

La constante cosmologique, cinquième constante universelle?

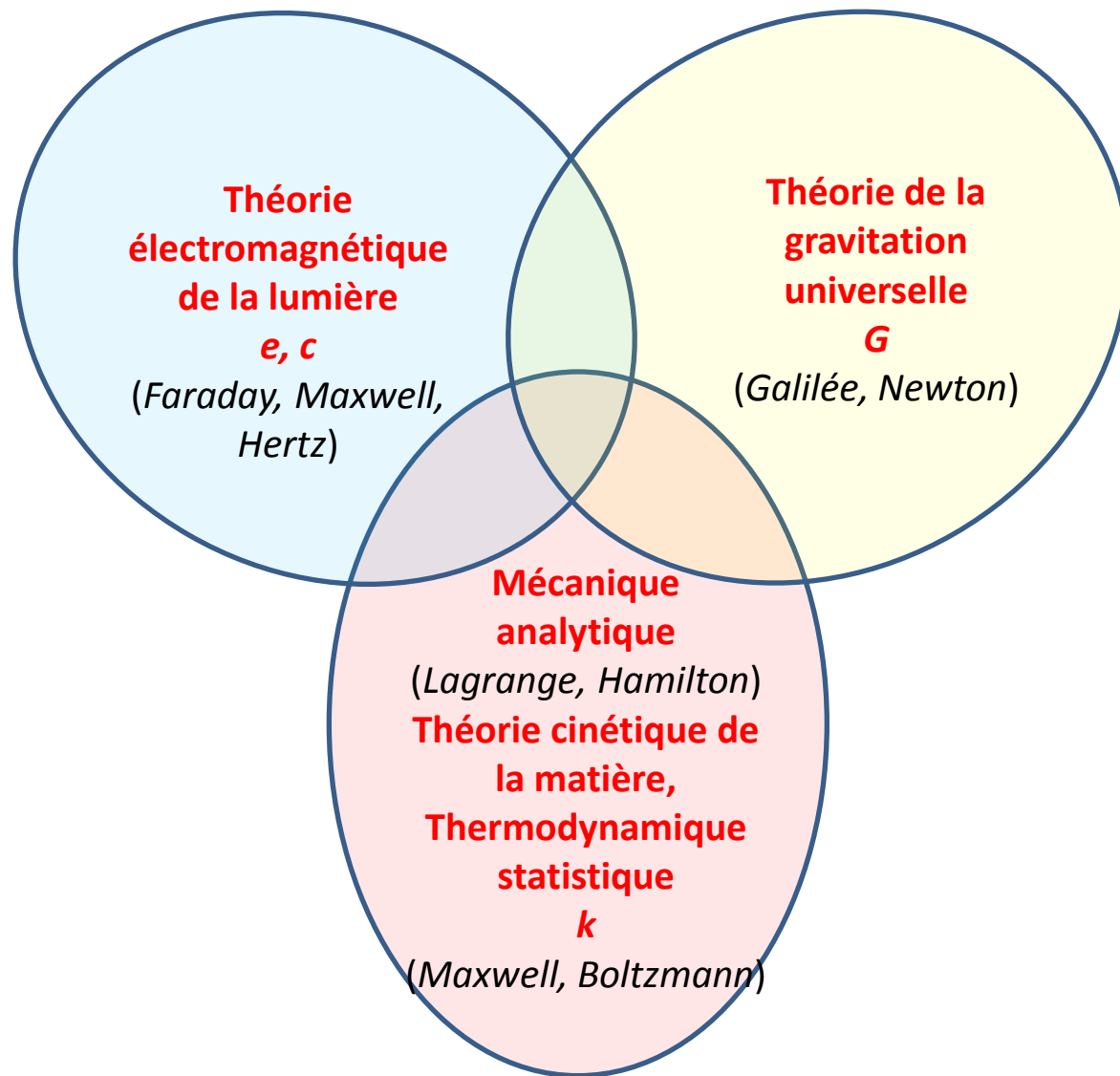
Gilles Cohen-Tannoudji

www.gicotan.fr

LARSIM CEA-Saclay

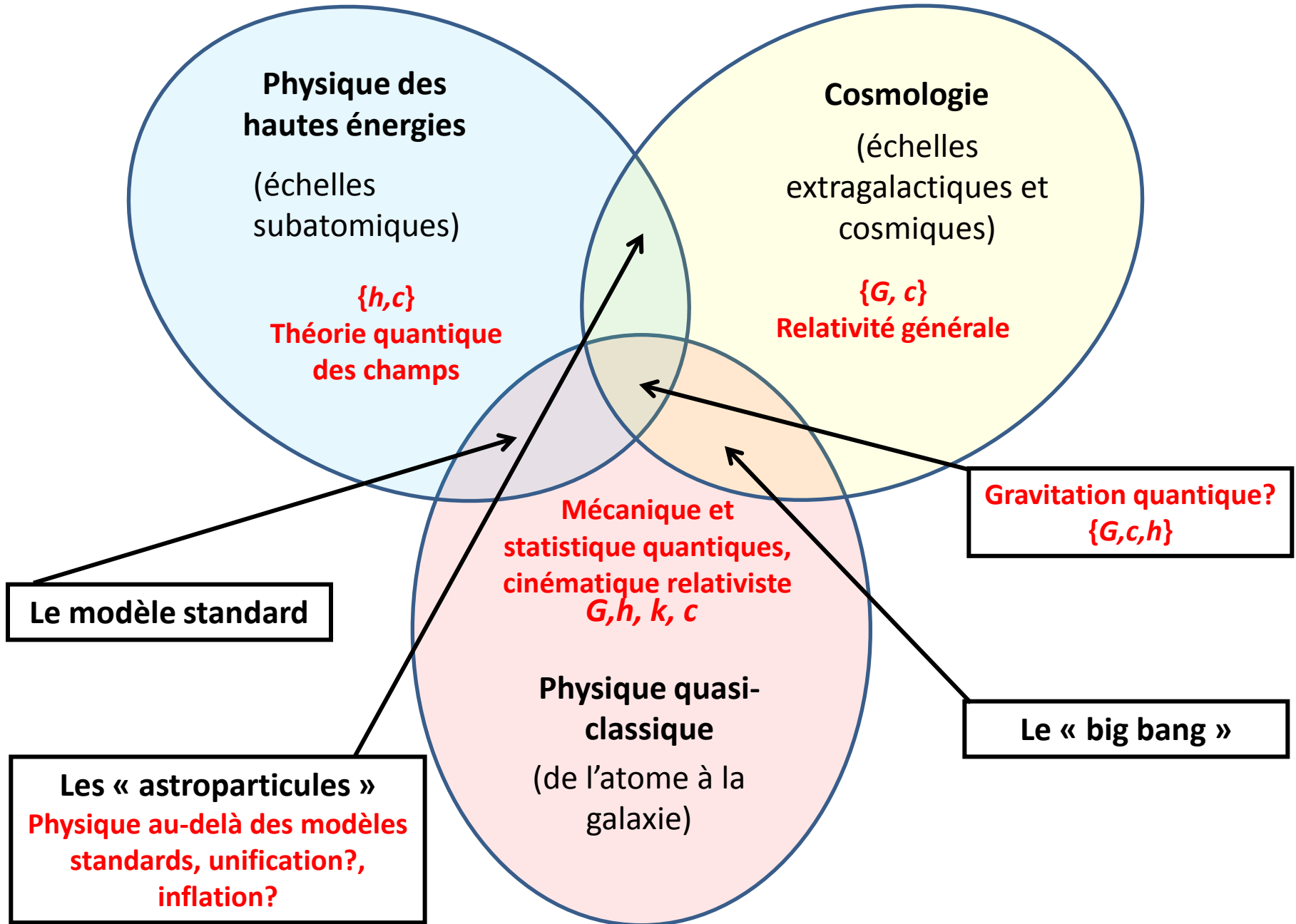
SAF, 15/02/2012

Les constantes universelles et la révolution scientifique du 20^e siècle



L'apogée de la physique classique au début du XX^e siècle

- **La révolution scientifique du 20^{ème} siècle**
 - G, c, k, h : quatre constantes universelles découvertes ou redécouvertes au début du 20^{ème} 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**
 - Physique « **fondamentale** »
 - La théorie quantique des champs (h, c)
 - La relativité générale (G, c)
 - Physique « **phénoménologique** »: Statistique quantique et physique quantique à notre échelle

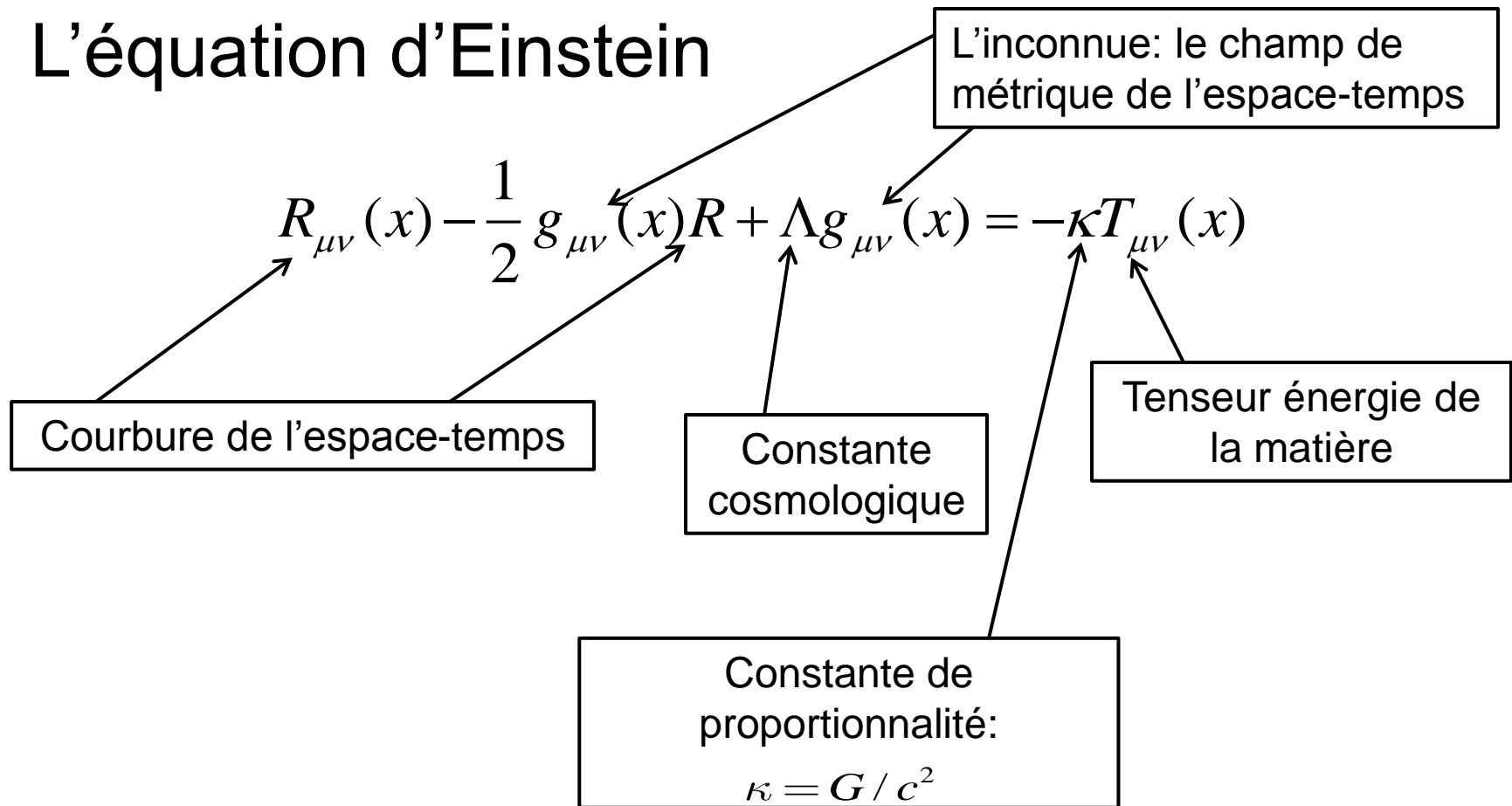


La relativité générale

- **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**
 - L'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).

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

• 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 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

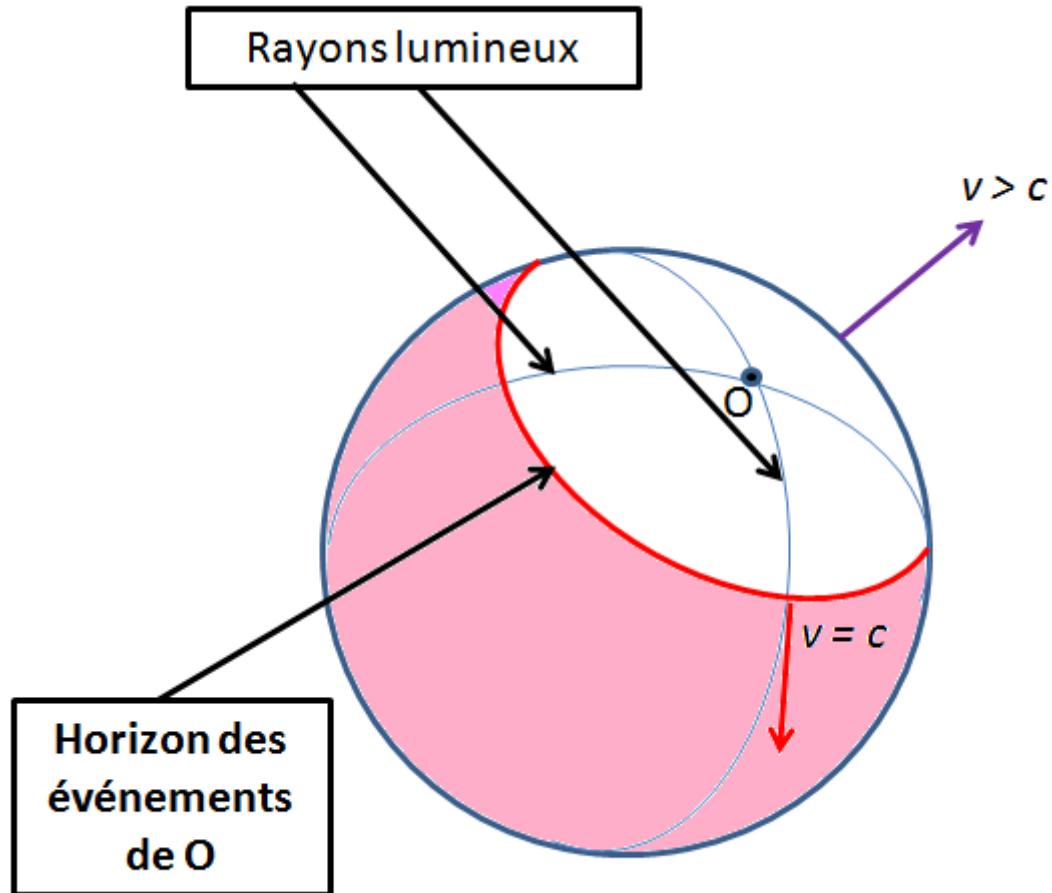
- Des arguments **observationnels** (mouvement de **récession des galaxies lointaines** – **Hubble** – infirmant l’hypothèse du caractère statique de l’univers) et **théoriques** (**instabilité** de l’équilibre entre pression négative et gravitation, possibilité, avec l’équation d’Einstein sans constante cosmologique, d’obtenir un univers statique, ou en expansion ou en contraction – **Friedman** –) conduisent Einstein à abandonner la constante cosmologique

- **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 retour de la constante cosmologique

- **Univers de de Sitter**: solution de l'équation d'Einstein, sans second membre (i.e. vide de matière), **avec constante cosmologique**
 - Analogie du ballon gonflable
 - « **inflation** » **exponentielle**
 - **Horizon des événements**

L'analogie du ballon gonflable



- **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, 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 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**

Le nouveau 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

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

Facteur d'échelle

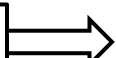
Indice de courbure spatiale, valant -1, 0 ou +1

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



$$k = 0 \Rightarrow \rho = \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

$$\Omega_i = \rho_i / \rho_c$$

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

Implications de la **constante cosmologique**

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

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

- **Pression négative**

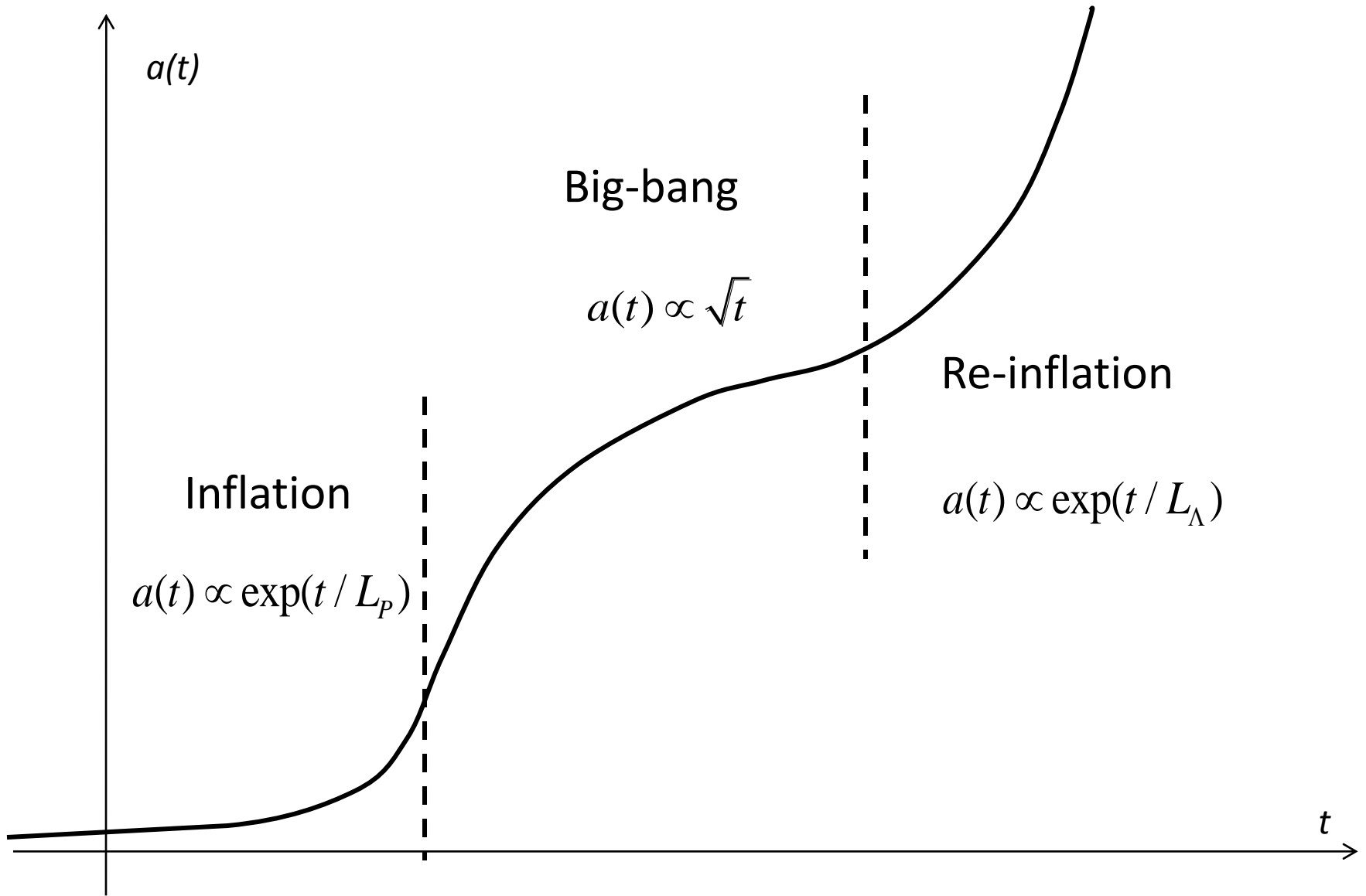
$$p_\Lambda = -\rho_\Lambda$$

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

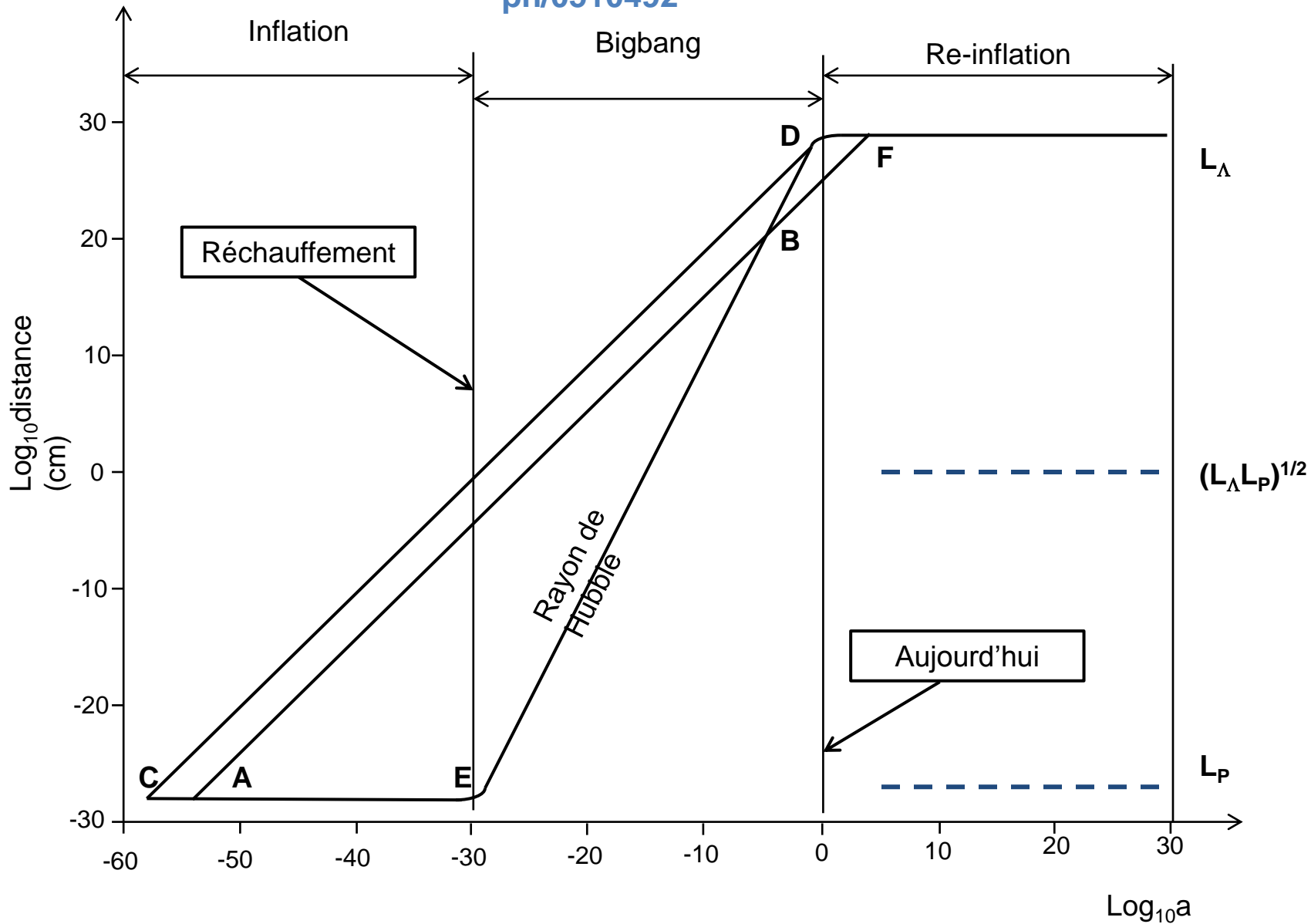
En unités naturelles

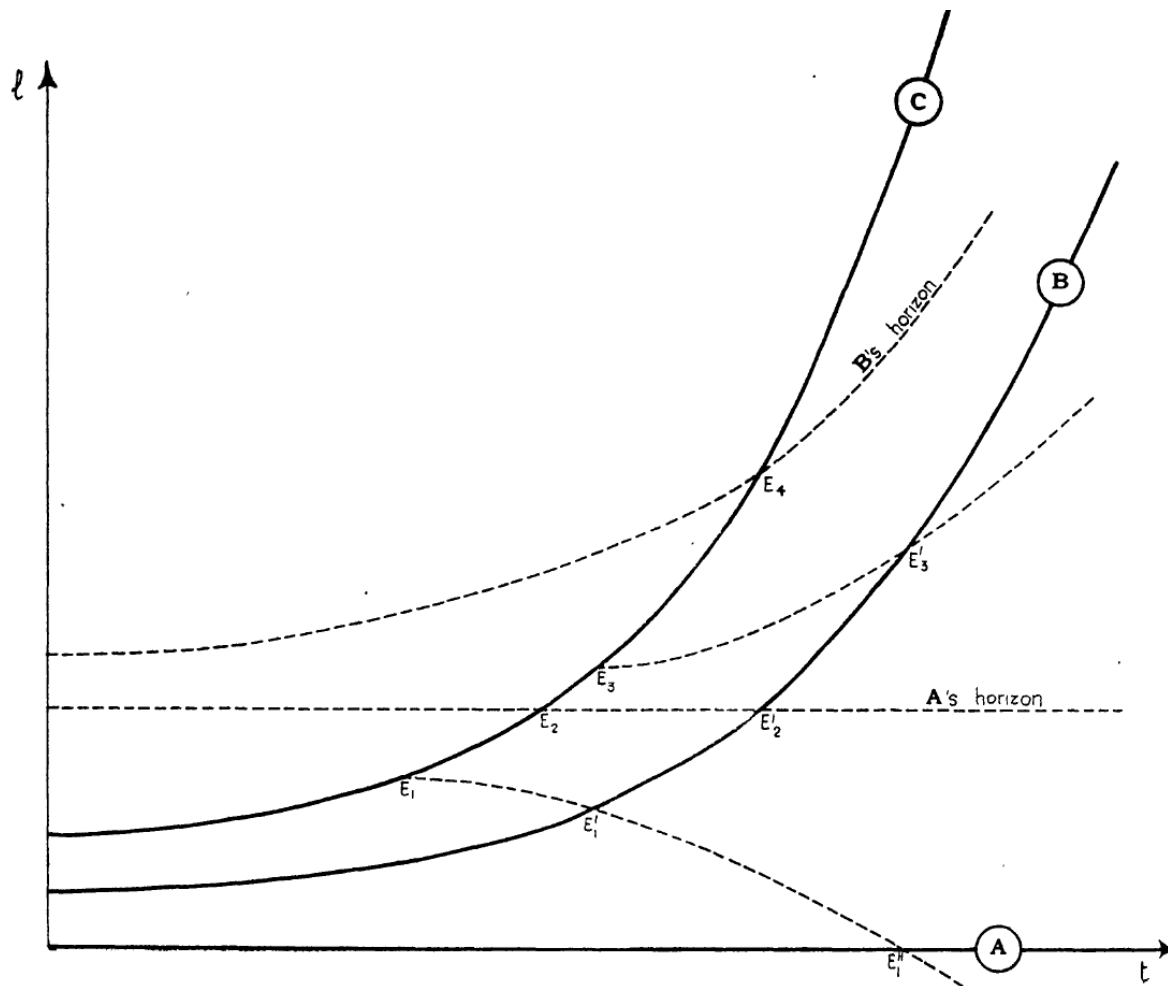
$$(\hbar = c = 1) G = L_P^2; \rho_{DE} \propto \frac{1}{L_\Lambda^2 L_P^2}$$

• **La densité d'énergie sombre est bien la densité d'énergie du vide: toute la matière est passée au-delà de l'horizon ! Le vide dont il s'agit est relatif à l'observateur, puisque l'horizon est relatif à l'observateur**



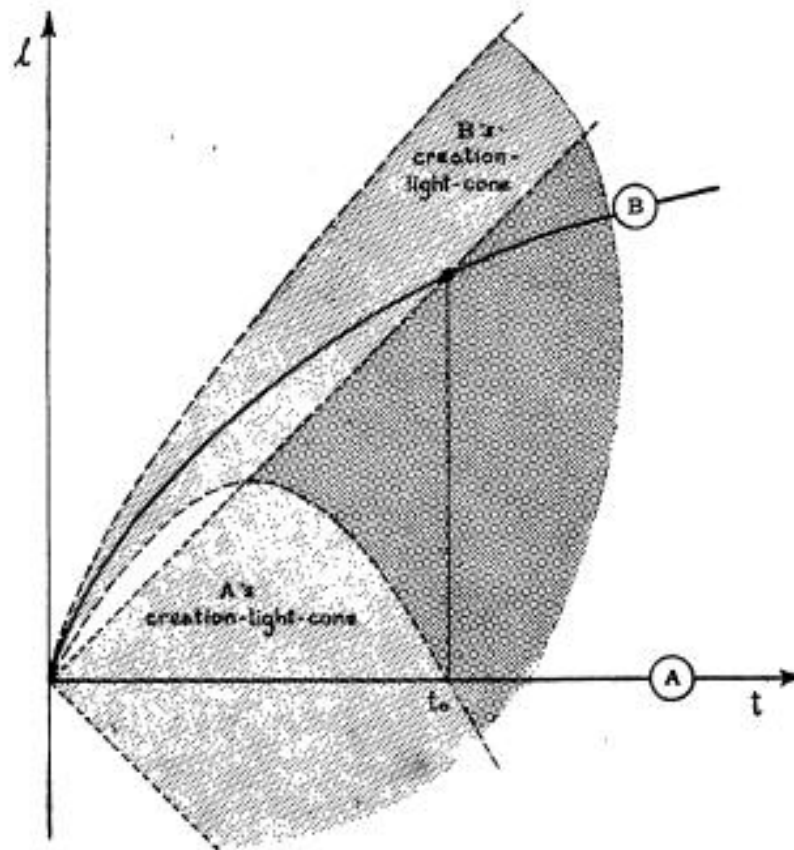
D'après T. Padmanabhan Astroph/0510492





Univers de de Sitter et horizon des événements

W. Rindler *Visual horizons in World-Models*
<http://adsabs.harvard.edu/full/1956MNRAS.116..662R>



Big bang et horizon des particules

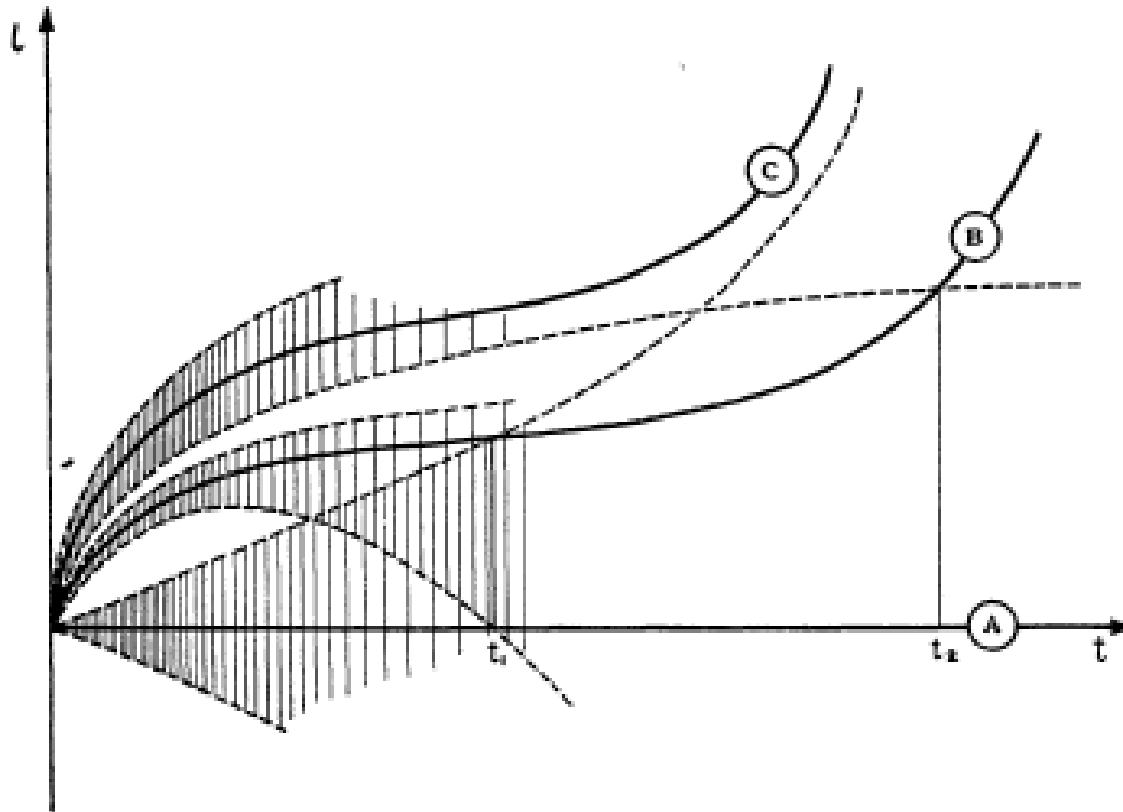


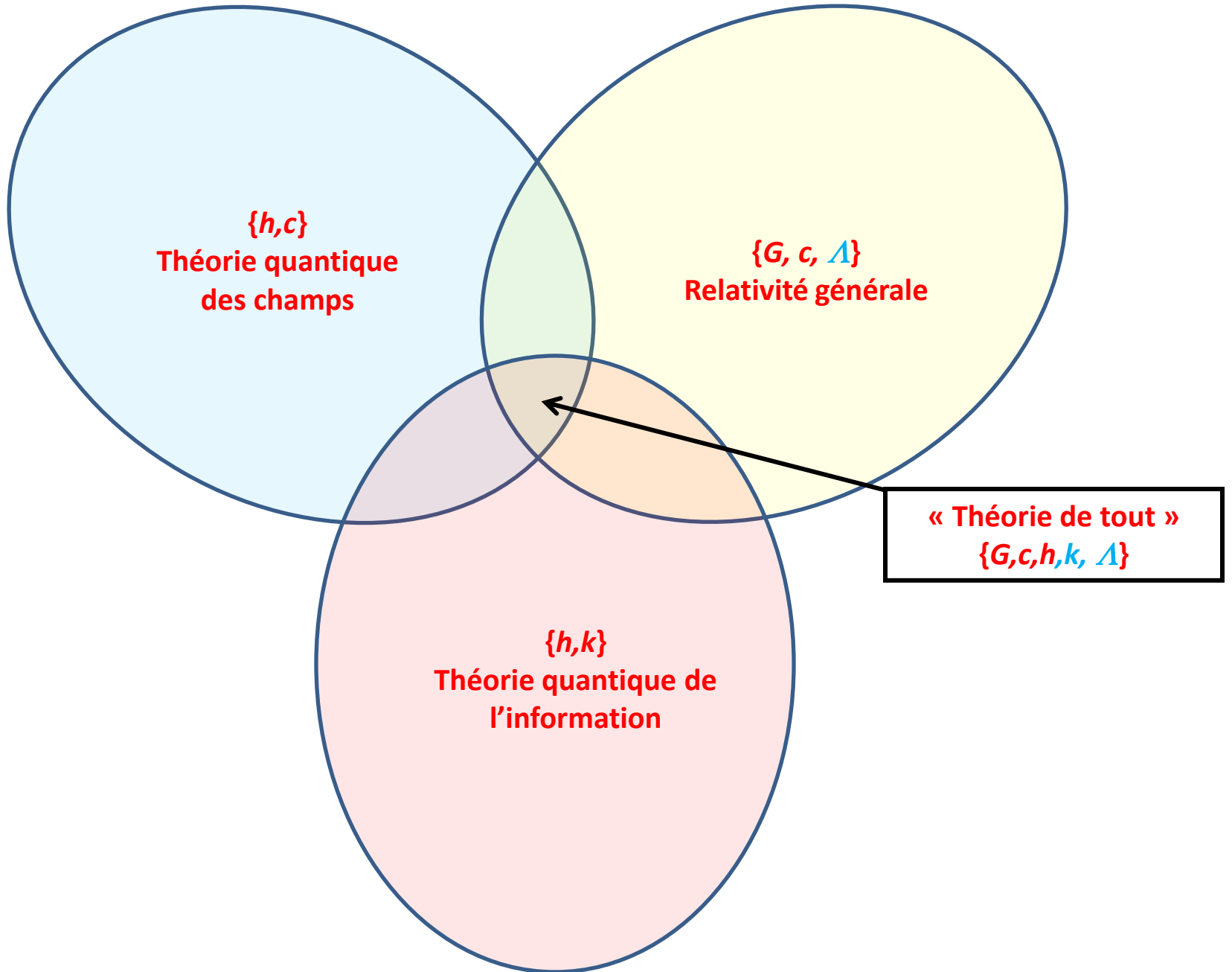
FIG. 3.

Modèle cosmologique (Lemaître) comportant un horizon des particules et un horizon des événements, lié à la constante cosmologique

Les cinq constantes universelles et l'horizon de la gravitation quantique

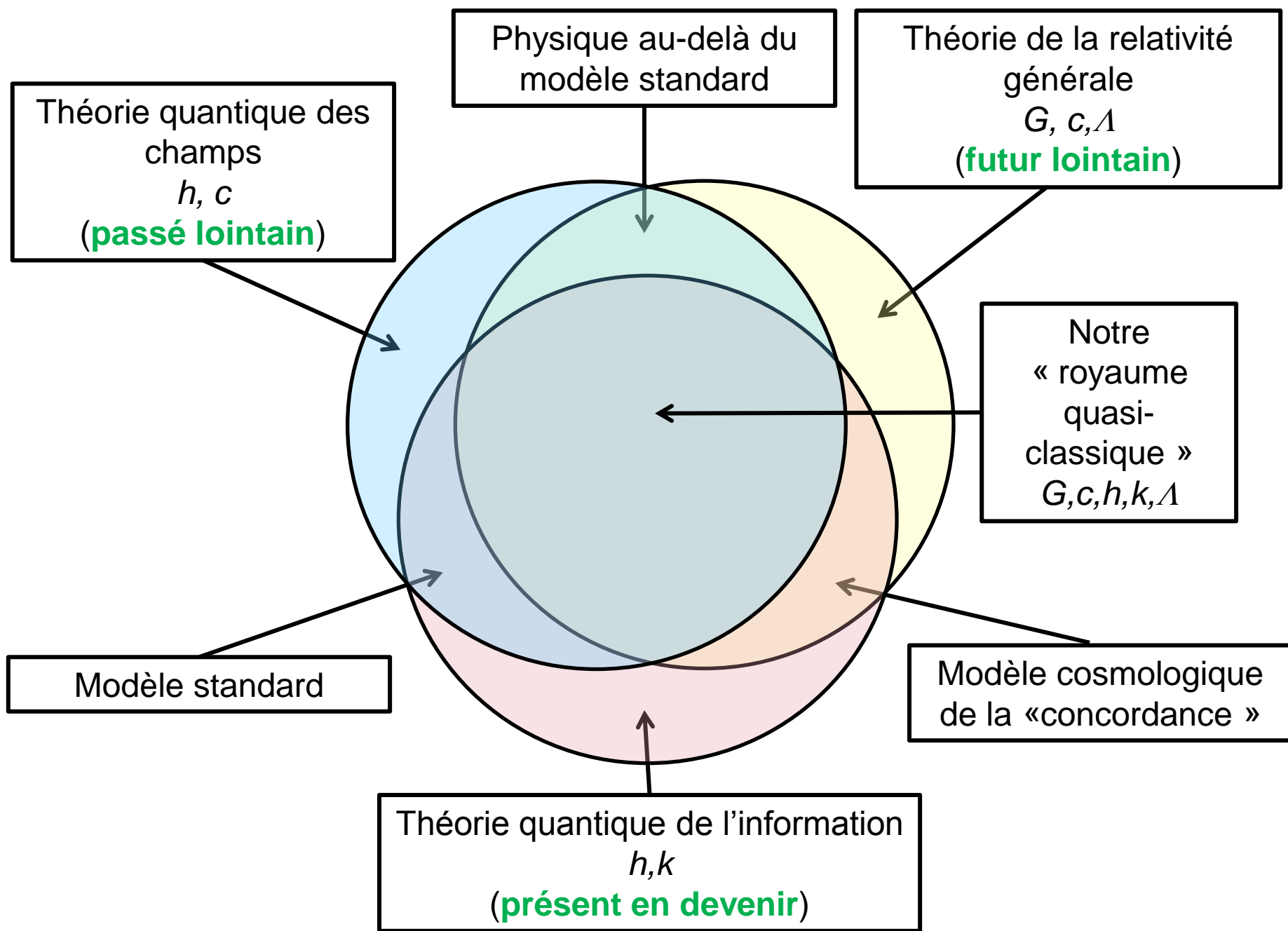
Unification par la théorie ou consolidation par la phénoménologie

- Au niveau **fondamental** (échelles de Planck):
recherche d'une « **théorie de tout** »
 - Unifiant les théories du trépied de la physique du 20^{ème} siècle
 - Unifiant les quatre interactions fondamentales
 - Prenant en compte les cinq constantes universelles, considérées comme les **constantes physiques de l'Univers**
 - Faisant appel à de nouveaux concepts comme **l'holographie** ou des **dimensions cachées de l'espace**
 - Existence de plusieurs candidates: théorie des supercordes, M-théorie, gravitation quantique à boucles,...
 - Mais peu d'implications phénoménologiques



- **Consolidation phénoménologique**

- **Universalité de l'émergence**: d'après l'interprétation moderne de la physique quantique (Gell-Mann et Hartle), l'univers qui nous est observable est un « **royaume quasi-classique** » émergent de la cosmologie quantique et relativiste.
- Les théories du trépied de la physique du 20^{ème} siècle sont **consolidées** à l'aide de modèles phénoménologiques qui sont des **théories effectives**, approximativement classiques et comportant des **corrections quantiques et/ou relativistes calculables**
- Les constantes universelles, maintenant considérées comme **les constantes universelles de la physique**, sont prises en compte par couples ou par trios, dont les combinaisons permettent des **approximations quasi-classiques**
- Cette consolidation phénoménologique peut préparer le terrain à une **nouvelle révolution scientifique**



« Par l'espace, l'univers me comprend et m'engloutit comme un point. Par la pensée, je le comprends »

Pascal, Les pensées

