

Introduction à la Cosmologie

Géraldine SERVANT

CEA Saclay & CERN Physics department, Theory Unit

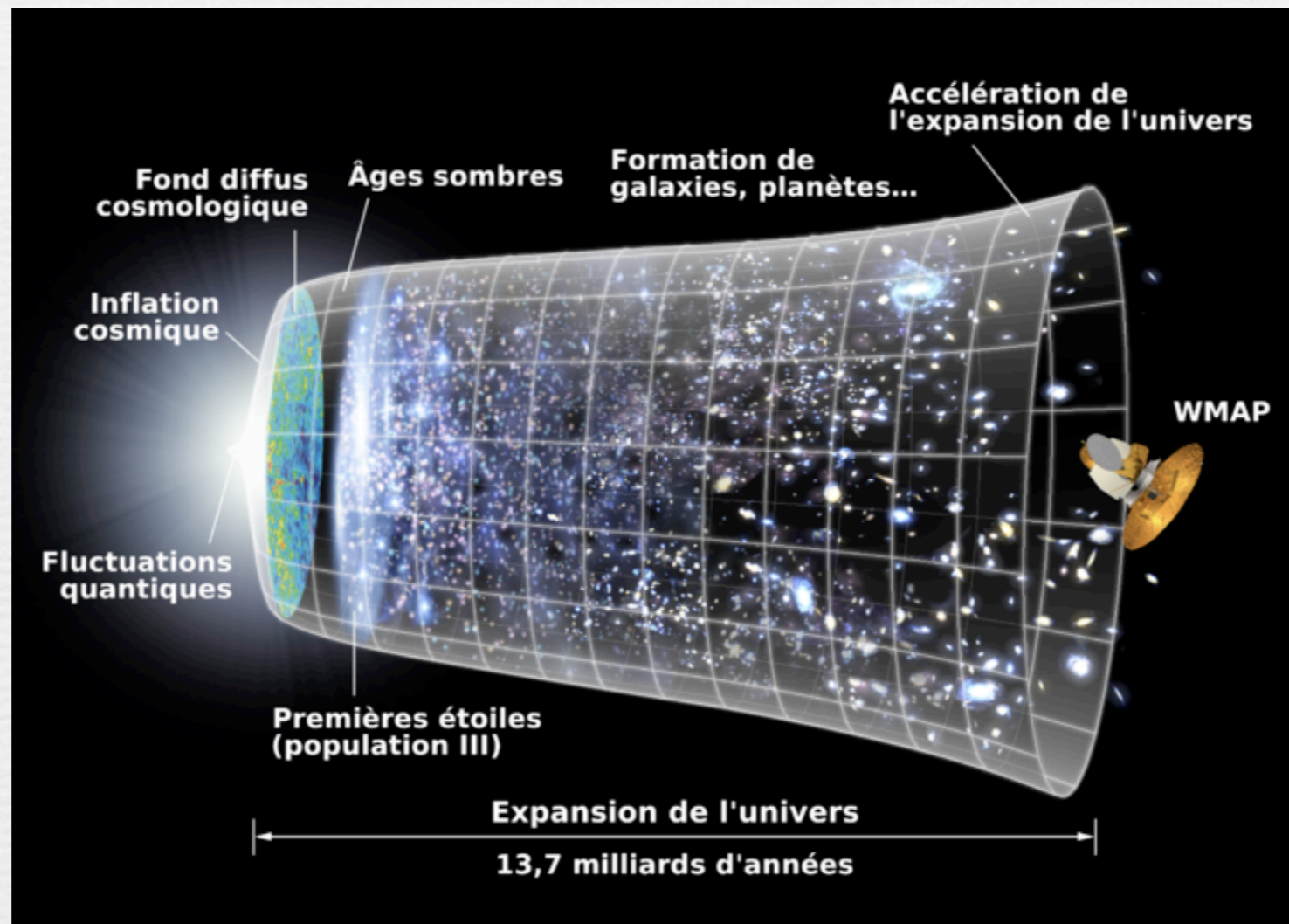


Objet de la cosmologie: expliquer la structure et l'évolution de l'univers

De quoi est-il constitué?

Comment se sont formées les grandes structures?

Quelles sont les lois qui régissent son évolution ?



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

La cosmologie: une science entrée dans une ère de précision

Model: lcdm+sz+lens

Data: wmap5

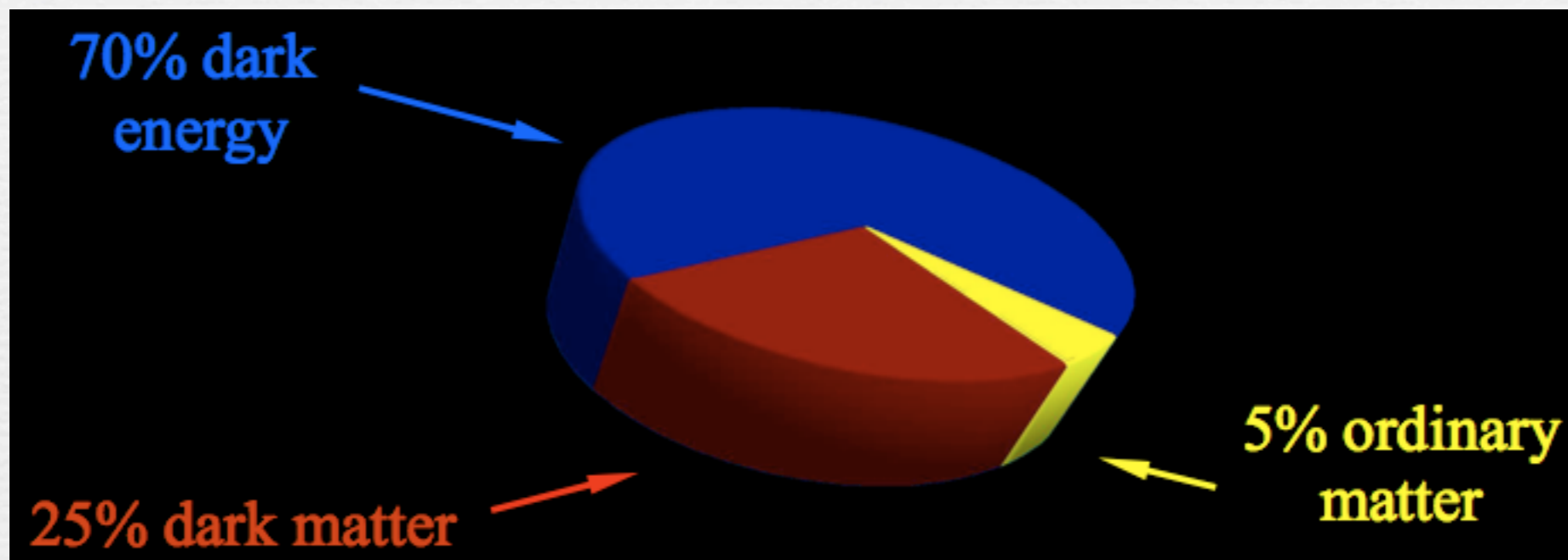
| | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|---|
| $10^2 \Omega_b h^2$ | 2.273 ± 0.062 | $1 - n_s$ | $0.037^{+0.015}_{-0.014}$ |
| $1 - n_s$ | $0.0081 < 1 - n_s < 0.0647$ (95% CL) | $A_{\text{BAO}}(z = 0.35)$ | 0.457 ± 0.022 |
| C_{220} | 5756 ± 42 | $d_A(z_{\text{eq}})$ | 14279^{+186}_{-189} Mpc |
| $d_A(z_*)$ | 14115^{+188}_{-191} Mpc | $\Delta_{\mathcal{R}}^2$ | $(2.41 \pm 0.11) \times 10^{-9}$ |
| h | $0.719^{+0.026}_{-0.027}$ | H_0 | $71.9^{+2.6}_{-2.7}$ km/s/Mpc ← taux d'expansion |
| k_{eq} | 0.00968 ± 0.00046 | ℓ_{eq} | 136.6 ± 4.8 |
| ℓ_* | $302.08^{+0.83}_{-0.84}$ | n_s | $0.963^{+0.014}_{-0.015}$ |
| Ω_b | 0.0441 ± 0.0030 | $\Omega_b h^2$ | 0.02273 ± 0.00062 |
| Ω_c | 0.214 ± 0.027 | $\Omega_c h^2$ | 0.1099 ± 0.0062 |
| Ω_Λ | 0.742 ± 0.030 | Ω_m | 0.258 ± 0.030 ← fraction de la densité d'énergie totale en matière |
| $\Omega_m h^2$ | 0.1326 ± 0.0063 | $r_{\text{hor}}(z_{\text{dec}})$ | 286.0 ± 3.4 Mpc |
| $r_s(z_d)$ | 153.3 ± 2.0 Mpc | $r_s(z_d)/D_v(z = 0.2)$ | 0.1946 ± 0.0079 |
| $r_s(z_d)/D_v(z = 0.35)$ | 0.1165 ± 0.0042 | $r_s(z_*)$ | 146.8 ± 1.8 Mpc |
| R | 1.713 ± 0.020 | σ_8 | 0.796 ± 0.036 |
| A_{SZ} | $1.04^{+0.96}_{-0.69}$ | t_0 | 13.69 ± 0.13 Gyr ← age de l'univers |
| τ | 0.087 ± 0.017 | θ_* | 0.010400 ± 0.000029 |
| θ_* | 0.5959 ± 0.0017 ° | t_* | 380081^{+5843}_{-5841} yr |
| z_{dec} | 1087.9 ± 1.2 | z_d | 1020.5 ± 1.6 |
| z_{eq} | 3176^{+151}_{-150} | z_{reion} | 11.0 ± 1.4 |
| z_* | 1090.51 ± 0.95 | | |

fraction de la densité d'énergie totale en "énergie noire"



fraction de la densité d'énergie totale en matière

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



Plan

Modèle standard de
la cosmologie et
Modèle standard de
la physique des
particules

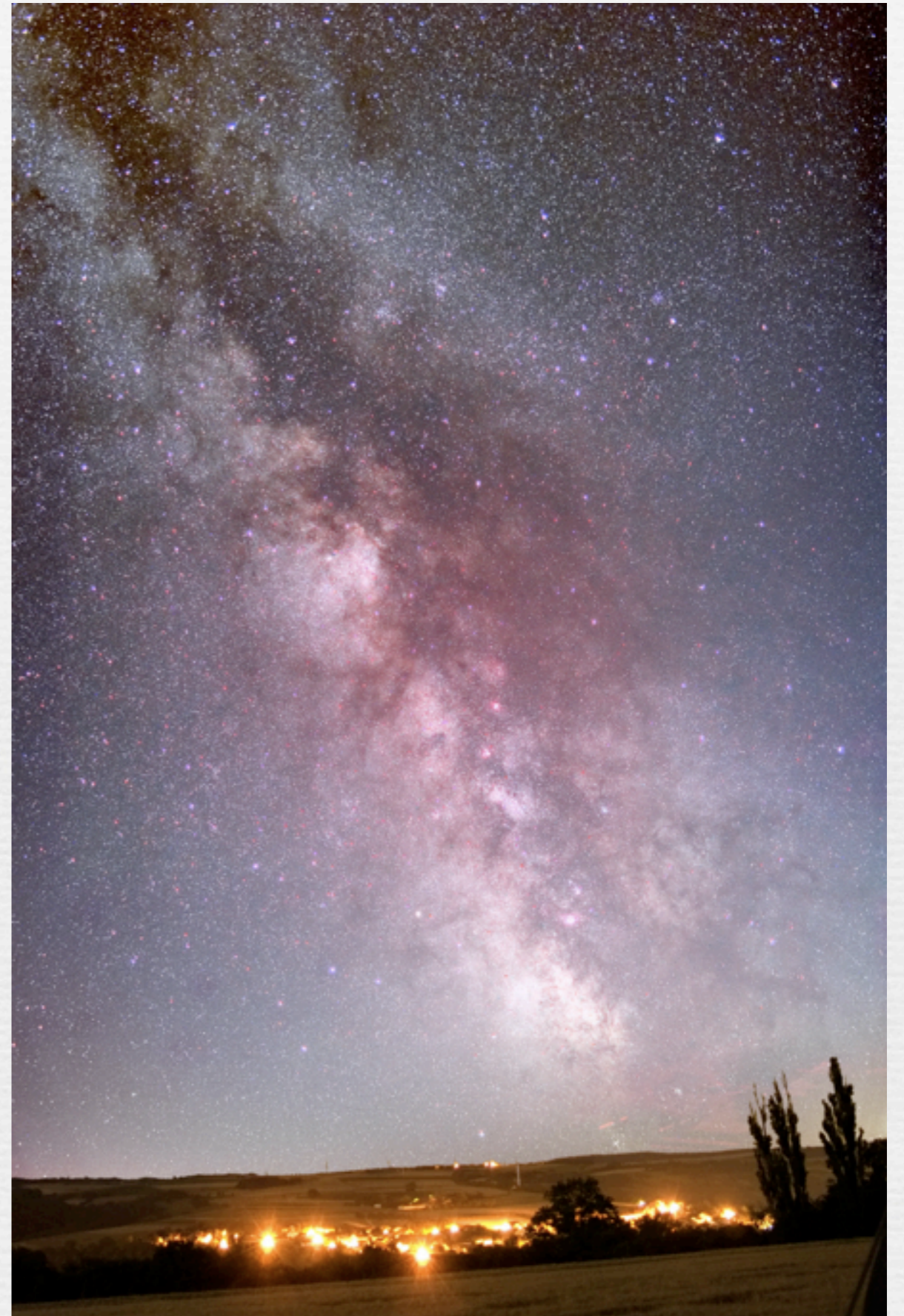
- Univers en expansion
- contenu de l'univers
- Physique des particules et évolution de l'univers primordial
- l'histoire thermique de l'univers

Au-delà du Modèle
Standard

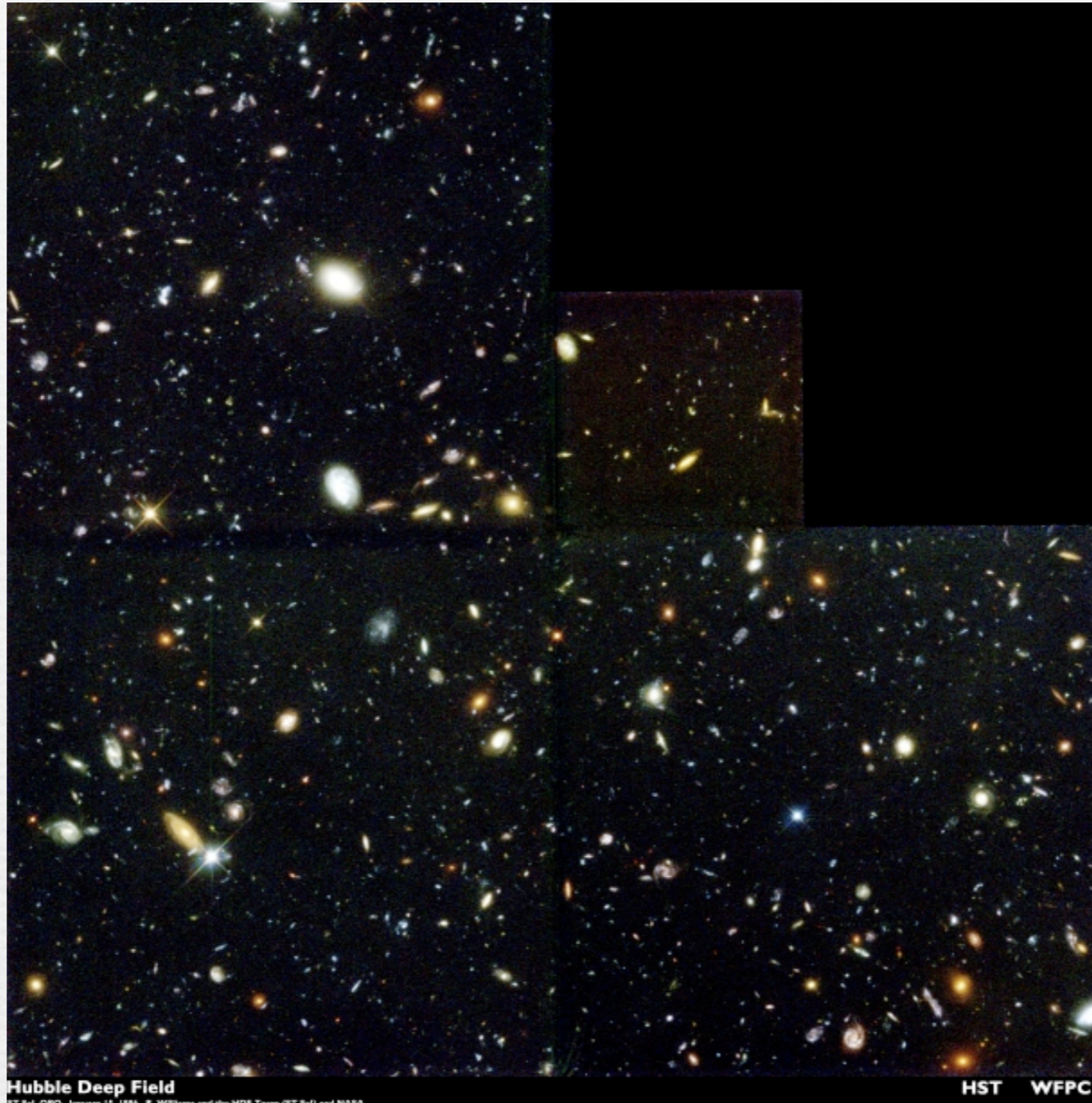
- brisure de la symétrie électrofaible
- Matière noire
evidence observationnelle
candidats
détection
- asymétrie matière / anti-matière
evidence observationnelle
mécanisme de baryogenèse
- Le problème de l'énergie noire et le problème de la
coincidence

Nous vivons à la périphérie d'une énorme collection d'étoiles:

La Voie Lactée: Une galaxie
parmi les centaines de milliards
de galaxies de notre univers



Notre univers: quelques centaines de milliards de galaxies

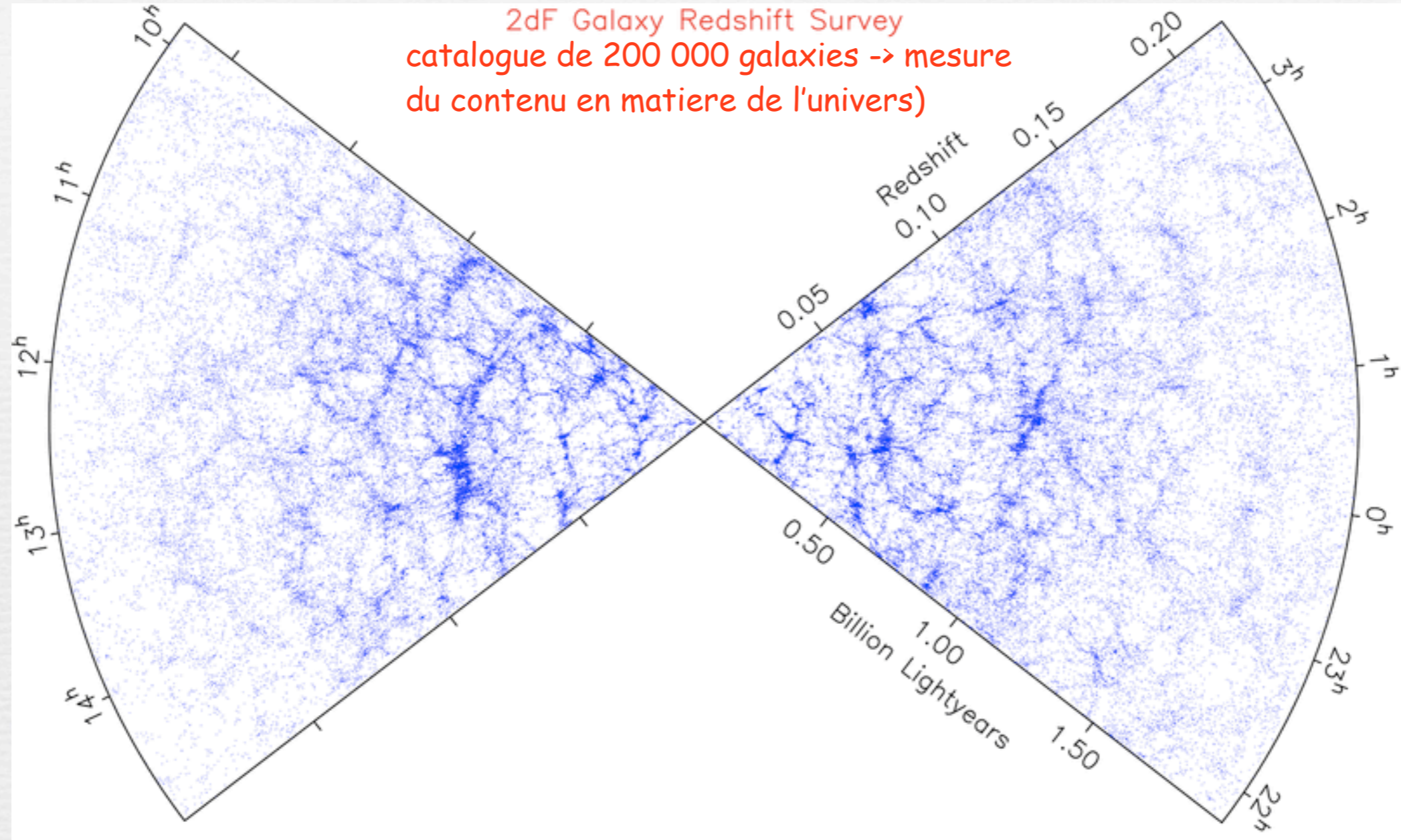


une répartition qui reflète l'influence de la gravité

étoiles \subset galaxies \subset groupes de galaxies \subset amas de galaxies \subset superamas

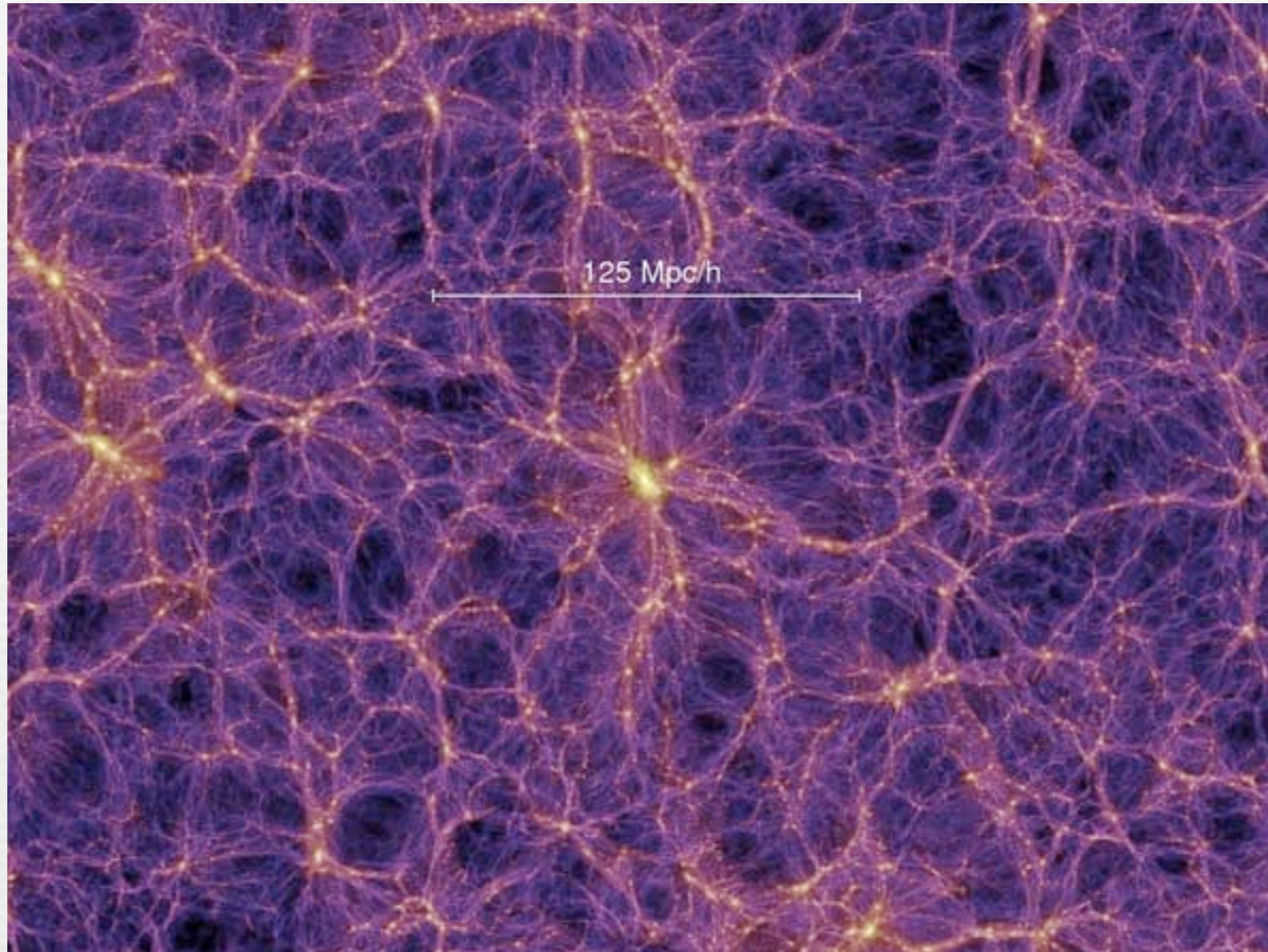
les plus grosses structures connues

portion observable de l'univers: ~ 3000 Mpc
(1 Mpc $\simeq 3.26 \times 10^6$ années lumière $\simeq 3 \times 10^{24}$ cm)



la caractéristique principale de notre univers:
homogène et isotrope à grande échelle (>100 Mpc)

aux échelles < 100 Mpc: structure très
inhomogène (galaxies, amas, super-amas)



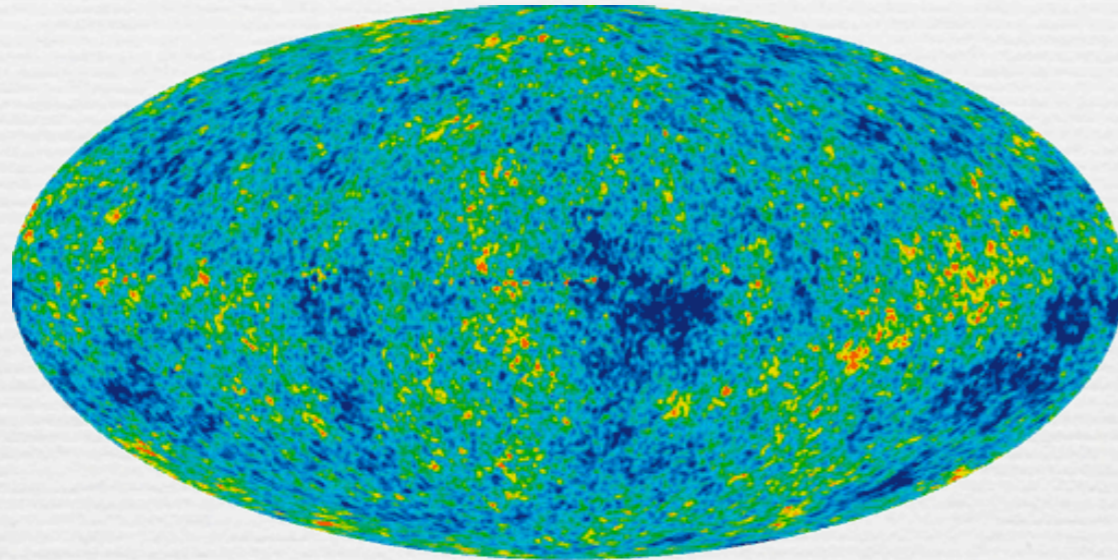
La matière primordiale de l'Univers s'est peu à peu condensée en filaments, en super-amas, puis en amas de galaxies.

Simulation numérique de l'évolution de la matière primordiale permettant de retracer l'histoire des quelque 20 millions de galaxies.

Caractéristique 1: Univers homogène et isotrope:
son apparence ne dépend pas de la position de
l'observateur ni de la direction d'observation

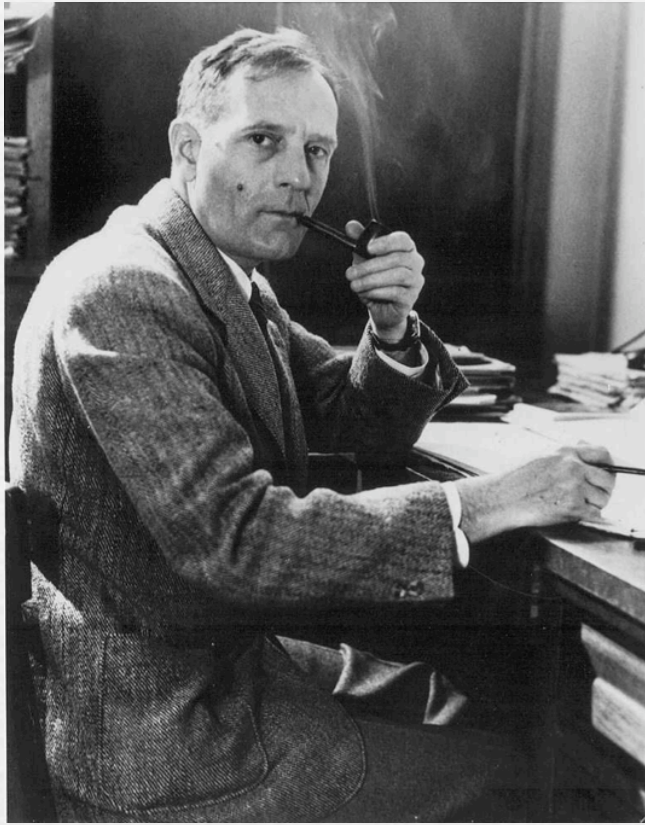


pas de position privilégiée,
pas de centre

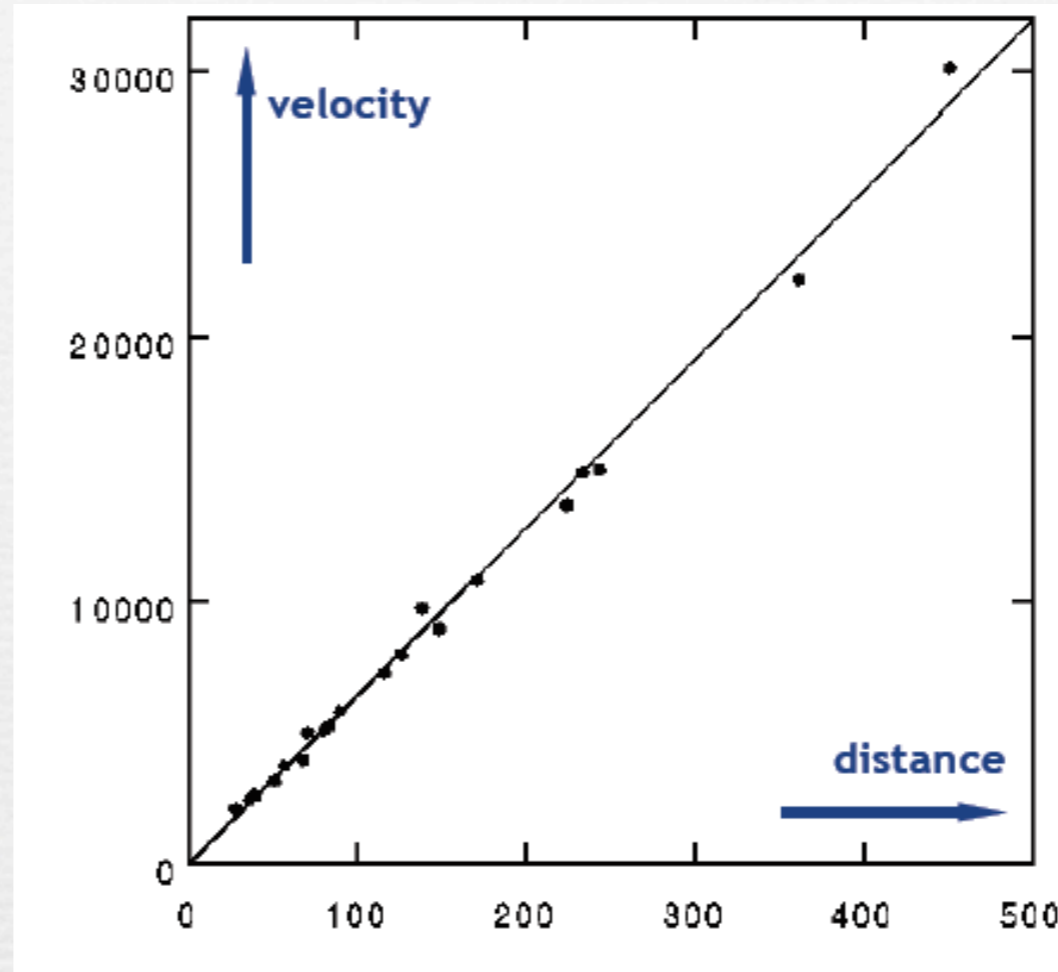


rayonnement de fond cosmologique

Caractéristique 2: L'univers en expansion



1929: Edwin Hubble



$$v = H \times r$$

↑
constante
de Hubble

décalage spectral des galaxies éloignées ->

Effet Doppler $\lambda' = \lambda \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}}$

La vitesse de récession des galaxies est proportionnelle à la distance qui nous en sépare

La théorie du Big Bang

Equation
d'Einstein :

$$G_{\mu\nu} = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

espace-temps courbé par la présence de matière/énergie

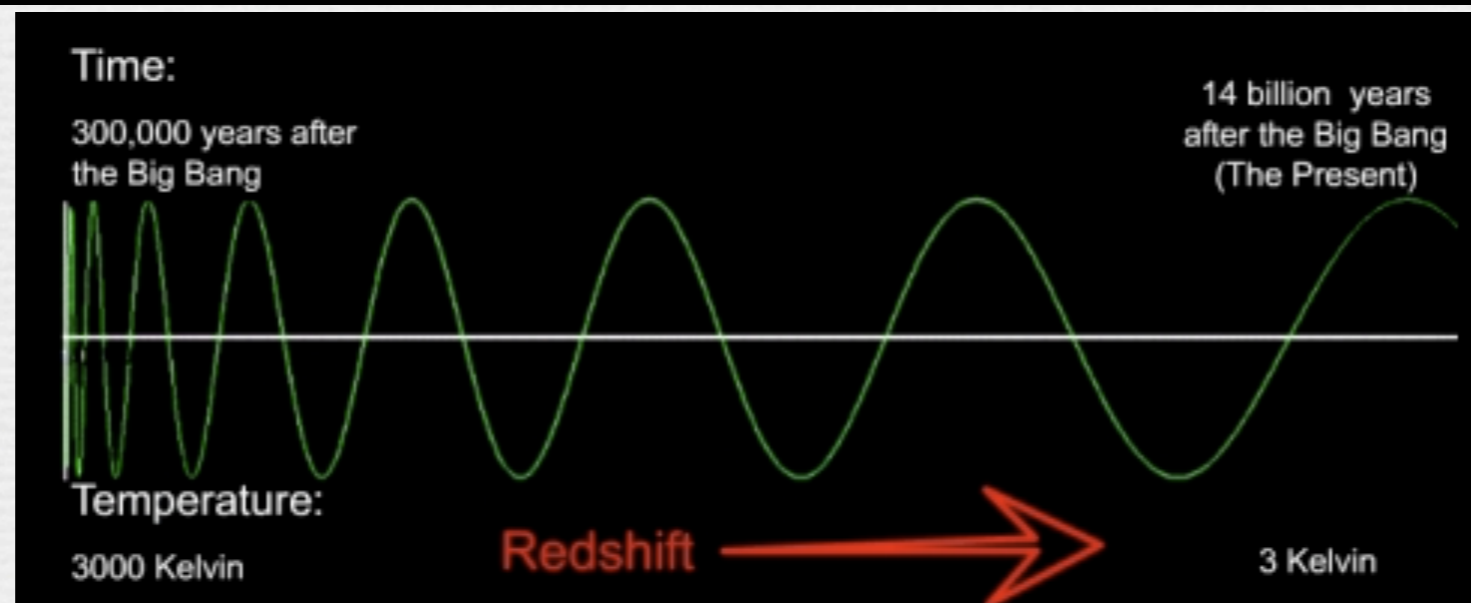
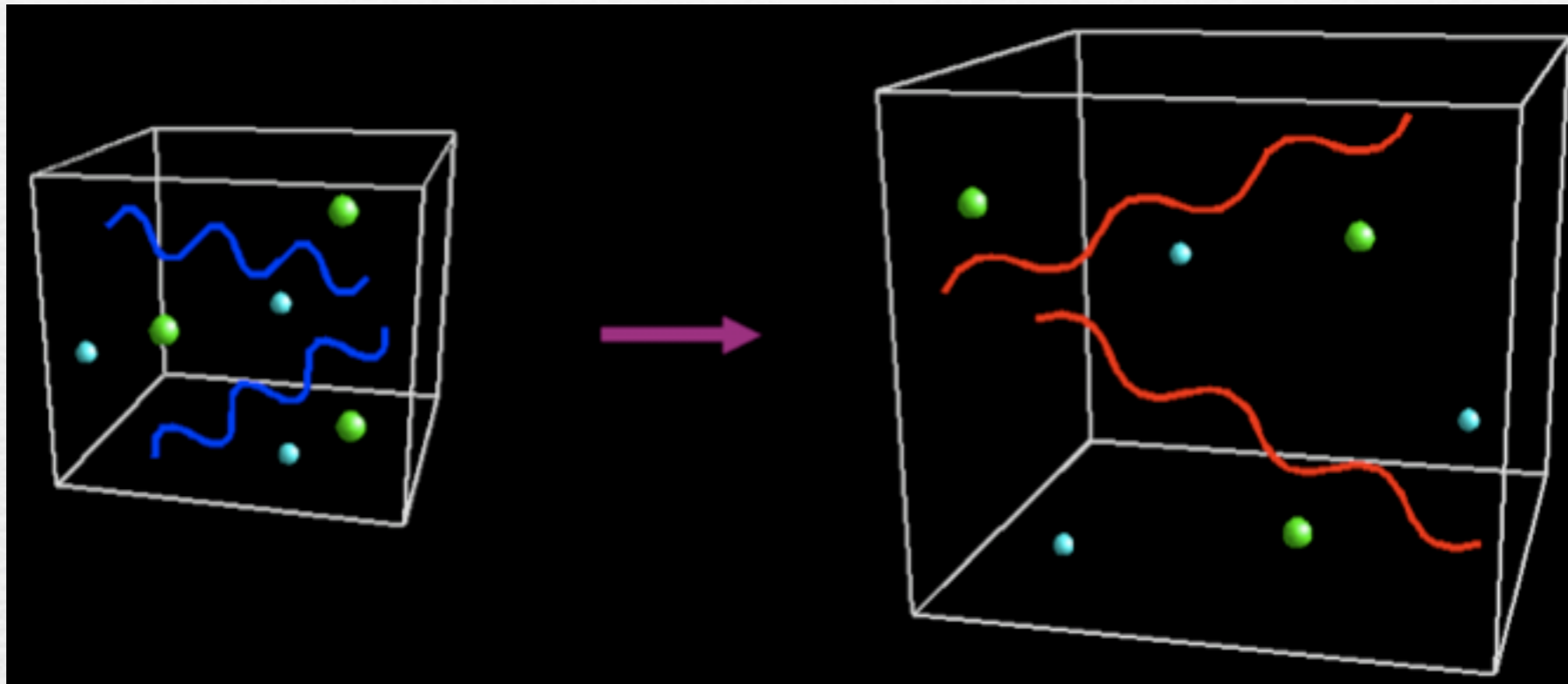
la métrique de
Robertson-Walker,
caractérisée par le
"facteur d'échelle" $a(t)$

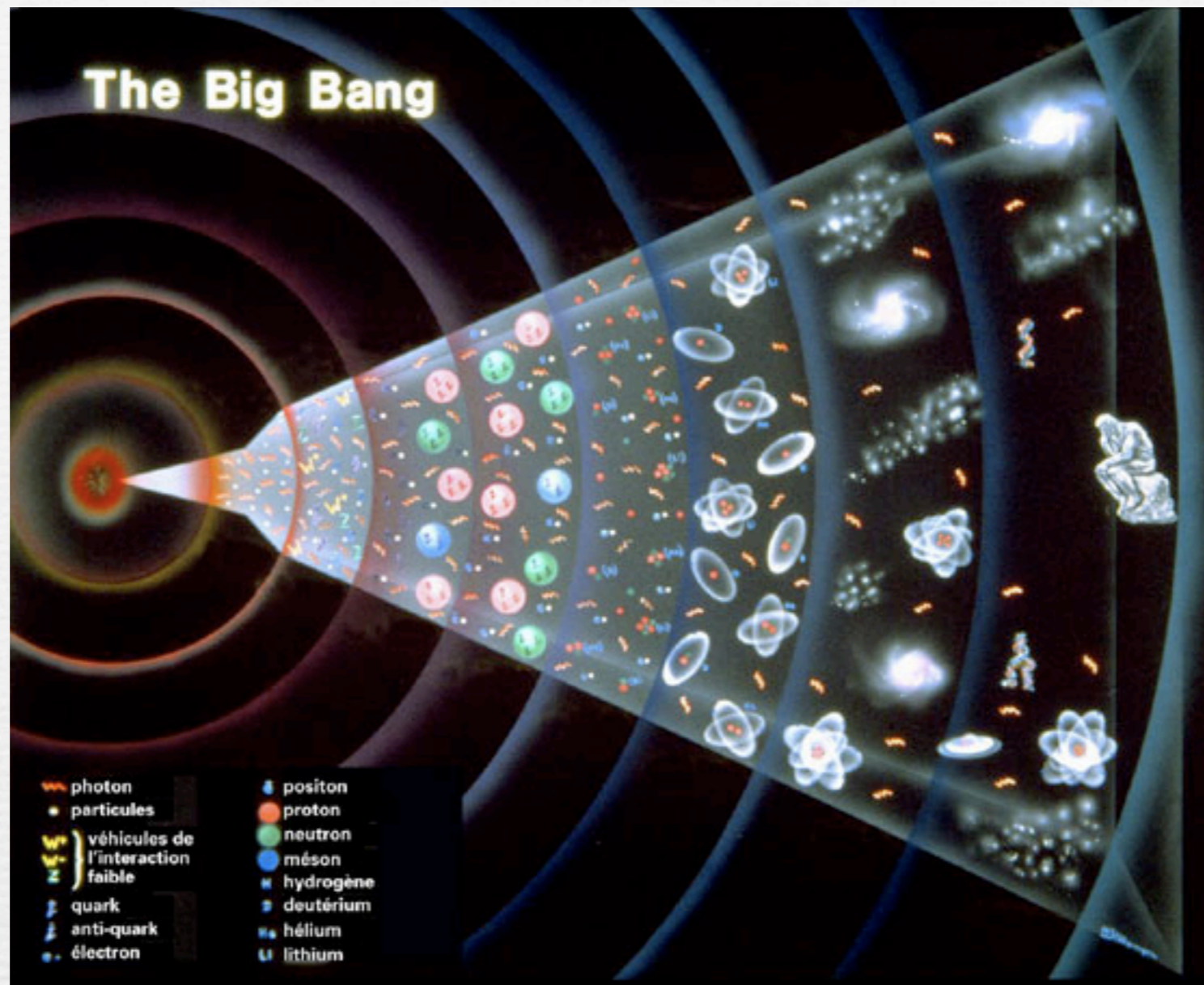
taux
d'expansion $H = \frac{\dot{a}}{a}$

le tenseur énergie-
impulsion

L'univers était plus dense et plus chaud par le passé

L'expansion augmente les distances, dilue le nombre de particules et "allonge" la longueur d'onde des photons, i.e. diminue la fréquence -> décalage vers le rouge





Equation de Friedmann:

$$H = \sqrt{\frac{8\pi G \rho}{3}}$$

taux d'expansion

densité d'énergie totale

Que vaut ρ ?

Tout ce que l'on observe correspond à diverses combinaisons des memes particules fondamentales

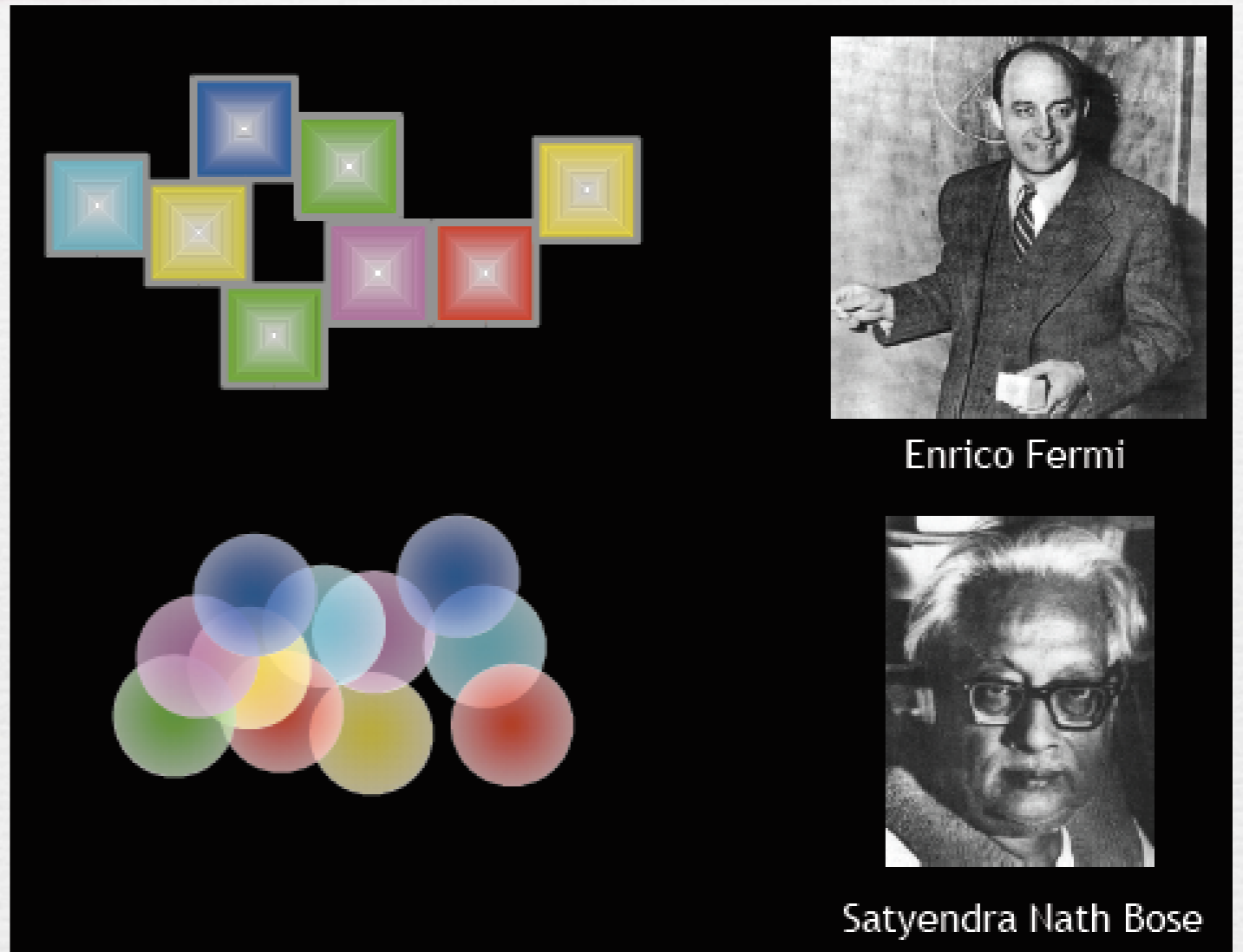
Il existe 2 catégories de particules:

Fermions *particules de matière*

Les fermions se repoussent

Bosons *particules de forces*

Les bosons peuvent s'empiler



Enrico Fermi

Satyendra Nath Bose

Les briques élémentaires de la matière

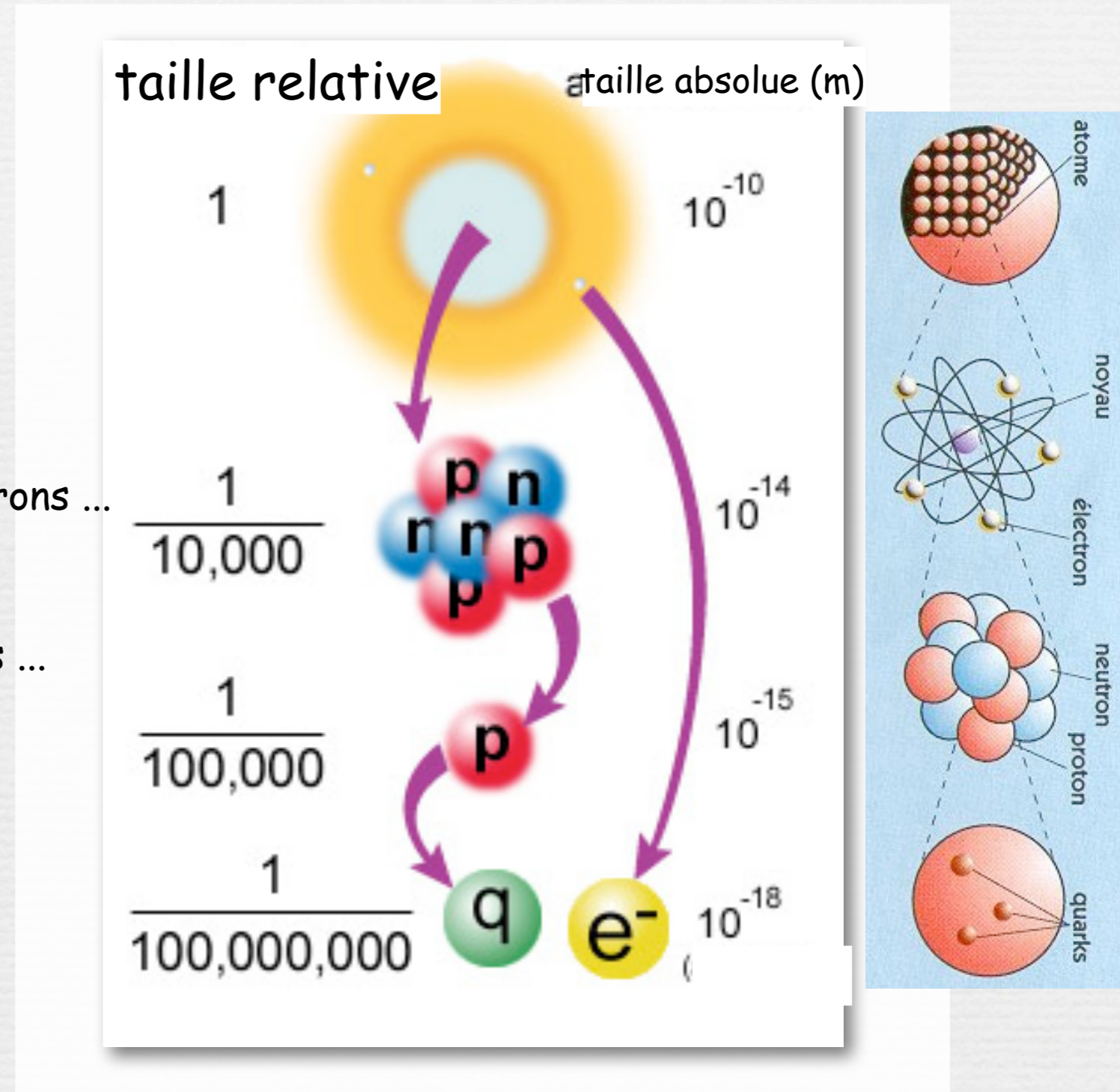
La matière est faite de molécules ...

Les molécules sont des assemblages d'atomes ...

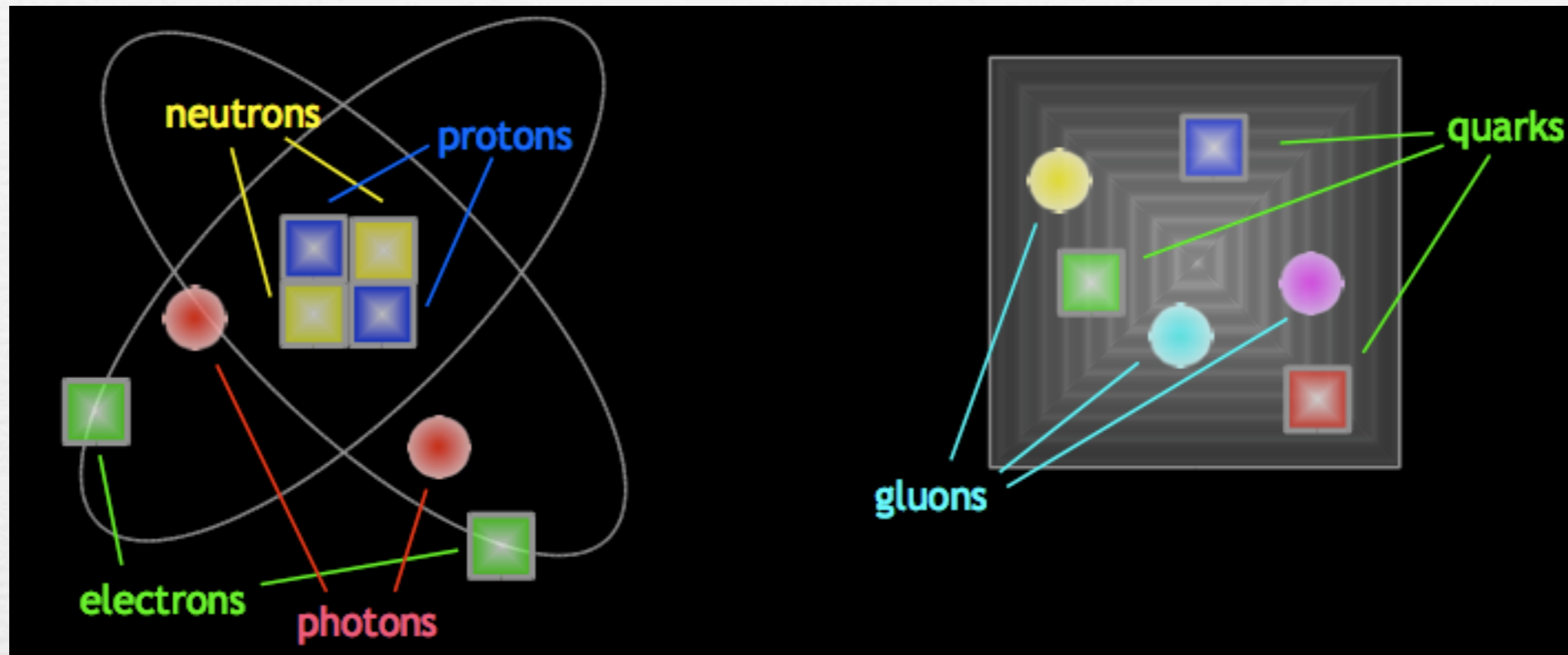
Les atomes sont composés d'un noyau et d'électrons ...

Les noyaux sont faits de protons et de neutrons ...

Protons et neutrons sont composés de quarks ...



la matiere ordinaire est constituée de fermions soudés les uns aux autres par les bosons:



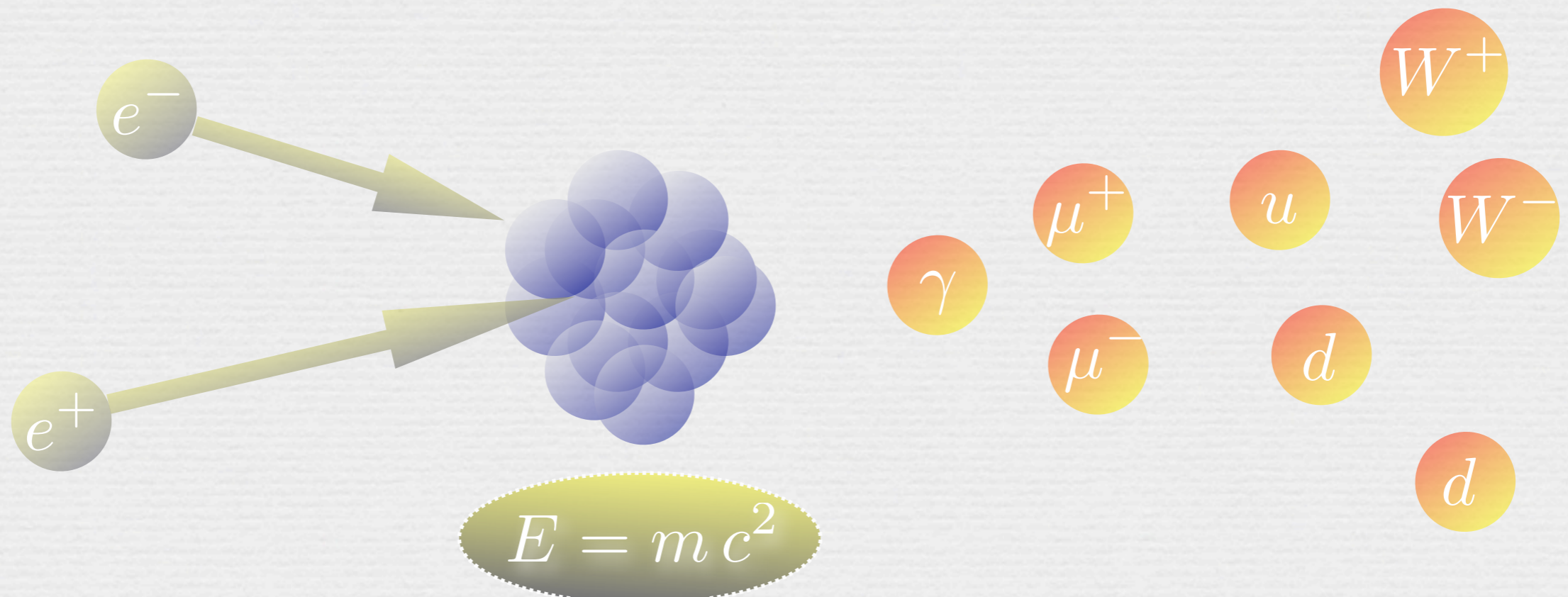
Création de matière à partir d'énergie

- Chimie : réarrangement de la matière

les différents constituants de la matière se réorganisent



- Physique des particules : transformation énergie \leftrightarrow matière

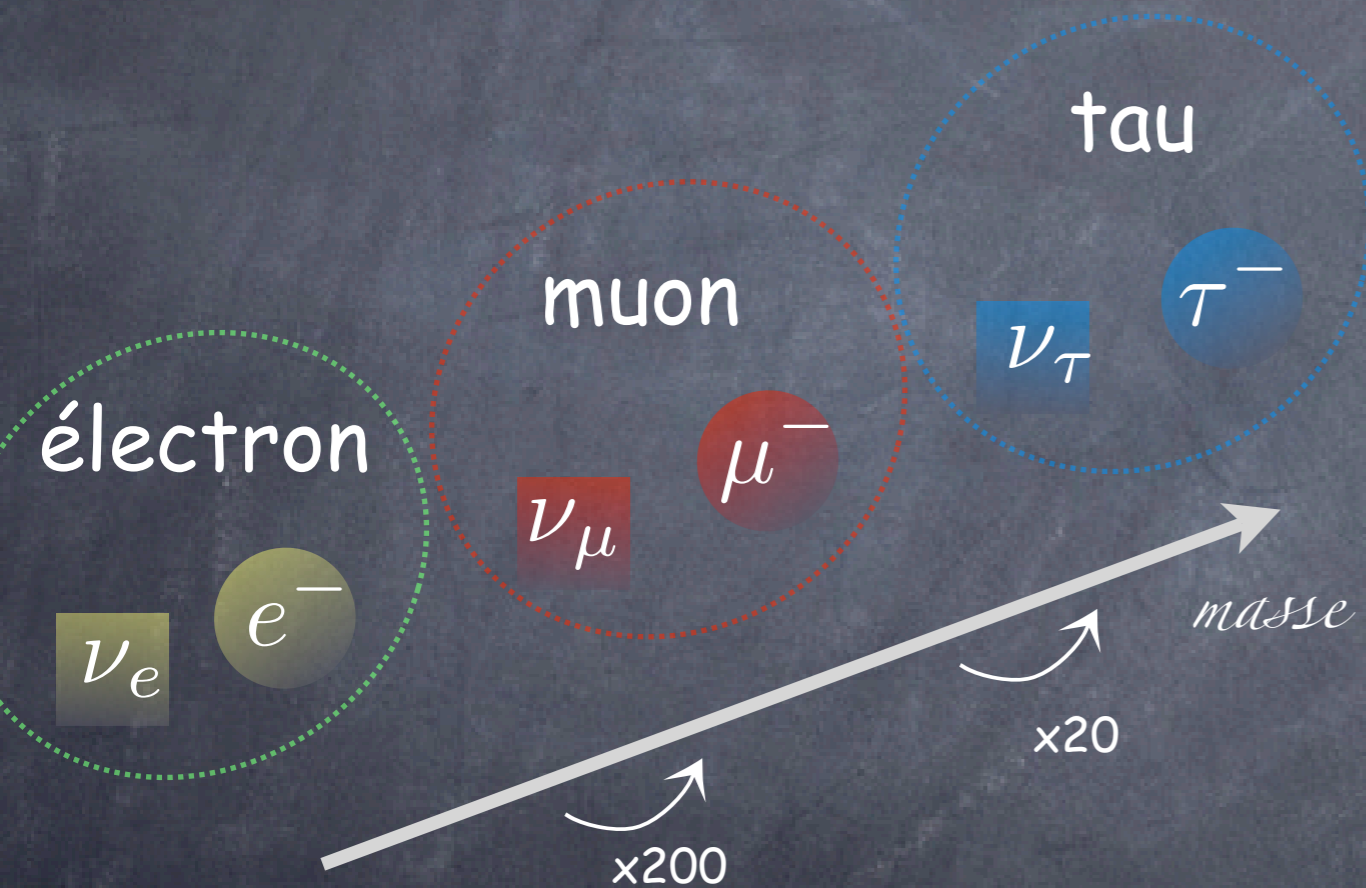


Le Modèle Standard : la matière

Le code génétique de la matière

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

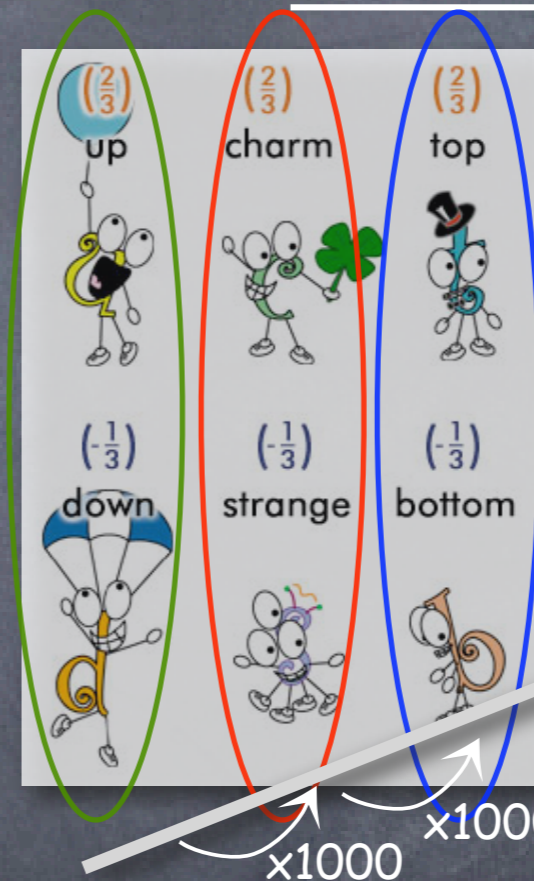
LES LEPTONS



➔ pas d'états composites formés de leptons

+ antiparticules

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

Les unités du physicien des particules

$$c = 1$$

$$\hbar = 1$$

masse \sim énergie \sim (distance) $^{-1}$ \sim (temps) $^{-1}$

électron-volt eV

L'énergie d'un électron accéléré par une différence de potentiel de un volt.

Un électron-volt est donc égal à ... $1.6 \cdot 10^{-19}$ J

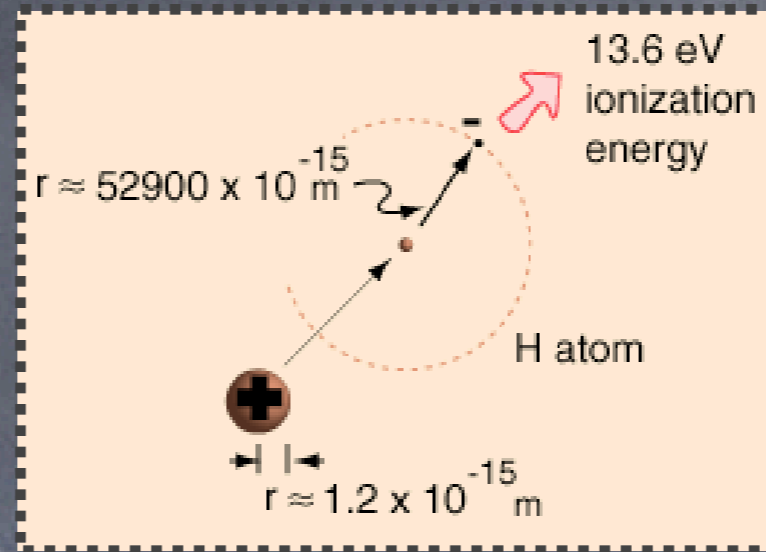
Mais combien ça pèse ?

les énergies du CERN : 1 TeV = 1000 milliards d'eV = 10^{-24} 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} eV \sim 10^4 TeV

Différentes interactions



○ Physique atomique

masse d'un atome = masse du noyau + masses d'électrons

exemple : atome d'**hydrogène**, masse ~ 1 GeV, énergie de liaison ~ 13.6 eV

○ Physique nucléaire

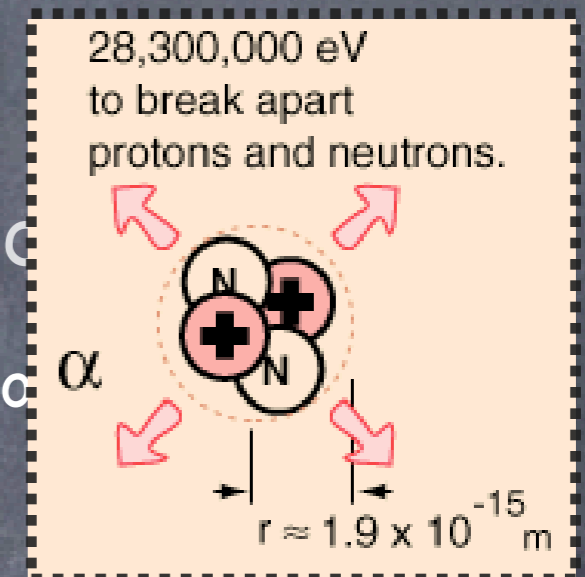
masse d'un noyau < masse des protons et neutrons

exemple : noyau d'**hélium**, masse ~ 4 GeV, énergie de liaison ~ 28 MeV ⇒ 10^{-2}

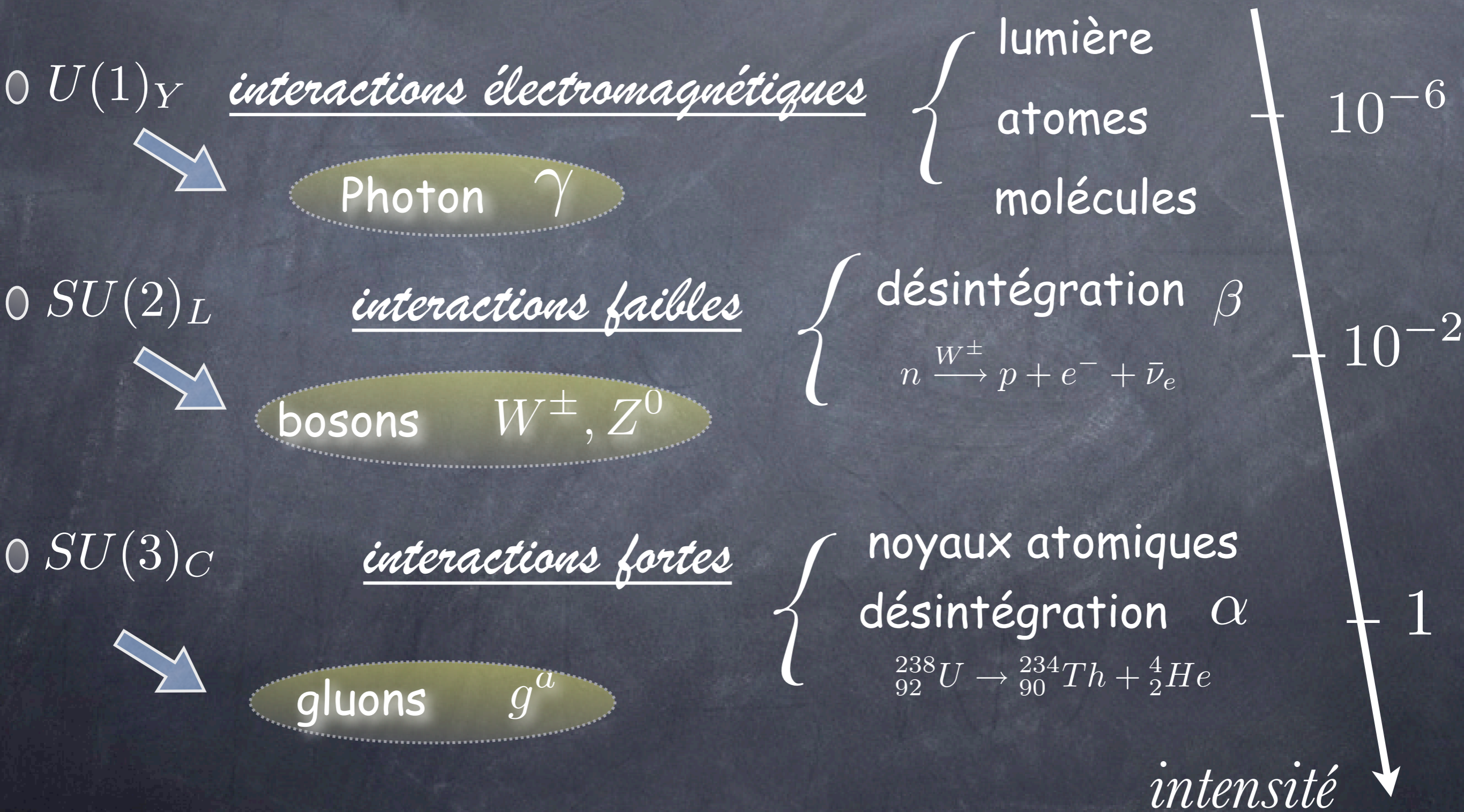
○ Physique des particules

masse du proton ≫ masse des quarks

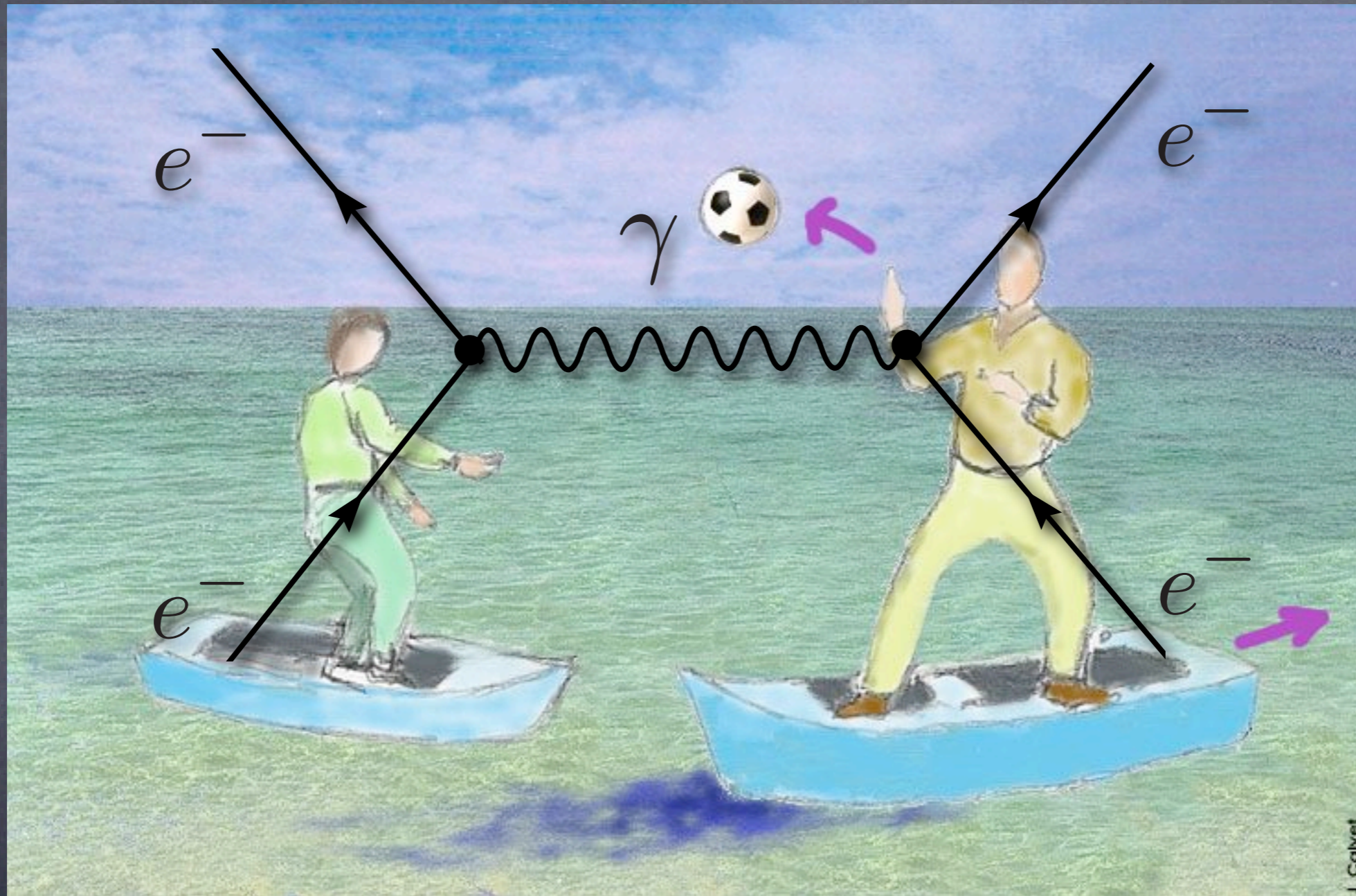
masse du **proton** ~ 1 GeV, masse des quarks ~ 12 MeV ⇒ 10^2



Le Modèle Standard : les interactions



Les interactions entre les particules



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

Le modèle standard

Prix Nobel '79



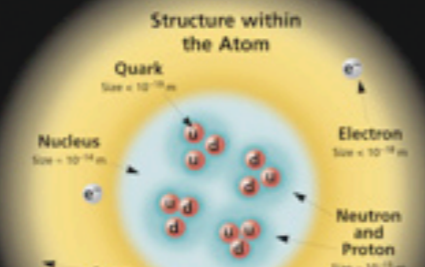
Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

| Leptons spin = 1/2 | | | Quarks spin = 1/2 | | |
|---------------------------|-------------------------|-----------------|-------------------|---------------------------------|-----------------|
| Flavor | Mass GeV/c ² | Electric charge | Flavor | Approx. Mass GeV/c ² | Electric charge |
| ν_e electron neutrino | <1.5·10 ⁻⁸ | 0 | u up | 0.003 | 2/3 |
| e electron | 0.000511 | -1 | d down | 0.006 | -1/3 |
| ν_μ muon neutrino | <0.0002 | 0 | c charm | 1.3 | 2/3 |
| μ muon | 0.106 | -1 | s strange | 0.1 | -1/3 |
| ν_τ tau neutrino | <0.02 | 0 | t top | 175 | 2/3 |
| τ tau | 1.7771 | -1 | b bottom | 4.3 | -1/3 |



BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

| Unified Electroweak spin = 1 | | | Strong (color) spin = 1 | | |
|------------------------------|-------------------------|-----------------|---|-------------------------|-----------------|
| Name | Mass GeV/c ² | Electric charge | Name | Mass GeV/c ² | Electric charge |
| γ photon | 0 | 0 | g gluon | 0 | 0 |
| W ⁻ | 80.4 | -1 | Color Charge | | |
| W ⁺ | 80.4 | +1 | Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the color of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge. | | |
| Z ⁰ | 91.187 | 0 | Quarks Confined in Mesons and Baryons | | |

Quarks Confined in Mesons and Baryons
One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (confinement) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-flux field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles we can observe. Two types of hadrons have been observed in nature: mesons (q \bar{q}) and baryons (qqq).

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

| Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ | | | | | |
|---|--------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|------|
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass (GeV/c ²) | Spin |
| p | proton | uud | +1 | 0.938 | 1/2 |
| \bar{p} | anti-proton | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1 | 0.938 | 1/2 |
| n | neutron | udd | 0 | 0.940 | 1/2 |
| \bar{n} | anti-neutron | $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ | 0 | 1.176 | 1/2 |
| Ξ^0 | xi-zero | uds | 0 | 1.116 | 1/2 |
| Ξ^- | xi-minus | sds | -1 | 1.132 | 1/2 |

| Property | Gravitational | | Weak (Electroweak) | | Electromagnetic | | Strong | |
|--|-----------------------------|--|----------------------|---------------------------|---------------------------|---|----------|--|
| | Acts on: | Mass - Energy | Flavor | Electric Charge | Color Charge | Fundamental | Residual | |
| Particles experiencing: | All | Quarks, Leptons | Electrically charged | Quarks, Gluons | Hadrons | See Residual Strong Interaction, Note 1 | | |
| Particles mediating: | Graviton (not yet observed) | W ⁺ W ⁻ Z ⁰ | γ | Gluons | Mesons | Not applicable to quarks | | |
| Strength relative to electromagnetism for two q quarks at: | 10 ⁻⁴¹ | 10 ⁻⁶ | 1 | 25 | Not applicable to hadrons | 20 | | |
| for two protons in nucleus: | 10 ⁻³⁸ | 10 ⁻¹ | 1 | Not applicable to hadrons | 20 | | | |

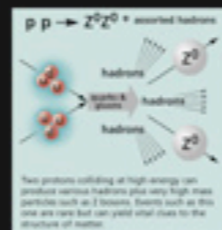
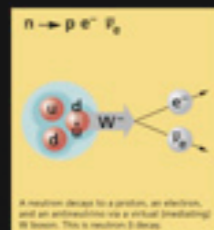
| Mesons q \bar{q} | | | | | |
|--------------------|---------|---------------|-----------------|----------------------------|------|
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass (GeV/c ²) | Spin |
| π^+ | pion | u \bar{d} | +1 | 0.140 | 0 |
| K^+ | kaon | u \bar{s} | +1 | 0.494 | 0 |
| ρ^+ | rho | u \bar{d} | +1 | 0.770 | 1 |
| B^0 | B-meson | d \bar{b} | 0 | 5.279 | 0 |
| η_c | eta-c | c \bar{c} | 0 | 2.980 | 0 |

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z⁰, γ , and η_c + η_c' , but not π^0 + η) are their own antiparticles.

Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not real and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



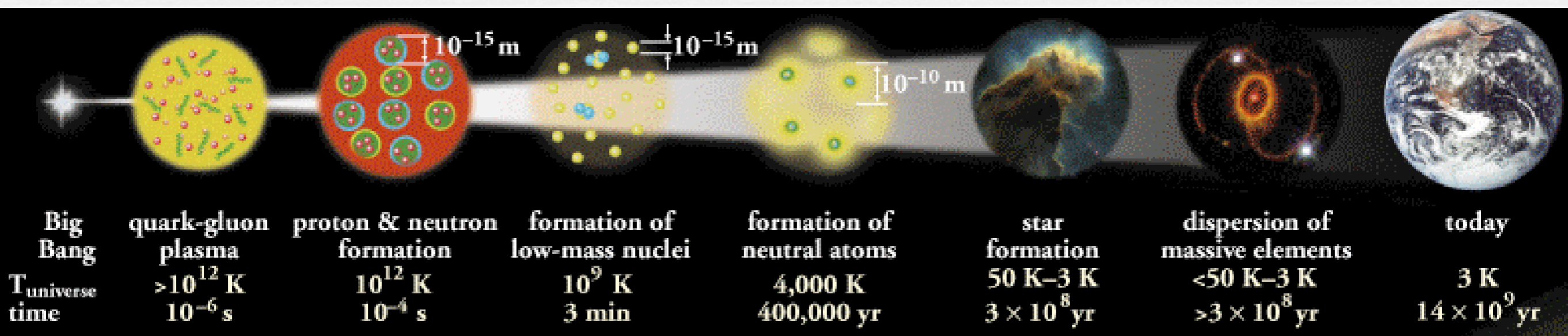
The Particle Adventure
Visit the award-winning web feature The Particle Adventure at <http://pdg.lbl.gov/cpep/adventure.html>

Sponsors:
This chart has been made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particle and Fields
DUMBLE INDUSTRIES, INC.

©1996-1998 Contemporary Physics Education Project (CPEP) is a non-profit organization of teachers, physicists, and education. Send mail to: CPEP, MS 50-208, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, test materials, hands-on classroom activities, and workshops, see <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>

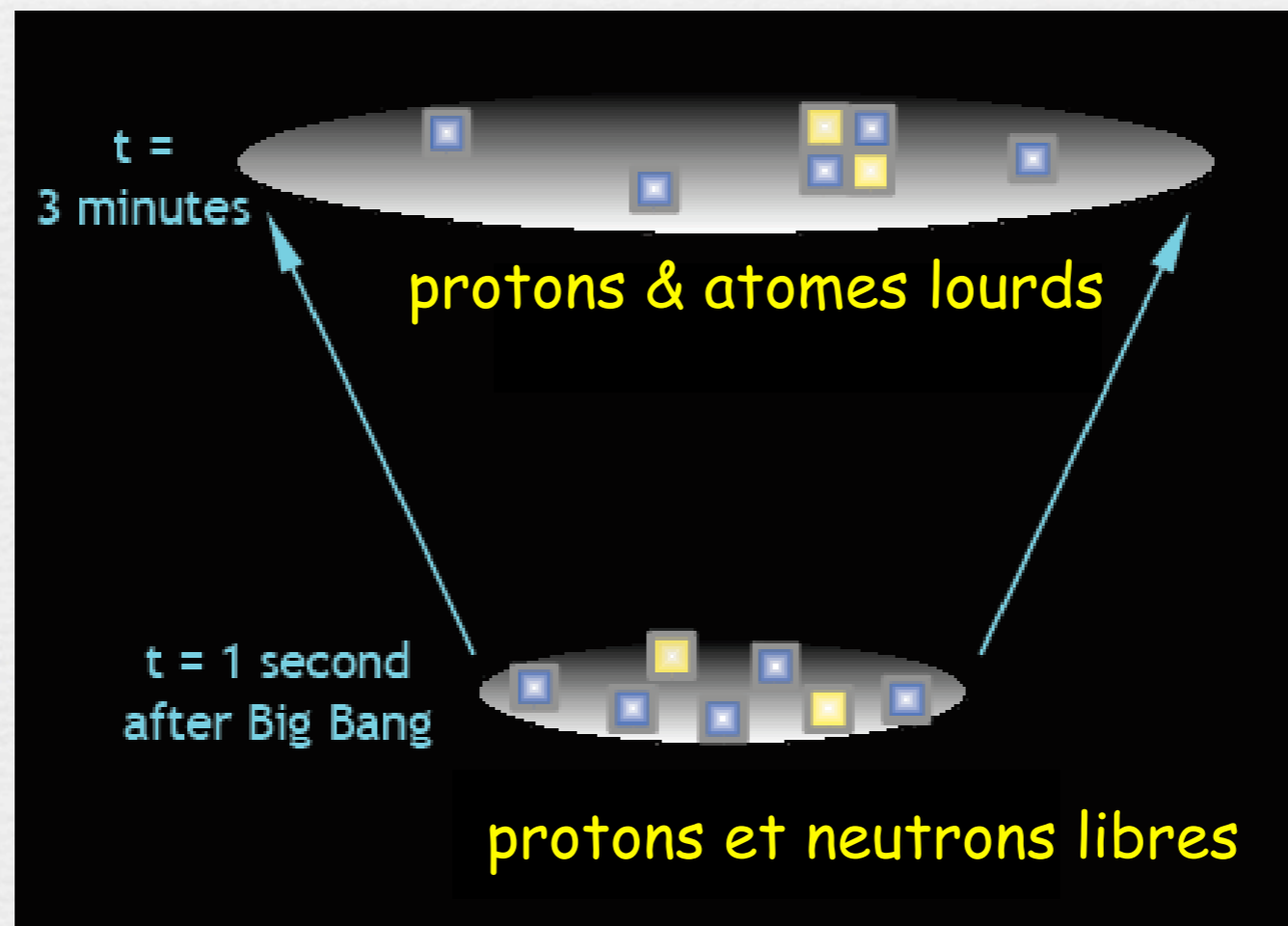
MS décrit toutes les particules et leurs interactions.

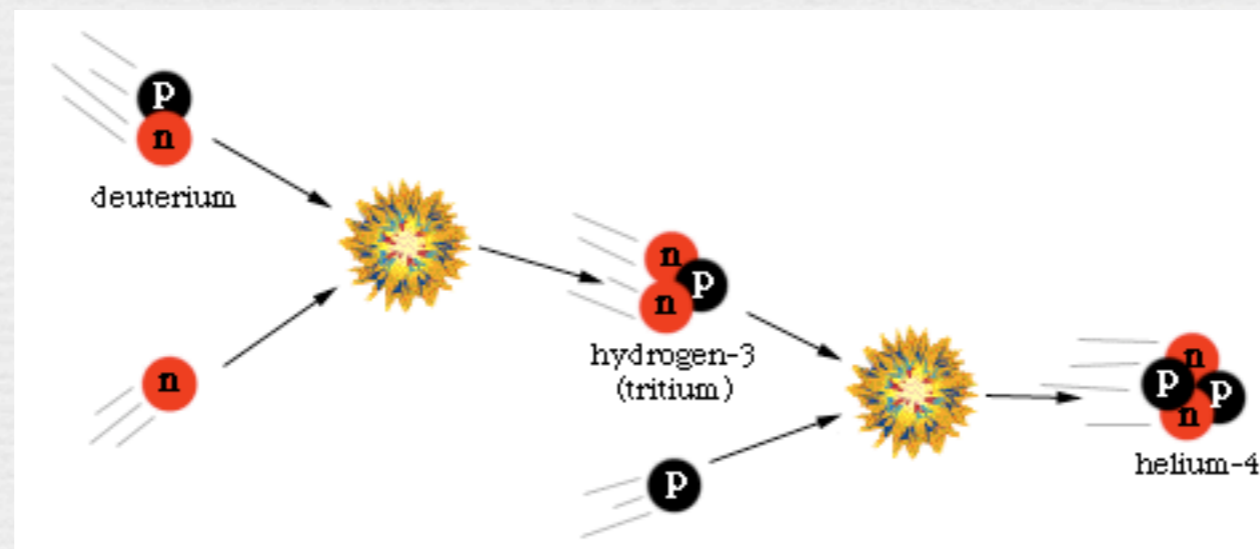
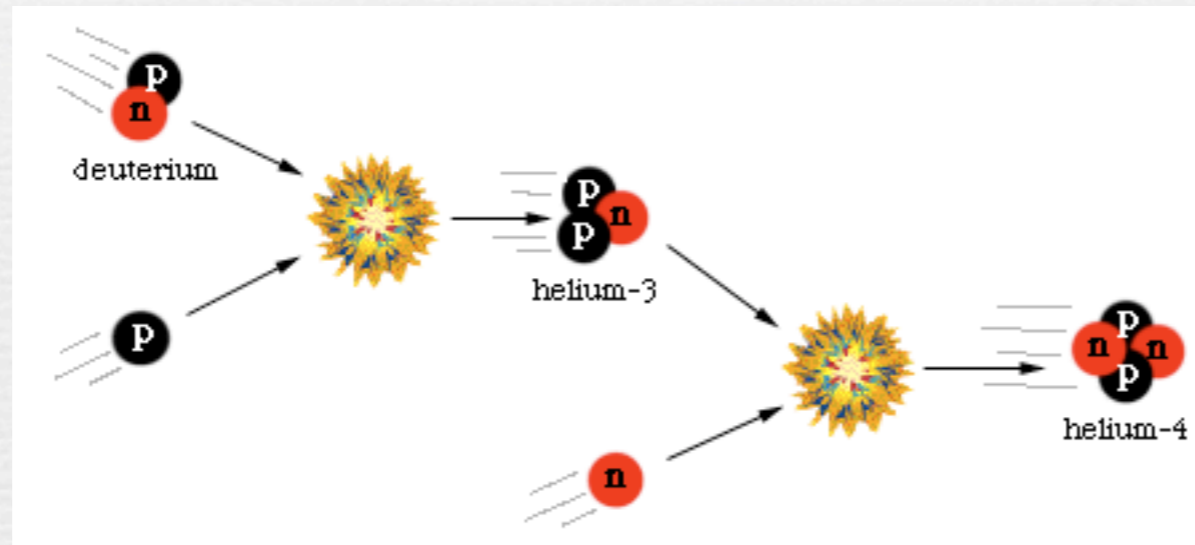
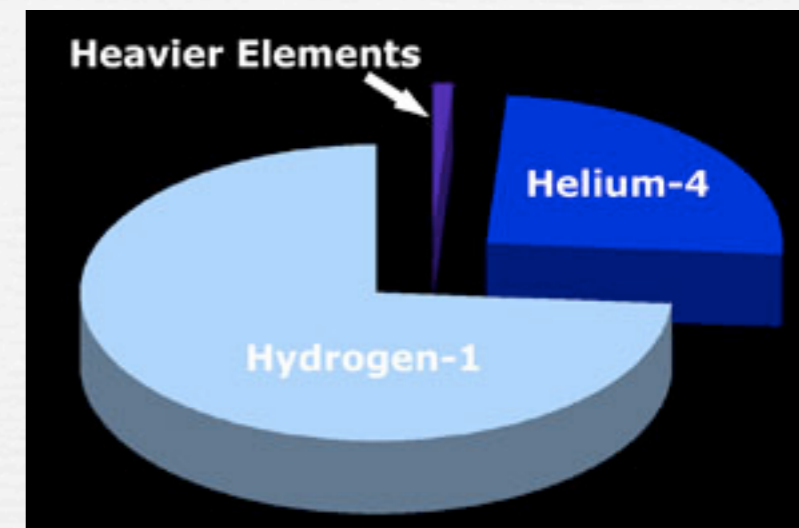
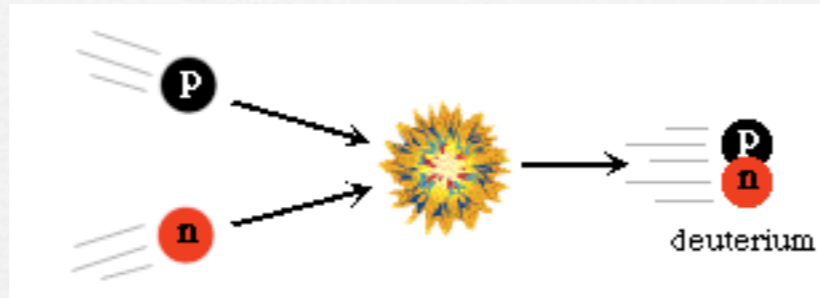
En accord avec toutes les expériences jamais réalisées sur Terre.



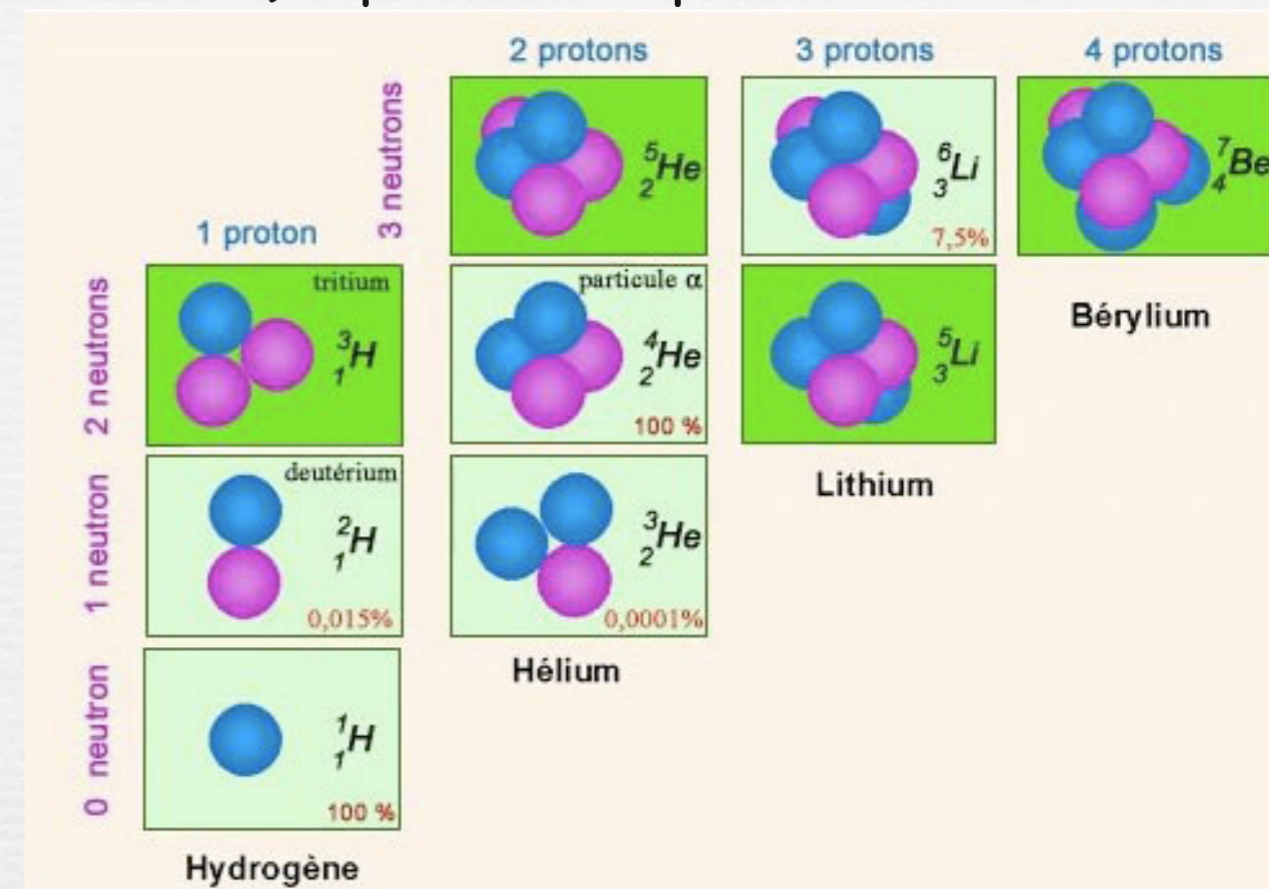
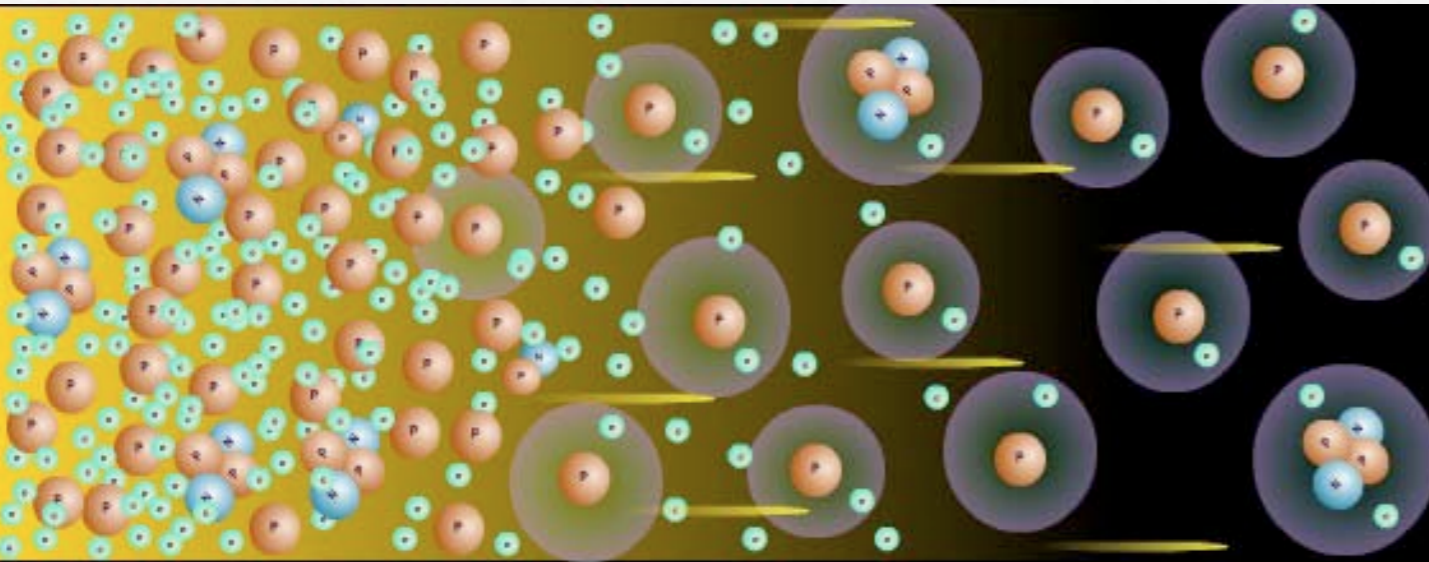
Du laboratoire aux premières minutes de l'Univers

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

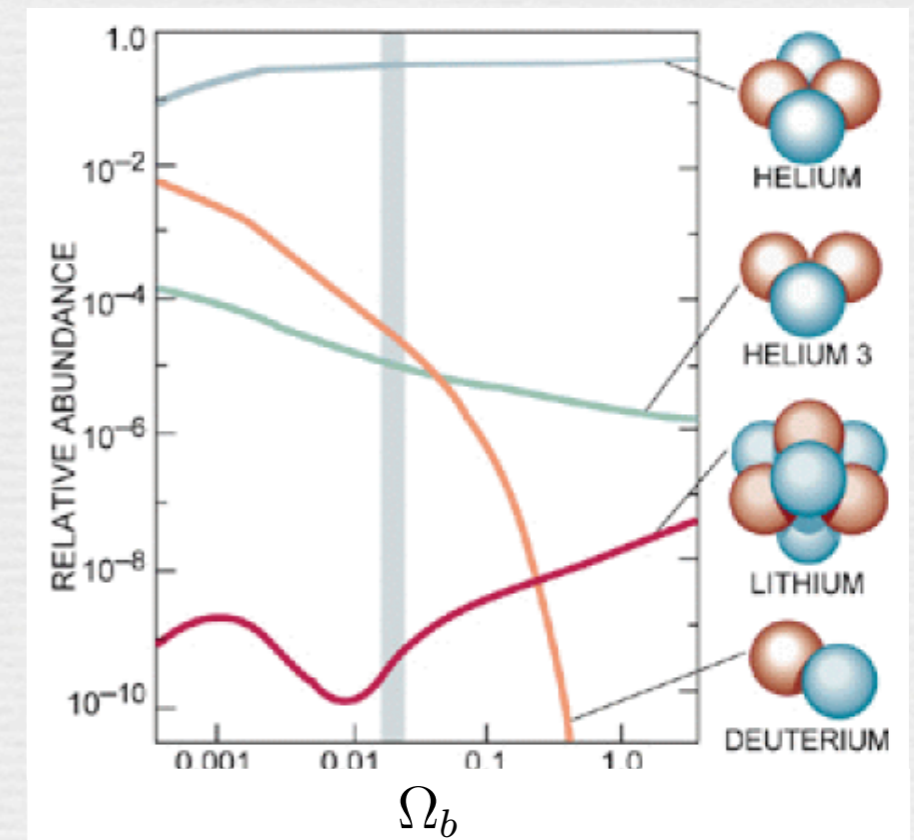




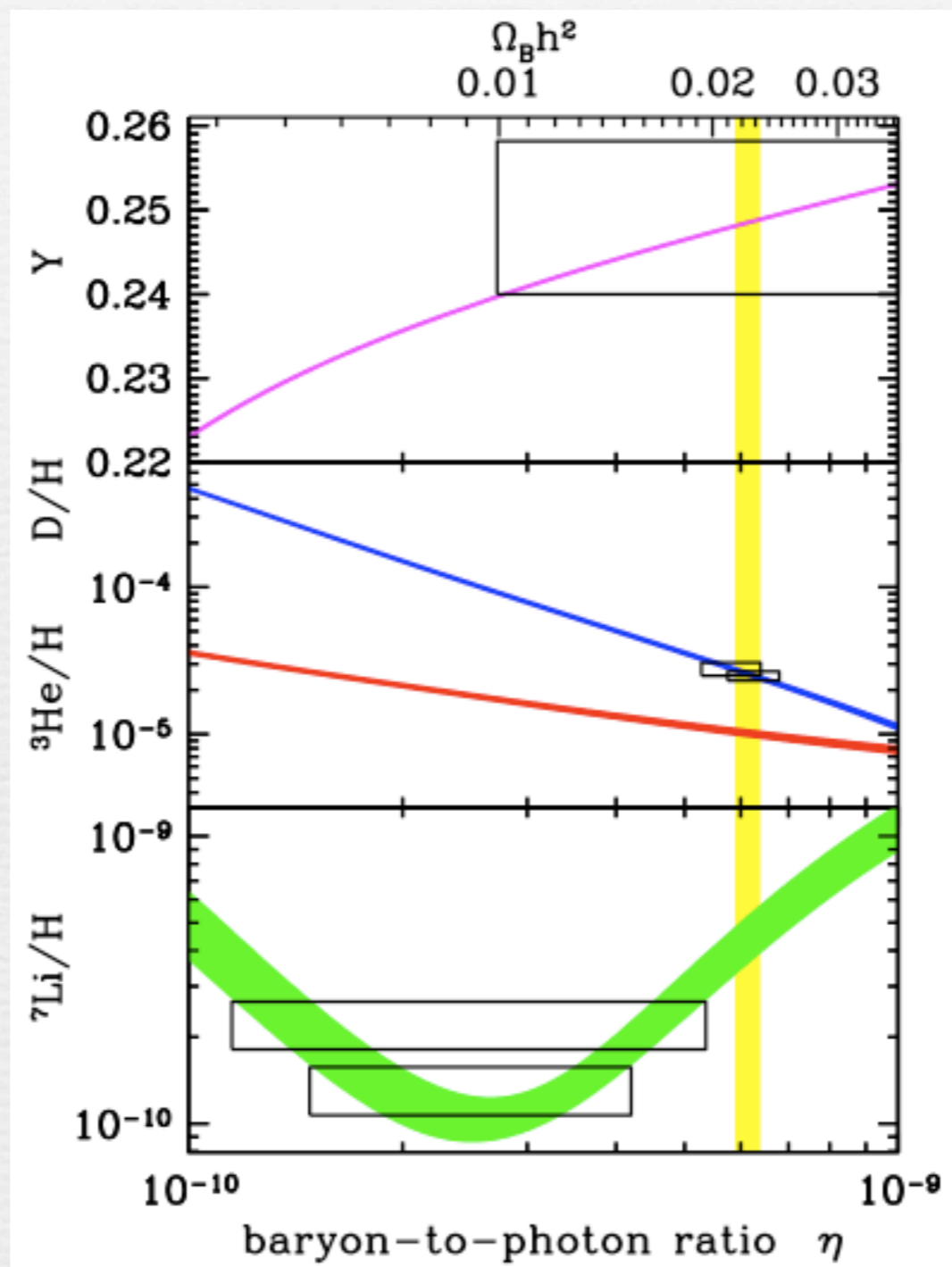
Formation des éléments légers (deutérium, hélium, lithium) à partir des protons et neutrons



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



Nucléosynthèse primordiale



Histoire de l'Univers

Nucléosynthèse

protons et neutrons

BIG BANG

| | | |
|-----|------------|--------------|
| t | 10^{-44} | 10^{-37} s |
| T | 10^{32} | 10^{28} |
| E | 10^{19} | 10^{15} |

Formation des grandes structures

| | |
|-------------|------------|
| W, Z bosons | galaxy |
| quark | meson |
| gluon | baryon |
| electron | ion |
| muon | atom |
| tau | black hole |
| neutrino | |
| | photon |
| | star |

Accelerators: CERN-LHC
FNAL-Tevatron
BNL-RHIC
CERN-LEP
SLAC-SLC

high-energy cosmic rays

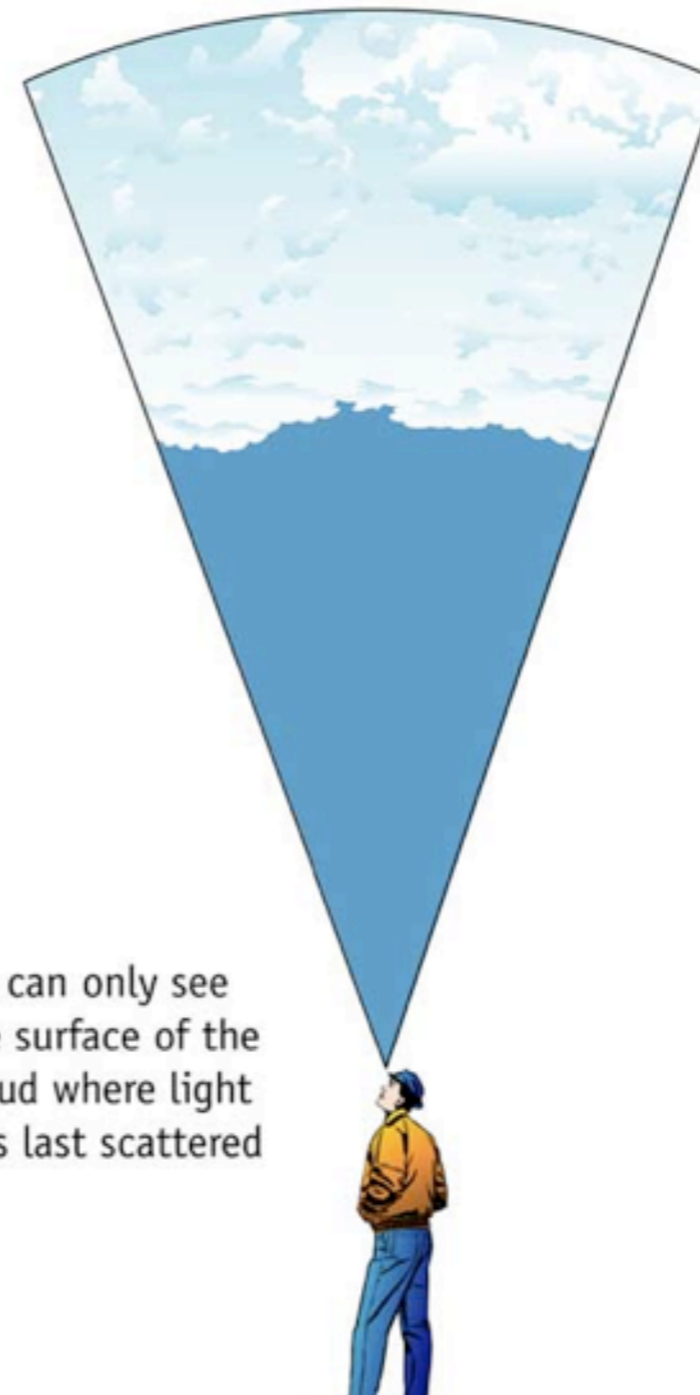
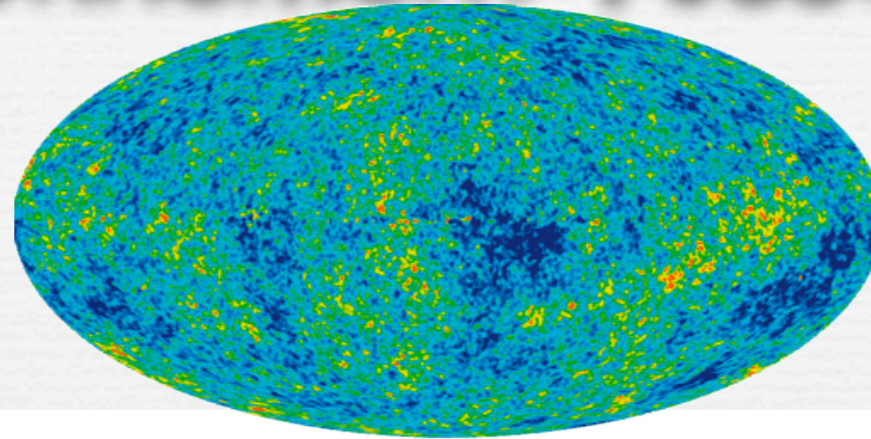
Inflation

possible dark matter relics

cosmic microwave radiation visible

| | |
|-----------------------|------------|
| Today | |
| 12×10^8 yrs | (sec, yrs) |
| 2.7 | (Kelvin) |
| 2.3×10^{-13} | (GeV) |

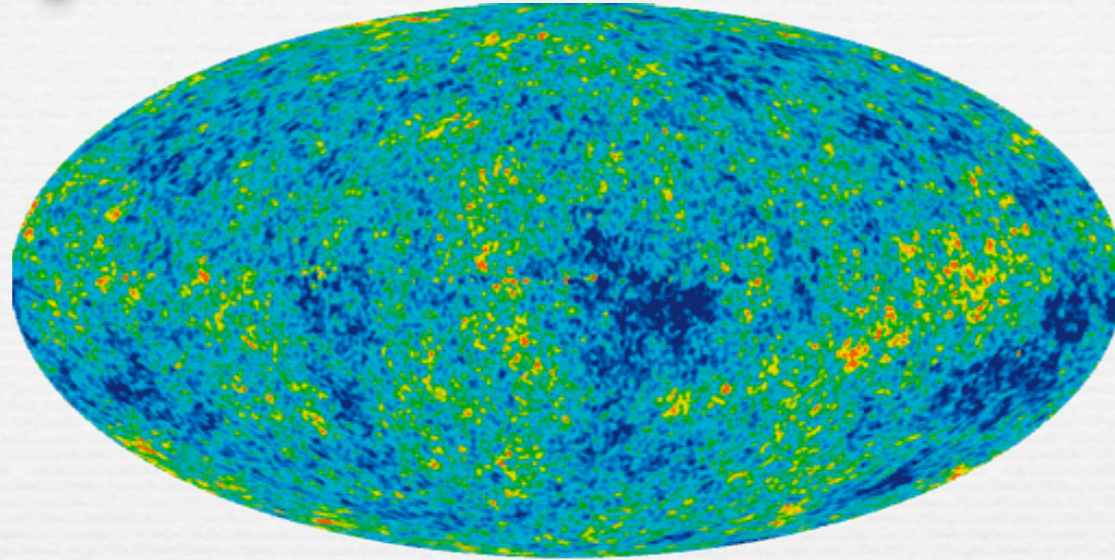
Le rayonnement fossile à 3 K



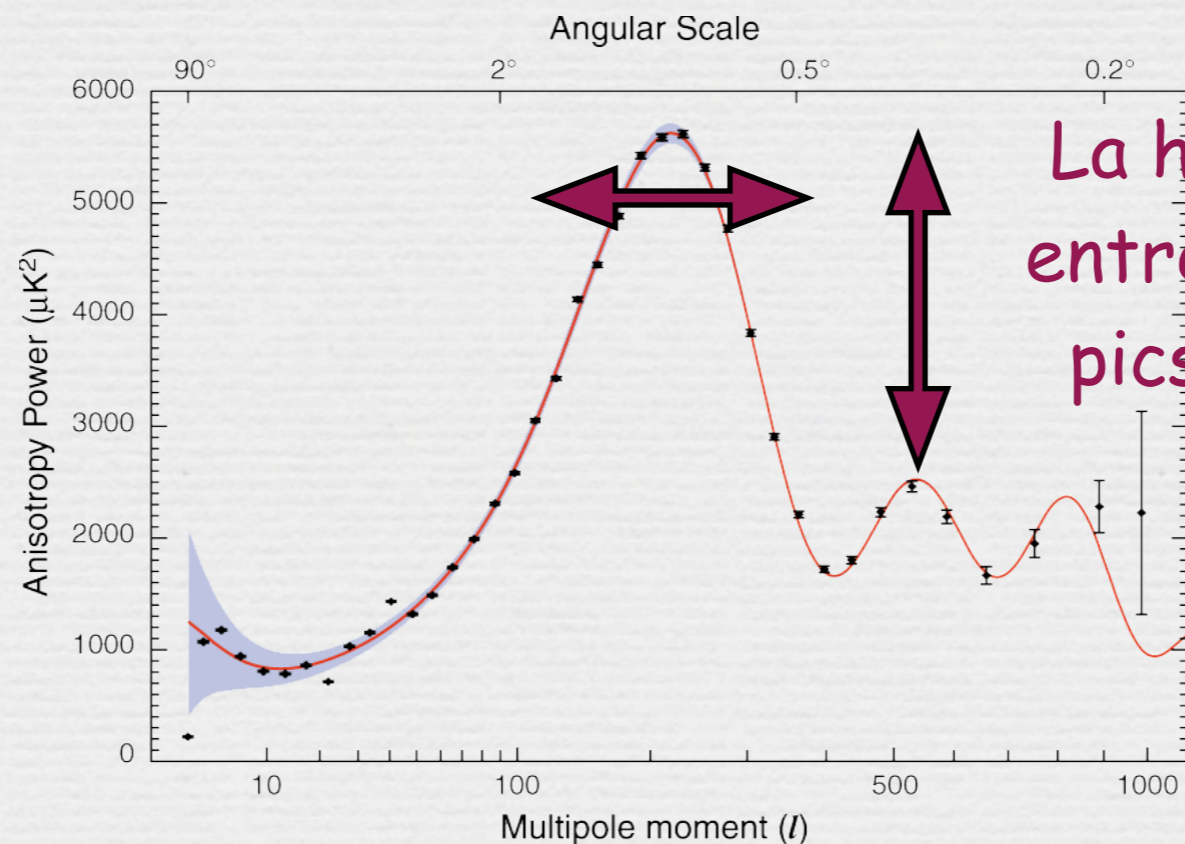
We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

Le rayonnement fossile à 3 K

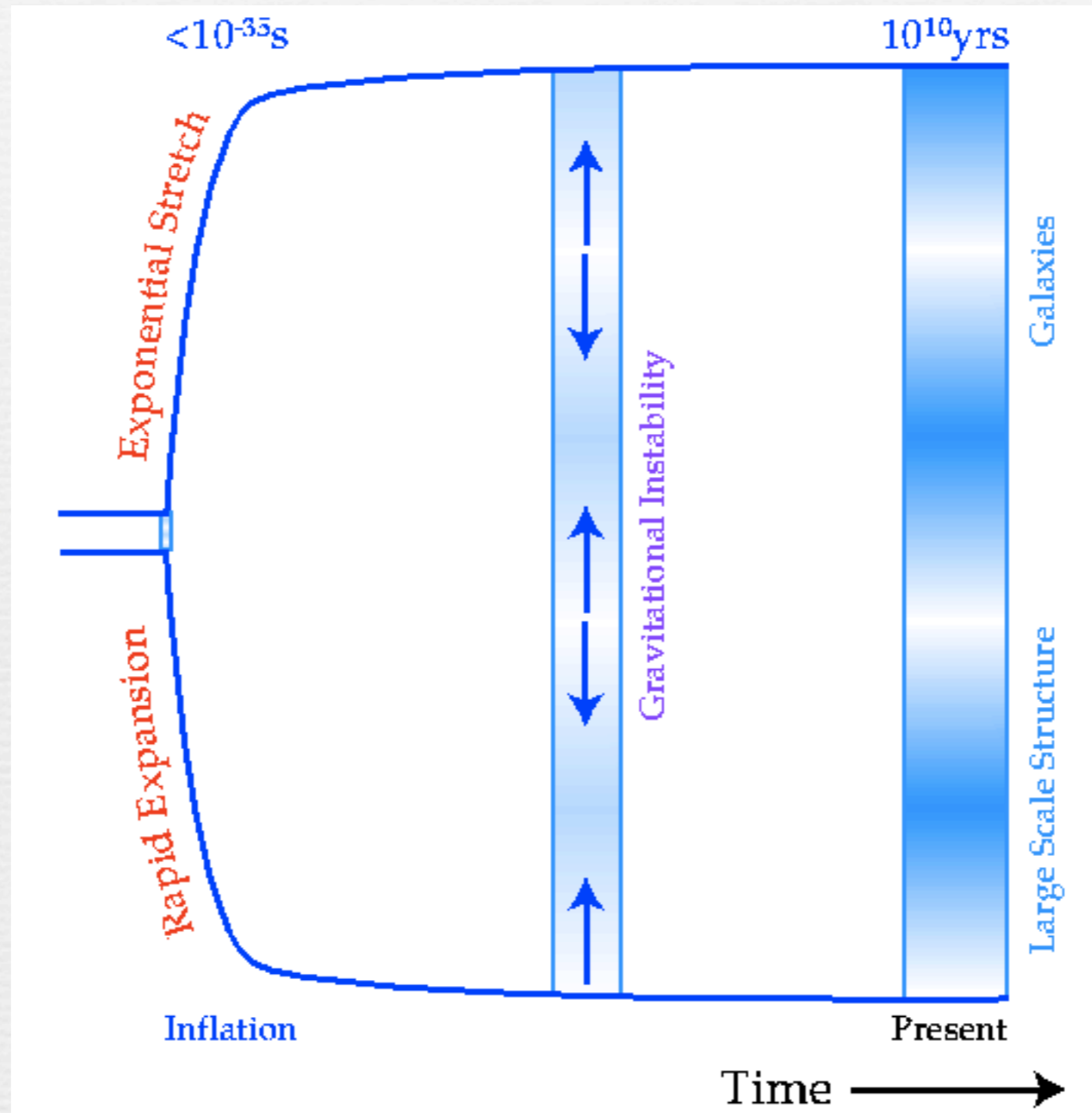


La position du pic
depend de Ω_{tot}



La hauteur relative
entre les 2 premiers
pics depend de Ω_b

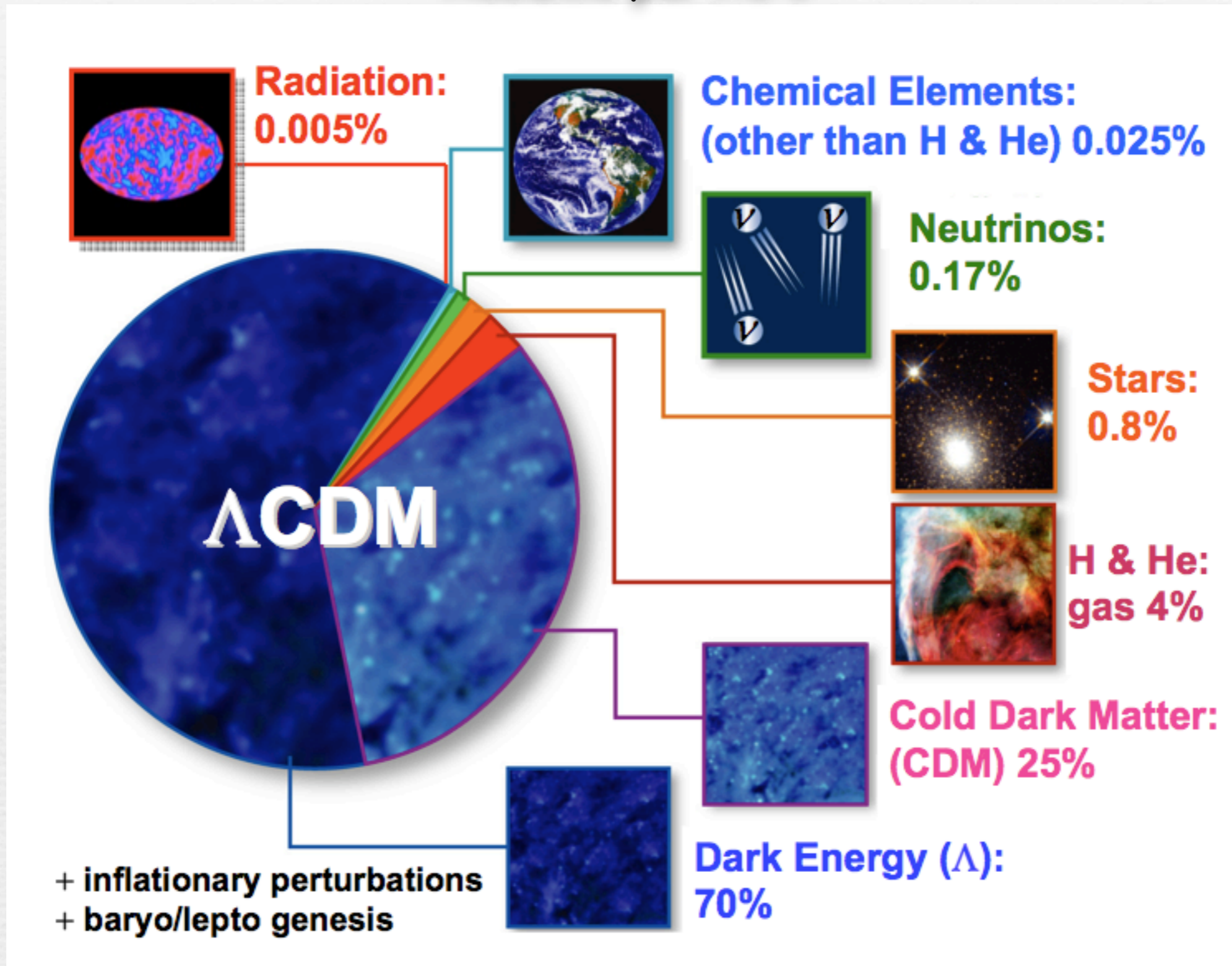
De l'inflation à la formation des structures



Les trois grands succès de la théorie du Big Bang

1. Le mouvement de récession des galaxies, observé grâce à leur décalage spectral, démontre l'expansion continue de l'univers
2. Les abondances des éléments légers prédites par la théorie de nucléosynthèse primordiale est en accord avec les observations
3. Le rayonnement de fond cosmique, observé avec une température de 3° K, reflète le rayonnement émis au moment du découplage matière-rayonnement

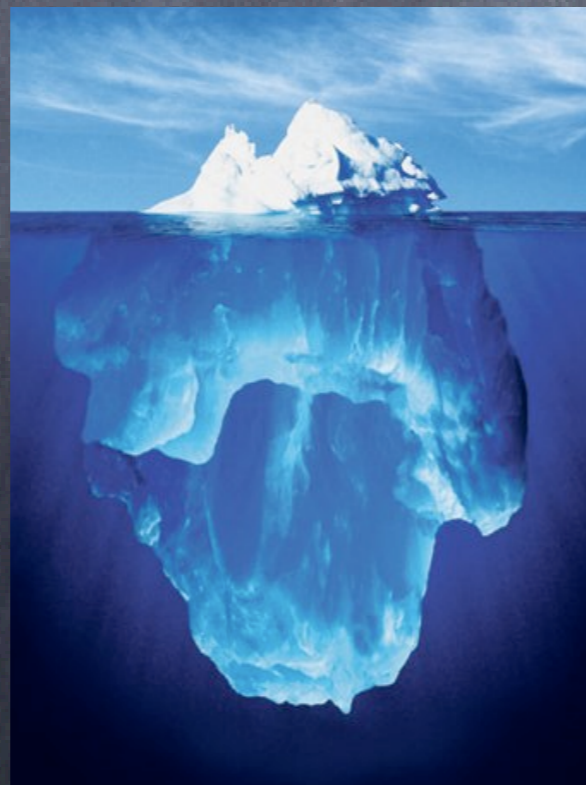
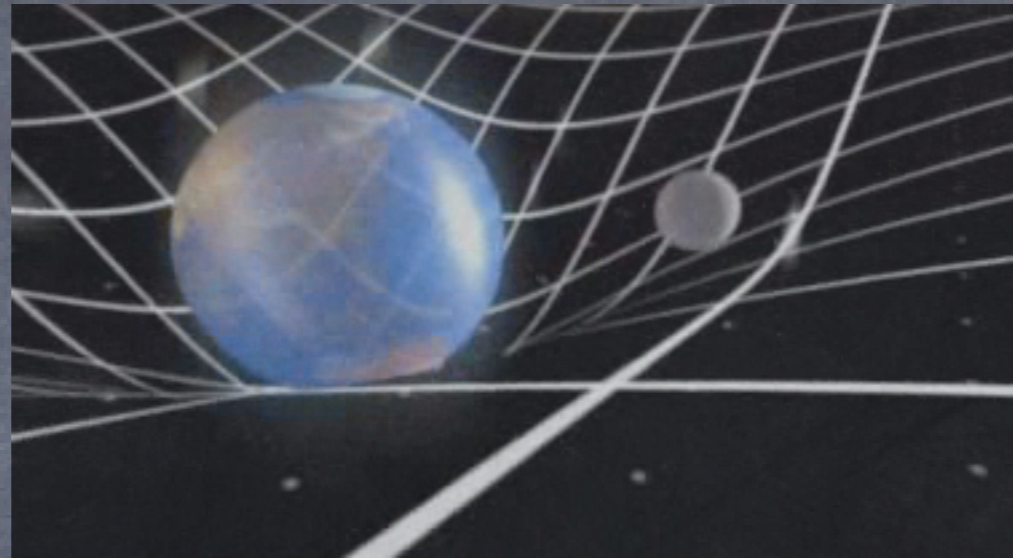
Résumé partie 1



Aux tous premiers instants, l'univers était dans un état extrêmement homogène. Les objets astrophysiques (étoiles, galaxies) se sont formés très tard par instabilité gravitationnelle.

La matière noire

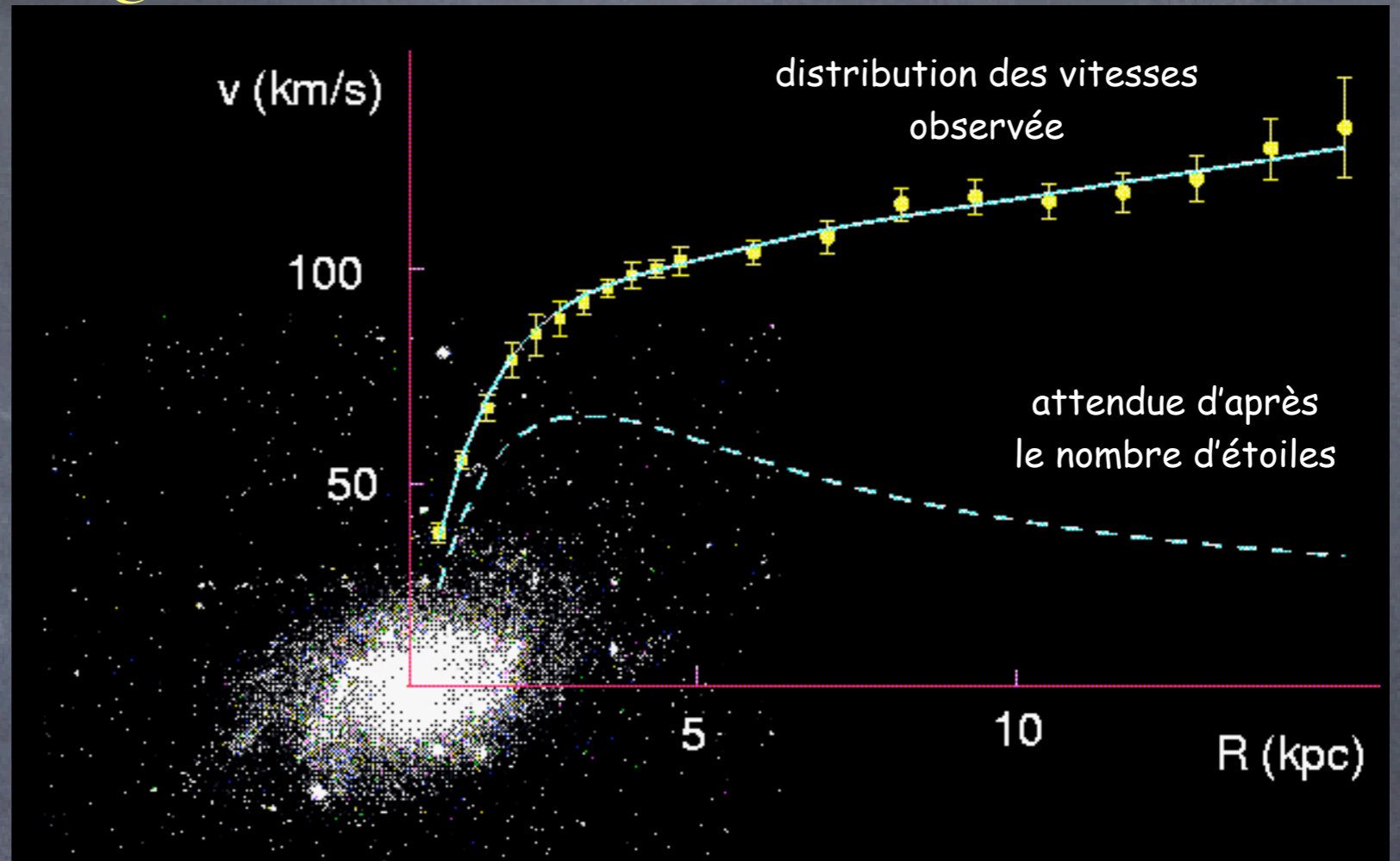
Une forme de matière invisible et transparente (sans interaction avec les photons) mais qui se manifeste par ses effets gravitationnels.



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

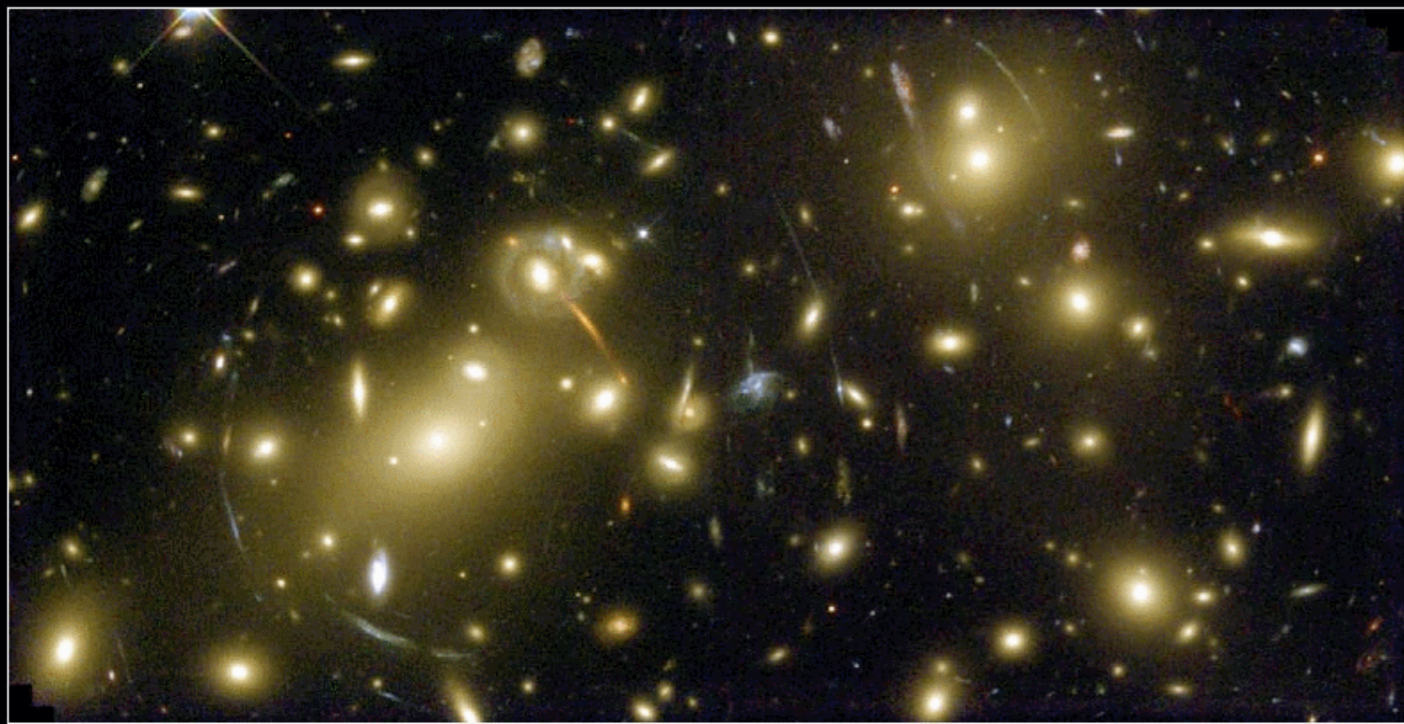
} 85% matière noire inconnue

courbe de rotation des galaxies



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

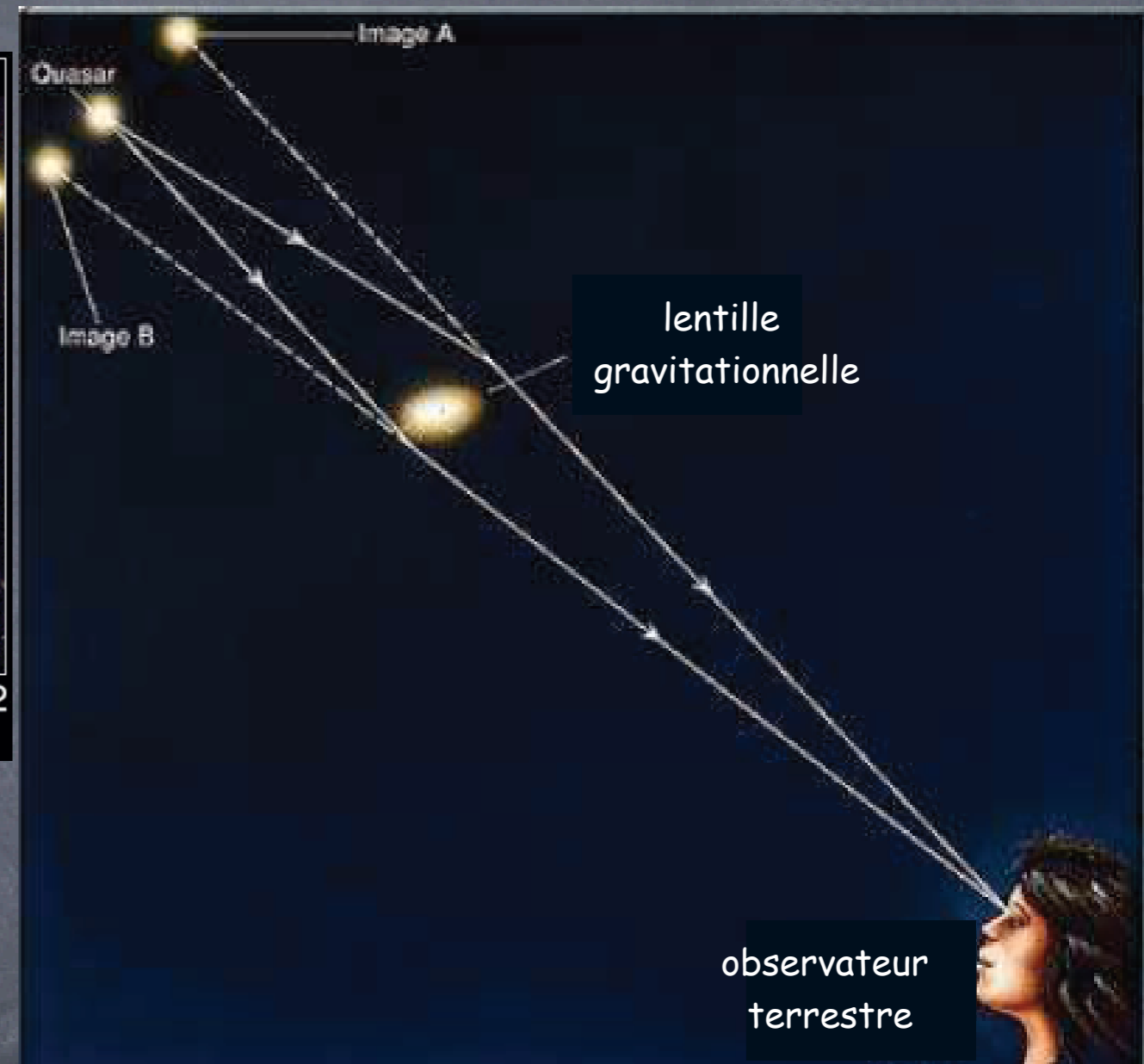
lentilles gravitationnelles



Galaxy Cluster Abell 2218

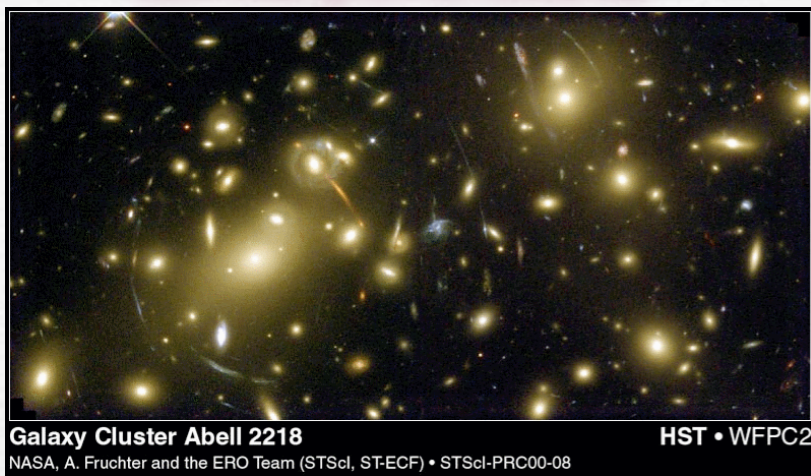
HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

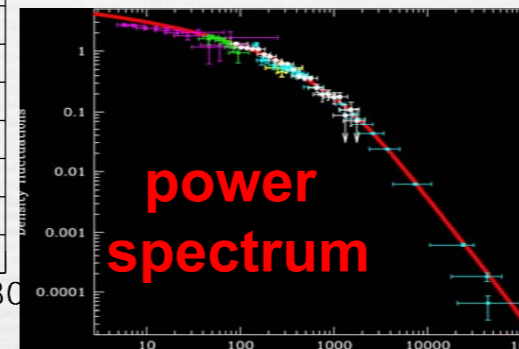
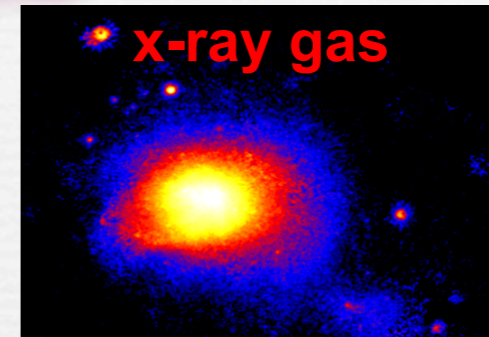
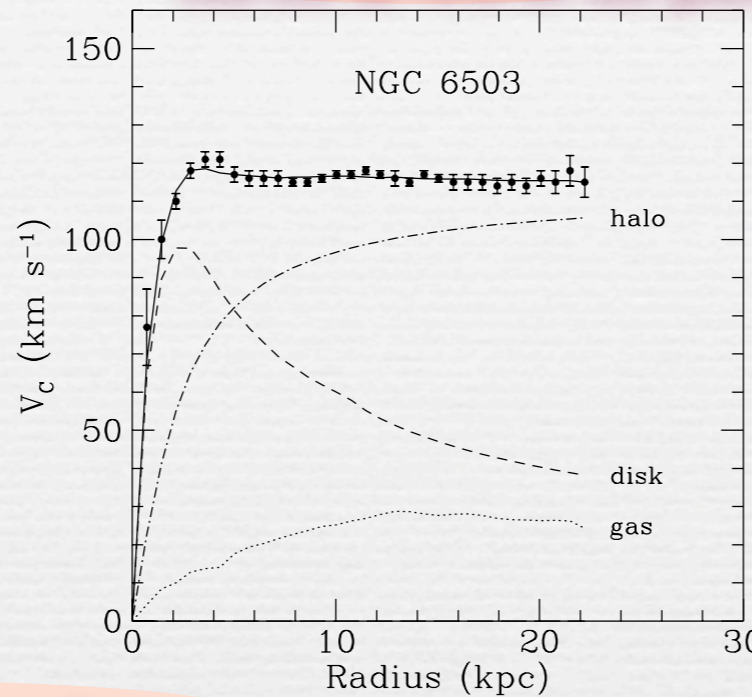


L'existence de matière noire (froide) repose sur un très grand nombre d'observations indépendentes; elle est nécessaire à toutes les échelles

Lentilles gravitationnelles

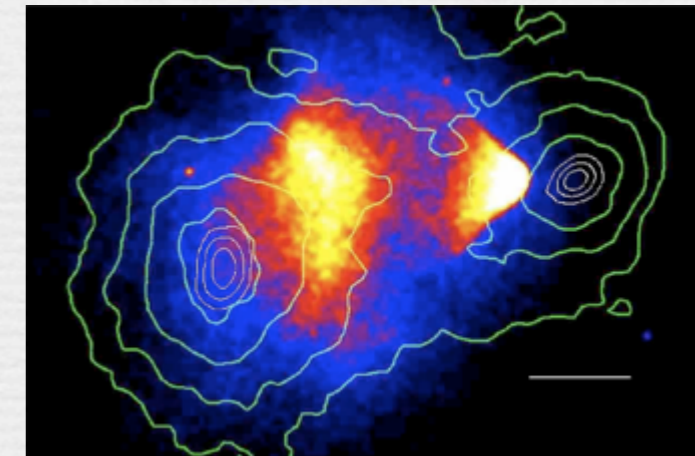
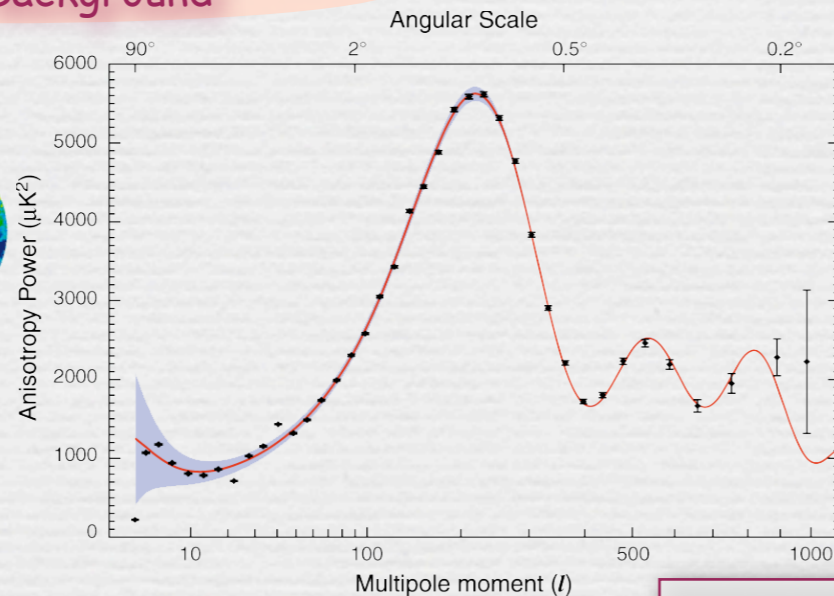
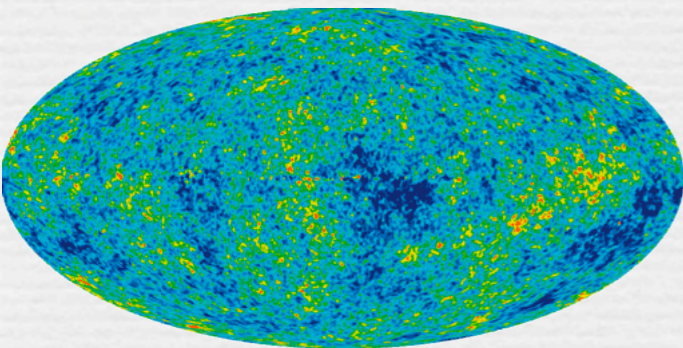


courbes de rotation des galaxies



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

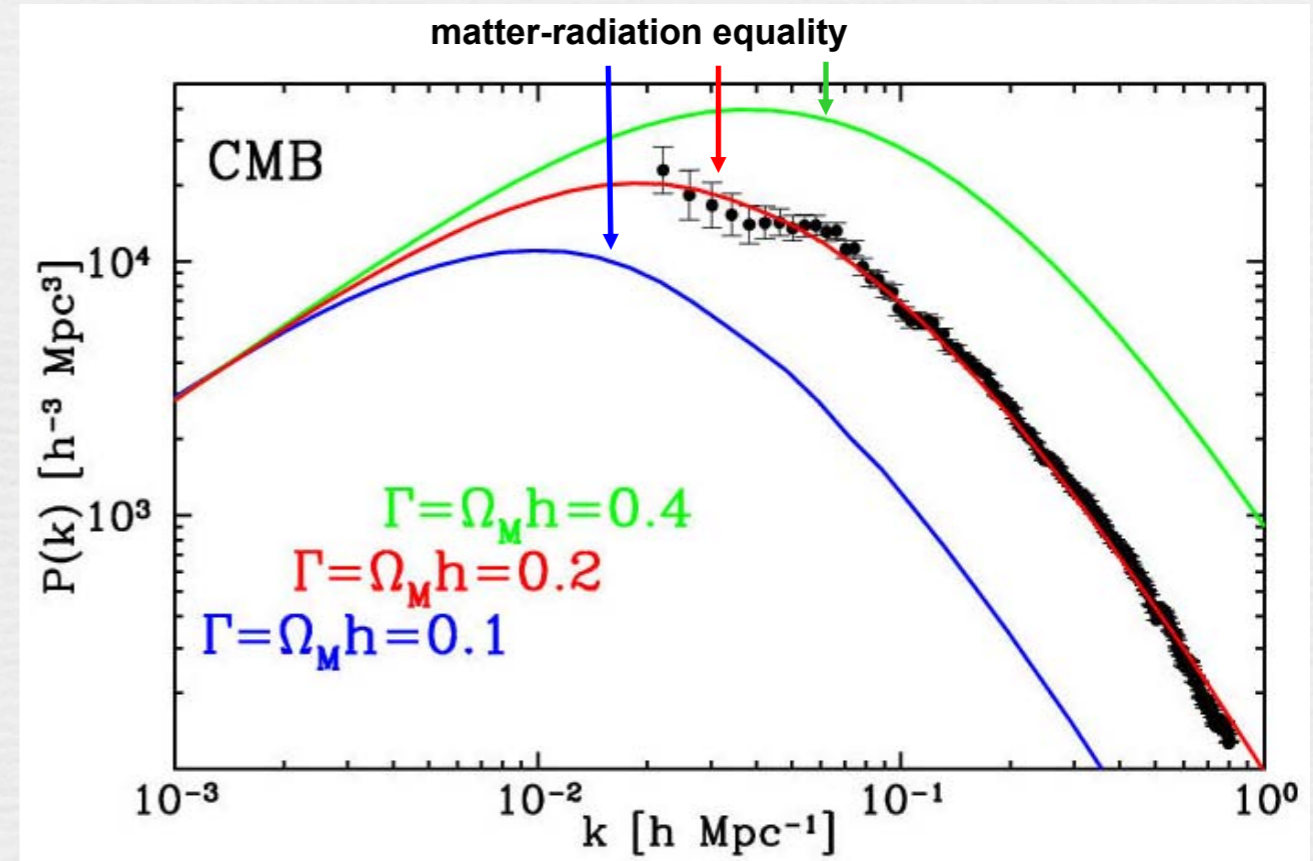
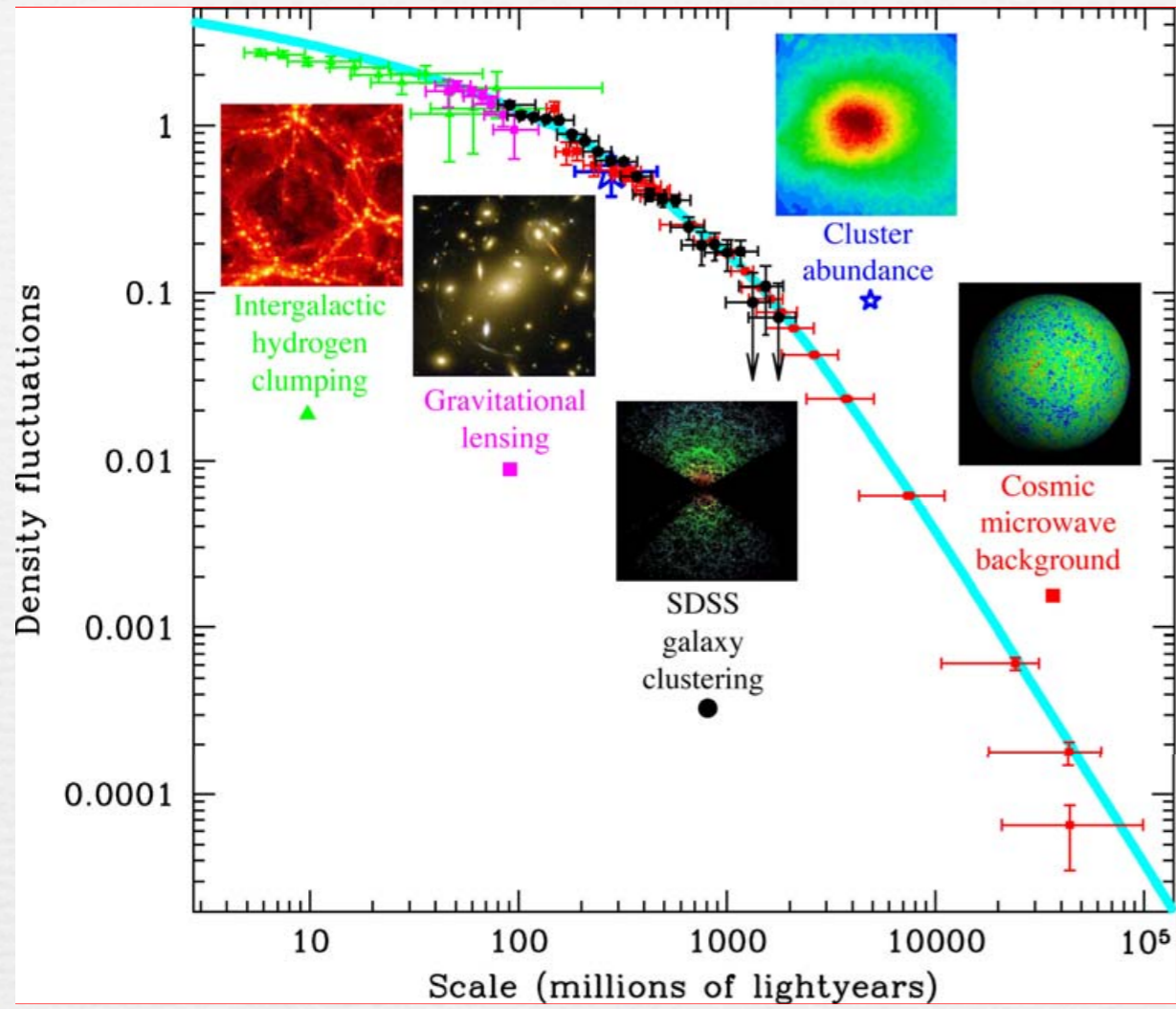
Cosmic Microwave Background



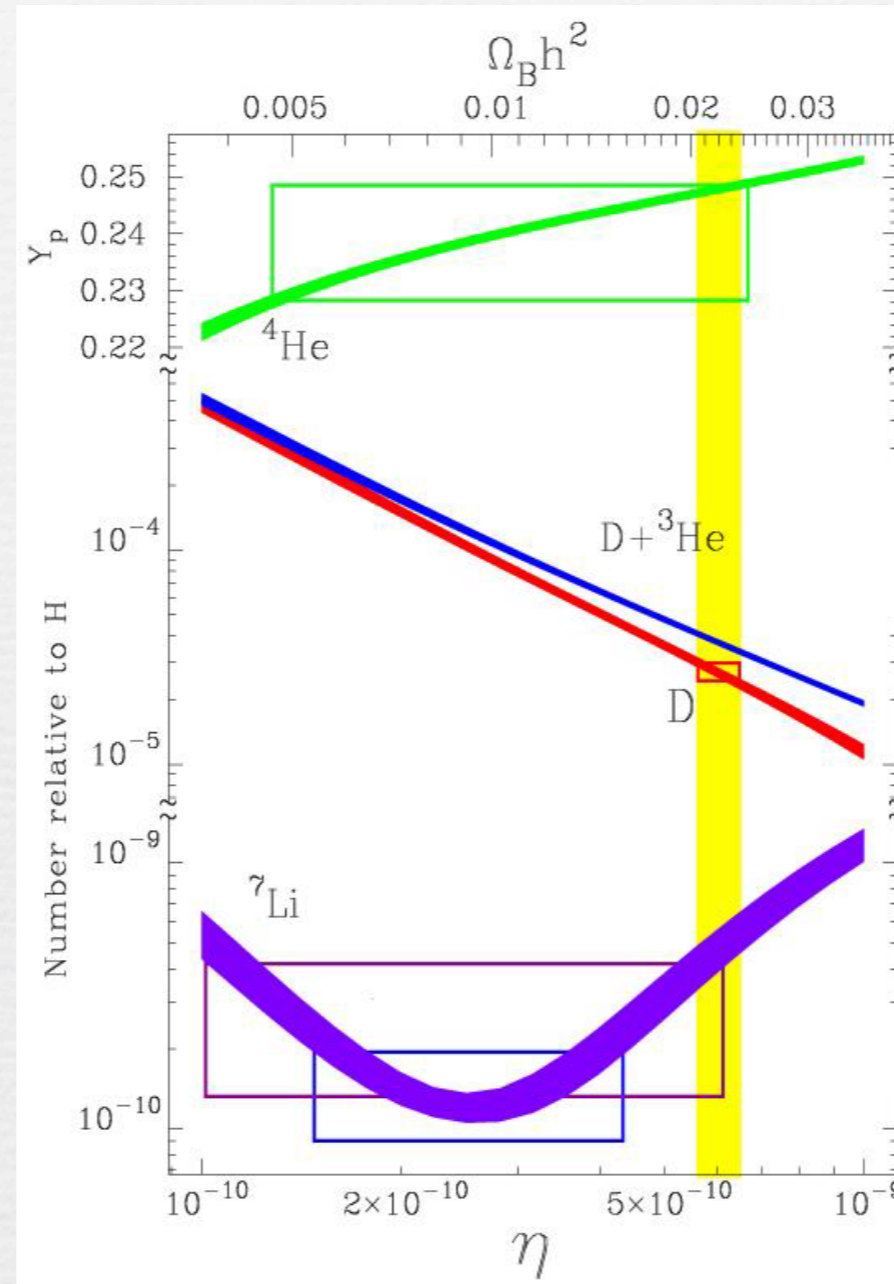
-> Fraction de la densité d'énergie en matière noire :
 $\Omega_{\text{matiere noire}} \approx 0.22$

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

Spectre de puissance de la matière



Baryons

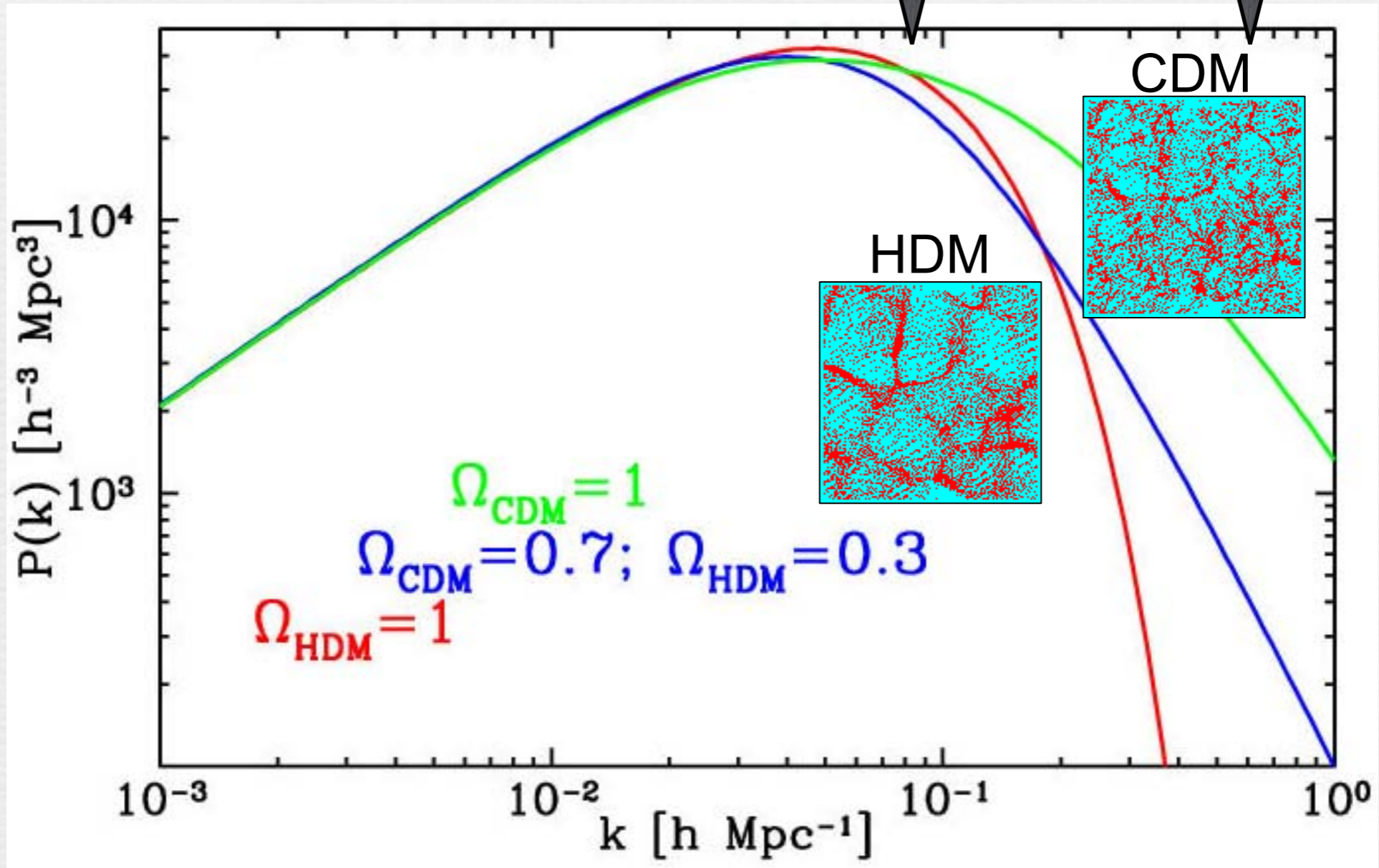


contribution des baryons:
seulement quelques pourcents

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

Neutrinos

matière
noire chaude matière
noire froide



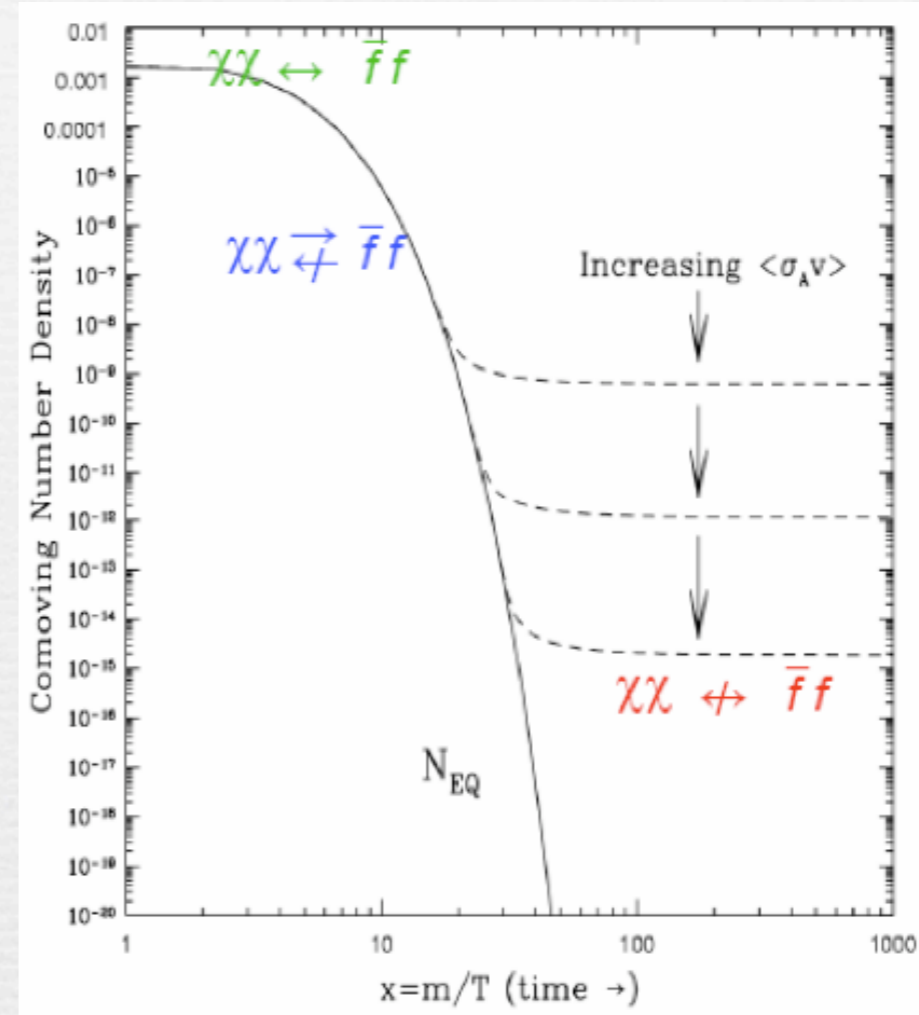
----> pas de candidat dans le *Modèle Standard*

-> besoin de physique au-delà du modèle standard

introduction d'une nouvelle particule massive stable

détermination de sa densité relique:

$$\Omega_{DM} \approx \frac{0.2 \text{ pb}}{\sigma_{\text{anni}}}$$



→ une particule avec une section efficace typique de l'échelle 100 GeV- 1 TeV

$\sigma_{\text{anni}} \approx 1 \text{ pb}$ donne précisément la bonne densité relique

une coïncidence ?!

De nombreux modèles possèdent une particule stable
ex: supersymétrie

spectre de masse,
interactions



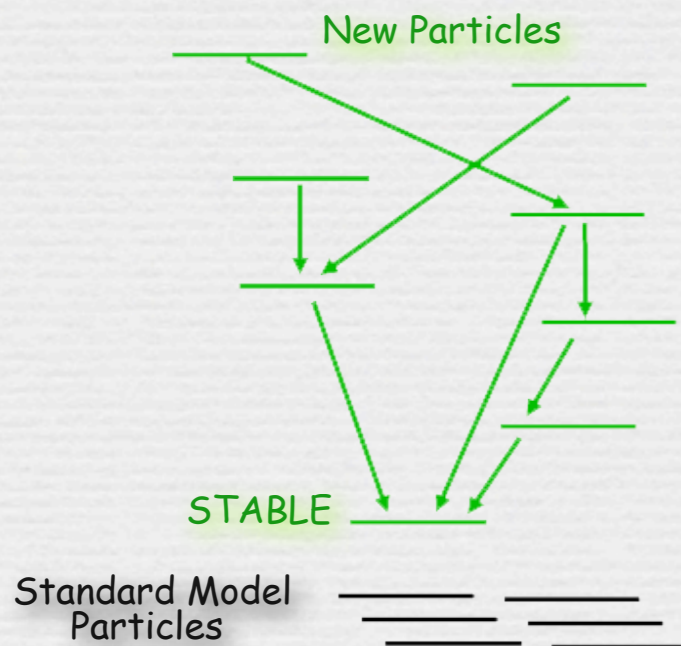
candidats matière noire



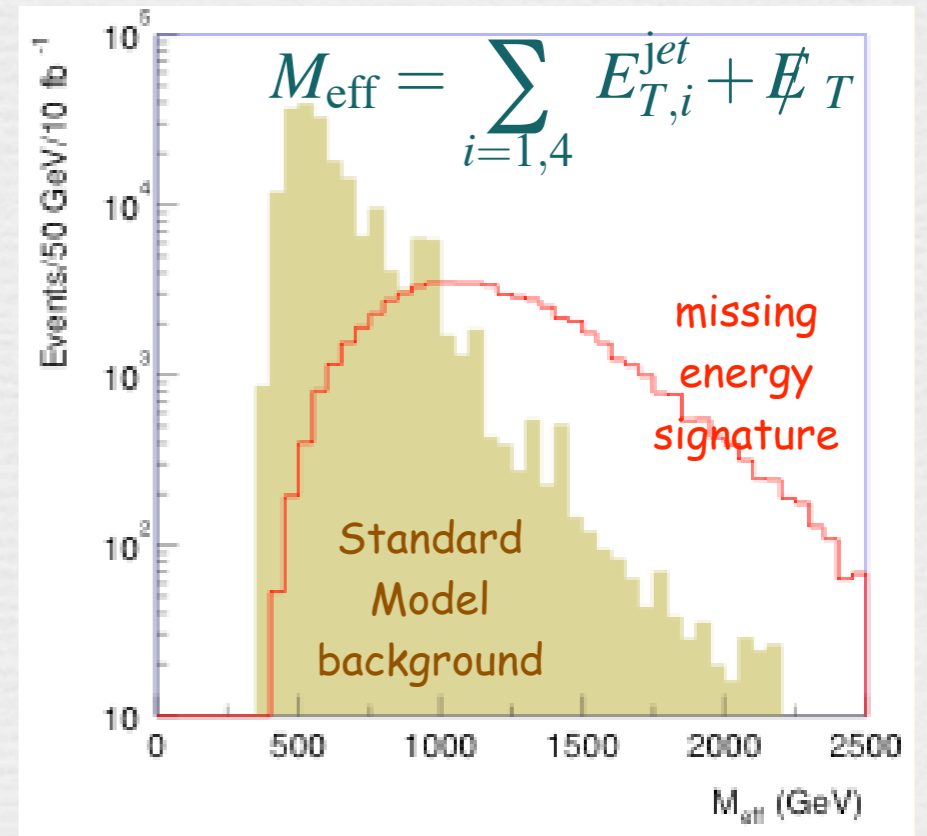
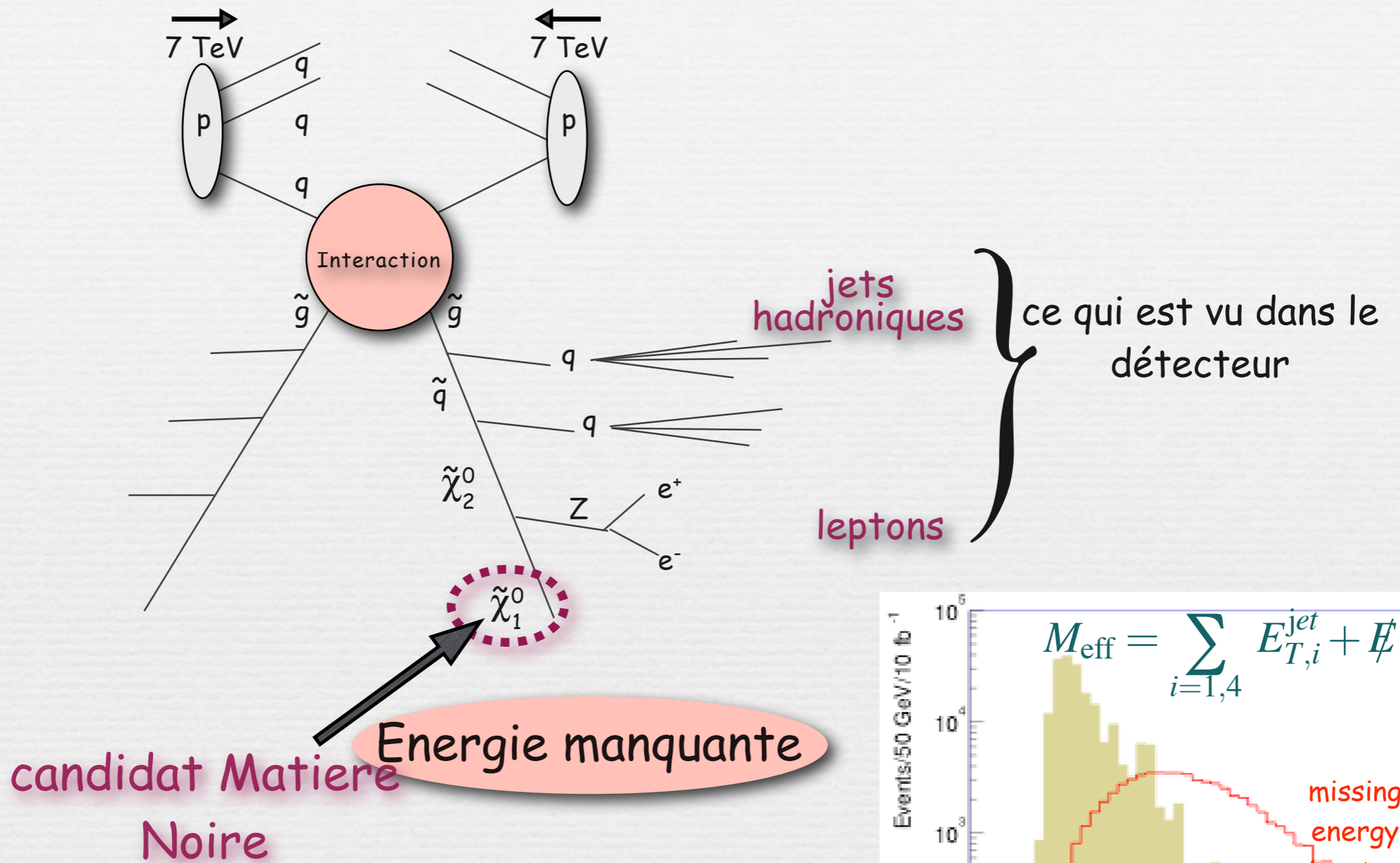
abondance



taux de détection
& signatures



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



"It is impossible to overestimate the importance of discovering Dark Matter at the LHC."

G. Giudice

LHC: pas suffisant pour déterminer la nature de la matière noire

Si le LHC voit des évènements avec énergie manquante et mesure la masse de la particule de matière noire, il faudra en plus:

1) détecter la matière noire dans la galaxie (via ses produits d'annihilation)

2) étudier ses propriétés en laboratoire

3) faire la connexion entre les deux

Complémentarité nécessaire entre les expériences de détection directe, indirecte et les collisionneurs pour identifier la nature de la particule de matière noire

Un important effort expérimental pour identifier la matière noire

Indirect

Direct

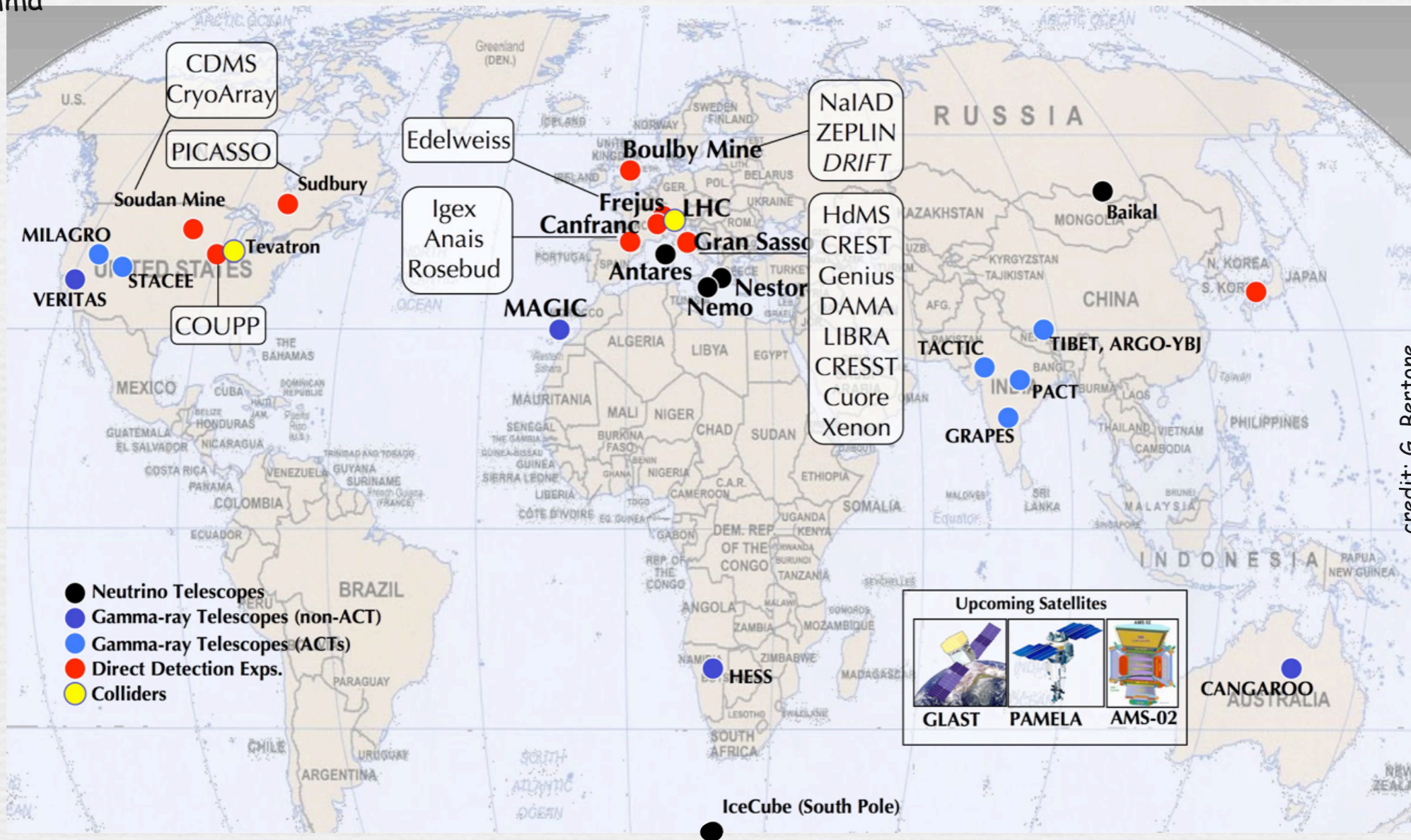
Collisionneurs

Antimatiere
Neutrinos
Rayons Gamma

Signature :
annihilation

signature: diffusion
élastique

signature : energie
manquante



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.

10 000 000 001

q

10 000 000 000

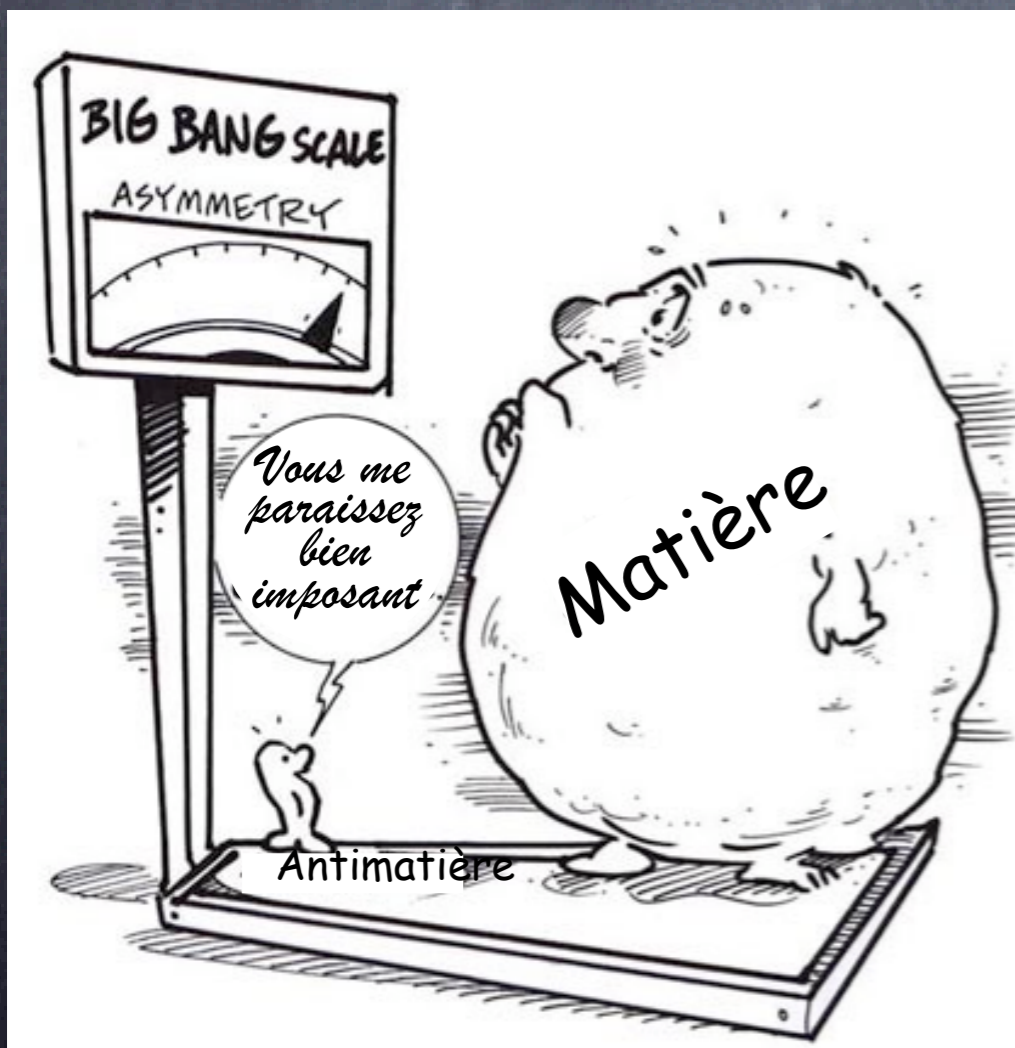
\bar{q}

1

q

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

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

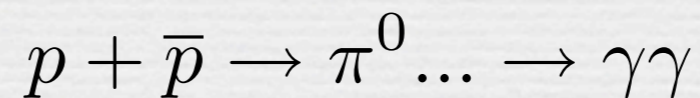


Evidence Observationnelle

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 $n_{\bar{p}}/n_p \sim 10^{-4}$ peut être expliqué par des processus du type $p + p \rightarrow 3p + \bar{p}$.

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



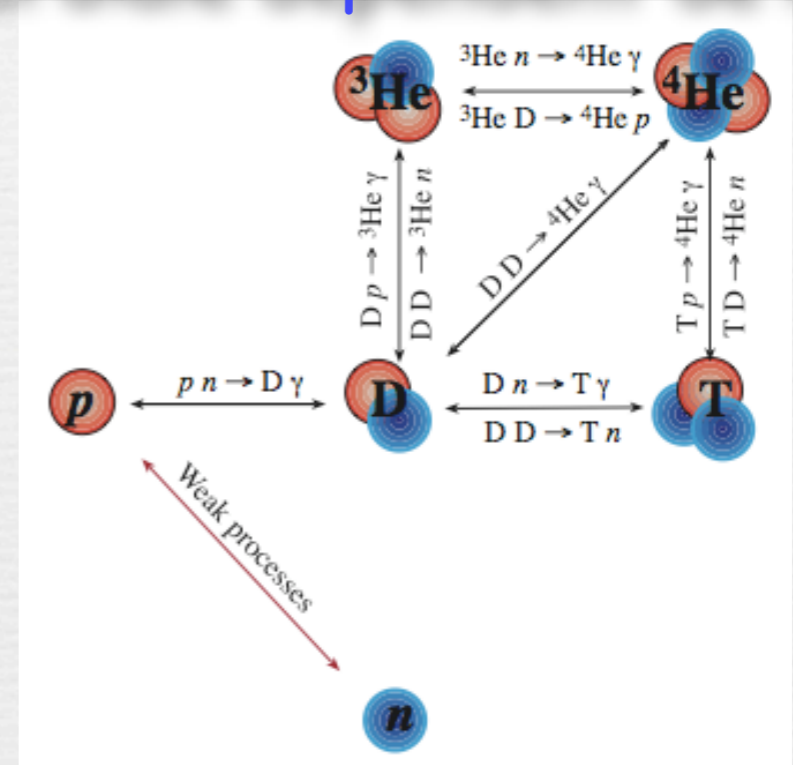
Comment mesure-t-on η ?

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

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

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

Un excès de photons par rapport aux baryons retarde la nucléosynthèse en augmentant la réaction $D \gamma \rightarrow pn$

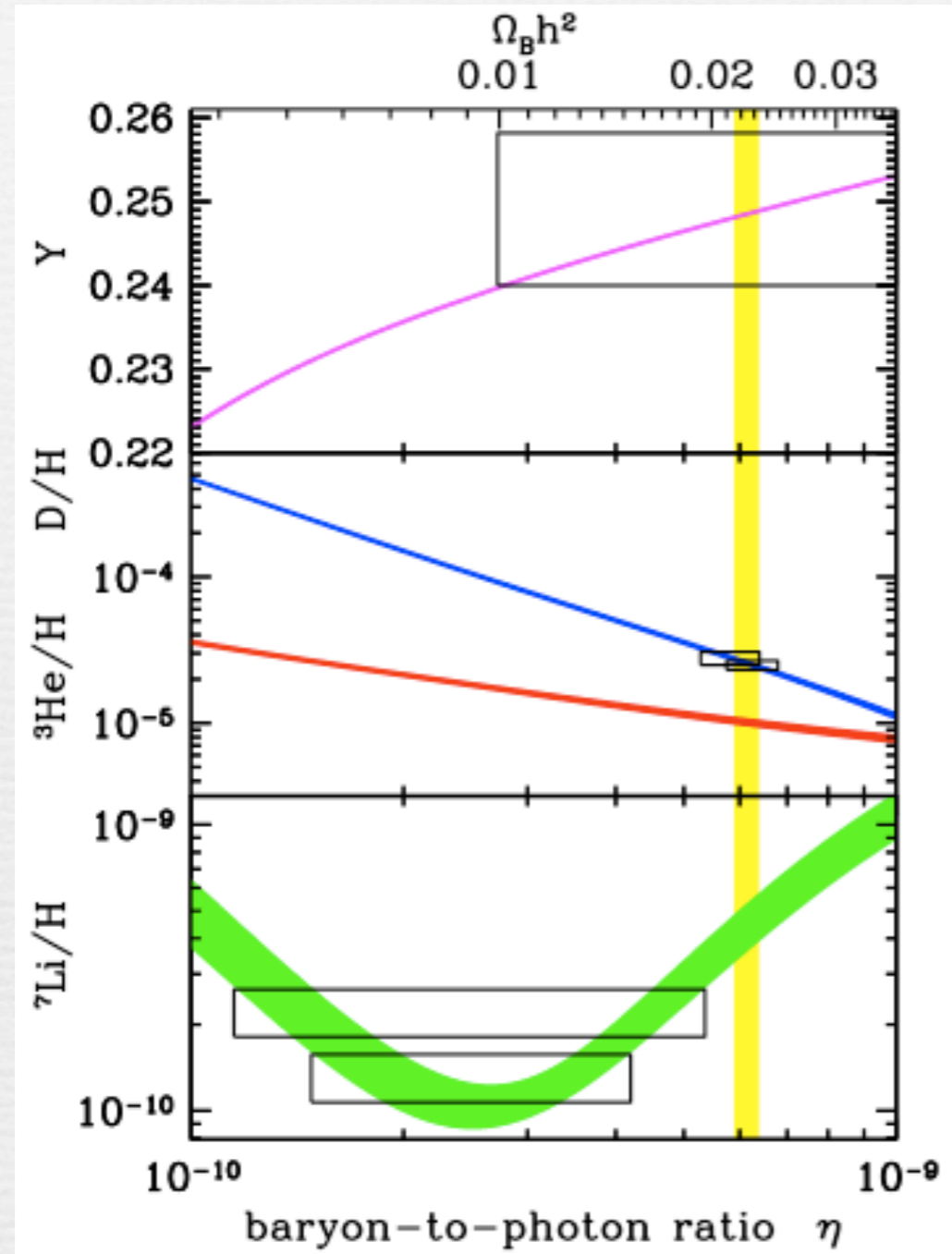


2) Mesures du rayonnement de fond cosmique

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

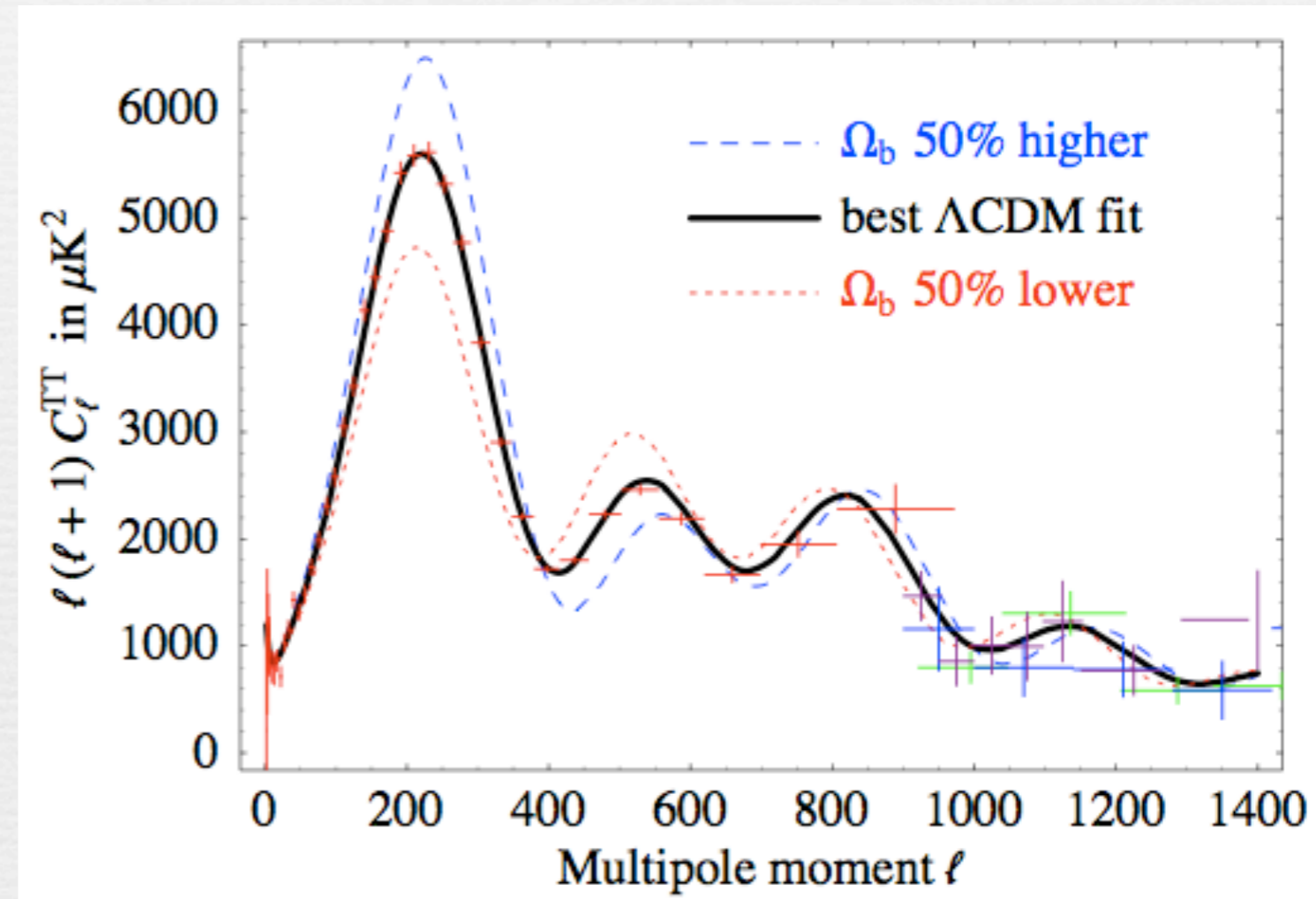
Les fluctuations de température dépendent du rapport n_B / n_γ

Abondances primordiales en fonction de η



Dependence of the CMB Doppler peaks on η

(CMB temperature fluctuations)

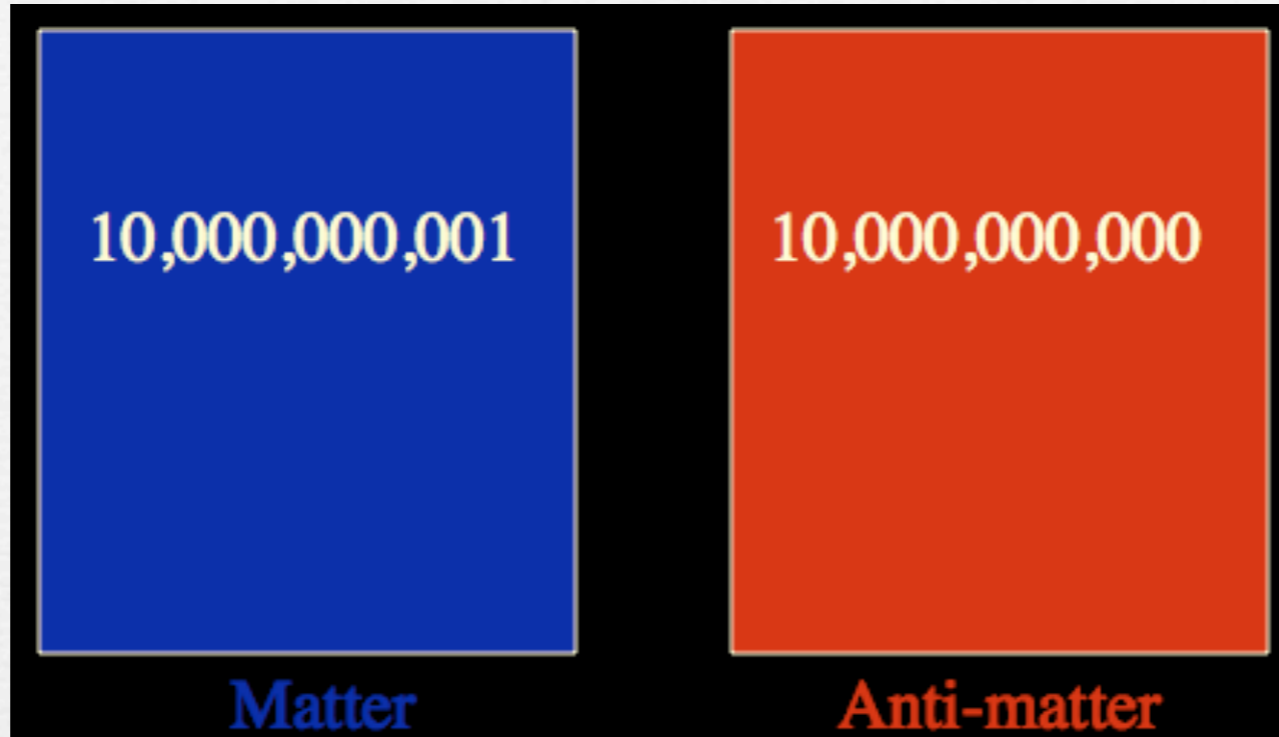


→ $\eta = 10^{-10} \times \begin{cases} 6.28 \pm 0.35 \\ 5.92 \pm 0.56 \end{cases}$

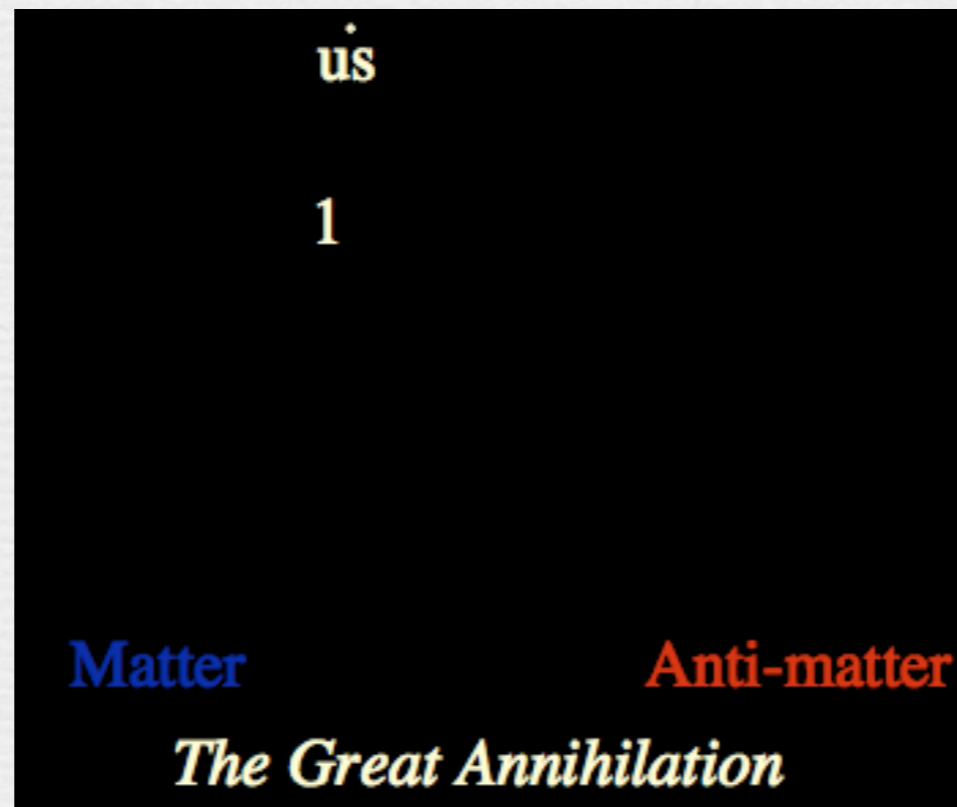
→ $\eta = 10^{-10} \times (6.14 \pm 0.25)$

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

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

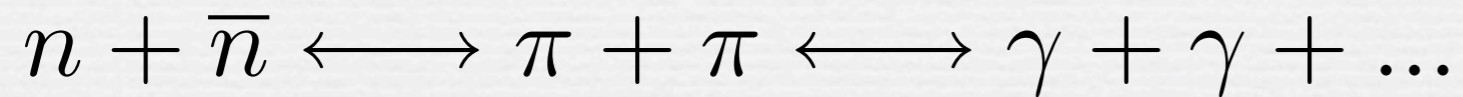


asymétrie baryonique: $\frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_B + n_{\bar{B}}} \sim 10^{-10}$



Combien de baryons aurait-on dans un univers symétrique?

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



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

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

ce qui correspond à la température

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

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

Les 3 conditions de Sakharov pour la baryogénèse (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 être rompu

Le Modèle Standard de la Physique des Particules

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

secteur de jauge

secteur de saveur

secteur des neutrinos (si Majorana)

secteur de la brisure de symétrie électrofaible

- un siècle pour le développer
- testé avec une précision impressionnante
- décrit toutes les données expérimentales 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

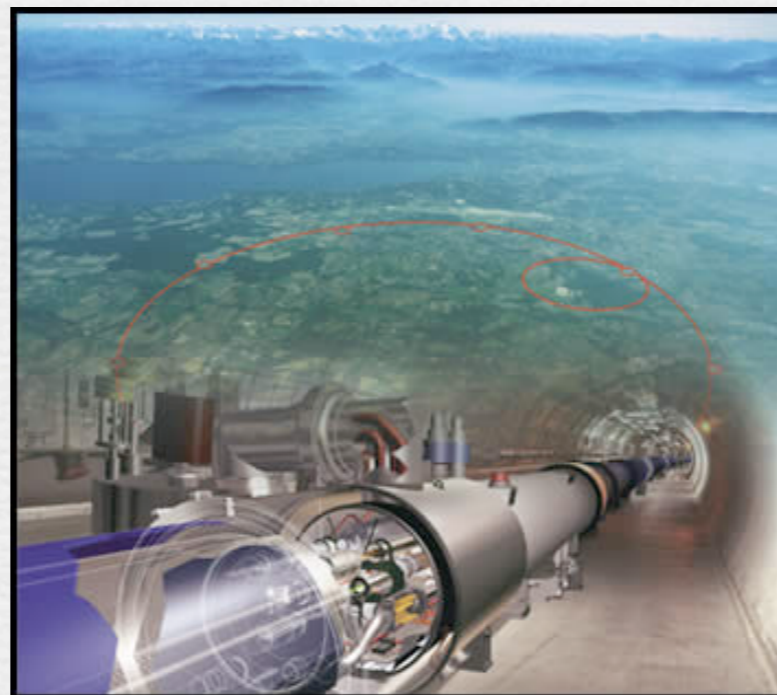
(c'est la seule particule
fondamentale *scalaire*)

2008: premières collisions au LHC (14×10^{12} eV)

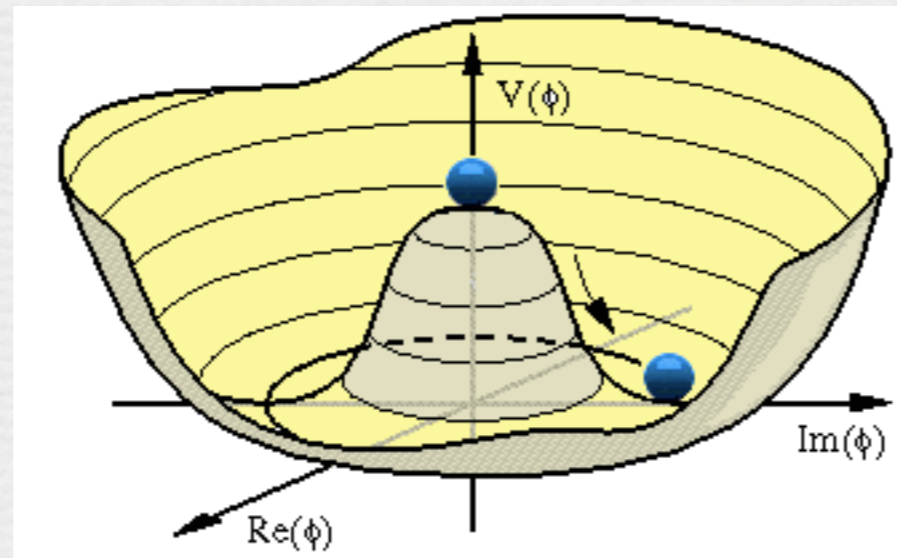
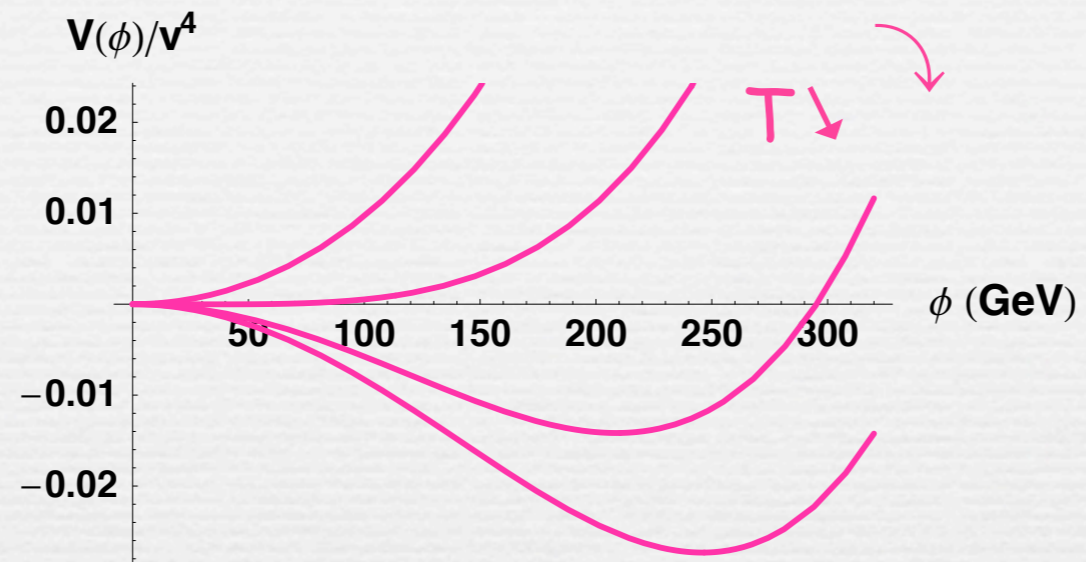
L'exploration directe de l'échelle de Fermi
commence

principal objectif
pour la physique :

Quel est le mécanisme à l'origine de la brisure de symétrie électrofaible ?



Mécanisme de Higgs



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 légèrement modifiée

-proton plus lourd que le neutron! le proton n'est plus stable et se désintègre en neutron.

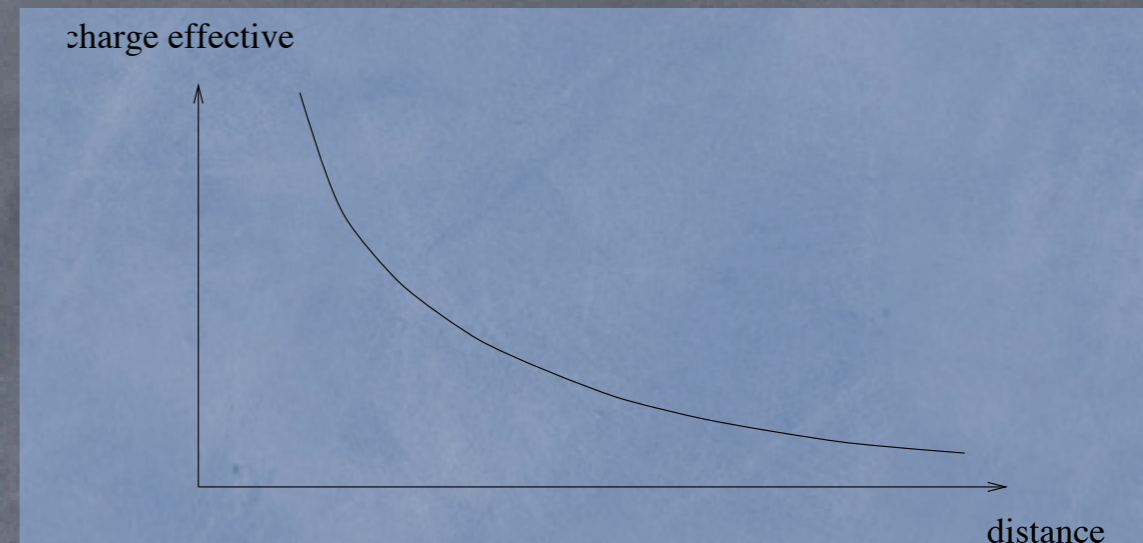
-> pas d'atome d'hydrogène

-> nucléosynthèse primordiale très différente

-> un univers profondément différent

Variation de l'intensité d'une force

Excès de charge positive
autour de l'électron



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

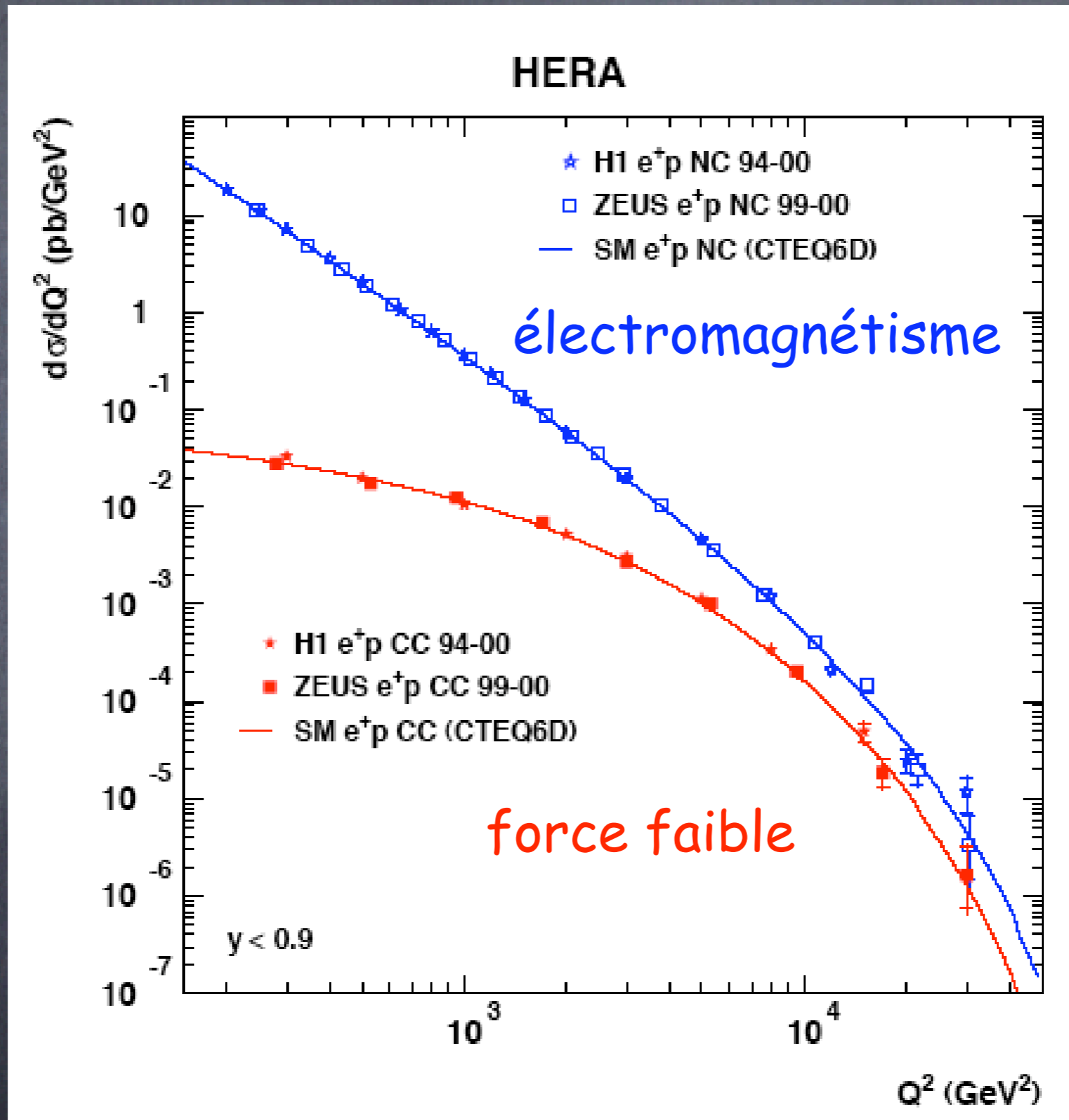


$L = 400 \text{ km}$

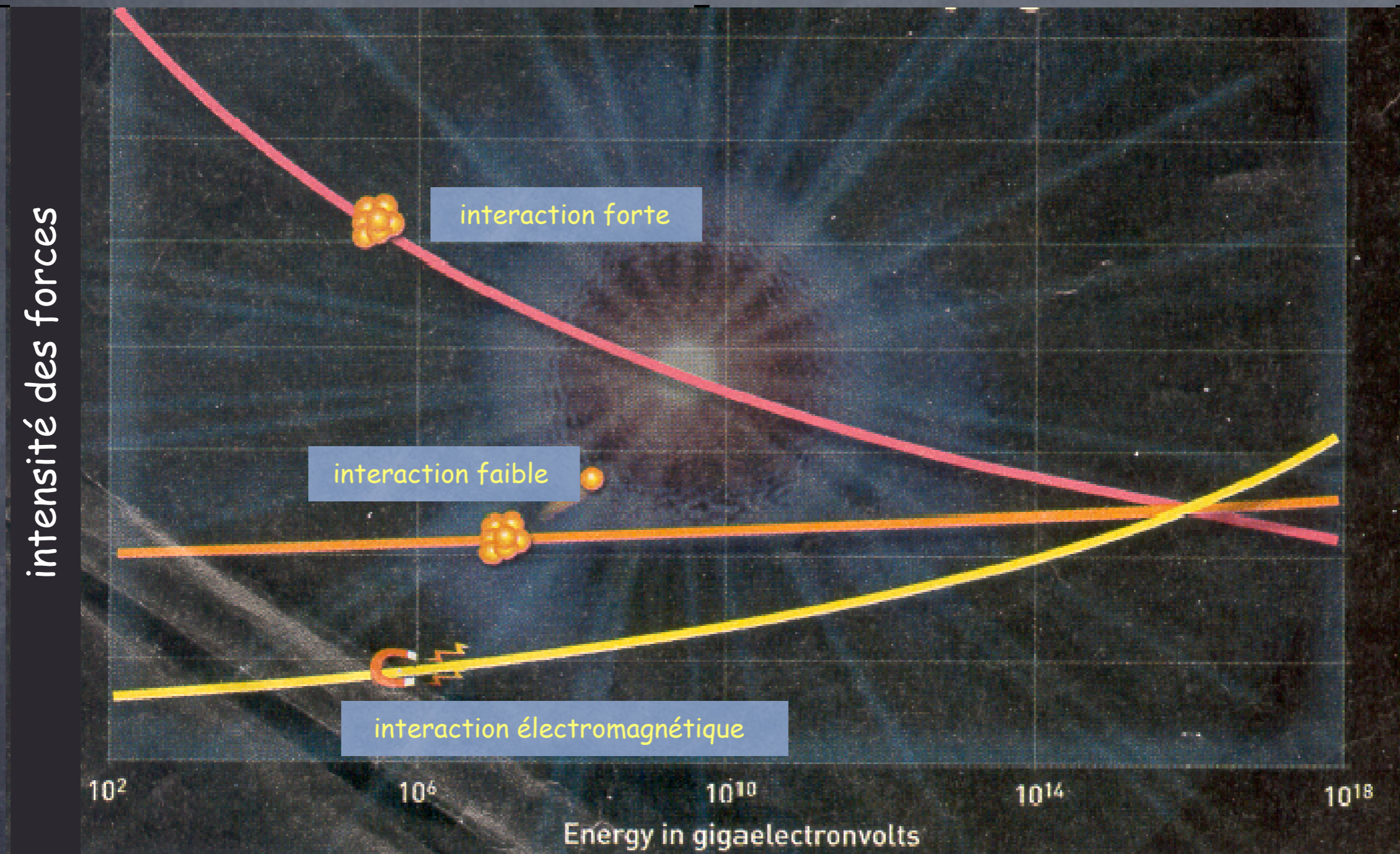


$L = 800 \text{ km}$

L'unification électrofaible



Théories de grande unification



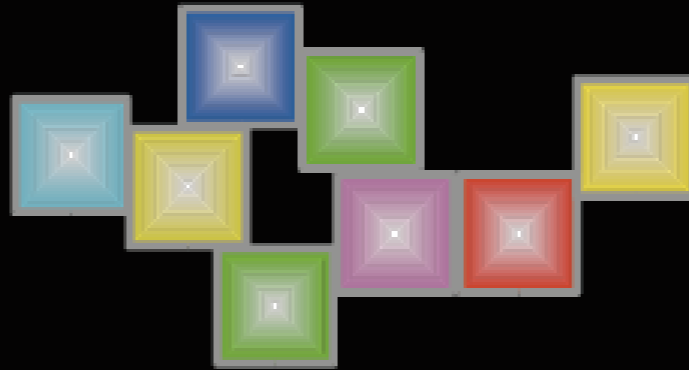
Un seul type de matière
Une seule interaction fondamentale

Supersymétrie

Fermions

particules de matière

Les fermions se
repoussent

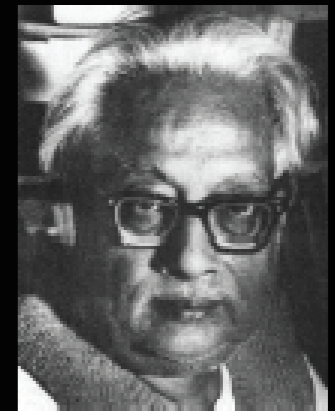
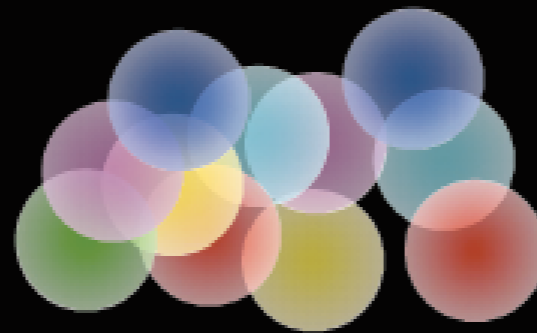


Enrico Fermi

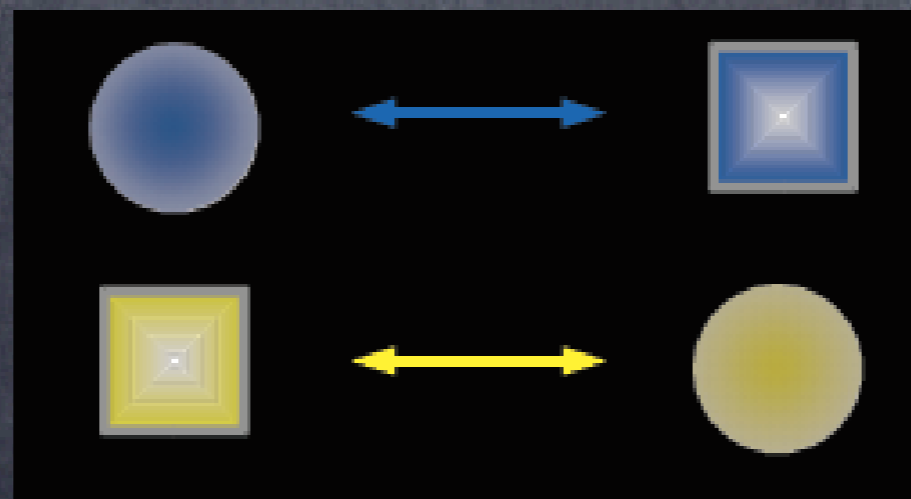
Bosons

particules de forces

Les bosons peuvent
s'empiler



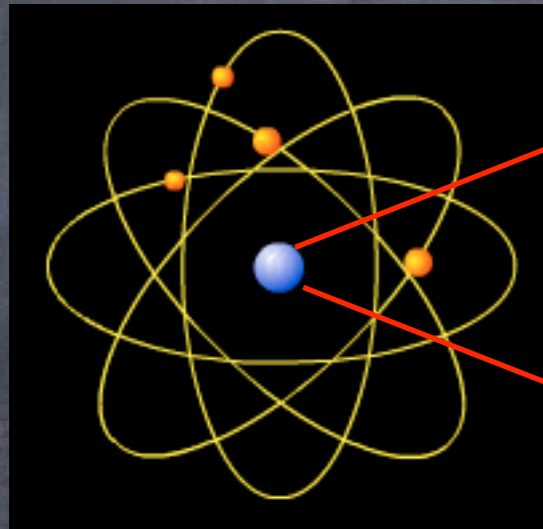
Satyendra Nath Bose



Théorie des cordes

(univers observable)

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

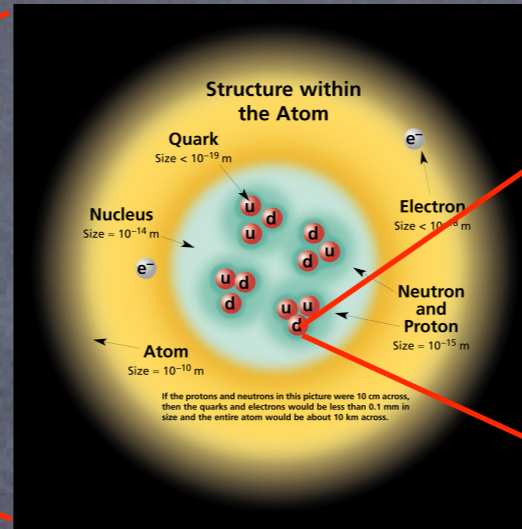


Atome

électrons + noyau

(Terre)

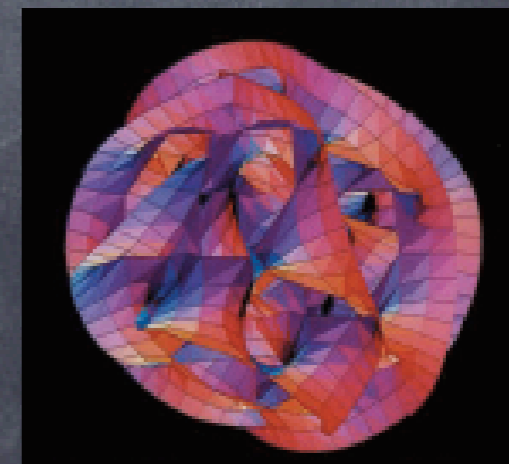
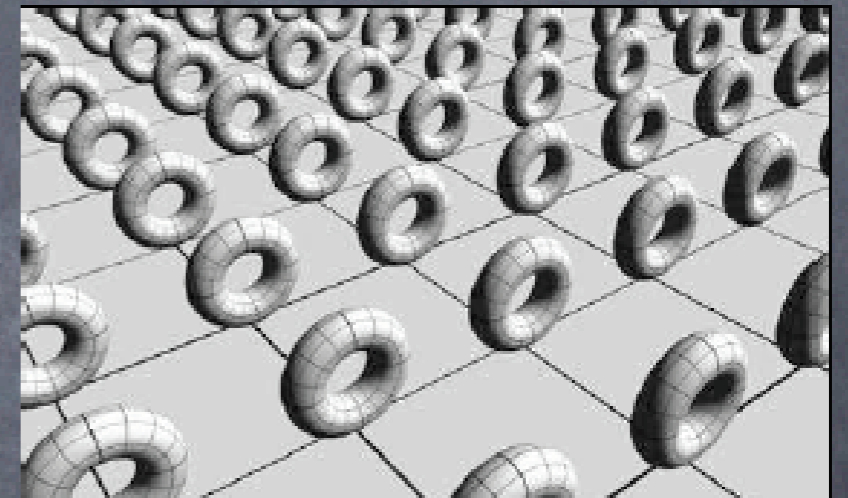
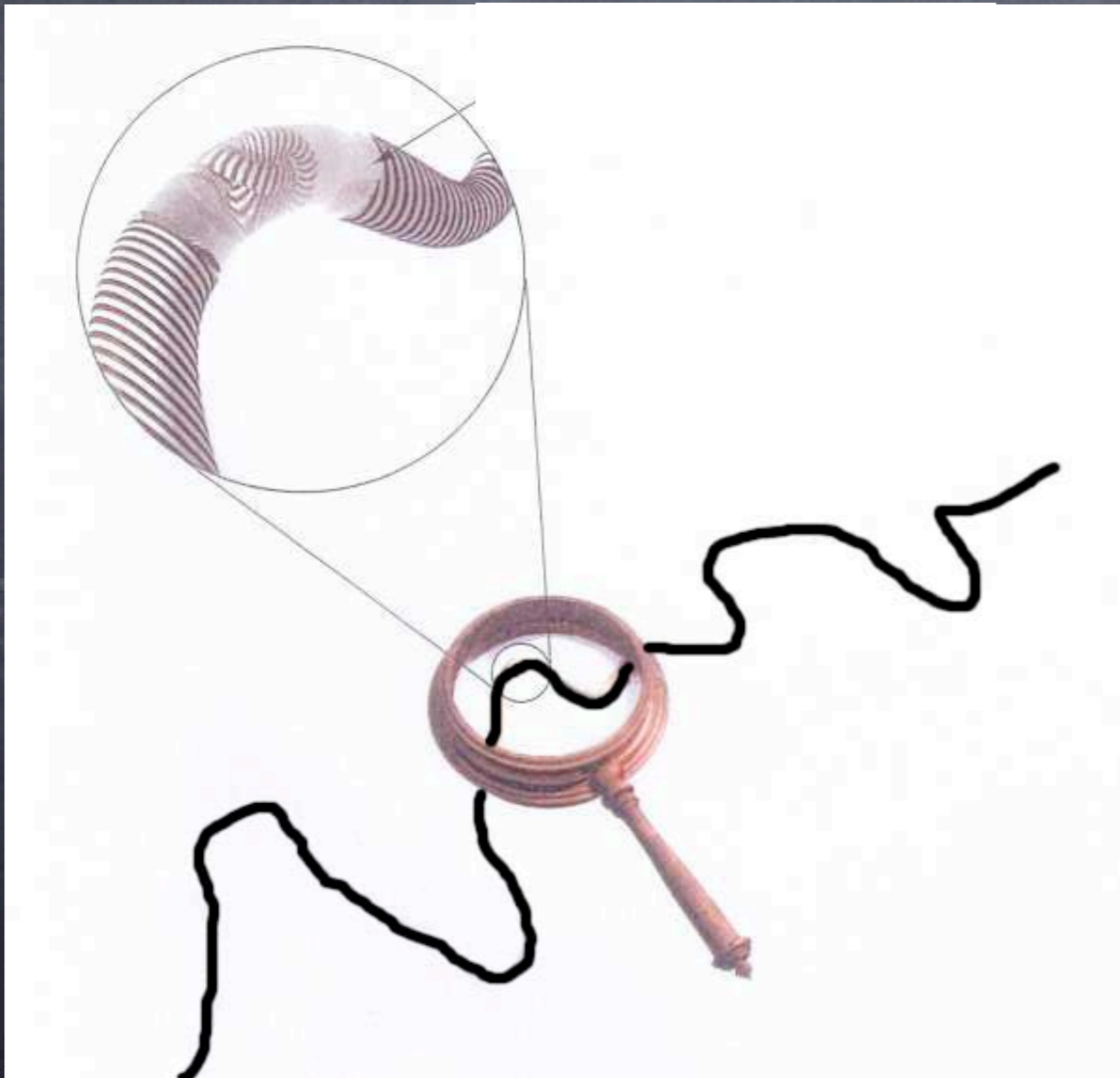
$$10^{-17} \text{ m}$$



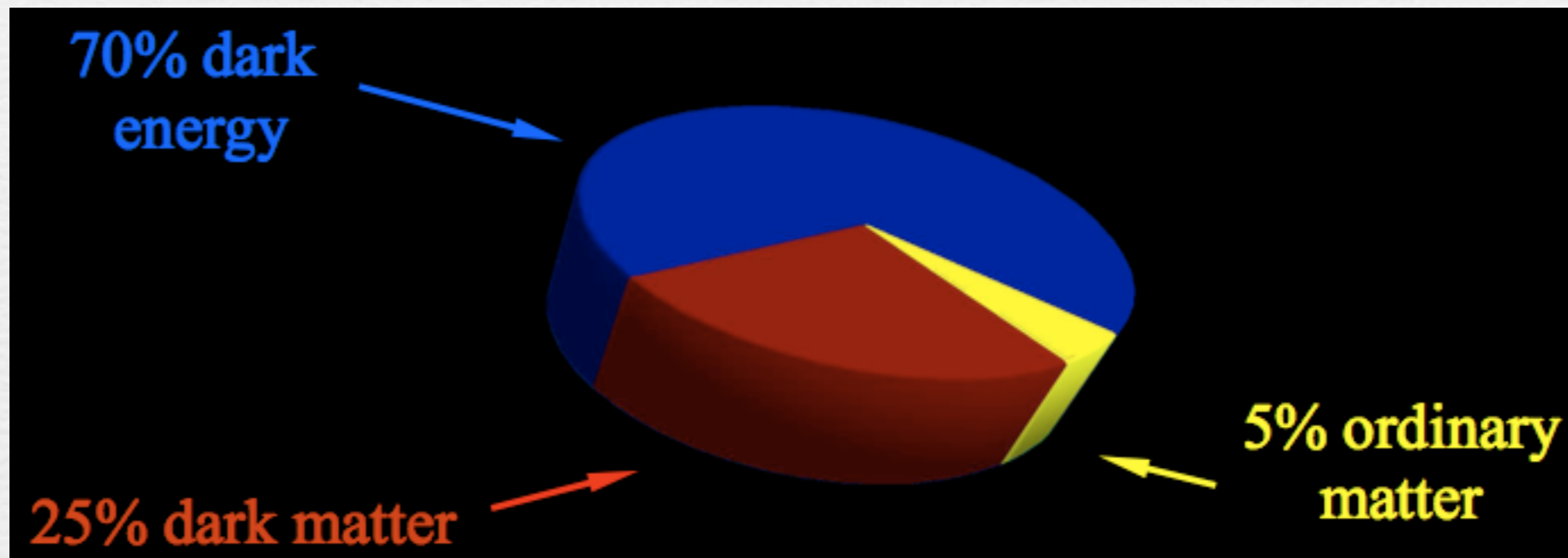
Dimensions supplémentaires

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

Ces dimensions supplémentaires sont recourbées sur elles-mêmes



Retour à l'énergie sombre



Comment déduisons-nous la présence d'énergie sombre?

1) Postuler un modèle cosmologique

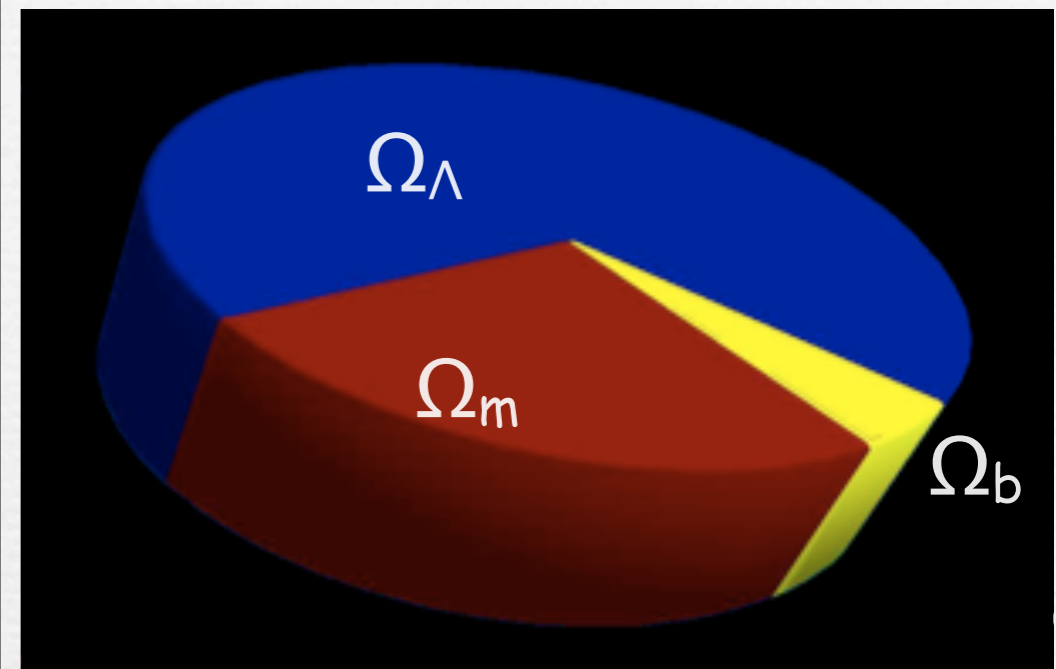
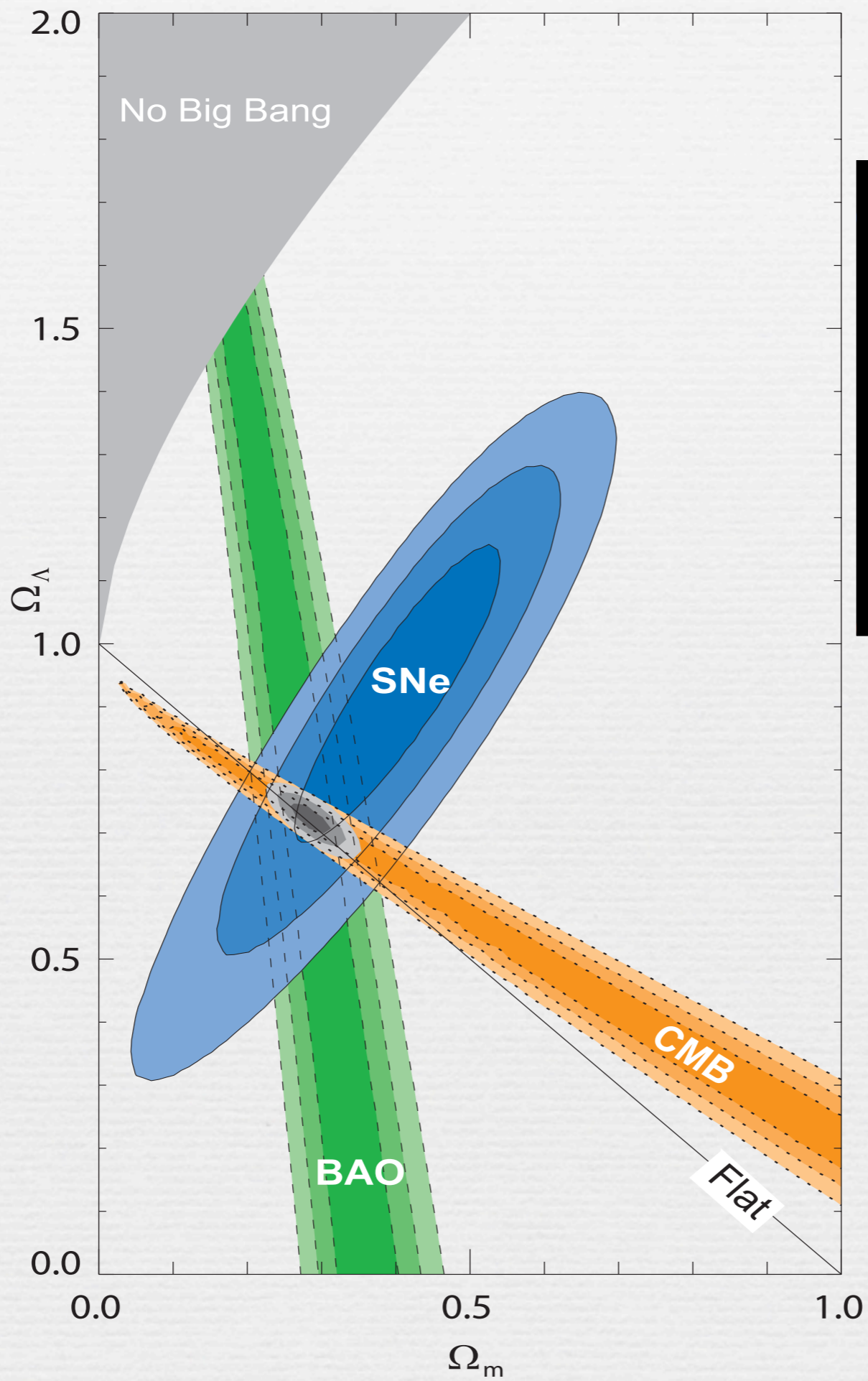
- métrique de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker
(équation de Friedmann)
- contenu en énergie $\rho = \rho_M + \rho_R + \rho_\Lambda + \dots$

2) Calculer les observables

3) comparer aux observations: Supernovae, galaxies (répartition des fluctuations de densité de matière/spectre de puissance), amas de galaxies (masse, redshift, structure), lentilles gravitationnelles (mesure des angles de deflection affectée par la présence d'énergie sombre)

-> Pas de "fit" du modèle cosmologique si $\rho_\Lambda = 0$.

-> Le "fit" du modèle cosmologique donne la valeur de la
'constante cosmologique' $\rho_\Lambda = (10^{-4} \text{ eV})^4$



Le taux d'expansion H est une quantité clé

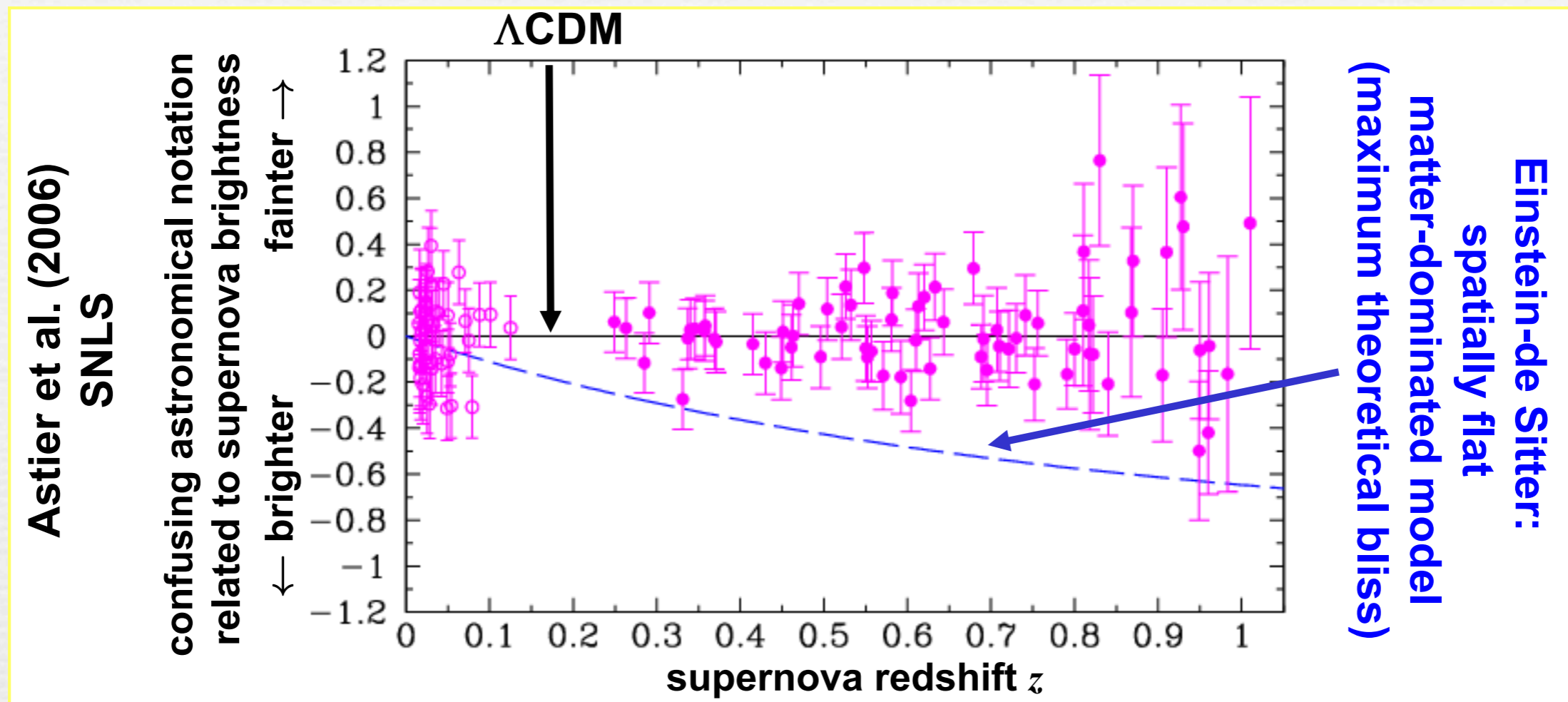
Hubble's constant curvature matter radiation dark energy

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\underbrace{(1 - \Omega_{\text{TOTAL}})}_{\text{CMB}} (1+z)^2 + \underbrace{\Omega_M}_{\text{LSS}} (1+z)^3 + \underbrace{\Omega_R}_{\text{CMB}} (1+z)^4 + \underbrace{\Omega_w}_{H(z)} (1+z)^{3(1+w)} \right]$$

(rayonnement de fond)

(distribution des structures à grande échelle)

Supernovae (SNe1a)



- 1) Utiliser des "chandelles standards"
 - 2) Mesurer luminosité et redshift
 - 3) faire une hypothèse sur le modèle cosmologique
 - 4) comparer observations et modèle
- > Le "fit" donne la valeur de la 'constante cosmologique' ρ_Λ
 $= (10^{-4} \text{ eV})^4$

une mesure embarrassante...

valeur déduite des observations:

$$\rho_{\Lambda} = (10^{-4} \text{ eV})^4 = 10^{-16} \text{ eV}^4$$

valeur attendue (théorique): $\sim 10^{120}$ fois la valeur observée

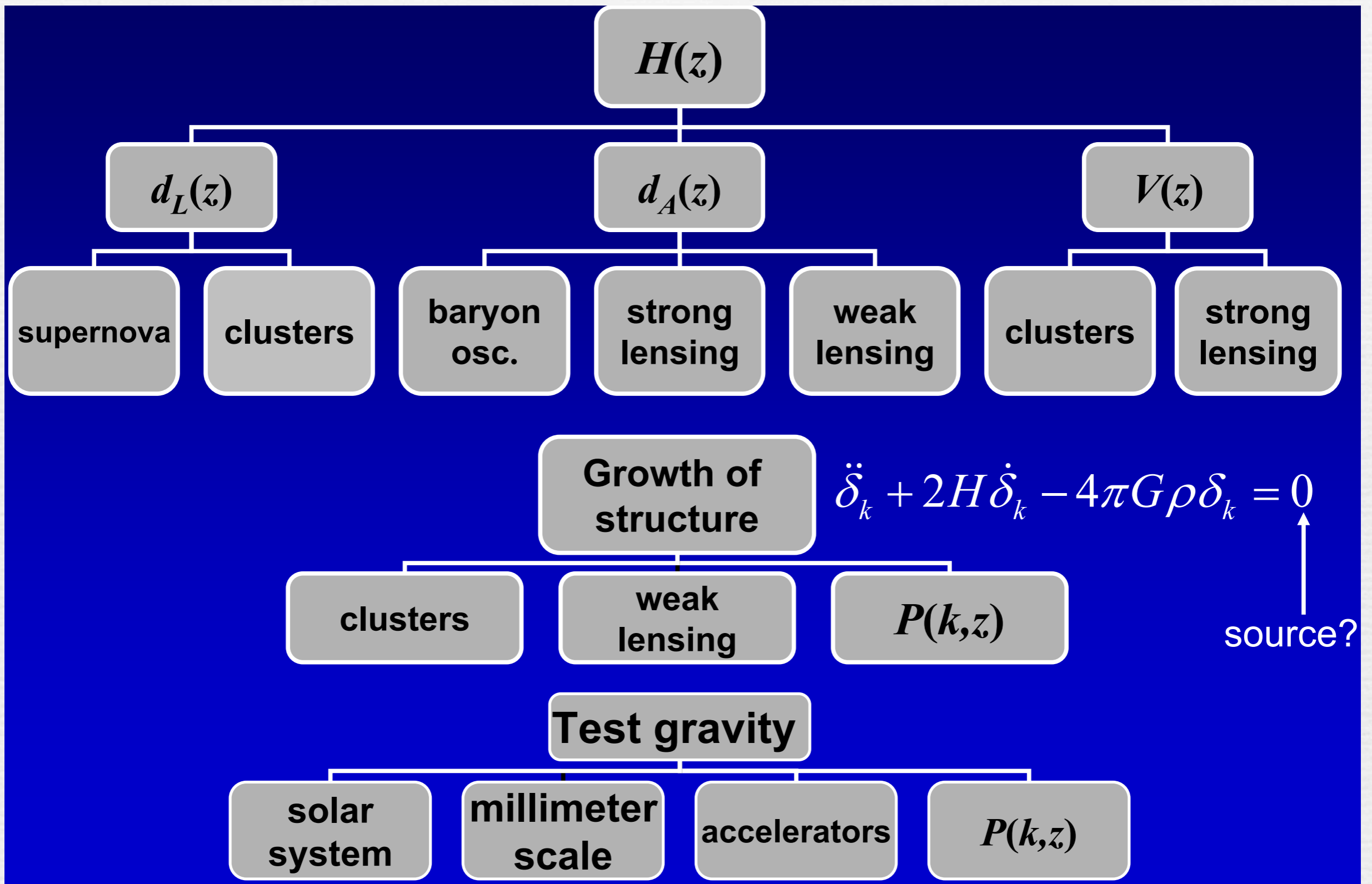
$$\Lambda = M_{\text{Planck}} \rightarrow \rho_{\Lambda} = 10^{112} \text{ eV}^4$$

$$\Lambda = \text{TeV} \rightarrow \rho_{\Lambda} = 10^{48} \text{ eV}^4$$

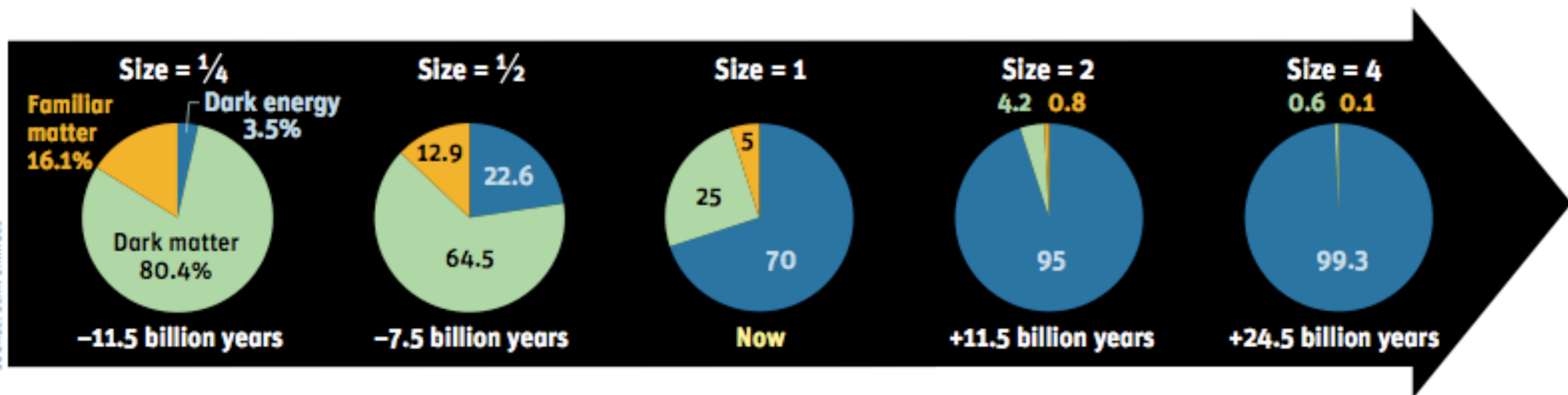
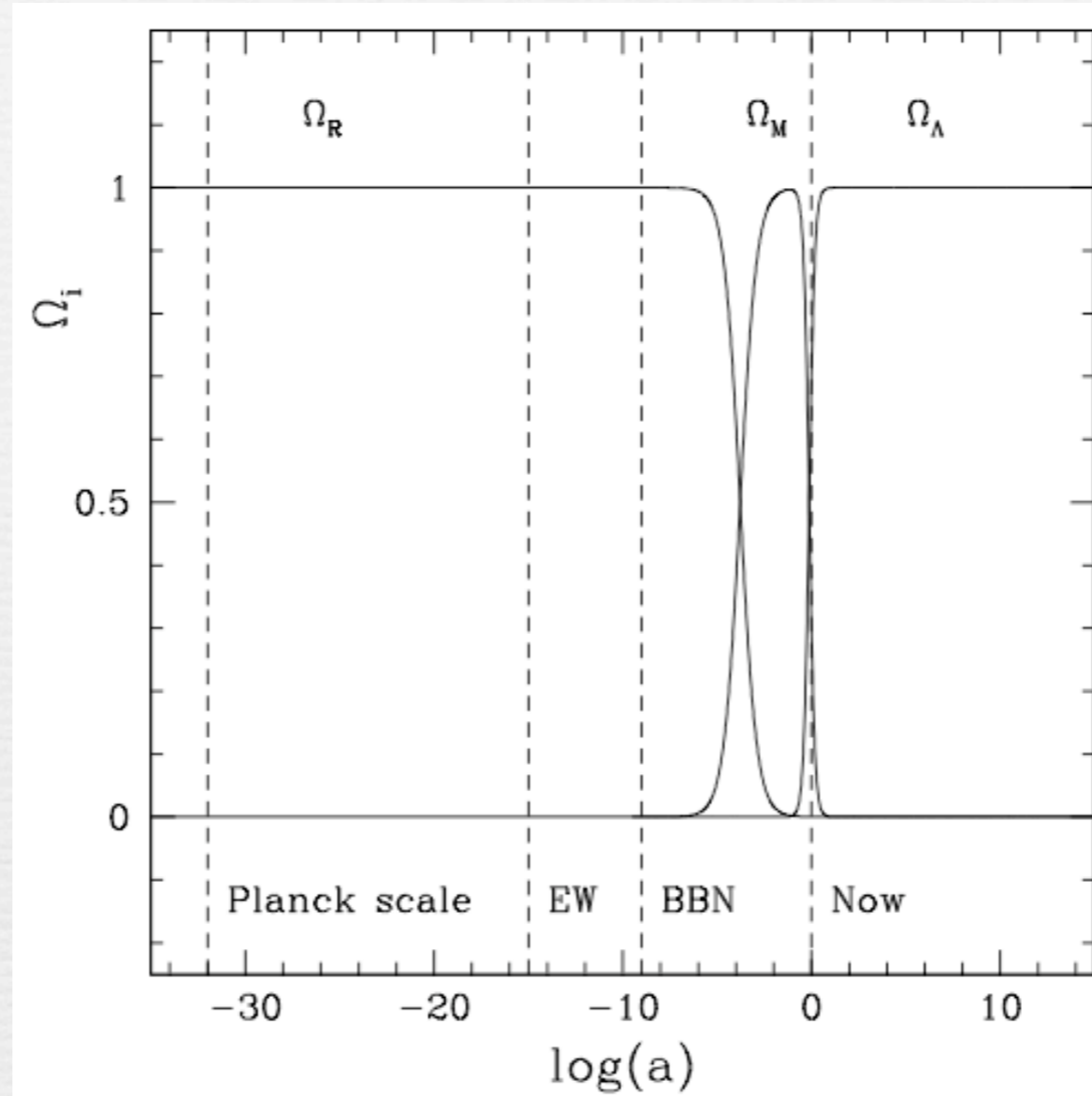


fluctuations quantiques du vide

Programme des observations



Le problème de la coïncidence (the "why now?" problem)



Sites de vulgarisation en français:

<http://www.planck.fr/heading2.html>

<http://www-cosmosaf.iap.fr/Wright.htm>

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosbig/>

en anglais:

<http://www.universeadventure.org/>

<http://map.gsfc.nasa.gov/universe/index.html>

<http://www.aip.org/history/cosmology/>