

# Plan

- I. Qu'est-ce que l'Univers ?
- II. Historique de la cosmologie
- III. Les grandes étapes de l'évolution de l'Univers
- IV. L'avenir de l'Univers
- V. Annexes

## II. Historique de la cosmologie

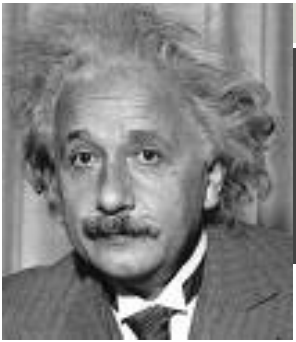
1. De la Relativité Générale à l'univers en expansion
2. La théorie du Big Bang
3. Preuves de la théorie du Big Bang
4. Problèmes liés à la théorie du Big Bang
5. L'inflation : la solution pour compléter le modèle cosmologique
6. Résumé chronologique



## II. Historique de la cosmologie

**1914 Vesto Slipher** : Observe l'éloignement des nébuleuses

- Spectroscopie => décalage vers le rouge => fuite des nébuleuses (effet Doppler)
- '**vitesse de récession**' des nébuleuses
- Rem. Nébuleuse/galaxie ;
  - à l'époque l'UNIVERS = LA VOIE LACTÉE !
  - La précision des instruments d'observation ne permet pas de distinguer clairement les formes de ces nébuleuses



## II. Historique de la cosmologie

### 1. De la Relativité Générale à l'Univers en expansion

#### 1915 Albert Einstein : La Relativité Générale

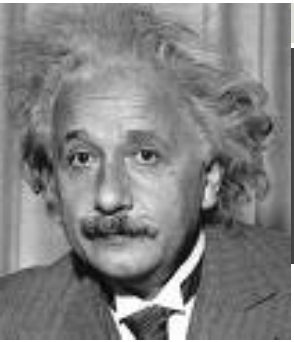
- Relativité Restreinte => espace géométrique + temps = 'l'espace-temps'

Relativité Générale => masse et énergie structurent l'espace-temps  
(→ non euclidien!)

- Einstein publie "**les équations d'Einstein**" ou "**équations de la gravitation relativiste**"

=> décrivent **l'univers** à grande échelle

- Rem. Celles-ci sont dues à une **intuition extraordinaire d'Einstein**. Il s'agit d'un postulat !



## II. Historique de la cosmologie

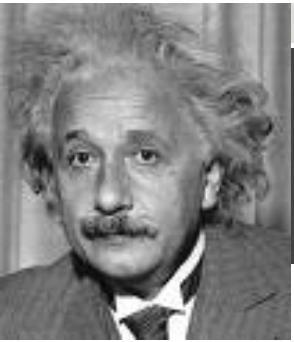
### 1. De la Relativité Générale à l'Univers en expansion

#### Hypothèses simplificatrices pour la résolution de ces équations:

- 1) On admet que les lois de la relativité générale sont celles qui décrivent le mieux l'univers
- 2) On suppose que les lois déterminées sur la terre sont également valables dans tout l'univers
- 3) On suppose l'univers homogène et isotrope à grande échelle = '**le principe cosmologique**'

#### Remarque sur le principe cosmologique:

- Il faut considérer des volumes gigantesques tels qu'un cube d'arête de l'ordre de 300 Mpc ( $1 \text{ pc} \approx 3 \times 10^{13} \text{ km}$ ) pour que l'espace présente une densité de matière homogène (entre 100Mpc et 300Mpc, l'homogénéité est considérée comme bonne)
- Au début des années'20 (jusqu'en 1925), l'univers = la voie lactée !
- Cependant, le principe cosmologique s'avéra utilisable par la suite compte tenu de la répartition de l'ensemble des galaxies



## II. Historique de la cosmologie

### 1. De la Relativité Générale à l'Univers en expansion

#### 1917 **Albert Einstein** : Résolution de ses propres équations sous limitation

- Il considère que l'univers est statique et fini mais sans frontières (\*)
- Il introduit la "constante cosmologique  $\Lambda$ " de manière à ce que les résultats de ses équations soient en concordance avec cette hypothèse (qui exclut la possibilité d'un univers en expansion). Ceci s'avéra être une erreur qu'il reconnut quelques années plus tard.

(\*) Pourquoi Einstein fait-il cette hypothèse ?

2 explications plausibles:

- 1) Il se limite aux observations de l'époque et recherche une concordance avec ces observations
- 2) Pour éviter l'idée d'un 'commencement' car trop apparenté à l'idée de 'création' (amalgame scientifico-religieux)



## II. Historique de la cosmologie

### 1. De la Relativité Générale à l'Univers en expansion

**1922 Alexandre Friedmann:** Résout avec succès les équations d'Einstein

- ▣ trouve les solutions exactes aux équations du champ gravitationnel relativiste qui impliquent que **l'univers peut être en expansion** (publications en 1922 et 1924)

Plus exactement, il démontre **“l'existence possible d'un univers dont la courbure spatiale est constante par rapport aux trois coordonnées spatiales mais dépend de la 4<sup>ème</sup> coordonnée, c-à-d du temps”** => il en écrit une métrique : **“la métrique de Friedmann”**

**“Alexandre Friedmann introduit une révolution scientifique de la même ampleur que la révolution copernicienne”** (JP Luminet – essais de cosmologie)

▣ **Principe du calcul des univers de Friedmann:**

- ▣ Il utilise la constante cosmologique ! MAIS introduit deux simplifications importantes :
  - 1°) Il considère l'univers comme rempli d'un 'fluide cosmique', dont les étoiles (\*) sont les particules constituantes.
  - 2°) Il considère que la pression de ce gaz est nulle ( car très grande dilution des particules )

(\*) Par la suite, ce sont les galaxies qui seront assimilées à ces particules



## II. Historique de la cosmologie

### 1. De la Relativité Générale à l'univers en expansion

#### 1922 **Alexandre Friedmann**: Résout avec succès les équations d'Einstein

- Finalement, il aboutit à une infinité de solutions selon la valeur donnée à la  $C^{\text{te}}$  cosmologique.  
**Et pour  $\Lambda=0$ , il obtient 3 solutions**, chacune correspondant à un modèle de l'univers:
  - 1) L'UNIVERS CYCLIQUE : vitesse initiale d'expansion assez faible. Après expansion pendant environ 100 milliards d'années, écrasement avant de repartir pour un nouveau cycle.
  - 2) L'UNIVERS OUVERT : vitesse initiale d'expansion rapide. La force d'expansion l'emporte sur la force gravitationnelle. Il en résulte une expansion éternelle et un refroidissement progressif jusqu'à mort thermique
  - 3) L'UNIVERS CRITIQUE : vitesse critique d'expansion. La force d'expansion et la force gravitationnelle se compensent. Il en résulte une expansion éternelle et un refroidissement progressif jusqu'à mort thermique
  
- **L'âge de l'univers** est à l'époque estimé par Friedmann à dix milliards d'années !!!

#### Rem.

- **Einstein** conteste d'abord les solutions de Friedmann. Il reconsidèrera ensuite sa position, en qualifiant les travaux de Friedmann comme "justes et éclairants".
  
- A l'époque où les travaux de Friedmann sont réalisés ils n'ont pas beaucoup d'écho chez les cosmologues car d'une part ces travaux sont très théoriques, et d'autre part, Friedmann meurt en 1925.



## II. Historique de la cosmologie

### Observation



**1925 Edwin Hubble:** Prouve l'existence d'autres galaxies que la Voie Lactée

- **Observations** télescope Hooker (2,5 m) à l'observatoire du Mont Wilson (US)
- Il établit la relation entre le décalage spectral et la distance des objets observés
- Il prouve que les nébuleuses observées se situent en-dehors de notre Galaxie et les identifie définitivement comme étant d'autres galaxies (la précision de son télescope le permet).



# II. Historique de la cosmologie

## 2. La théorie du Big Bang



**1927 Georges Lemaître affirme que l'expansion de l'univers est LA BONNE SOLUTION pour les modèles de l'univers (<>Einstein) :**

Sa publication de 1927 comporte 2 éléments clés ;

- 1°) **Des solutions plus générales(\*) aux équations de la gravitation relativistes**
- 2°) **Il détermine la “constante de Hubble” ... avant Hubble !**

1°) **Lemaître résout les équations d'Einstein (équations de gravitation relativiste), et obtient des solutions plus générales(\*) que celles de Friedmann**

- Rem ! Indépendamment des calculs de Friedmann
- (\*) tiennent compte de la pression du fluide cosmique ( $\neq 0$ )

# II. Historique de la cosmologie

## 2. La théorie du Big Bang



### 2°) Lemaître détermine la “constante de Hubble”

... avant Hubble !

- 1926 : travaille aux USA => connaît les observations de Slipher et Hubble
  - Il cherche une manifestation de l'expansion de l'univers et remarque que **la fuite des galaxies est une conséquence de l'expansion de l'univers déterminée dans le cadre de la relativité générale.**
  - Sur base de ses propres calculs en utilisant les mesures relatives à 42 nébuleuses extragalactiques => **il énonce clairement le relation de proportionnalité entre**
    - la vitesse de récession d'une galaxie
- et - la distance à laquelle se trouve la galaxie
- + une galaxie est éloignée, + sa vitesse de récession est grande (  $v = C^{te} \times D$  )

# II. Historique de la cosmologie

## 2. La théorie du Big Bang



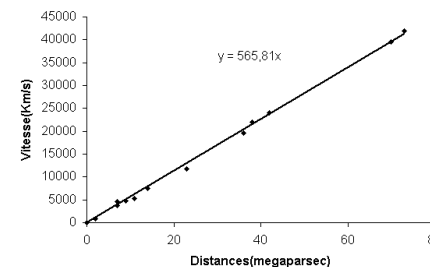
### 1929 Edwin Hubble:

les galaxies s'éloignent toutes de la terre

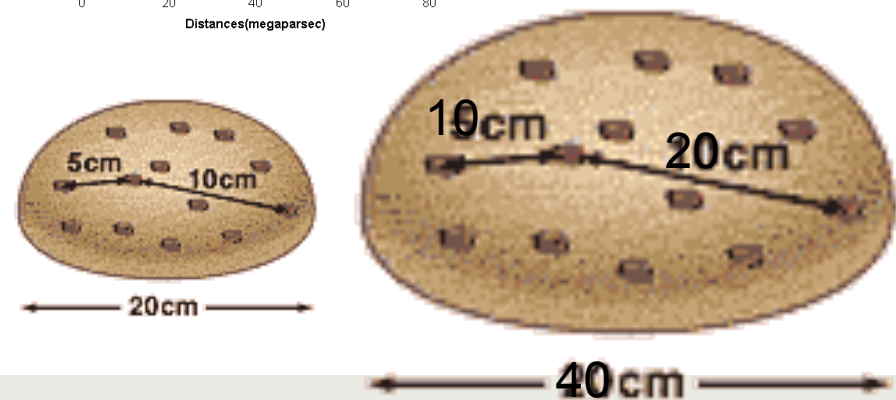
- IL établit (indépendamment de Lemaître) la relation entre la vitesse de récession et la distance de plusieurs galaxies
- Il 'prouve' l'expansion de l'univers (bien que Lemaître l'ait, publié 2 ans auparavant mais ... en français et sans grande diffusion).

Loi de Hubble  $v = H \times d$

Constante de Hubble  $H \approx 20 \text{ (km/s) / Mly}$



Rem. Les galaxies s'éloignent de la Terre mais, d'une manière plus générale, elles s'éloignent les unes des autres ! (cfr. Schéma) La terre n'occupe pas une place privilégiée dans l'univers !



# II. Historique de la cosmologie

## 2. La théorie du Big Bang



### 1931 Georges Lemaître: "L'atome primitif"

□ expansion → évolution → origine

Puisque l'univers se dilate, il faut bien qu'il ait été plus comprimé dans le passé, de plus en plus comprimé au fur et à mesure que l'on remonte le temps.

Or, par analogie avec la forte densité du noyau atomique, il imagine que l'univers tout entier aurait connu une densité limite, et aurait eu l'allure d'un immense « atome primitif ». Celui-ci se serait désagrégé, entraînant la formation des galaxies, des étoiles et de toutes les structures que nous connaissons.

**Cette idée révolutionnaire est à l'origine de la théorie du « Big Bang »**

Rem. Cette appellation a été inventée par hasard et par moquerie en 1960, par Fred Hoyle, un opposant à la théorie soutenue par Lemaître.

Rem. Le Big Bang n'est PAS une explosion

# II. Historique de la cosmologie

## 2. La théorie du Big Bang



- Georges Lemaître formule une hypothèse qui relie la cosmologie (science de l'infiniment grand) et la physique nucléaire (science de l'infiniment petit)
- Il **ne pourra pas formuler l'hypothèse de l'atome primitif avec rigueur** car :
  - 1°) les connaissances de physique nucléaire encore balbutiantes à l'époque.
  - 2°) mais surtout, l'étude des premiers moments de l'univers impose l'invention d'une **théorie de 'gravitation quantique'** qui relie la relativité générale à la physique quantique
- Lemaître propose même un **scénario pour la formation des différentes structures** que nous observons à l'heure actuelle : elles se seraient formées à partir de petites fluctuations de densité dans la matière de l'univers primitif. De petites condensations locales auraient formé les germes des galaxies et des amas de galaxies.

Rem. l'identification des fluctuations de densité de l'univers primordial, elle est au cœur même des programmes de recherche actuels.

# II. Historique de la cosmologie

## 3. Preuves de la théorie du Big Bang

Outre les observations de Hubble, deux observations importantes viennent corroborer la validité de la théorie du Big Bang :

- 1°) **L'abondance des éléments légers H, He, Li** provenant de la phase chaude primordiale
- 2°) La découverte du **bruit de fond cosmique micro-onde** (CMB: COSMIC MICROWAVE BACKGROUND)

Il s'agit d'une découverte fortuite faite

**en 1965 par Arno Penzias et Robert Wilson.**

Rem. Lemaître avait prédit l'existence d'un tel rayonnement mais s'était trompé dans les calculs de la longueur d'onde.

### DISCOVERY OF COSMIC BACKGROUND



Robert Wilson



Robert Wilson



Arno Penzias

# II. Historique de la cosmologie

## 4. Problèmes de la théorie du Big Bang

### 1. Problème de la platitude

- ▣ Prédiction cosmologie du Big Bang : la courbure croît avec le temps
- ▣ Observations WMAP : l'univers est plat

### 2. Problème de l'horizon

- ▣ Prédiction cosmologie du Big Bang : les distances maximales dans l'univers sont tellement grandes que le temps pour échanger de l'information est  $\gggg$  à l'âge de l'univers (même quand les différentes parties étaient plus proches)
- ▣ Observations WMAP : CMB relativement homogène  
→ à un moment de son histoire tout l'univers a dû être en contact thermique

### 3. Problème des monopôles

- ▣ La physique des particules prédit l'existence de particules appelées 'monopôles'.  
monopôles : stables,  $10^{15}$  fois plus massifs que le proton  
La théorie du Big Bang prévoit que, dans l'univers primordial, ces particules aient été très nombreuses.
- ▣ Observations : Elles n'ont jamais été détectées

### 4. Problème de la formation des structures

- ▣ Prédiction cosmologie du Big Bang : ne prévoit pas de fluctuations de densité  
→ ne prévoit pas l'existence des galaxies, étoiles, planètes !



# II. Historique de la cosmologie

## 5. L'inflation : la solution pour compléter le modèle cosmologique

### ■ La théorie de l'inflation

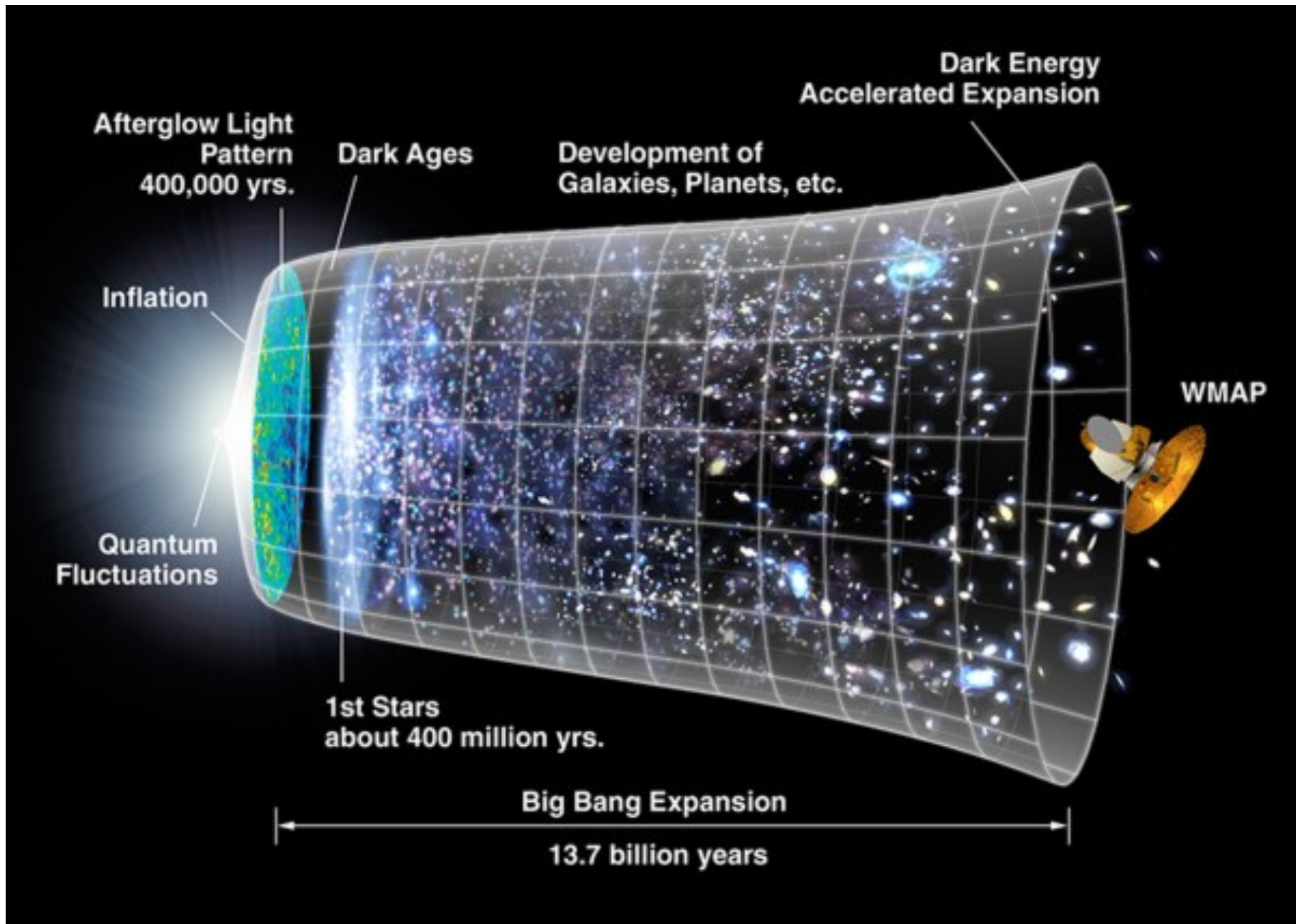
- Alan Guth, Alexei Starobinski, François Englert => 1980  
Andrei Linde, Paul Steinhardt, Andy Albrecht
- Motivation: expliquer pourquoi, comment l'univers est isotrope et homogène
- Apporte des solutions entre-autres aux problèmes posés par la cosmologie du Big Bang
- Cette théorie est une extension à la théorie du Big Bang  
l'ensemble = "**le modèle standard de la cosmologie**"

# II. Historique de la cosmologie

## 5. L'inflation : la solution pour compléter le modèle cosmologique

### ■ La théorie de l'inflation

- Principe: Au tout début de la vie de l'univers, il s'est produit une dilatation fulgurante :
  - volume augmente de manière exponentielle en une fraction de seconde
  - => à une vitesse bien plus grande que  $c$
- Avant cette dilatation, la concentration de l'univers était telle qu'elle a permis les échanges thermiques entre les différents constituants de l'univers qui font que l'univers est isotrope.
- Voir Illustration slide suivant



# II. Historique de la cosmologie

## 5. L'inflation : la solution pour compléter le modèle cosmologique

### □ Comment l'inflation résout – elle les 4 problèmes du Big Bang ?

#### 1. Problème de la platitude

- Observations: l'univers est plat
- L'inflation provoque un aplatissement de toute courbure jusqu'à la platitude
- Analogie avec la balle qui gonfle : ballon foot (extrêmement courbé) => Terre  
=> si dim >>>>> => plat aussi loin que l'on peut observer

#### 2. Problème de l'horizon

- Observations : CMB relativement homogène => contact thermique initial
- L'inflation explique l'existence d'une phase initiale avec contact assez proche pour avoir causé les échanges de chaleur ayant permis d'atteindre une chaleur uniforme

#### 3. Problème des monopôles

- Observations: ces particules prédites n'ont jamais été détectées
- L'inflation explique l'existence de ces particules avant l'inflation et donc la dilution dans des proportions telles qu'elles sont alors indétectables

# II. Historique de la cosmologie

## 5. L'inflation : la solution pour compléter le modèle cosmologique

### □ Comment l'inflation résout – elle les 4 problèmes du Big Bang ?

#### 4. Problème de la formation des structures

- Prédiction cosmologie du Big Bang : ne prévoit pas de fluctuations de densité  
→ ne prévoit pas l'existence des galaxies, étoiles, planètes !
  
- Comment expliquer la formation d'agglomérats, et donc des fluctuations de densité dans un univers homogène ?
  
- Avant l'inflation  
→ univers pas parfaitement homogène  
(minuscules zones de densité plus élevée)  
→ univers microscopique => phys quantique
  - => principe d'incertitude
  - => responsable de fluctuations frénétiques
  - => amas de particules
  
- L'inflation étire ces amas à l'échelle macroscopique => petits paquets de matière

# II. Historique de la cosmologie

## 6. Résumé chronologique

**1914**  
OBSERVATIONS

- **Vesto Slipher** : Décalage spectral vers le rouge : **Fuite des nébuleuses (galaxies)**+ hypothèse: sont en dehors de notre galaxie.

**1915**  
THÉORIE

- **Albert Einstein** : La **Relativité Générale** : “**les équations d'Einstein**” pour **décrire l'univers** à grande échelle

**1922**  
THÉORIE

- **Alexandre Friedmann** : Solutions aux équations d'Einstein, densité critique, géométrie de l'univers. Possibilité d'un univers en expansion

**1925**  
OBSERVATIONS

- **Edwin Hubble** : Confirme que **les nébuleuses observées sont bien d'autres galaxies, extérieures à la Voie Lactée**

**1927**  
THÉORIE + calculs

- **Georges Lemaître** : Solutions + générales aux éq. d'Einstein. L'expansion de l'univers est LA vraie solution. Loi de proportionnalité entre la vitesse de récession et la distance des galaxies.

**1929**  
OBSERVATIONS

- **Edwin Hubble** : Confirme que les galaxies s'éloignent les unes des autres.

**1931**  
THÉORIE + calculs

- **Georges Lemaître** : L'atome primitif.

**1964**  
OBSERVATIONS

- **Penzias et Wilson** : Découverte fortuite du rayonnement fossile

**1981**  
THÉORIE

- **Alan Guth et ensuite Andreï Linde**: L'inflation

**1998**

- **Selon les observations sur les Supernova Ia**: il semble que l'expansion de l'univers soit accélérée

**2003**

- **WMAP**: L'univers est plat, densité  $\approx 10^{-29} \text{g/cm}^3$