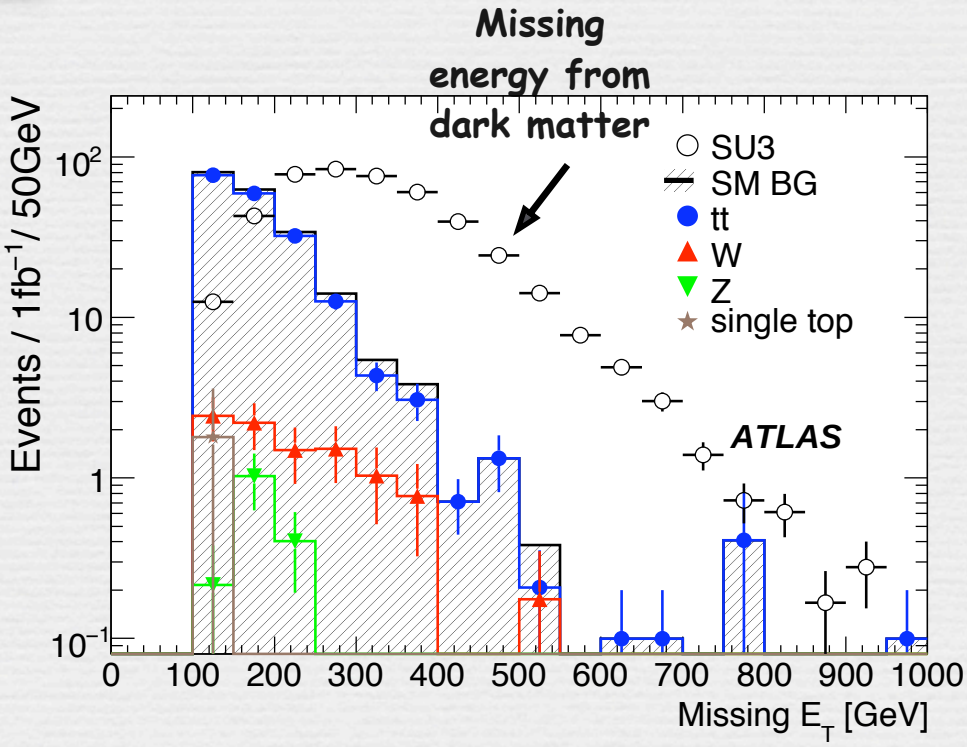
jets hadroniques

leptons

ce qui est vu dans le détecteur

candidat Matiere Noire

Energie manquante



La décennie de la matière noire

Un très gros effort expérimental pour identifier la matière noire

Indirect

Antimatiere
Neutrinos
Rayons Gamma

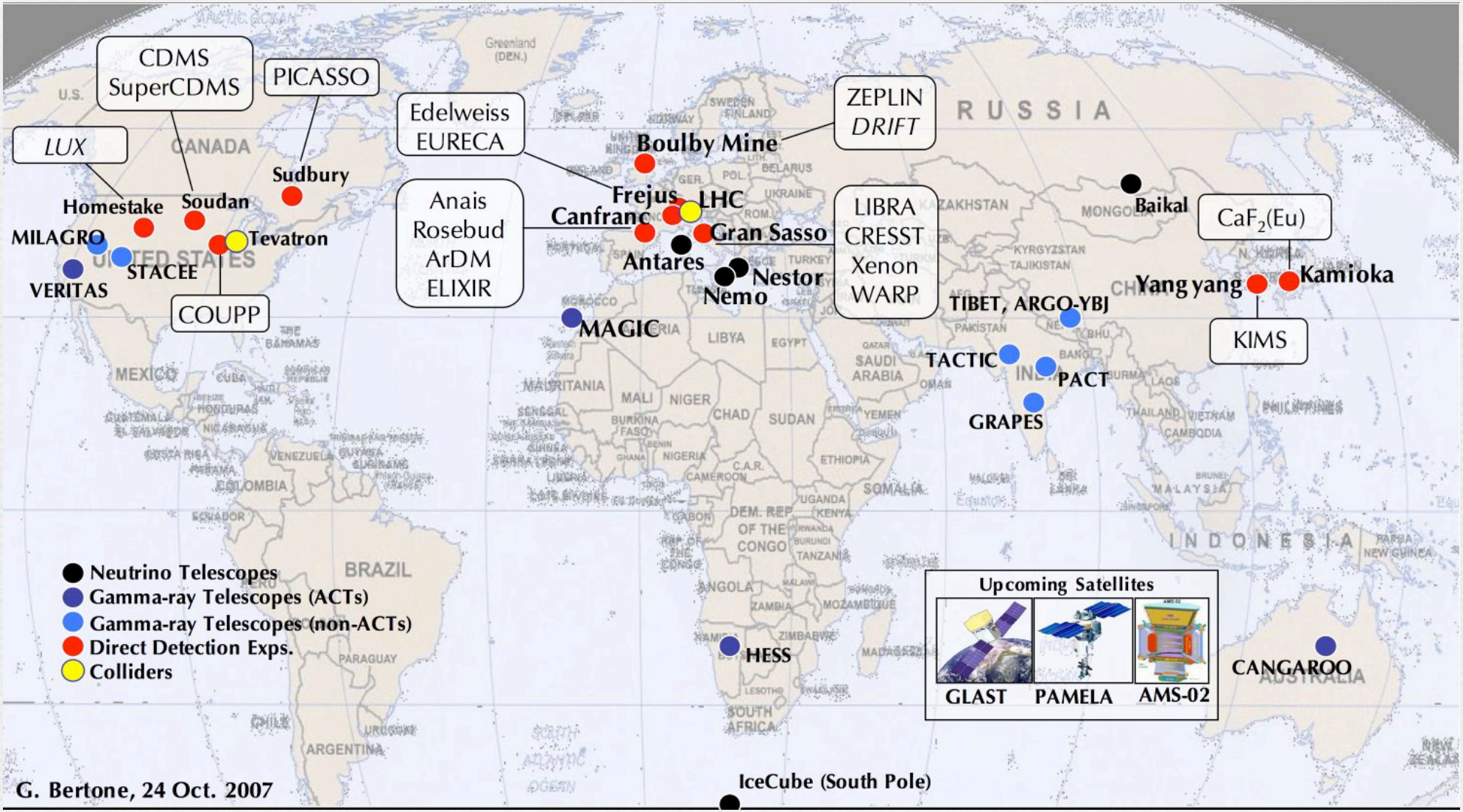
Signature : annihilation

Direct

signature: diffusion elastique

Collisionneurs

signature : energie manquante



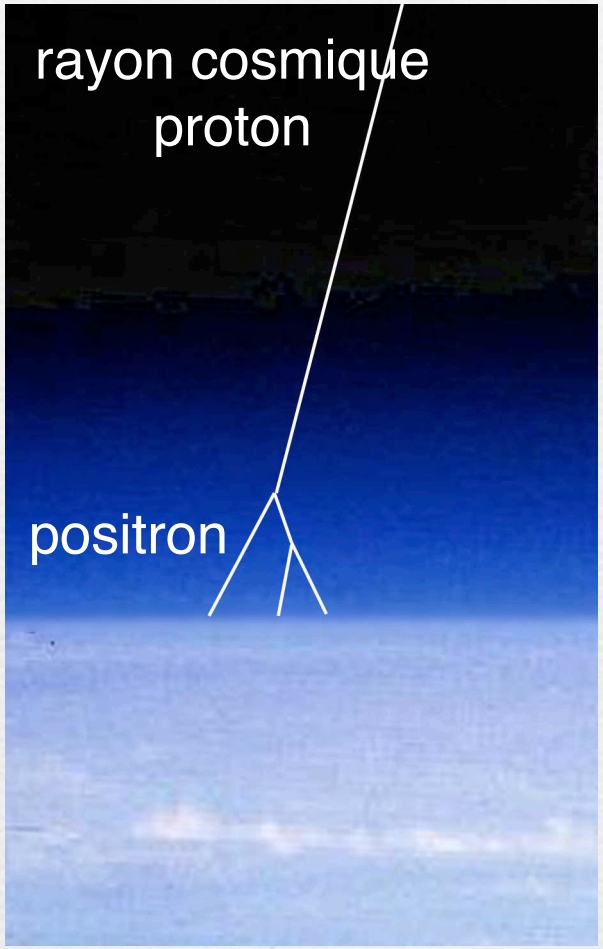
L'asymétrie Matière-antimatière

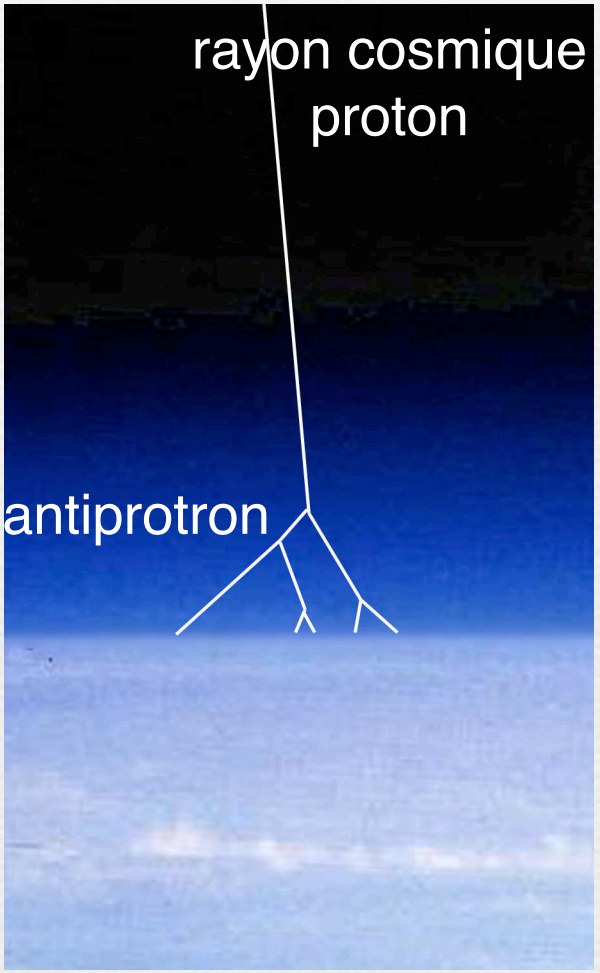
Antimatière

Pour chaque espèce de particule, il existe une antiparticule, possédant une charge électrique opposée

électron	⟷	positron
proton		antiproton
neutron		antineutron
muon		antimuon
neutrino		antineutrino
quarks		antiquarks

Les antiparticules sont produites par des rayons cosmiques arrivant sur l'atmosphère terrestre





En revanche, pas de concentration d'antimatière dans notre univers observable

Autrement nous aurions detecté de rayonnement issu de l'annihilation entre matière et antimatière

$$p + \overline{p} \rightarrow \pi^0 ... \rightarrow \gamma\gamma$$

Pas de concentration d'antimatière dans notre univers observable

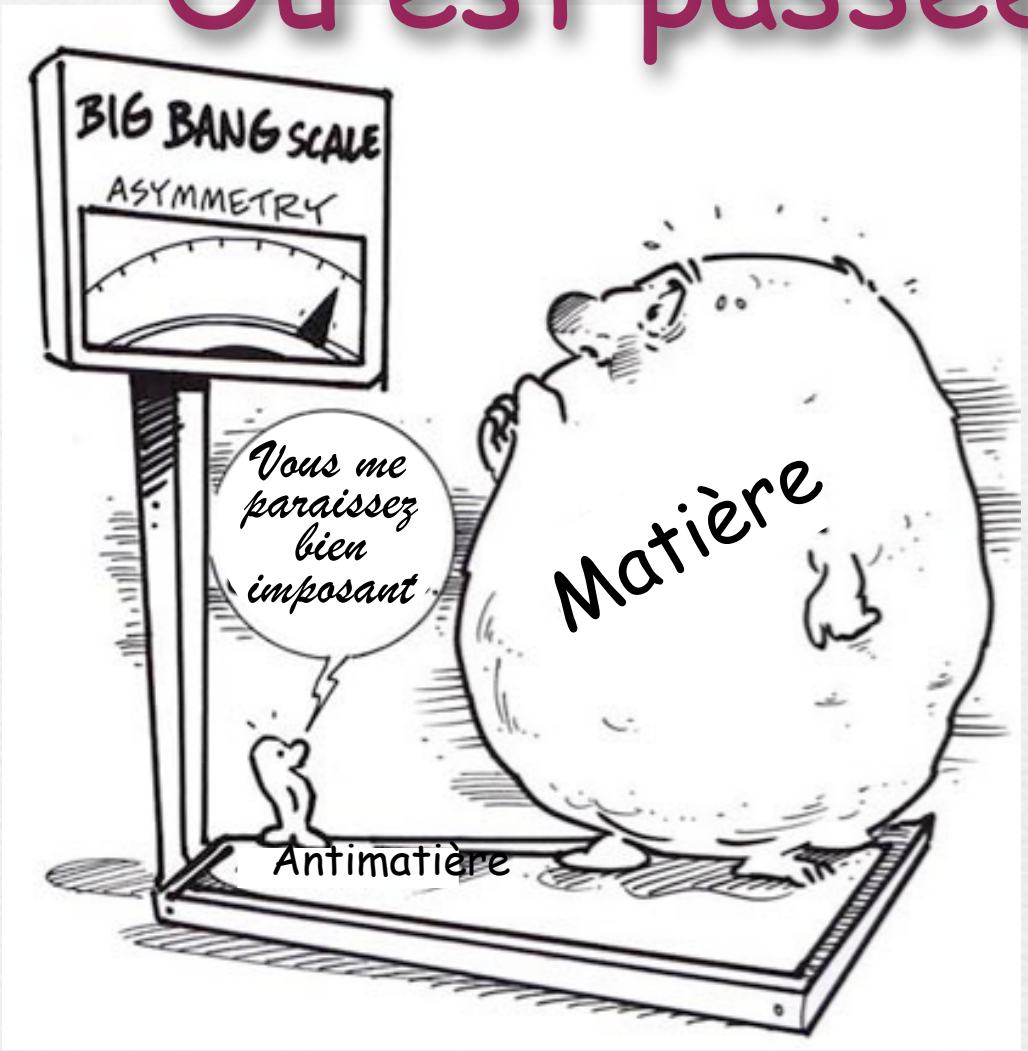
A l'échelle du système solaire: pas de concentration d'antimatière, autrement son interaction avec le vent solaire fournirait une source importante de rayonnement γ visible

A l'échelle des galaxies: Il existe de l'antimatière sous forme d'antiprotons dans les rayons cosmiques. Le rapport $n_{\overline{p}}/n_p \sim 10^{-4}$ peut etre expliqué par des processus du type $p + p \longrightarrow 3p + \overline{p}$.

A l'échelle des amas de galaxies: nous n'avons pas detecté de rayonnement issu de l'annihilation entre matière et antimatière

$$p + \overline{p} \longrightarrow \pi^0 ... \longrightarrow \gamma\gamma$$

Où est passée l'antimatière ?



Matière et antimatière auraient dû être formées en quantité égale. Mais aujourd'hui il ne reste plus que de la matière.

asymétrie baryonique: $\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \sim 10^{-10}$

$$\eta \equiv \frac{n_B - n_{\overline{B}}}{n_\gamma}$$

Dans le modèle standard rien ne permet de comprendre cette asymétrie matière-antimatière.

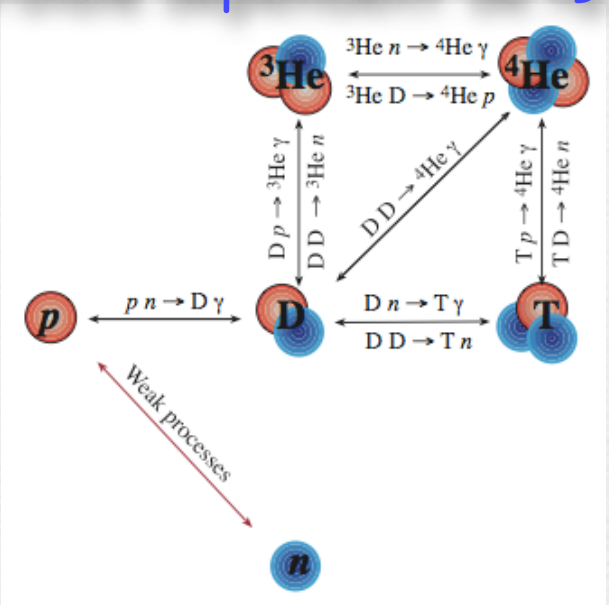
Comment mesure-t-on η ?

$$\eta \equiv \frac{n_B - n_{\overline{B}}}{n_\gamma}$$

Compter le nombre de baryons est une tache difficile puisque seule une petite fraction d'entre eux sont visibles. Il existe néammoins deux moyens indirects:

1) les predictions de la nucléosynthèse primordiale dépendent de n_B / n_γ

Un excès de photons par rapport aux baryons retarde la nucléosynthese en augmentant la réaction D γ →pn



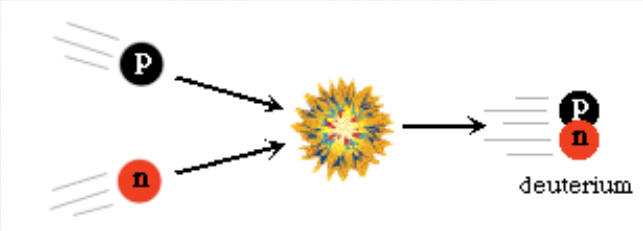
2) Mesures du rayonnement de fond cosmique

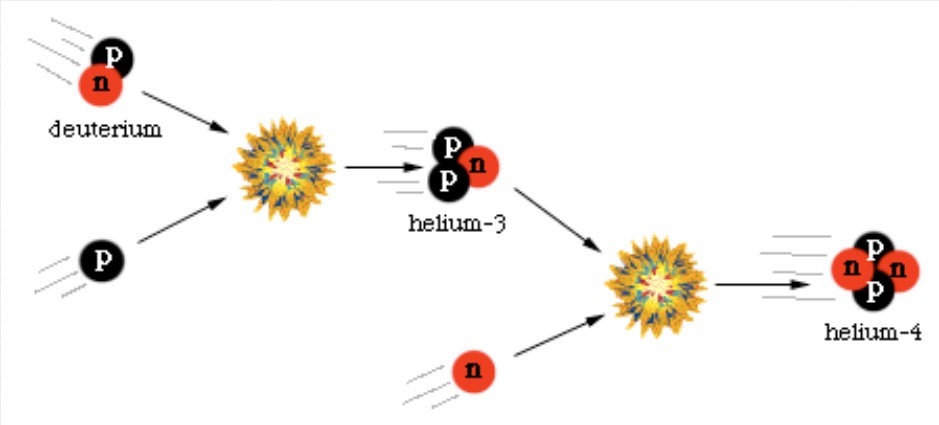
une photographie des oscillations acoustiques dans le fluide primordial de photons et baryons

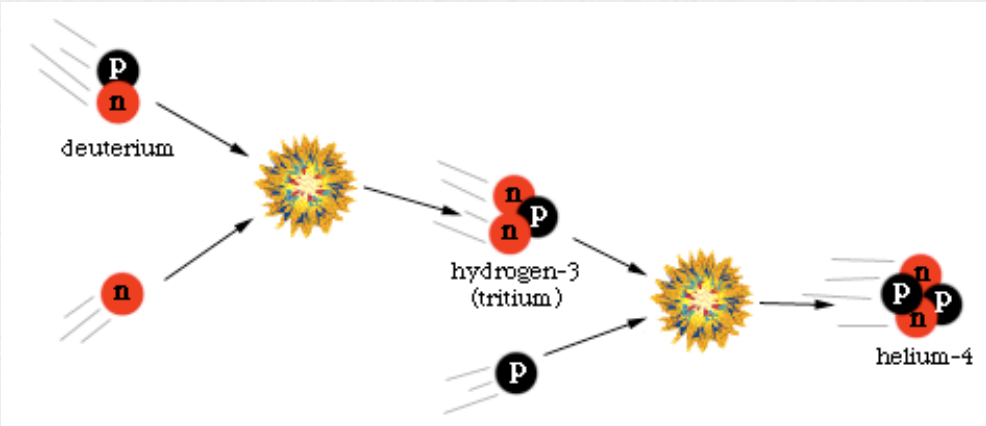
Les fluctuations de température dépendent du rapport

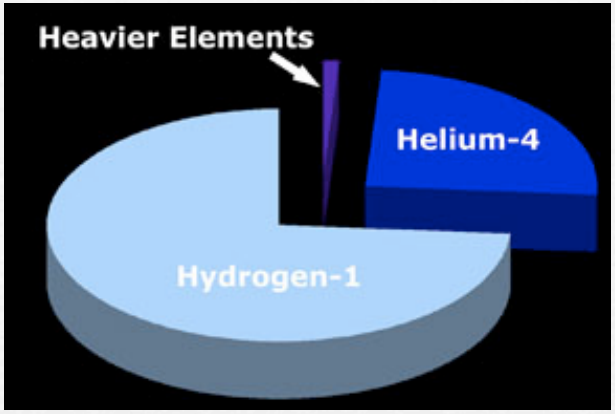
n_B / n_γ

Nucléosyntèse Primordiale



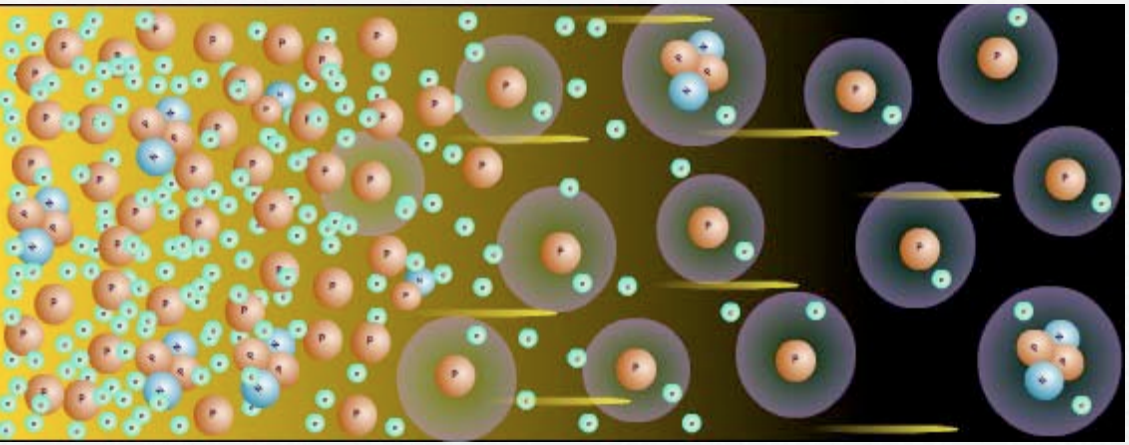






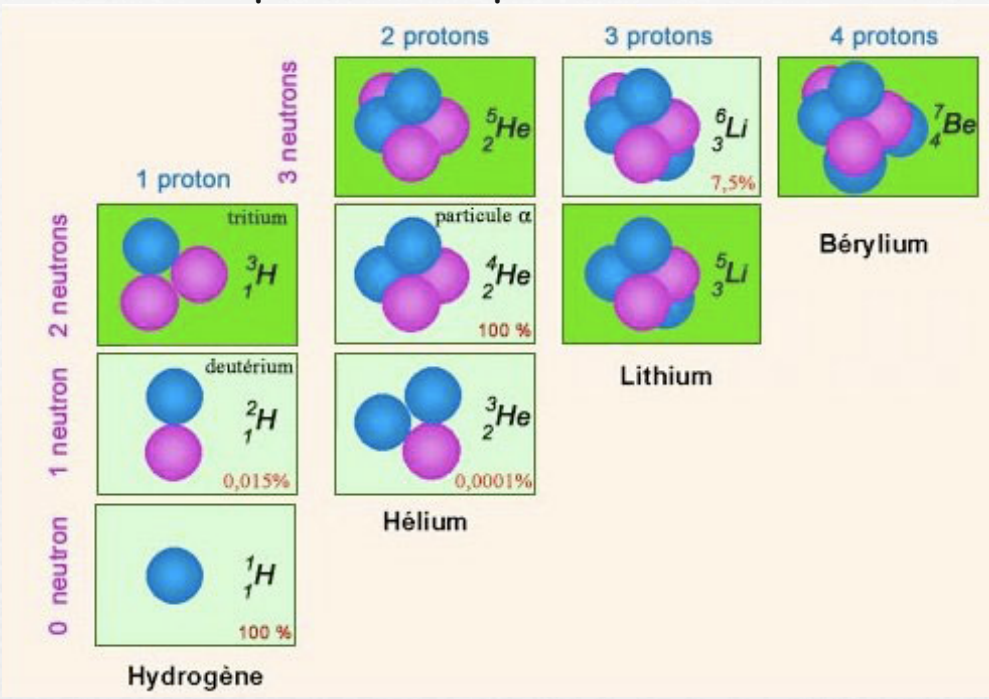
$$
\begin{aligned}
p + n &\rightarrow D + \gamma \\
D + n &\rightarrow {}^3H + \gamma \\
D + p &\rightarrow {}^3He + \gamma \\
D + D &\rightarrow {}^3H + p \\
D + D &\rightarrow {}^3He + n \\
D + D &\rightarrow {}^4He + \gamma \\
{}^3H + p &\rightarrow {}^4He + \gamma \\
{}^3He + n &\rightarrow {}^3H + p \\
{}^3He + n &\rightarrow {}^4He + \gamma \\
{}^3H + D &\rightarrow {}^4He + n \\
{}^3He + D &\rightarrow {}^4He + p \\
{}^3He + {}^3He &\rightarrow {}^4He + 2p \\
{}^4He + D &\rightarrow {}^6Li + \gamma \\
{}^4He + {}^3H &\rightarrow {}^7Li + \gamma \\
{}^4He + {}^3He &\rightarrow {}^7Be + \gamma \\
{}^6Li + n &\rightarrow {}^7Li + \gamma \\
{}^6Li + p &\rightarrow {}^7Be + \gamma \\
{}^7Li + p &\rightarrow {}^4He + \gamma \\
{}^7Be + n &\rightarrow {}^7Li + p \\
{}^7Be + e^- &\rightarrow {}^7Li + \gamma
\end{aligned}
$$

Formation des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) à partir des protons et neutrons

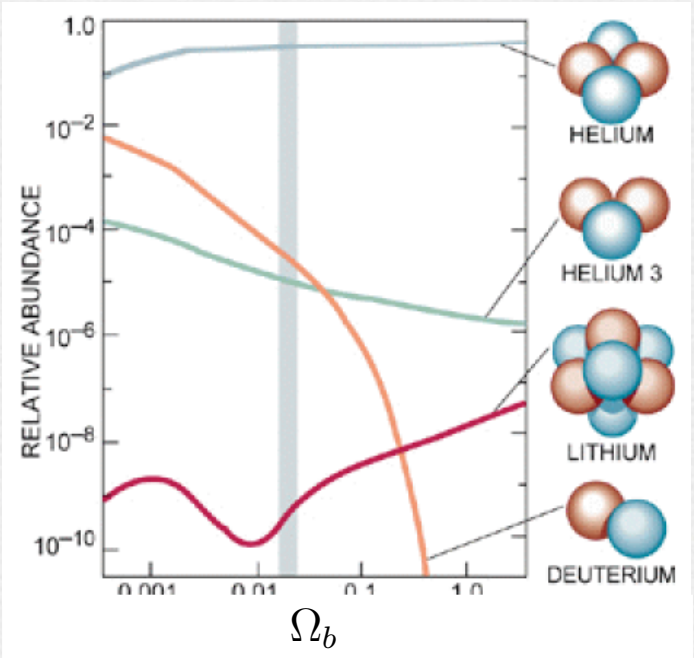


a t<1 s

$$\mathrm{n} + \nu_\mathrm{e} \leftrightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^-$$
$$\mathrm{n} + \mathrm{e}^+ \leftrightarrow \mathrm{p} + \nu_\mathrm{e}$$
$$\mathrm{n} \leftrightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \overline{\nu_\mathrm{e}}$$

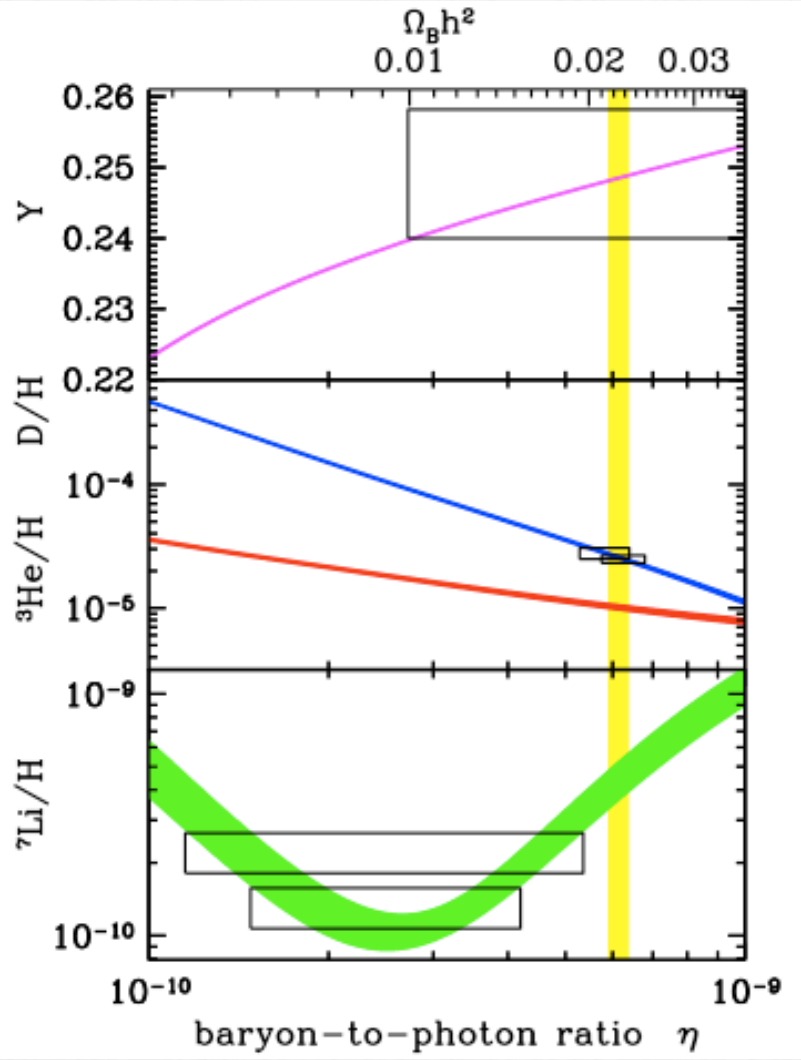


La mesure de l'abondance de ces éléments permet de connaitre la quantité de protons et neutrons dans l'univers primordial. On en déduit la quantité de matière ordinaire aujourd'hui



Nucléosynthèse primordiale

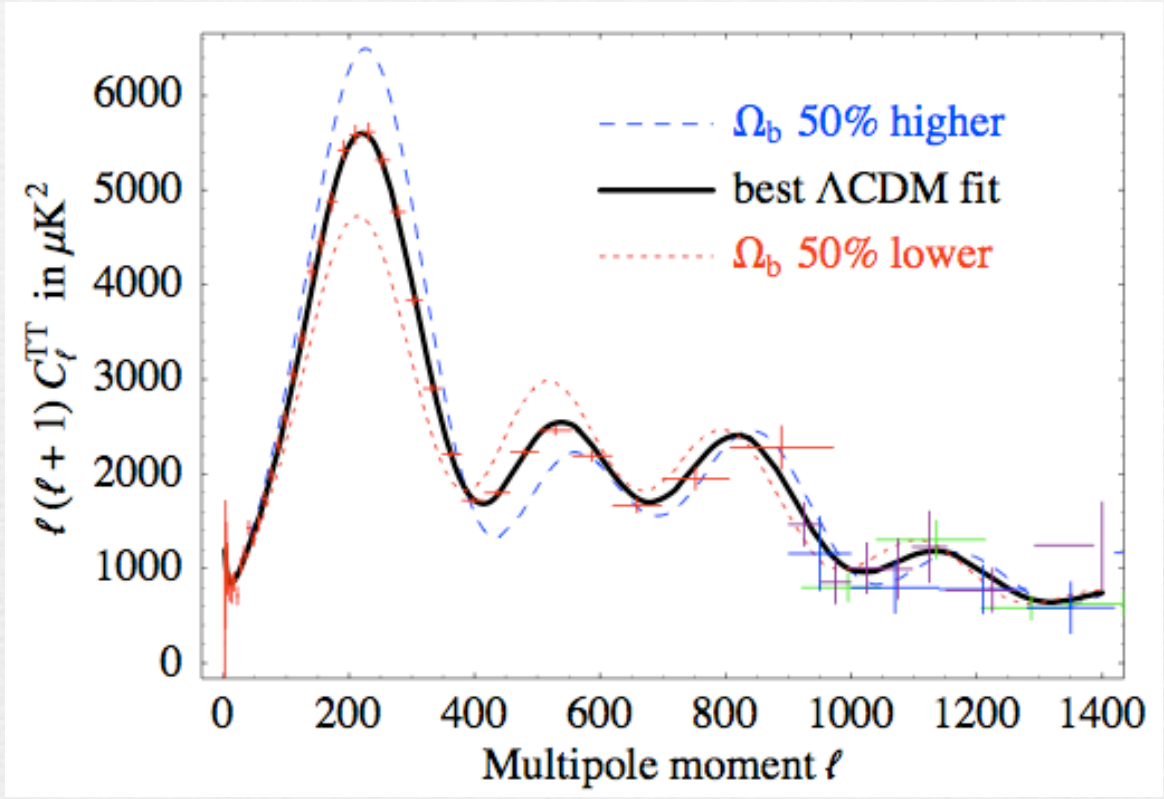
Abondances primordiales en fonction de η



$$\eta = 10^{-10} \times \begin{cases} 6.28 \pm 0.35 \\ 5.92 \pm 0.56 \end{cases}$$

Dependence of the CMB Doppler peaks on η

(CMB temperature fluctuations)



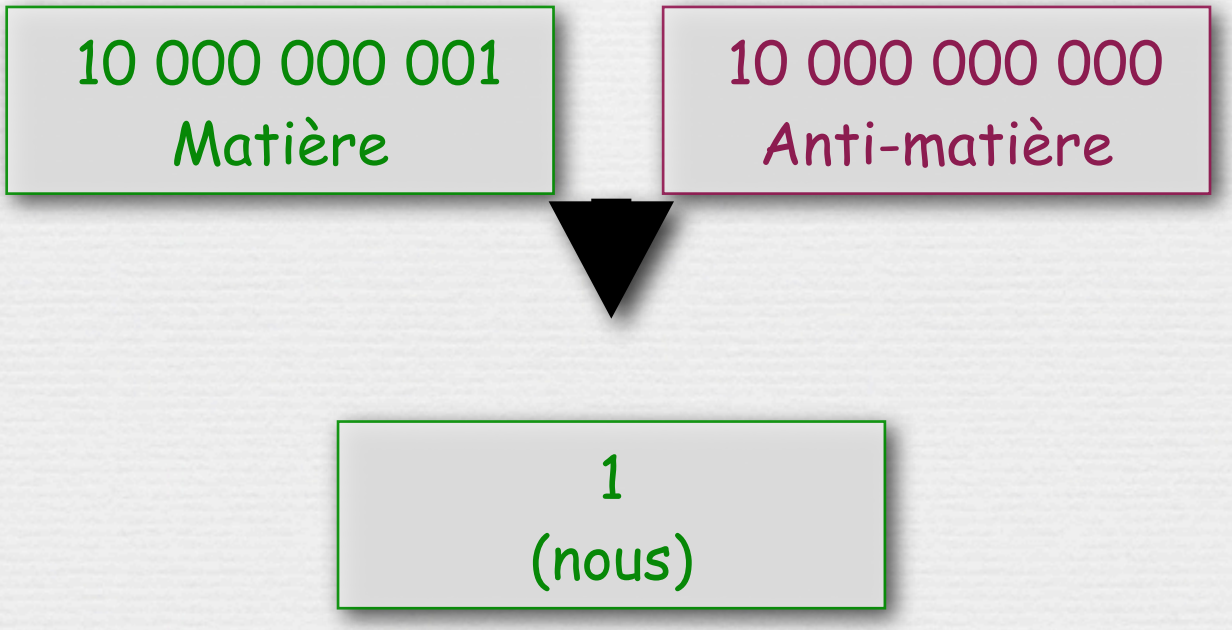
$$\eta = 10^{-10} \times (6.14 \pm 0.25)$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0223^{+0.0007}_{-0.0009}$$

baryons: seulement quelques pourcents de la densité d'énergie totale de l'univers

Asymétrie Matière antimatière

La grande annihilation



Combien de baryons aurait-on dans un univers symétrique?

Les densités de nucleon et anti-nucleon sont controlées par les processus d'annihilation

$$n + \overline{n} \longleftrightarrow \pi + \pi \longleftrightarrow \gamma + \gamma + ...$$

qui deviennent inefficaces lorsque le taux d'expansion devient plus elevé que le taux d'annihilation

$$\Gamma \sim n_N / m_\pi^2 \sim H$$

ce qui correspond a la température

$$T_F \sim 20 \text{ MeV}$$

$$\frac{n_N}{s} \approx 7 \times 10^{-20}$$

Les 3 conditions de Sakharov pour la baryogénese (1967)

1) violation du nombre baryonique (il faut créer un excès de matière)

2) violation des symétries C et CP (les réactions "miroir" doivent avoir des propriétés différentes)

3) L'équilibre thermodynamique doit etre rompu

Why can't we achieve baryogenesis in the Standard Model?

B is violated

C and CP are violated

but which out-of-equilibrium condition?

no heavy particle which could decay out-of-equilibrium

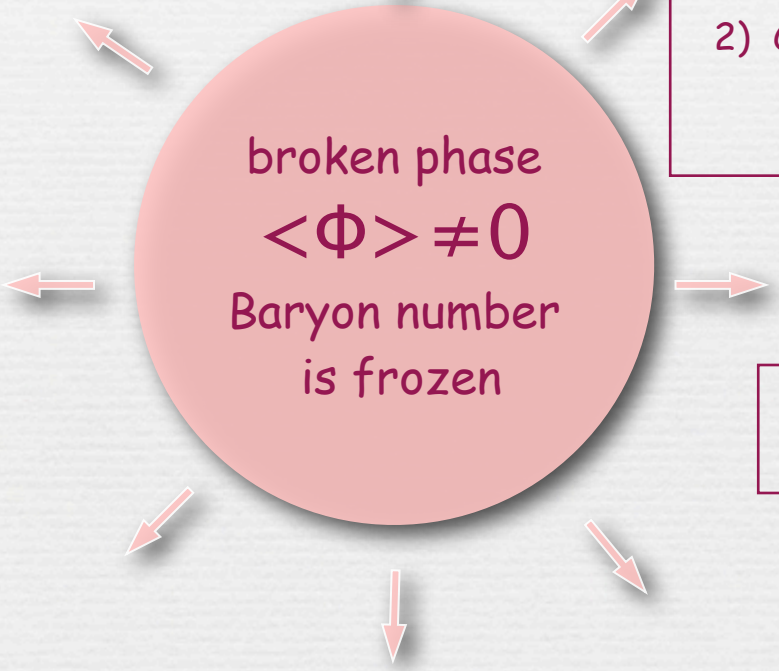
no strong first-order phase transition

Electroweak phase transition is a smooth cross over

Also, CP violation is too small (suppressed by the small quark masses, remember there is no CP violation if quark masses vanish)

Baryon asymmetry and the EW scale

1) nucleation and expansion of bubbles of broken phase



2) CP violation at phase interface responsible for mechanism of charge separation

Chirality Flux
in front of the wall

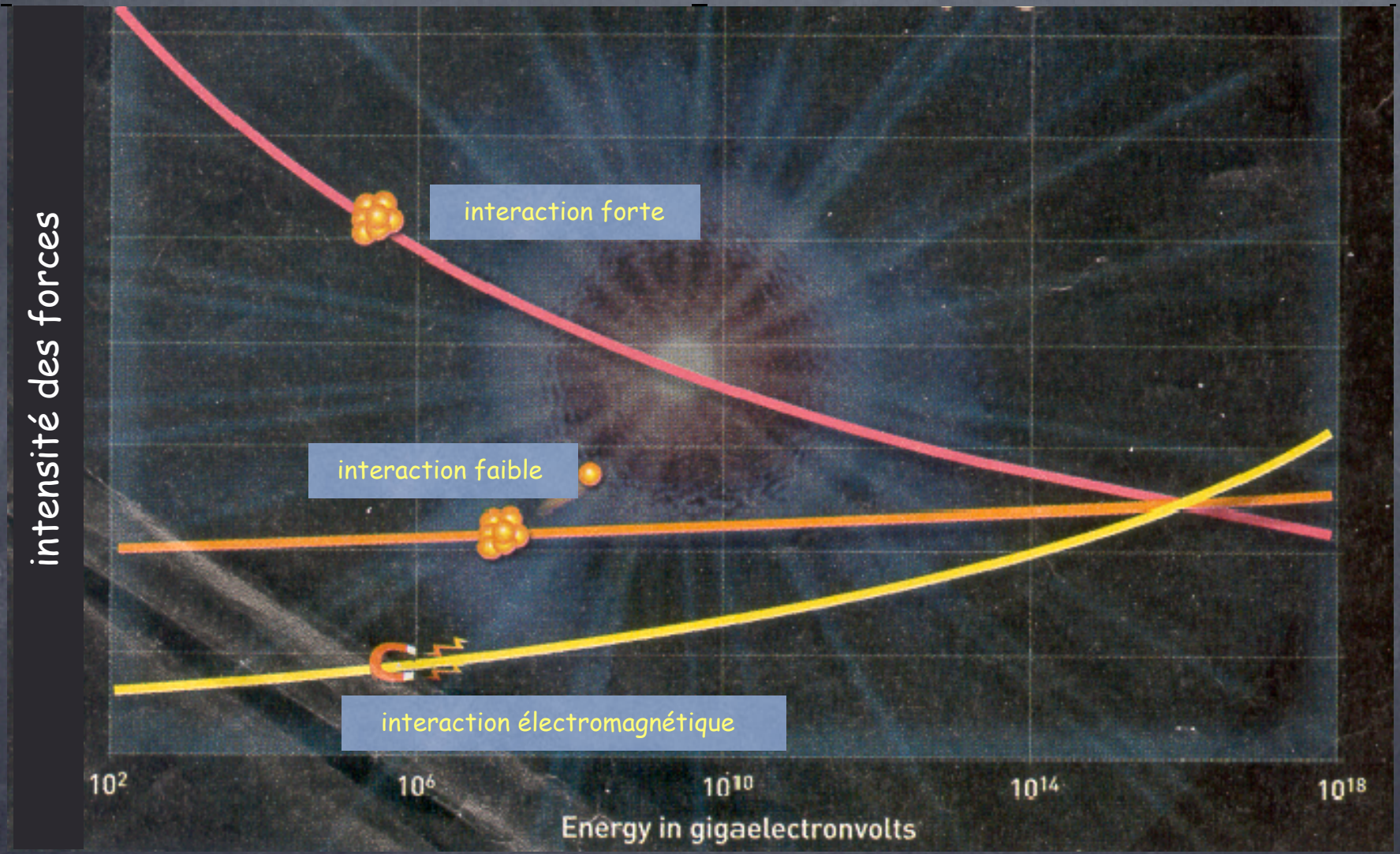
3) In symmetric phase, <Φ>=0, very active sphalerons convert chiral asymmetry into baryon asymmetry

Electroweak baryogenesis mechanism relies on a first-order phase transition

What is the nature of the electroweak phase transition?

Quelle physique au-dela du Modèle Standard?

Théories de grande unification



Un seul type de matière
Une seule interaction fondamentale

Supersymétrie

Il existe 2 catégories de particules:

Fermions

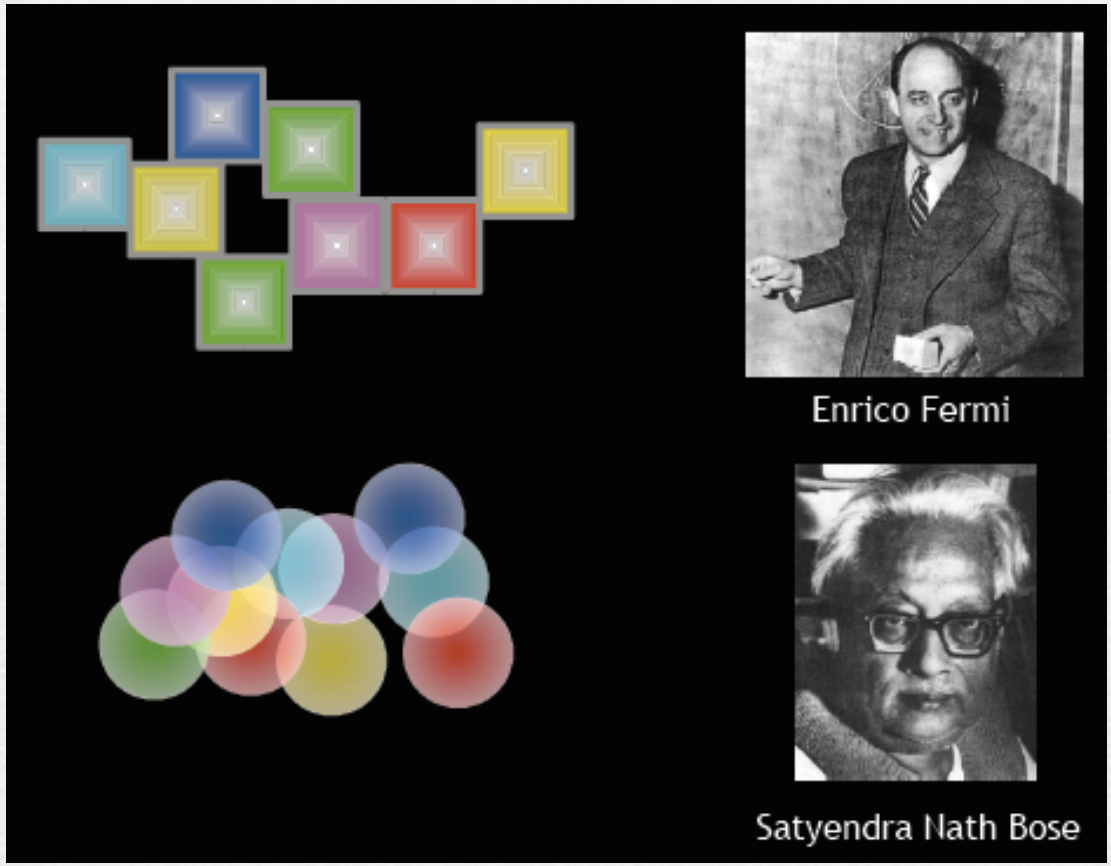
particules de matière

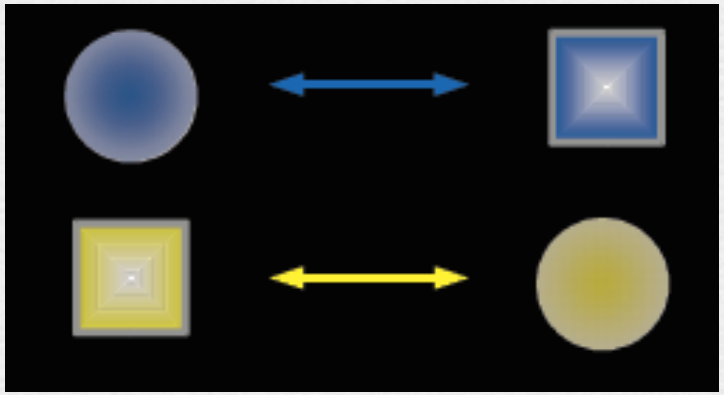
Les fermions se repoussent

Bosons

particules de forces

Les bosons peuvent s'empiler

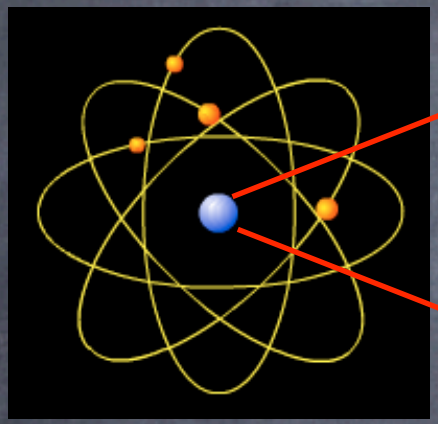




Théorie des cordes

(univers observable)

$10^{-10}\mathrm{m}$

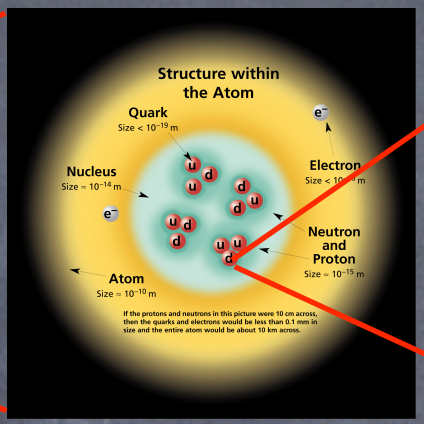


Atome

électrons + noyau

(Terre)

$10^{-17}\mathrm{m}$

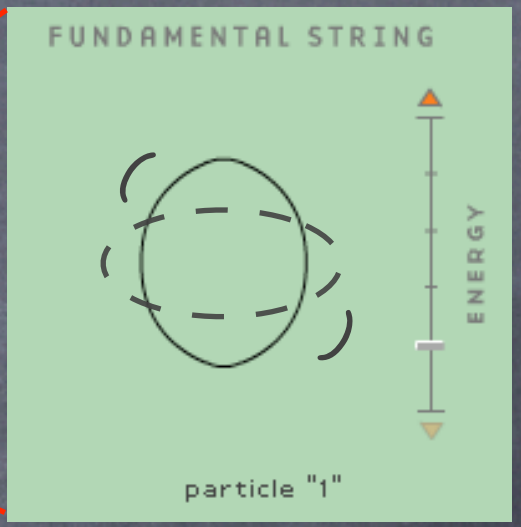


Noyau

quarks

(cheveu)

$10^{-35}\mathrm{m}$

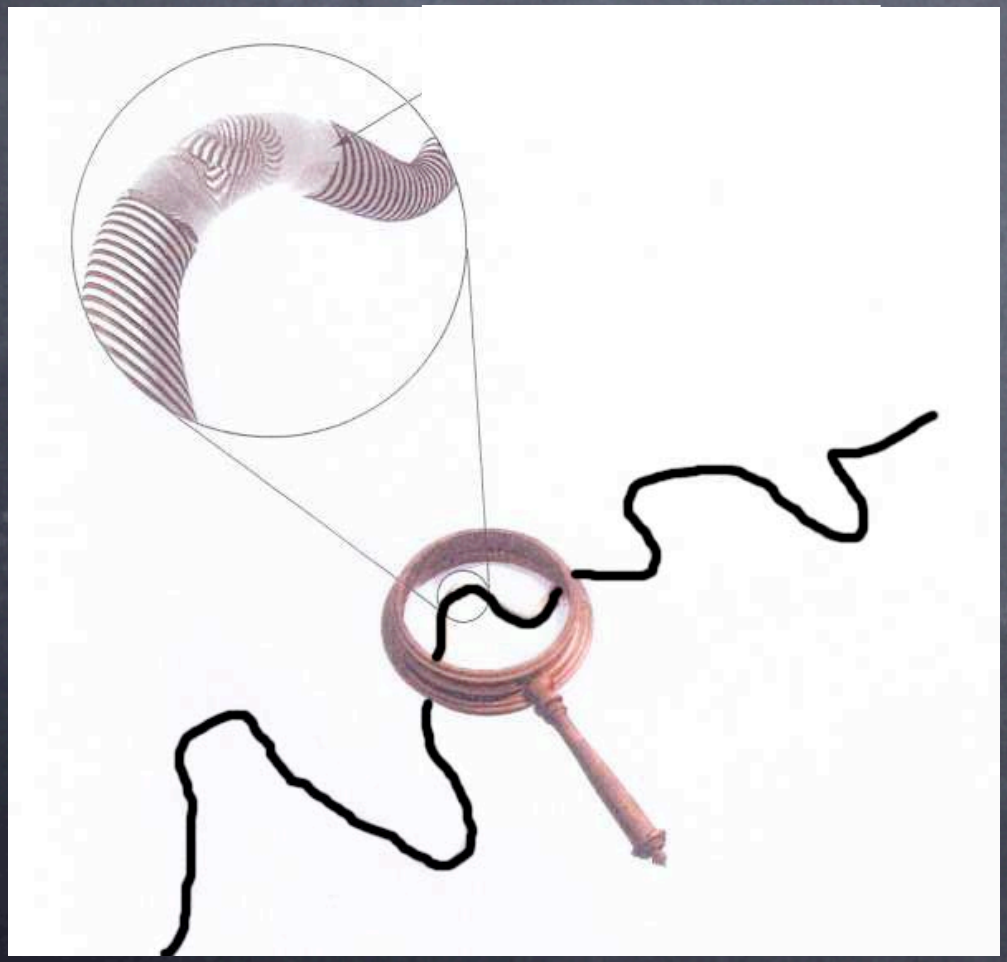


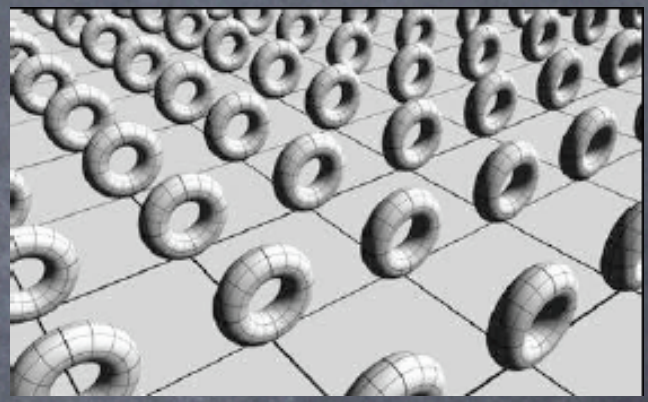
(Super)Corde

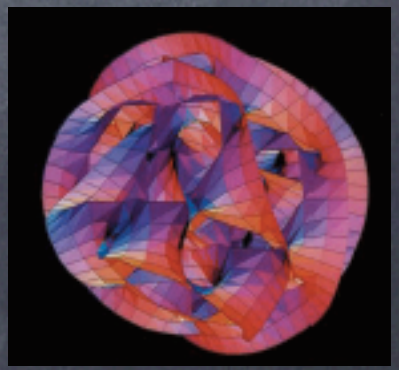
Dimensions supplémentaires

Les théories des cordes sont (bien) définies uniquement dans des espaces ayant 10 ou 11 dimensions

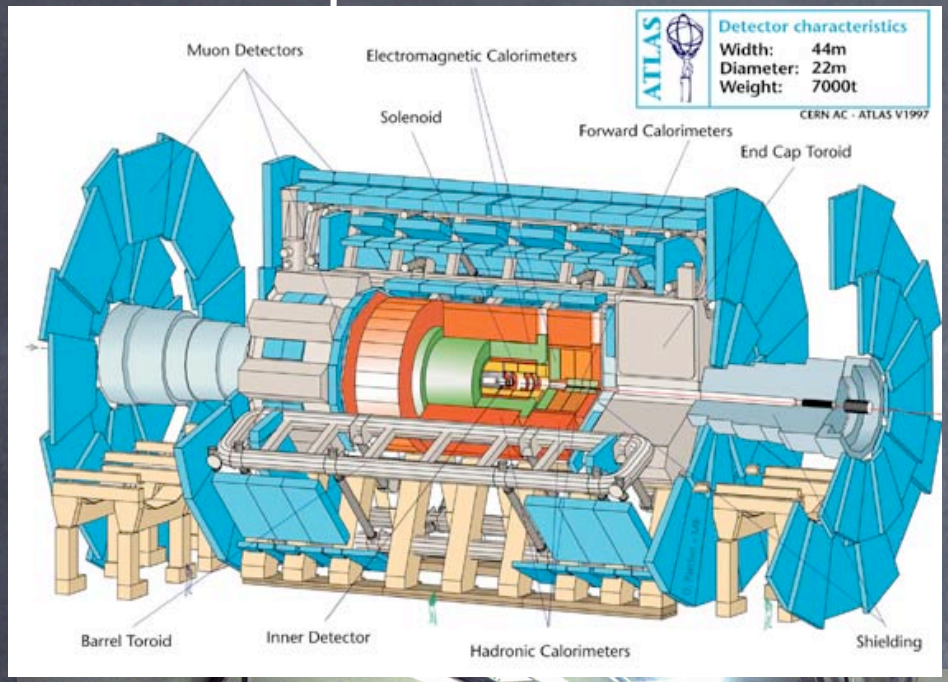
Ces dimensions supplémentaires sont recourbées sur elles-mêmes

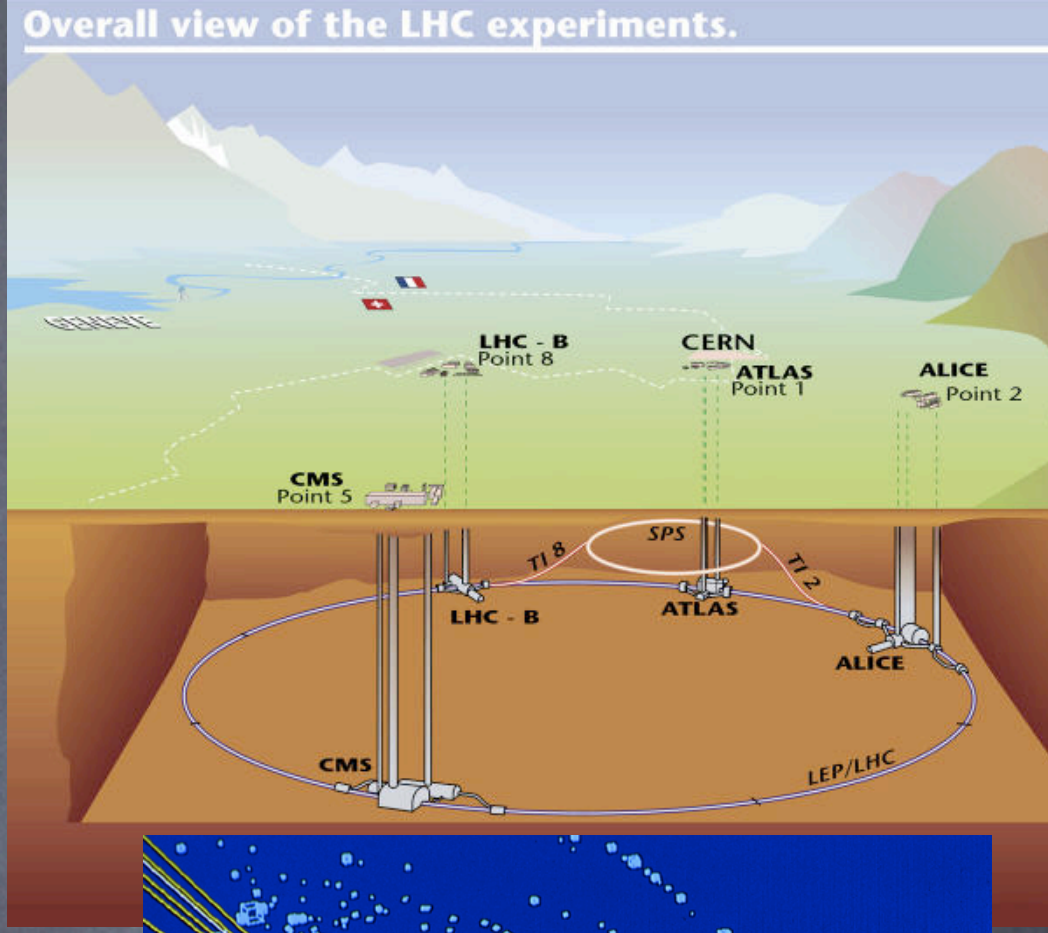


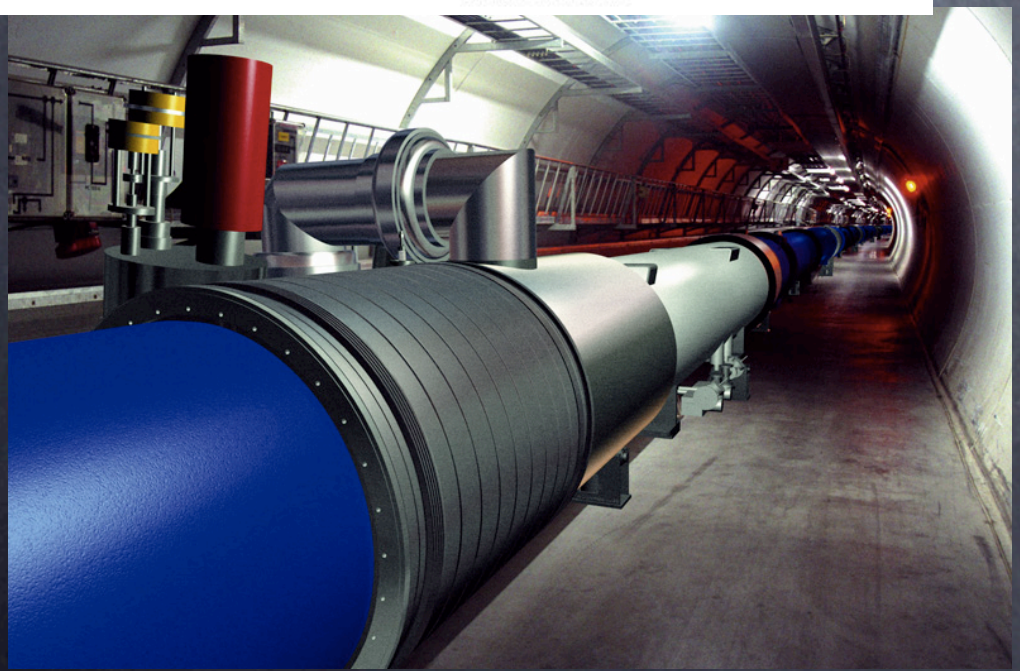




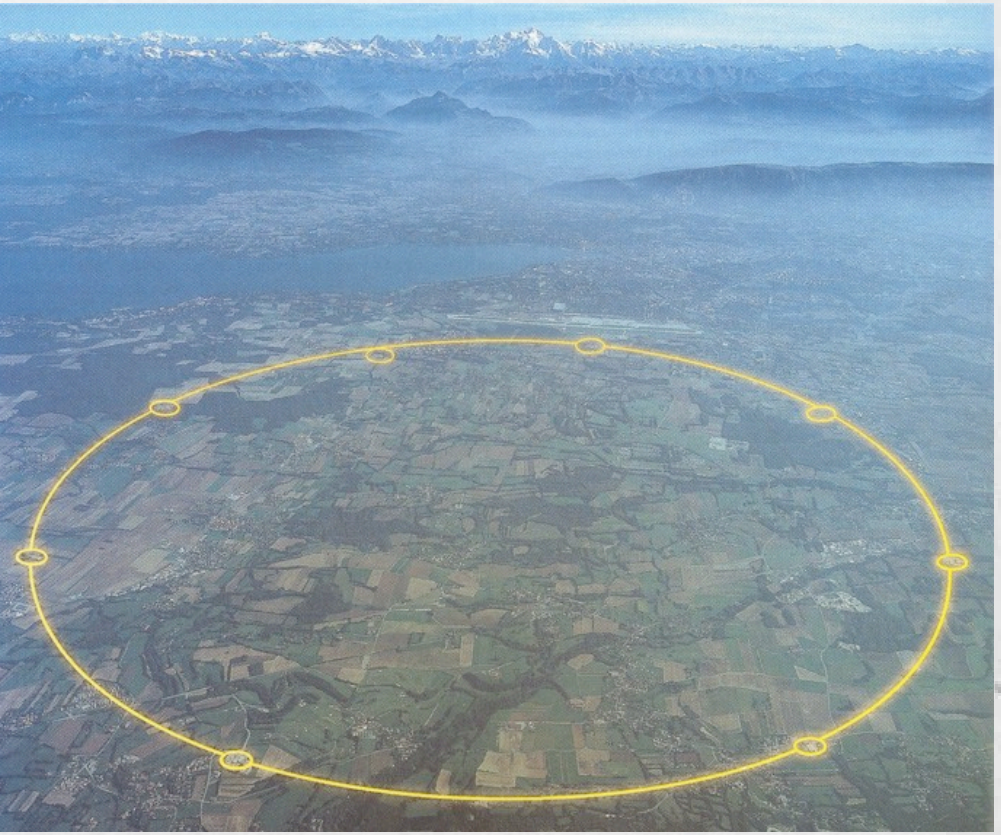
2010: Le début d'une nouvelle aventure pour les physiciens des particules

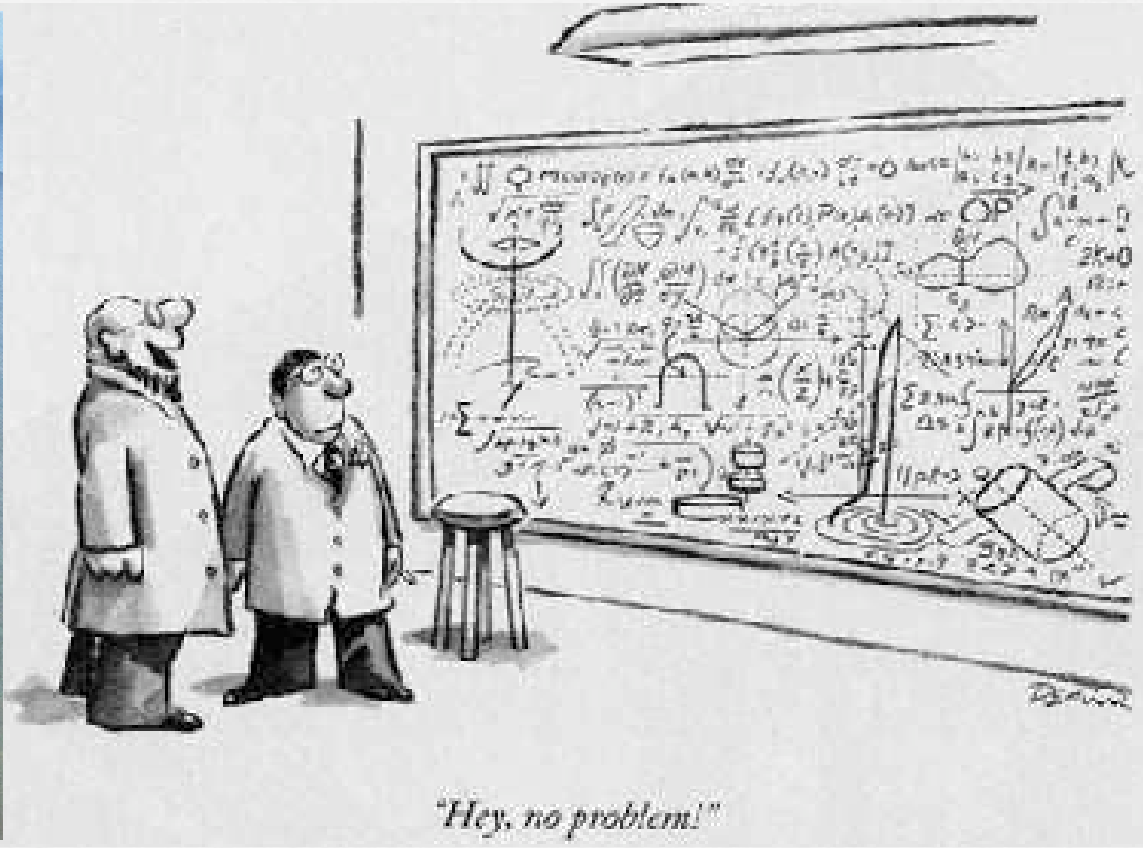






Des questions ?





"Hey, no problem!"