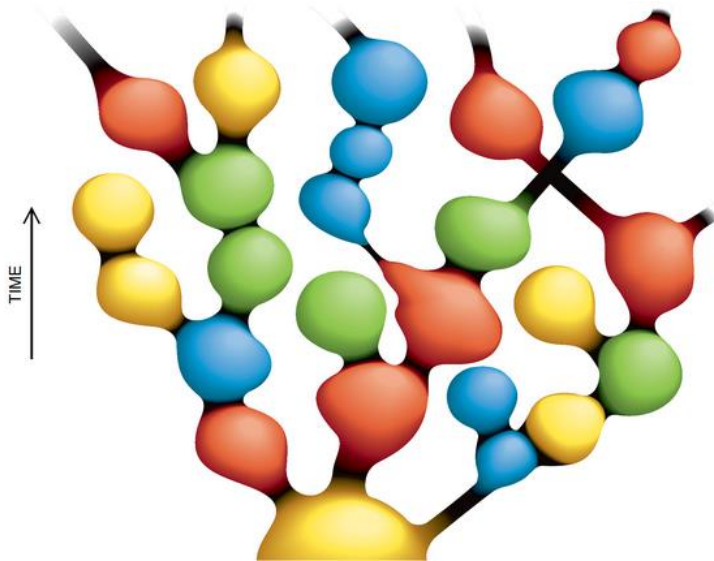


Origine de l'Univers



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie



Françoise Combes
Octobre, 2018



Contenu de l'Univers

- Matière ordinaire **5%**

Baryons (protons, neutrons)

Ω_b



- Matière noire exotique **25%**
non baryonique

Ω_{DM}



- Energie noire **70%**

Ω_Λ



$$\Omega = \rho / \rho_{crit}$$

$$\rho_{crit} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

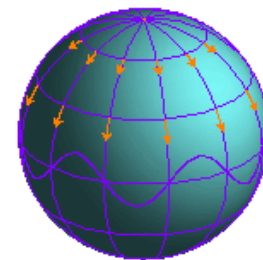
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

ou constante cosmologique Λ



Galaxies qui
s'éloignent
Vitesse \propto Distance

L'Univers est en expansion

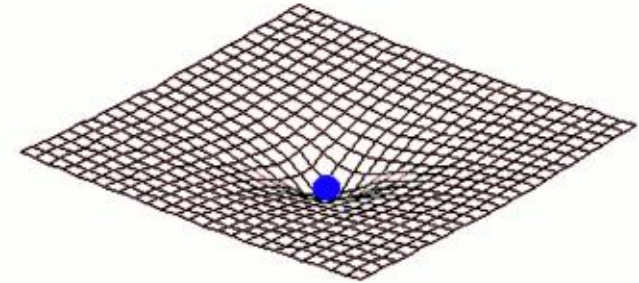


Décalage vers le rouge



Un peu d'histoire

1905: Relativité restreinte, espace-temps, $E=mc^2$



1915: Relativité générale

→ La gravitation comme déformation de l'espace

1917: on commence à exploiter la RG pour des modèles d'Univers
A l'époque, on pensait l'Univers statique, stable, en équilibre
Einstein propose donc une sphère, avec courbure positive
et rajoute une **constante Λ** dans ses équations

→ 1919: Λ est une nécessité, au détriment de la beauté de la théorie

La théorie du Big-Bang

1929: Il est établi qu'il existe des galaxies extérieures
Les galaxies s'éloignent !

vitesse proportionnelle à leur distance

L'espace est en expansion

Conforme aux équations de la relativité générale (1915)

→ Pas besoin de Λ

Georges Lemaître propose une origine de l'Univers
très dense et très chaud (1927)

Qualifié de **Big-Bang** par Fred Hoyle (BBC, 1949!)

1965: découverte du fond cosmologique microonde

Penzias & Wilson (Nobel 1978)



E. Hubble

G. Lemaître



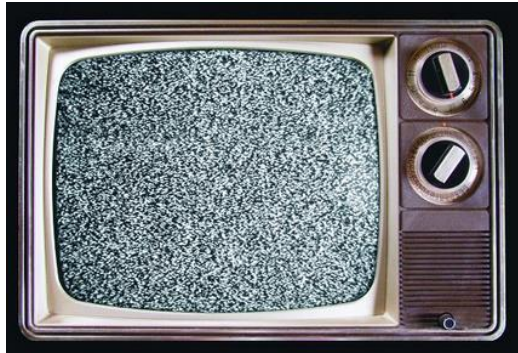
Le fonds microonde



Découvert par hasard en 1965, comme un bruit de fond gênant!

Alors que des théoriciens commençaient à le prévoir ($T < 40\text{K}$)

→ R. Dicke & Jim Peebles à Princeton

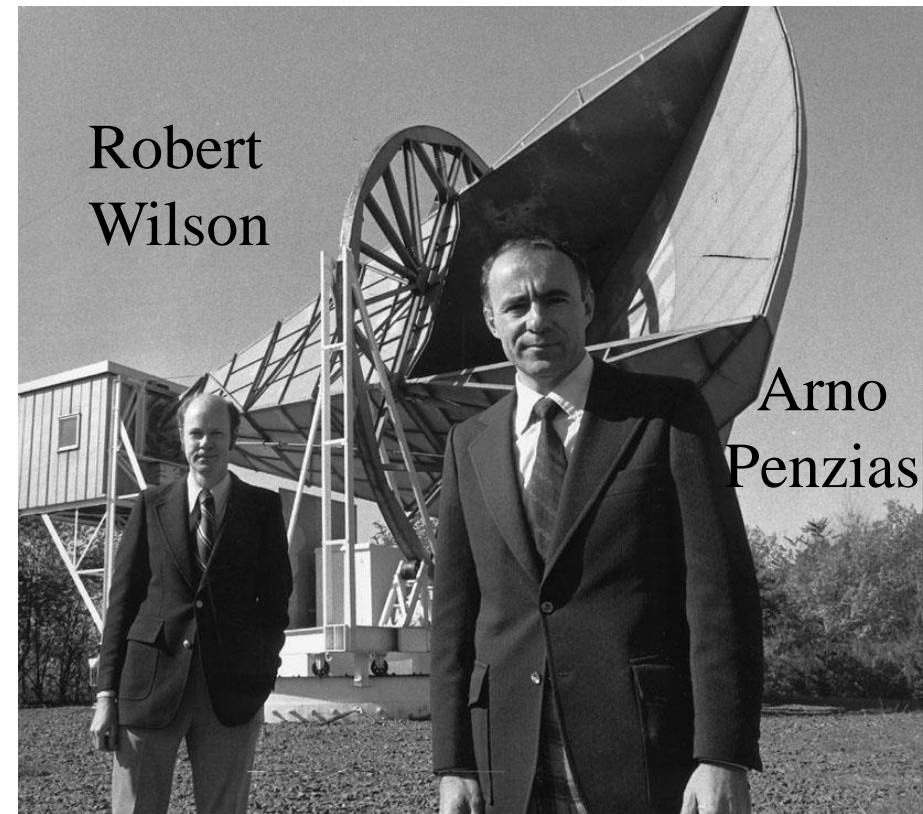
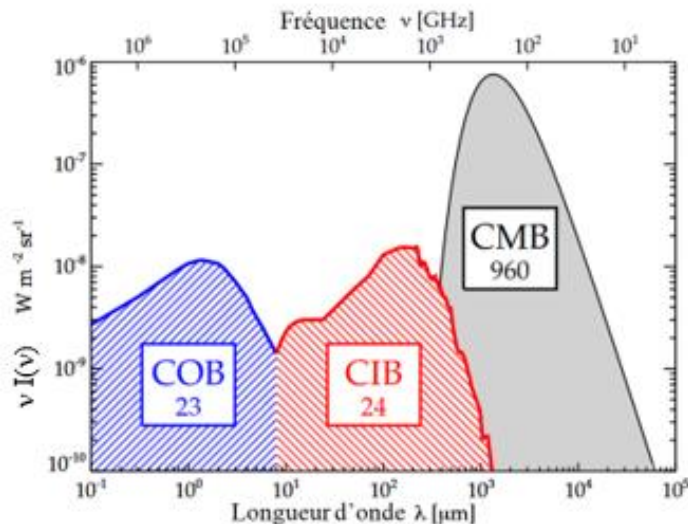


400ph/cm^3

$10^{13} / \text{cm}^2/\text{s}$

$T = 2,73\text{K}$

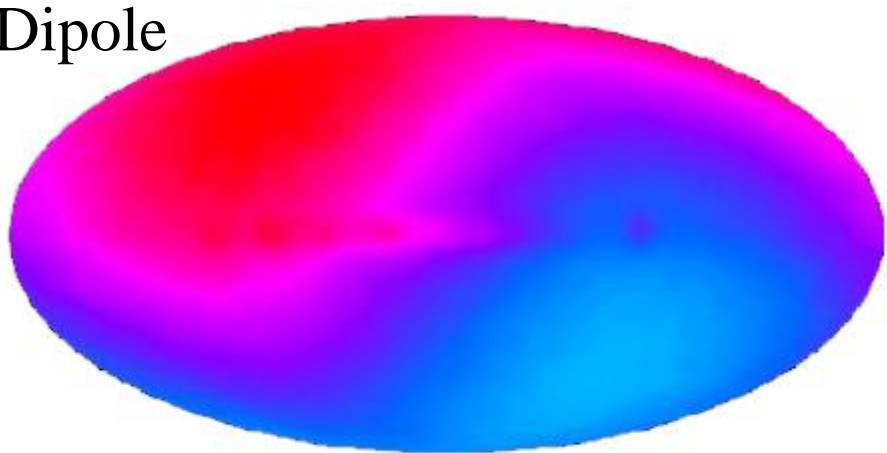
qq % de la neige sur la télé



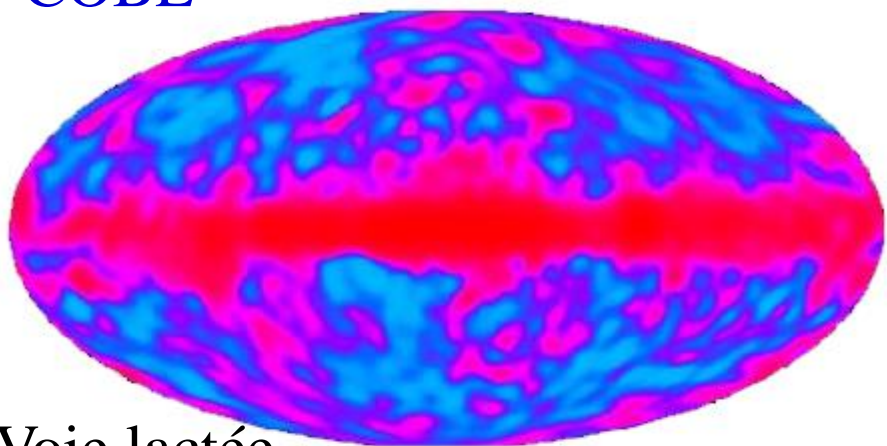
Robert
Wilson

Arno
Penzias

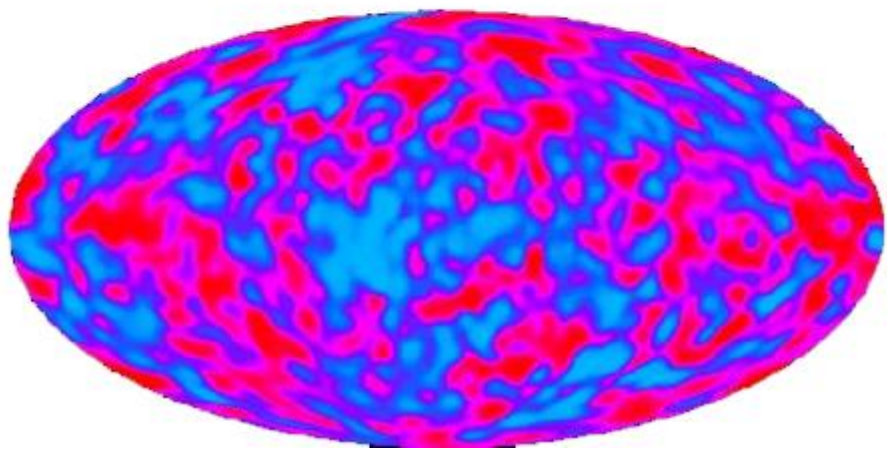
Dipole



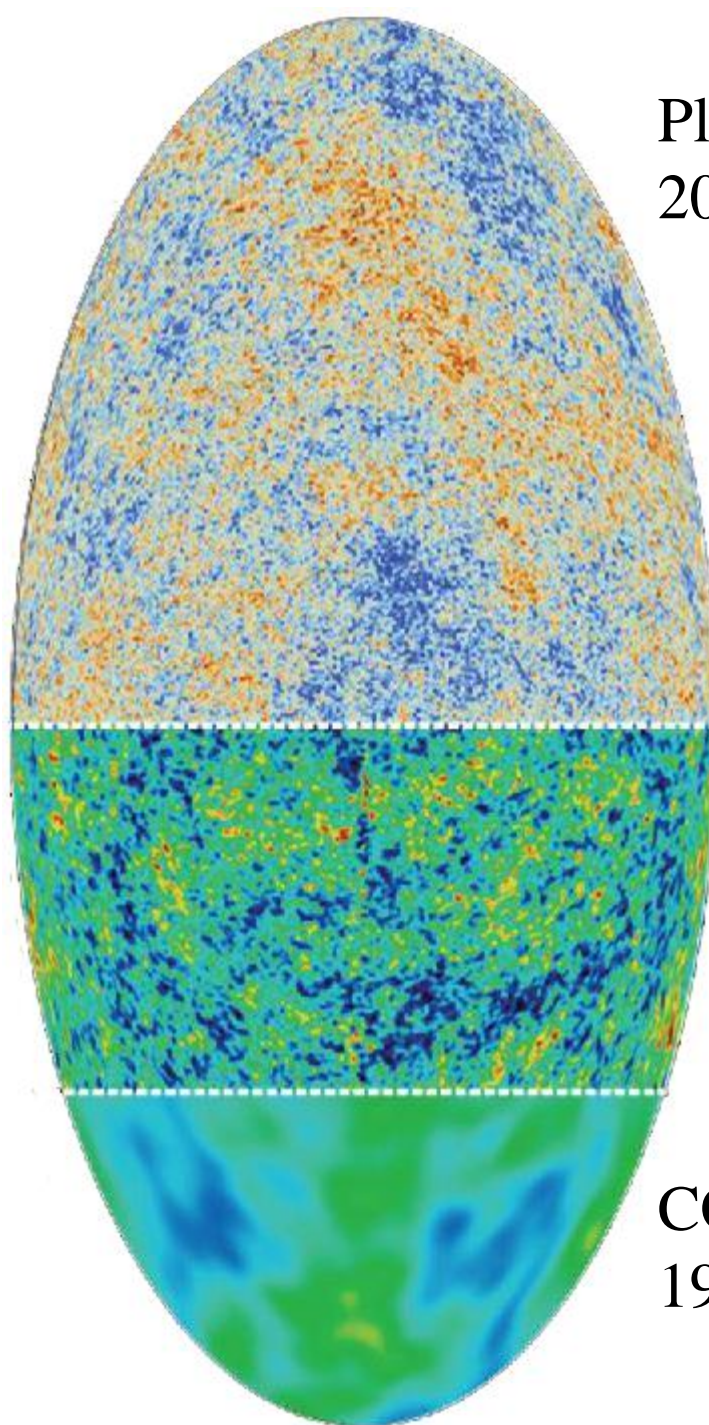
COBE



Voie lactée



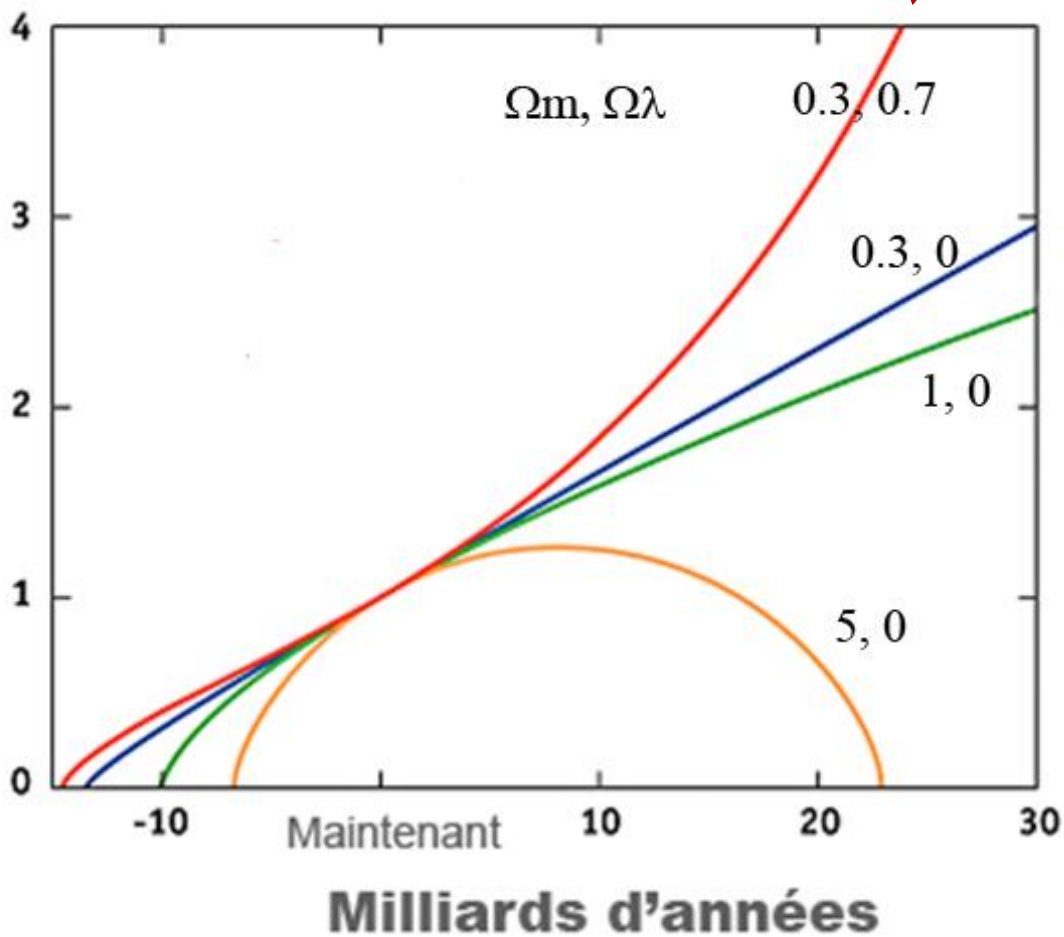
Planck
2013



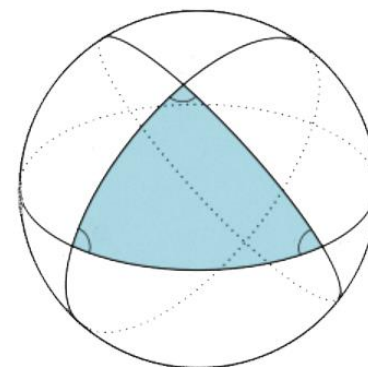
WMAP
2003

COBE
1992

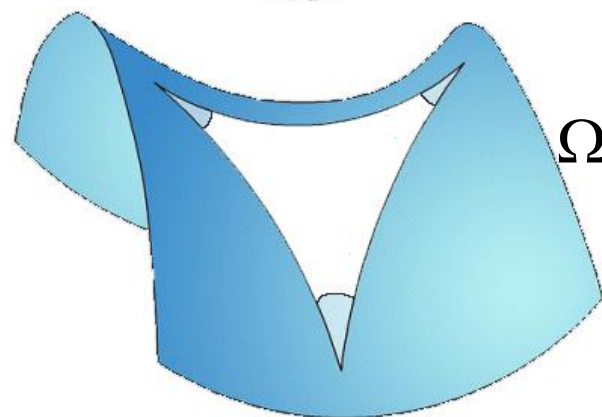
Taille de l'Univers



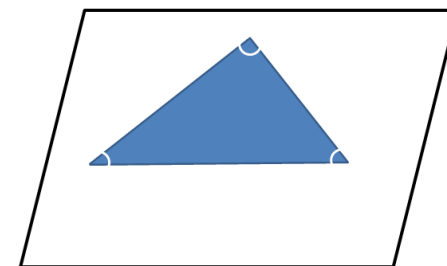
Aujourd'hui



$\Omega > 1$



$\Omega < 1$



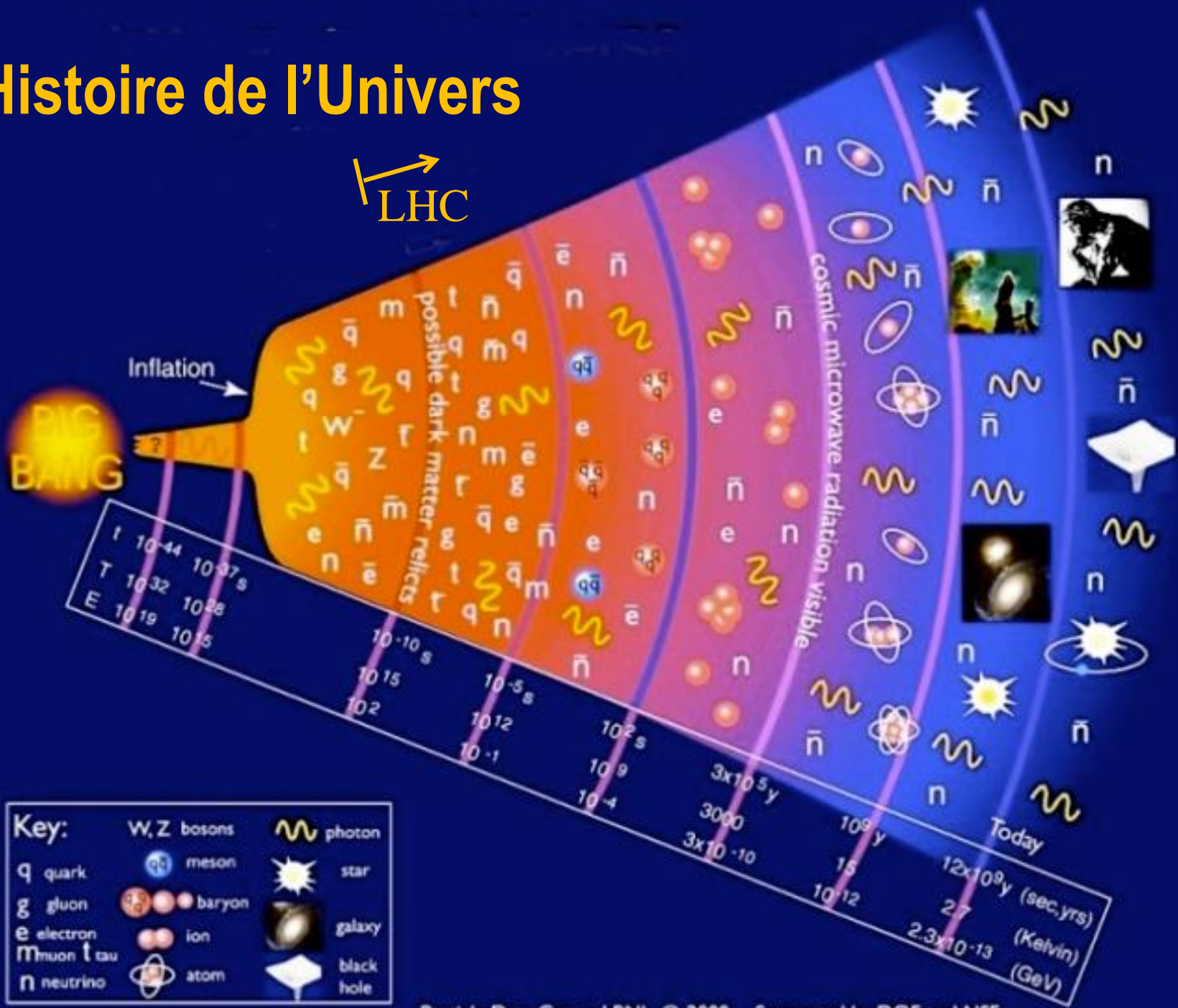
$\Omega = 1$

$$\Omega = \rho / \rho_c$$

$$\rho_c = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

Histoire de l'Univers

LHC



Pourquoi reste-t-il de la matière?

Au début uniquement du rayonnement, assez énergétique pour créer particules-antiparticules, en équilibre
 $kT < 1 \text{ GeV} \sim \text{masse du proton} \rightarrow \text{annihilation}$

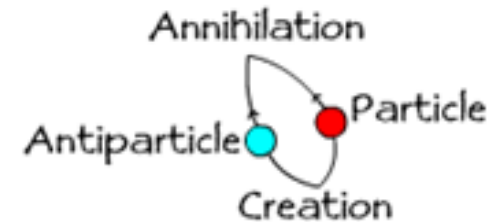
L'abondance est gelée à $T < 0.7 \text{ MeV}$

$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \sim 10^{-18}$$

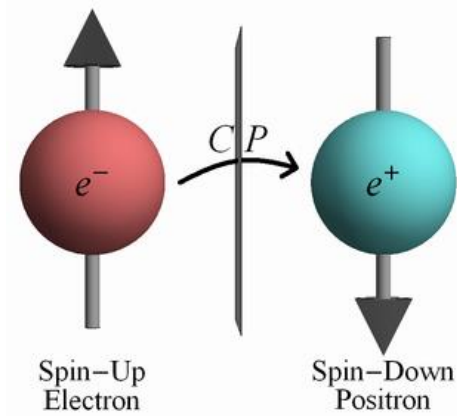
Mais aujourd'hui $\eta = n_B/n_\gamma \sim 10^{-9}$

Compatible avec toutes les observations:

- Du fond microonde (Planck)
- De la nucléosynthèse primordiale (He, D, Li..)
- Recensement de la masse (lentilles gravitationnelles)
- Supernovae, Chandelles standard



Brisure de symétrie?



En effet, la symétrie CP est brisée, de même que C

C conjugaison de charges (baryons \leftrightarrow antibaryons)

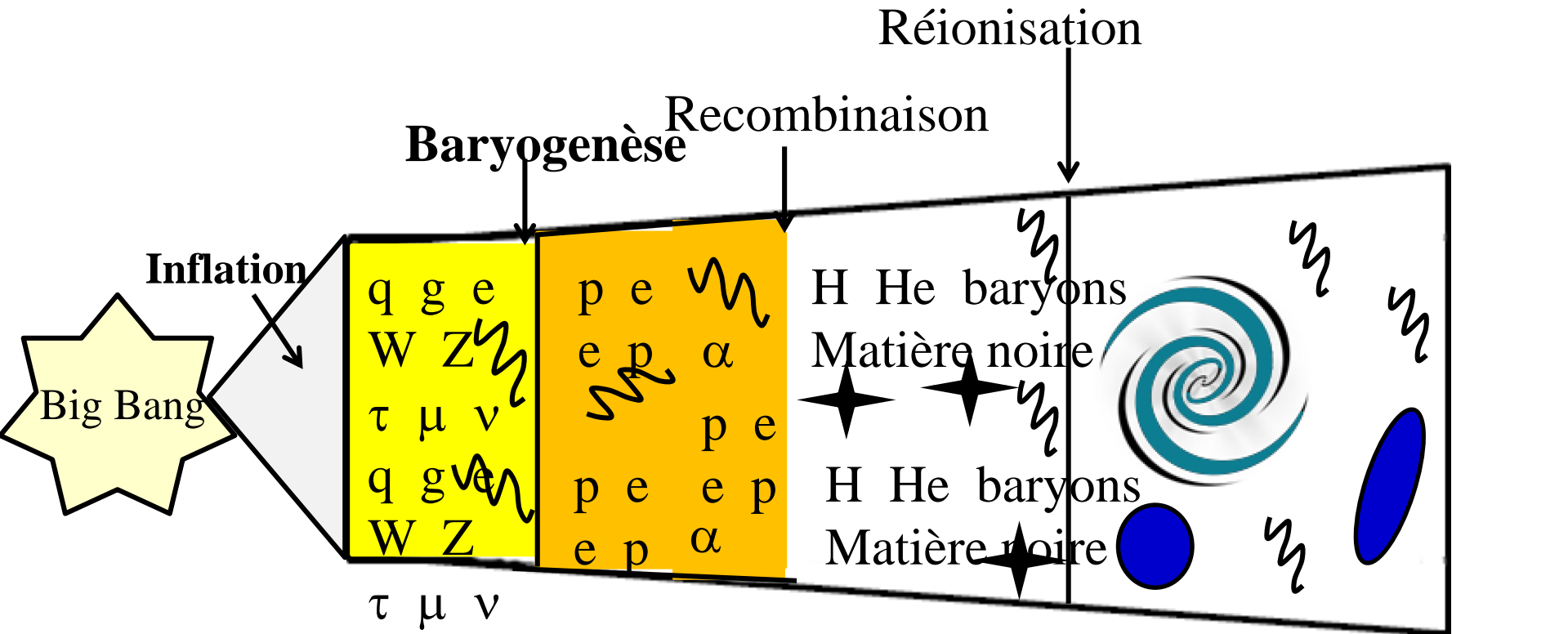
P parité, symétrie ($x \leftrightarrow -x$) (*violée par l'interaction faible*)

T renversement du temps **CPT** conservée

Mais dans les accélérateurs, aucune asymétrie baryons/antibaryons n'a été observée (**anti-hydrogène, CERN, Nature 2018, à 10^{-12} près**)

→ On conjecture que l'asymétrie est survenue avant, durant la baryogénèse, par exemple dans la période de réchauffement après l'inflation (10^{-36} s à 10^{-6} s)

→ Rien n'interdit de penser à des modèles symétriques de matière/antimatière



Temps t	10^{-37} s	10^{-5} s	$3 \cdot 10^5$ an	10^9 an	$14 \cdot 10^9$ an
Température T	10^{28}	10^{12}	3000	15	2,7 K
Décalage z	$3 \cdot 10^{27}$	$3 \cdot 10^{11}$	1000	5	0
Energie E	10^{15}	0,1	$3 \cdot 10^{-10}$	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-13}$ GeV

Univers symétrique Matière-Antimatière

Les modèles symétriques sont plus naturels!
1975-1980: modèle de **l'émulsion**
(Omnès 1972: séparation B-antiB)

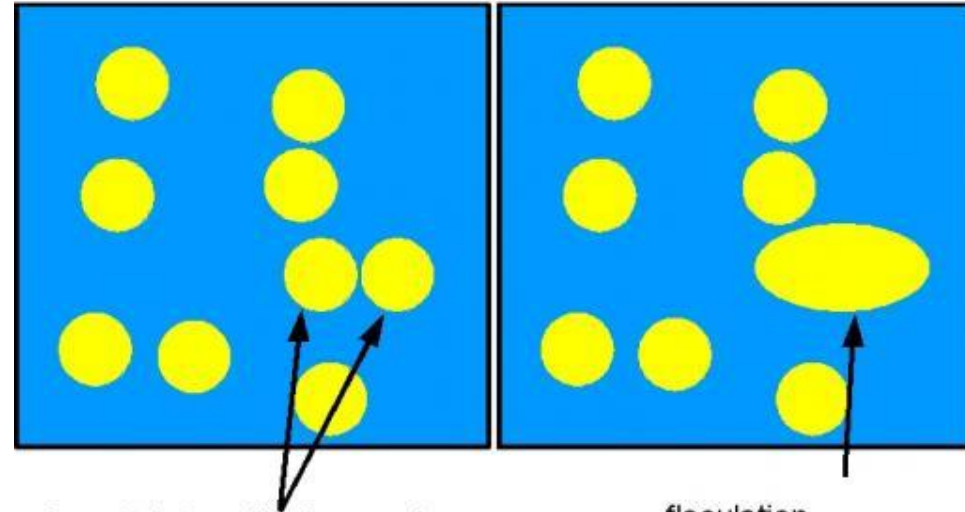
→ Problème à la frontière
trop de rayons γ

→ Problème de nucléosynthèse
primordiale
(Combes et al 1975)

Modèle repris aujourd'hui
(Baur et al 2015)

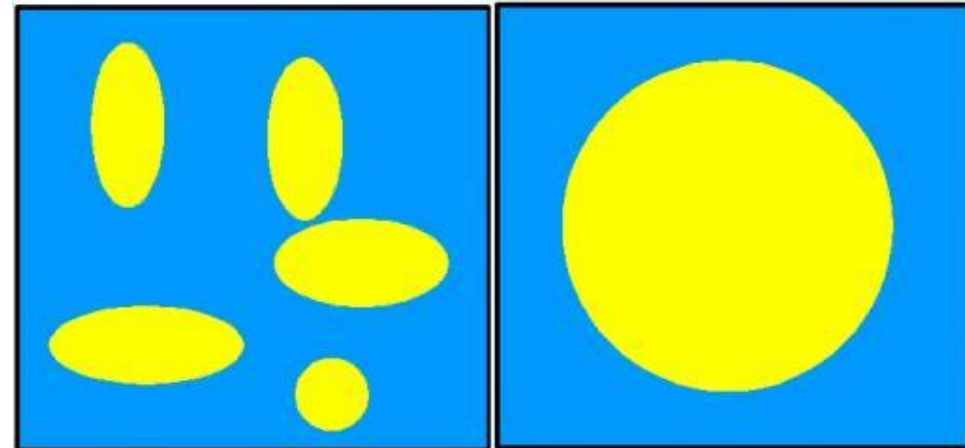
→ Problème d'anisotropies,
ondes acoustiques

Principe de floculation

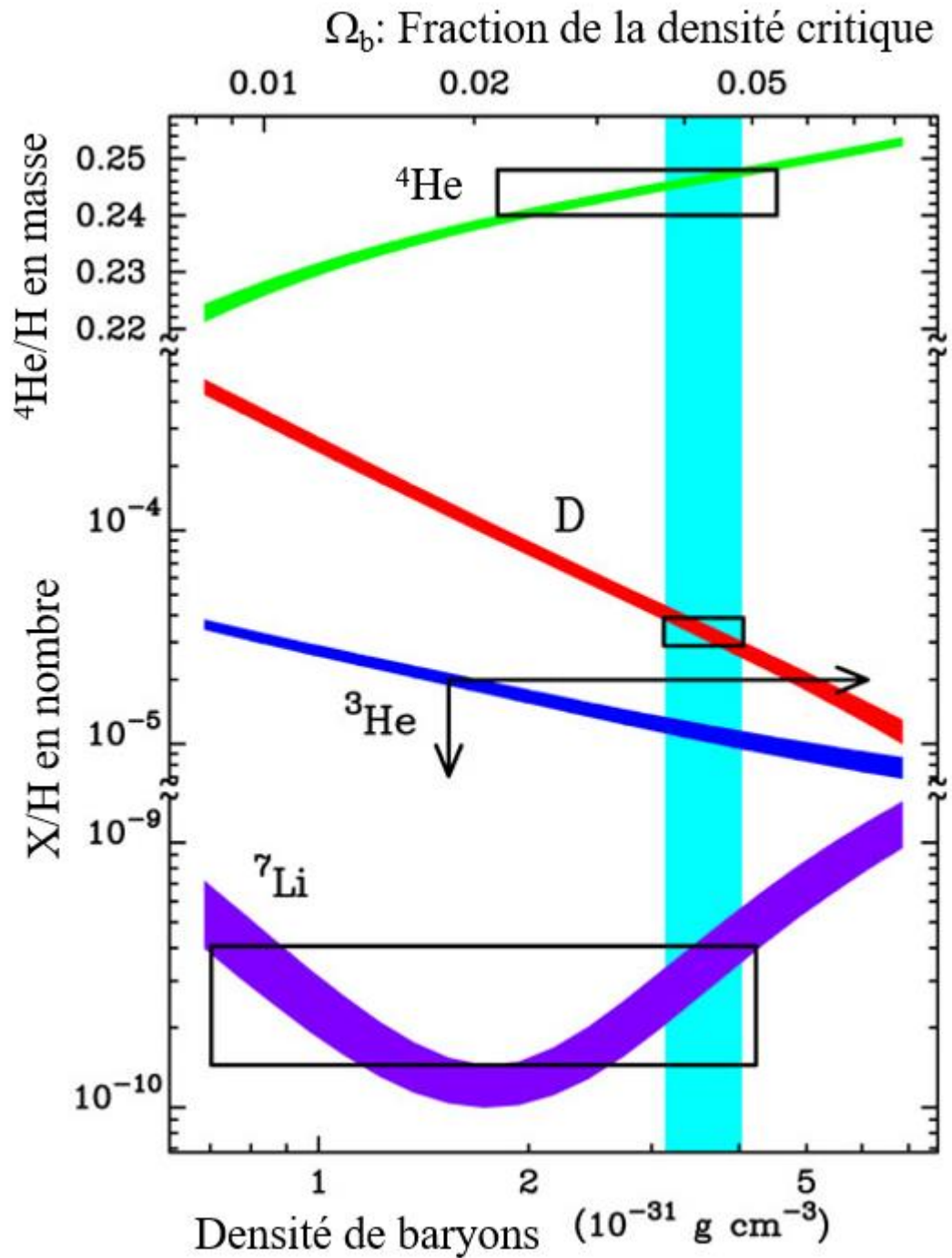


2 gouttelettes d'huiles proches

floculation



Regroupement des gouttelettes d'huiles, création d'une grosse goutte d'huile et le mélange devient alors hétérogène



La densité de baryons est contrainte par l'abondance des éléments légers, He, D, Li..

→ Ne marche plus avec des modèles symétriques (Combes et al 1975)

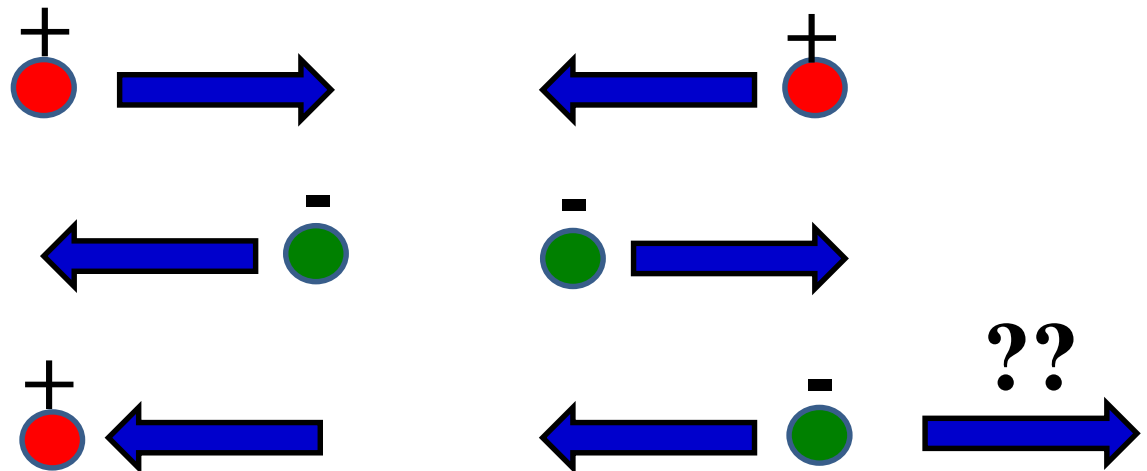
Antimatière : masse négative?

Certains font renaître les univers symétriques, en supposant une masse négative à l'antimatière (espace ouvert, $\Omega_m = \Omega_\Lambda = 0$, $a(t) \sim t$)

Mais alors le **principe d'équivalence** n'est plus vérifié

→ Gros problème avec la relativité générale

Matière et antimatière se repousseraient (Bondi 1957)



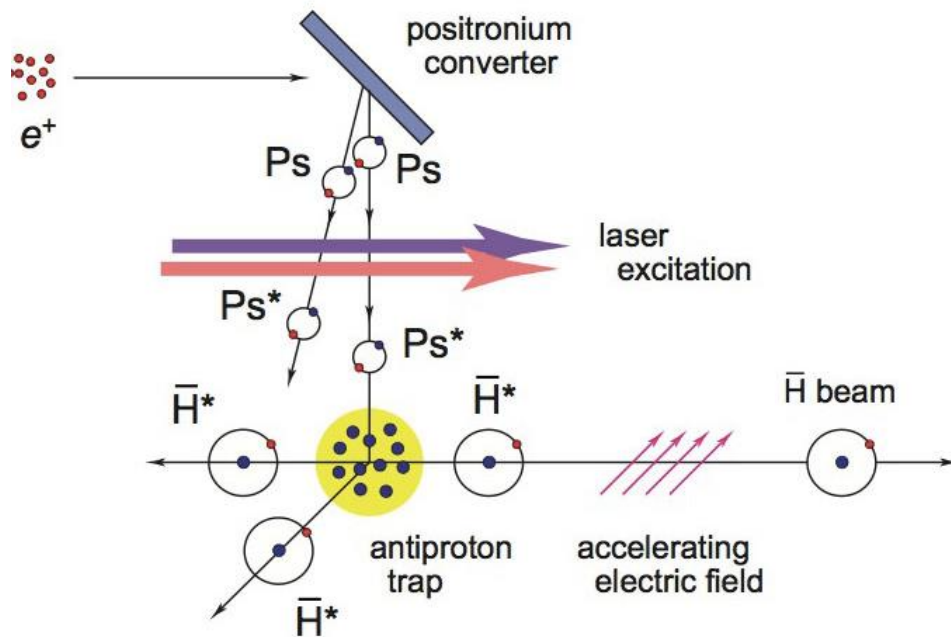
Action = réaction
Ppe Equivalence
 $m_i < 0$

Expérience AEGIS et GBAR

AEGIS: Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy

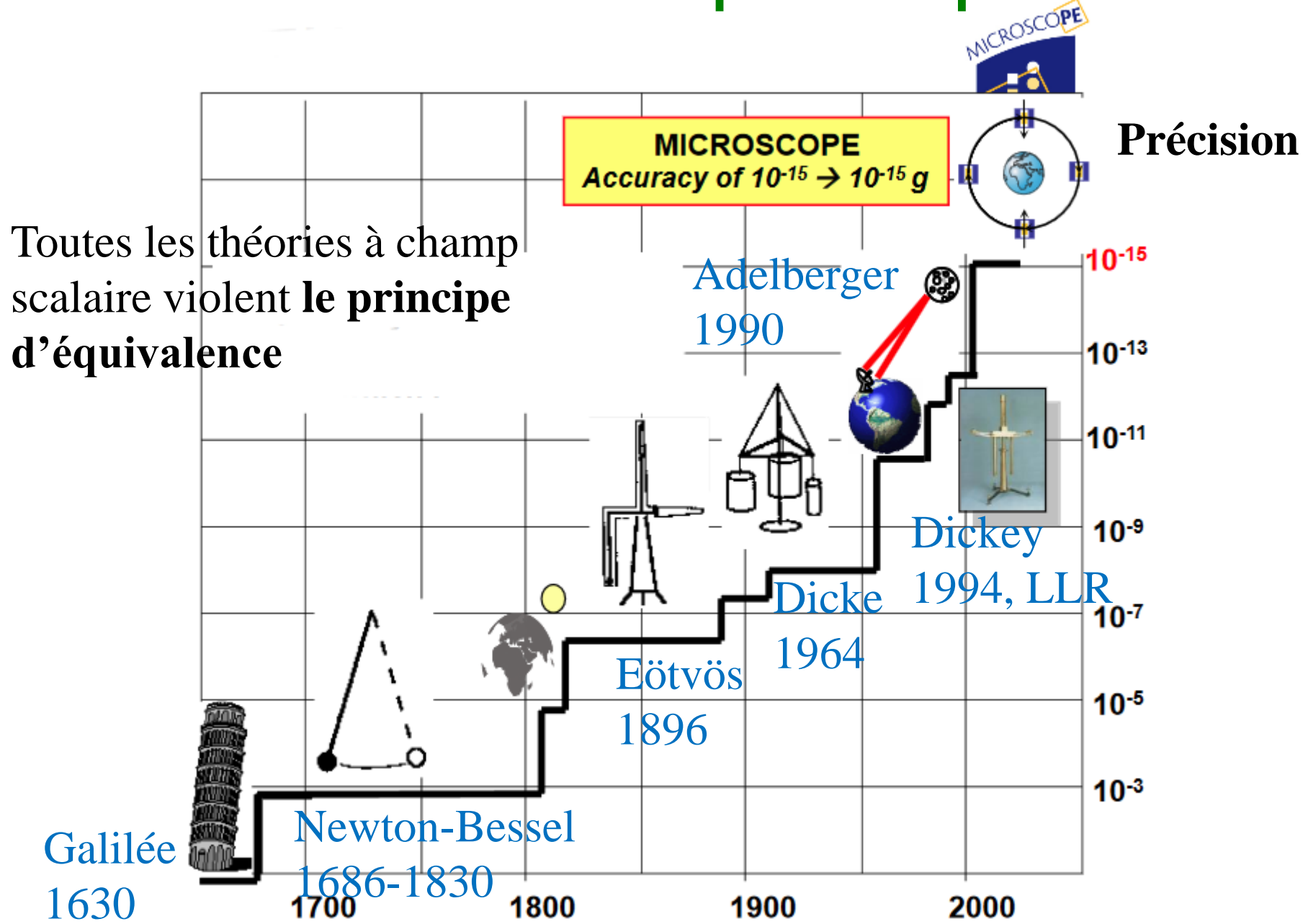
GBAR: Gravitational Behaviour of Anti hydrogen at Rest

Fabriquer des atomes d'anti-hydrogène (neutres), et les ralentir pour pouvoir mesurer leur comportement dans un champ de gravité



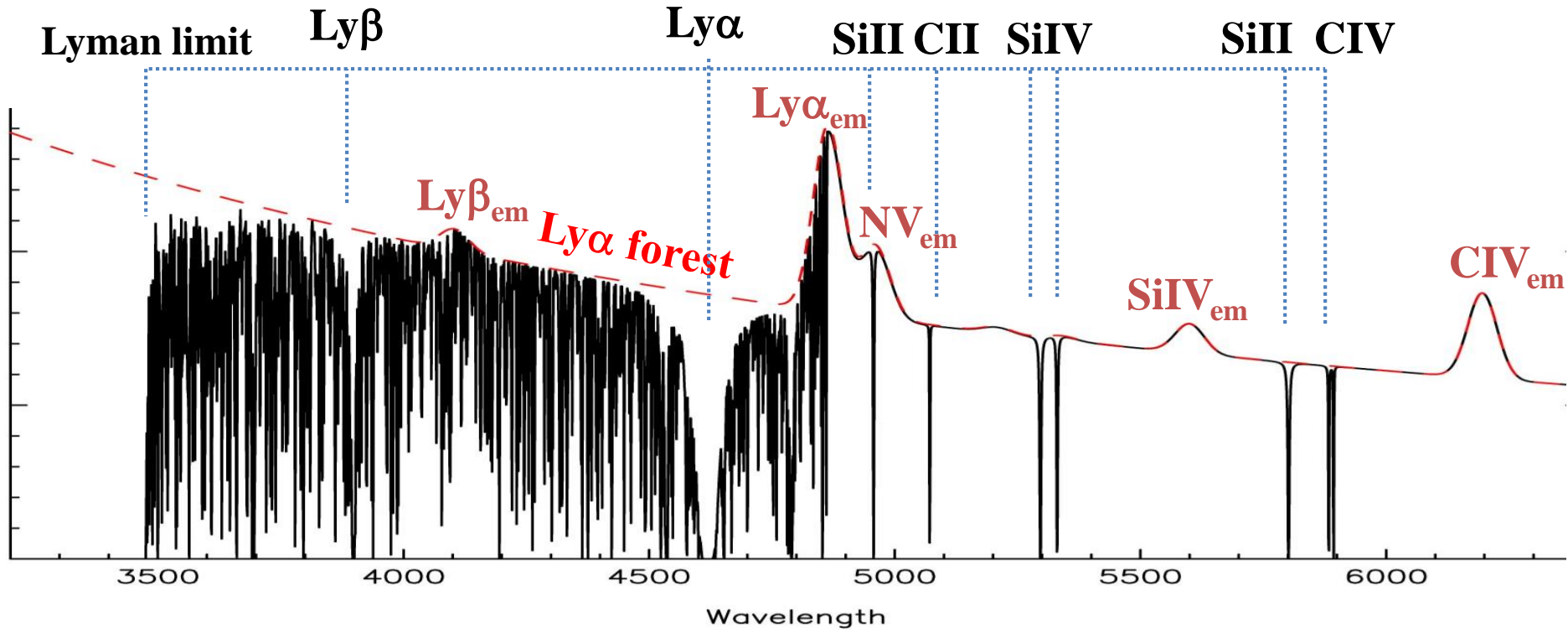
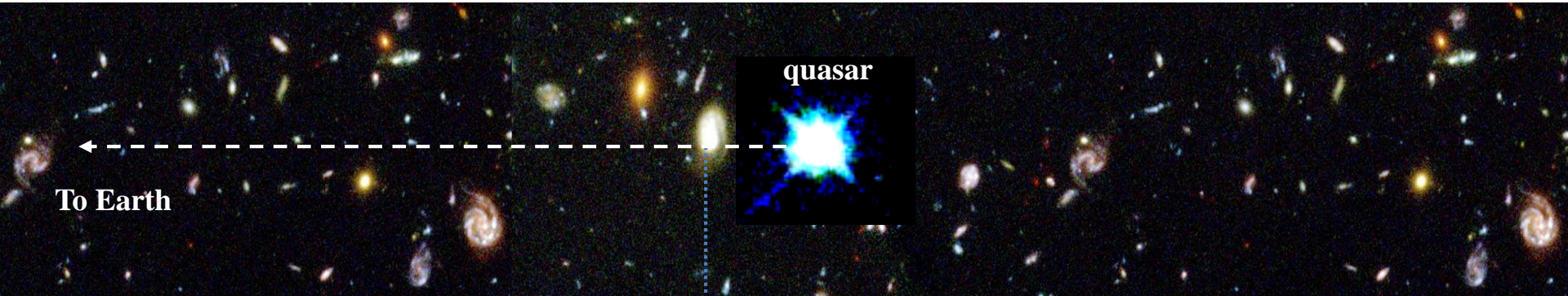
Accroissement historique de la précision

Toutes les théories à champ scalaire violent le **principe d'équivalence**

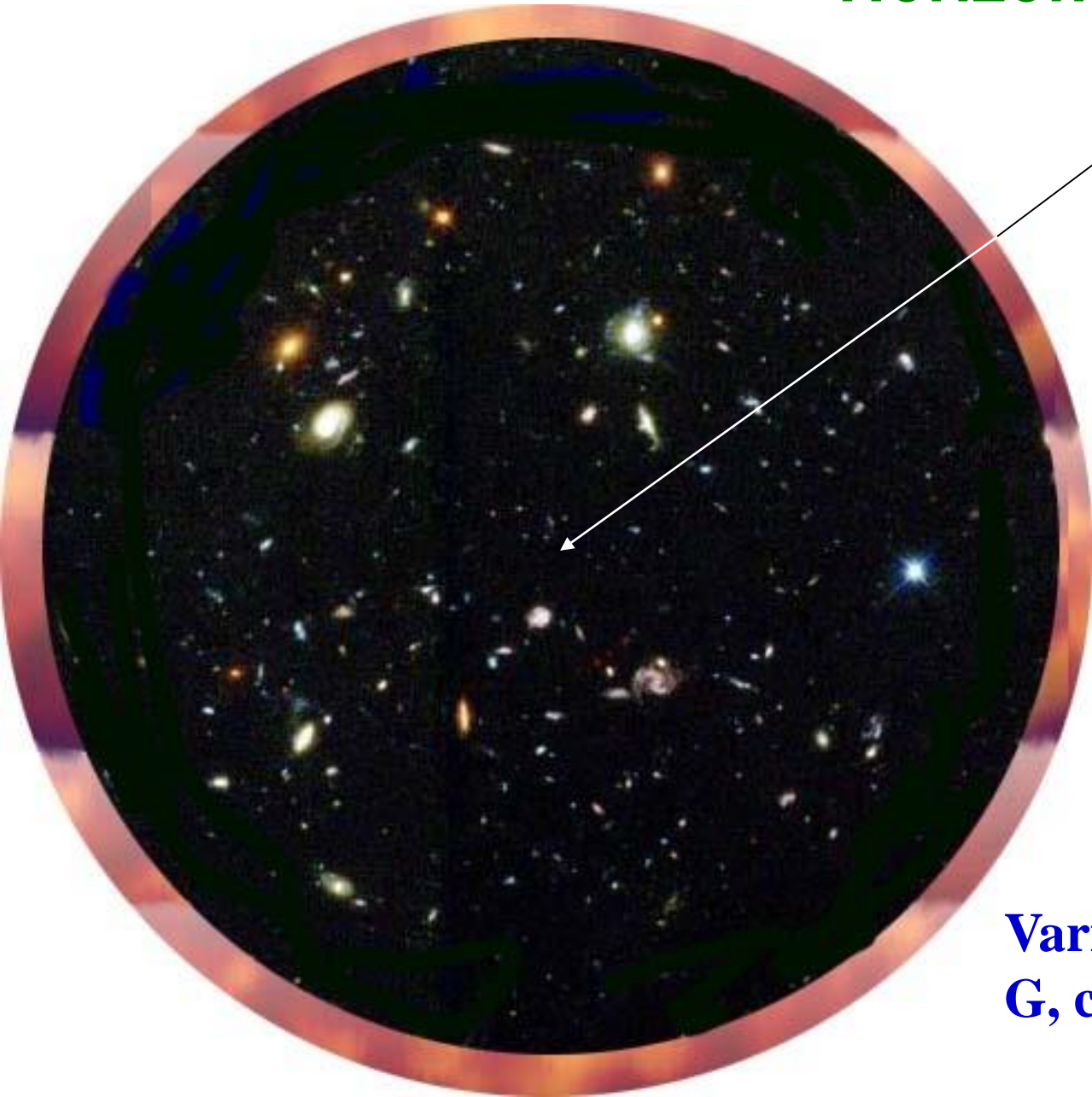


Variation des constantes fondamentales (G,c,h..)

Les quasars: laboratoires de l'Univers



Horizon de l'Univers

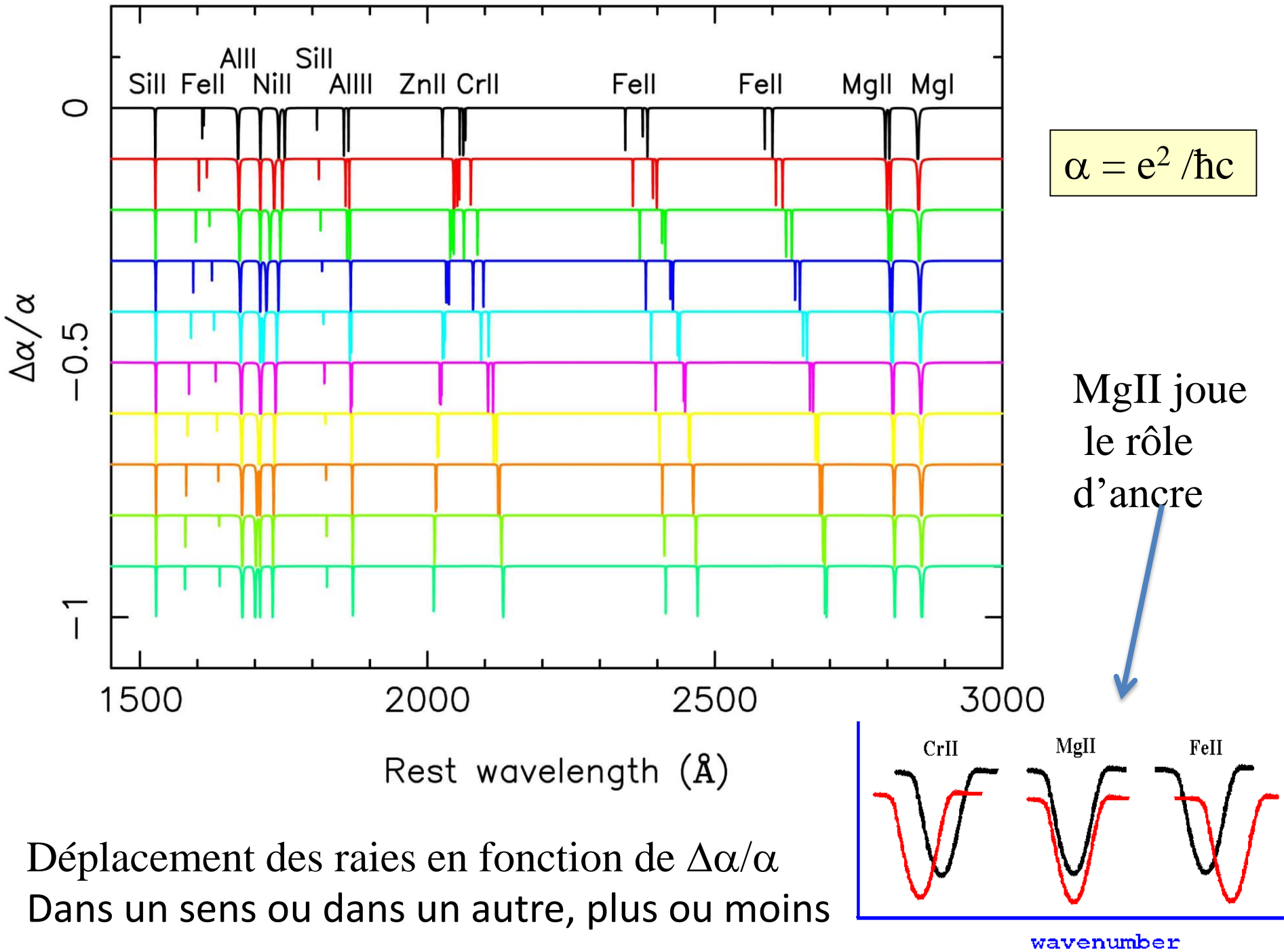


Vous êtes ICI
au centre de
l'Univers visible

Regarder loin
revient à remonter
dans le temps

Jusqu'au Big-Bang
il y a 13.7 milliards
d'années

Variation des constantes?
 G , c , h , m_e , m_p , e



Déplacement des raies en fonction de $\Delta\alpha/\alpha$
 Dans un sens ou dans un autre, plus ou moins

Absorption en radio-astronomie

Variations de $y = \alpha^2 g_p m_e / m_p$

HI 21cm rapport hyperfin $\sim \mu_p \mu_B / h a^3$ $a = \text{rayon de Bohr} = \hbar^2 / m e^2$

Raies de rotation CO $\sim h / (M a^2)$

→ variations de $\alpha^2 g_p$

Quasars PKS1413+135, raies très fines

B0218+357 PKS1830 -211

lentilles gravitationnelles

Avantages: tech. hétérodynes R de 10^6

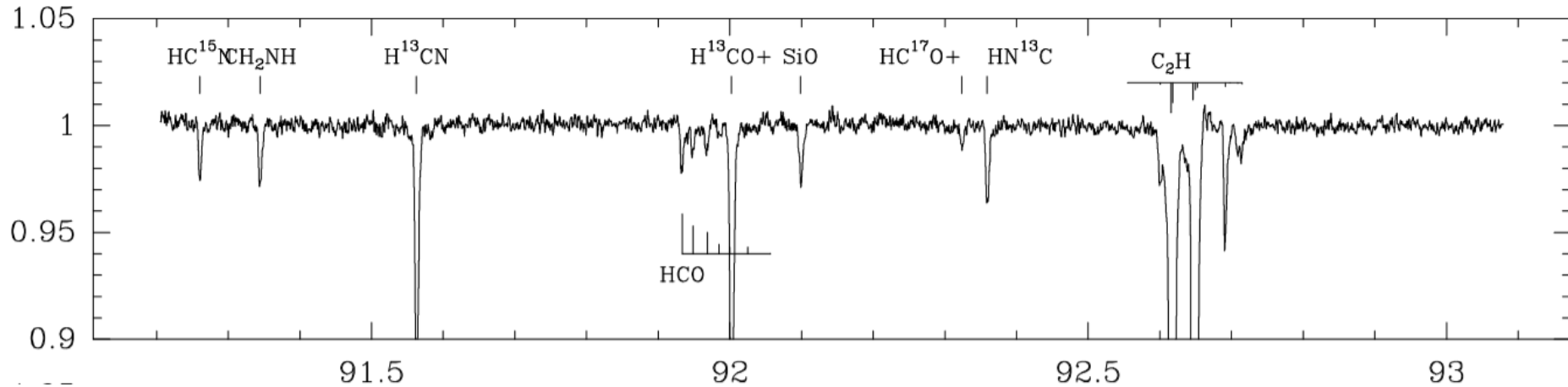
+Raies plus fines, car gaz froid



Lentilles gravitationnelles

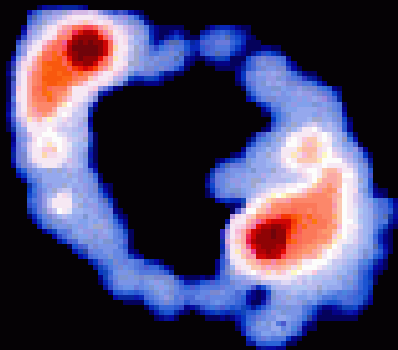


PKS1830-211 z=0.88582



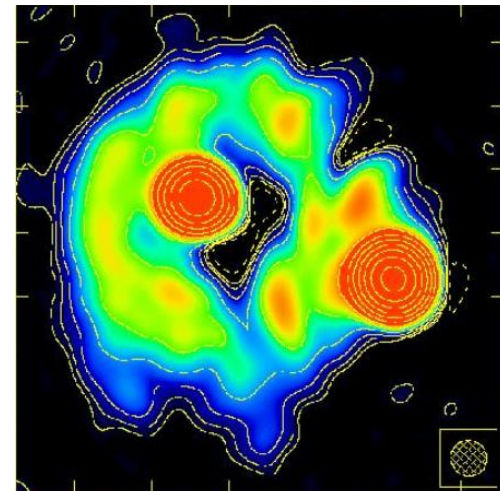
2 images, + anneau d'Einstein

PKS1830



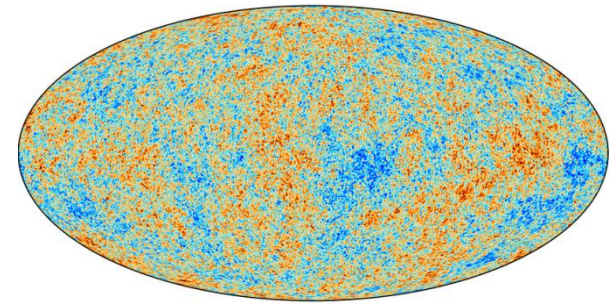
Contraintes sur la variation
des constantes
avec CH et H₂O

$$\rightarrow \Delta\alpha/\alpha < 5.8 \times 10^{-7}$$
$$\text{ou } \Delta\mu/\mu < 1.2 \times 10^{-6}$$



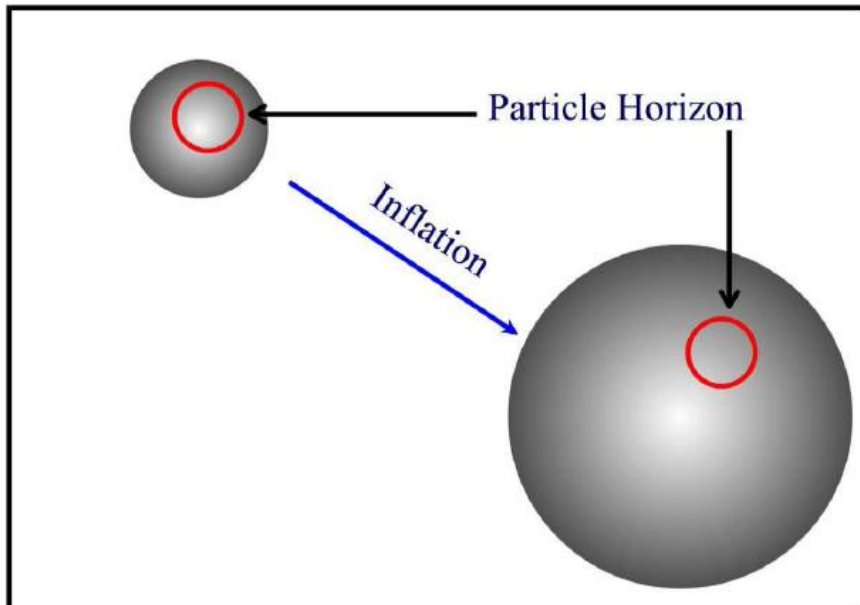
B0218+357 z=0.68

Théorie de l'inflation: Problème de l'horizon



- L'horizon à l'époque du CMB était $< 2^\circ$
- Pourquoi T_{CMB} est la même à 10^{-5} près partout?
(régions non causalement reliées)

Homogénéité

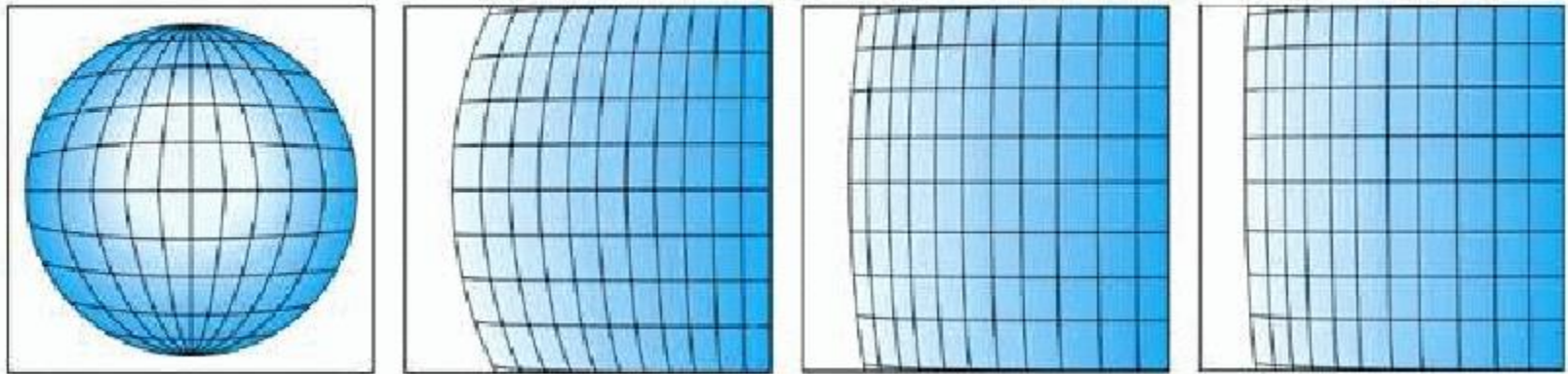


Référentiel au repos

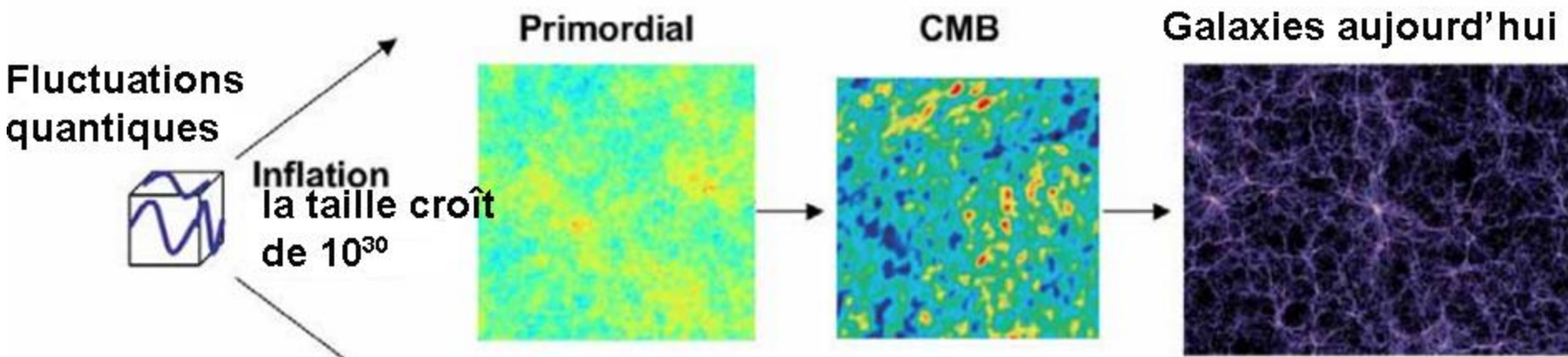
L'observateur accompagne
l'inflation de l'espace
L'horizon est constant

Tailles croissent de 10^{30}
en 10^{-32} s

L'inflation résoud le problème de la platitude



Inflation, source des fluctuations à $t < 10^{-32}$ s

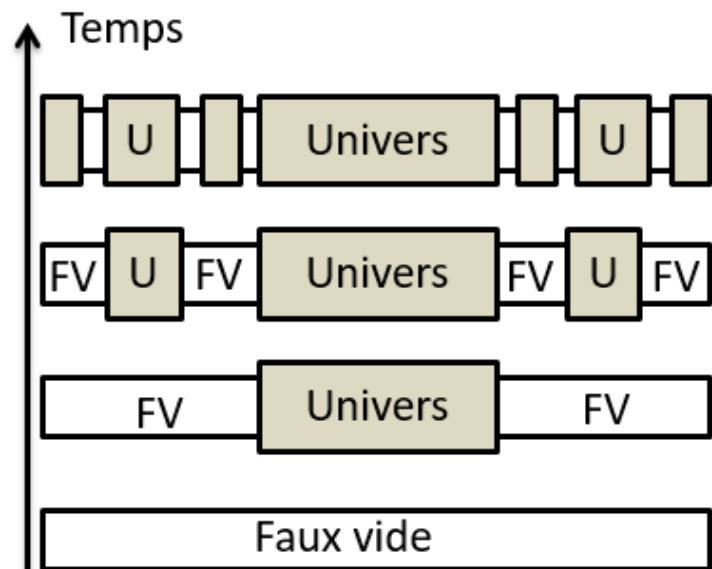


Inflation chaotique ou éternelle

Il est difficile d'arrêter l'inflation partout. On peut l'arrêter dans une bulle en particulier, avoir un ré-chauffement, et la création de particules dans un univers, mais l'espace continue son expansion ailleurs

Chaque partie de l'Univers évolue indépendamment, selon les valeurs initiales des paramètres quantiques

L'inflation s'auto-entretient, d'une façon chaotique, et indéfinie
Il n'y a plus de début ni de fin → inflation éternelle (Linde 1986)

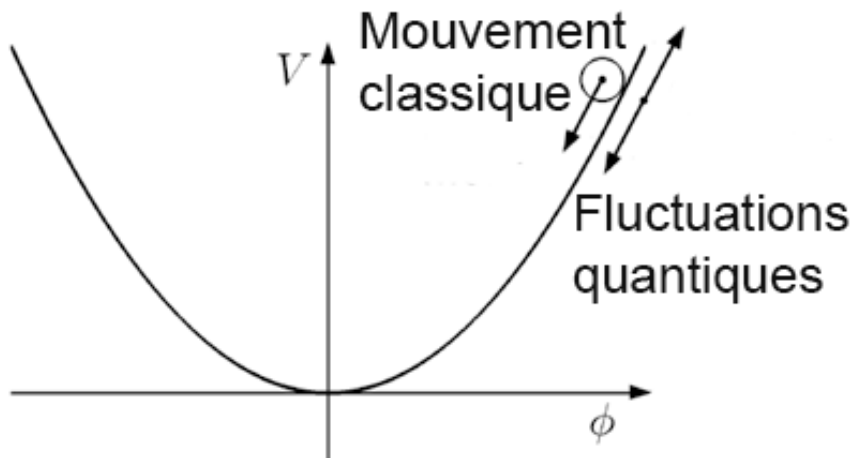


Inévitable!



Guth 2007

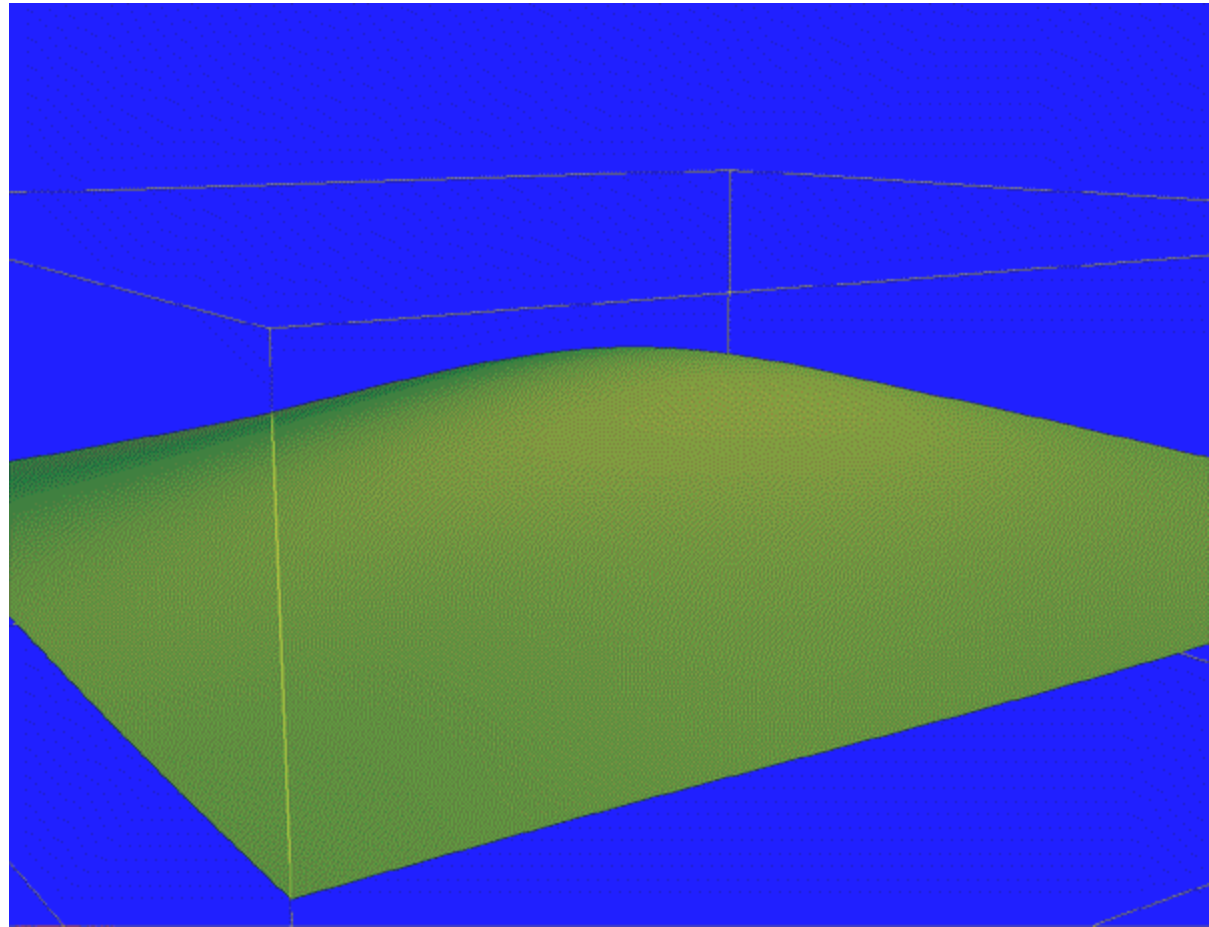
Evolution du champ de l'inflaton



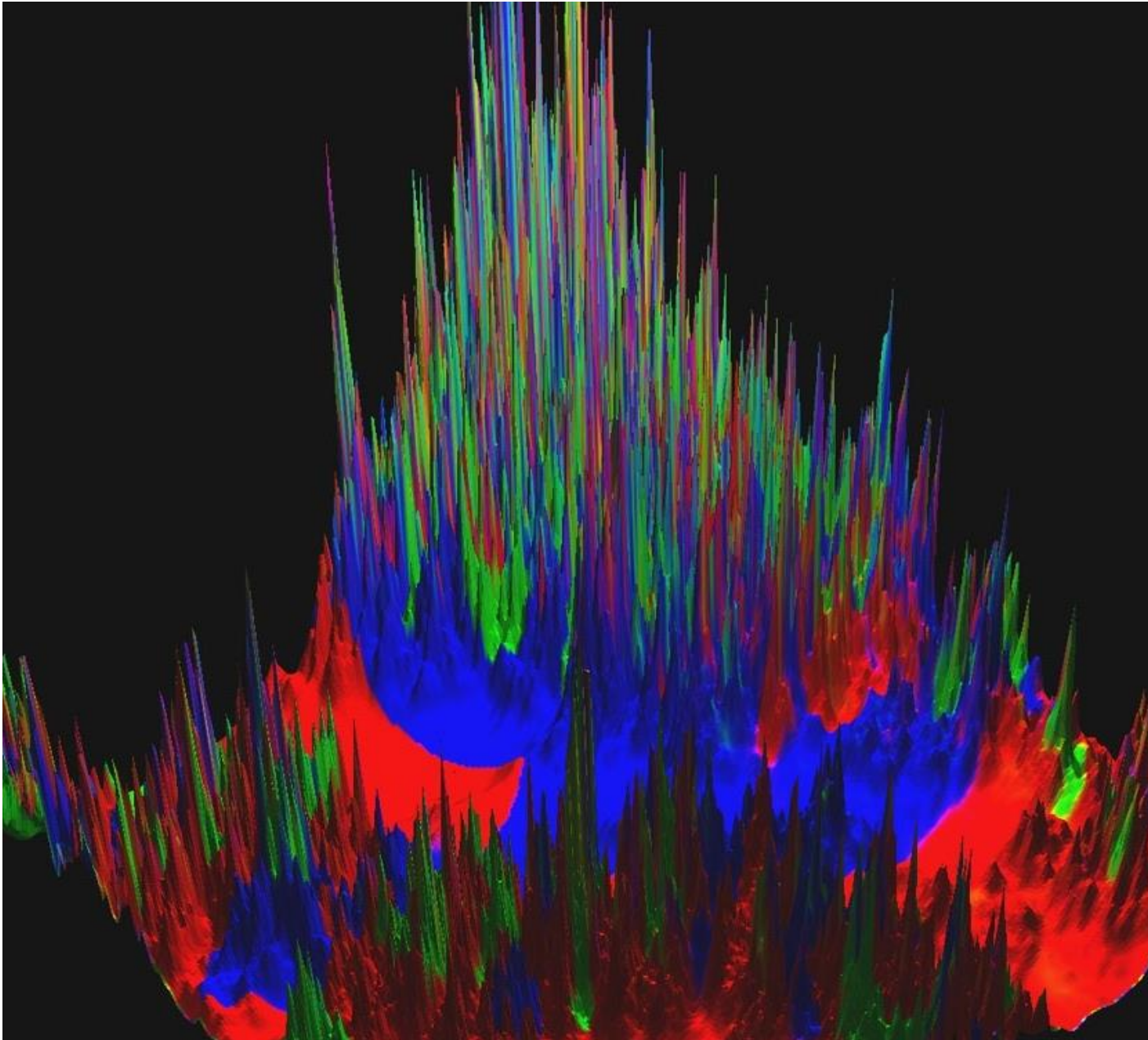
A cause des fluctuations quantiques, la probabilité de revenir à de grandes valeurs de ϕ n'est pas nulle

Ces régions produisent une forte inflation et occupent une grande partie du volume

Film A. Linde



Structure fractale de l'inflation éternelle



Linde
Vanchurin
Vilenkin
Winitzki

2000-07

simulations

Fluctuations d'origine quantique

Mécanique quantique (MQ): particules virtuelles dans le vide

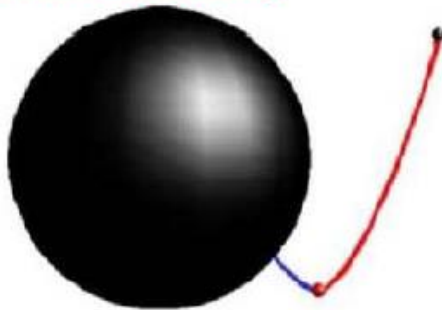
Dans l'inflation, des régions connectées causalement, se trouvent soudain déconnectées: **les particules ne peuvent plus s'annihiler**

Inflation + MQ = Fluctuations

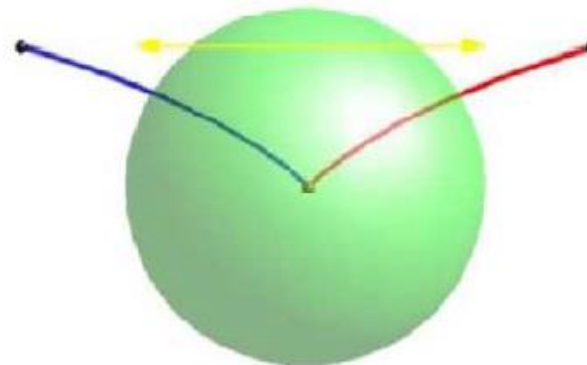
Paire **particule/antiparticule**



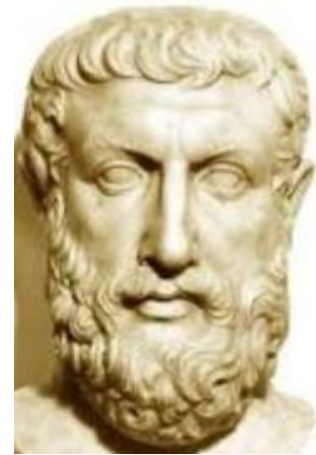
Trou noir :
Rayonnement Hawking



Inflation: **expansion**



Conservation de l'énergie?



On ne crée rien à partir de rien! *nihil fit ex nihilo*

Parmenides (philosophe grec, ~500 av J-C),

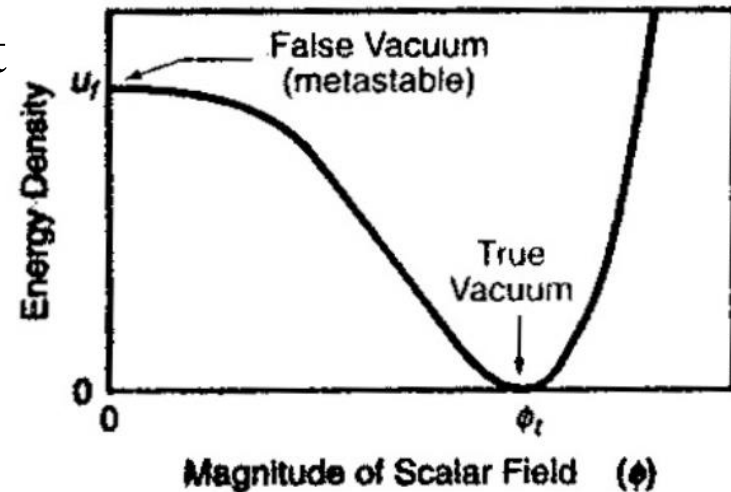
Lucrèce (Rome ~100 av. J-C), de Rerum Natura

Champ scalaire (de GUT) a la propriété d'être à l'équilibre dans un faux vide, dont $E \neq 0$

Puis le champ pourra descendre lentement vers le vrai vide $E=0$

Pression négative du faux vide $P=-\rho c^2$

Agit comme de la gravité négative

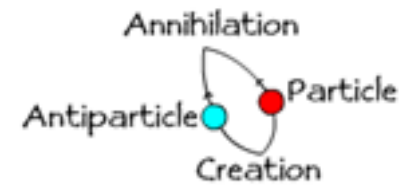


L'univers au début possède une énergie

gravitationnelle très négative, qui compense exactement. L'énergie

de toute la matière qui est créée est prise sur l'énergie gravitationnelle

Energie du vide



- L'énergie du vide doit être constante, ne dépend de rien
- Il faut fournir de l'énergie pour tirer le piston, car plus d'énergie après
- Si le piston fournit de l'énergie, → pression négative

$$P = -\rho c^2$$

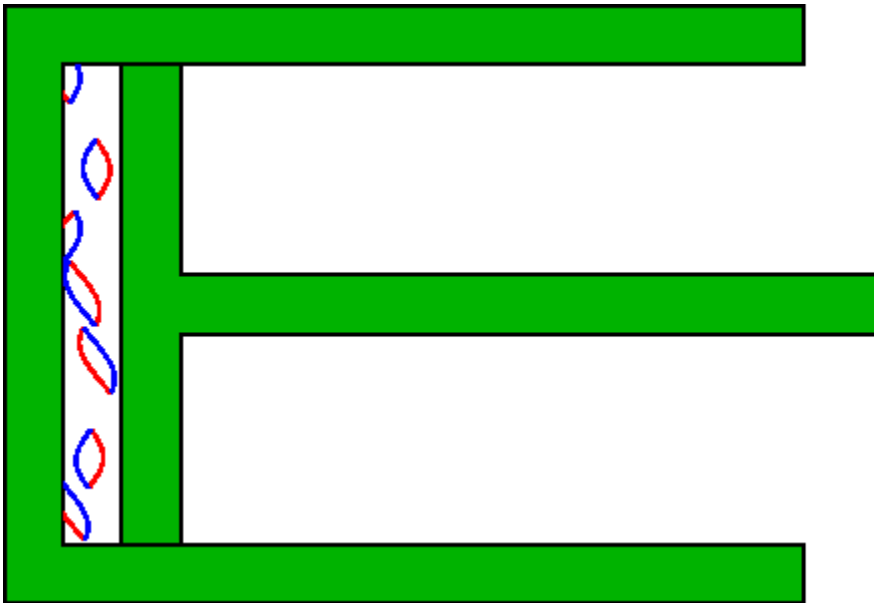
La « gravité » du vide
est négative

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\frac{\rho + 3P}{c^2} \right)$$

Pour un gaz, $N \sim 1/V$

ρ diminue

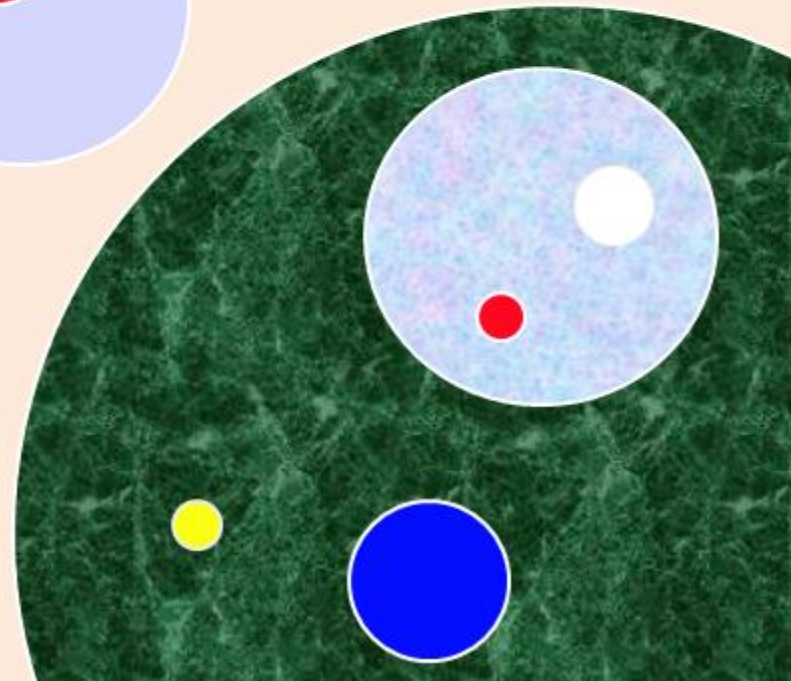
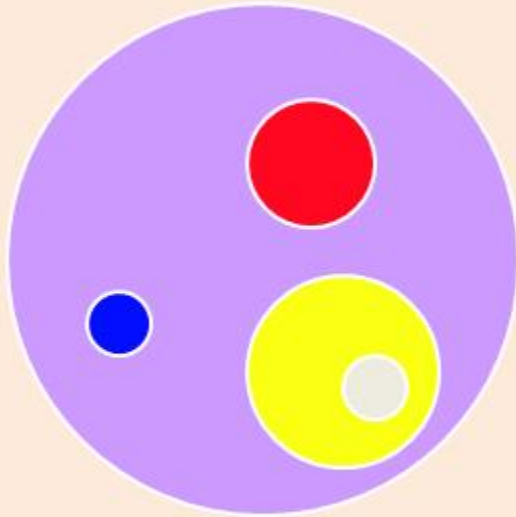
La pression pousse le piston



De multiples Univers, avec des Λ différentes



$$\Lambda > 0$$



Problèmes de l'inflation?

Dans notre passé, nous ne verrons jamais qu'une seule inflation.

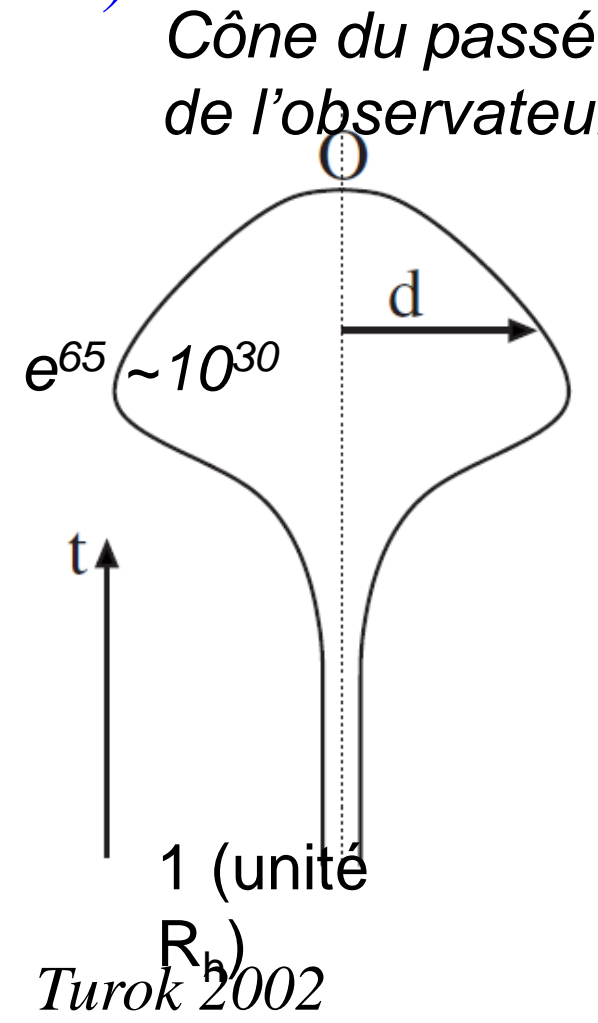
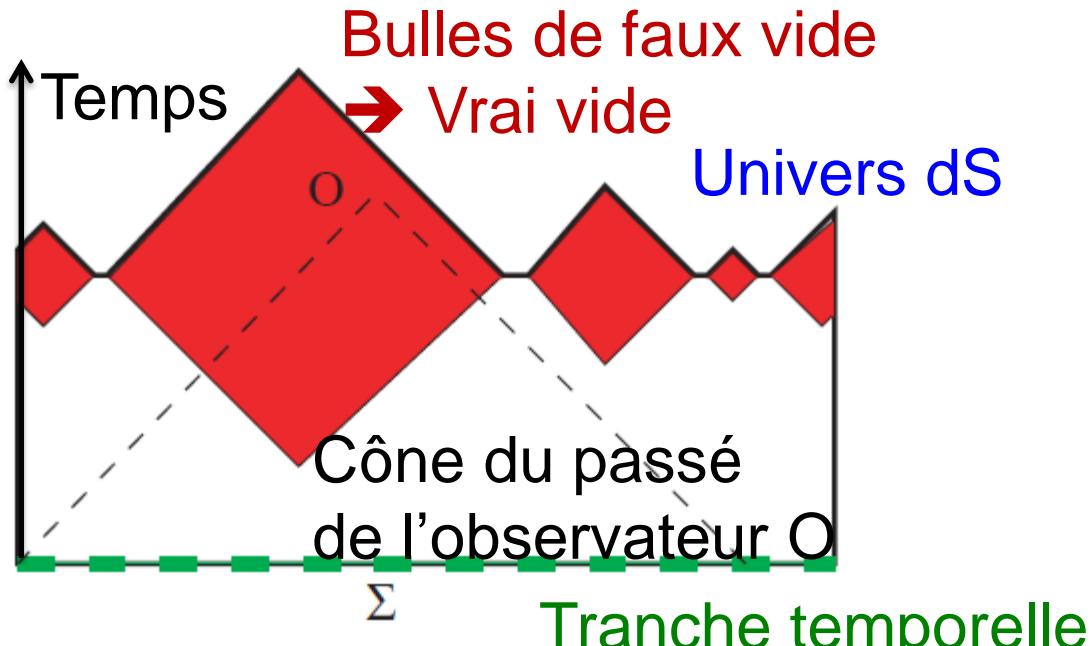
Le concept d'inflation éternelle est philosophique

(le principe de causalité n'est pas remis en question)

Reste un problème de singularité initiale

Quelle est l'énergie de départ?

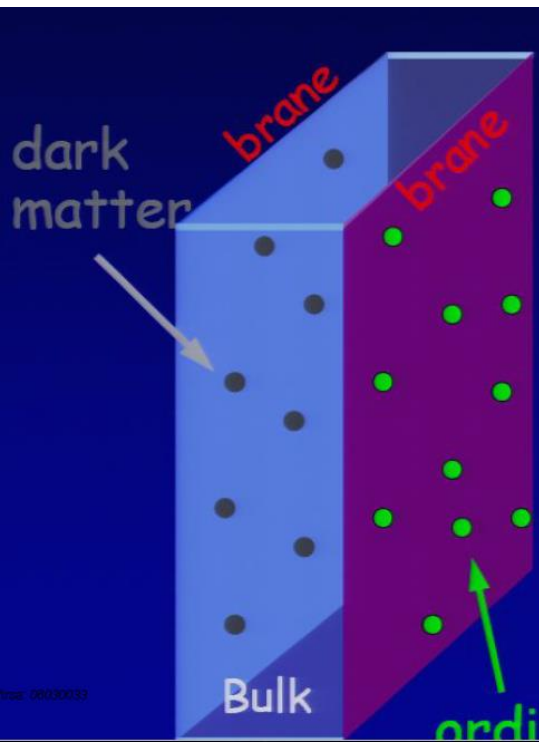
$$\Lambda_i \sim 10^{120} \Lambda_o$$



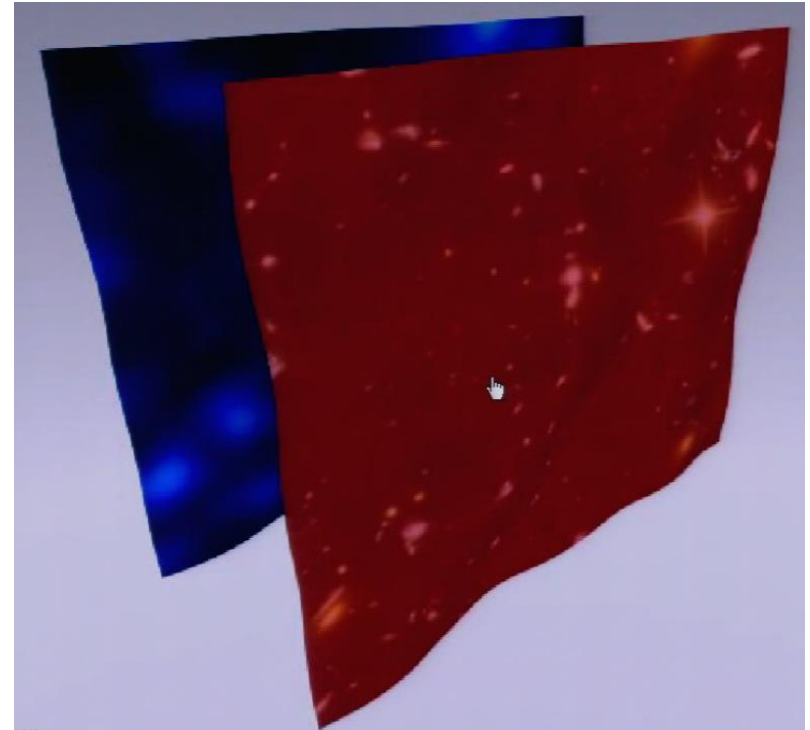
Alternatives: modèles cycliques

Modèle ekpyrotique, à partir de branes en collision
Cyclique, avec rebond (Turok & Steinhardt 2005)

Le modèle cyclique a tout de même besoin de Λ



Théorie des
cordes
10, 11 ou
26 dimensions



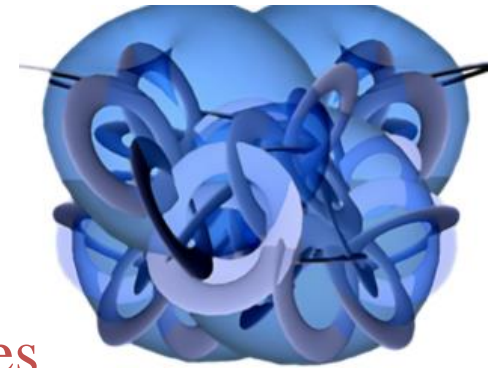
Gravité se propage en dehors de la 3-brane

Deux types de modèles d'inflation

Cordes fermées Les modèles les plus simples: l'inflaton est le **module** de la corde

Utilisent les champs scalaires déjà présents dans les modèles de compactification, avec leur grand nombre de minima

Un paysage avec 10^{100} à 10^{1000} minima



Branes (reliées par des cordes ouvertes)

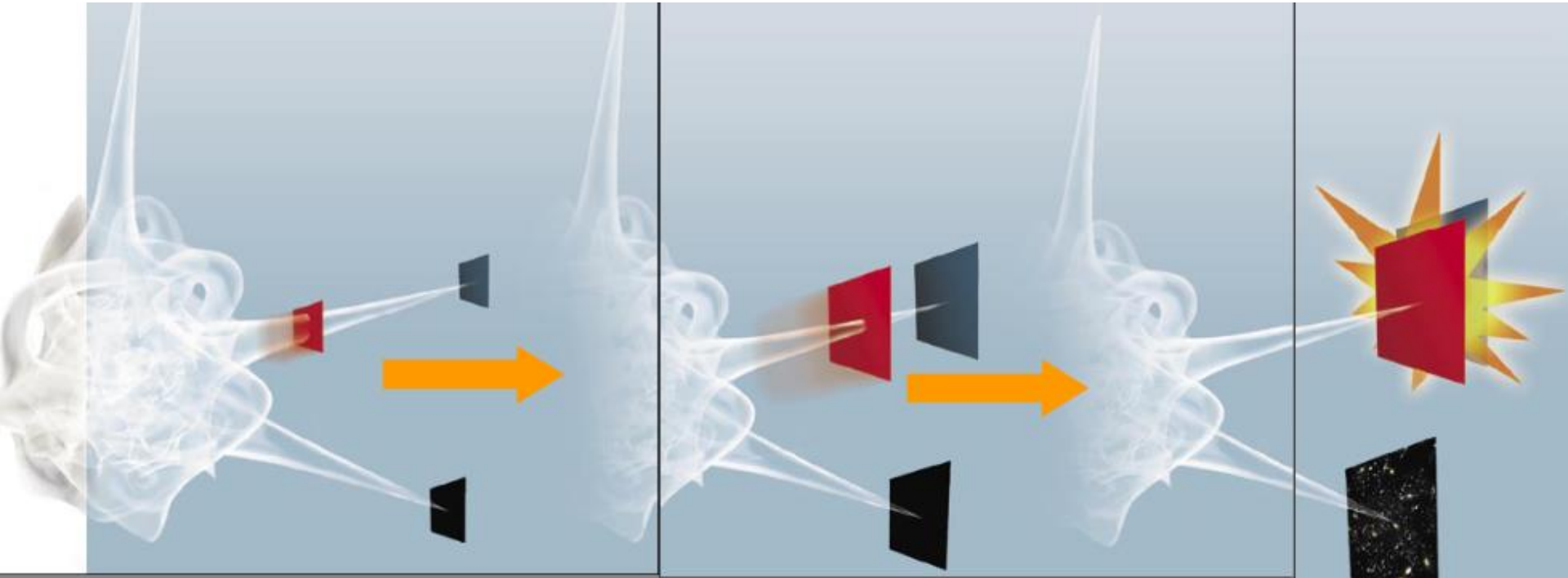
Le champ d'inflaton correspond à la **distance** entre des branes de l'espace de Calabi-Yau

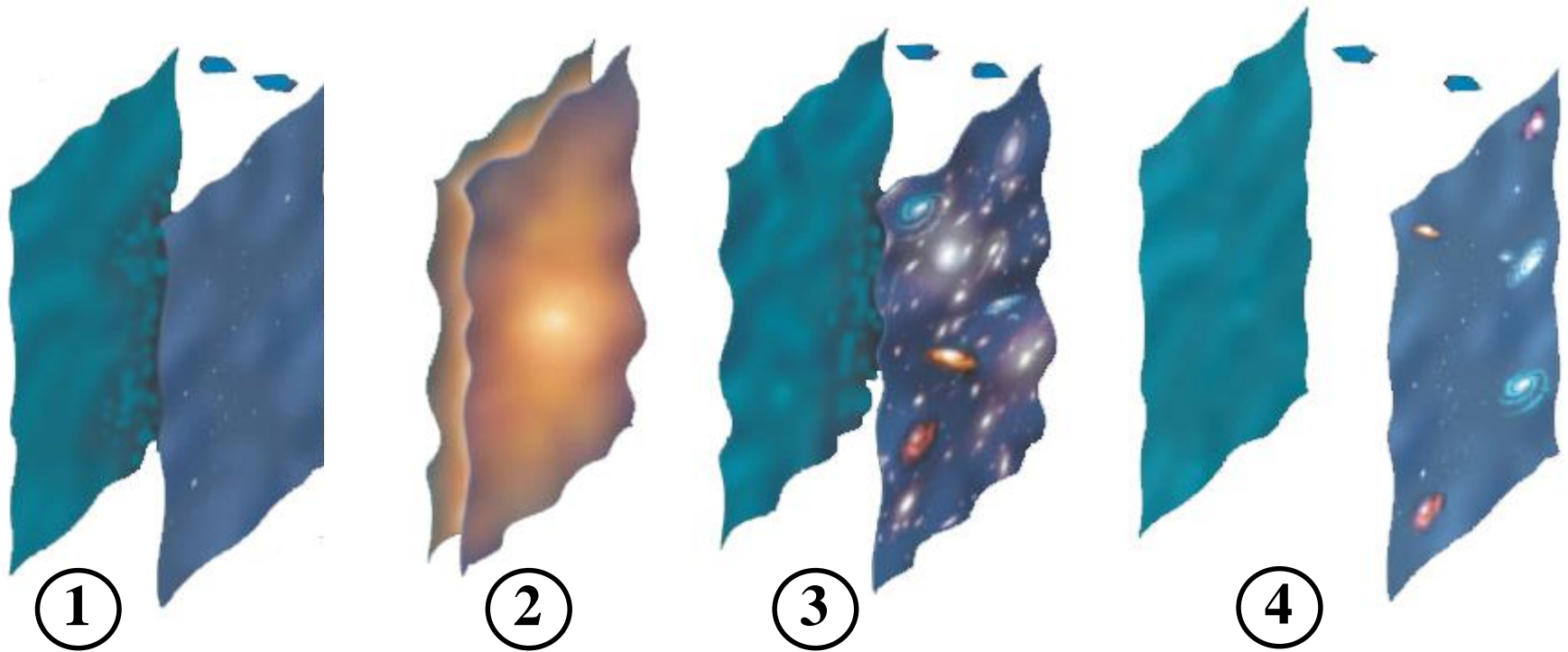
Ce genre de modèle était historiquement le premier proposé dans la théorie des cordes



Inflation Brane-Antibrane

Lors de l'inflation des branes, deux peuvent entrer en collision





Théorie cyclique de l'Univers ekpyrotique

- (1) 2 branes se dirigent l'une vers l'autre (espace en contraction)
- (2) elles collisionnent: énergie cinétique → matière et rayonnement
- (3) le rebond : l'espace en expansion décélérée
- (4) L'attraction entre les branes les ralentit
→ Mouvement inverse → (1)

Comparaison: inflation/ cyclique

1. Big-Bang



2. Inflation



3. Rayonnement

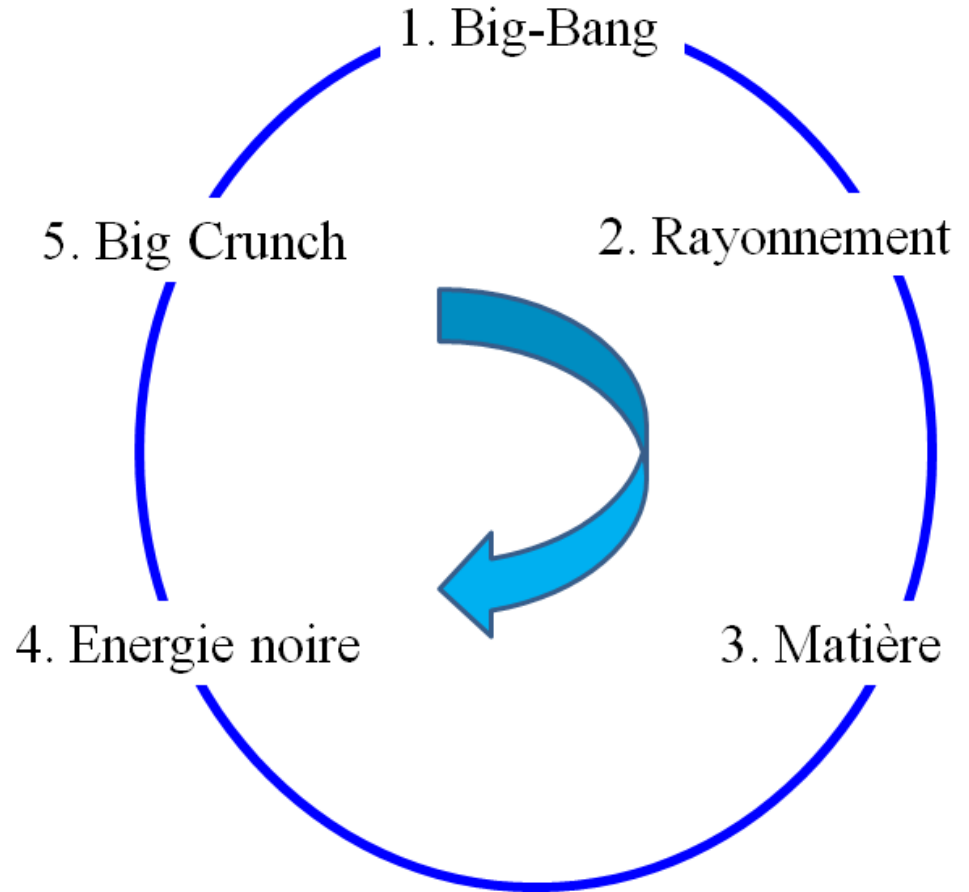


4. Matière



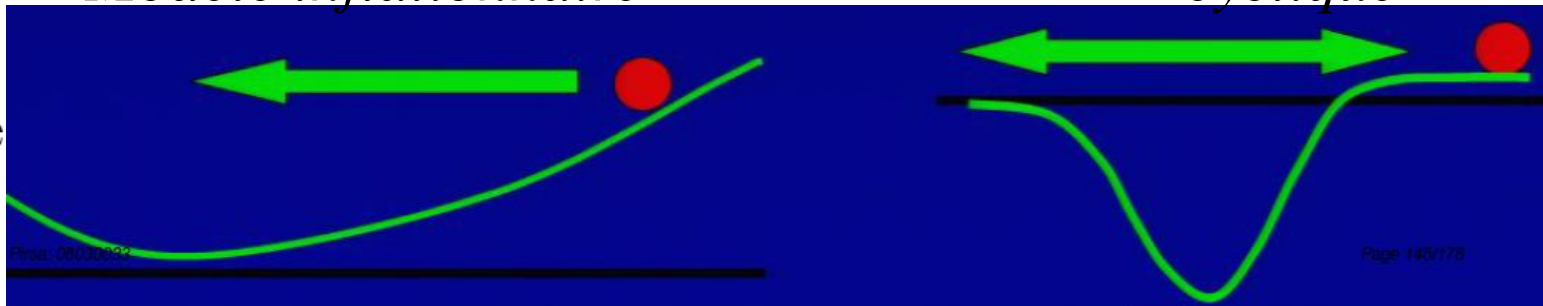
5. Energie noire

$Radiation \sim 1/R^4$
 $Matière \sim 1/R^3$
 $Courbure \sim 1/R^2$
 \rightarrow *inflation*
 $Vide = cste = \Lambda$



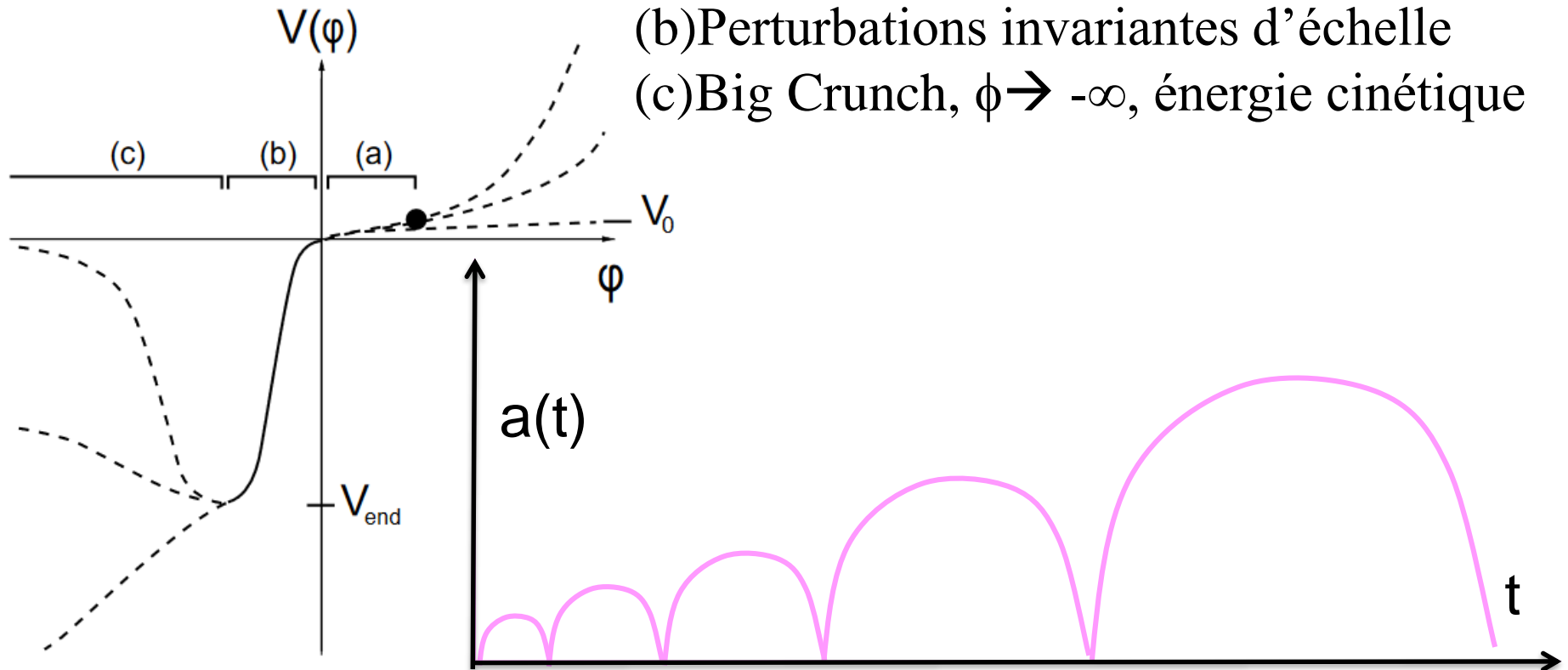
Modèle inflationnaire

cyclique

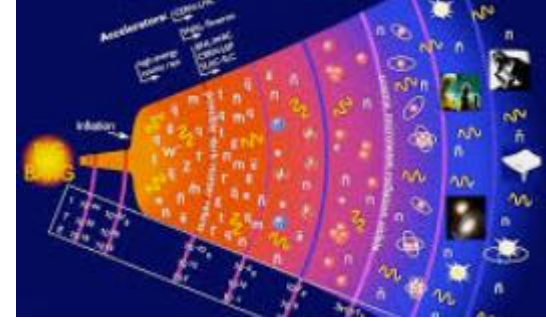


Test des ondes gravitationnelles

L'inflation prédit des ondes gravitationnelles primordiales
Leur mesure pourrait donner accès au potentiel $V(\phi)$
et éliminer les autres modèles cycliques



Conclusion



L'inflation **privilegiée** par les observations

-- résout les problèmes de platitude, d'horizon, d'homogénéité

-- fournit des fluctuations quantiques initiales, capables de développer les structures, avec le spectre observé

Problèmes: inflation éternelle, multiples univers

Ajustement fin, non-prédictibilité

Observations: inflations à un seul champ favorisées par **Planck**

forme: plutôt un plateau, qu'une loi de puissance

du moins dans la dernière phase

→ En attente: futures observations des ondes gravitationnelles Primordiales, preuves de l'inflation