

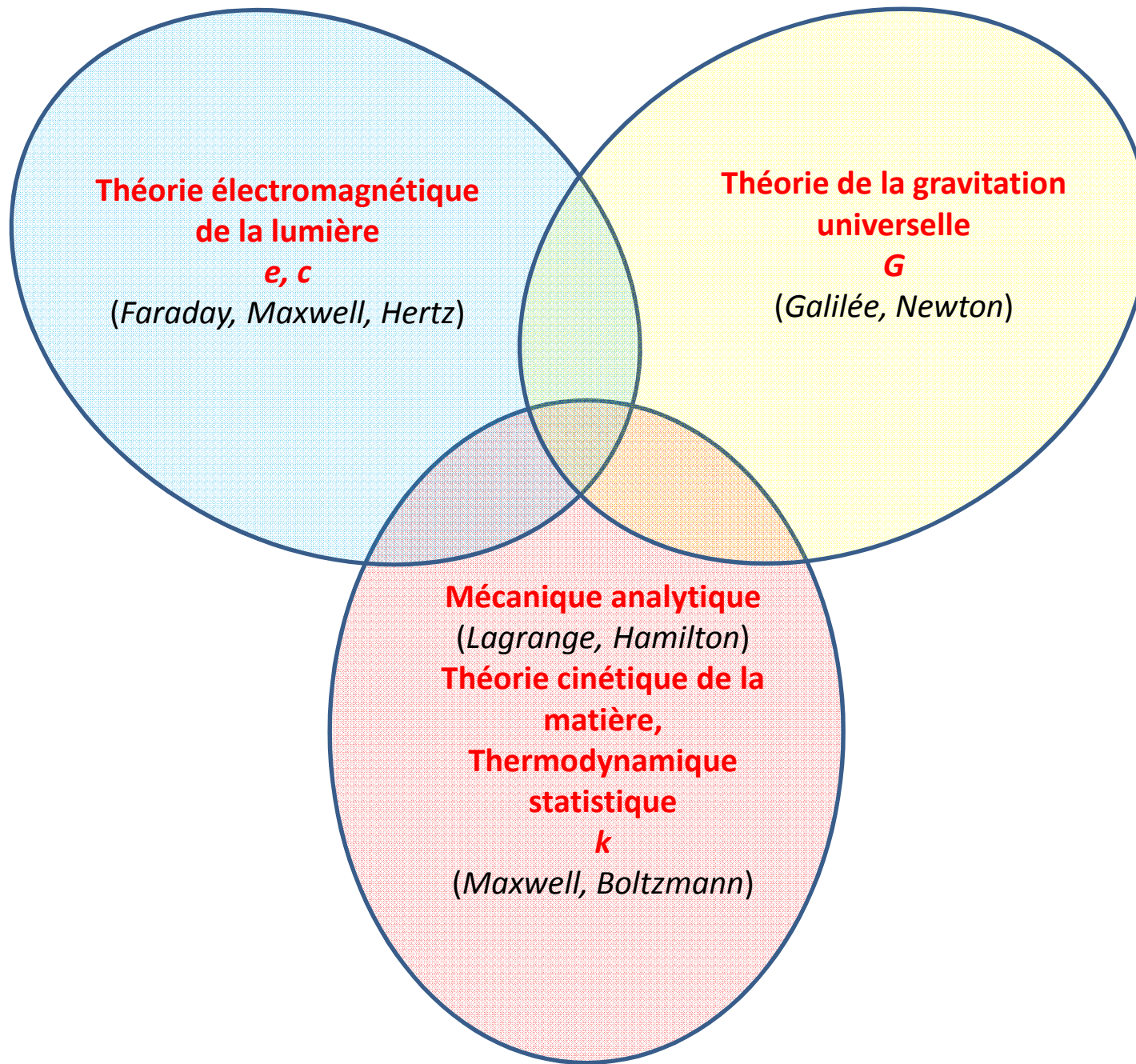
# Une nouvelle révolution scientifique à l'horizon?

Gilles Cohen-Tannoudji

LARSIM CEA-Saclay

L'univers invisible, Paris 6-10 juillet 2009

# L'apogée de la physique classique à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle



# Bilan de la révolution scientifique du 20<sup>ème</sup> siècle

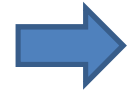
- **La révolution scientifique du 20<sup>ème</sup> siècle**
  - $G, c, k, h$  : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20<sup>ème</sup> siècle
    - Définissent les **unités fondamentales**
    - Traduisent des **principes fondamentaux de limitation**
    - Structurent le **cadre général de la physique théorique**
- **Le « trépied » de la physique théorique**
  - Physique « **fondamentale** »
    - La théorie quantique des champs ( $h, c$ )
    - La relativité générale ( $G, c$ )
  - Physique « **phénoménologique** »: Mécanique et statistique quantiques ( $h, k$ ), cinématique relativiste ( $c$ )

# La théorie quantique des champs

- **Principes de limitation liés à  $\hbar$  et  $c$** 
  - L'existence d'un quantum élémentaire d'action,  $\hbar$  exclue toute subdivision des processus quantiques individuels, qui doivent être traités comme des **événements non prédictibles ni reproductibles individuellement**
  - La vitesse de la lumière dans le vide,  $c$ , est interprétée comme la constante universelle traduisant toujours et partout **l'impossibilité d'action instantanée à distance**

- **La théorie quantique des champs**

- Mariage de la relativité restreinte (prise en compte de  $c$ ) et de la mécanique quantique (prise en compte de  $\hbar$ )
- Base théorique de la physique **des particules élémentaires** et des **interactions fondamentales non gravitationnelles**
- Champs quantiques
  - Champs **relativistes**, i.e. définis en chaque point de l'espace-temps de Minkowski
  - Champs **quantiques** i.e. champs d'**opérateurs** agissant dans un **espace de Hilbert** provoquant des **événements** d'émission ou d'absorption de **quanta d'énergie**
  - Les quanta d'énergie sont des **particules** ou des **antiparticules** (résolution du problème des énergies négatives)
  - Interactions et couplages locaux: **produits de champs évalués au même point d'espace-temps**
  - Le **vide**: état fondamental du système de champs quantiques dans lequel le nombre de quanta d'énergie est nul, mais où les champs quantiques sont affectés de **fluctuations quantiques** (par exemple la création puis la désintégration d'une paire particule-antiparticule)



- **Le modèle standard de la physique des particules**
  - Le paradigme de l'électrodynamique quantique (QED)
    - Existence d'une limite classique
    - Effets des corrections quantiques et relativistes mesurables en physique atomique
    - Théorie à **invariance de jauge** (abélienne) locale
    - Théorie **renormalisable**
    - **Accord théorie/expérience excellent** ( $10^{-11}$ )
  - Généralisation aux autres interactions fondamentales non gravitationnelles: **théories à invariance de jauge non abéliennes, renormalisables**
    - Le niveau sub-hadronique d'élémentarité: les **quarks** et les **gluons**
    - La **chromodynamique quantique (QCD)**, interaction forte des quarks et gluons
    - La **théorie électrofaible** de Glashow, Salam et Weinberg, unification des interactions faible et électromagnétique
    - Accord théorie/expérience très bon:  $10^{-3}$  jusqu'à 200 GeV



- Les théories **renormalisables**
  - La **localité** des couplages d'interaction induit une **singularité** dans la TQC: les **intégrales** à partir desquelles on obtient les amplitudes de transition **divergent**
  - Une théorie est dite **renormalisable** si toutes les observables physiques peuvent s'exprimer sans infini à l'aide de paramètres dépendant de l'énergie, redéfinis (on dit « **renormalisés** ») par l'interaction
  - Une théorie **renormalisable** est **prédictive** : les paramètres dont elle dépend sont en nombre fini et ils peuvent être déterminés expérimentalement
  - Mais elle n'est pas « fondamentale »: la **valeur des paramètres dépend de la résolution (c'est-à-dire de l'énergie accessible)**
  - Cette théorie est efficace (en anglais « **effective** ») car la dépendance en énergie des paramètres est prédictible, grâce aux **équations du groupe de renormalisation**

# La relativité générale

- **La relativité restreinte**
  - Équivalence des **référentiels inertiels** en mouvement relatif uniforme
  - Invariance de la vitesse de la lumière dans le vide
  - **Cinématique invariante de Lorentz dans l'espace-temps quadridimensionnel de Minkowski**
  - Élimination de l'éther
  - Promotion du concept de **champ** au rang de concept fondamental

- **Covariance générale, principe d'équivalence et théorie géométrique de la gravitation**
  - Un **changement quelconque de référentiel** peut être remplacé, **localement**, par un **champ gravitationnel adéquat**
  - Le **champ gravitationnel** peut être remplacé, **localement**, par un **changement de référentiel adéquat**
  - Équation d'Einstein relie le tenseur de Ricci-Einstein lié à la **géométrie non euclidienne** de l'espace-temps au **tenseur énergie-impulsion** décrivant de manière **phénoménologique** les propriétés de la matière
  - La constante de proportionnalité entre ces deux tenseurs, est ajustée de façon à redonner la gravitation newtonienne à la limite non relativiste
  - La covariance générale implique que ne sont observables que des **événements de coïncidence spatio-temporelle** (par exemple des couplages locaux entre champs quantiques).

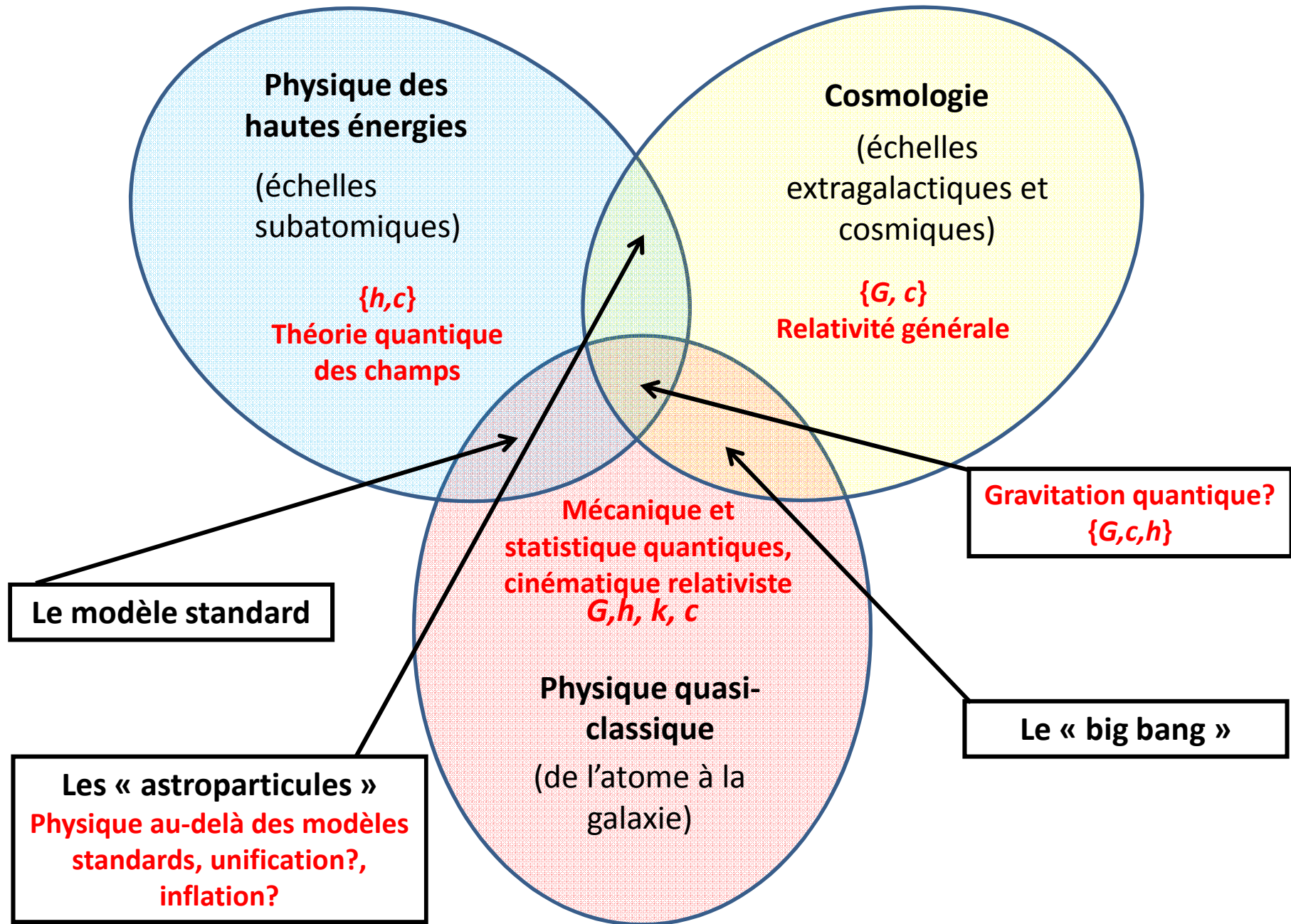
- **Relativité générale et cosmologie**

- L'univers statique d'Einstein

- La relativité générale devient la base théorique de modèles cosmologiques dans lesquels le contenu matériel de l'univers (tenseur d'énergie-impulsion) est modélisé de manière phénoménologique
- La **constante cosmologique** introduite par Einstein: un terme compatible avec la covariance générale, lié à une propriété globale de l'univers (inverse du carré du « rayon » d'un **univers fini et sans bord**), et induisant une « pression négative » capable de contrebalancer l'action de la gravitation et de conduire à un **univers statique**
- L'univers de **de Sitter** serait un univers statique d'Einstein sans matière, mais avec constante cosmologique. Einstein refuse un tel univers qui serait en contradiction avec le « **principe de Mach** » selon lequel la géométrie (par exemple la courbure liée à la constante cosmologique) devrait être induite par la matière

- L'univers statique d'Einstein, comme celui de de Sitter, comporte une singularité apparente: les rayons lumineux issus d'un point d'espace-temps convergent vers un point conjugué qui peut être confondu avec le point de départ (espace elliptique) qui apparaît comme une **singularité** analogue à la singularité dans un trou noir de Schwarzschild . Cependant un tel univers comporte un **horizon des événements** qui masque cette singularité
- Des arguments **observationnels** (mouvement de **récession des galaxies lointaines** – **Hubble** – infirmant l'hypothèse du caractère statique de l'univers) et **théoriques** (**instabilité** de l'équilibre entre pression négative et gravitation, possibilité, avec l'équation d'Einstein sans constante cosmologique, d'obtenir un univers statique, ou en expansion ou en contraction – **Friedman** –) conduisent Einstein à abandonner la constante cosmologique
- **Échelles de Planck** et horizon de la **gravitation quantique**

- **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



# Les enjeux d'une nouvelle révolution scientifique

# Les signes annonciateurs de cette nouvelle révolution scientifique

- Renouveau de l'interprétation de la physique quantique faisant jouer un rôle décisif au concept d'information (« **seconde révolution quantique** »)
- Indication de physique au-delà du modèle standard (**masse des neutrinos**)
- Deux découvertes majeures de la cosmologie observationnelle
  - La **matière sombre** dont l'explication exigerait une physique au-delà du modèle standard
  - **L'accélération de l'expansion de l'univers** pouvant s'expliquer à l'aide d'une **constante cosmologique** non nulle
- **Une cinquième constante universelle?**
- Crise de l'incompatibilité de la TQC et de la RG et horizon de **la gravitation quantique**

- **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**
    - Détermination avec une grande précision de la carte du RDFC (**COBE, WMAP, bientôt 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 standard inévitables de la densité d'énergie (**matière sombre et énergie sombre**)
    - **Interprétation** des fluctuations observées dans le RDFC comme le résultats 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**

## La métrique de Friedman, Lemaître, Robertson, Walker

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

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

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

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

Implications de la **constante cosmologique**

$$L_\Lambda = \sqrt{3/\Lambda}$$

- Existence d'un **horizon des événements** de rayon

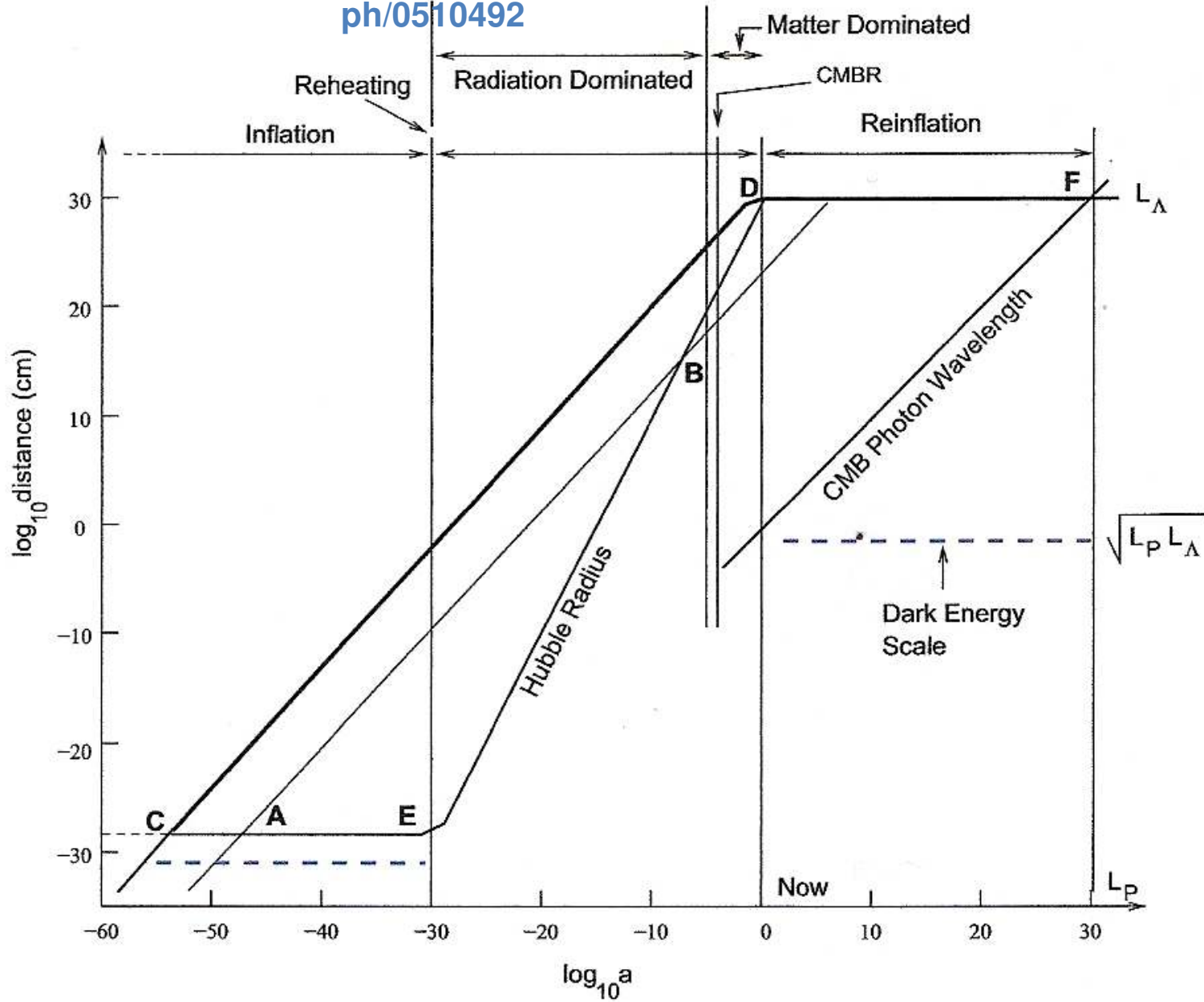
- **Pression négative**  $p_\Lambda = -\rho_\Lambda$

$$t \rightarrow \infty \Rightarrow H \rightarrow H_\infty = 1/L_\Lambda; \rho_c \rightarrow \frac{3}{8\pi L_\Lambda^2 G} = \rho_{DE}; \Omega_{DE} \rightarrow 1$$

En unités naturelles

- **La densité d'énergie sombre est bien la densité d'énergie du vide: toute la matière est passée au-delà de l'horizon !**

$$(\hbar = c = 1) G = 1/L_P^2; \rho_{DE} \propto \frac{1}{L_\Lambda^2 L_P^2}$$



## • Les principes d'holographie et de complémentarité des horizons des événements

- Analogie entre mécanique des trous noirs et thermodynamique (Bekenstein, Hawking)
- Accroissement de l'aire de l'horizon d'un trou noir par ajout d'un bit d'information (L. Susskind, *the black hole war*, Brown and company, 2008)
  - Rayon de l'horizon  $R_S = 2MG/c^2$
  - Un bit d'information: un photon de  $\lambda = R_S$  jeté dans le trou noir
  - $\Delta M c^2 = \Delta E = hc/R_S \rightarrow \Delta M = h/cR_S$
  - $\Delta R_S = 2\Delta MG/c^2 \rightarrow \Delta A_H = 2\Delta R_S R_S = 4hG/c^3 = 4A_p$
- Toute l'information contenue dans un trou noir est égale au quart de l'aire de son horizon exprimée en unité d'aire de Planck
- D'après Susskind, ce principe holographique, joint à celui de **complémentarité des trous noirs** permettrait de résoudre le **paradoxe de la non conservation de l'information** (Hawking) qui rendrait caduque toute la physique quantique
- **Ces principes d'holographie et de complémentarité pourraient être étendus à tout horizon des événements et ainsi conduire à une théorie quantique de la gravitation**

# Une route thermodynamique vers la gravitation quantique

« **Horizons** are an inevitable feature of any geometrical theory of gravity. **Thermal** nature of horizons cannot arise without the spacetime having a **microstructure**

Just as a solid cannot exhibit thermal phenomenon if it does not have microstructure, horizons cannot exhibit thermal behavior if spacetime has no microstructure

Just as thermodynamics provides a link between statistical mechanics and (zero temperature) dynamics of a solid, **horizons link certain aspects of microphysics with the bulk dynamics**

**Gravity is an emergent phenomenon** like elasticity and the field equations should be derivable from an alternative paradigm

The gravitation action is '**holographic**' with the same information being coded in both the bulk and the surface terms »

T. Padmanabhan *Gravity as an emergent phenomenon: A conceptual description* arXiv:0706.1654v1 [gr-qc]

