Relativité et quanta, une mise en perspective

e2phy'14, Clermont-Ferrand 25082014

Gilles Cohen-Tannoudji

Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (Larsim CEA-Saclay)

www.gicotan.fr

Plan des deux cours

- **1/Introduction:** Une apogée de la physique de grand impact culturel
- **2/D'où venons nous?** Trois grandes synthèses à mettre à l'actif de la physique classique qui entre en crise au début du 20ème siècle
- **3/ Les constantes universelles et la crise de la physique classique**
- **4/ Où en sommes nous?** Un nouveau grand récit de l'univers
- **5/ Et maintenant?** Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

Introduction: une apogée de la physique de grand impact culturel

En un siècle, notre champ de vision est passé du millier d'années-lumière, au milliard d'années-lumière.

Ptolémée plaçait la terre au centre du monde, Copernic remplaçait cette représentation géocentrique par une représentation héliocentrique. Nous savons aujourd'hui que l'univers s'étend bien au delà du système solaire et de la voie lactée.

Comment l'être humain, un être si fragile, dont la vie dépasse rarement les 100 ans, une poussière de temps comparée à l'âge de l'univers, a-t-il pu, avec sa seule intelligence, se hisser à une telle cohérence dans la représentation du monde qui l'entoure, aussi bien dans l'infiniment petit des atomes et des particules élémentaires que dans l'infiniment grand du cosmos ?

Lumière, matière et cosmos,* Discours prononcé par Claude Cohen-Tannoudji *en 2009, trois ans avant l'annonce de la découverte du boson de Higgs

« Standing ovation » au CERN, le 4 juillet 2012 à l'annonce de la découverte du « boson de Higgs »
Un milliard d'internautes et téléspectateurs exposés à cette annonce

Robert Brout (1928-2011)

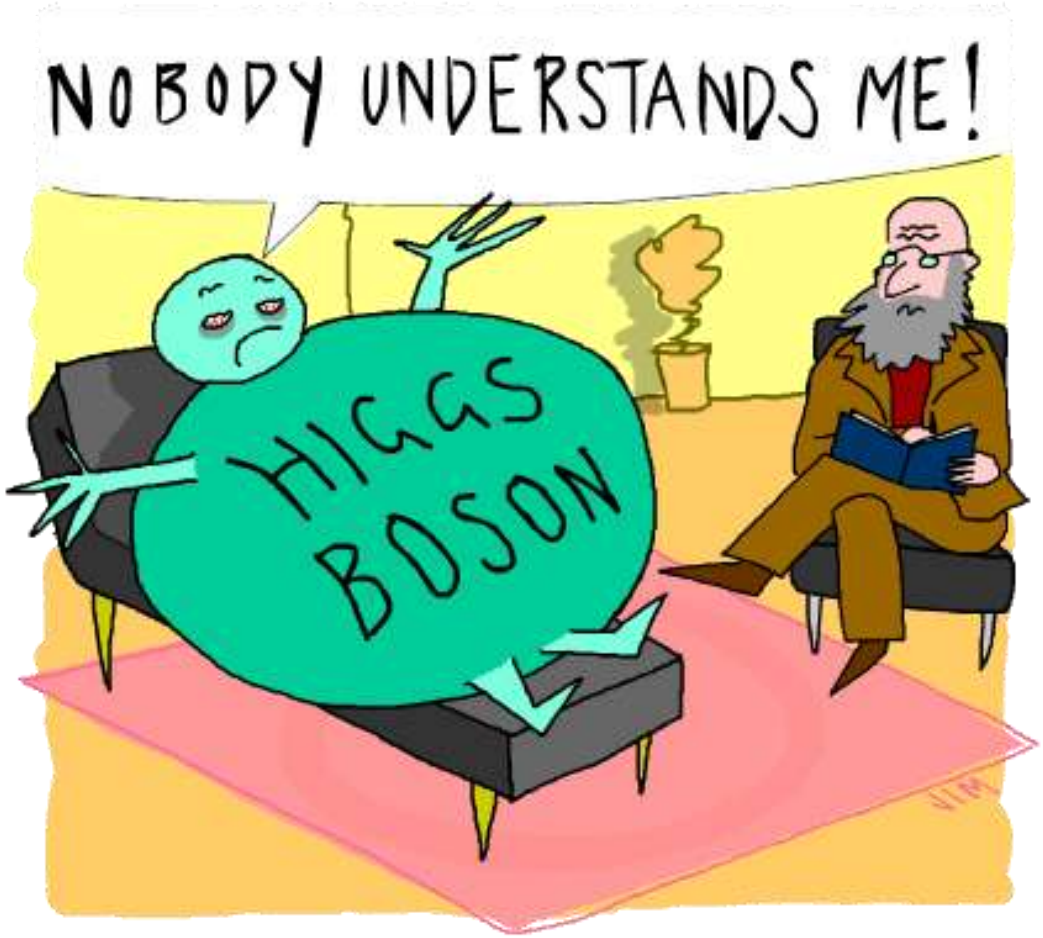
François Englert et Peter Higgs

•F. Englert and R. Brout, *Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons* Physical Review Letters , 13 – 9, p. 321, 31 august 1964

•P. Higgs, *Broken symmetry and the masses of gauge boson*
Physical Review Letters,13 – 16, p. 508, 19 october 1964

Mécanisme et boson BEH (Brout, Englert, Higgs)

François Englert et Peter Higgs récompensés par le prix Nobel de physique en 3013



Et pourtant, le boson de Higgs au bac en 2014!!

La quête de l'élémentarité et la course aux hautes énergies

Les inégalités de Heisenberg

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

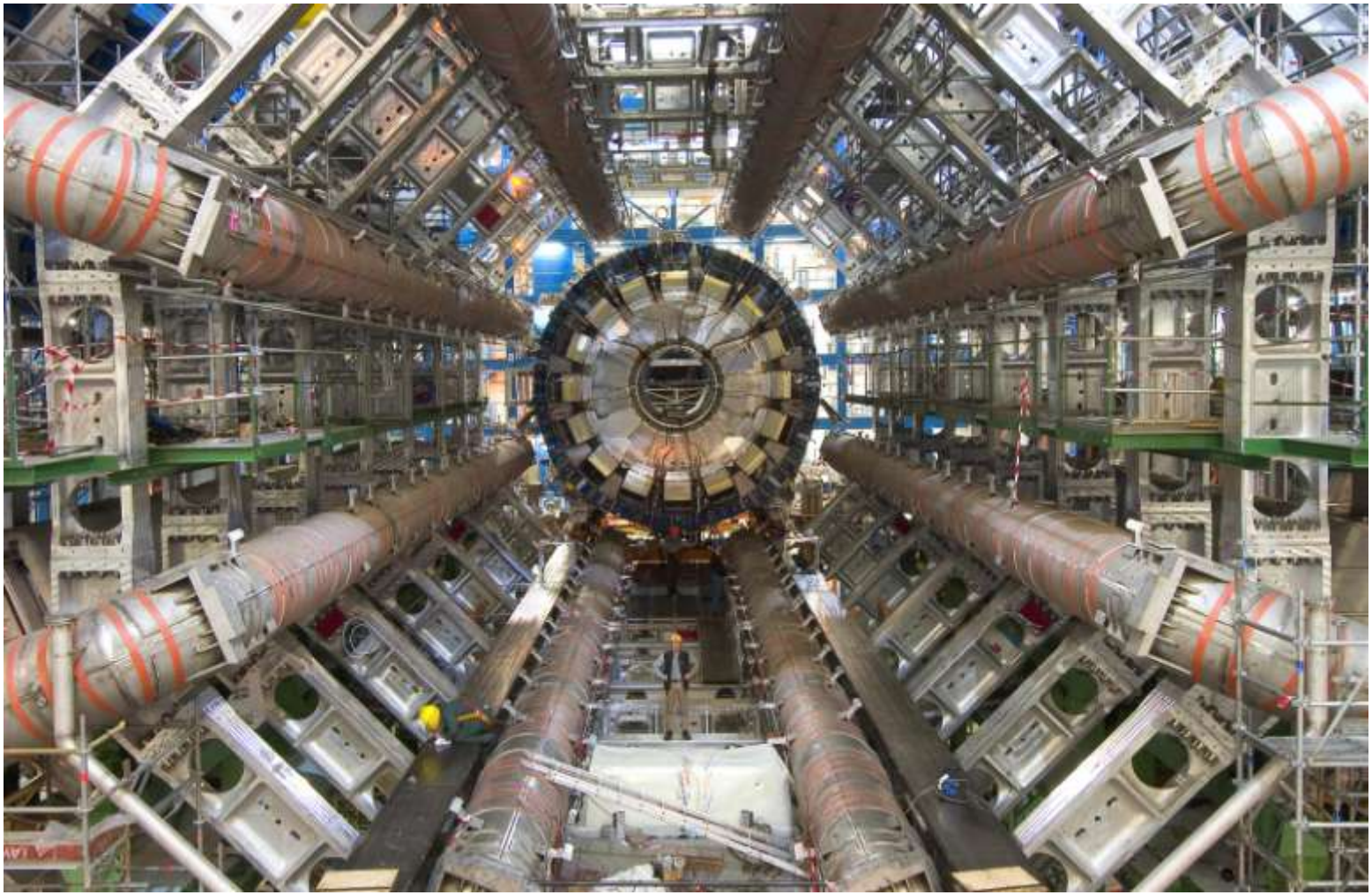
$$\Delta x \Delta p_x \geq \hbar$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \hbar$$

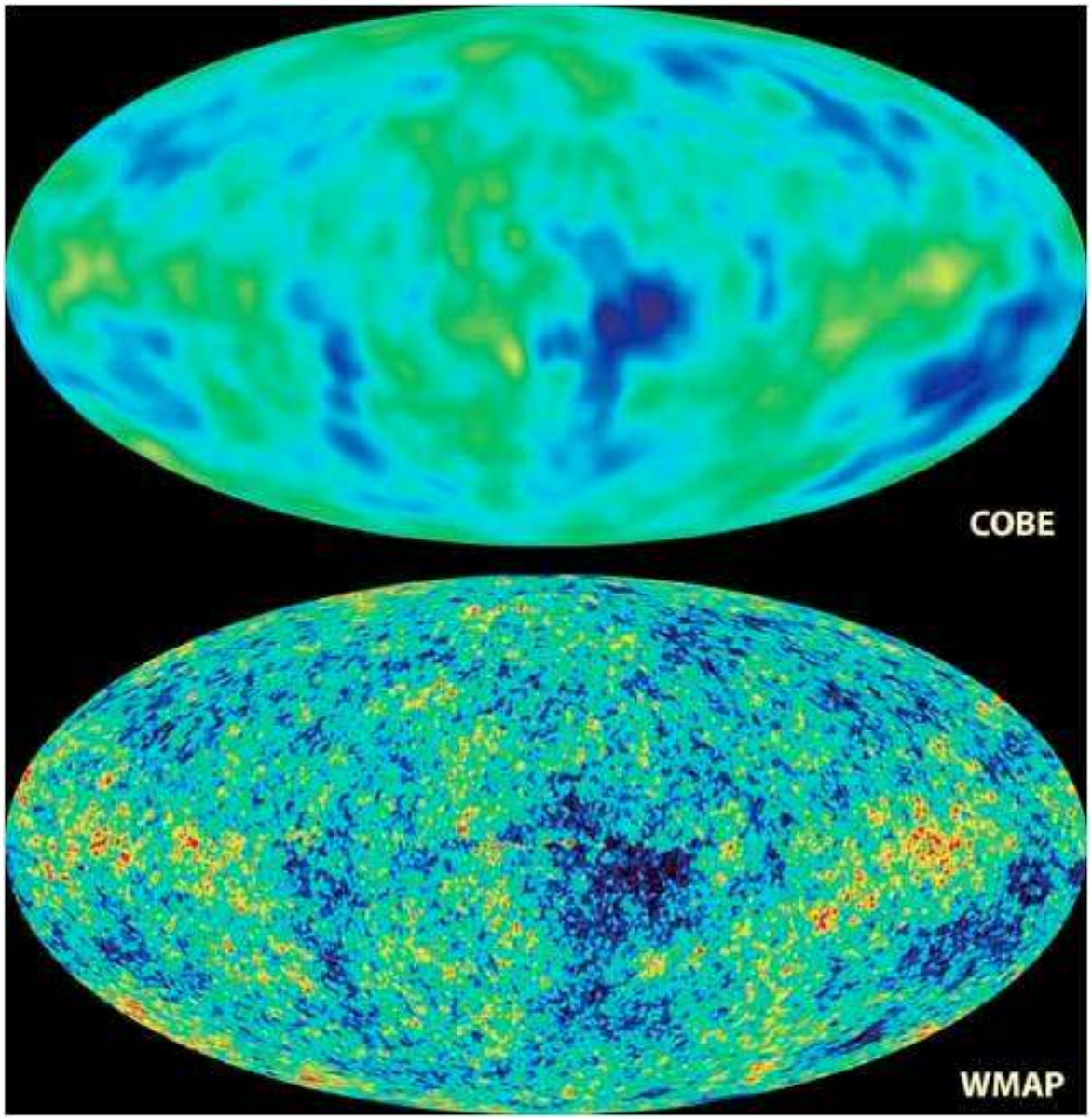
$$\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$$

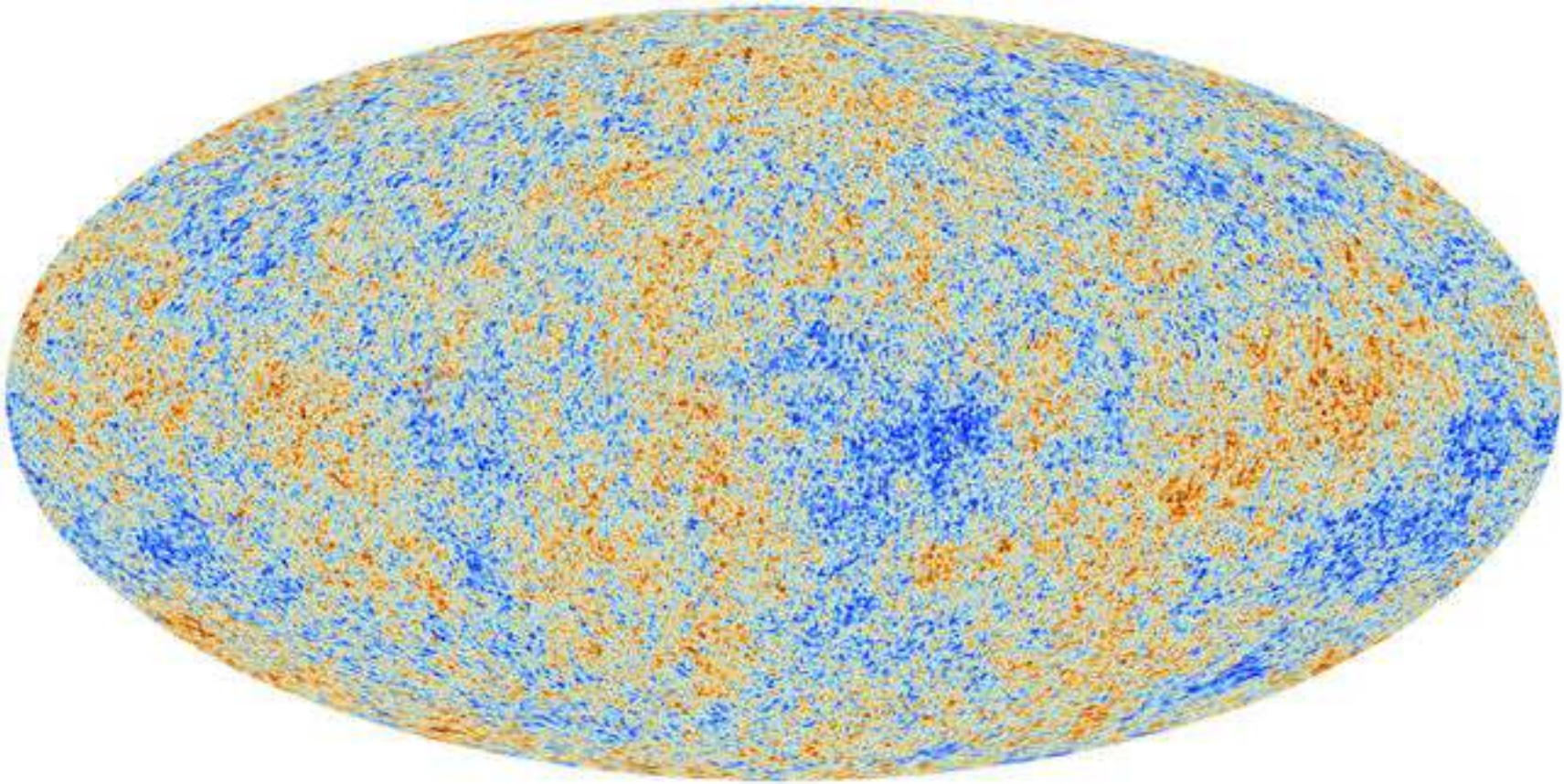
Infiniment **bref** et infiniment **petit** = infiniment **grand en énergie**

Vue aérienne du CERN

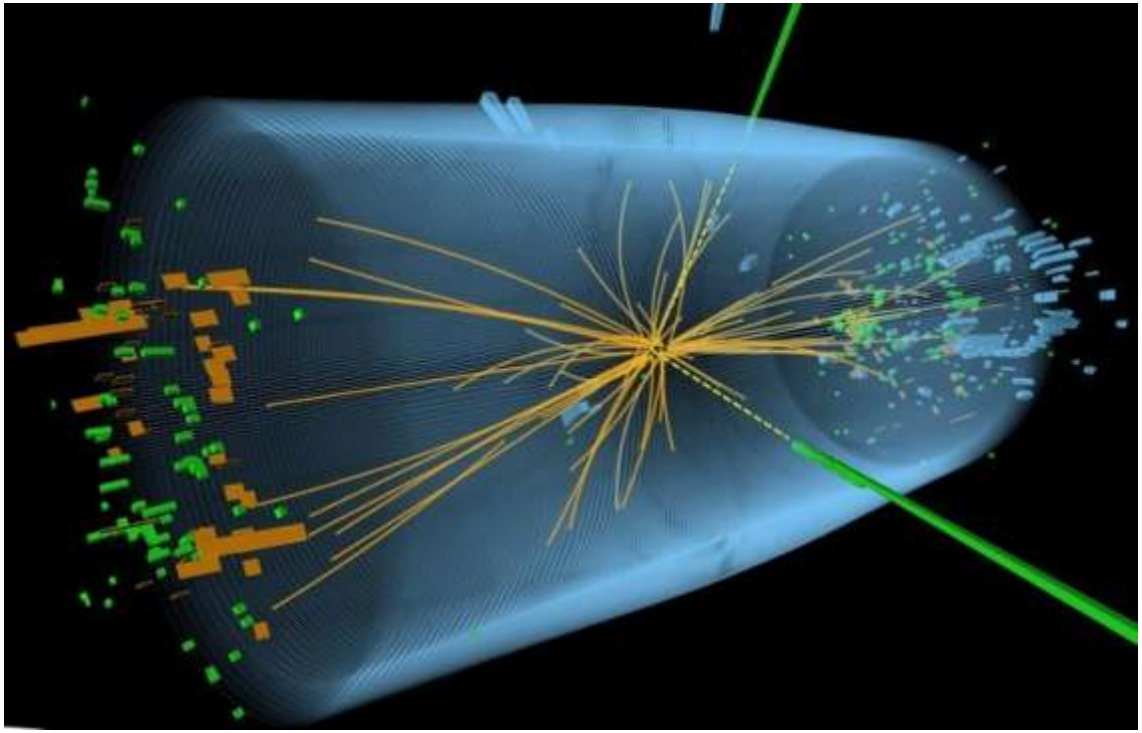


Le détecteur ATLAS auprès du LHC

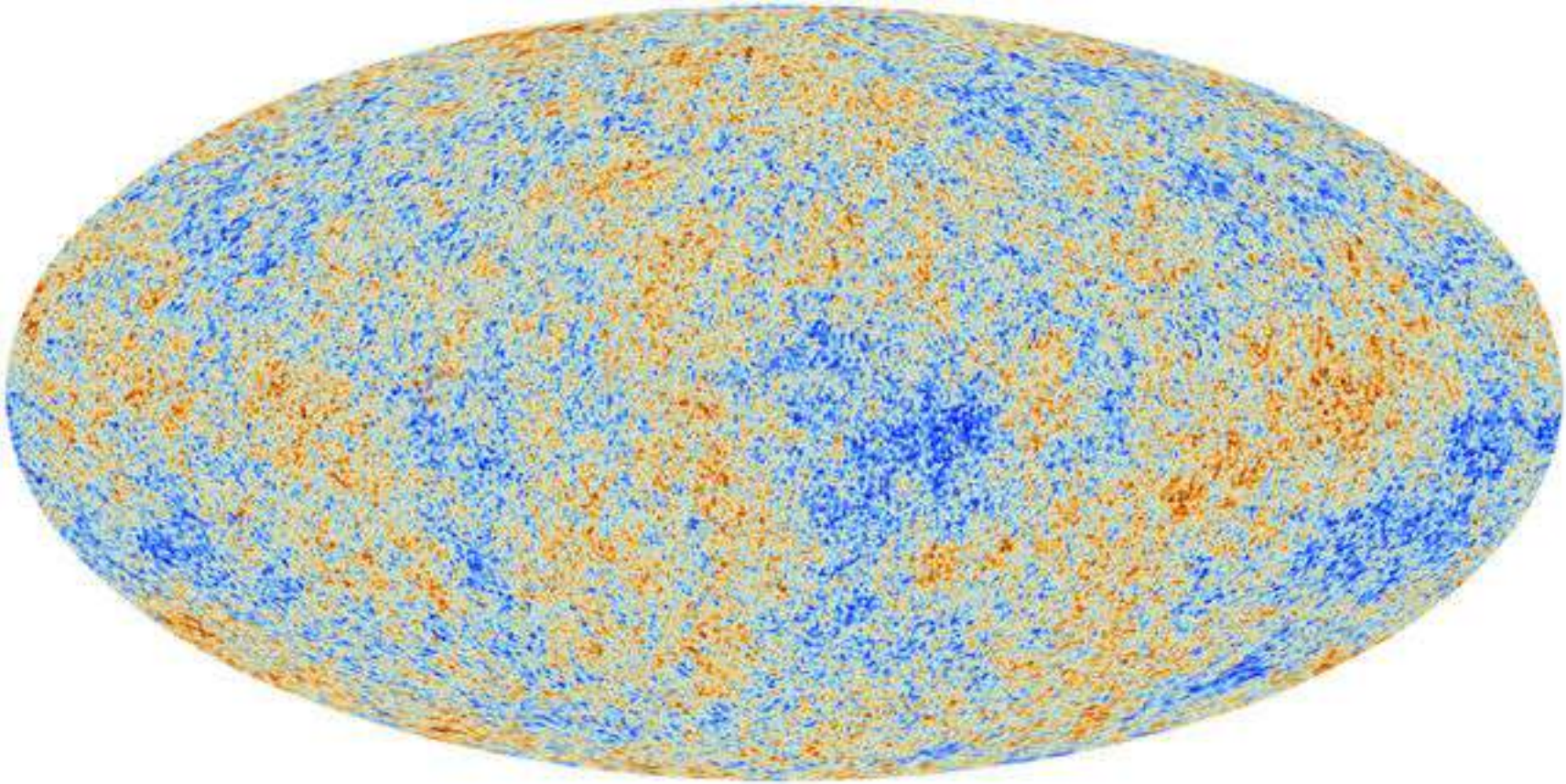

COBE
WMAP



Le boson BEH au LHC, et, à venir le LHC à énergie et luminosité doublées en 2015



Analyse complète des données fournies par le satellite Planck (fin 2015)



Une mise en perspective « transhistorique »

Le modèle standard contient en lui-même les questions qui l'amèneront un jour, très bientôt peut-être à être dépassé. On retrouve cette idée selon laquelle « pour l'esprit scientifique, tracer nettement une frontière, c'est déjà la dépasser », dans l'épistémologie de Bachelard que Vincent Bontems qualifie de « transhistorique » dans l'ouvrage qu'il a consacré à ce philosophe. C'est à une telle mise en perspective dont l'intention « n'est pas de juger l'histoire des sciences à partir d'un point de vue épistémologique historiquement fixe et privilégié, mais à partir de n'importe quel point de son histoire , » qu'est consacrée cette première partie de notre ouvrage, qui, partant de la naissance de la science moderne au XVIIe siècle, aboutira à la fin des années soixante du XXe siècle qui ont vu naître deux nouvelles disciplines de la recherche fondamentale, la physique des particules et la cosmologie scientifique

GC-T, Michel Spiro, Le boson et le chapeau mexicain p. 36

2/ D'où venons-nous

Trois grandes synthèses à mettre à l'actif de la physique classique qui entre en crise au début du 20ème siècle

2.1 Première synthèse: la révolution copernicienne, synthèse de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste

- Concepts de base : point matériel et force
- Cinématique
  - Espace et temps absolus
  - Géométrie euclidienne
- Les quatre lois
  - Relativité galiléenne
  - Force et accélération
  - Action et réaction
  - Attraction universelle

$$\vec{F} = m\vec{\gamma}$$

$$\vec{F} = -G\frac{mm'}{d^2}\hat{n}$$

- Révolution copernicienne, naissance de la science moderne, unification de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste
- Origine du principe d'équivalence:

{Deuxième loi + G = constante universelle}

⇓

{l'accélération induite par la gravitation est indépendante de la masse et de la nature des corps sur lesquels elle s'applique}

- La mécanique analytique

Lagrange unifie mathématiquement la mécanique, en établissant un cadre formel qui rend possible de résoudre tous les problèmes qui peuvent en relever, incluant ceux de la statique et ceux de la dynamique pour les solides et les fluides. Cette reformulation de la mécanique fait jouer un rôle central à un concept qui n'a été formalisé que tardivement, et qui a fait passer au second plan celui de force, l'énergie que l'on sépare en énergie cinétique et en énergie potentielle ; les équations du mouvement peuvent être déduites du principe de moindre action qui avait été postulé de manière heuristique par Maupertuis et qui a été formalisé de façon rigoureuse par Euler, Lagrange et Hamilton.

L'intérêt de cette formulation de la mécanique est dû à son caractère systématique : elle fournit une authentique méthodologie, comprenant des règles strictes, qu'il est suffisant d'observer rigoureusement pour dériver les équations du mouvement de tout système matériel.

GC-T, Michel Spiro, Le boson et le chapeau mexicain p. 42

2.2 Deuxième synthèse: la thermodynamique statistique, synthèse de l'atomisme et de la mécanique

- **Énergie et entropie** et les deux principes de la thermodynamique (Carnot et Clausius) (immatérialité du « calorique »)
- Théorie **cinétique** (ou **moléculaire**) de la matière (Maxwell et Boltzmann)
- **Thermodynamique statistique**
  - **Atomisme** : les atomes seraient les points matériels dont le mouvement obéit aux lois de la mécanique
  - Problème de l'observabilité des atomes
  - **Entropie et flèche du temps**

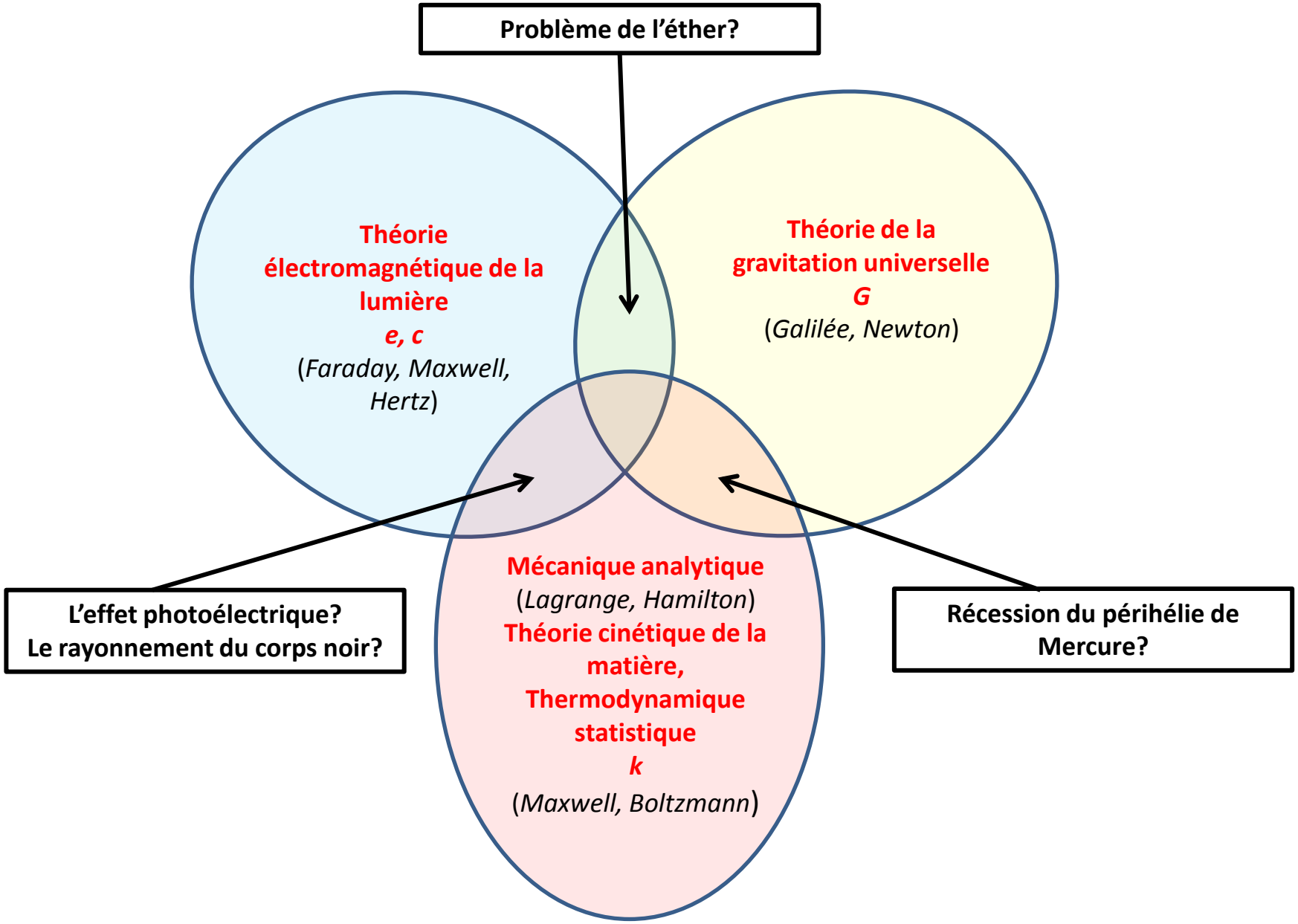
2.3 Troisième synthèse: la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell, synthèse de l'électromagnétisme et de l'optique

- **La théorie électromagnétique de la lumière**
  - Faraday et le concept de **champ**
  - **Synthèse** de l'électricité, du magnétisme et de l'optique dans la théorie de **Maxwell**
  - Reformulation de la théorie et vérification expérimentale par **Hertz**
  - Triomphe de la **conception ondulatoire de la lumière**
  - Le modèle de **l'éther** et ses difficultés

2.4 Bilan de la conception de la matière à la fin du 19e siècle

- **Succès** de la théorie de la **gravitation universelle**
- **Axiomatisation** de la mécanique rationnelle (**mécanique analytique et formulation lagrangienne**)
- Deux composantes dans la matière :
  - Les **atomes ou molécules**, assimilés à des points matériels de masse et éventuellement de charge invariable
  - L'**éther**, milieu hypothétique aux étranges propriétés supposé porter les ondes électromagnétiques ou lumineuses
- **Conception classique de l'espace et du temps**
- **Conception subjectiviste de la flèche du temps** (démon de Laplace)

- **Des problèmes non résolus**
  - **Avance du périhélie** de Mercure
  - **Effet photo-électrique**
  - Loi du rayonnement du **corps noir**
  - **Chaleur spécifique des corps poly-atomiques**
  - **Impossibilité** d'observer directement les atomes ou molécules
  - **Identité** des atomes d'une même espèce
  - Impossibilité de mettre en évidence le mouvement relativement à l'**éther**


Problème de l'éther?
Théorie électromagnétique de la lumière
e, c
(Faraday, Maxwell, Hertz)
Théorie de la gravitation universelle
G
(Galilée, Newton)
Mécanique analytique
(Lagrange, Hamilton)
Théorie cinétique de la matière,
Thermodynamique statistique
k
(Maxwell, Boltzmann)
L'effet photoélectrique?
Le rayonnement du corps noir?
Récession du périhélie de Mercure?

3/ Les constantes universelles et la crise de la physique classique

3.1 Les constantes universelles

- *G, c, k, h* : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20ème siècle
  - ❑ Définissent les **unités fondamentales**
  - ❑ Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
- Structurent, par leur prise en compte séparément ou par paires, le **cadre général de la physique théorique qui répond à la crise de la physique classique**

3.2 Les échelles de Planck

- Les échelles de Planck (1899) Quatre constantes universelles dimensionnées: *h,k,G,c,* à partir desquelles Planck détermine des grandeurs fondamentales, appelées échelles de Planck

$$l_P = \sqrt{hG/c^3} \approx 10^{-35} m$$

$$t_P = \sqrt{hG/c^5} \approx 10^{-43} s$$

$$E_P = \sqrt{hc^5/G} \approx 10^{19} GeV$$

$$T_P = E_P / k$$

- **La révolution scientifique du 20ème siècle**
  - *G, c, k, h* : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20ème siècle
    - Définissent les **unités fondamentales**
    - Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
    - Structurent le **cadre général de la physique théorique**
- **Le nouveau « trépied » de la physique théorique**
  - La **théorie quantique des champs (*h, c*)**, au fondement de la physique des particules
  - La **relativité générale (*G, c*)**, au fondement de la cosmologie
  - **Statistique quantique et physique quantique à notre échelle (*h,k*)**, au fondement de la physique des **phénomènes émergents**

3.3 Les horizons de la mécanique : les théories à une constante (*h*), (*c*), (*k*)

- **L'horizon statistique ou informationnel (*k*)**
  - ❑ Thermodynamique statistique
    - Second principe et impossibilité du mouvement perpétuel
    - Mécanique rationnelle au niveau des atomes
    - Prédictibilité probabiliste (conditions initiales pratiquement non prédictibles ni reproductibles)
  - ❑ La constante de Boltzmann

$$E_c = kT$$

$$S = k \operatorname{Log} W$$

  - ❑ Mouvement brownien

$$< x^2 > = \frac{2kTt}{w}$$

- Réalité des atomes
  - Jean Perrin : treize façons différentes de déterminer le nombre d'Avogadro

$$PV = nRT$$

$$R = kN_A$$

  - Thermodynamique classique

$$k \to 0\,;N \to \infty\,;kN = R$$

- Physique statistique = triomphe de la mécanique rationnelle et de la conception atomiste (Einstein)
- Shannon et Brillouin: interprétation informationnelle de l'entropie
- Information et "agraindissement"

L'horizon relativiste (*c*)

- Les problèmes de la théorie électromagnétique de Maxwell
  - Modèle de l'éther peu crédible
  - Échec de l'expérience de Michelson Morley
- L'approche de Poincaré-Lorentz
  - Invariance de Lorentz des équations de Maxwell
  - Les transformations de Lorentz et les rotations forment un groupe
- La relativité de Poincaré
  - Principe de relativité et invariance de Lorentz
  - Théorie de l'électron déformable, contraction réelle des longueurs et pression de l'éther
  - Dualité temps vrai/temps local

❑ La relativité restreinte d'Einstein

- Les principes
  - **Relativité**
  - **Invariabilité** de la vitesse de la lumière, et **nouveau statut de la constante *c***
  - **Identité** des **étalons de mesure au repos** (durées et longueurs)
- Remise en cause de la cinématique
- Élimination de l'éther
- Promotion du concept de champ au rang de concept fondamental
- L'espace-temps de Minkowski
- Invariance de Lorentz étendue à toutes les lois de la physique
- Relativité qualifiée de restreinte parce que limitée aux changements de référentiels inertiels

L'horizon quantique (*h*)

- Problèmes non résolus de la physique classique
  - Radioactivité
  - Chaleur spécifique des corps poly-atomiques
  - Rayonnement du corps noir
  - Effet photo-électrique
- Principales étapes du développement de la théorie quantique
  - 1900 Planck et le rayonnement du corps noir
  - 1905 Einstein et les quanta de lumière
  - 1908 Rutherford et le noyau de l'atome
  - 1913 L'atome de Bohr
  - 1916 Einstein et l'émission induite
  - 1924 Statistique de Bose -Einstein
  - 1926 Statistique de Fermi-Dirac

- Crise conceptuelle majeure
  - Discontinu dans les relations causales : crise de la causalité
  - Inégalités de Heisenberg : crise de l'objectivité
  - Indéterminisme: impossibilité de principe de déterminer les conditions initiales
  - Intrication et procès en incomplétude intenté par Einstein
- La mécanique quantique (fin des années 20)
  - Formalisme de l'espace de Hilbert
  - Interprétation de Copenhague
- Acquis
  - Solution des problèmes laissés en suspens par la physique classique
  - Stabilité des atomes
  - Identité des atomes d'une même espèce
  - Explication complète de tous les phénomènes atomiques, moléculaires, …
  - Consolidation de la thermodynamique statistique (troisième principe)

- Un premier bilan épistémologique
  - La réponse à la crise conceptuelle majeure du début du XXe siècle nécessite des remises en causes majeures, liées à la prise en compte de chacune des constantes universelles, mais pas un retour en arrière par rapport à la révolution copernicienne
  - Les remises en cause concernent la cinématique (i.e. valable quelles que soient les interactions)
  - Pour élaborer des théories dynamiques, il faut construire des cadres axiomatiques, i.e. des théories à deux constantes, permettant de modéliser les phénomènes
  - Dans ces remises en cause, et cette élaboration, noter le rôle essentiel joué par les mesures de haute précision

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 géométro-dynamique 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 Siter)
  - 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 (10^4GeV) 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?

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$$ 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 emplie de physiciens bavardant tranquillement est l'analogue d'un espace empli 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

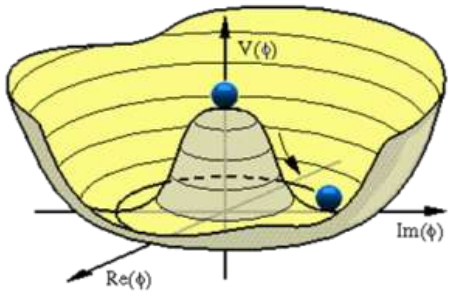
Elle provoque le même type attroupement , mais cette fois entre les scientifiques eux-mêmes: un tel attroupement est l'analogue de la particule de Higgs

Champ BEH

$$\left(\phi^{+},\phi^{0}\right);\left(\overline{\phi^{0}},\phi^{-}\right)$$

Fermions droits et gauches sans masse

4 bosons électrofaibles sans masse



Un boson BEH massif

Des fermions massifs

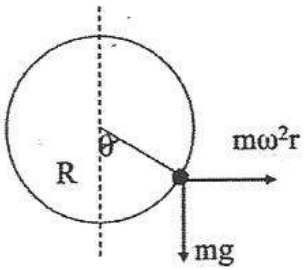
Un photon sans masse des bosons faibles, W^{+},W^{-}, Z^{0} massifs

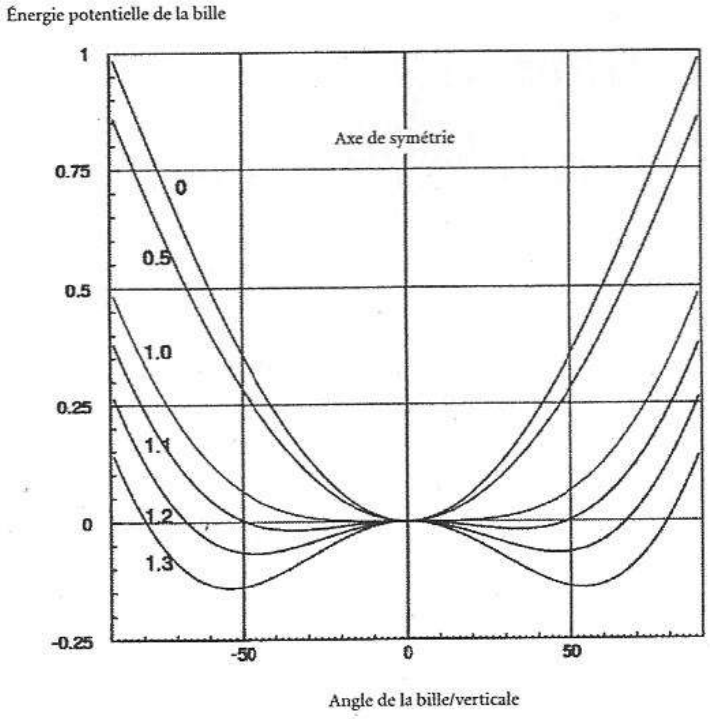
Une théorie électrofaible renormalisable !

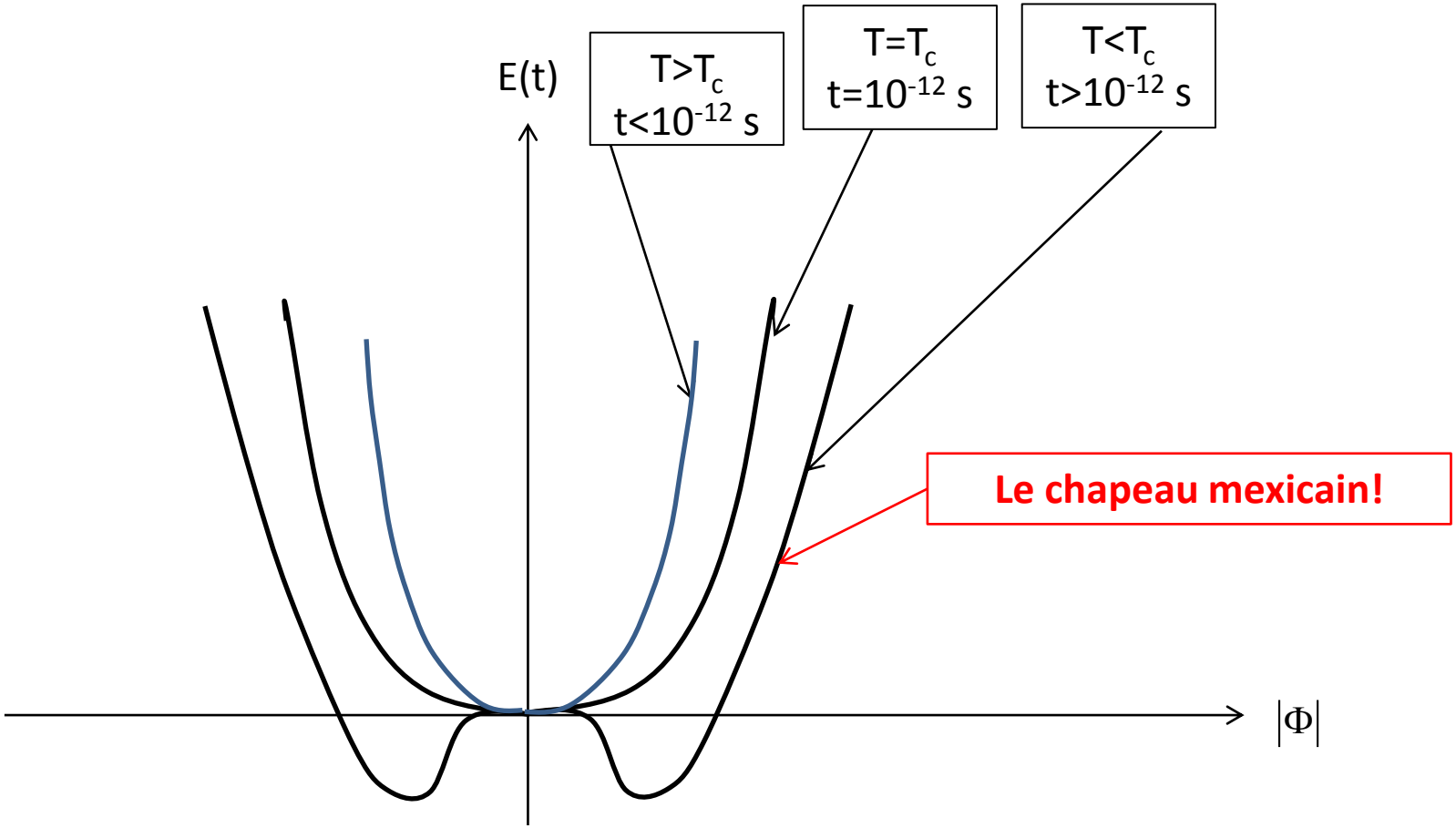
La magie du chapeau mexicain

Une petite expérience

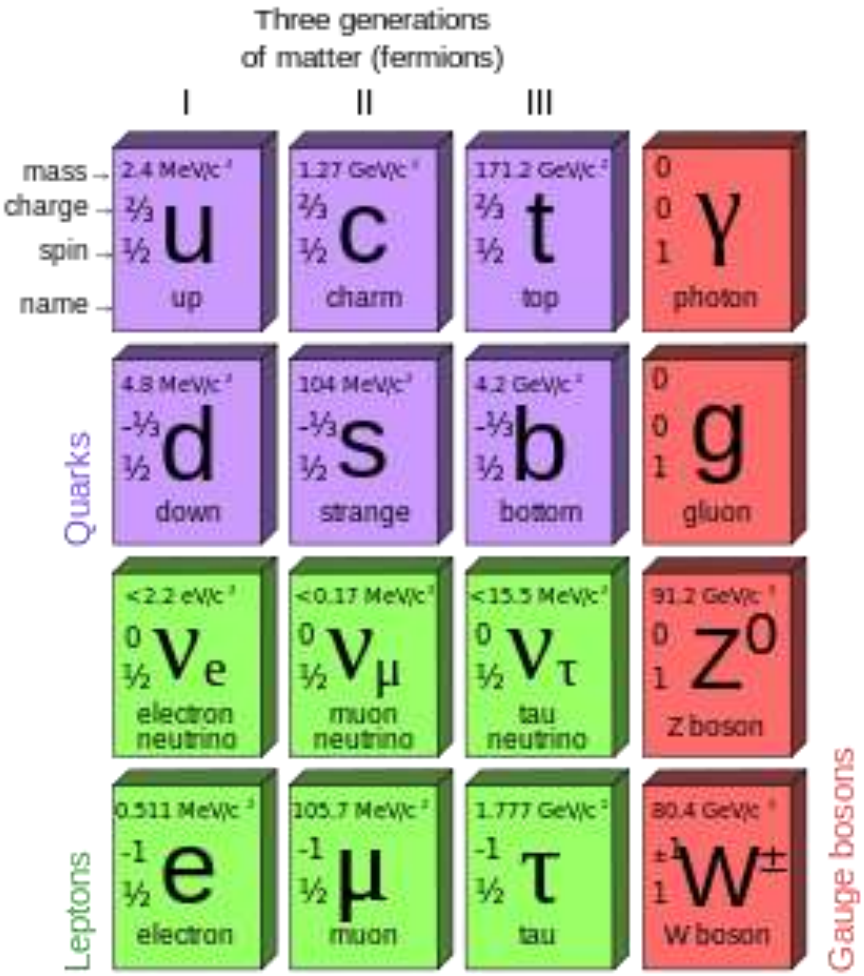
D'après Michel Davier, *LHC: enquête sur le boson de Higgs,* Le Pommier/Cité des sciences et de l'industrie, Paris 2008



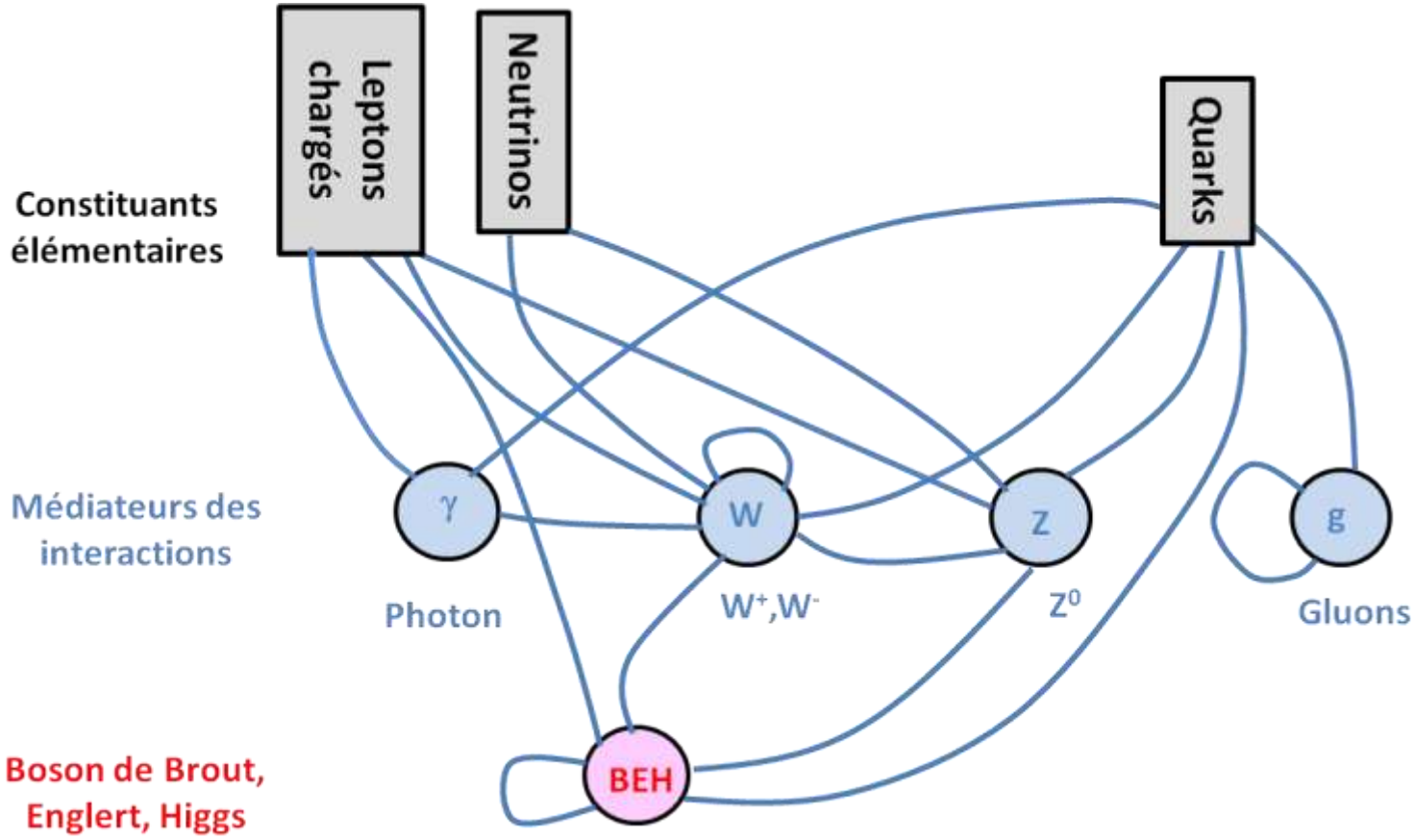




Transition induite par le mécanisme BEH 10^{-12} s après le « Big bang »



- **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

4.3Le 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

L'inconnue: le champ de métrique de l'espace-temps

$$R_{\mu\nu}(x) - \frac{1}{2} g_{\mu\nu}(x) R + \Lambda g_{\mu\nu}(x) = -\kappa T_{\mu\nu}(x)$$

Courbure de l'espace-temps

Constante cosmologique

Tenseur énergie de la matière

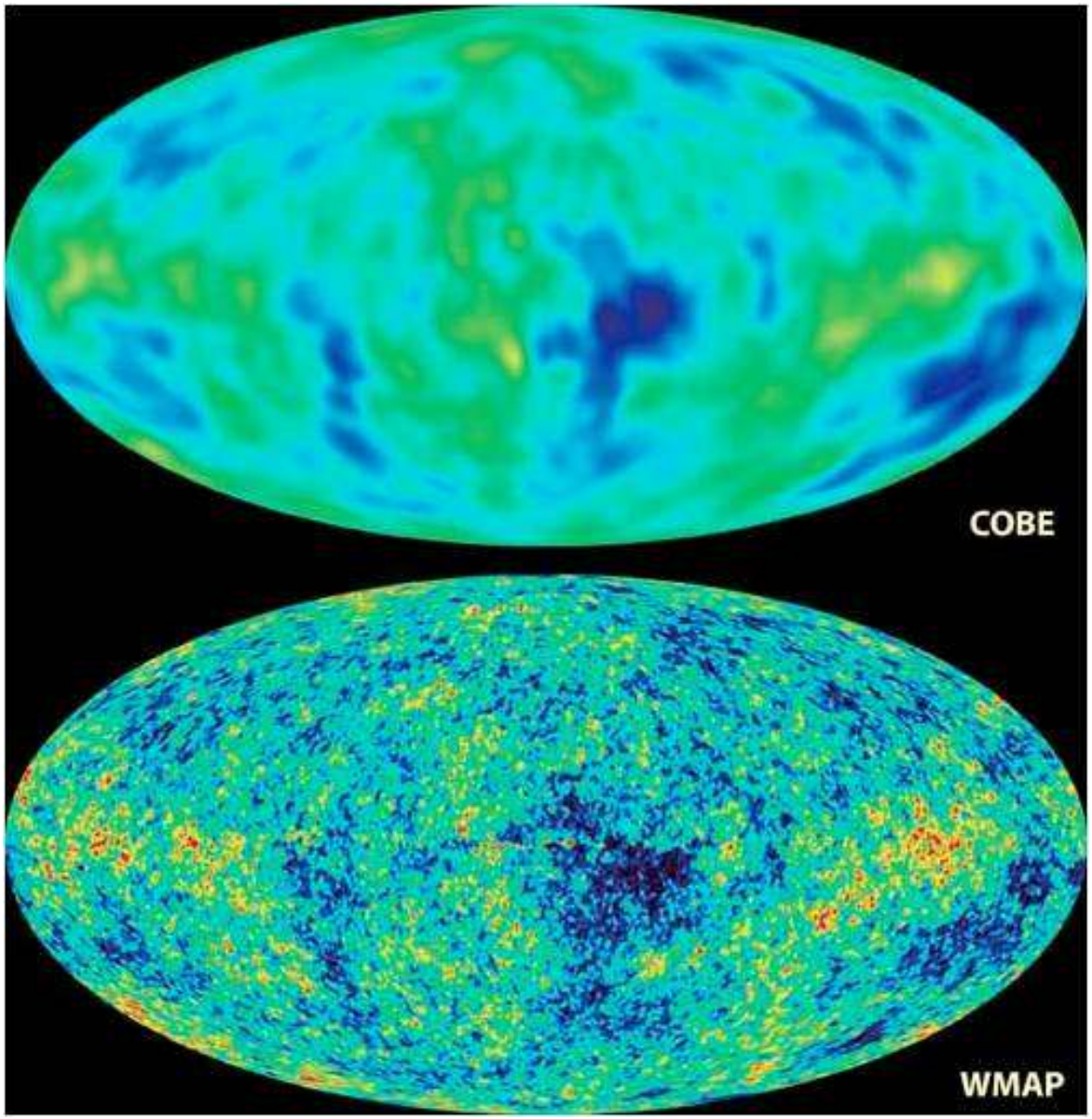
Constante de proportionnalité:
$\kappa = G / c^2$

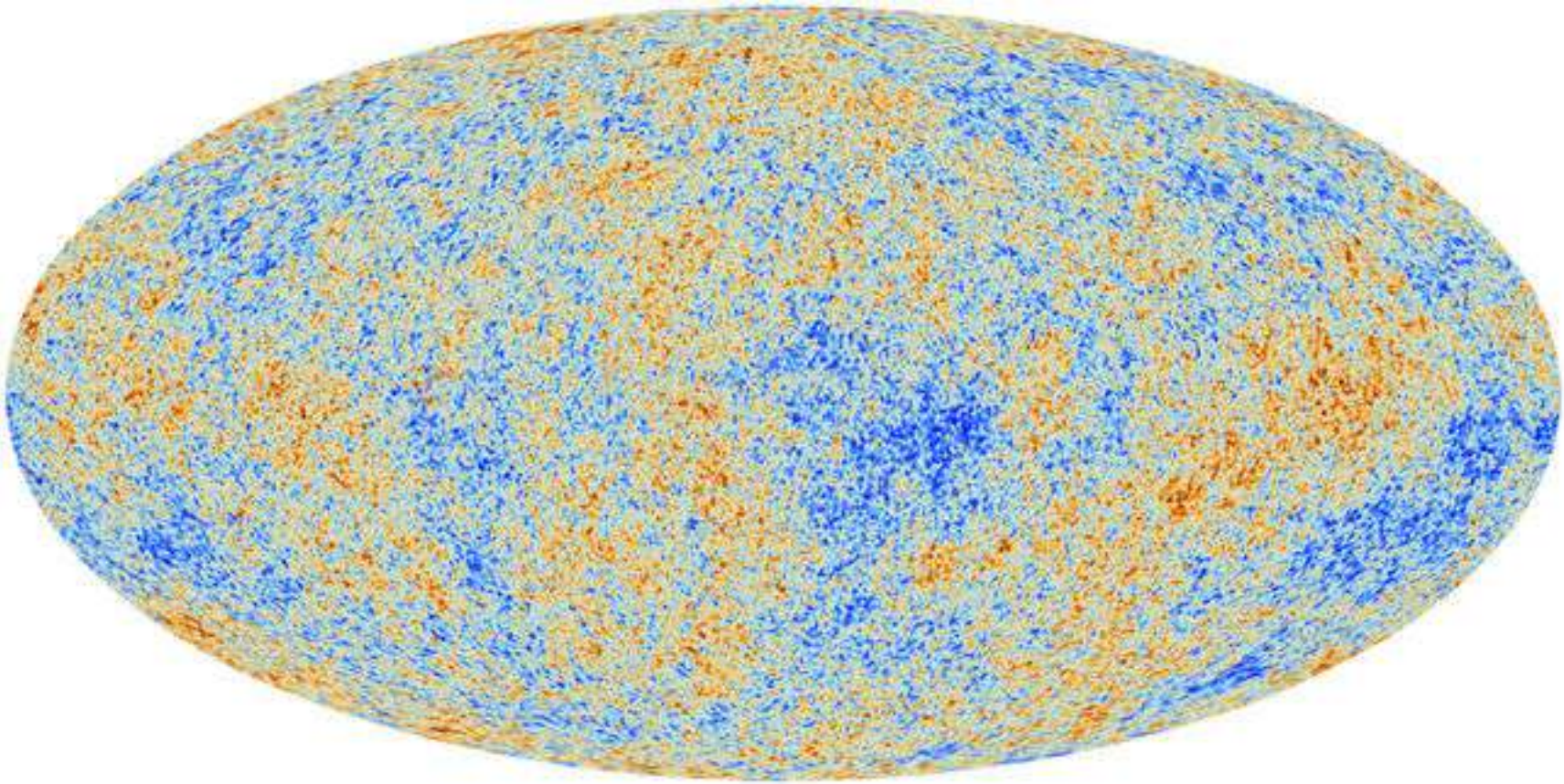
La matière dicte à l'espace-temps comment il doit se courber: l'espace temps dicte à la matière comment elle doit se mouvoir

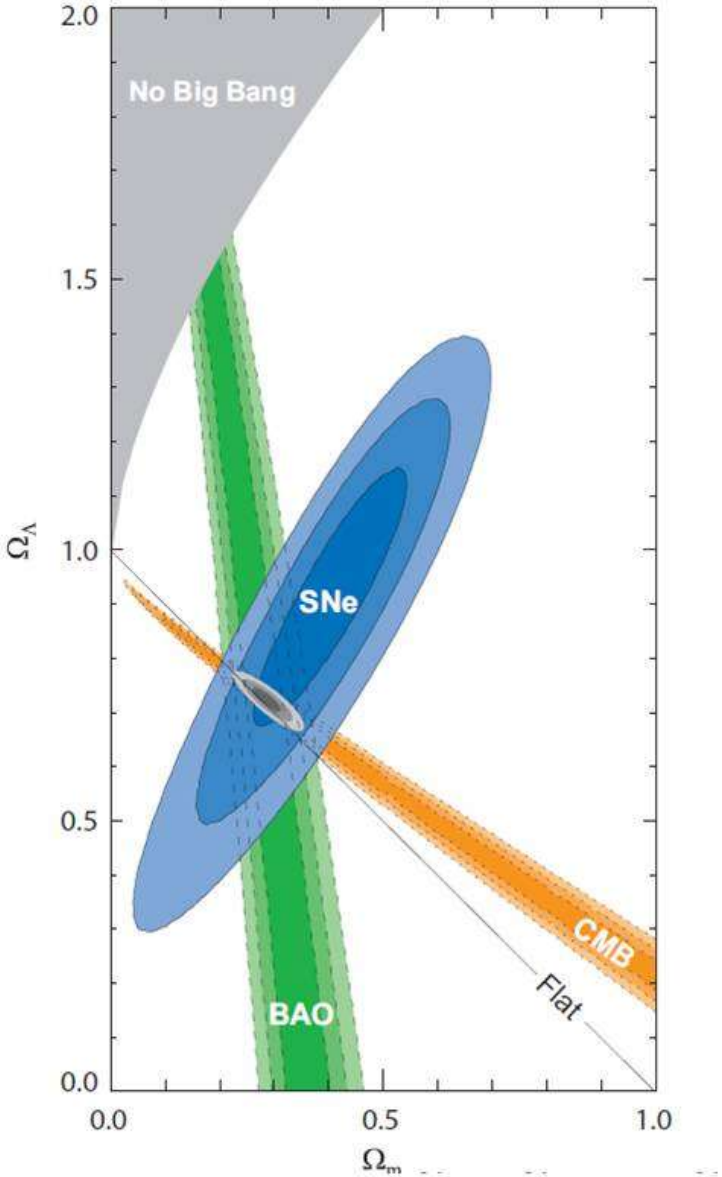
Le modèle cosmologique du « big bang »

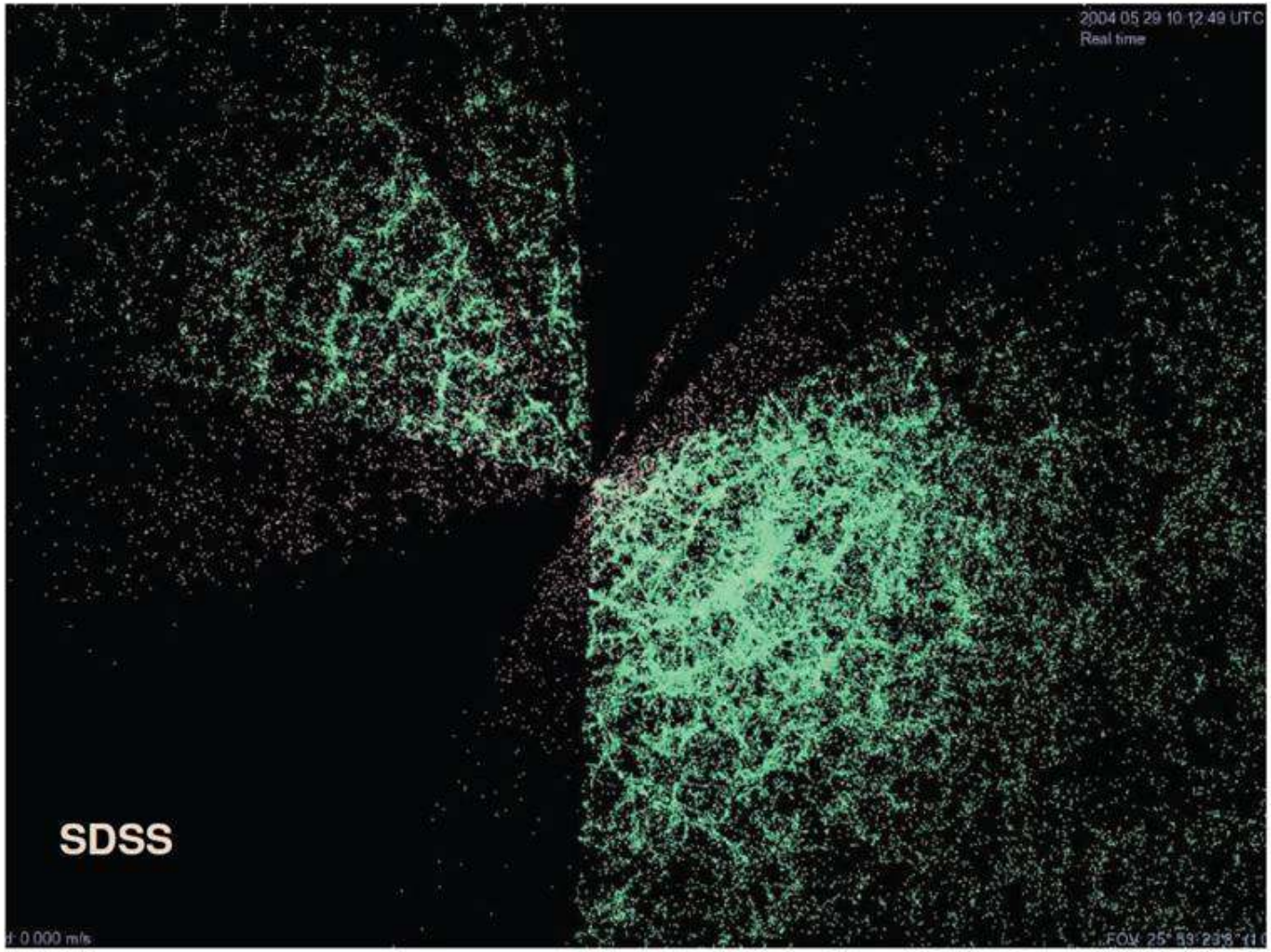
- Le modèle « simple » du big bang (**Lemaître, Friedman, Robertson, Walker**)
  - Récession des galaxies lointaines, loi de Hubble
  - Abondance relative des éléments léger (nucléosynthèse primordiale)
  - Rayonnement diffus de fond cosmologique (RDFC) à environ 3 degrés Kelvin, détecté en 1965
  - **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**

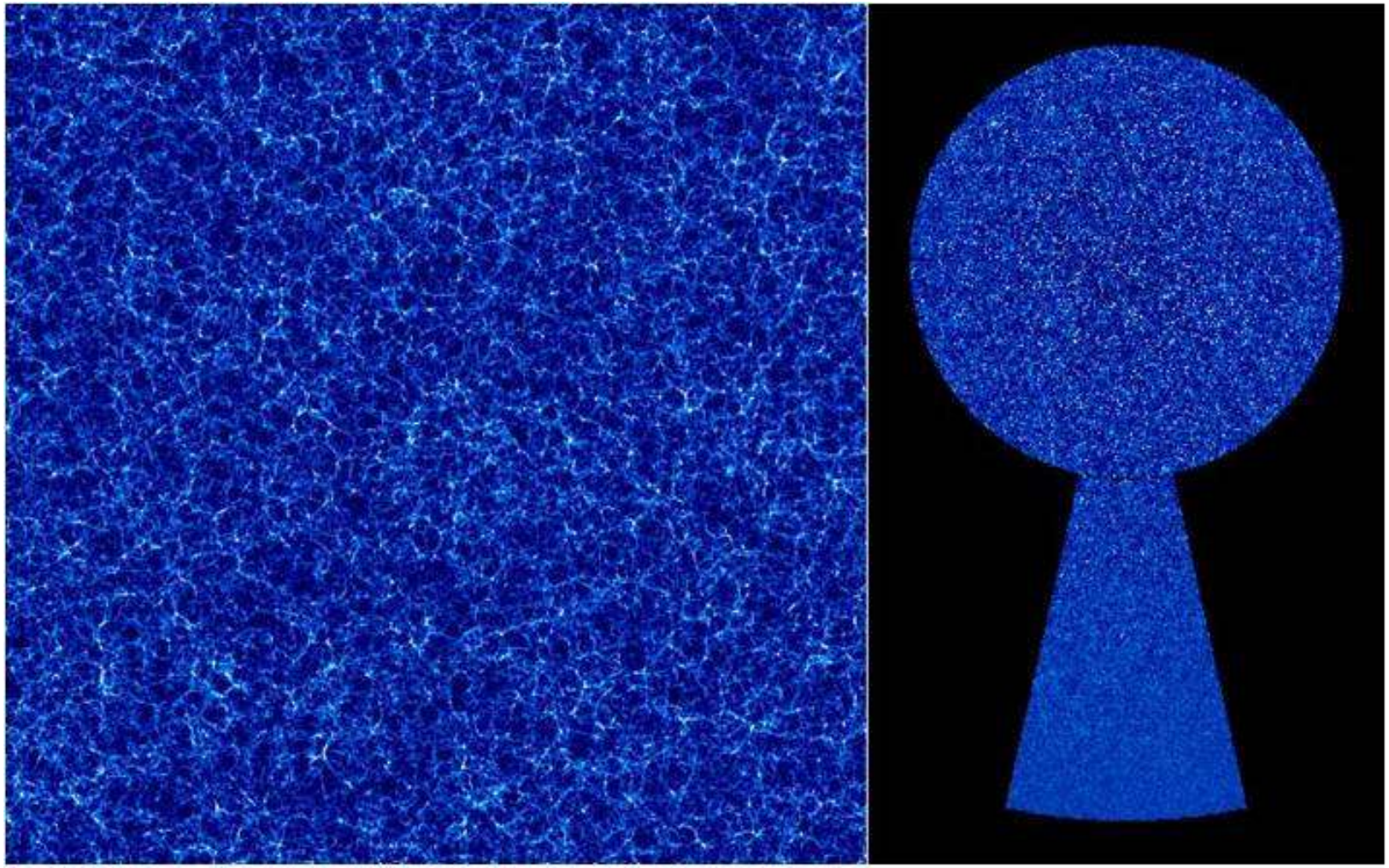

COBE
WMAP




No Big Bang
SNe
BAO
CMB
Flat
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
0.0
0.5
1.0
Ω_Λ
Ω_m



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

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

Étalon cosmique de distance

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

Constante de Hubble

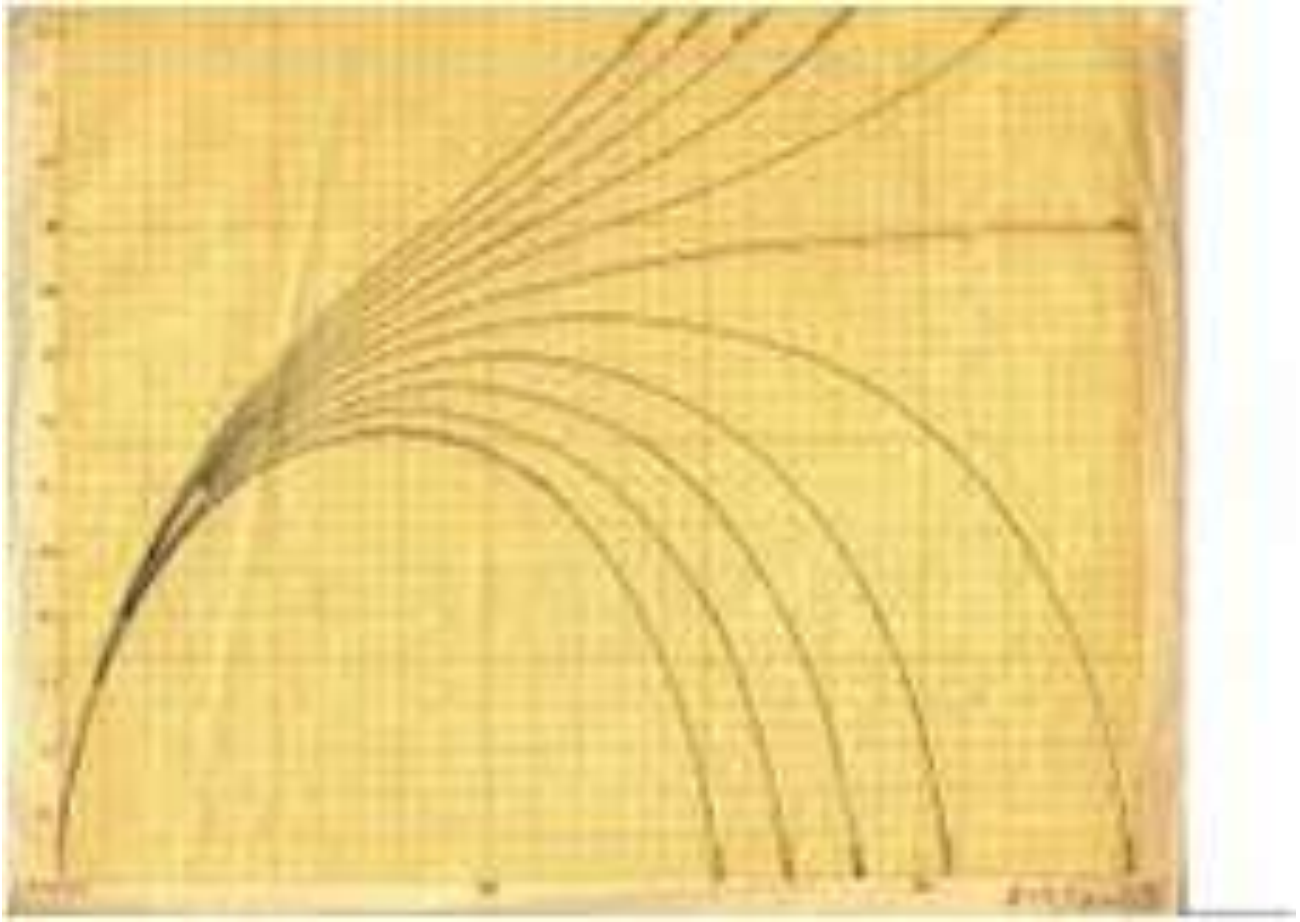
$$H_0 \equiv (\dot{a}/a)_0$$

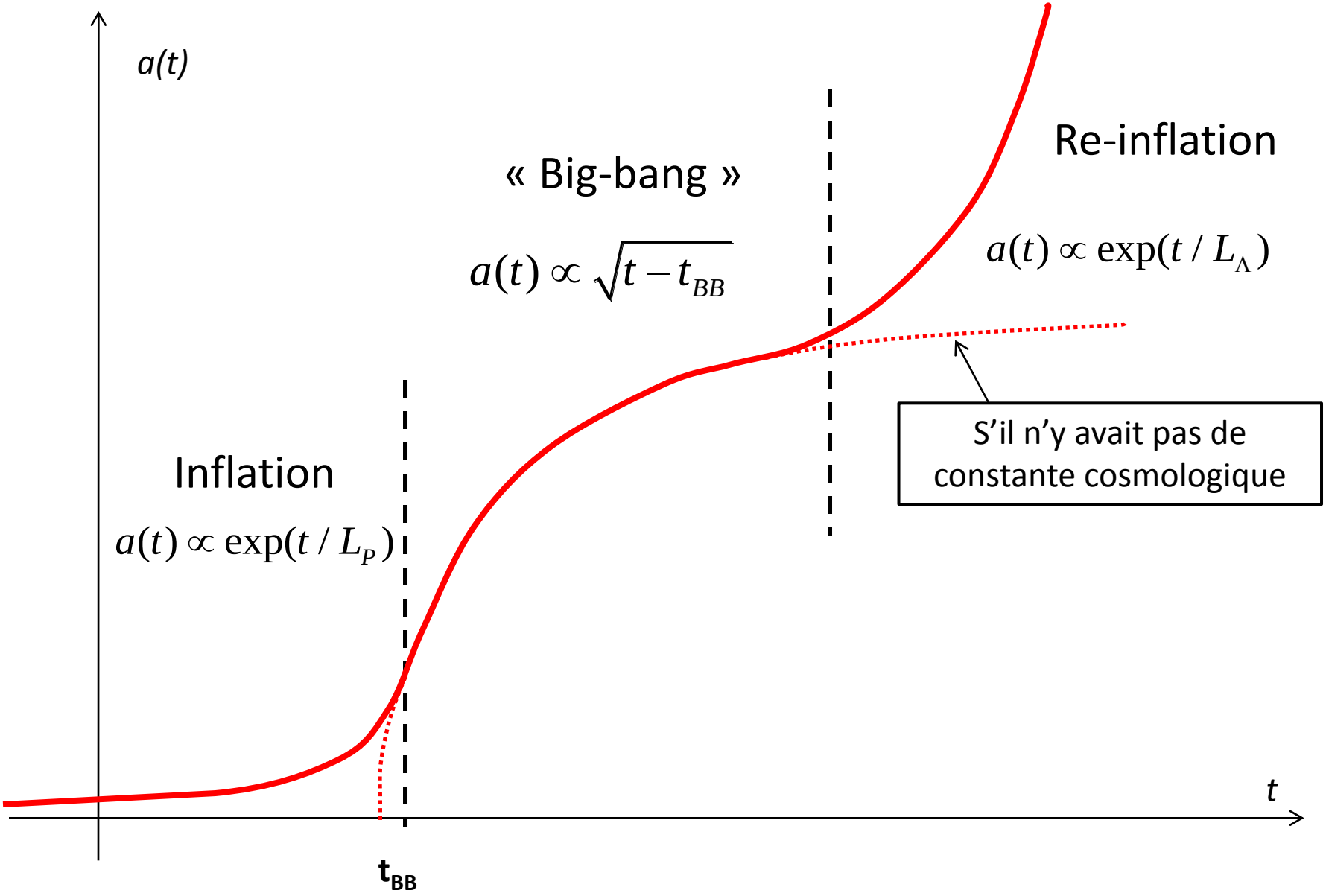
$$\frac{\dot{a}^2 + k}{a^2} = \frac{8\pi G\rho}{3}; \quad d(\rho a^3) = -p da^3$$

Inflation

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

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




a(t)
« Big-bang »
$a(t) \propto \sqrt{t - t_{BB}}$
Re-inflation
$a(t) \propto \exp(t / L_\Lambda)$
Inflation
$a(t) \propto \exp(t / L_P)$
S'il n'y avait pas de constante cosmologique
t
t_{BB}

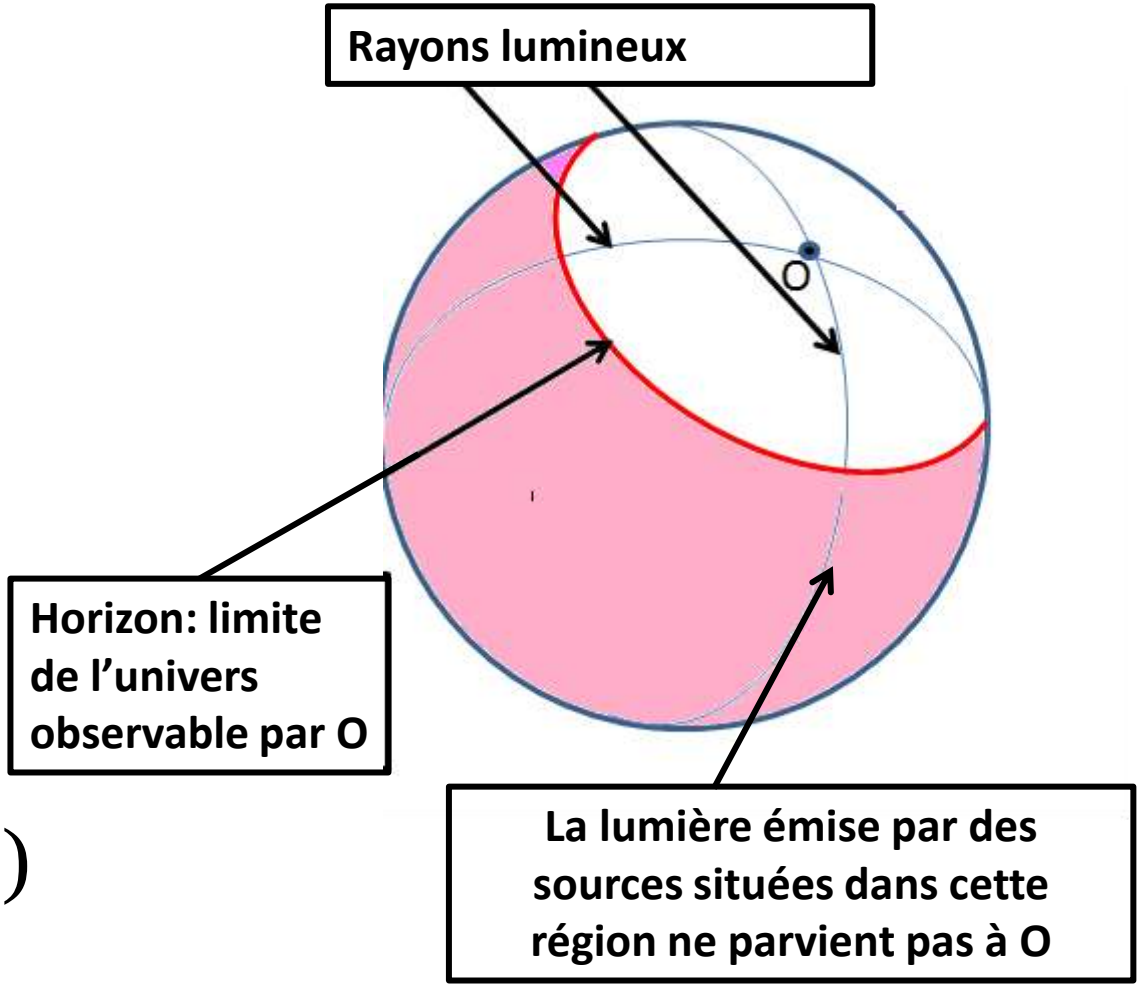
Horizon, univers observable et Univers entier à deux dimensions d'espace

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

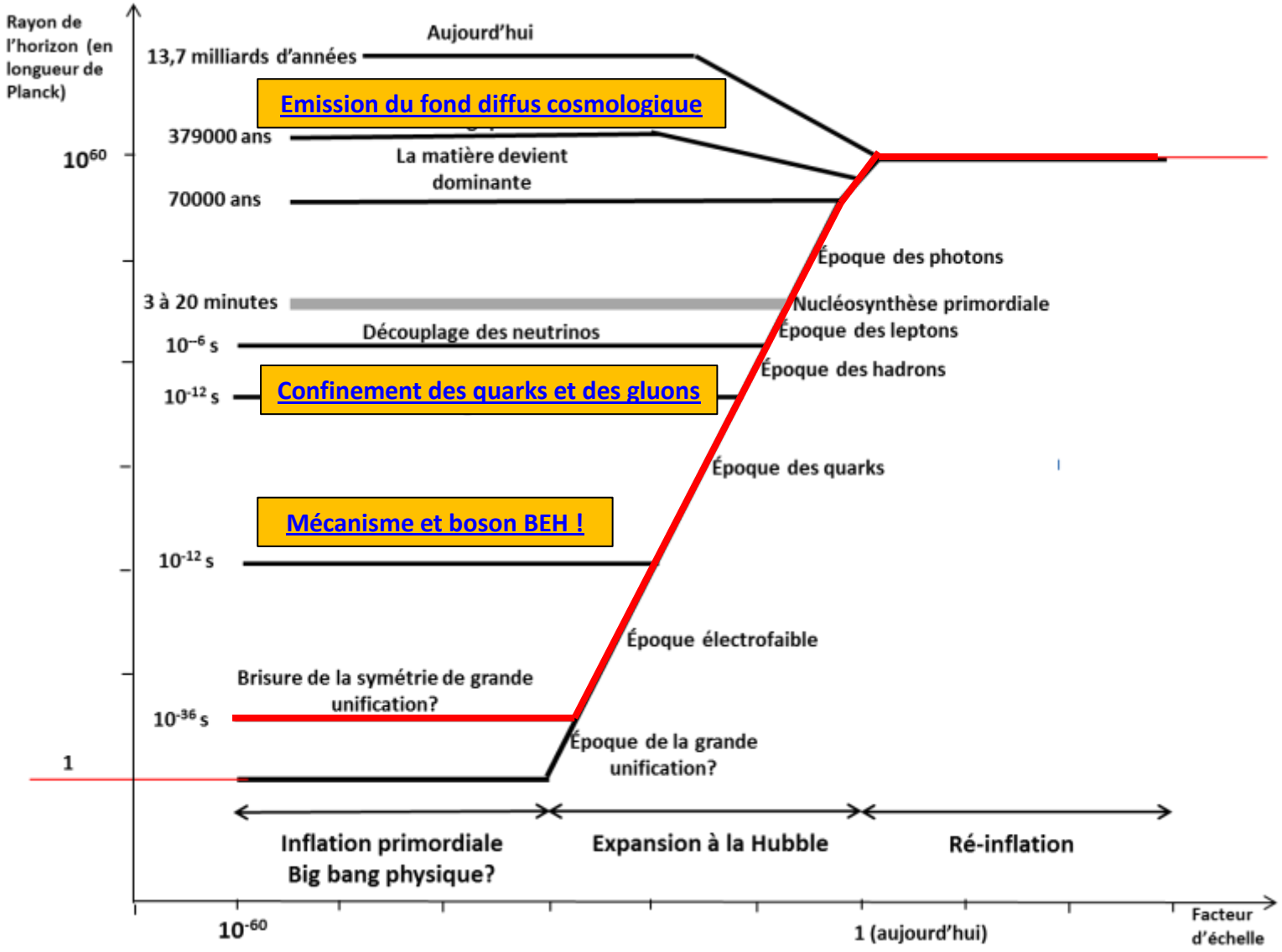
$$R_H = c\frac{a(t)}{\dot{a}(t)}$$

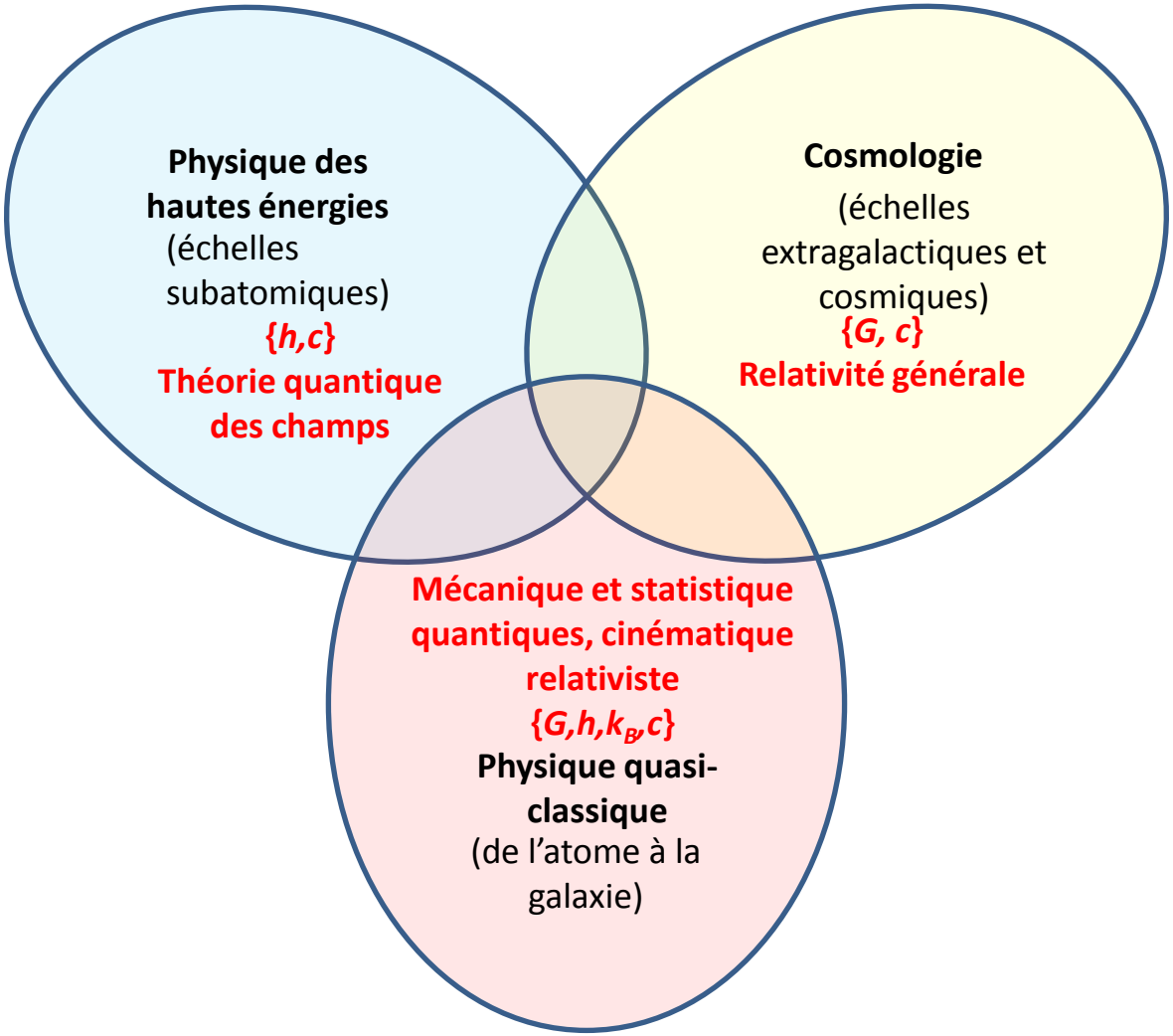
Ce rayon de l'horizon est constant dans le cas d'une expansion exponentielle (de Sitter)

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



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




Physique des hautes énergies
(échelles subatomiques)
{h,c}
Théorie quantique des champs
Cosmologie
(échelles extragalactiques et cosmiques)
{G, c}
Relativité générale
Mécanique et statistique quantiques, cinématique relativiste
{G,h,k_B,c}
Physique quasi-classique
(de l'atome à la galaxie)

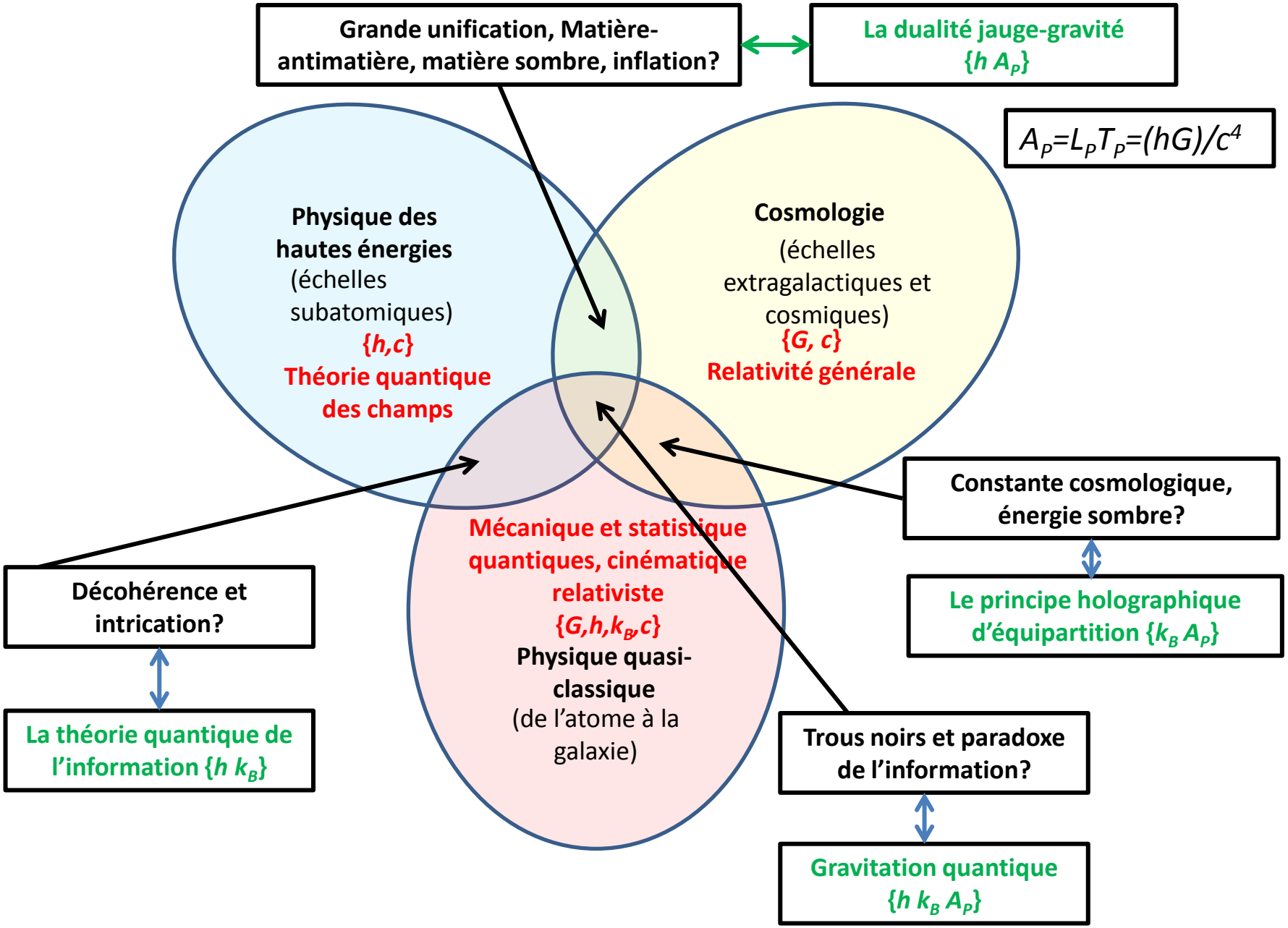
5/ Et maintenant? Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

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

Une brève histoire du modèle standard consolidé

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 $A_P=L_PT_P=(hG)/c^4$: quantum d'espace-temps
- Complémentarité généralisée
  - Trois théories à deux quanta
  - Une théorie à trois quanta: la gravitation quantique!?


Grande unification, Matière-antimatière, matière sombre, inflation?
La dualité jauge-gravité {h A_P}
A_P=L_PT_P=(hG)/c^4
Physique des hautes énergies (échelles subatomiques) {h,c} Théorie quantique des champs
Cosmologie (échelles extragalactiques et cosmiques) {G, c} Relativité générale
Constante cosmologique, énergie sombre?
Le principe holographique d'équipartition {k_B A_P}
Décohérence et intrication?
La théorie quantique de l'information {h k_B}
Mécanique et statistique quantiques, cinématique relativiste {G,h,k_B,c} Physique quasi-classique (de l'atome à la galaxie)
Trous noirs et paradoxe de l'information?
Gravitation quantique {h k_B A_P}