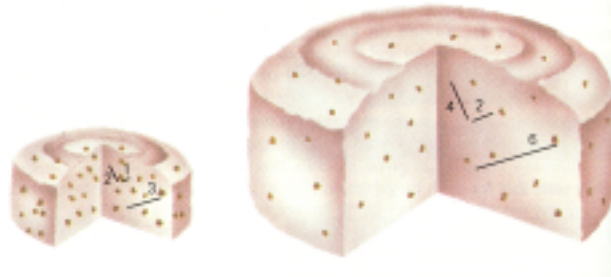
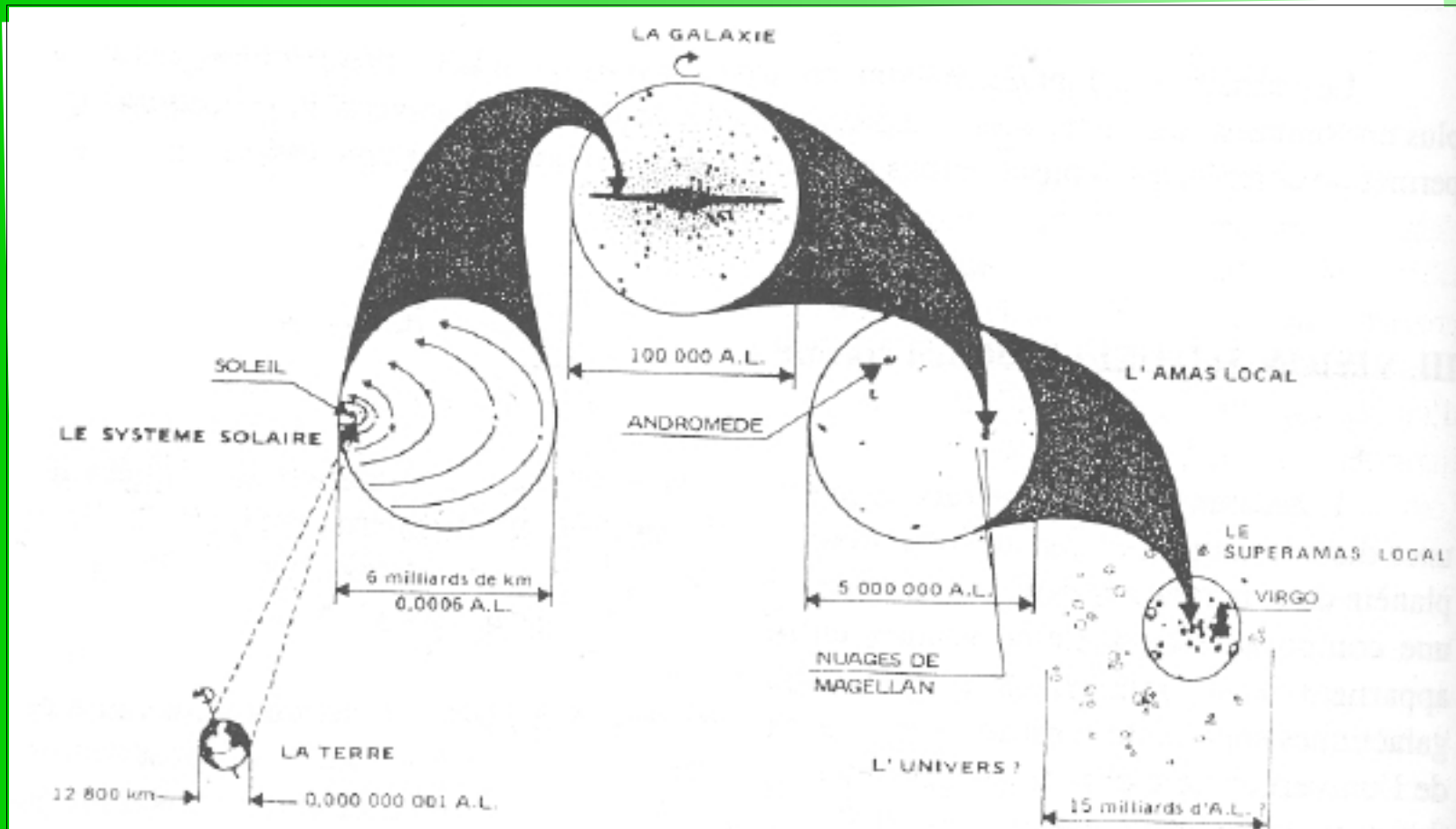


# **Les grands problèmes de l'astrophysique contemporaine**

**A. Jorissen**

**Institut d'Astronomie et d'Astrophysique, ULB**

## La structure hiérarchique de l'univers



Loi de Hubble:

$$V = H d$$

(où  $H$  = 'constante de Hubble')

$$V = z c \quad (\text{où } z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \text{'redshift'})$$

## Préambule: Les interactions fondamentales

### 1. Interaction gravitationnelle

'Intensité'

loi de la gravitation universelle (Newton, 1686)

interaction entre 2 corps **massifs**, toujours attractive, portée infinie

$10^{-39}$

## Préambule: Les interactions fondamentales

### 1. Interaction gravitationnelle

'Intensité'

loi de la gravitation universelle (Newton, 1686)

interaction entre 2 corps massifs, toujours attractive, portée infinie

$10^{-39}$

### 2. Interaction faible

responsable des désintégrations (Becquerel, 1896)

(Ex: neutron  $\rightarrow$  proton + électron + antineutrino électronique)

produit des leptons, portée finie ( $\sim 10^{-18}$  m)

$10^{-14}$

## Préambule: Les interactions fondamentales

### 1. Interaction gravitationnelle

'Intensité'

loi de la gravitation universelle (Newton, 1686)

interaction entre 2 corps massifs, toujours attractive, portée infinie

$10^{-39}$

### 2. Interaction faible

responsable des désintégrations (Becquerel, 1896)

(Ex: neutron  $\rightarrow$  proton + électron + antineutrino électronique)

produit des leptons, portée finie ( $\sim 10^{-18}$  m)

$10^{-14}$

### 3. Interaction électromagnétique

électricité - magnétisme (Coulomb 1780, Maxwell 1864)

interaction entre 2 corps chargés, attractive ou répulsive, portée infinie

$10^{-2}$

Remarque: description unifiée de l'interaction électro-faible:  
(Weinberg - Glashow - Salam 1979)

## Préambule: Les interactions fondamentales

### 1. Interaction gravitationnelle

'Intensité'

loi de la gravitation universelle (Newton, 1686)

interaction entre 2 corps **massifs**, toujours attractive, portée infinie

$10^{-39}$

### 2. Interaction faible

responsable des désintégrations (Becquerel, 1896)

(Ex: neutron  $\rightarrow$  proton + **électron** + **antineutrino électronique**)

produit des **leptons**, portée finie ( $\sim 10^{-18}$  m)

$10^{-14}$

### 3. Interaction électromagnétique

électricité - magnétisme (Coulomb 1780, Maxwell 1864)

interaction entre 2 corps **chargés**, attractive ou répulsive, portée infinie

$10^{-2}$

Remarque: description unifiée de l'interaction électro-faible:  
(Weinberg - Glashow - Salam 1979)

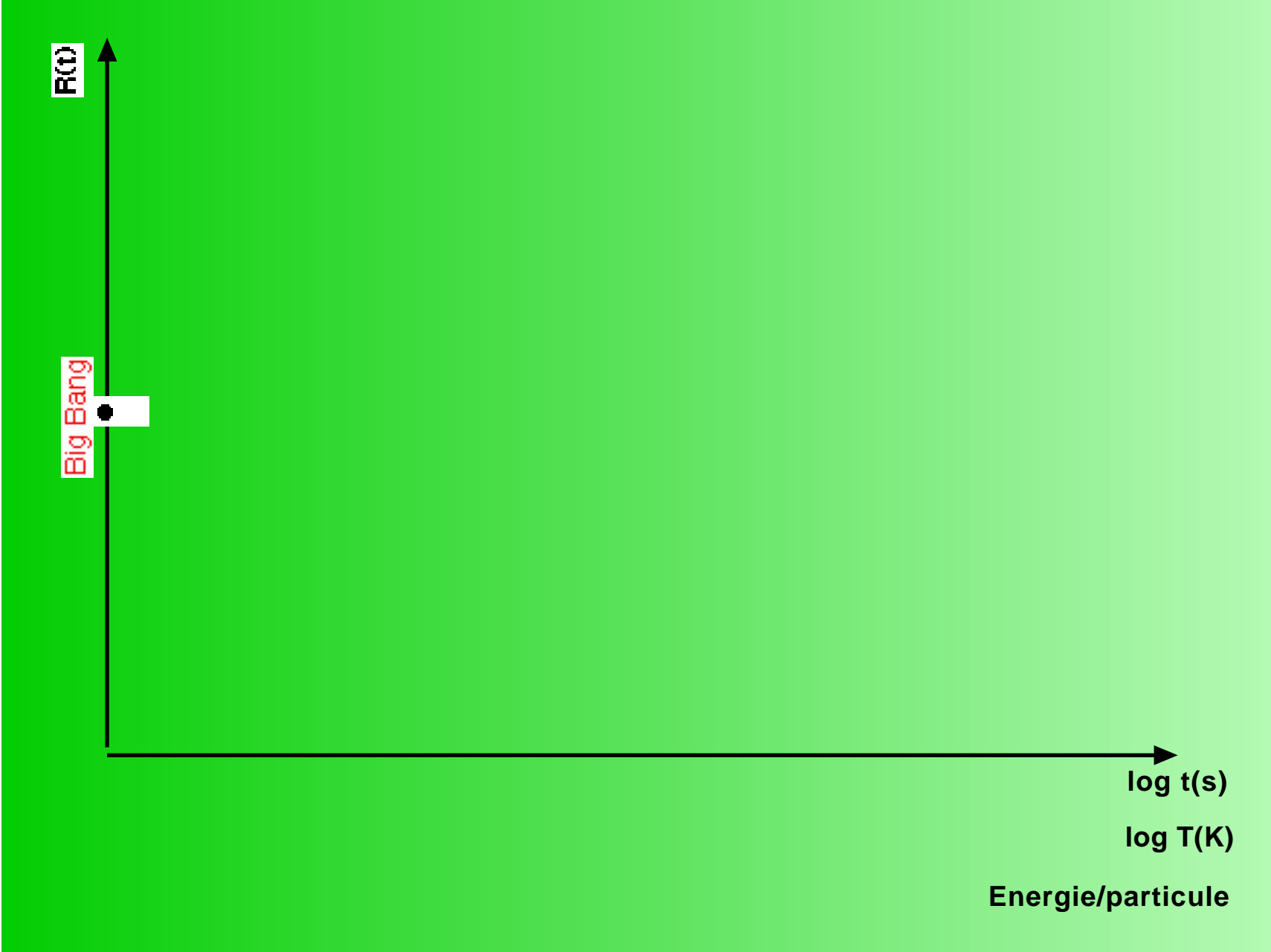
### 4. Interaction nucléaire forte

responsable de la cohésion du noyau atomique (Rutherford, 1911)

interaction entre 2 **quarks** (constituants des protons, neutrons...),  
attractive, portée finie ( $\sim 10^{-15}$  m)

1

Une brève histoire de l'univers...





découplage interaction gravitationnelle

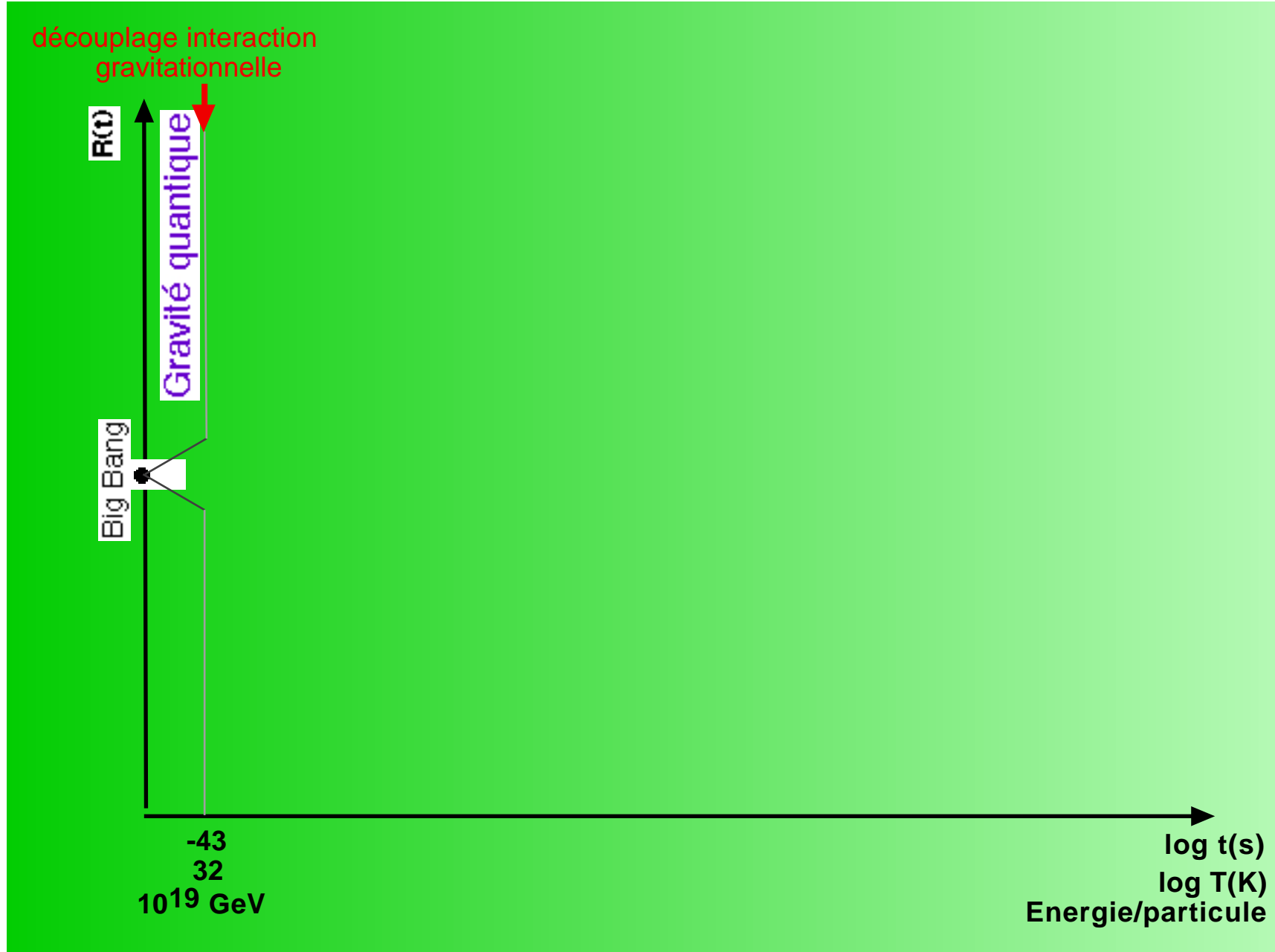
$R(t)$

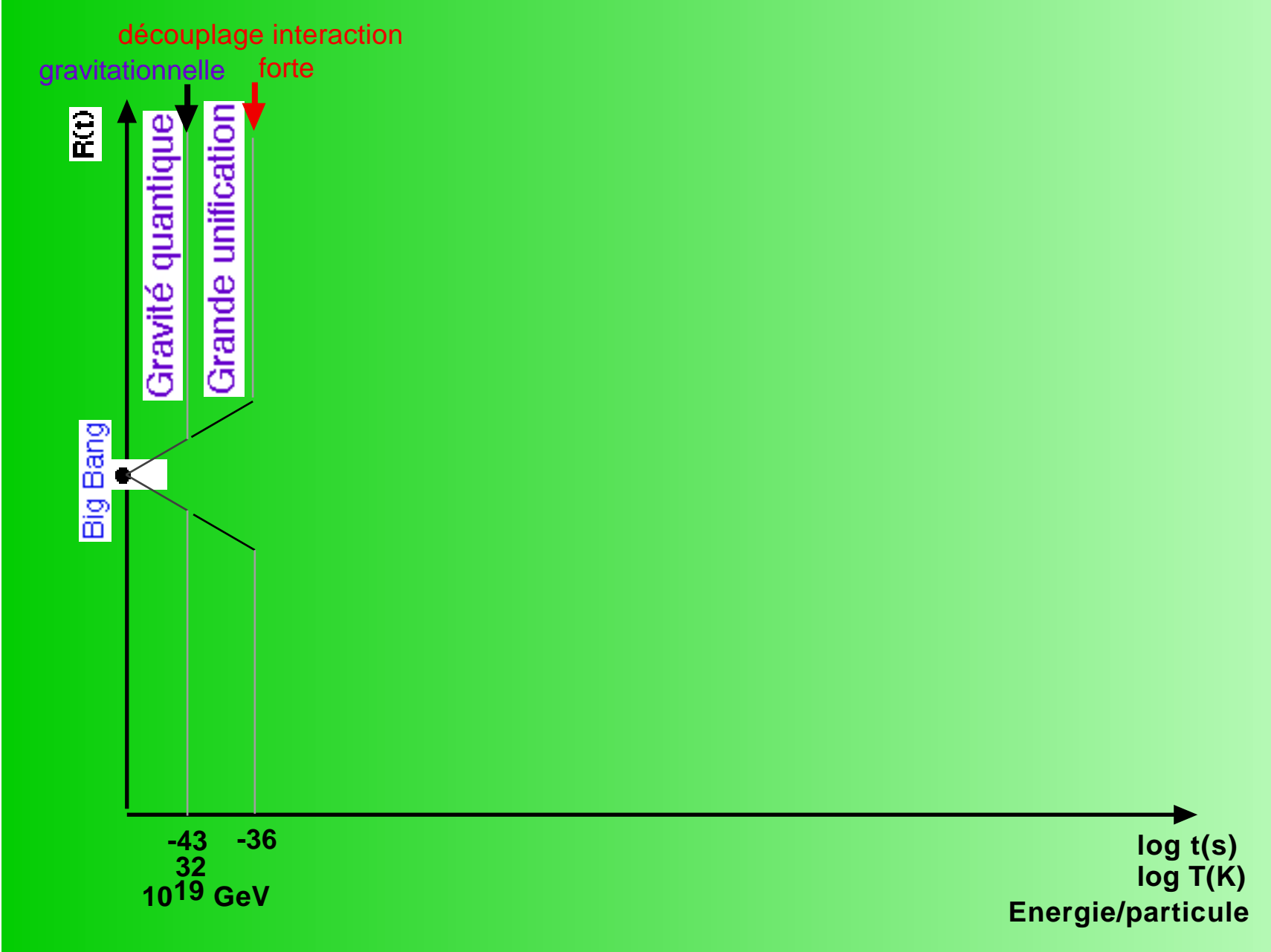
Gravité quantique

Big Bang

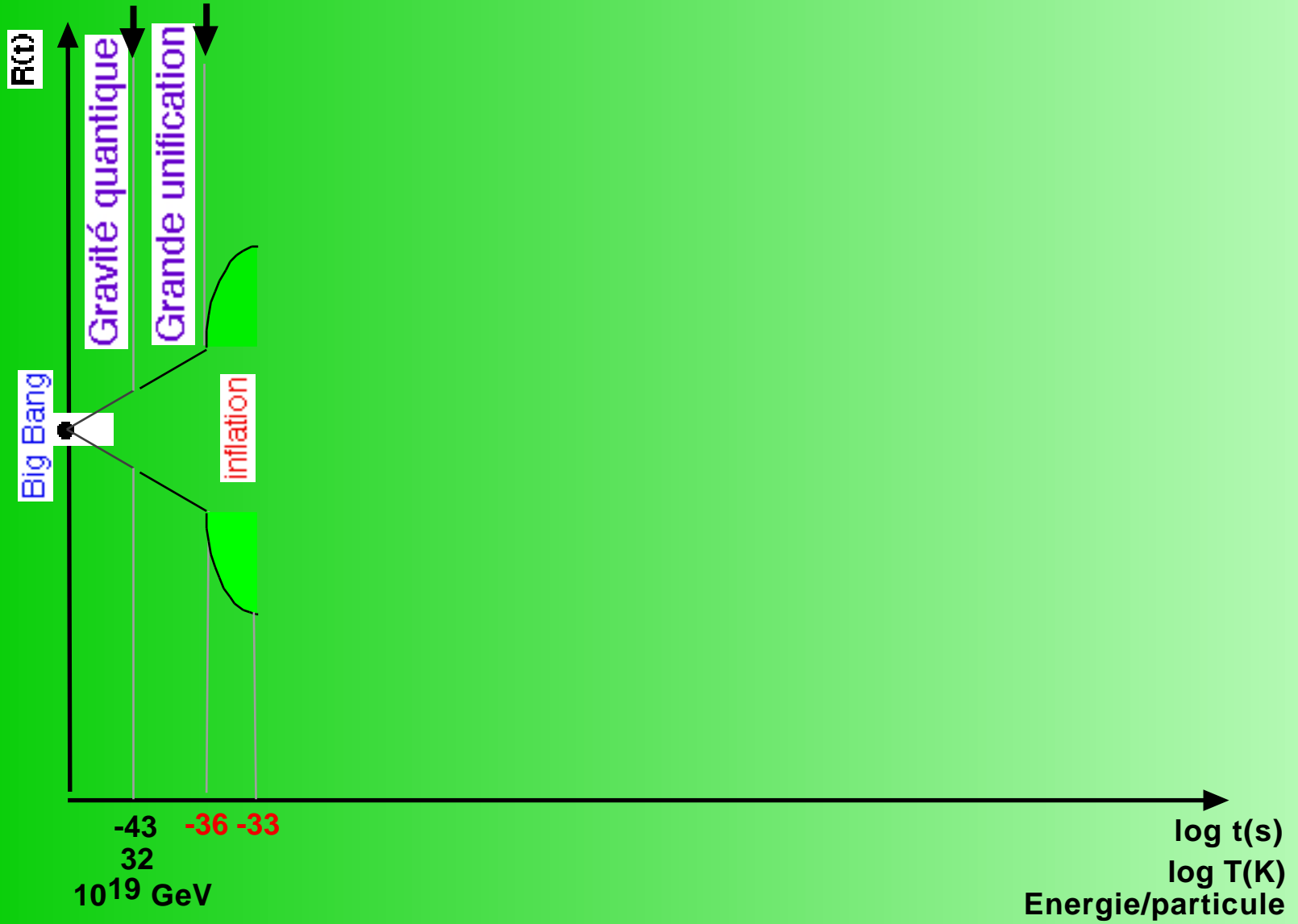
-43  
32  
 $10^{19}$  GeV

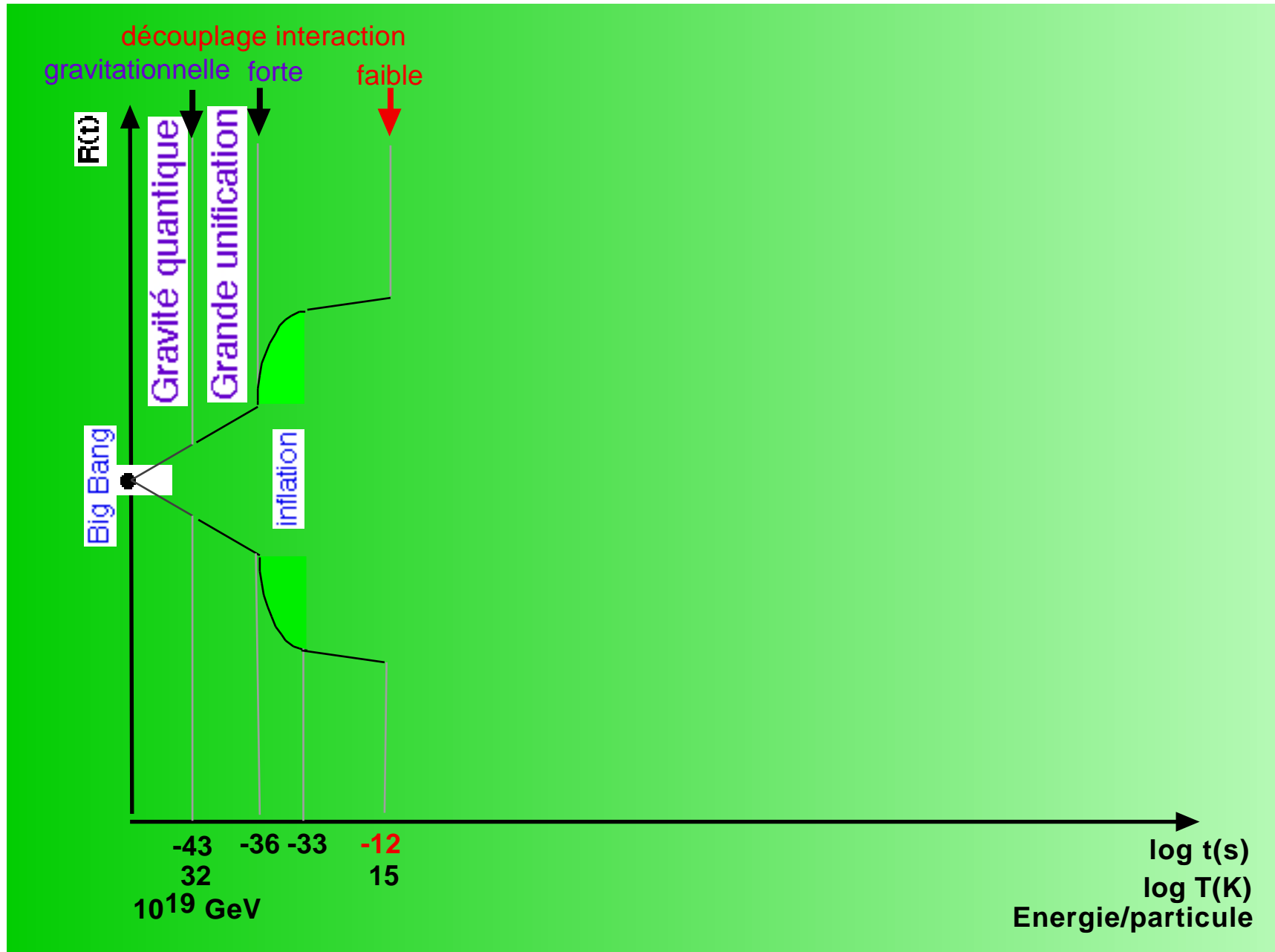
log t(s)  
log T(K)  
Energie/particule

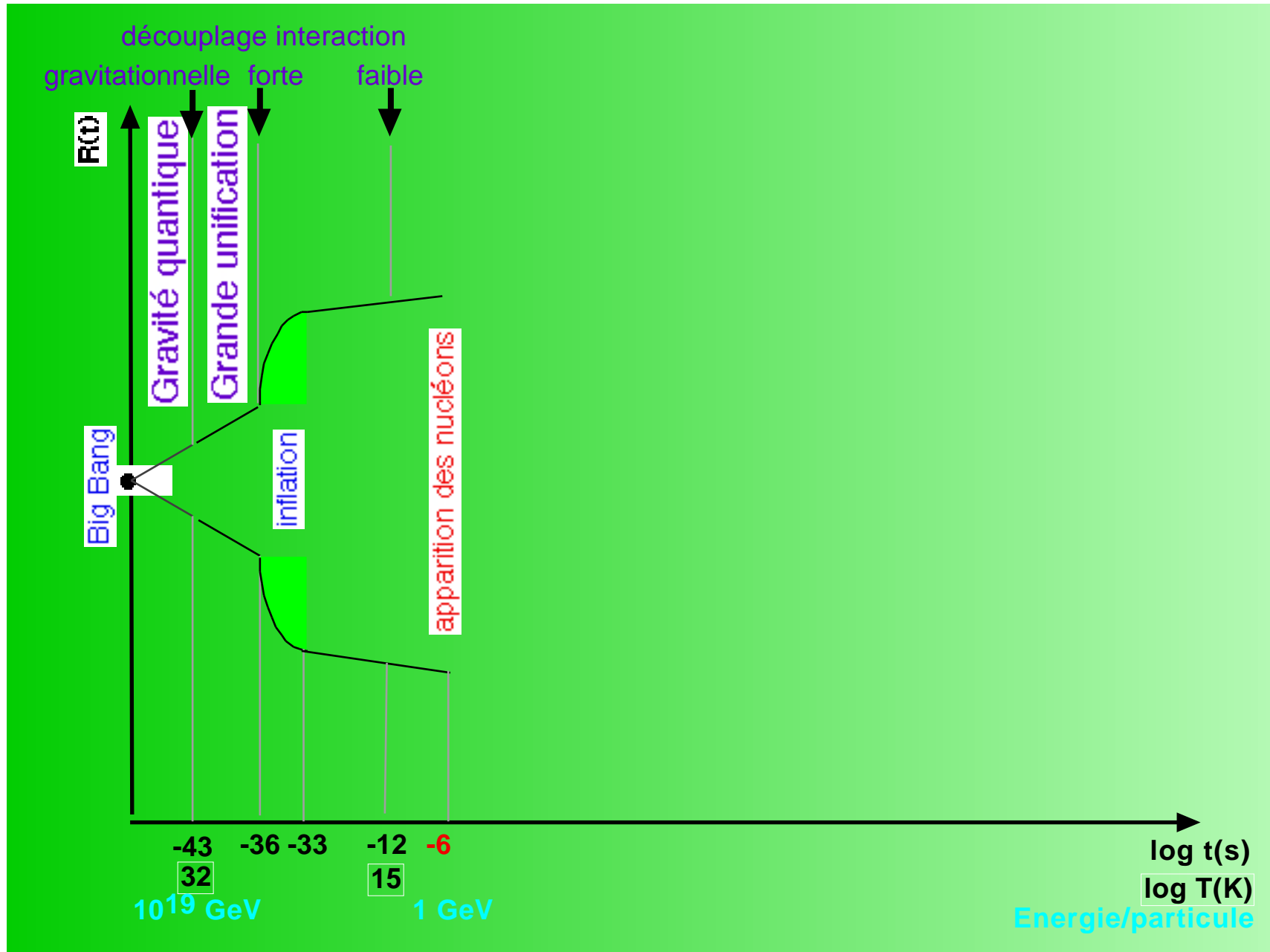


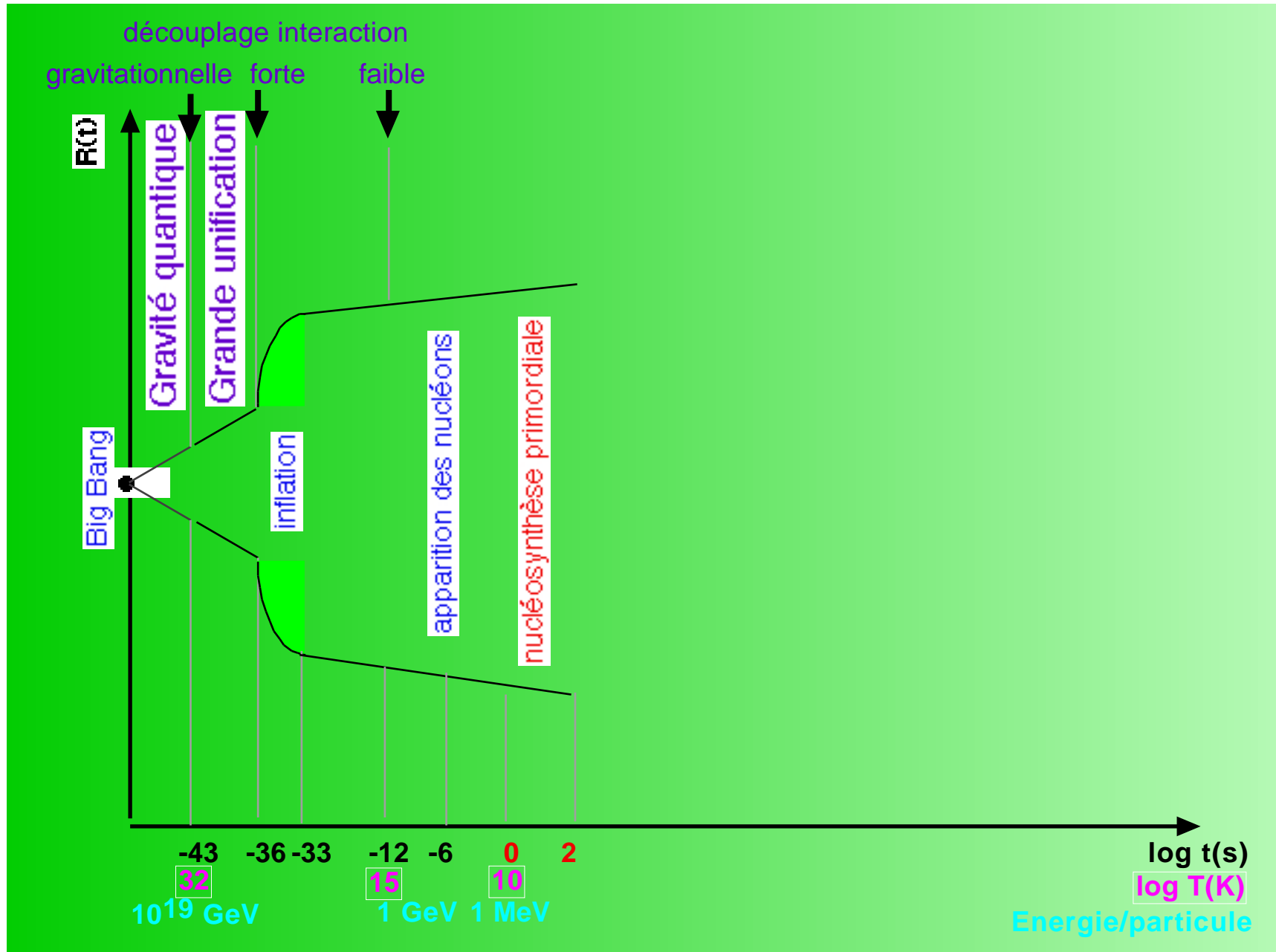


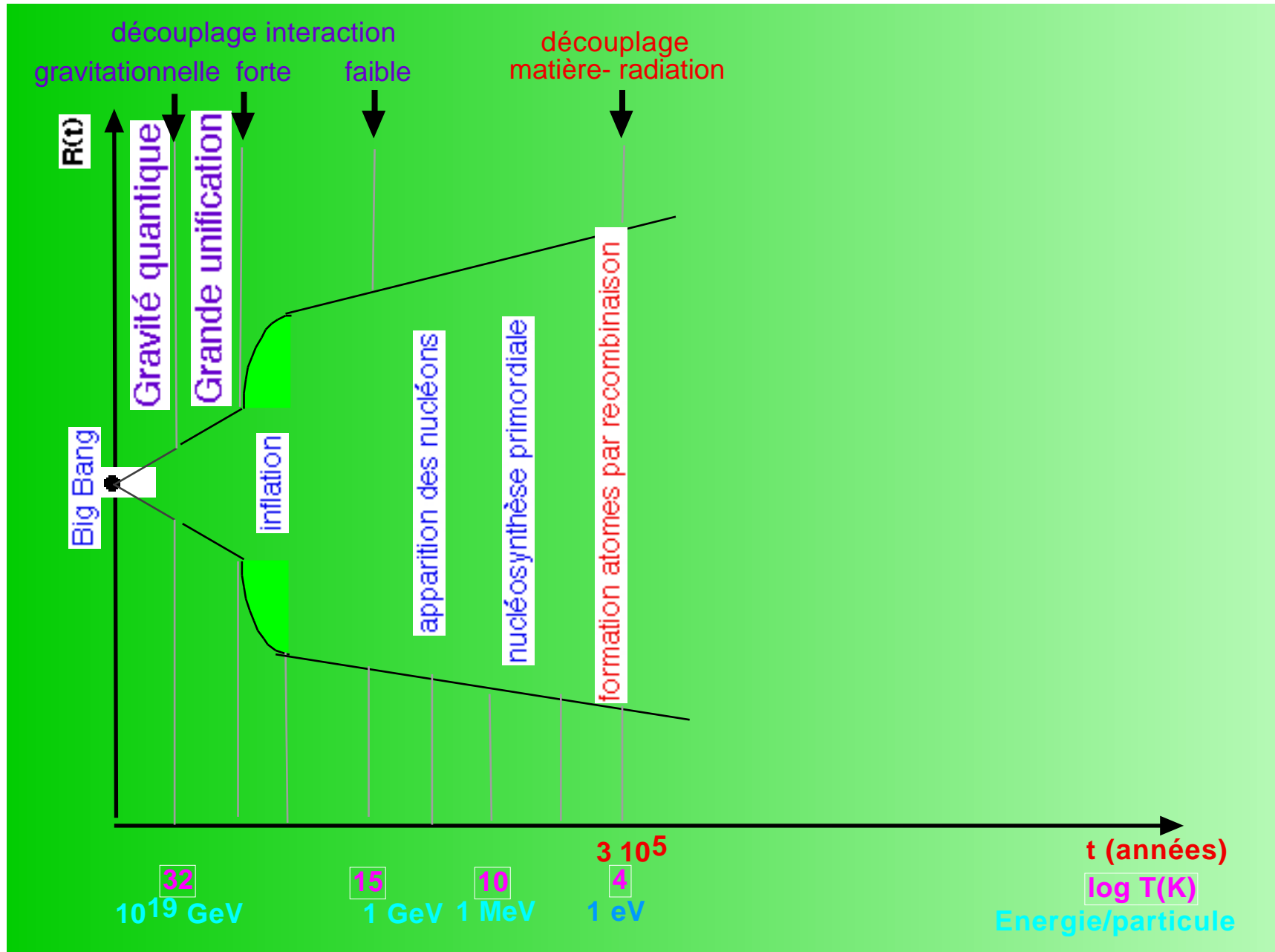
découplage interaction  
gravitationnelle forte





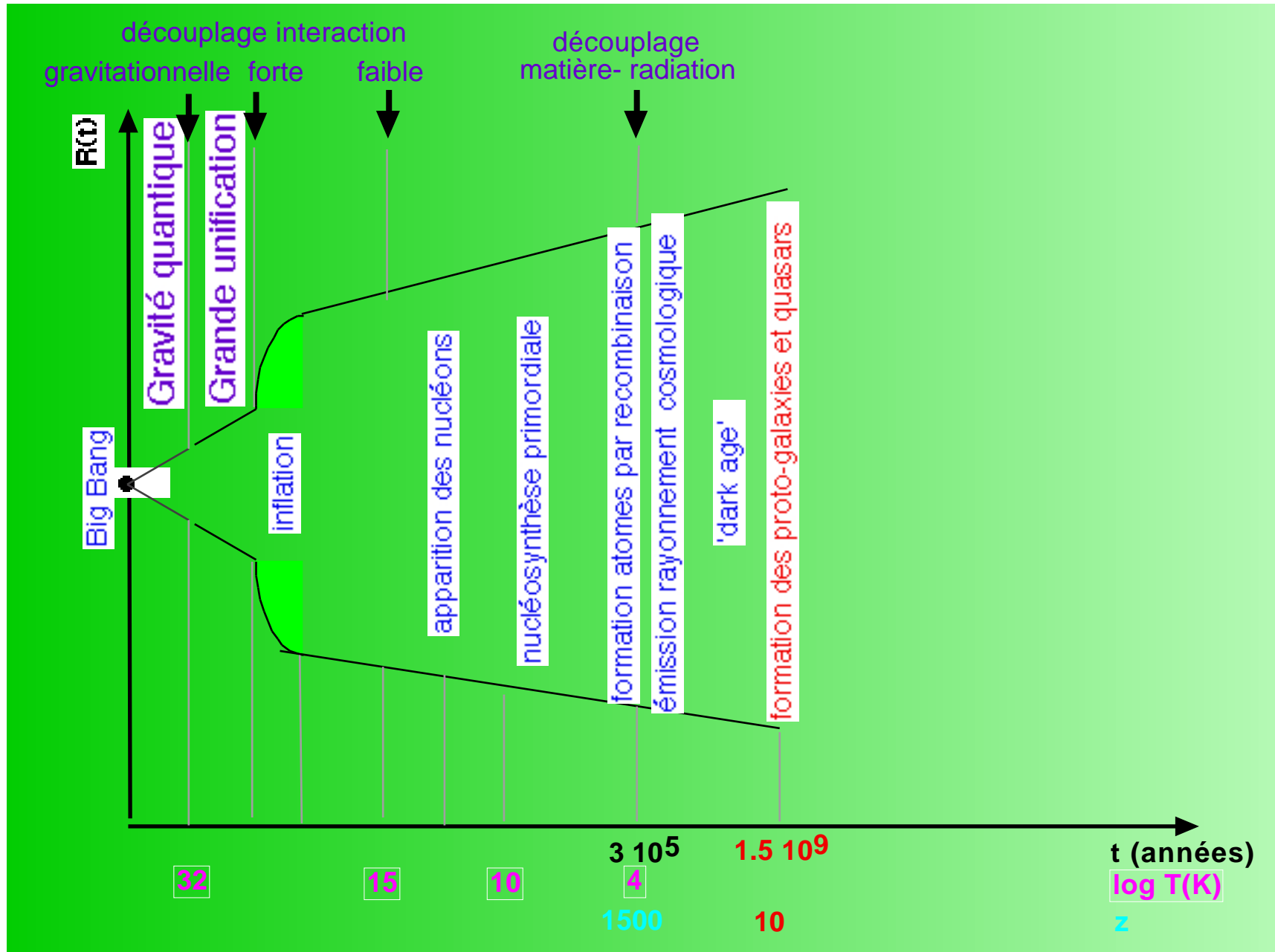


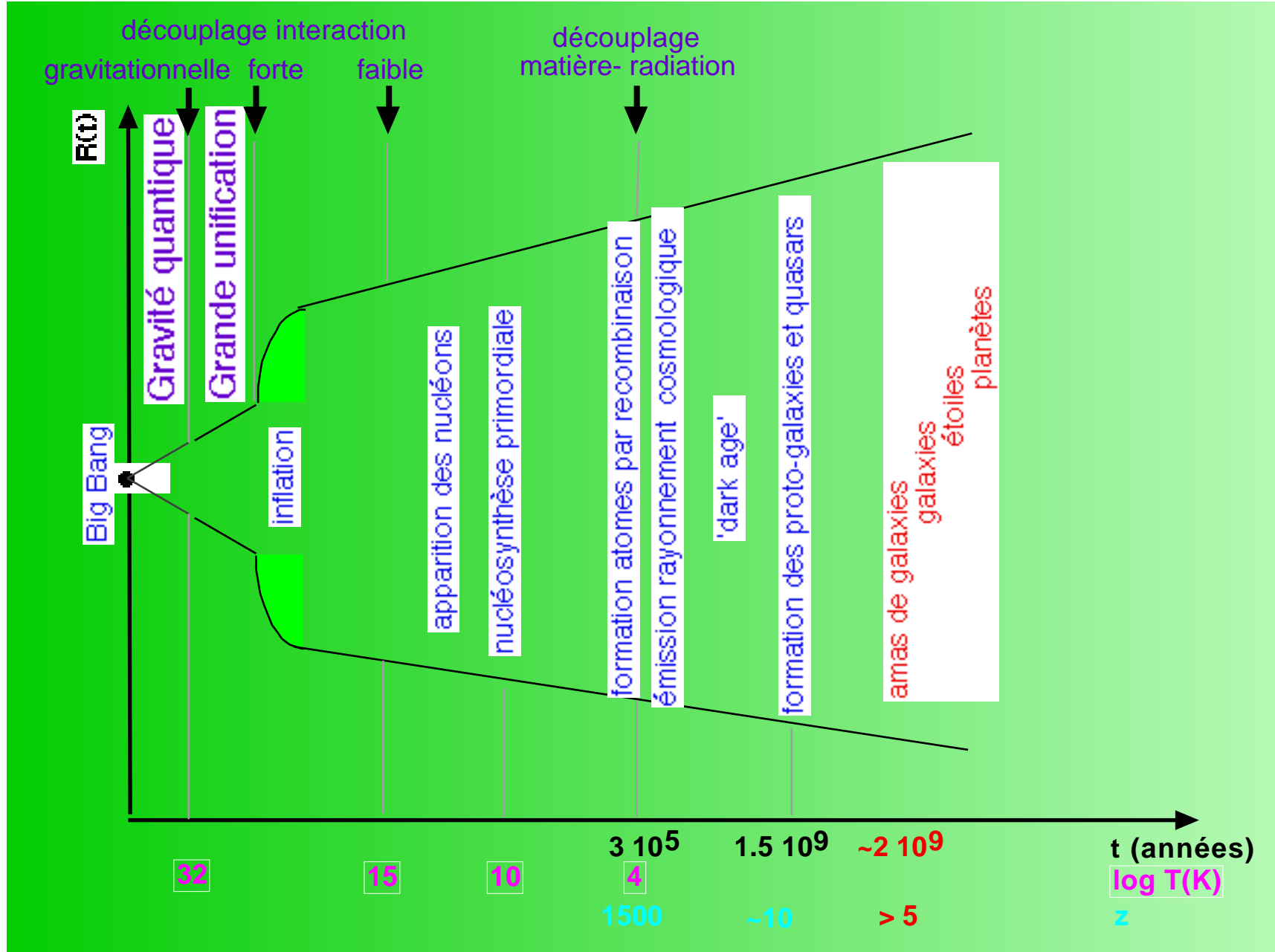


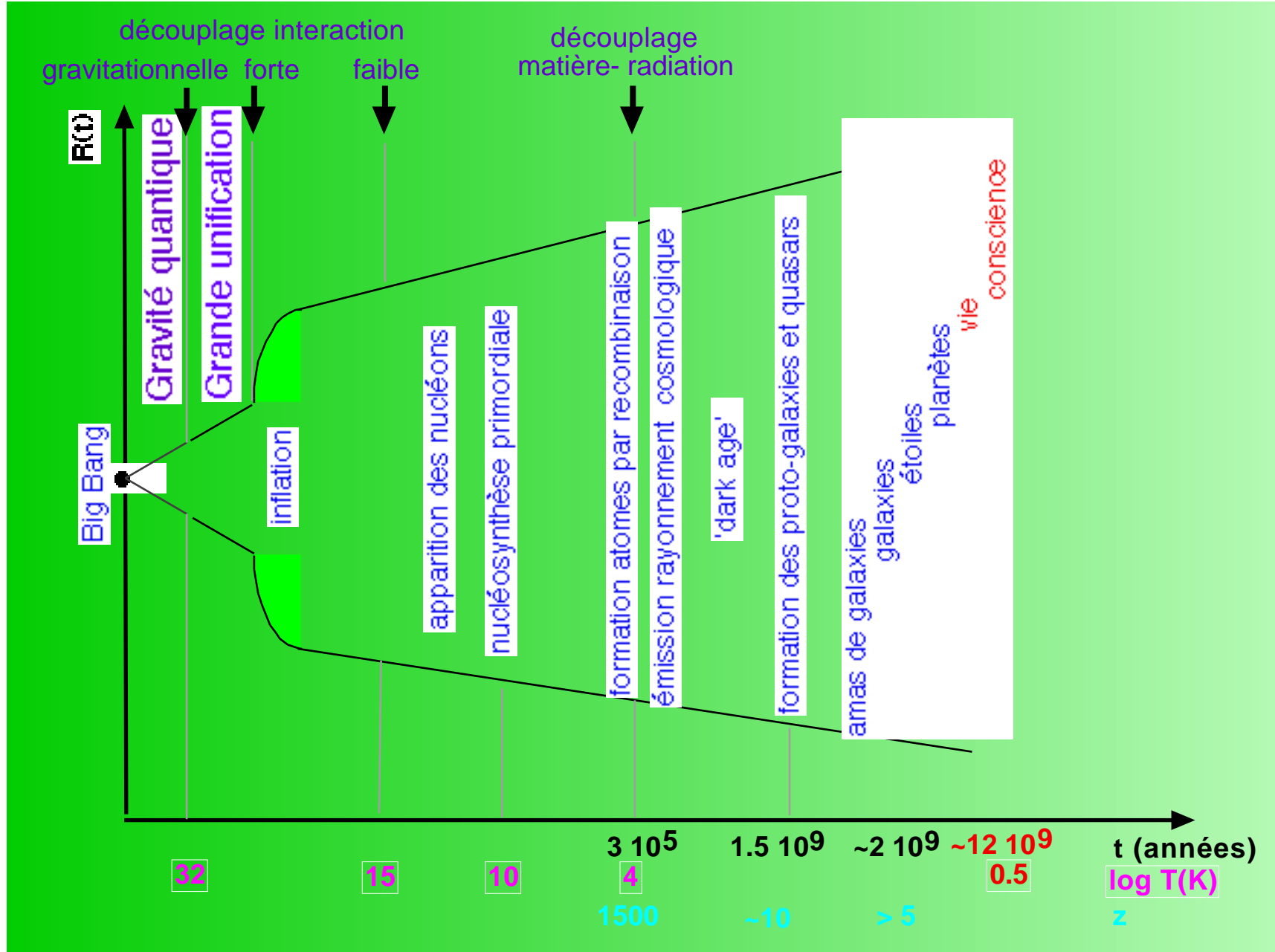






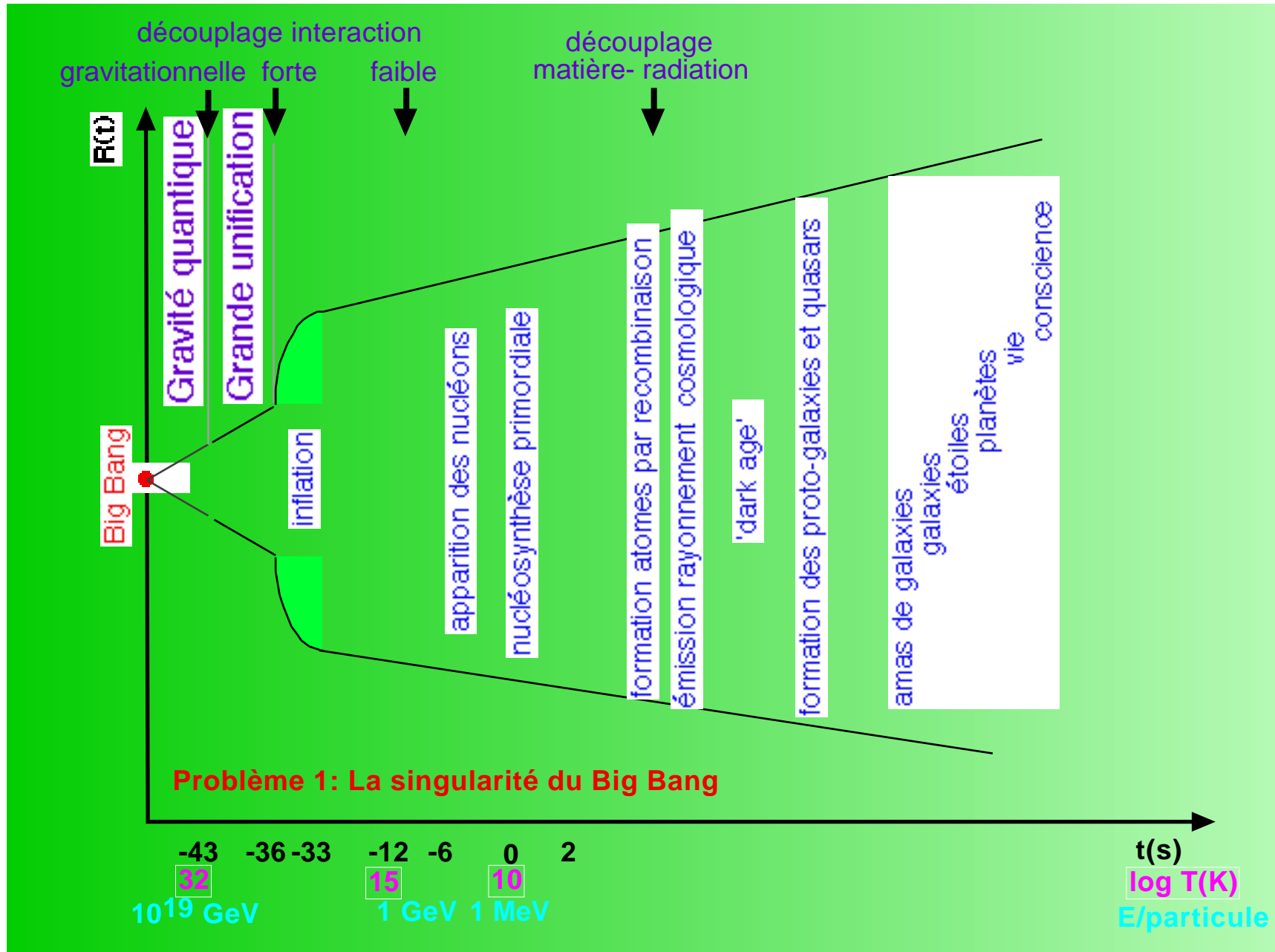






Passons maintenant aux problèmes

apparaissant dans cette histoire de l'univers...



## Problème 1: La singularité du Big Bang

## Les grandeurs de Planck

Ce sont des combinaisons de

$G$	=	$6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$
$c$	=	$3.00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$
$\hbar$	=	$1.05 \cdot 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-1}$

qui permettent de définir de manière unique

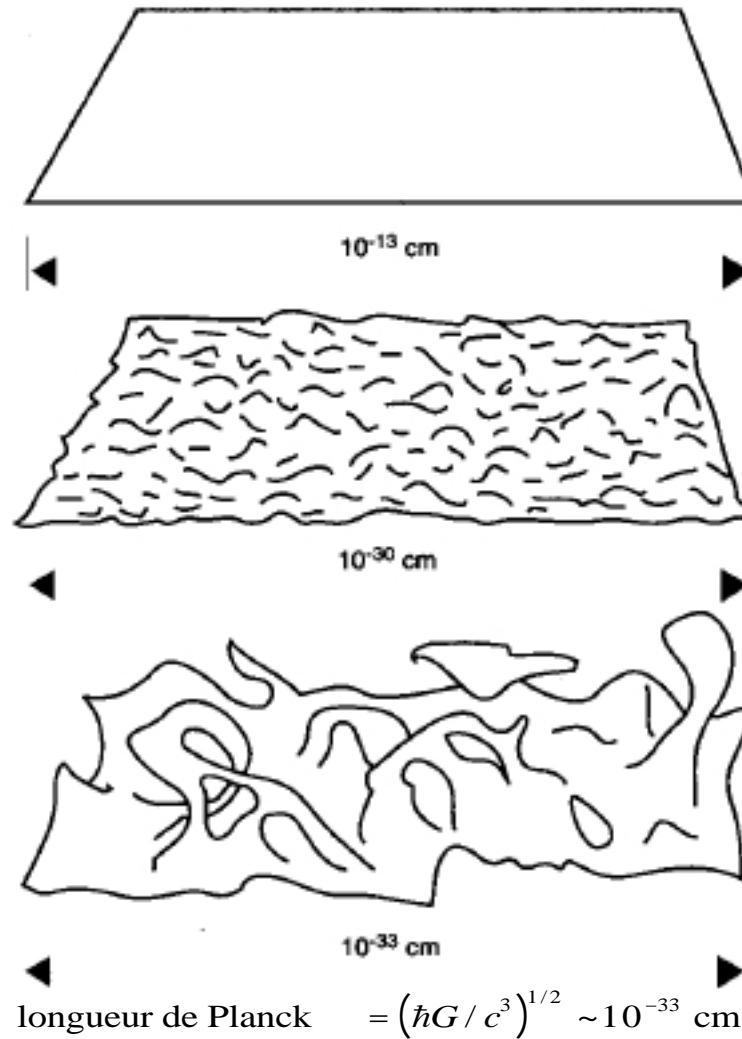
$$\begin{aligned} \text{longueur} &= \left( \hbar G / c^3 \right)^{1/2} \sim 10^{-35} \text{ m} &= L_{Pl} \\ \text{durée} &= \left( \hbar G / c^5 \right)^{1/2} \sim 10^{-43} \text{ s} &= t_{Pl} = L_{Pl} / c \\ \text{masse} &= \left( \hbar c / G \right)^{1/2} \sim 10^{-8} \text{ kg} &= M_{Pl} \end{aligned}$$

ainsi que les grandeurs dérivées

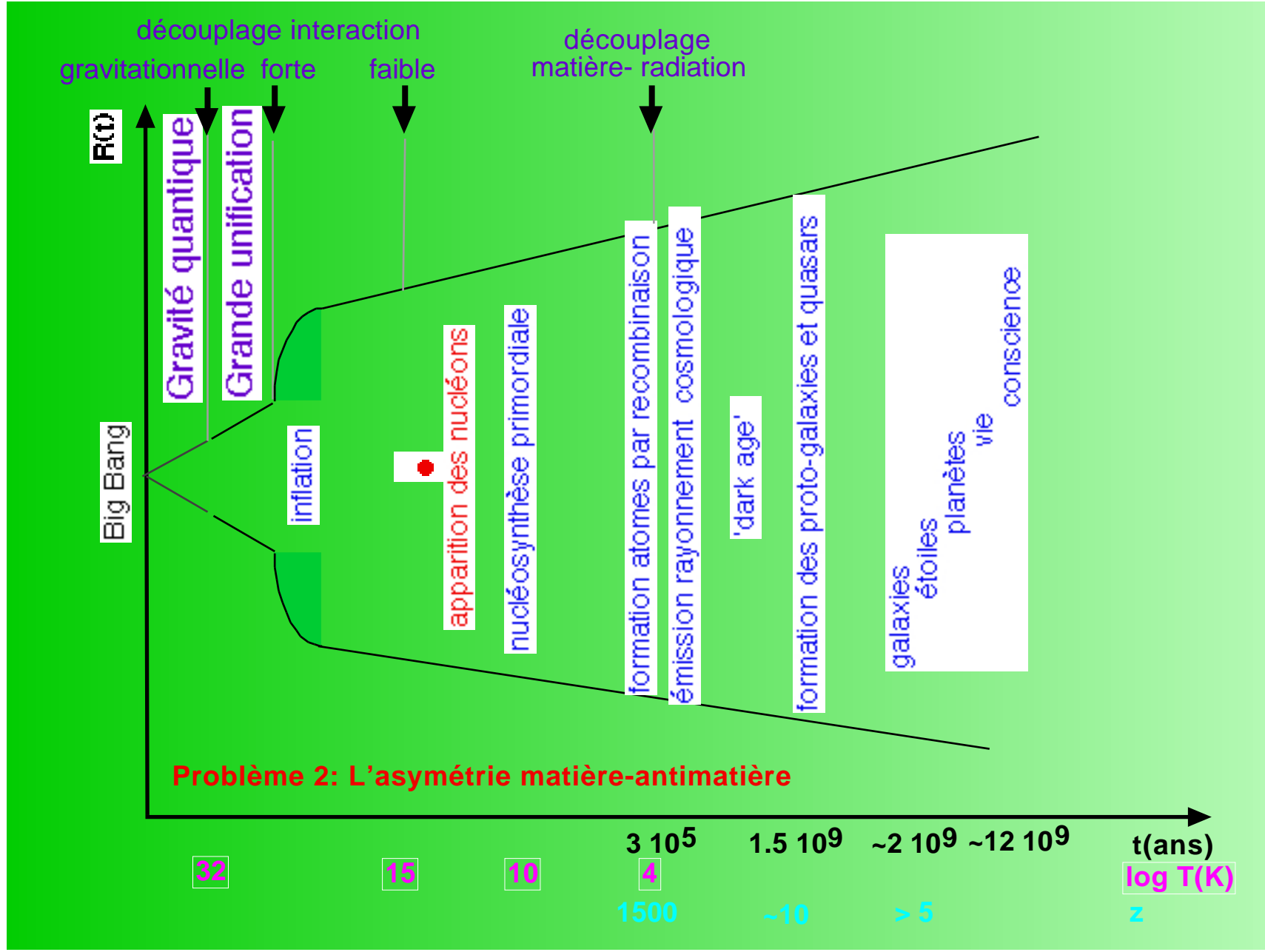
$$\begin{aligned} \text{énergie} &= \left( \hbar c^5 / G \right)^{1/2} &10^{19} \text{ GeV} &= E_{Pl} \quad (1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 10^9 \times 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}) \\ \text{température} &&10^{32} \text{ K} &= E_{Pl} / k \end{aligned}$$

Les processus se produisant à des échelles et sur des durées inférieures à **L<sub>Pl</sub>** et **t<sub>Pl</sub>** sont soumises aux lois d'une **théorie quantique de la gravité** qui implique en particulier que **l'espace-temps lui-même est soumis à des fluctuations quantiques**.  
Ce comportement met à mal les concepts habituels de **passé/futur** et **causalité**!

**Vue schématique des fluctuations de la structure de l'espace-temps à l'échelle de Planck**







**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

## L'asymétrie matière-antimatière et violations de P et CP

1955: Découverte de la **non-conservation de la parité (P)** lors des **désintégrations beta** ( $\mapsto$  **interactions faibles**).  
Cependant, CP est généralement conservée.

P = 'réflexion dans un miroir':  $x \rightarrow -x, y \rightarrow y, z \rightarrow z$   
C = 'conjugaison de charge':  $Q \rightarrow -Q$

1964: Découverte de la **non-conservation de CP** lors de la **désintégration des mésons K neutres**.

2001: **des mésons B.**

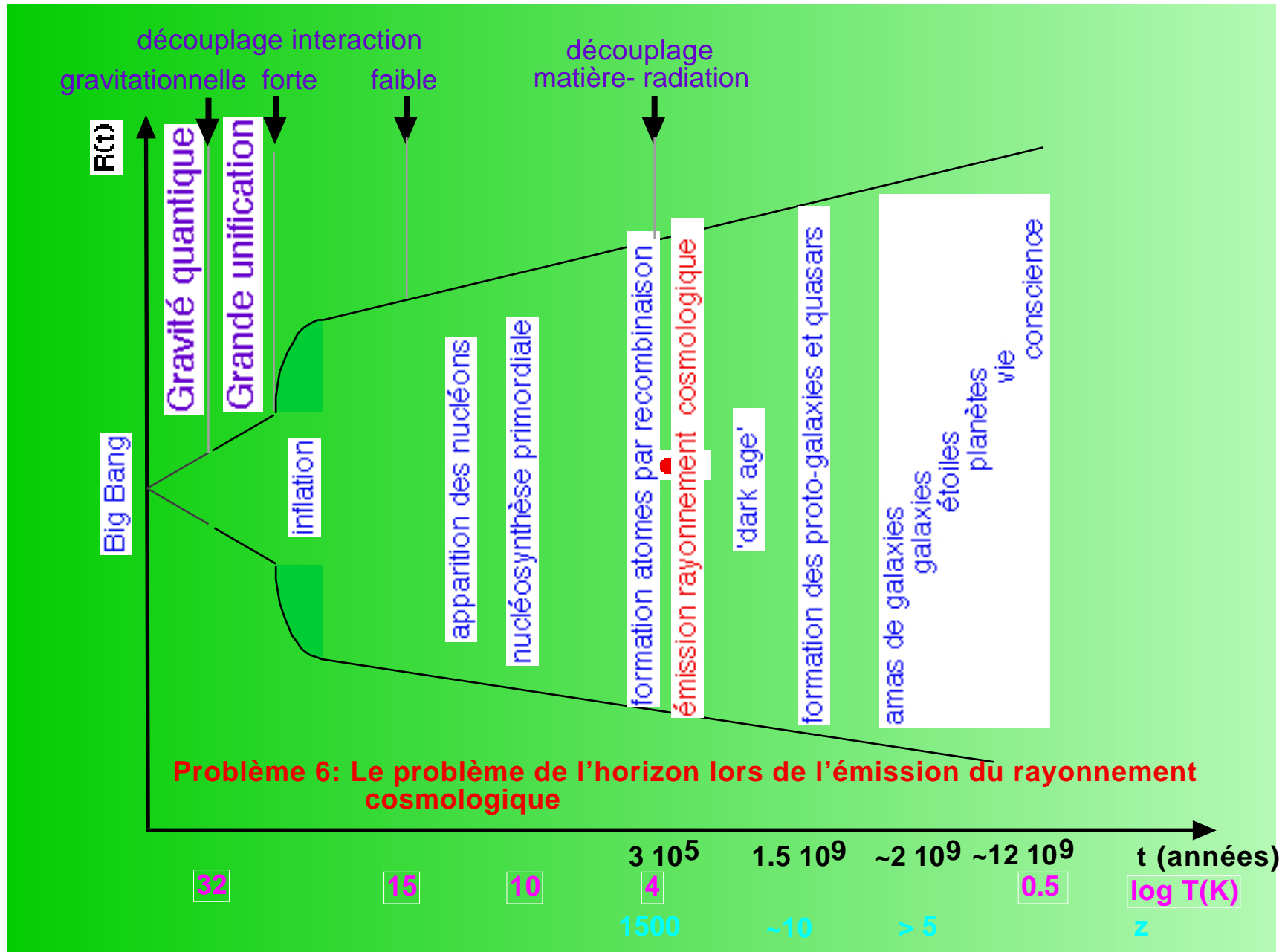
La violation de CP est-elle à l'origine de l'asymétrie matière-antimatière?

L'observation du rayonnement cosmologique de la matière (visible et 'noire')

fournit

$$\frac{N_{baryons}}{N_{photons}} = \frac{N_{baryons}(0) - N_{antibaryons}(0)}{N_{baryons}(0) + N_{antibaryons}(0)} \quad 10^{-8}$$

Cette valeur est difficile à réconcilier avec les valeurs (**plus petites**) observées pour l'asymétrie CP des taux de désintégrations pour particules/antiparticules.



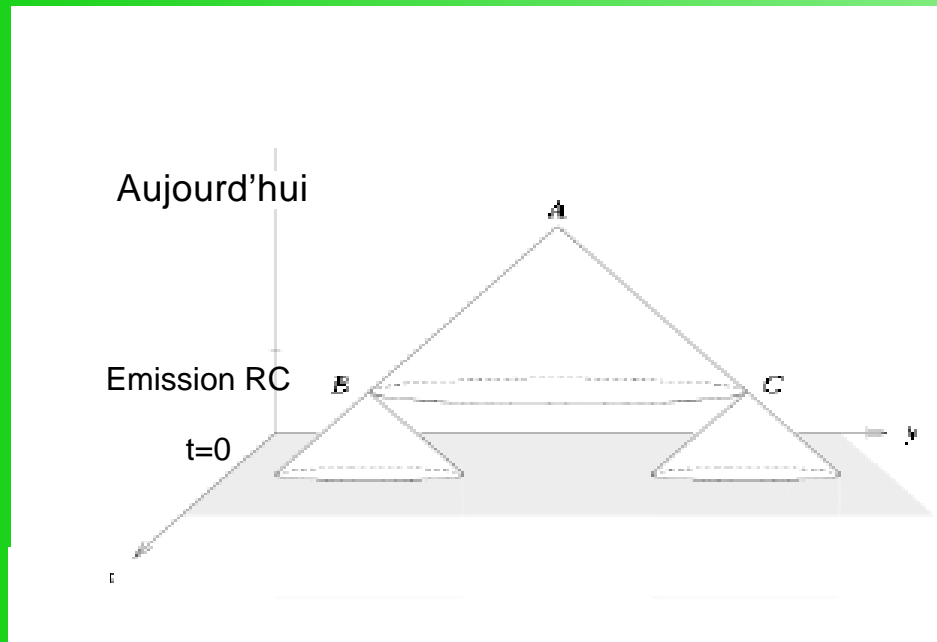
**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

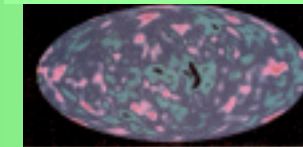
**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

## L'horizon d'une particule lors de l'émission du rayonnement cosmologique

La **grande homogénéité** du rayonnement cosmologique (RC) à 3 K ( $\Delta T/T \sim 10^{-5}$ ) est **incompatible** avec la **dimension de l'horizon causal** au moment de l'émission de ce rayonnement



$$\Delta T/T = 10^{-5}$$



L'**horizon causal** d'une particule au moment de l'émission du RC correspond à **1 degré sur le ciel aujourd'hui!**  
En l'absence de lien causal entre des points éloignés, **comment expliquer l'homogénéité du rayonnement?**

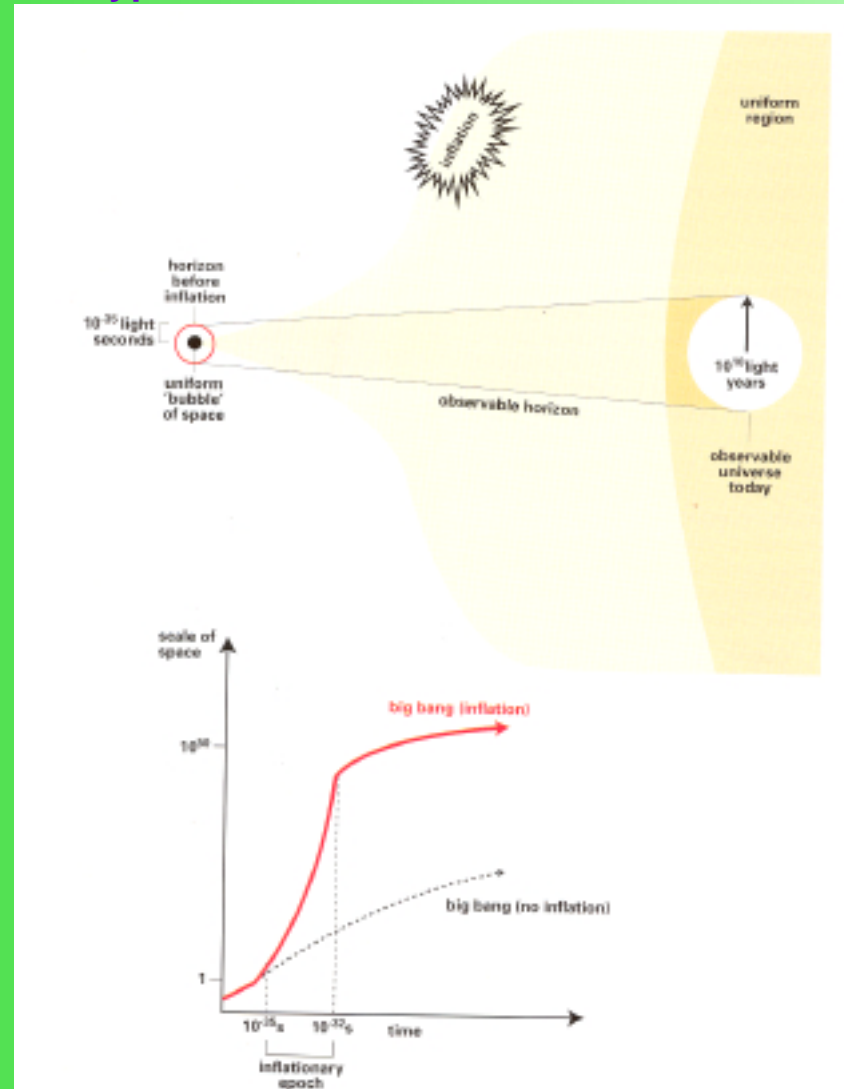
Une **solution** peut y être apportée par l'hypothèse de l'**inflation**.

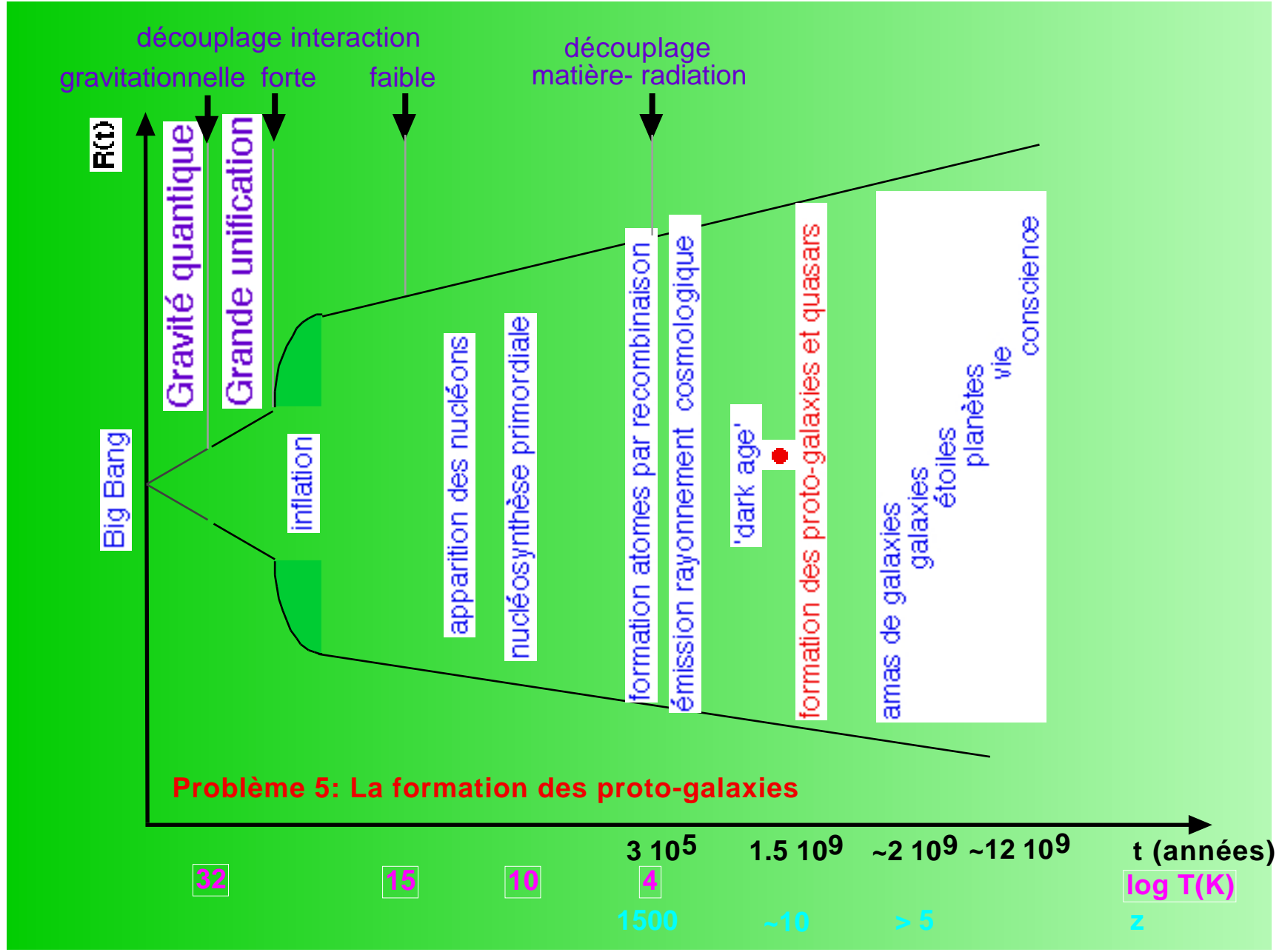
# L'horizon d'une particule lors de l'émission du rayonnement cosmologique

La solution apportée par l'hypothèse d'inflation

## Corollaires:

1. la portion d'univers observable aujourd'hui est bien plus petite que l'univers entier
2. la quasi-platitude de l'univers observée aujourd'hui ( $\Omega \sim 0.2$ ) est une conséquence naturelle de l'inflation







**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

**I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies**

**II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?**

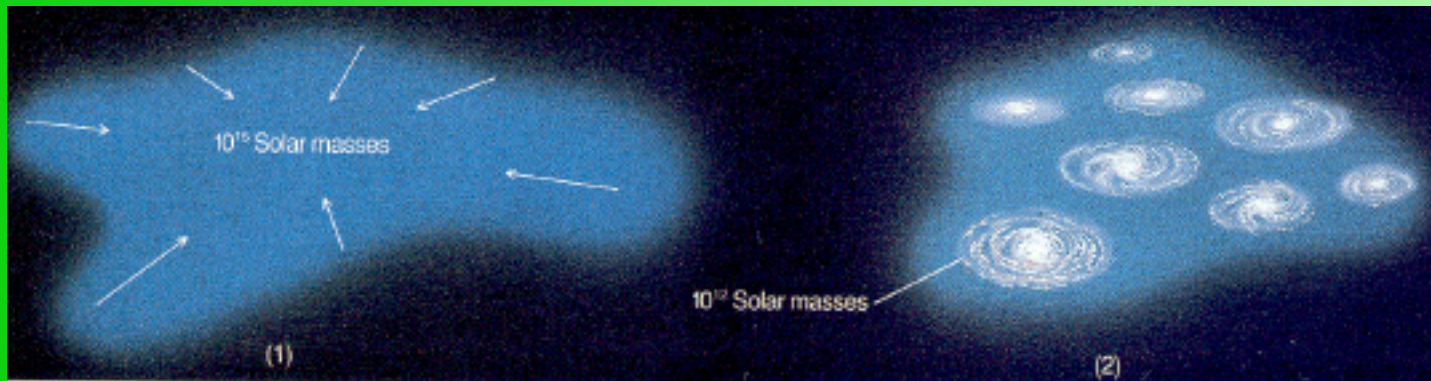
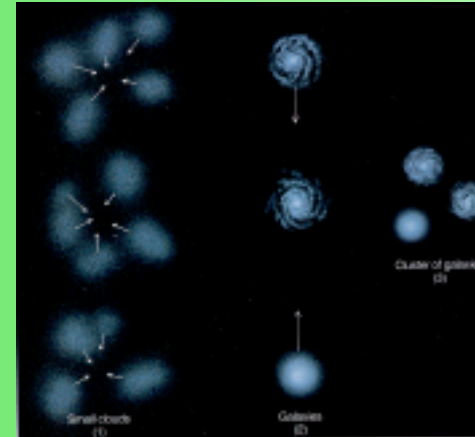
# La formation des proto-galaxies (I)

'Top-down' ou 'bottom-up'?

La formation des galaxies, amas et super-amas se produit-elle

des petites structures vers les grandes?

ou des grandes vers les petites?



La réponse dépend du **type de matière sombre**:

**froide** (particules non-relativistes:  $m \sim \text{MeV}$  ou  $\text{GeV}$ : baryons, WIMPS)

**petites structures d'abord, puis agglomération**

ou **chaude** (particules relativistes:  $m < 100 \text{ eV}$ : neutrinos...)

**grandes structures d'abord, puis fragmentation**

## La formation des proto-galaxies (II)

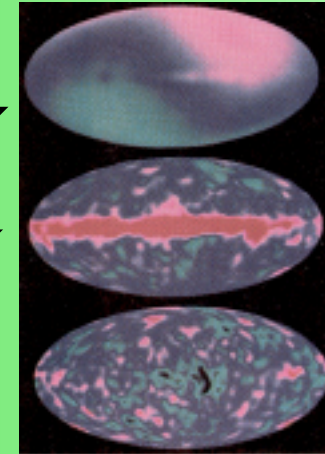
### Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies

1965: Penzias & Wilson: découverte du rayonnement cosmologique à  $2.735 \pm 0.06$  K

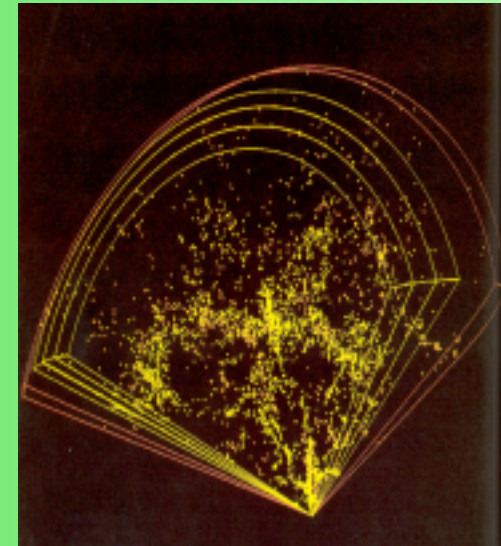
dipôle Doppler ( $370 \pm 10$  km/s): amplitude de 3 mK (0.12 %)

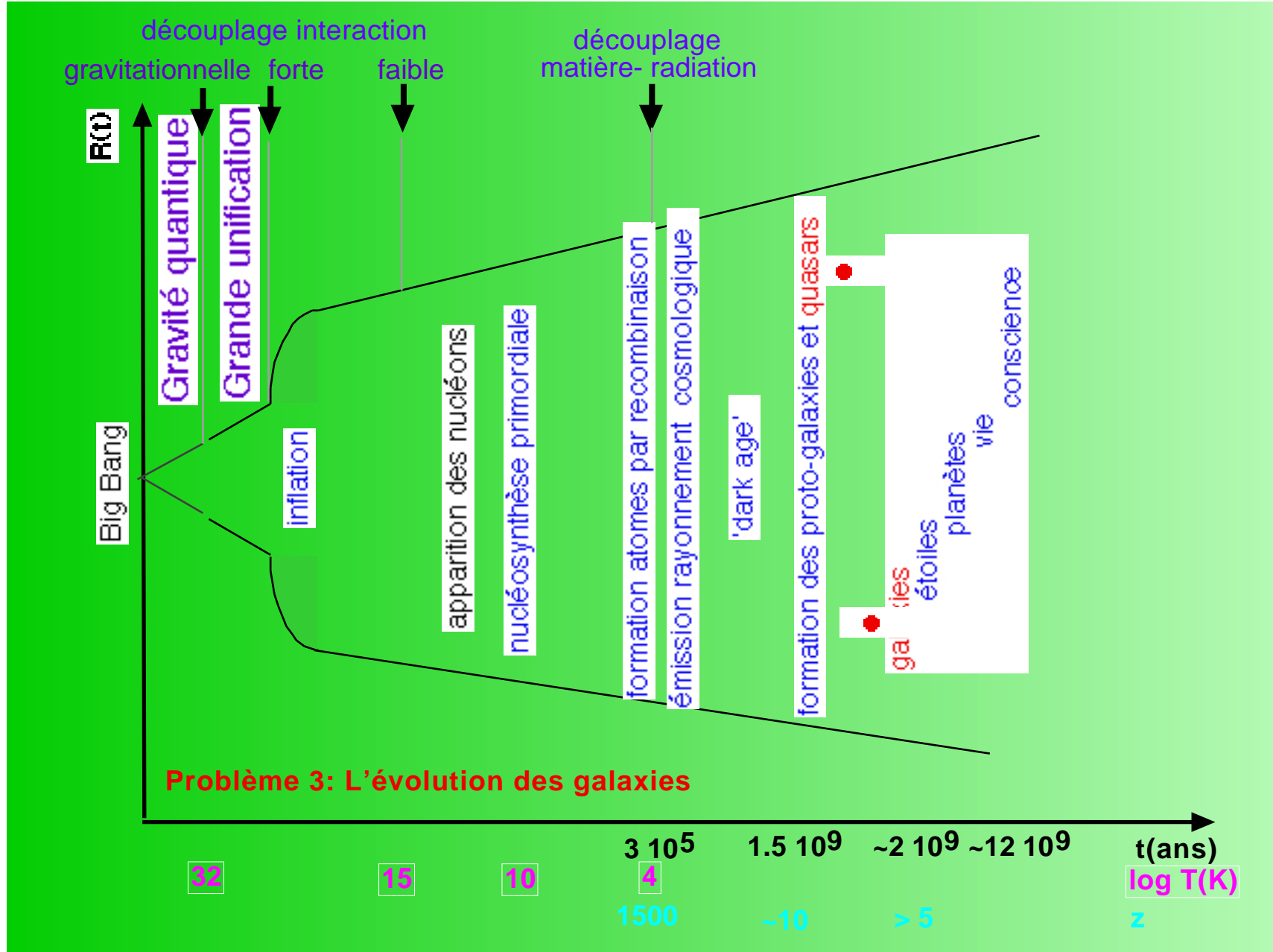
après soustraction subsistent des inhomogénéités de 300 microK (0.01%) dues aux sources de notre Galaxie

après soustraction subsistent des inhomogénéités de 30 microK (0.001% soit  $T/T = 10^{-5}$  à l'échelle de  $7^\circ$ ) dues aux inhomogénéités à l'époque de l'émission du rayonnement cosmologique



**Ces inhomogénéités sont-elles compatibles avec l'échelle des grandes structures observées aujourd'hui?**





**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

**I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies**

**II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?**

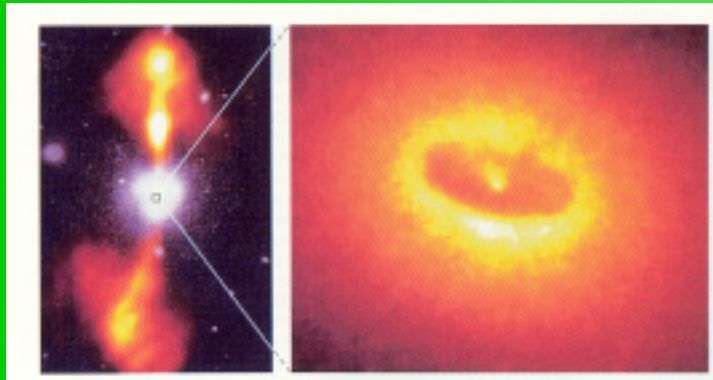
**Problème 5: L'évolution des galaxies**

**I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?**

**II. Comment se forment les bras spiraux?**

## L'évolution des galaxies (I)

Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?



**M87, grande galaxie elliptique de l'amas de la Vierge**

Dans le passé ( $z \sim 10$  à  $\sim 1$ ):  
quasars et galaxies à noyaux actifs  
(ou de Seyfert, ou blazars)  
sont la règle...

Le moteur de cette activité est un trou noir supermassif  
(un million voire milliard de fois la masse du Soleil!)  
situé au centre de la galaxie



**Messier 109, galaxie spirale barrée**

Actuellement ( $z \sim 0$ ), ils sont l'exception...

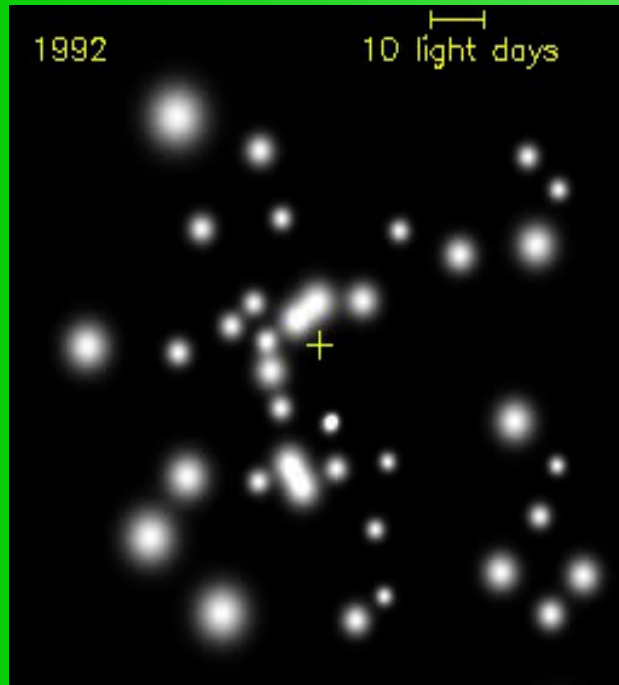
Et pourtant....

## L'évolution des galaxies (II)

### Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?

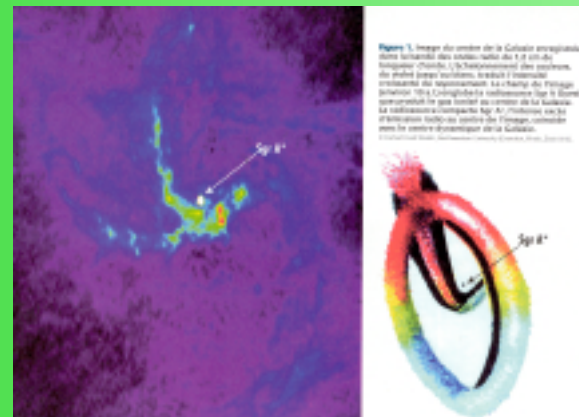
Et pourtant, elles possèdent (toutes?) un trou noir supermassif en leur centre...

C'est désormais une **certitude** pour notre **Galaxie** et pour la **galaxie d'Andromède**.



**Pourquoi notre trou noir fait-il de l'asthénie?**

Un **sursaut d'activité** de SgrA\* en rayonnement X a été détecté par le satellite Chandra le 26 octobre 2000 (45 fois plus intense pendant quelques heures!)



## L'évolution des galaxies (III)

### Comment se forment les bras spiraux?

#### Le problème:

Prot (étoiles centre) < Prot (étoiles périphérie)  
Age galaxie >> Prot

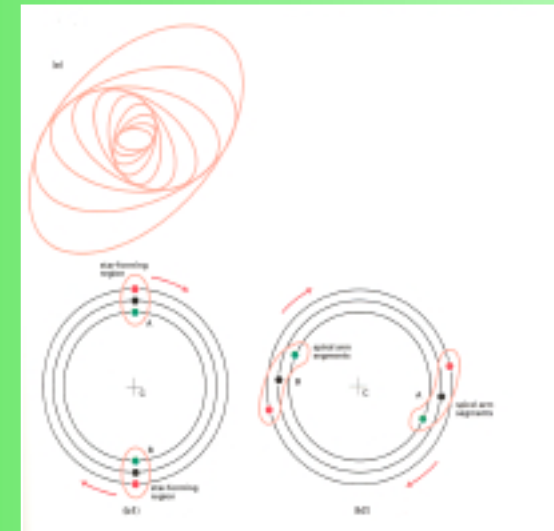
---> Les bras devraient s'enrouler de plus en plus...

#### Trois solutions possibles:

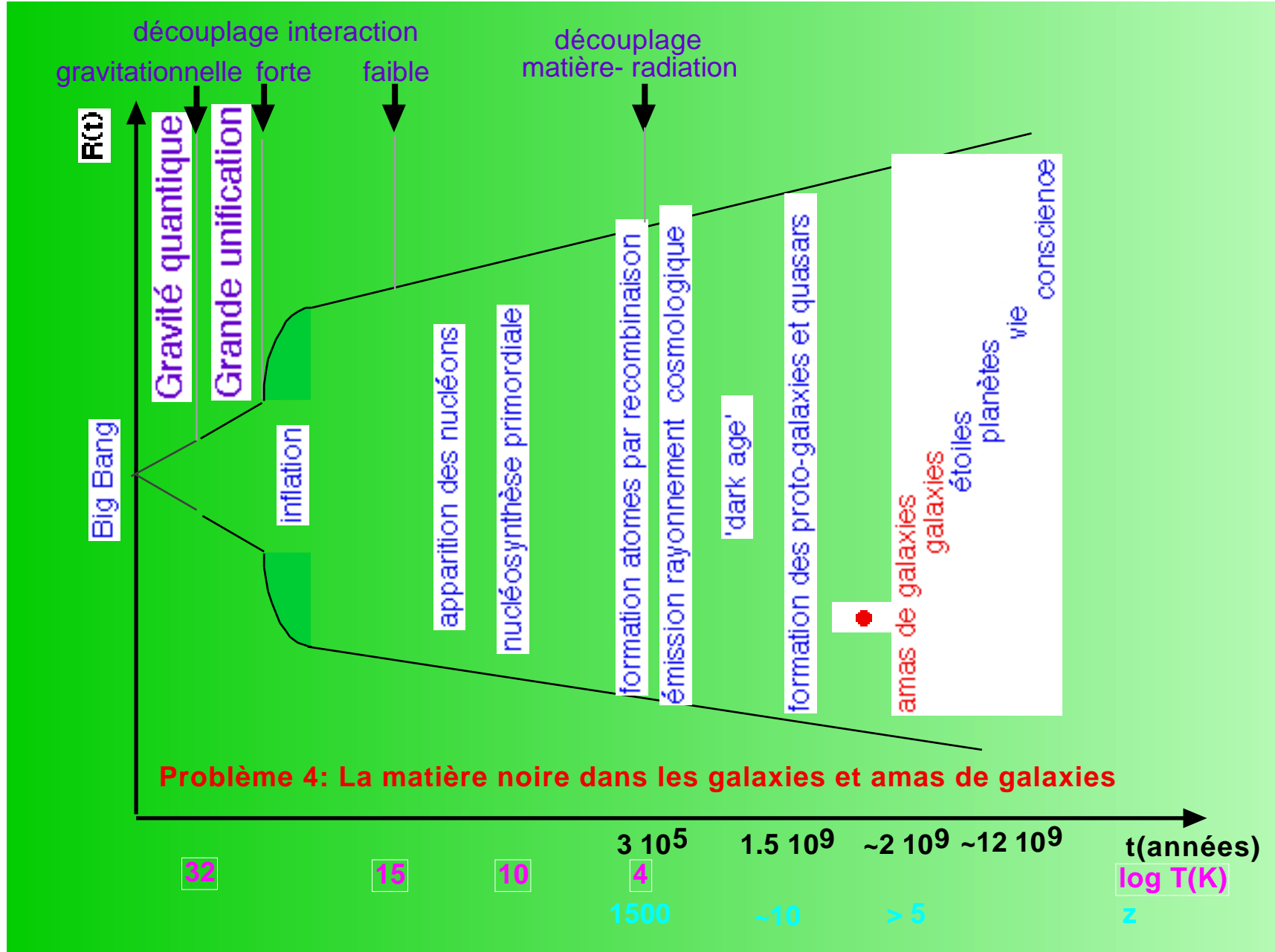
1. Propagation d'une 'onde de densité' déclenchant la formation d'étoiles à l'emplacement du front de compression
2. Enveloppe des orbites stellaires elliptiques subissant un mouvement de précession engendré par la perturbation due à la barre centrale en rotation
3. Etirement progressif des régions de formation stellaire par la rotation différentielle (OK pour bras flocculents)



Galaxie Messier 83







**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

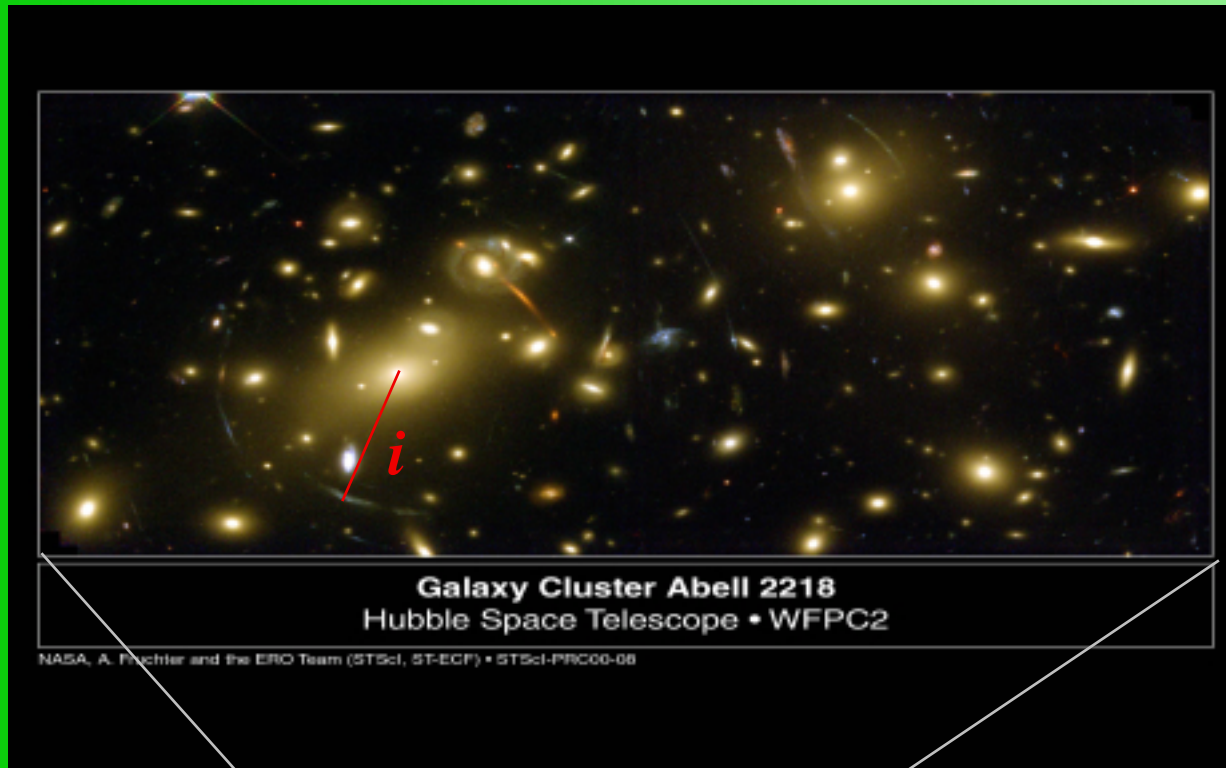
- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

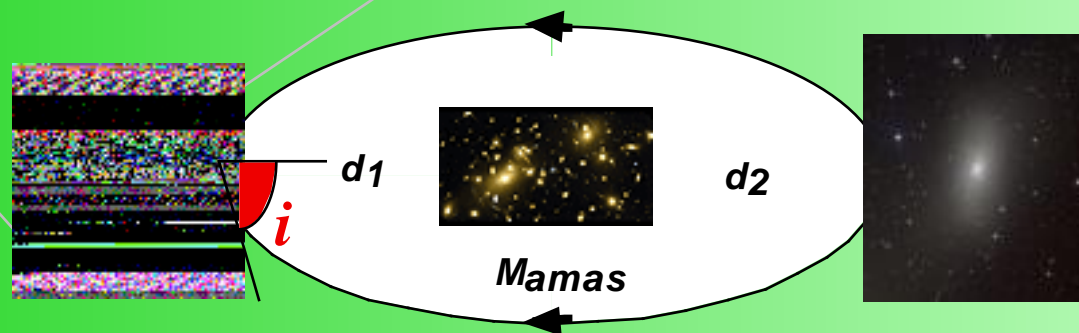
- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

# La matière noire dans les amas de galaxies

## Lentilles gravitationnelles



$$i^2 = \frac{4GM_{amas}}{c^2} \frac{d_2}{d_1(d_1 + d_2)}$$

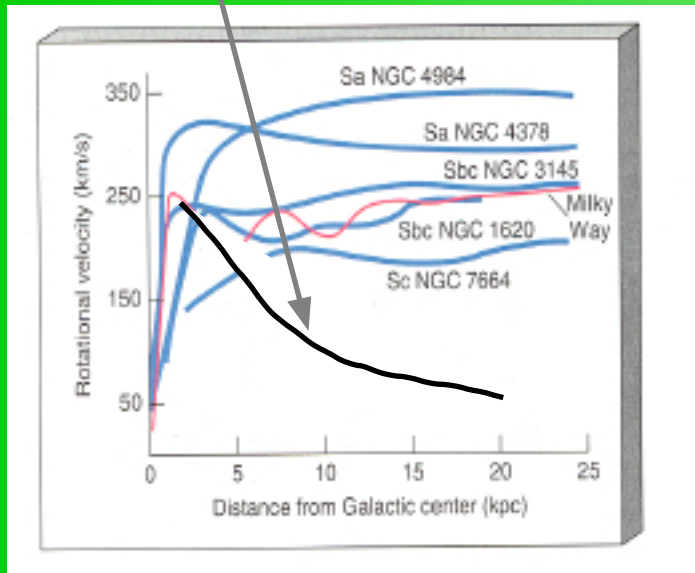
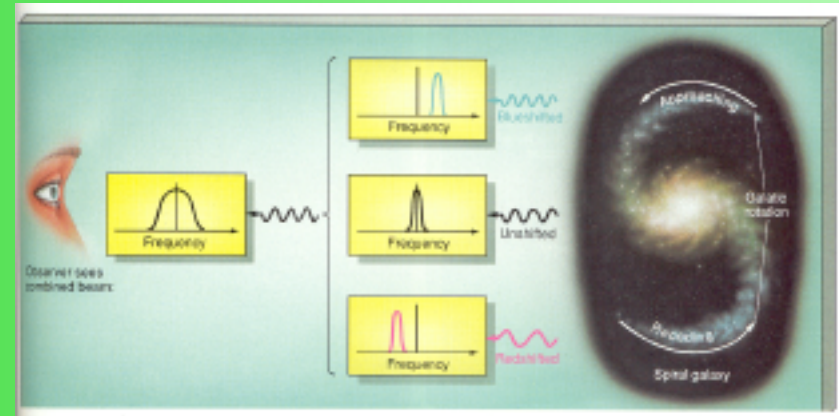


# La matière noire dans les galaxies

## Courbes de rotation des galaxies

Si la masse d'une galaxie était principalement concentrée dans son noyau (supposé à symétrie sphérique), la vitesse de rotation de la galaxie à la distance  $r$  du centre s'exprimerait par

$$V(r) = \sqrt{\frac{GM_{\text{noyau}}}{r}}$$



Ce n'est pas le cas!

--> Il existe de la matière non-lumineuse  
(telle que  $M(r) \propto r$ , soit  $V(r) = \text{cste}$ !)

Quelle est la nature de cette matière?

objets compacts

(trous noirs,  
naines blanches, brunes ou rouges)?

particules élémentaires classiques

(neutrinos massifs) ?

ou exotiques

(WIMPS) ?

**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

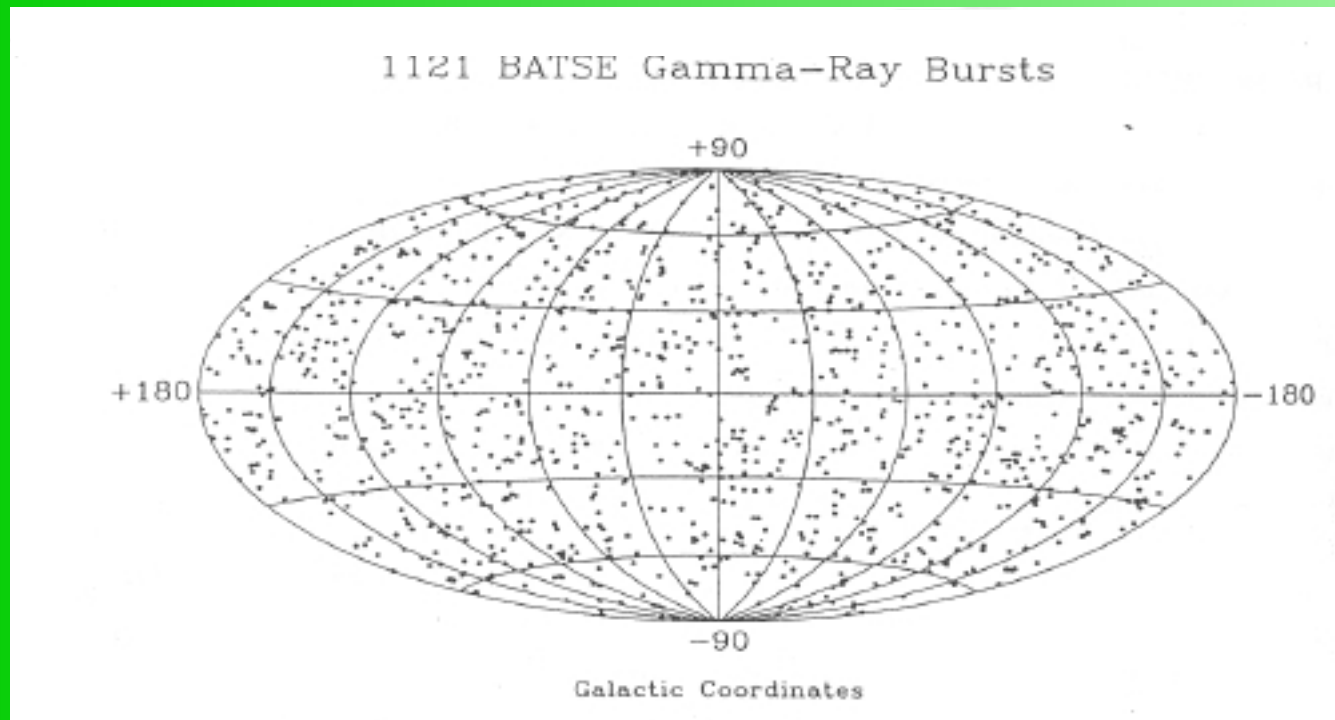
- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

**Problème 7: L'origine des sursauts gamma**

## L'origine des sursauts gamma



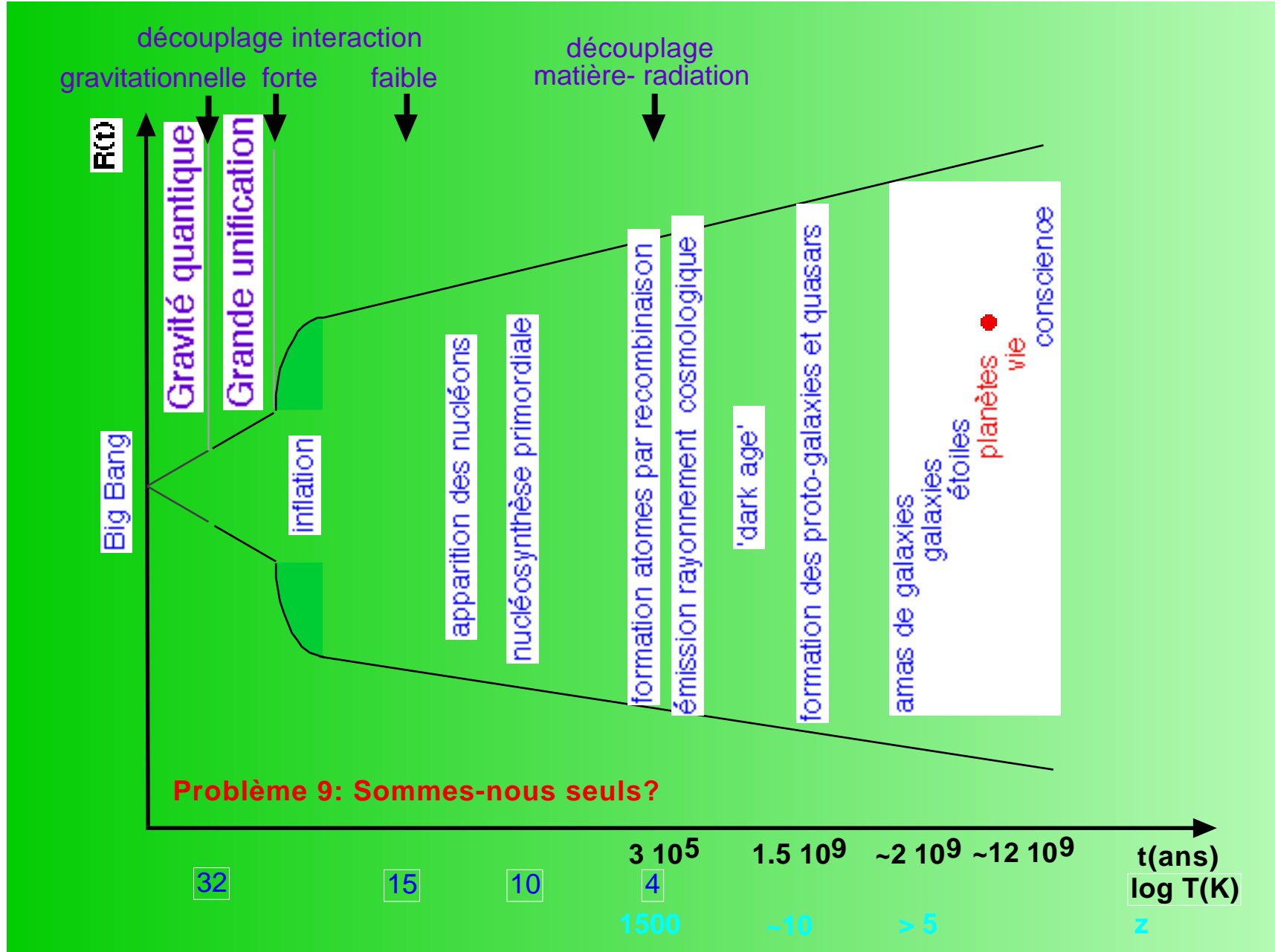
Propriétés essentielles:

- Pas de récurrence
- Isotropie parfaite
- Emission de rayonnement aussi intense que  $10^9$  galaxies pendant 1 à 2 secondes!
- Emission non seulement de rayonnement gamma, mais aussi X et visible

Les galaxies hôtes ont désormais été identifiées comme des objets à grand redshift ( $z > 1$ ).

**Le sursaut gamma provient-il**

d'une hypernova (étoile de masse  $> 30 M_{\odot}$  formant un trou noir en rotation)?  
de la fusion de 2 étoiles à neutrons...?



**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

**Problème 7: L'origine des sursauts gamma**

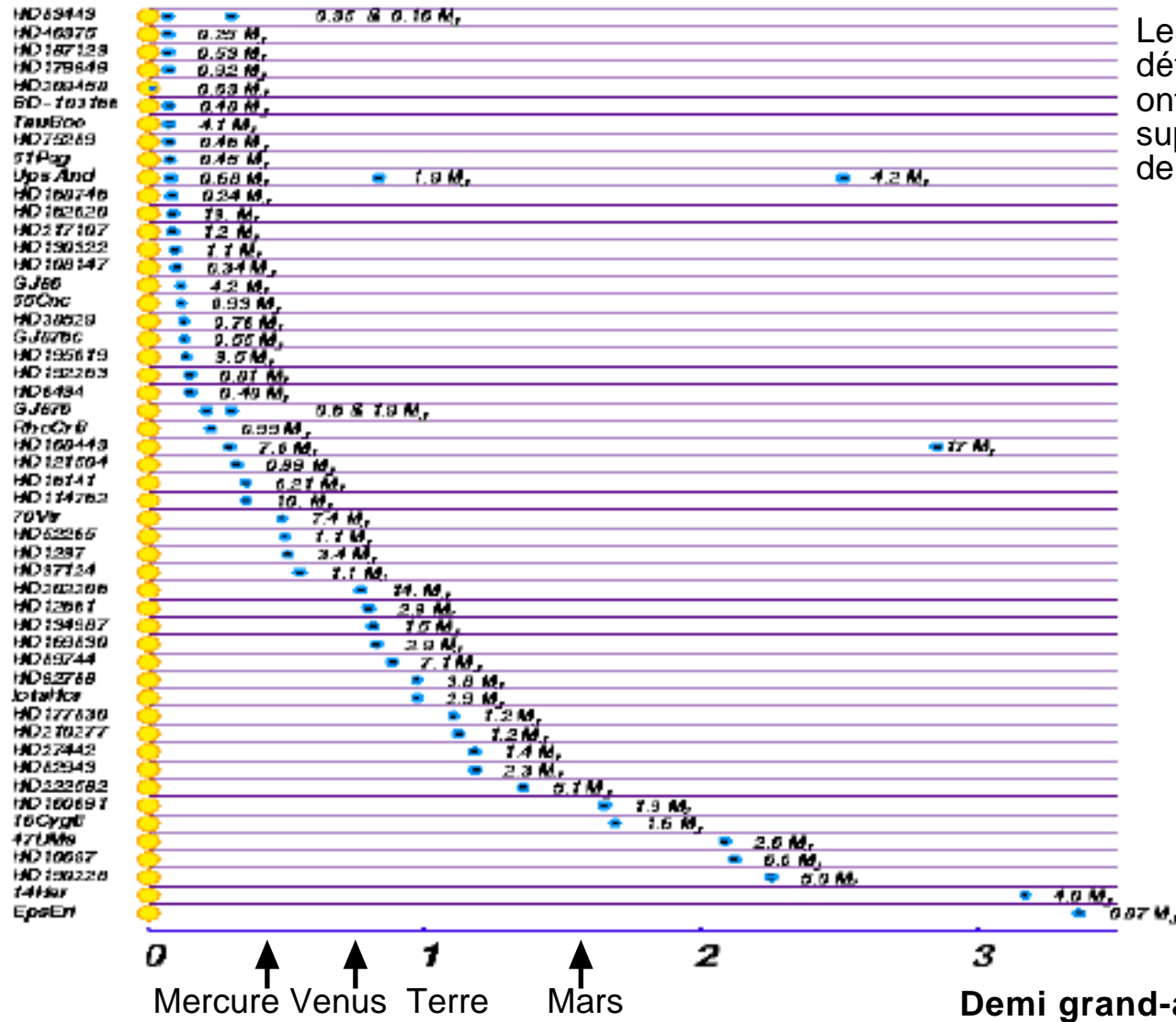
**Problème 8: Sommes-nous seuls?**

La détection des planètes telluriques et des signatures de la vie



## Sommes-nous seuls?

### La détection d'exoplanètes telluriques et des signatures de la vie (I)



Les exoplanètes détectées à ce jour ont toutes une masse supérieure à celle de Saturne.

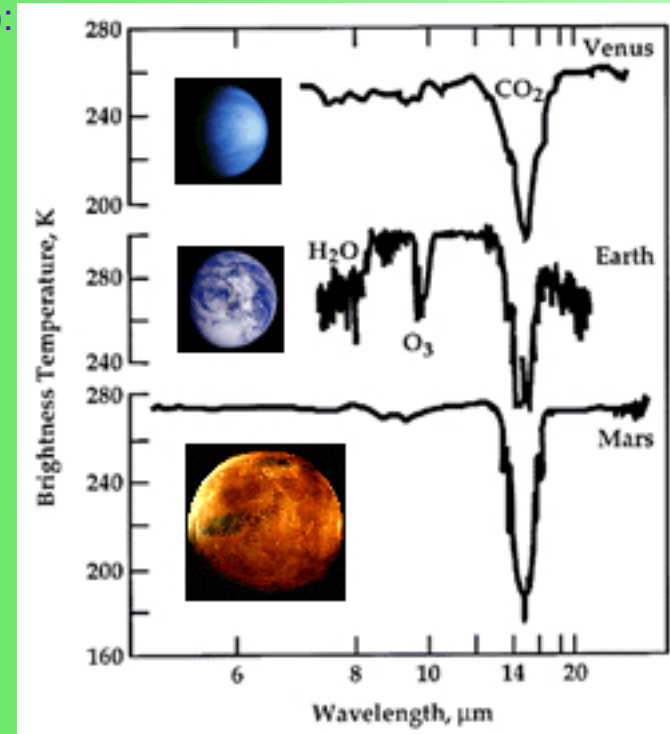
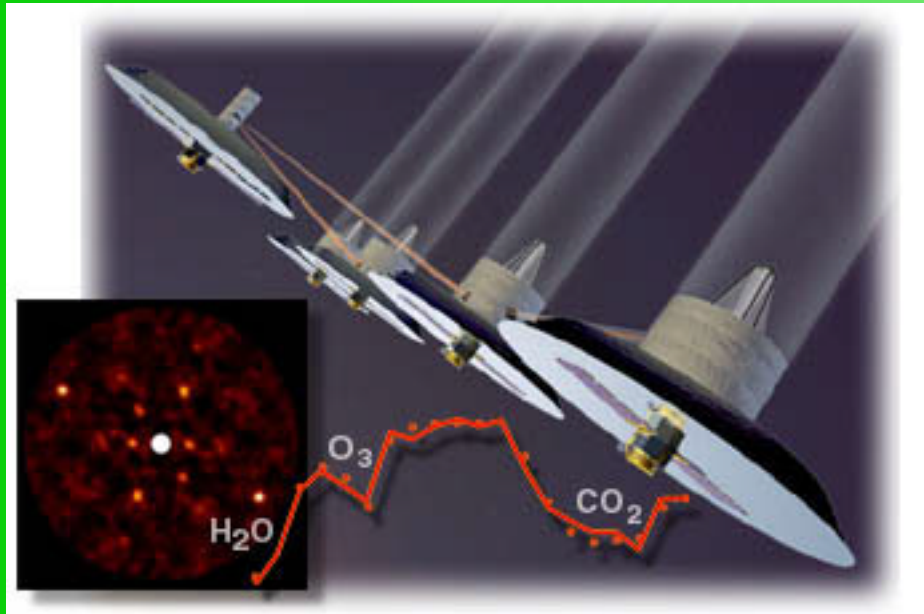
## Sommes-nous seuls?

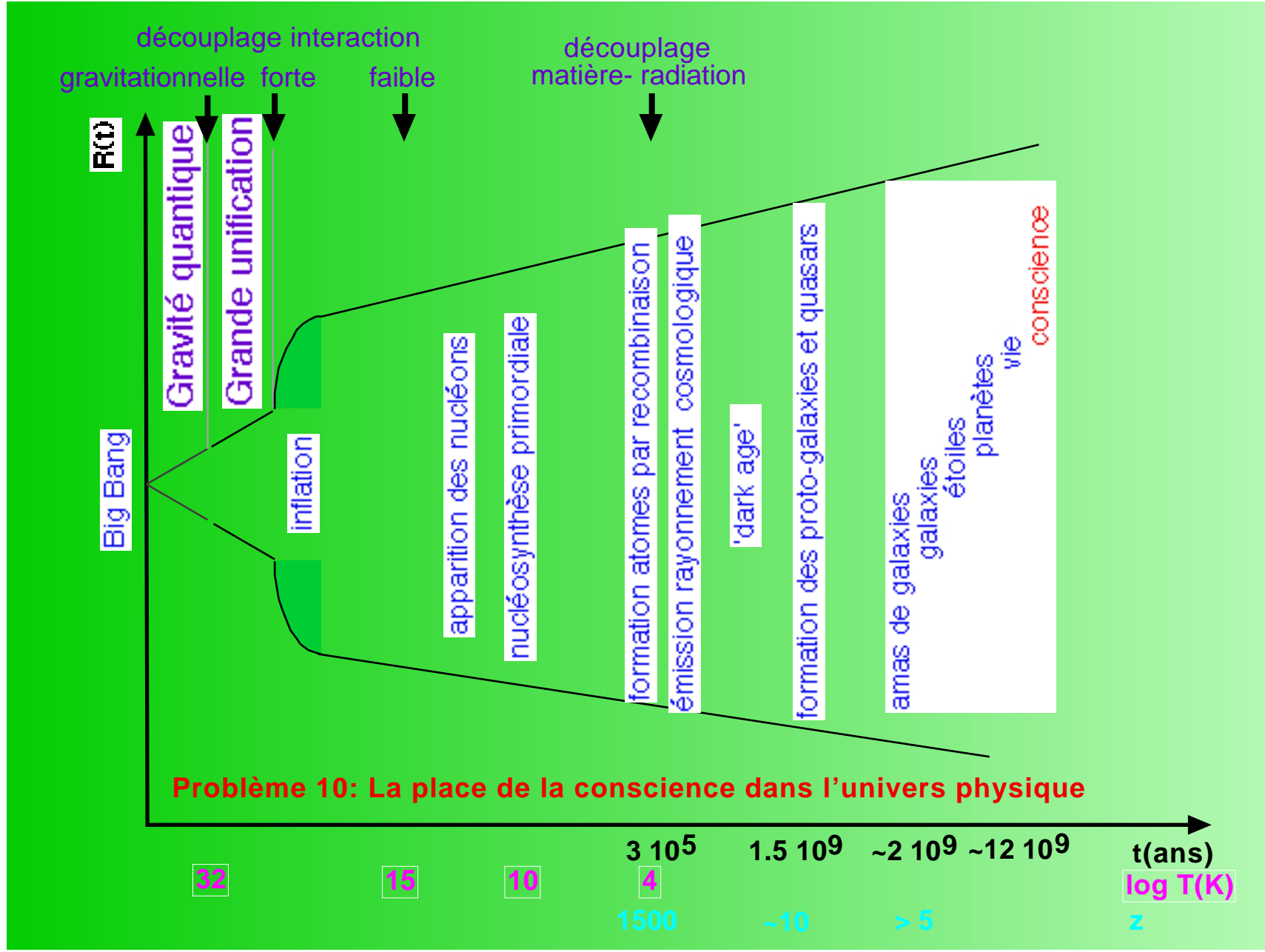
### La détection d'exoplanètes telluriques et des signatures de la vie (II)

Missions Darwin (ESA) et Terrestrial Planet Finder (NASA):

vers 2020, détection d'exoplanètes telluriques, de leur atmosphère possible et d'éventuelles signatures de la vie dans ces atmosphères (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O et O<sub>3</sub>)

par interférométrie infrarouge en mode soustractif.





**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

**Problème 7: L'origine des sursauts gamma**

**Problème 8: Sommes-nous seuls?**

La détection des planètes telluriques et des signatures de la vie

**Problème 9: La place de la conscience dans l'univers physique**

## La place de la conscience dans l'univers

Question passionnée depuis que Descartes a rejeté l'observateur (et sa conscience) hors du cadre de la physique expérimentale.

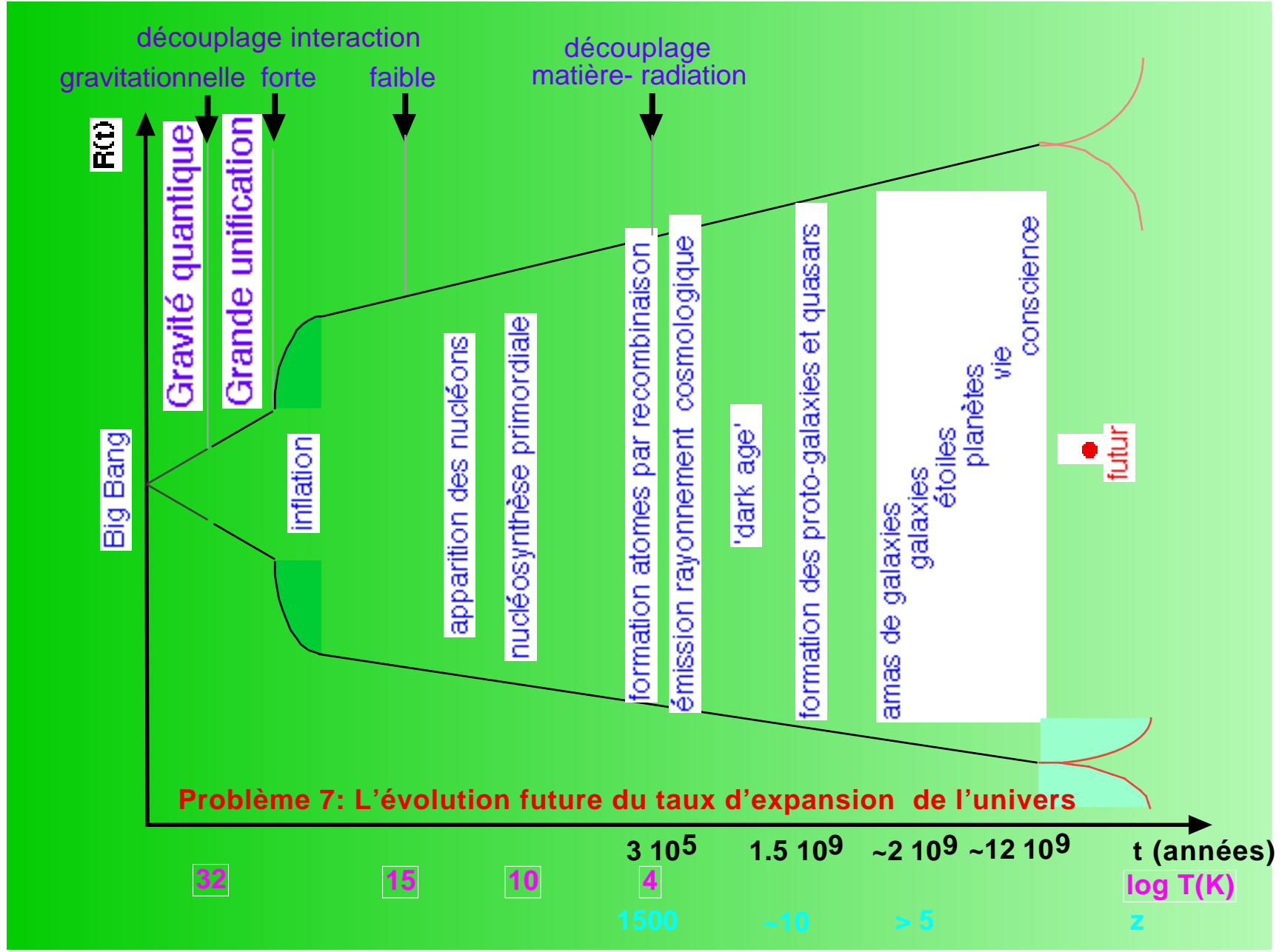
L'étude de la conscience a dès lors été l'apanage de la théologie ou des neurosciences.

L'approche cartésienne a fait ses preuves dans l'étude du monde matériel. Cependant, la description d'un ordinateur en termes de sa quincaillerie seule, et des courants qui la parcourent, est une description fondamentalement limitée de sa nature.

Les **mystiques, surtout orientaux**, ont été très loin dans **l'étude expérimentale de la conscience** par l'introspection et la méditation.

Leurs écrits **suggèrent l'existence** d'une **loi de conservation pour la conscience**, que notre physique pourrait sans doute un jour devoir incorporer au même titre que **la conservation de l'énergie ou du moment cinétique**.

Relation possible avec le **principe anthropique**...



**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

**Problème 7: L'origine des sursauts gamma**

**Problème 8: Sommes-nous seuls?**

La détection des planètes telluriques et des signatures de la vie

**Problème 9: La place de la conscience dans l'univers physique**

**Problème 10: I. L'évolution future du taux d'expansion de l'univers**

- II. La topologie de l'univers
- III. Le problème de la constante cosmologique
- IV. Le problème de l'âge de l'univers

## Paramètres cosmologiques

Les équations de Friedmann-Lemaître décrivant l'évolution du facteur d'échelle de l'univers  $R(t)$  (~'rayon') permettent d'identifier les paramètres nécessaires à la description de l'évolution de l'univers

$$\frac{\dot{R}^2}{R^2} - \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{c^2}{3} = -\frac{kc^2}{R^2}$$

$$\frac{\ddot{R}}{R} = \frac{-8\pi G}{6} \rho + \frac{c^2}{3}$$

où l'on suppose la contribution des particules relativistes négligeable.

Les paramètres impliqués sont donc:

- la **densité de l'univers** . On la représente souvent sous la forme réduite  $\Omega = \rho/\rho_c$  où  $\rho_c$  est la densité critique de l'univers, soit  $\rho_c = 3H_0^2/8\pi G = h^2 1.8710^{-29} \text{ gcm}^{-3}$ , où  $h$  est la valeur de  $H_0$  en unités de 100 km/s/Mpc;
- $H_0 = \dot{R} / R$  est la valeur actuelle de la '**constante**' de Hubble;
- la **constante cosmologique** , dont les unités sont (longueur)<sup>-2</sup>;
- le **paramètre de décélération**  $q$ , où  $q_0 = -H_0^{-2} \ddot{R} / R$  est sans dimensions.

Dans l'hypothèse d'une constante cosmologique nulle, les équations de Friedmann relient la densité de l'univers à sa **géométrie**, exprimée par sa **courbure**  $k$ . Dans ce cas, le devenir de l'univers est également fixé univoquement:

$k = 0$ , soit  $\Omega = 1$ : univers plat, avec  $R$  tendant vers l'infini et  $\dot{R}$  asymptotiquement vers zero;


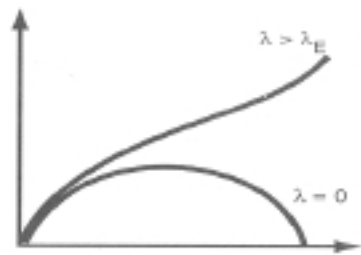
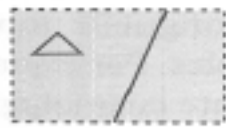
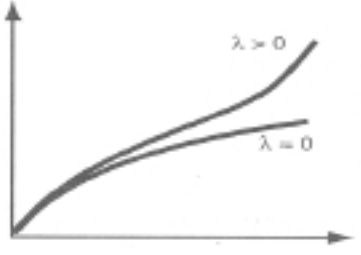

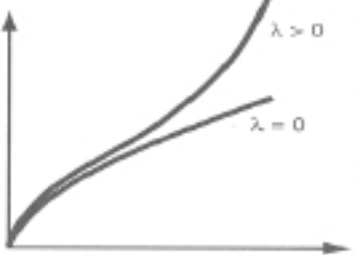
$k < 0$ , soit  $\Omega < 1$ : univers à courbure négative, avec  $R$  tendant vers l'infini;

$k > 0$ , soit  $\Omega > 1$ : univers à courbure positive, avec  $R$  atteignant un maximum, puis tendant vers

zéro.



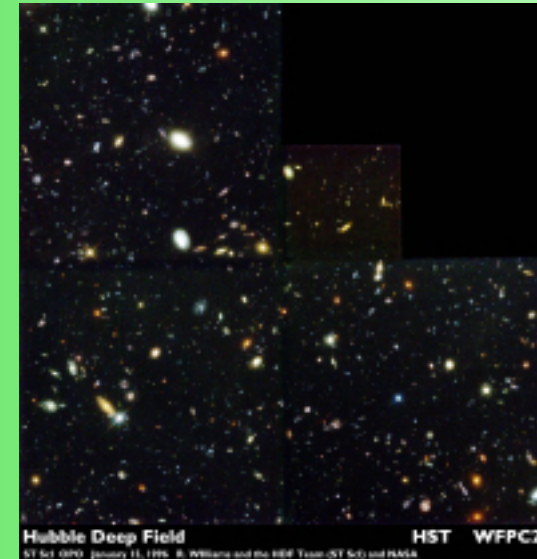
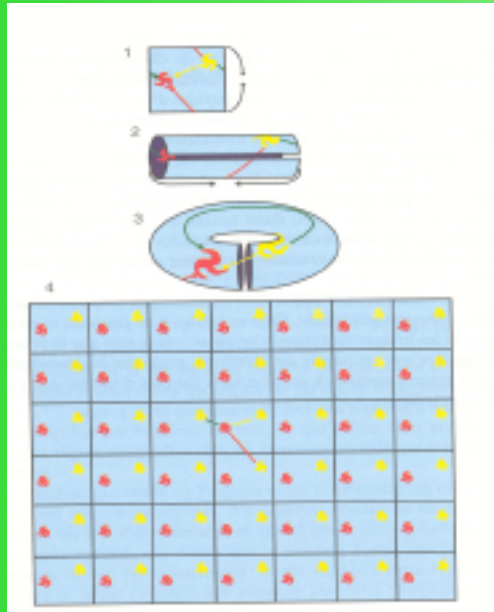
## Evolution de l'univers pour différentes valeurs de la courbure $k$ et de la constante cosmologique $\Lambda$

courbure	topologie	dynamique	destin
$K > 0$  elliptique	fini		ouvert si $\lambda$ grand  fermé
$K = 0$  Euclidien	fini ou infini		ouvert
$K < 0$  hyperbolique	fini ou infini		ouvert

## La topologie de l'univers

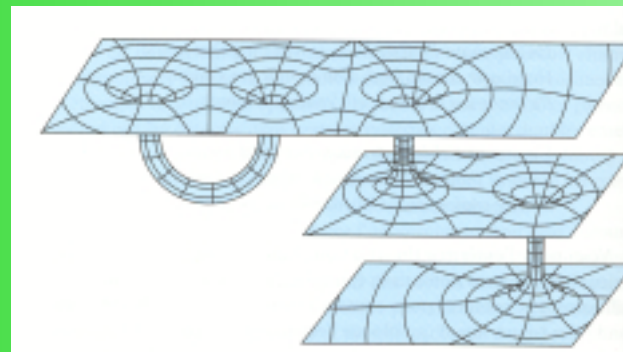
On notera que les équations de Friedmann décrivant l'évolution du facteur d'échelle de l'univers  $R(t)$  (~'rayon') ne contiennent aucune information sur la **topologie** de l'univers (à ne pas confondre avec sa **géométrie** décrite par la seule courbure).

En particulier, l'univers est-il monoconnexe ou multiconnexe?



Existe-t-il des trous de ver?

Comment réconcilier une telle éventualité avec la préservation de la causalité?



## Mesure des paramètres cosmologiques (I)

Deux méthodes sont possibles pour la détermination des paramètres cosmologiques (courbure  $k$  ou densité de matière  $\Omega$ , constante cosmologique  $\Lambda$ ):

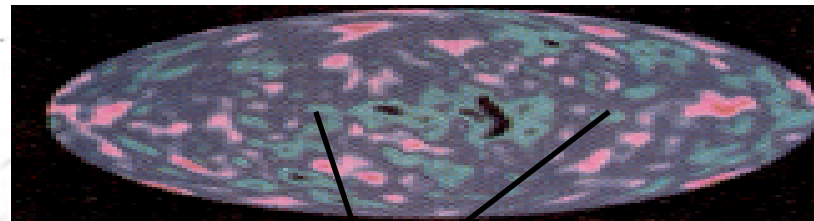
- L'observation de supernovae très lointaines
- L'observation du spectre d'autocorrélation spatiale des inhomogénéités du rayonnement cosmologique à 2.7 K

## Mesure des paramètres cosmologiques (II)

### Mesure de l'autocorrélation spatiale des inhomogénéités du rayonnement cosmologique

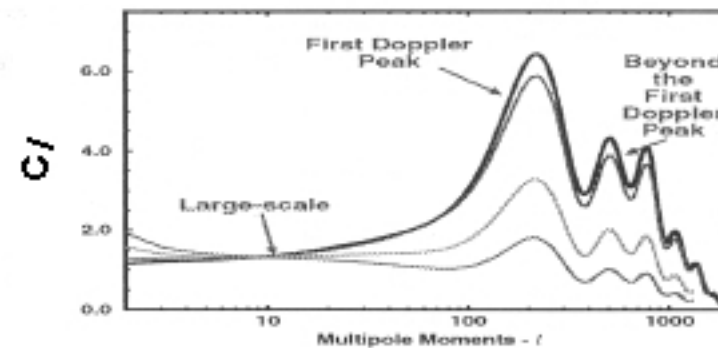
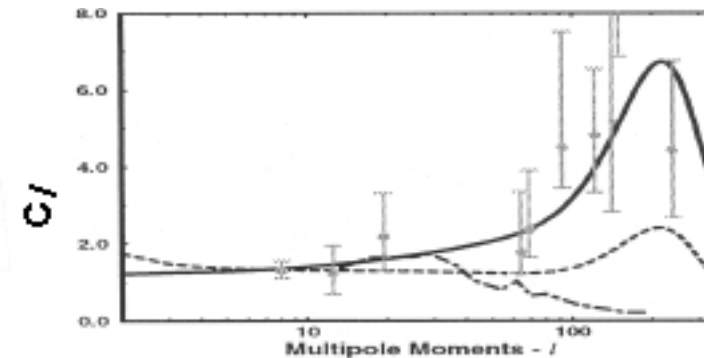
Développement en série de la fonction d'autocorrélation spatiale des inhomogénéités du rayonnement cosmologique

$b$  = hauteur 1er pic  
 $H$  = rapport 1er / 3e pic  
 = espacement pics et vallées



$$C(\theta) = \left\langle \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{x}) \frac{\Delta T}{T}(\mathbf{x}') \right\rangle_{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|=\theta}$$

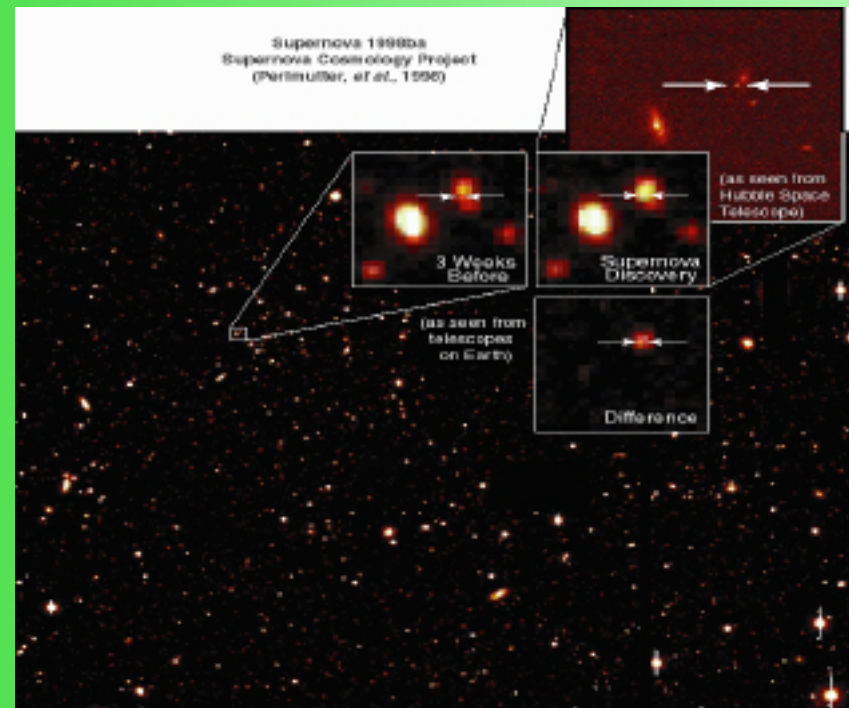
$$= \frac{1}{4\pi} \sum (2l+1) C_l P_l(\cos \theta)$$



## Mesure des paramètres cosmologiques (III) Observation de supernovae très lointaines

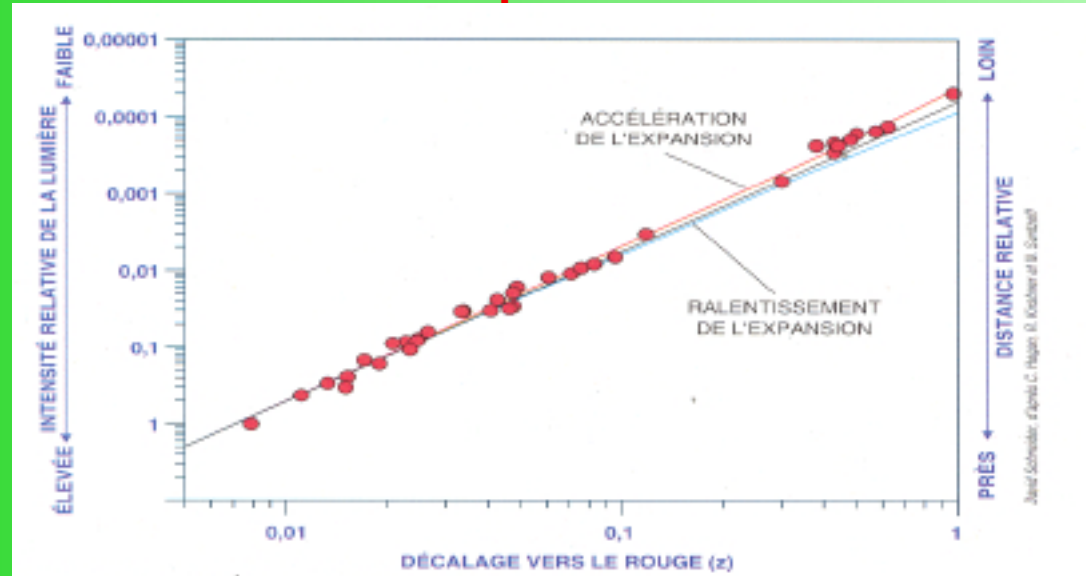
Les supernovae de type Ia (explosion de naines blanches) possèdent un éclat intrinsèque supposé connu: ce sont des **chandelles standard** qui permettent de déterminer la **distance** de la galaxie hôte, dont on mesure par ailleurs le **redshift**. On peut ainsi déterminer l'évolution de la vitesse de récession en fonction de la distance, et ainsi mettre en évidence d'éventuels **écarts à la loi de Hubble**, qui suppose un taux d'expansion constant. On peut donc mesurer l'**évolution du taux d'expansion en fonction de la distance** (c'est-à-dire du **temps**), soit déterminer si l'expansion de l'univers ralentit, accélère, ou reste constante.

Il faut cependant une certaine dose de 'foi' pour accepter la validité de ces détections très difficiles, à la limite de nos capacités actuelles.



## Mesure des paramètres cosmologiques (IV) L'accélération de l'expansion

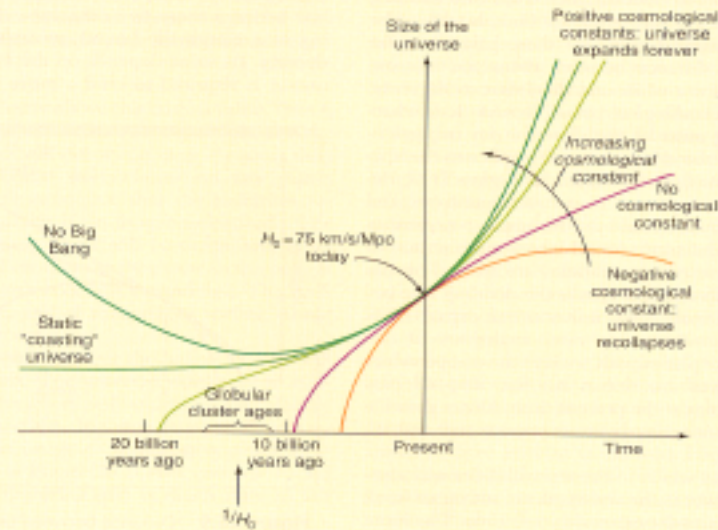
Les observations de supernovae de type Ia dans des galaxies très lointaines ( $z \sim 1$ ) conduisent à la conclusion que **l'expansion de l'univers accélère!**



Ceci implique l'existence d'une 'force' responsable de cette accélération:

Notre ignorance est totale quant à sa nature profonde!

Nous masquons notre ignorance sous divers vocables tels **constante cosmologique, quintessence...**



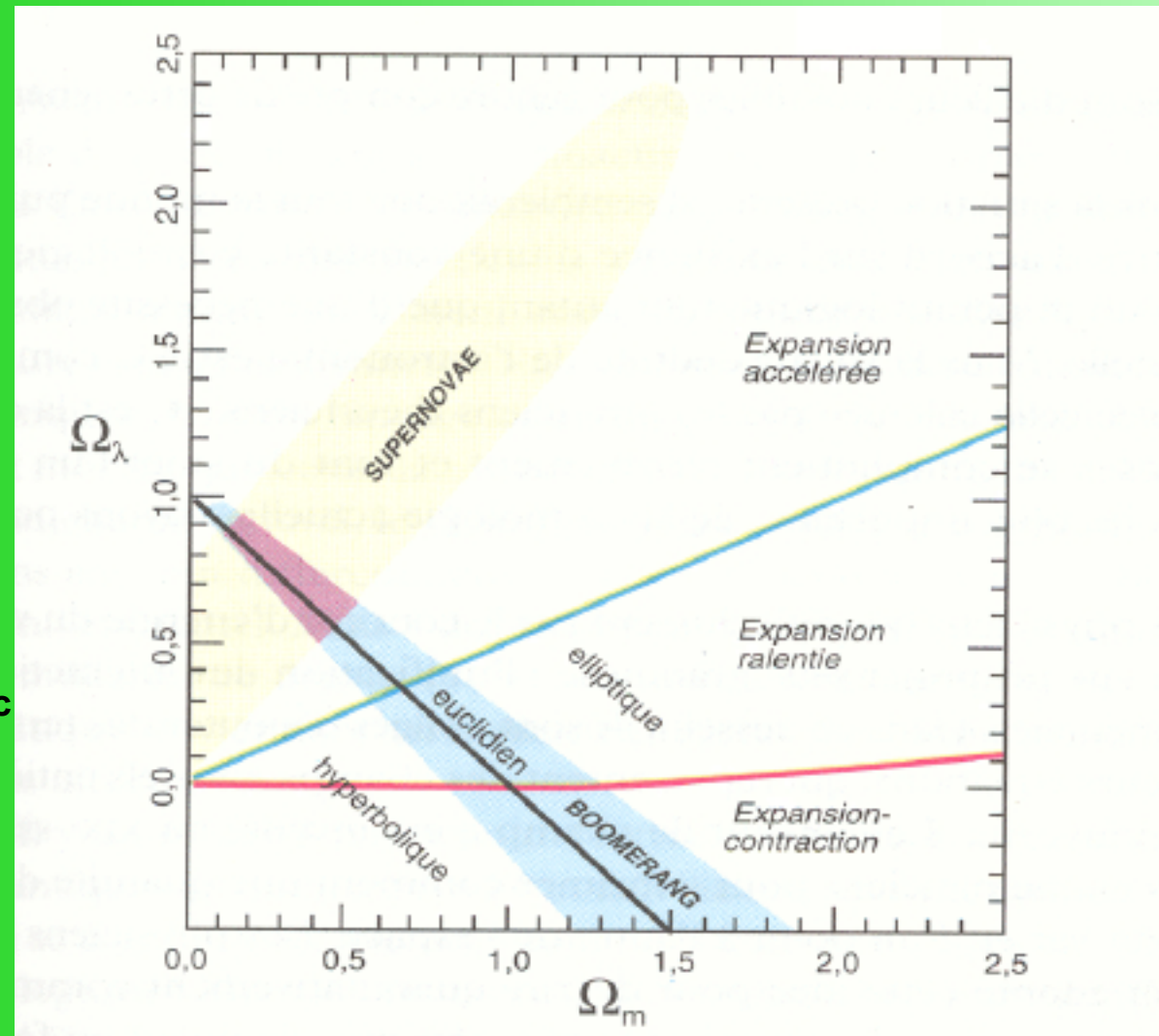
## Mesure des paramètres cosmologiques (V)

$$H_0 = 60 \pm 10 \text{ km/s/Mpc}$$

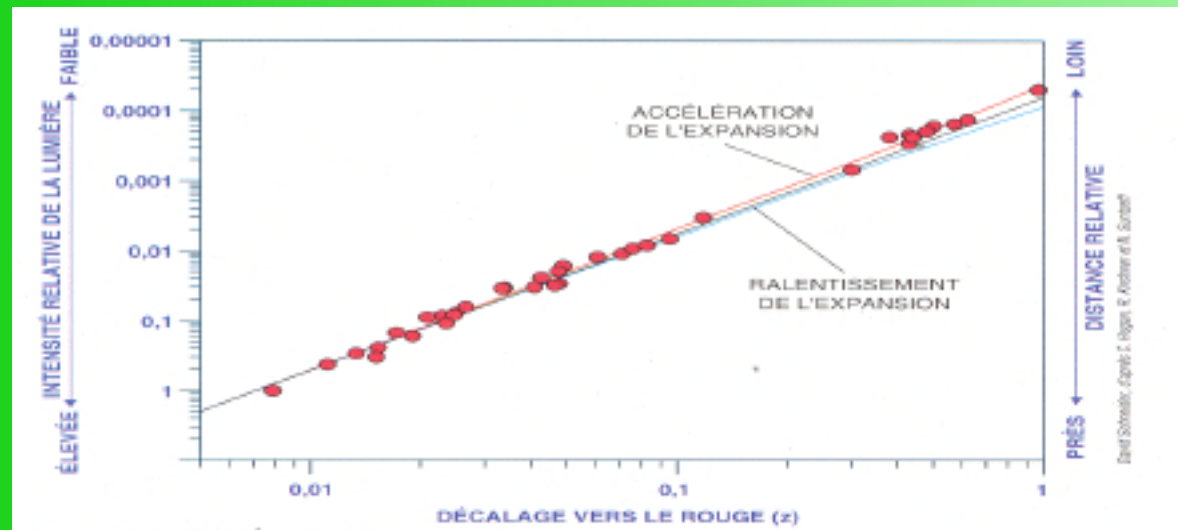
$$\Omega_m = 0.3 \pm 0.2$$

$$\Omega_\lambda = 0.7 \pm 0.2$$

$$q_0 = -3/4 \pm 1/4$$



## Accélération de l'expansion et constante cosmologique



L'accélération de l'expansion de l'univers nécessite l'existence d'une force répulsive s'opposant à la gravité: cette conclusion ressuscite le concept de constante cosmologique.

$$\text{En effet: } q_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{c^2}{3H_0^2} \right)$$

où  $q_0$  est le paramètre de décélération,

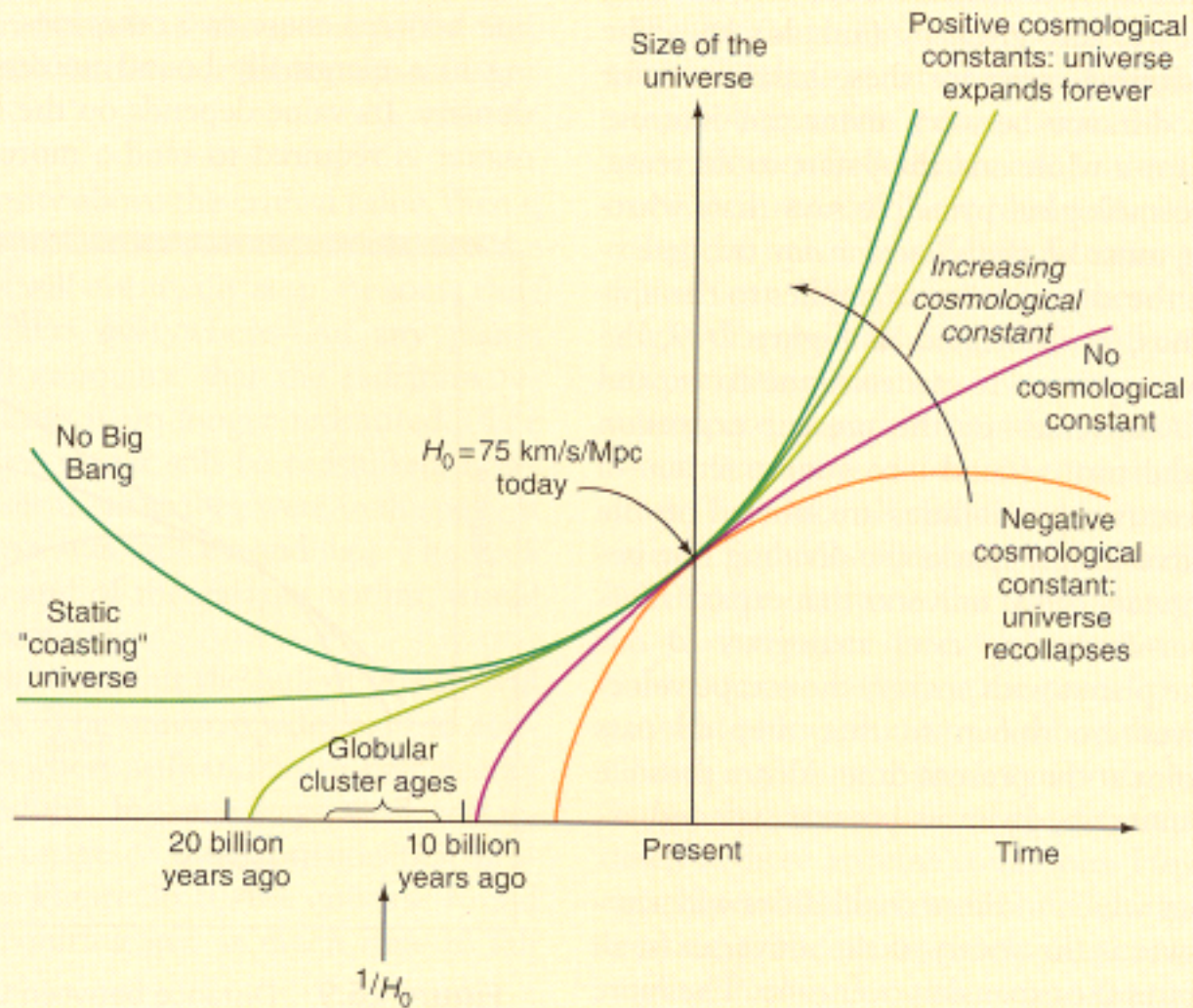
$$\text{soit } R(t) = R(t_0) \left[ 1 + (t - t_0) h_0 - \frac{1}{2} (t - t_0)^2 h_0^2 q_0 \right]$$

La gravité seule ( $q_0 > 0$ ) ne peut conduire qu'à  $q_0 > 0$ ,  
alors que les mesures de SN Ia fournissent  $q_0 = -3/4 \pm 1/4$ .

Or  $q_0 < 0$  implique  $\Lambda > 0$



## Evolution de l'univers pour différentes valeurs de la constante cosmologique $\Lambda$



## Le problème de la constante cosmologique

La constante cosmologique est équivalente à l'énergie du vide en théorie quantique des champs. D'après les équations de Friedmann-Lemaître, on peut en effet identifier une densité d'énergie à la constante cosmologique, via l'expression:

$$\rho = \frac{c^2}{8\pi G} \Lambda$$

Les densités d'énergie du vide associées aux interactions fortes et électrofaibles valent respectivement (dans les unités naturelles où  $\hbar = c = 1$ )

$$\rho_{\text{forte}} = 1 \text{ GeV}^4$$

$$\rho_{\text{électrofaible}} = 10^8 \text{ GeV}^4,$$

tandis que la mesure astrophysique fournit en fait

$$\rho_0 = \rho + \rho_{\text{forte}} + \rho_{\text{électrofaible}}$$

Les observations de SN la fournissent

$$\rho_0 = 10^{-47} \text{ GeV}^4.$$

Les **55 ordres de grandeur** séparant la valeur mesurée  $\rho_0$  des valeurs microscopiques  $\rho_{\text{forte}}$ ,

$\rho_{\text{électrofaible}}$  impliquent un ajustement extrêmement fin de la densité d'énergie  $\rho$  associée à la constante cosmologique.

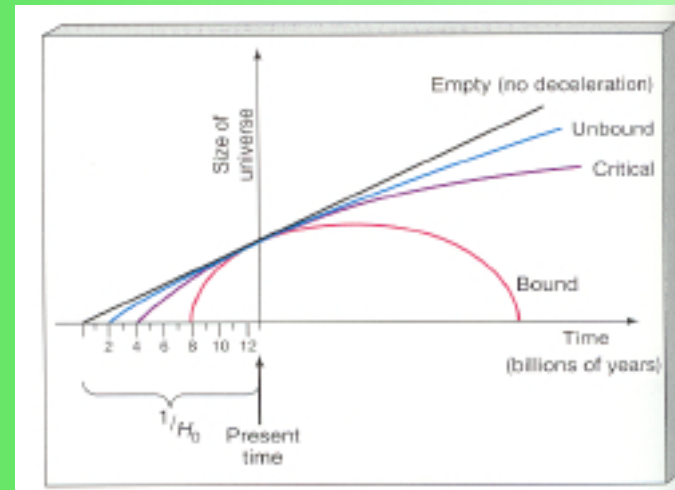
C'est le **problème de la constante cosmologique**.

## Le problème de l'âge de l'univers

On peut relier l'âge de l'univers à la constante de Hubble  $H_0$ , à la densité réduite de l'univers  $\Omega$ , et à la constante cosmologique  $\Lambda$ .

Dans le cas le plus simple (univers plat  $\Omega = 1$  et constante cosmologique  $\Lambda = 0$ ), on obtient la relation  $T_0 = H_0^{-1}$ .

Des relations plus complexes sont obtenues si  $\Omega < 1$ .



Le **problème de l'âge de l'univers** est que les valeurs de l'âge obtenues en adoptant la valeur expérimentale  $H_0 = (60 \pm 10) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  étaient systématiquement trop petites par rapport à l'âge des étoiles d'amas globulaires, soit 10 à 12 milliards d'années.

En présence d'une constante cosmologique non nulle, la relation plus complexe entre  $T_0$  et  $H_0^{-1}$  fait que **l'âge de l'univers est désormais estimé à environ 15 milliards d'années**, compatible avec l'âge des amas globulaires.

**Problème 1: La singularité du Big Bang**

**Problème 2: L'asymétrie matière-antimatière**

**Problème 3: Le problème de l'horizon lors de l'émission du rayonnement cosmologique**

**Problème 4: La formation des proto-galaxies**

- I. Des inhomogénéités du rayonnement cosmologique aux proto-galaxies
- II. 'Top-down' ou 'bottom-up'?

**Problème 5: L'évolution des galaxies**

- I. Pourquoi les galaxies actuelles ne sont-elles plus actives?
- II. Comment se forment les bras spiraux?

**Problème 6: La matière noire dans les galaxies et amas de galaxies**

- I. Lentilles gravitationnelles
- II. Courbes de rotation des galaxies

**Problème 7: L'origine des sursauts gamma**

**Problème 8: Sommes-nous seuls?**

La détection des planètes telluriques et des signatures de la vie

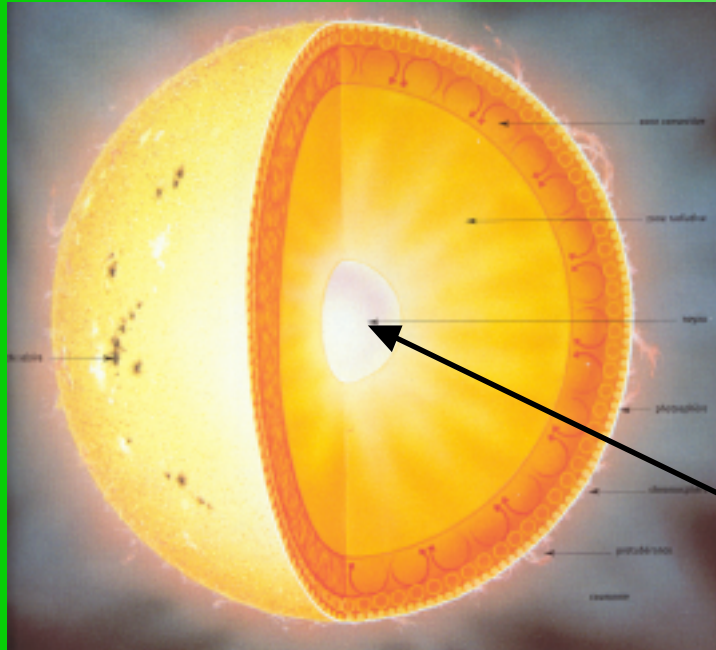
**Problème 9: La place de la conscience dans l'univers physique**

**Problème 10: I. L'évolution future du taux d'expansion de l'univers**

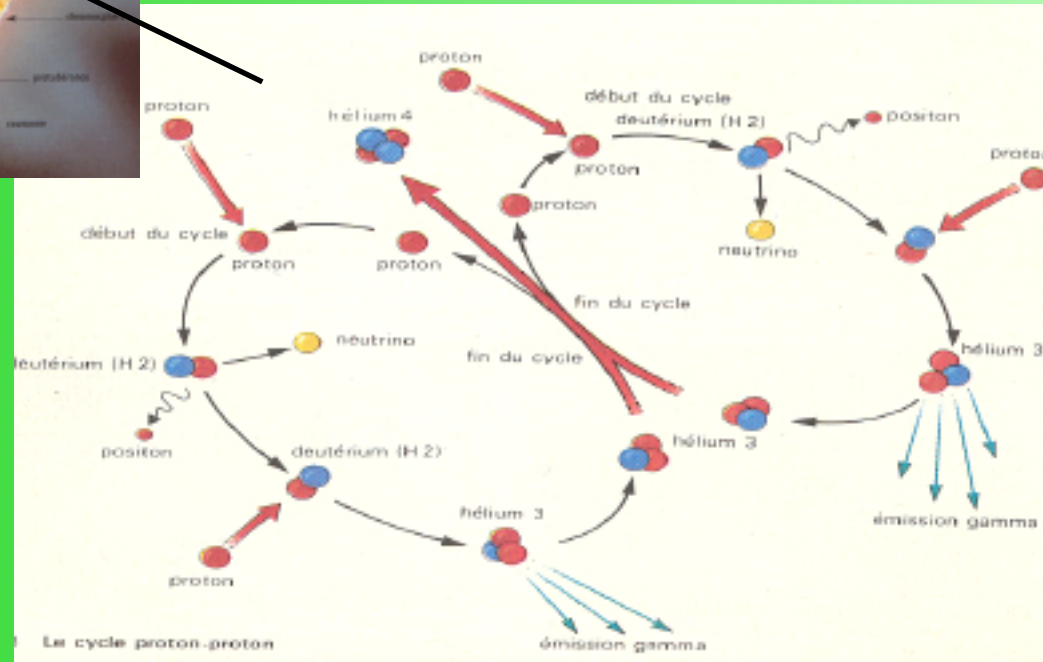
- II. La topologie de l'univers
- III. Le problème de la constante cosmologique
- IV. Le problème de l'âge de l'univers

**Ex-Problème: Les neutrinos solaires**

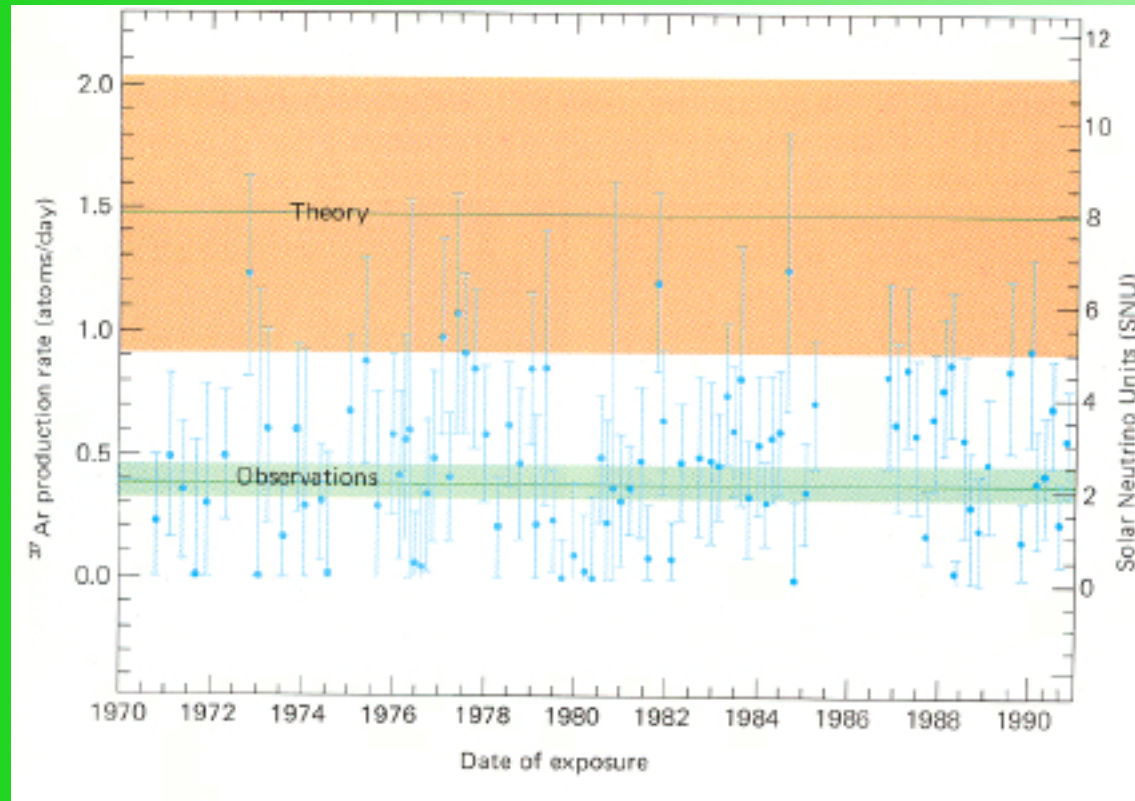
## L'(ex-)problème des neutrinos solaires (I)



Les **neutrinos** sont produits par le **cycle proton-proton** dans le cœur du soleil, et se propagent vers la surface quasiment sans interagir avec la matière solaire



## L'(ex-)problème des neutrinos solaires (II)



Le **problème des neutrinos solaires** est apparu dès 1970 lorsque la **première expérience de détection des neutrinos solaires** (Davis, 400 000 litres de perchloroéthylène  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  enfouis à 1.6 km sous le sol dans une ancienne mine d'or au Dakota du Sud), par la réaction  $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$  **ne détecte qu'un tiers environ du flux de neutrinos prédit** par les modèles solaires.

## L'(ex)-problème des neutrinos solaires (III)

La résolution du paradoxe est venu de la **détection de neutrinos mu et tau** en provenance du soleil (**expérience de Super Kamiokande - Japon - et Sudbury - Canada**), confirmation de l'**oscillation des neutrinos entre les 3 saveurs** entre le moment de leur émission dans le coeur du soleil et leur détection sur la Terre..

### Le modèle standard des particules

	Charge	Particule	Masse	Particule	Masse	Particule	Masse
	(e)		(MeV)		(MeV)		(MeV)
Quarks	+2/3	u (up)	5	c (charm)	1500	t (top)	170 000
	-1/3	d (down)	7	s (strange)	~ 150	b (bottom)	~ 5 000
Leptons	-1	e	0.511	$\mu$	105.7		1784
	0	$\nu_e$	$< 7 \cdot 10^{-6}$	$\nu_\mu$	$< 0.25$		$< 31$

Cette **oscillation des neutrinos entre les 3 saveurs** implique que les **neutrinos ont une masse**.

Ceci est le **premier signe de la physique au-delà du modèle standard**.

La Cosmologie n'est ni Science ni Mythe;  
le malheur veut qu'en se voulant Science,  
elle crée des Mythes!

J. Reignier,  
paraphrasant B. Pascal  
avril 2003, ULB



A suivre...

## Pour en savoir plus:

- Unsolved problems in Astrophysics**, J.N. Bahcall & J.P. Ostriker (éds.), Princeton Univ. Press (1997)
- De l'éclipse totale du soleil au problème de la constante cosmologique**, J.M. Gérard, Physicalia, vol. 22, No. 1, p. 3 (2000)
- Naissance et histoire du cosmos**, La Recherche hors série No 1 (avril 1998)
- Dossiers cosmologie**, Pour la Science (mars 1999 et mars 2001)
- The weak interaction in nuclear, particle and astrophysics**, K. Grotz, H.V. Klapdor, Adam Hilger (1990)
- First principles of cosmology**, E.V. Linder, Addison-Wesley (1997)
- Le rayonnement cosmologique**, M. Lachièze-Rey, E. Gunzig, Masson (1995)
- L'univers chiffonné**, J.P. Luminet, Fayard (2001)
- Our evolving universe**, M.S. Longair, Cambridge Univ. Press (1996)
- From quarks to the cosmos**, L.M. Lederman & D.N. Schramm, Scientific American Library (1995)
- Science et Bouddhisme**, B.A. Wallace, Calmann-Lévy (1998)