

Deuxième cours

4/ Où en sommes-nous? Un nouveau grand récit de l'univers

4.1 Le nouveau trépied de la physique, trois théories à deux constantes (c,G) , (h,c) , (h,k)

■ La relativité générale (c,G)

- ❑ Covariance générale = invariance par difféomorphisme (changement quelconque de référentiel)
- ❑ Principe d'équivalence
 - {changement quelconque de référentiel} équivalent localement à {champ gravitationnel adéquat}
 - {champ gravitationnel quelconque} équivalent localement à {changement adéquat de référentiel}
- ❑ La relativité générale est une théorie géométrodynamique de la gravitation
- ❑ La précession du périhélie de Mercure, qui mettait en échec la théorie de Newton, est expliquée par la RG

❑ Effacement de la frontière cinématique/dynamique

❑ Naissance de la cosmologie scientifique

- La relativité générale théorie de la gravitation appliquée à l'univers dans son entier
- Épisode de la constante cosmologique (de Sitter)
- Données observationnelles
- Le modèle cosmologique standard, "le big bang" (Friedman, Lemaître)

❑ Échec de la tentative d'unification gravitation/électromagnétisme

- Dualisme champ/point matériel
- Incompatibilité relativité générale/quanta
- L'impossible "mariage du marbre et du bois"

■ La théorie quantique des champs (h, c)

- ❑ Aux plus hautes énergies disponibles (10^4 GeV) qui sont très basses devant l'énergie de Planck (10^{19} GeV), la gravitation est négligeable
- ❑ La théorie quantique des champs réalise le mariage de la théorie des quanta et de la relativité restreinte.
- ❑ Le nouveau concept fondamental est celui de champ quantique, un champ relativiste d'opérateurs de création ou d'annihilation de particules ou d'anti-particules, qui unifie les aspects ondulatoires et corpusculaires : les particules élémentaires ne sont pas des points matériels, ce sont des quanta de quadri-moment, excitations élémentaires, irréductibles et bien localisées de champs quantiques

❑ Physique des interactions fondamentales

- À partir des **symétries** on détermine
 - Les champs quantiques fondamentaux
 - Le **lagrangien** (propagateurs et couplages)
 - L'intégrale de chemins
- **Développement perturbatif** (diagrammes et amplitudes de Feynman)
- Procédure de **renormalisation** et critère de **renormalisabilité**

❑ Le modèle standard des interactions non gravitationnelles

- QED
- QCD
- Théorie **électrofaible**

■ La statistique quantique (h, k)

□ Physique statistique quantique

- Cadre général de la **modélisation** des systèmes comportant un grand nombre de constituants, et impliqués dans des phénomènes où les effets quantiques ne peuvent être négligés.
- Statistique des **ensembles** (Gibbs, Einstein)
- Statistiques de **Bose-Einstein** et de **Fermi-Dirac**

□ Interprétation moderne de la mécanique quantique

- **Décohérence** : transition quantique/classique par l'intermédiaire de la statistique quantique
- Statistique quantique et théorie de la **mesure** en physique quantique

4.2 Le mécanisme et le boson BEH

■ Le défi de l'unification électrofaible

- ❑ Unification possible des interactions faible et électromagnétique (**unification électrofaible**) avec le modèle des **bosons intermédiaires** (MBI) massifs
- ❑ Mais sans l'invariance de jauge, le MBI n'est pas **renormalisable***
- ❑ Avec l'invariance de jauge, le MBI est renormalisable mais il faut que les **bosons intermédiaires soient sans masse**
- ❑ Pour qu'existe une théorie à symétrie de jauge dans l'interaction faible, il faut que **tous les constituants élémentaires (les fermions) soient sans masse**
- ❑ **Or des bosons intermédiaires sans masse et des fermions sans masse sont en contradiction flagrante avec l'expérience**

*** Une théorie est dite renormalisable si toutes les intégrales divergentes qui entrent dans les calculs théoriques des observables physiques peuvent être rendues finies au prix d'une redéfinition, dépendant de l'énergie, de ses paramètres fondamentaux**

Qu'est-ce que la masse?

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} \text{ énergie cinétique}$$

En mécanique classique, il n'y a pas de matière sans masse; il n'y a pas d'énergie sans mouvement; il n'y a pas de limite à la vitesse à laquelle on peut accélérer une particule

$$E^2 = \mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4$$

$$\mathbf{p} = 0 \Rightarrow E_0 = mc^2$$

$$m_v = \frac{m}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}};$$

$$E_v = m_v c^2; \mathbf{p}_v = m_v \mathbf{v}$$

$$m = 0 \Leftrightarrow v = c$$

$$m = 0 \Leftrightarrow E = |\mathbf{p}|c$$

En mécanique relativiste, il n'y a pas de matière sans énergie; même au repos, une particule de masse m a une énergie (potentielle) égale à mc^2 (c est la vitesse de la lumière); la vitesse de la lumière est indépassable; la masse d'une particule peut être nulle, auquel cas, cette particule se déplace, comme la lumière, quelque soit le repère, à la vitesse c

- **Qu'est-ce que le vide en théorie quantique des champs?**
 - ❑ Qu'est-ce qu'un **champ quantique**?
 - Un champ **relativiste** défini en chaque point de l'espace-temps
 - Un champ **quantique** d'opérateurs d'émission ou d'absorption d'un quantum d'énergie-impulsion (une particule ou une **antiparticule**)
 - ❑ Dualité ondes/particules
 - **Ondes** dans l'**espace-temps**
 - **Particules** dans l'espace des états du champ définis par le nombre de quanta d'énergie-impulsion
 - ❑ **Le vide quantique**: état fondamental (**d'énergie minimum**) : état à **zéro particule**.

■ Conséquences des inégalités de Heisenberg

- ❑ Quand le **nombre de particules** est bien **déterminé**, par exemple dans le vide quantique où ce nombre est nul, **l'état spatio-temporel** du champ est **indéterminé**
- ❑ Quand **l'état spatio-temporel du champ** est bien **déterminé**, par exemple dans un état cohérent tel qu'il est produit avec un laser, le **nombre de particules** est **indéterminé**
- ❑ Dans l'espace-temps, le vide quantique est assimilable à un **milieu complexe**, siège de **fluctuations du ou des champs quantiques**
- ❑ Dans le cas où ces fluctuations ne se moyennent pas à zéro, le vide peut être assimilé au **milieu « possédant une certaine dissymétrie »** (Curie), dans lequel peut naître le phénomène de l'émergence de la masse, **c'est ce qui se produit avec le mécanisme BEH**

□ **« D'où l'on peut voir qu'il y autant de différence entre le néant et l'espace vide, que de l'espace vide au corps matériel ; et qu'ainsi l'espace vide tient le milieu entre le matière et le néant. »** *Réponse de Blaise Pascal au très révérend père Noël, recteur de la Société de Jésus, à Paris, 29 octobre 1647 Pascal, Oeuvres complètes, La Pléiade, p 384, ed. 1998*

□ **Dans le vide stable, la valeur moyenne du champ BEH est différente de zéro.** Quand une particule se propage dans ce milieu, elle acquiert de la masse

Mécanisme et boson de Higgs en bande dessinée



Une salle emplies de physiciens bavardant tranquillement est l'analogue d'un espace rempli de champ de Higgs



Un scientifique renommé entre dans la salle, créant une perturbation quand il se déplace et attire à chaque pas un groupe d'admirateurs



Ceci accroît la résistance à son mouvement; en d'autres termes, il acquiert une masse tout comme les particules se déplaçant dans le champ de Higgs



Si une rumeur traverse la salle

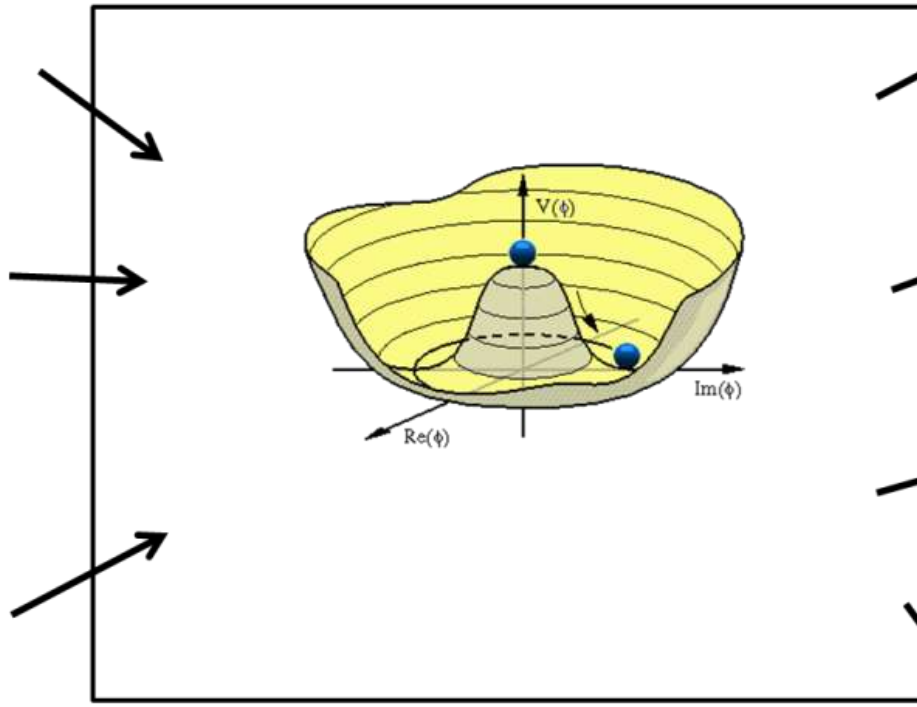


Elle provoque le même type attroupement, mais cette fois entre les scientifiques eux-mêmes: un tel attroupement est l'analogue de la particule de Higgs

Champ BEH
 $(\phi^+, \phi^0); (\bar{\phi}^0, \phi^-)$

Fermions droits
et gauches sans
masse

4 bosons
électrofaibles
sans masse



Un boson BEH
massif

Des fermions
massifs

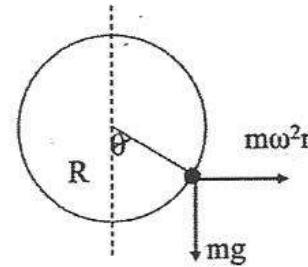
Un photon
sans masse
des bosons
faibles, W^+, W^- ,
 Z^0 massifs

Une théorie
électrofaible
renormalisable !

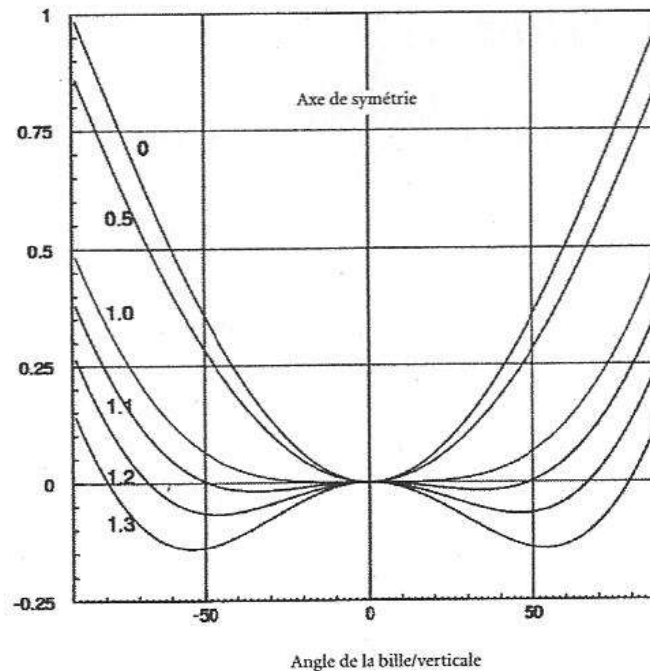
La magie du chapeau mexicain

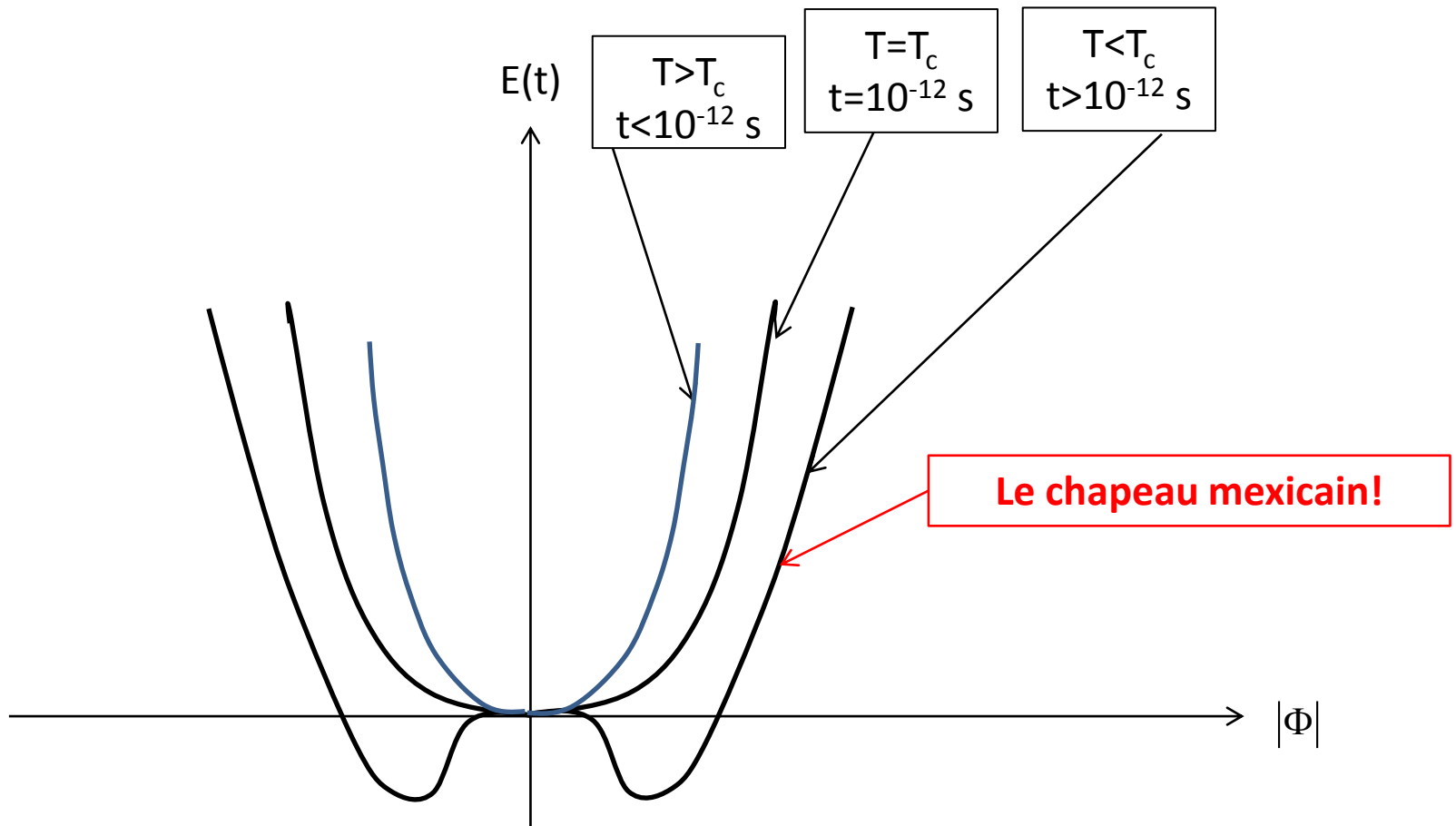
Une petite expérience

D'après Michel Davier, *LHC: enquête sur le boson de Higgs*, Le Pommier/Cité des sciences et de l'industrie, Paris 2008



Énergie potentielle de la bille

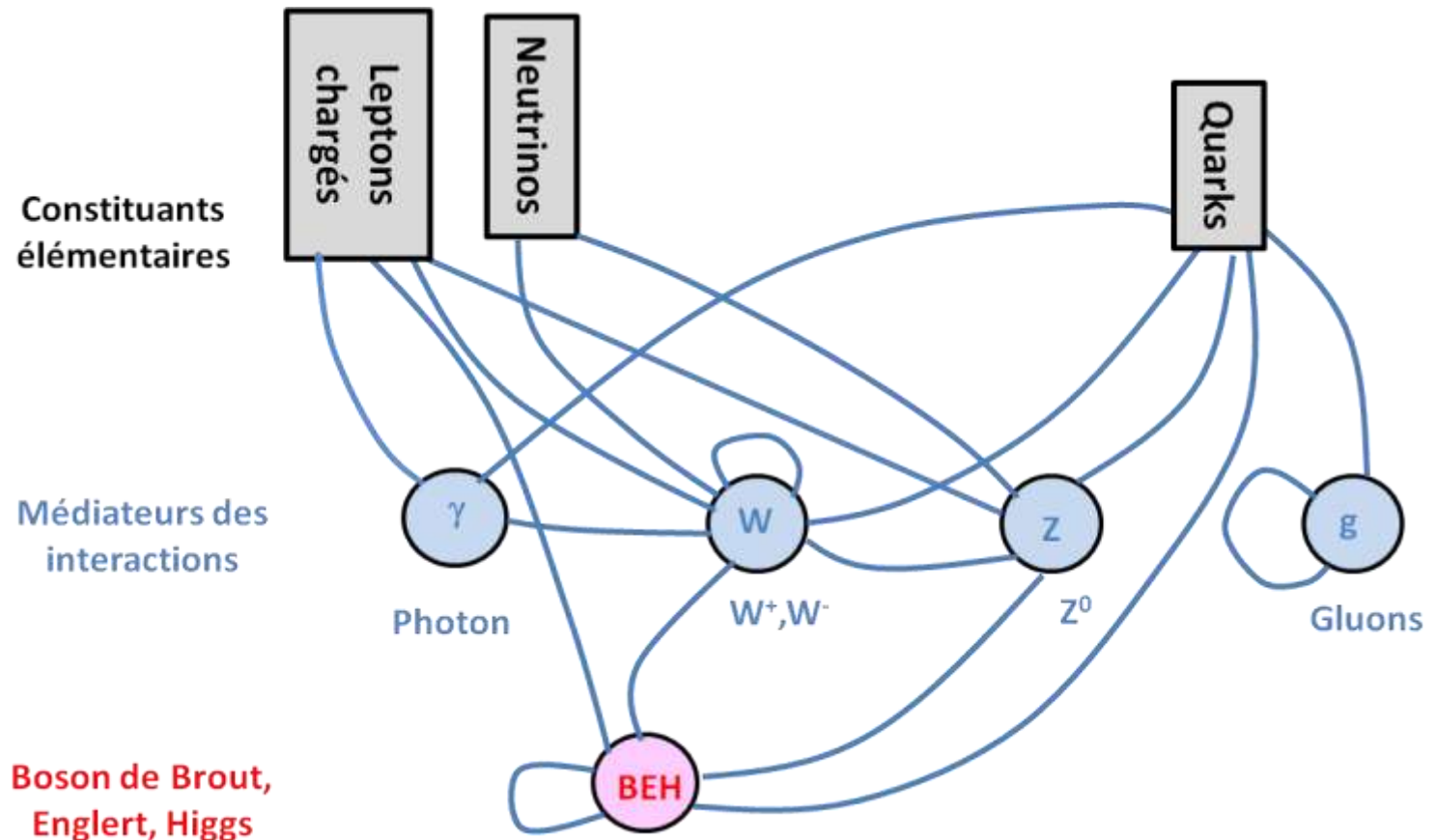




**Transition induite par le mécanisme BEH 10^{-12} s
après le « Big bang »**

Three generations of matter (fermions)				
	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge bosons

- Les constituants élémentaires de la matière: les quarks, et les leptons
- les médiateurs des interactions: les bosons de jauge



Le boson BEH, la clé de voûte du modèle standard

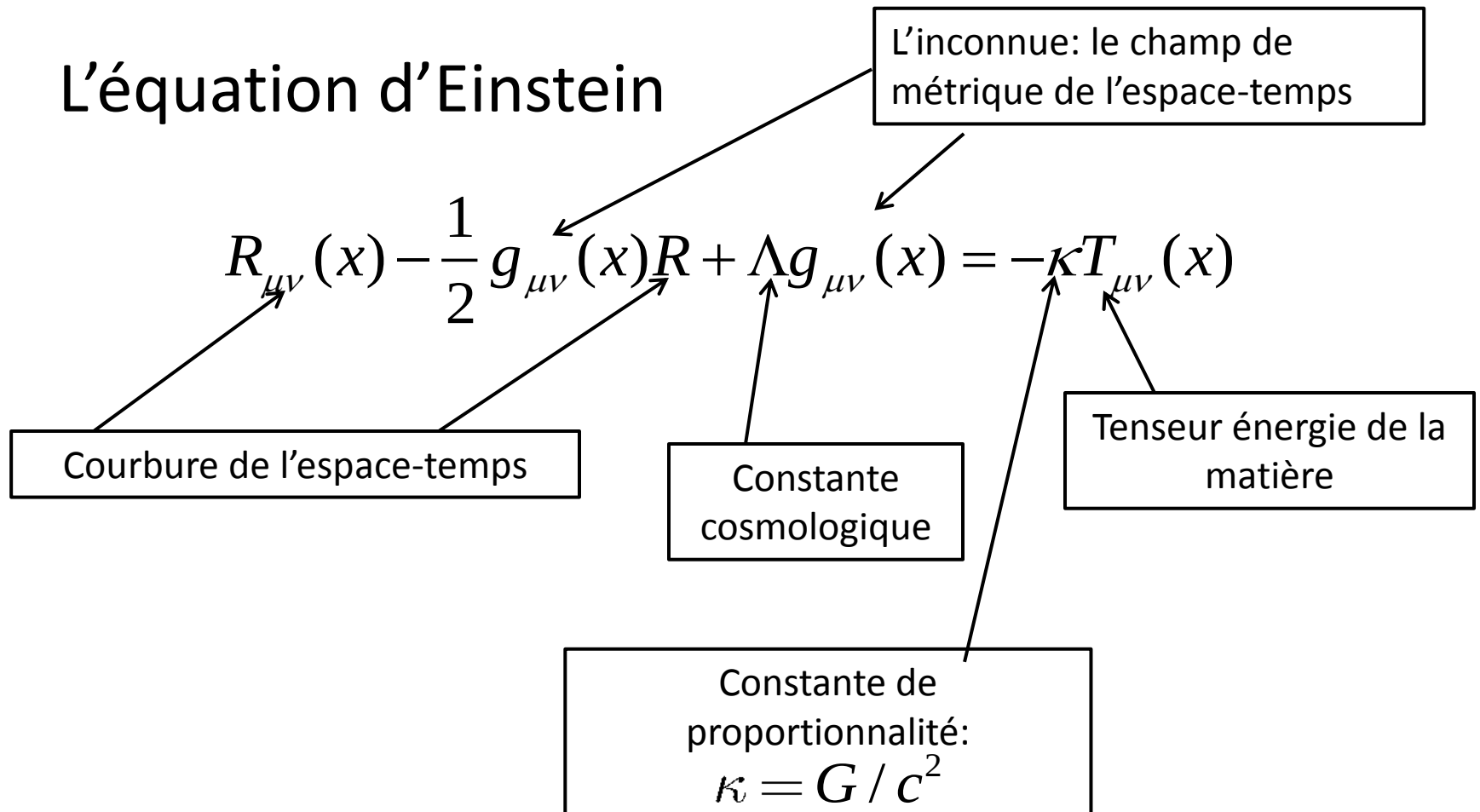
4.3 Le modèle standard de la cosmologie

(du modèle simple du big bang à la cosmologie de la concordance)



L'équation d'Einstein sur une locomotive relativiste
(Merci à Gérard et Marie-Françoise Rumèbe pour la photo)

L'équation d'Einstein



La matière dicte à l'espace-temps comment il doit se courber: l'espace temps dicte à la matière comment elle doit se mouvoir

■ Le modèle cosmologique du « big bang »

□ Le modèle « simple » du big bang (**Lemaître, Friedman, Robertson, Walker**)

- Récession des galaxies lointaines, loi de Hubble
- Abondance relative des éléments légers (nucléosynthèse primordiale)
- Rayonnement diffus de fond cosmologique (RDFC) à environ 3 degrés Kelvin, détecté en 1965
- **Constante cosmologique mise à zéro**

□ Les difficultés du modèle du big bang

- Trop grande **homogénéité** du RDFC (problème d'**horizon**)
- Problème de la **platitude spatiale** de l'univers (problème d'ajustement fin)
- **Scénario de l'inflation** imaginé pour lever ces difficultés

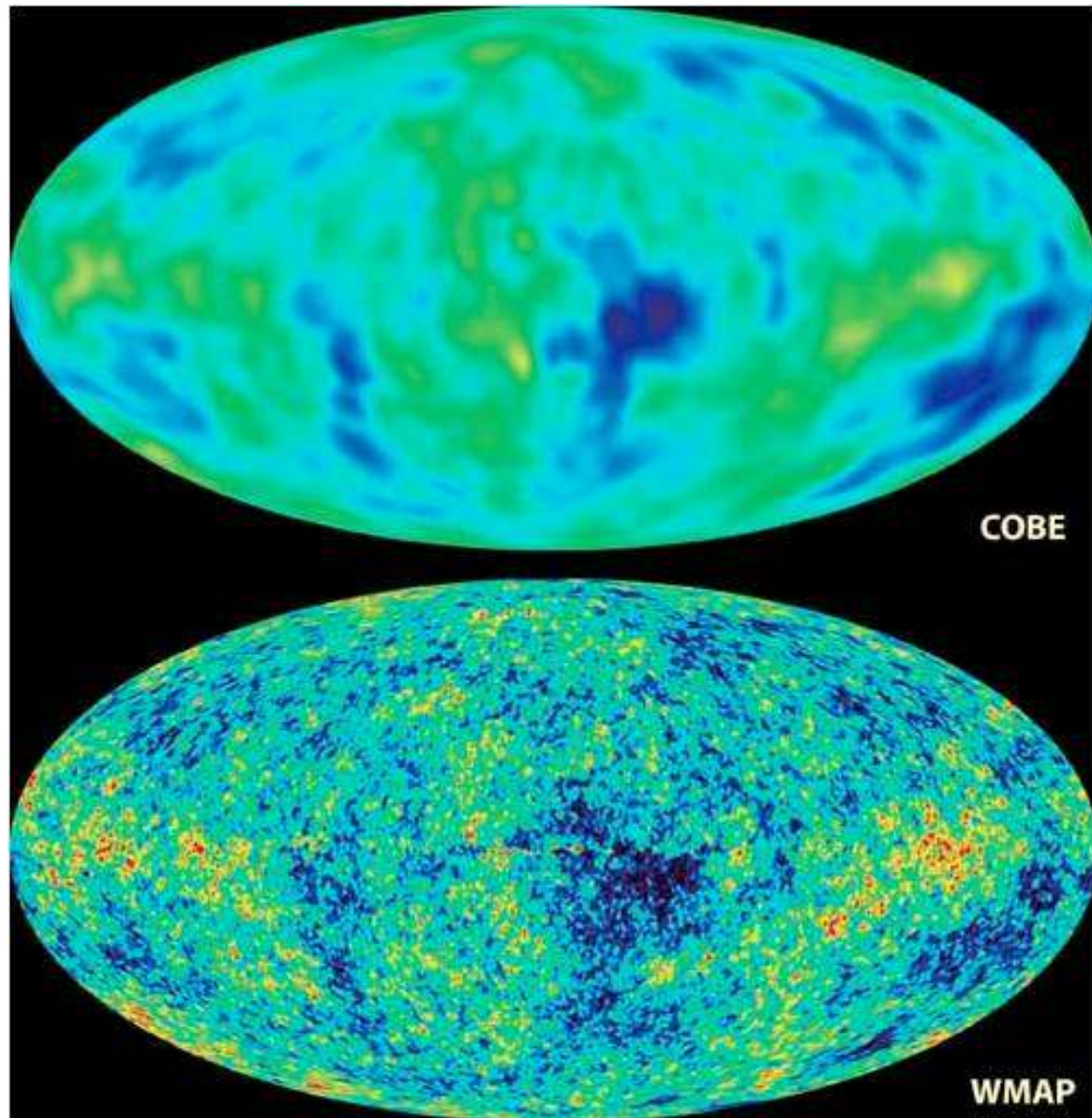
■ Le dépassement du modèle standard du big bang, la « concordance » et la redécouverte de la constante cosmologique

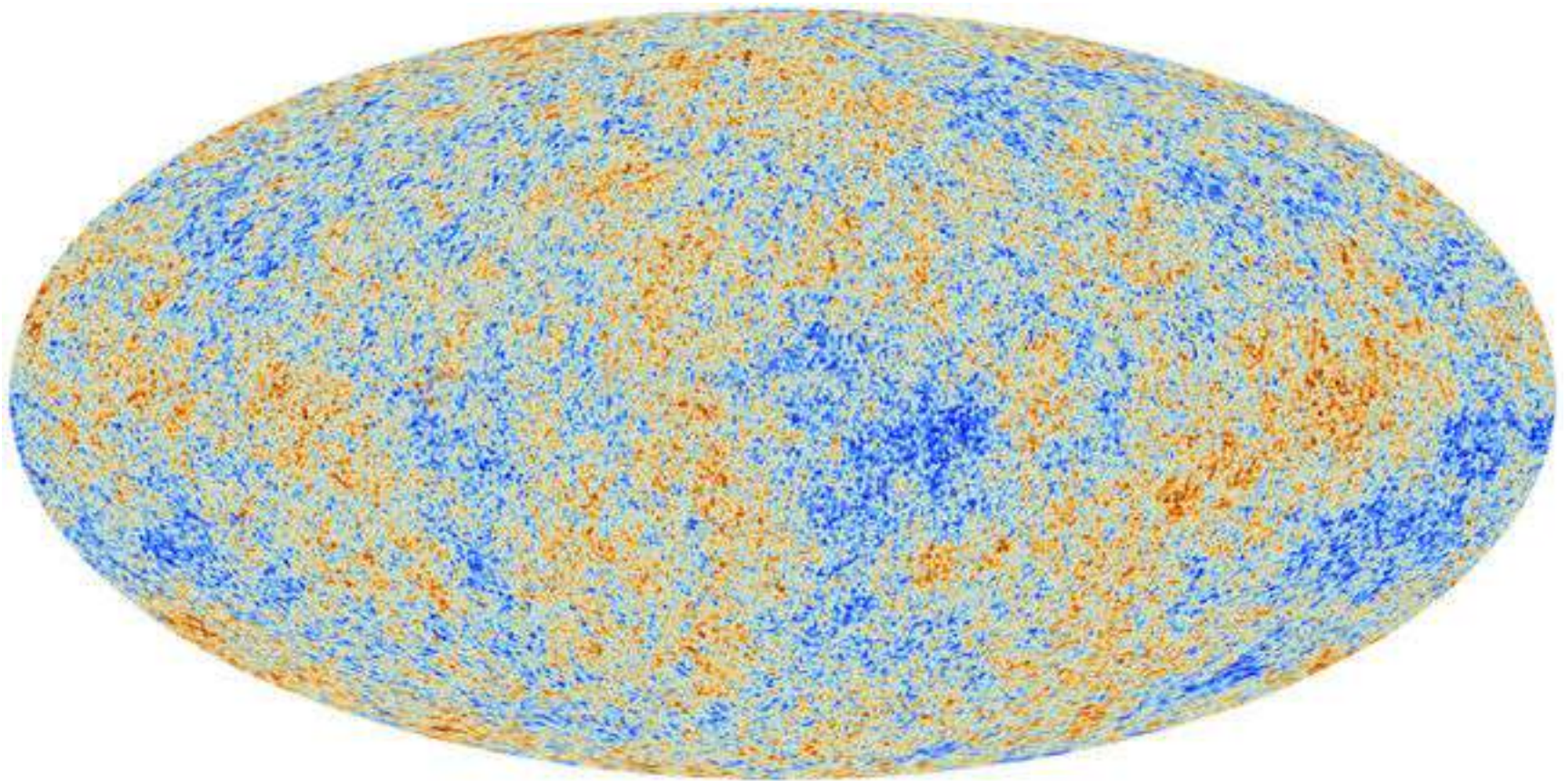
□ Importants progrès observationnels au début des années 2000

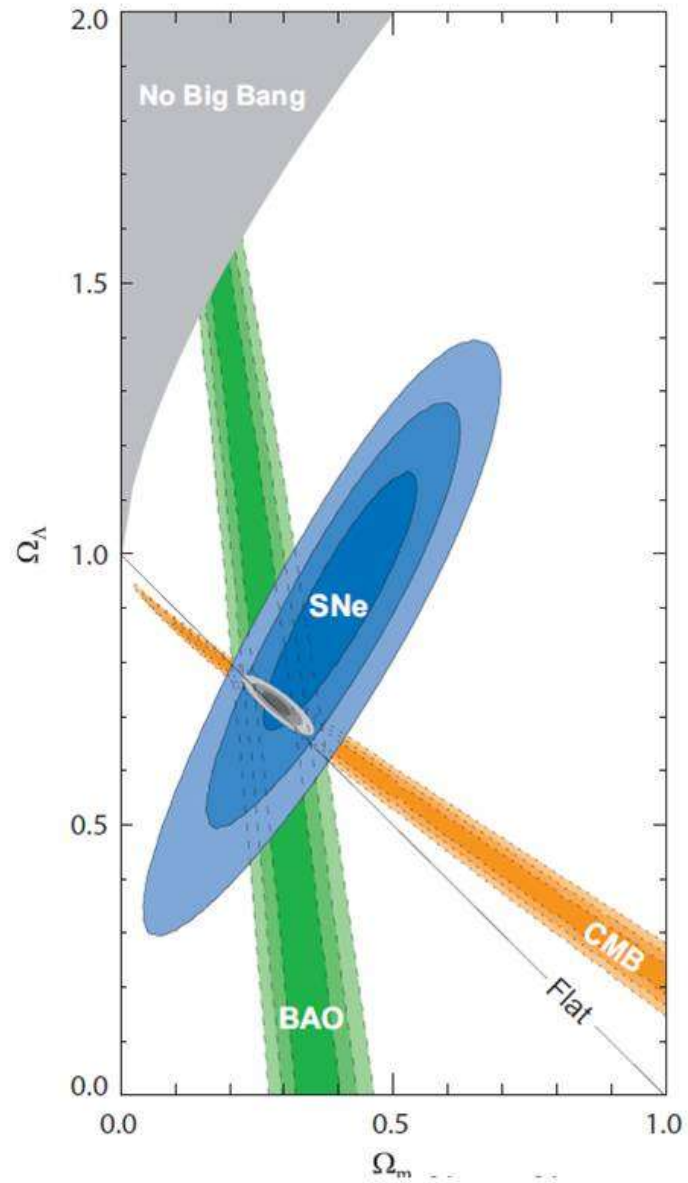
- Mesure des distances à l'aide des **super novae de type 1A** (voir le prix Nobel de physique 2011)
- Détermination avec une grande précision de la carte du RDFC (**COBE, WMAP, Planck**)

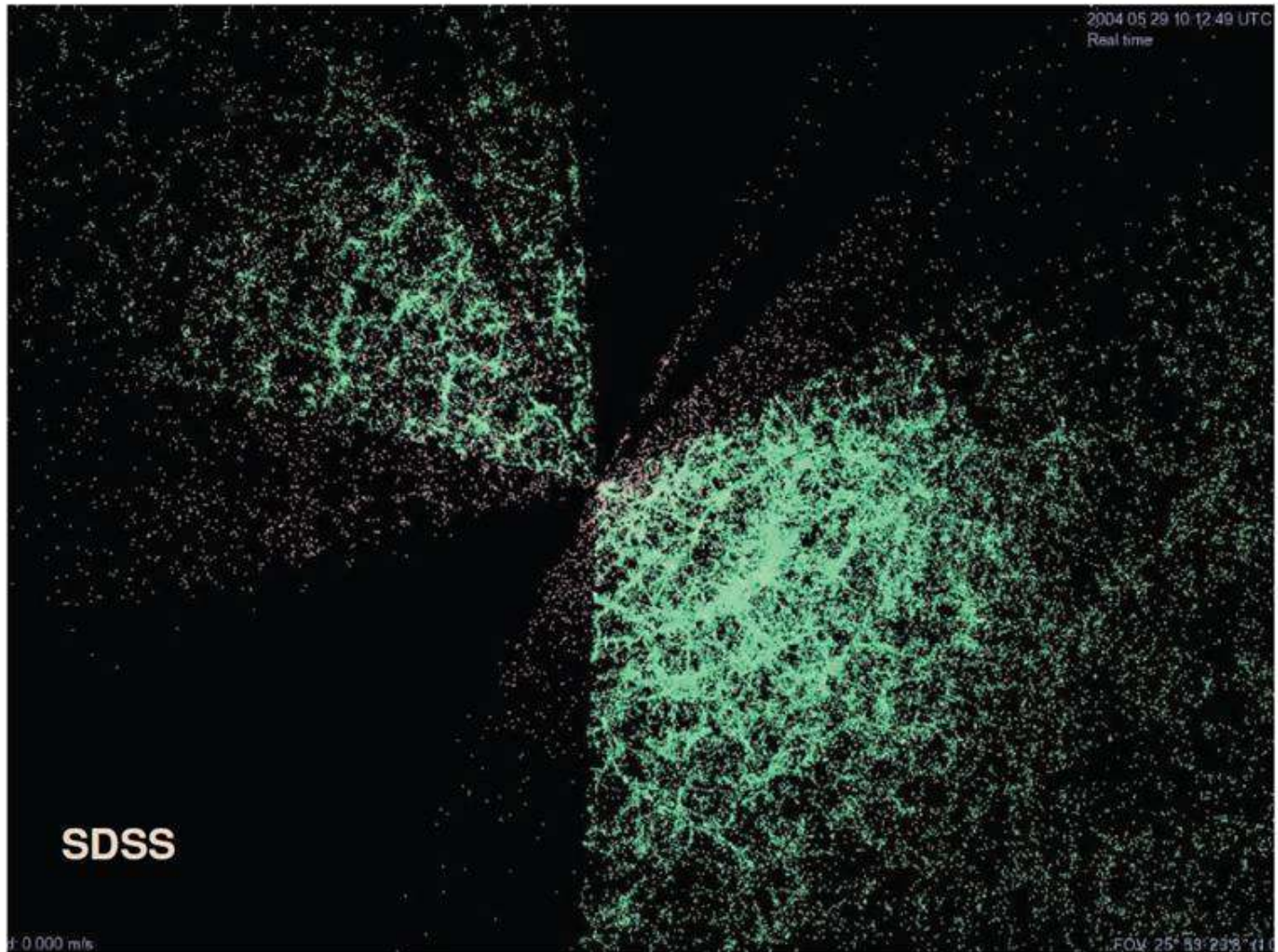
□ Dépassement du modèle du big bang

- Mise en **concordance** de toutes les données observationnelles
- **Validation de l'hypothèse de l'inflation** expliquant la platitude spatiale observée
- Détermination précise des paramètres fondamentaux de la cosmodynamique (**âge de l'univers, composantes de la densité d'énergie**)
- Mise en évidence de composantes non standards inévitables de la densité d'énergie (**matière sombre et énergie sombre**)
- **Interprétation** des fluctuations observées dans le RDFC comme le résultat de fluctuations intervenues dans l'ère de la **gravitation quantique, amplifiées par l'inflation**, pouvant produire les **grandes structures observées dans la distribution des galaxies** (filaments, vides, ...)
- **Retour de la constante cosmologique**

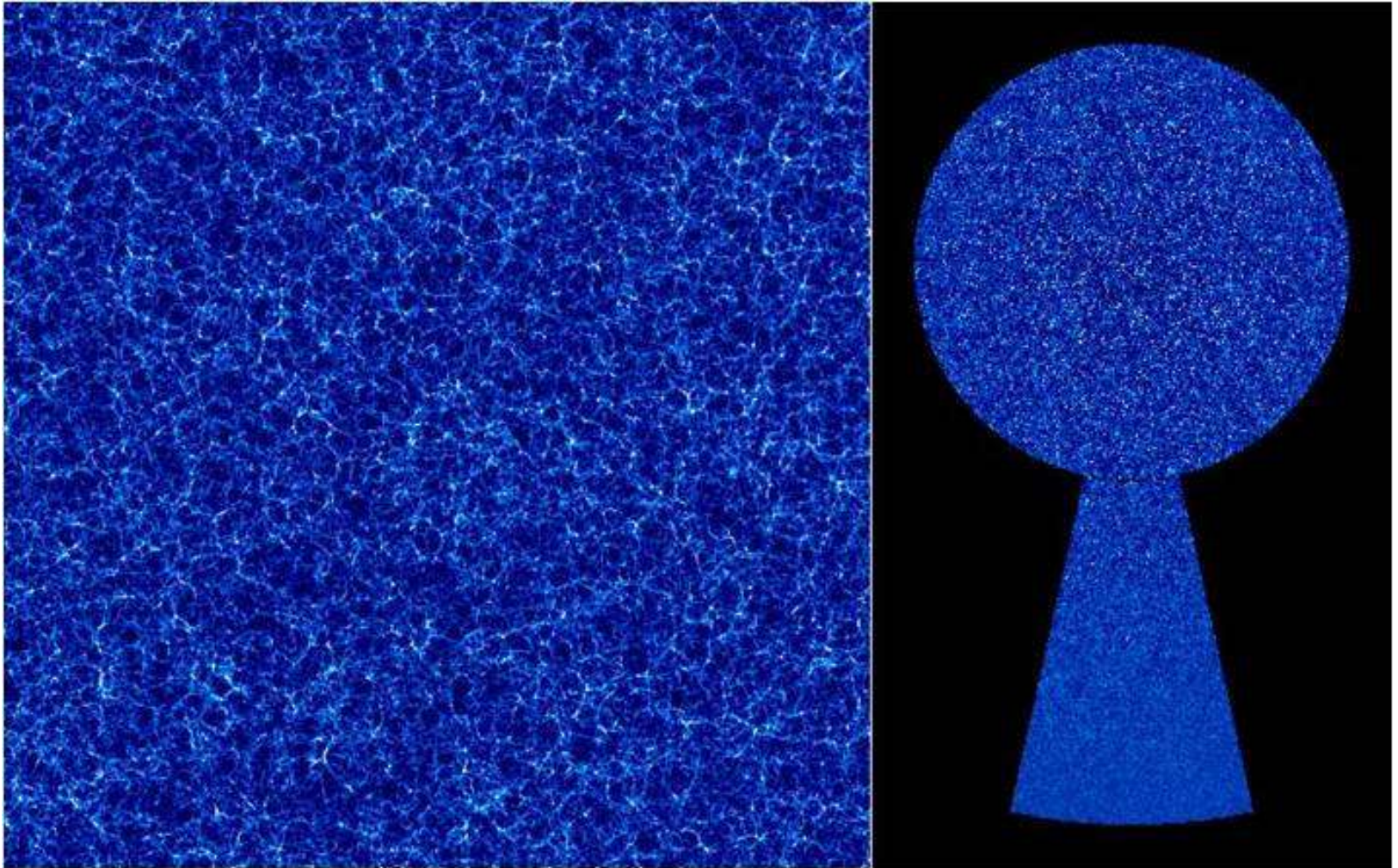








Observées



Simulées

Le modèle cosmologique standard (« cosmologie de la concordance »): le modèle du big-bang amélioré par l'inflation et la constante cosmologique

La métrique de Friedman, Lemaître, Robertson, Walker

$$ds^2 = dt^2 \rightarrow a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right]$$

Étalon cosmique
de distance

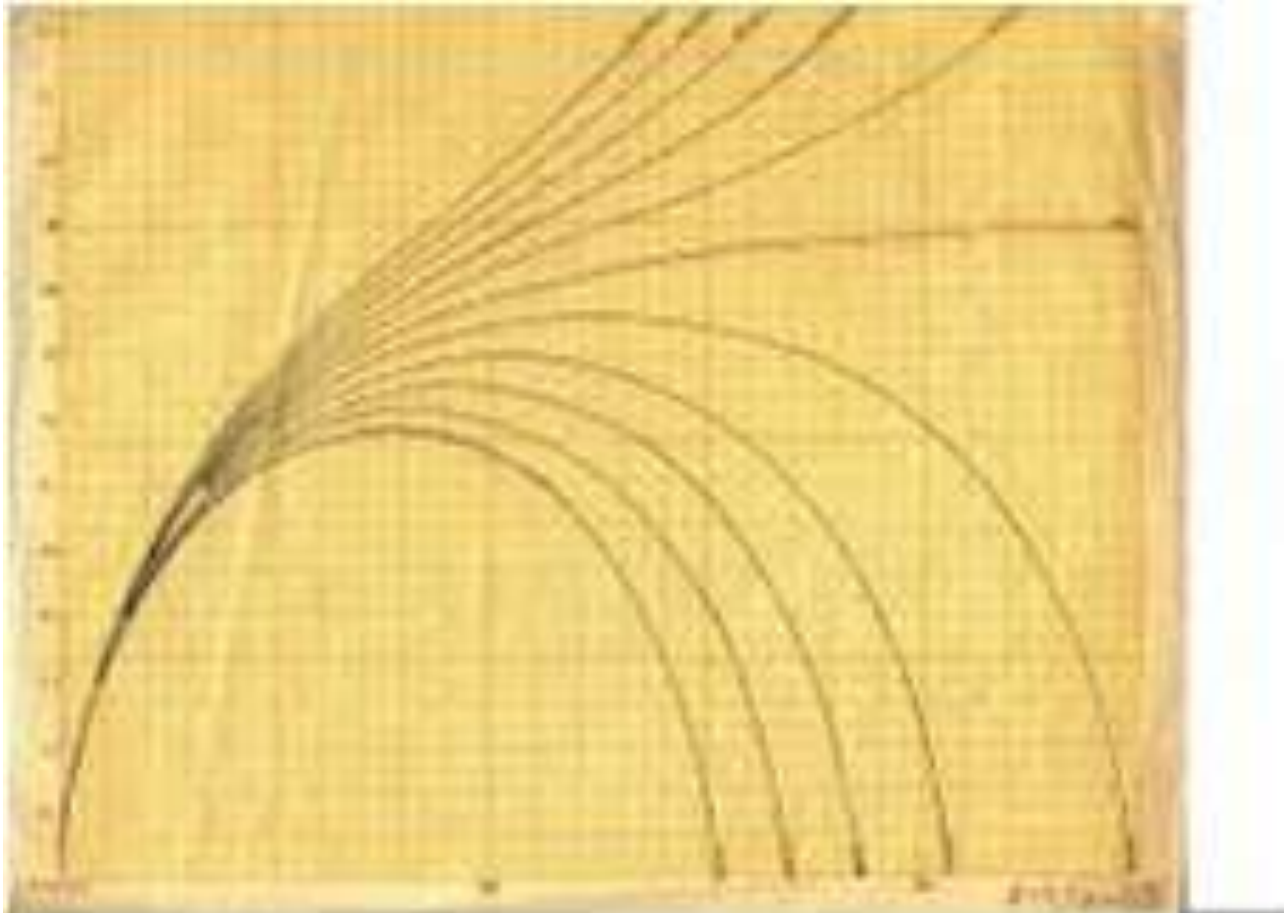
Indice de courbure de
l'espace, valant -1, 0 ou +1

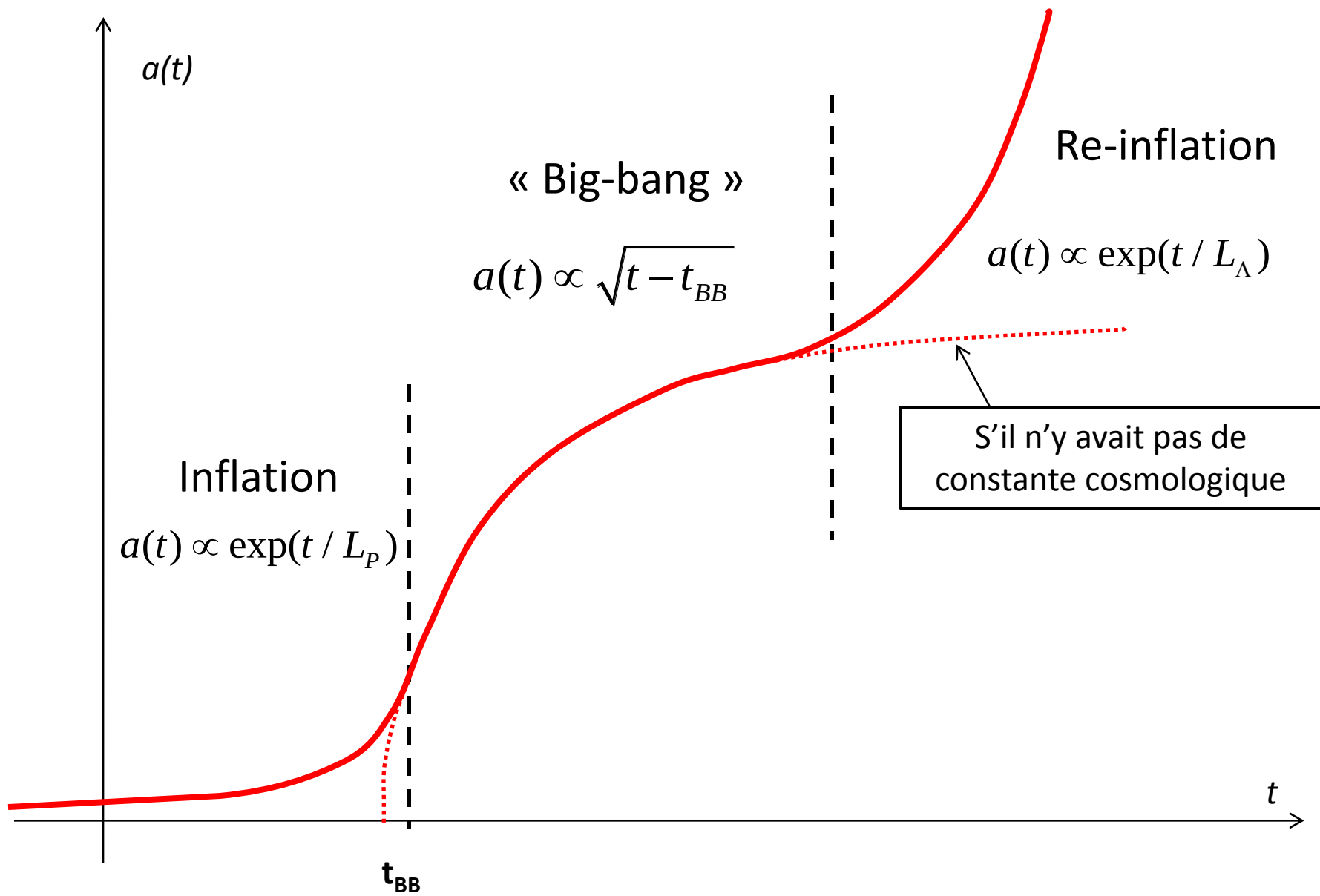
Constante de Hubble $\rightarrow H_0 \equiv (\dot{a} / a)_0$

$$\frac{\dot{a}^2 + k}{a^2} = \frac{8\pi G \rho}{3}; \quad d(\rho a^3) = -p da^3$$

Inflation $\Rightarrow k = 0 \Rightarrow \rho = \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \quad \Omega_i = \rho_i / \rho_c$

- Matière baryonique (noyaux): 5%
- Matière sombre: 25%
- Énergie sombre: 70%





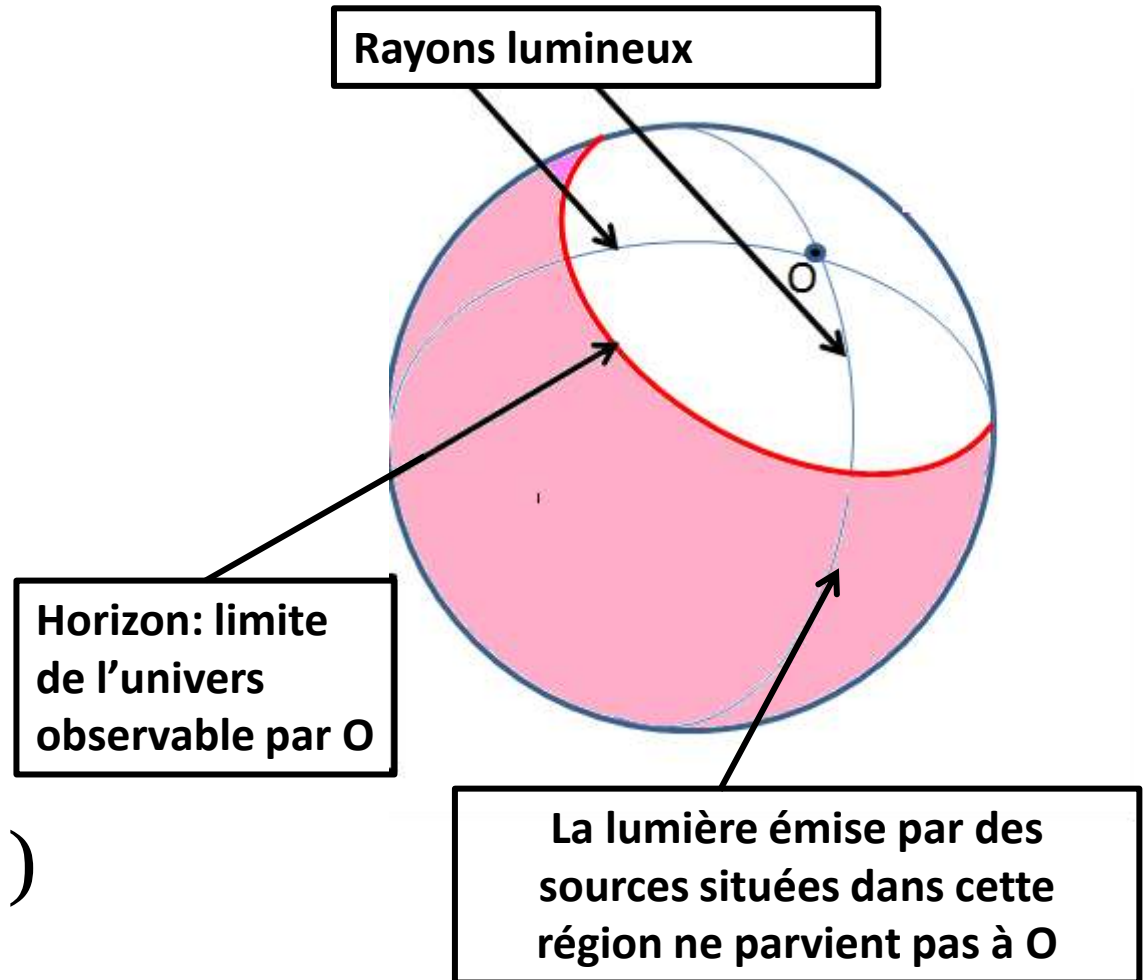
Horizon, univers observable et Univers entier à deux dimensions d'espace

Rayon de l'horizon limitant l'univers observable par O = valeur du facteur d'échelle lorsque sa vitesse est égale à c

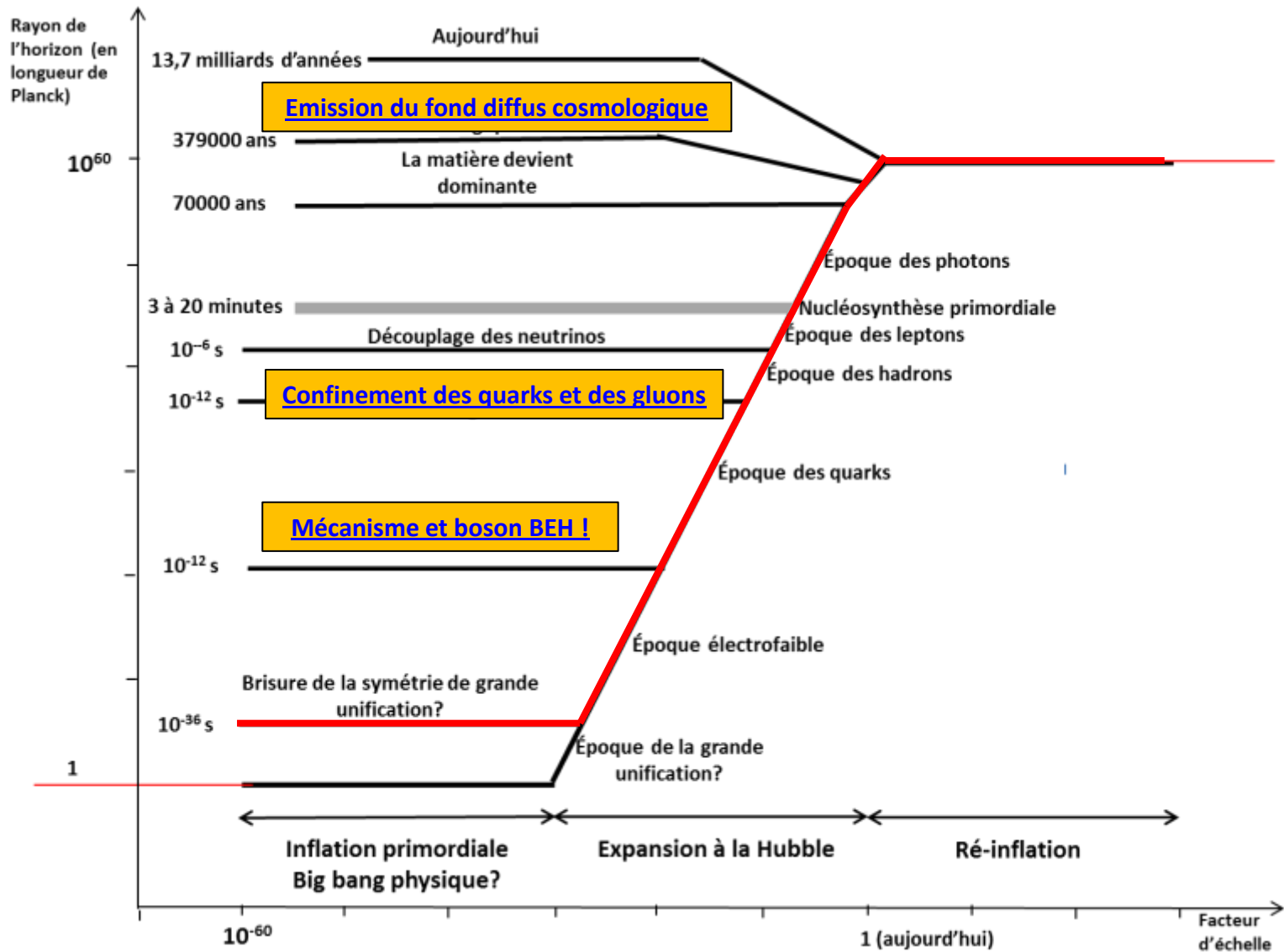
$$R_H = c \frac{a(t)}{\dot{a}(t)}$$

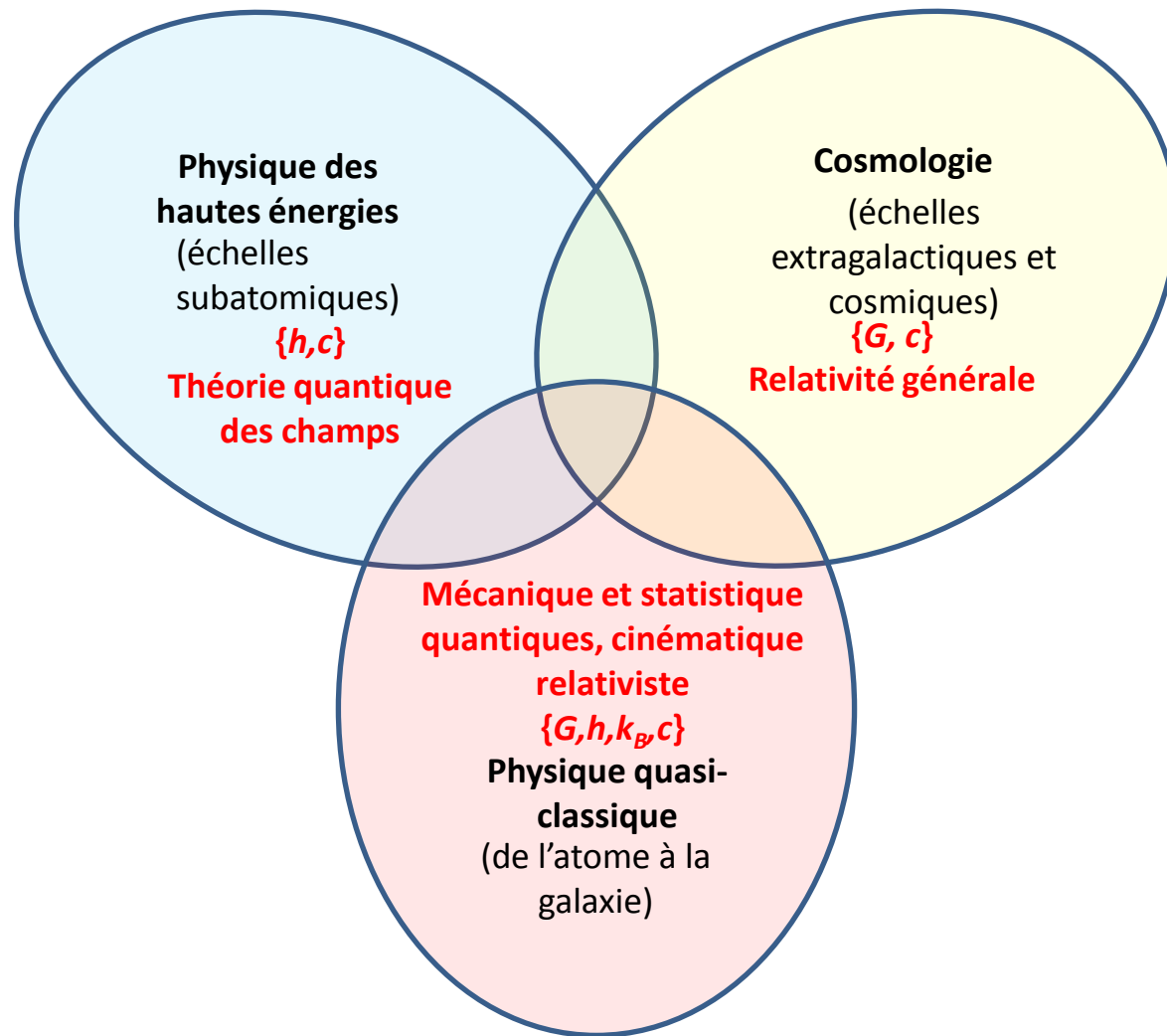
Ce rayon de l'horizon est constant dans le cas d'une expansion exponentielle (de Sitter)

$$a(t) \propto \exp(ct / R_H)$$



$$R_H = c \frac{a(t)}{\dot{a}(t)}$$





5/ Et maintenant? Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

Dates	Cadre théorique	Gravitation	Électro magnétisme	Interaction faible	Interaction forte
17 ^{ème} siècle	Galilée, Newton	<u>Newton</u>			
19 ^{ème} siècle	Mécanique analytique, thermodynamique statistique		<u>Maxwell</u>		
1895-1898			Rayons X, électron, radioactivité		
1900-1930	Mécanique quantique				
1905-1915	Relativité	<u>Einstein</u>			
1930-1970	Théorie quantique des champs	<u>Big bang</u>	<u>QED</u>	<u>Fermi</u>	Yukawa
1970-2012	Théories de jauge	<u>ΛCDM</u>	<u>Théorie électrofaible de Glashow, Salam, Weinberg et Brout, Englert et Higgs</u>		<u>QCD</u>
2012- ...	Décohérence, théorie quantique de l'information, Holographie		Grande unification? Supersymétrie ? Matière sombre ? Inflation ? Gravitation quantique ?		

Une brève histoire du modèle standard consolidé

Relativité et quanta, une mise en perspective

Cosmologie quantique: une physique triplement quantique?

- **Trois quanta universels élémentaires**

- ☐ Constante de Planck: quantum d'action
- ☐ Constante de Boltzmann: quantum d'information
- ☐ Aire de Planck $A_p = L_p T_p = (hG)/c^4$: quantum d'espace-temps

- **Complémentarité généralisée**

- ☐ Trois théories à deux quanta
- ☐ Une théorie à trois quanta: la gravitation quantique!?

