

# La cosmologie, d'Aristote au satellite Planck



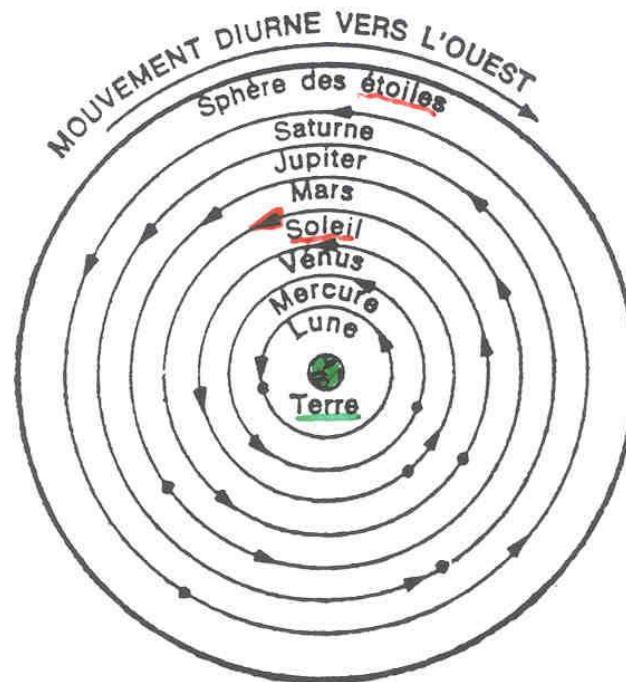
Pierre Marage  
Université Libre de Bruxelles



# Le cosmos des Grecs (Aristote)

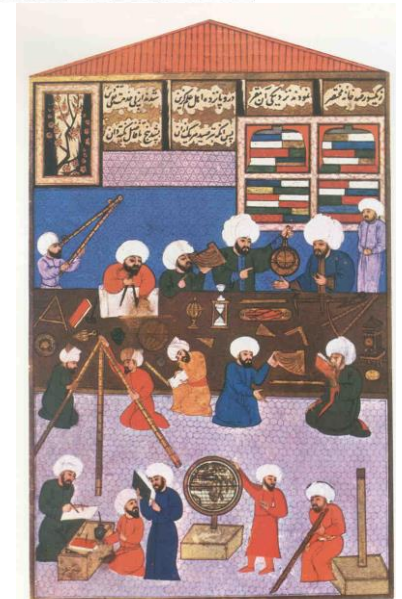
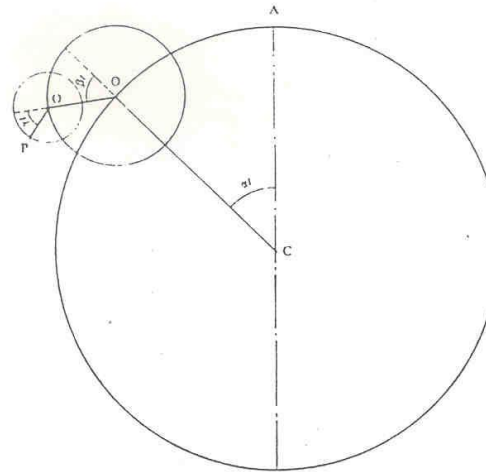
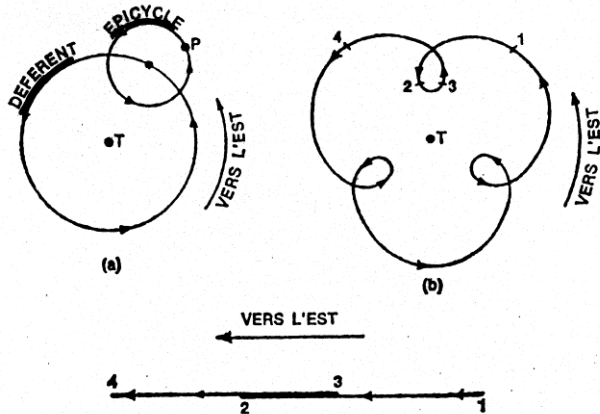
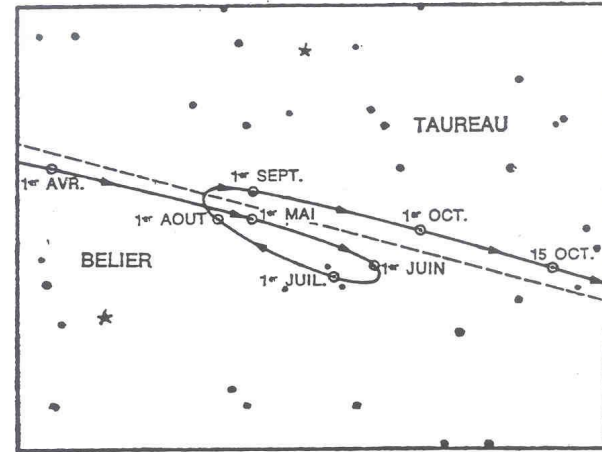
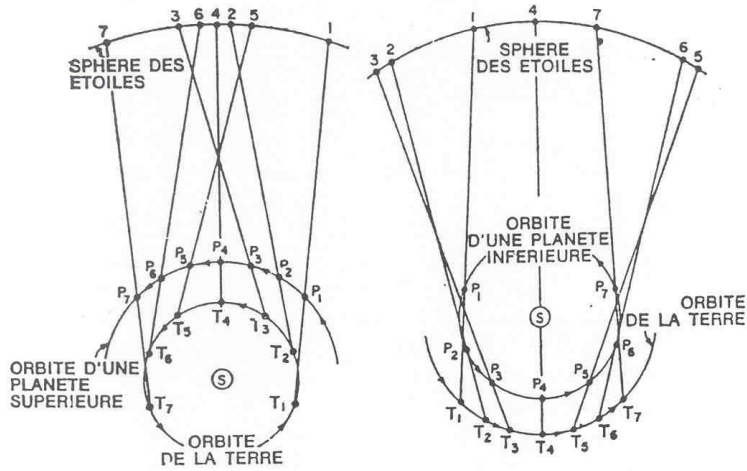
Terre sphérique, immobile au centre de l'univers fini, sphérique, plein  
Séparation des mondes sublunaire et supralunaire

- mouvement des corps lourds vers le centre du monde (« lieu naturel »)
- mouvements célestes **circulaires parfaits**



# Le système de Ptolémée

## Cycles et épicycles

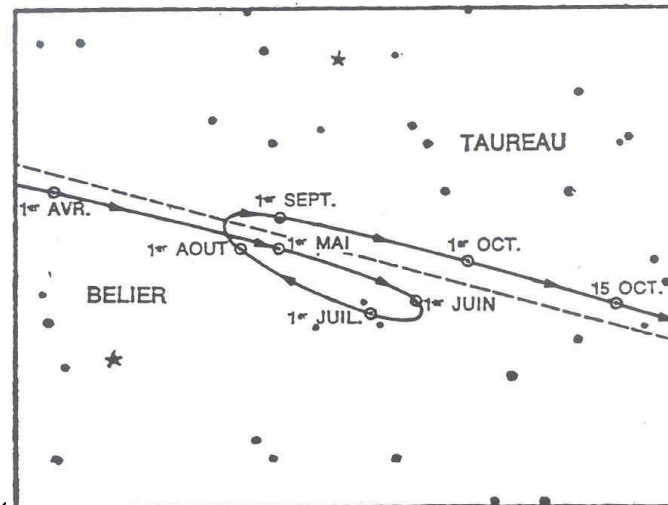
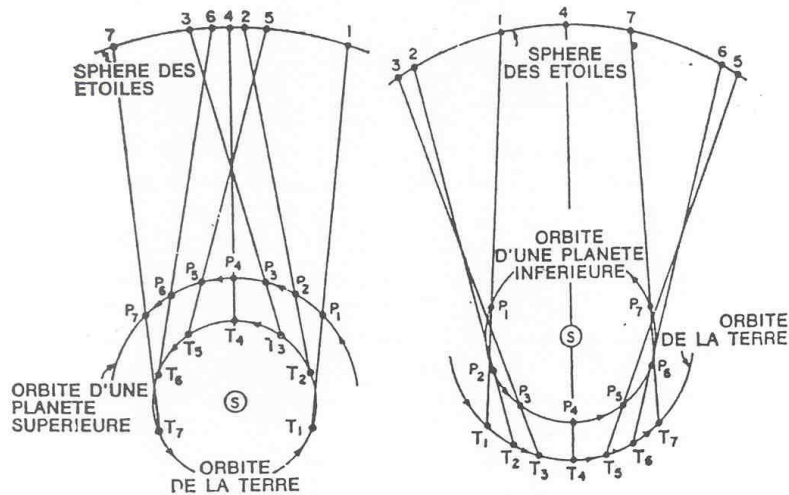


# Copernic (1473-1543)

Le **renversement** héliocentrique

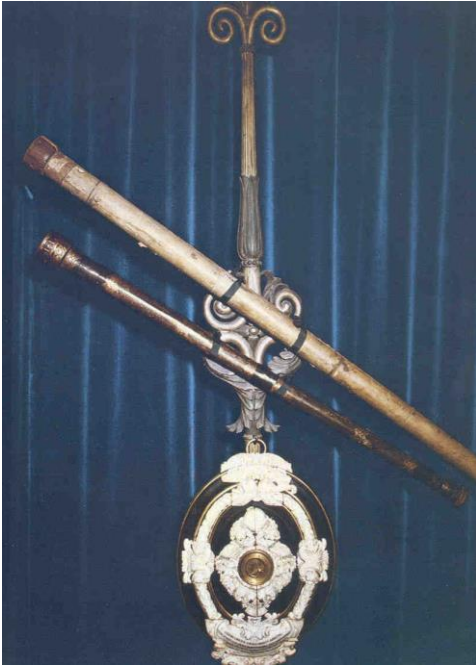
- relativité de l'observation

- « tellement plus harmonieux »



# Galilée (1564-1642) : cosmologie copernicienne

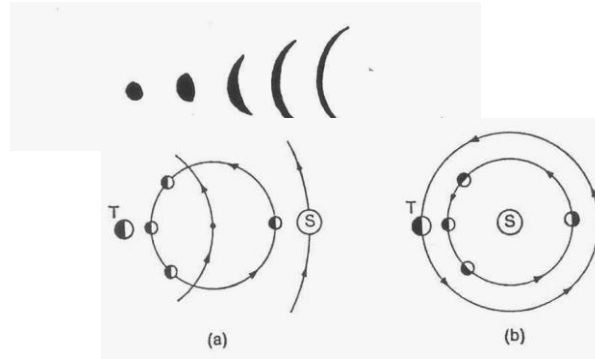
## La lunette (1609)



## les satellites de Jupiter



## les phases de Vénus



« Le messager céleste » (1609)

« Le Dialogue sur les deux grands systèmes du Monde »  
(1632)



# Galilée et l'invention de la nouvelle physique

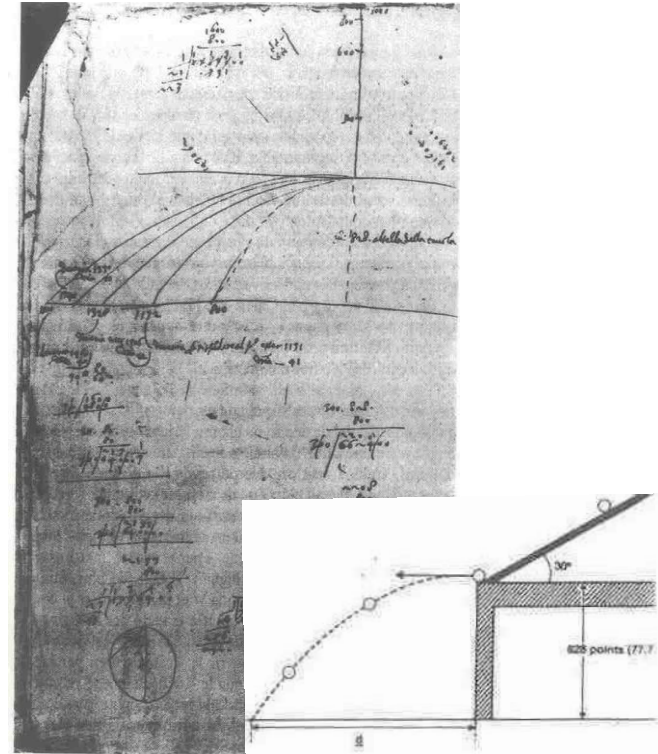
## Galilée

- mouvements et repos sont **relatifs**
- pas de lieu absolu (espace homogène)
- l'inertie  $\neq$  « cause » d'Aristote

## Une nouvelle manière de faire la science:

- **expérimentale** et **mathématisée**
  - la **mesure**
- (l'invention du **laboratoire**)

+ la liberté de la recherche  
(procès par l'Inquisition)



# Newton (1642-1727) : la mécanique



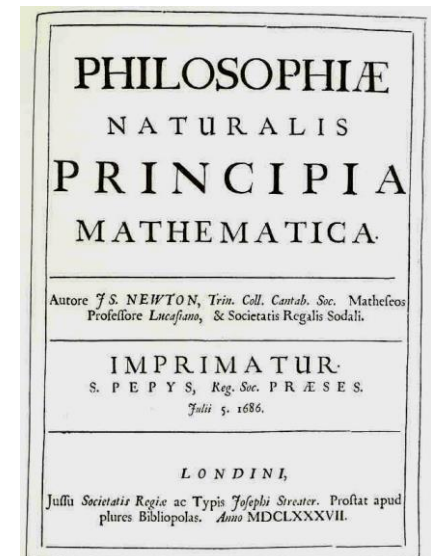
1666 : « annus mirabilis »

- loi de la gravitation :  $F = G m_1 m_2 / d^2$   
où  $G$  est *universelle*
- calcul infinitésimal
- décomposition de la lumière

1687 : « Principes mathématiques de philosophie naturelle »

- les **lois** de la mécanique  
(inertie, quantité de mouvement, action – réaction)
- « espace newtonien » **vide et infini**
- démontre les lois de Kepler

« **Je n'imagine pas d'hypothèses. Car tout ce qui ne se déduit point des phénomènes est une hypothèse, et les hypothèses ... métaphysiques... ne doivent pas être reçues dans la philosophie expérimentale.** »



# Au XIX<sup>ème</sup> : la physique « presque achevée »

## **La mécanique**

Halley : retour de la comète en 1758

Laplace : *Exposition du Système du Monde* (1798)

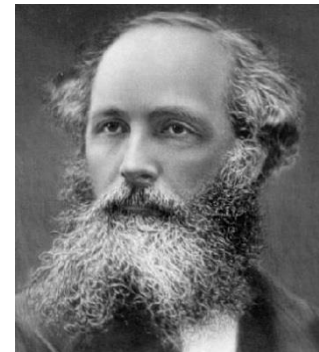
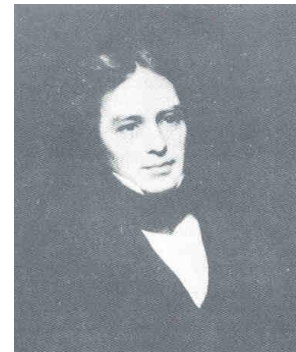
1846 : Le Verrier prédit Neptune

## **L'électricité et le magnétisme**

Faraday, Maxwell

**La lumière** comme onde électromagnétique

Hertz



## **La thermodynamique**

les deux principes :

conservation de l'énergie

augmentation de l'entropie

(mesure du « désordre »; « flèche du temps »)



# La relativité restreinte (1905)

Mais...

**Michelson et Morley :**  
la vitesse de la lumière ne s'ajoute pas au mouvement de la Terre

**Lorentz – Poincaré – Einstein :**  
1905 : **relativité restreinte**

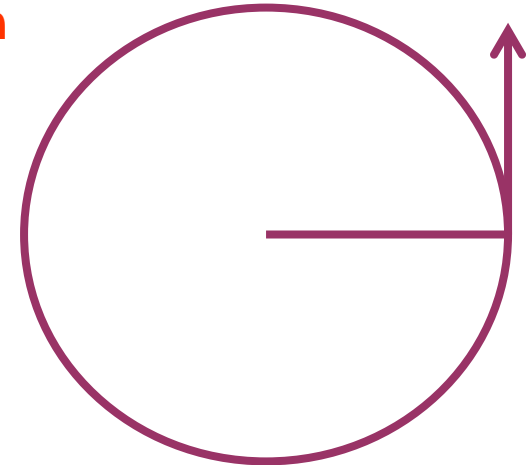
- constance de la mesure de  $c$
- principe de relativité :  
pas d'espace absolu  
pas de simultanéité absolue  
( $\neq$  Newton)



espace et temps mêlés dans « transformations de Lorentz » (pour MRU)  
**dilatation** du temps, **contraction** des longueurs  
équivalence masse – énergie :  **$E = m c^2$**

# La relativité générale (1916)

- principe de relativité: mêmes lois de la nature pour *tous* les référentiels (pas seulement MRU : y compris pour mvt. accéléré)
- « La meilleure idée de ma vie » (Einstein)  
expérience de pensée de l'ascenseur :  
mouvement **accéléré** équivalent à **gravitation**
- pour mouvements accélérés :  
**géométrie non-euclidienne**  
expérience de pensée du disque en rotation  
 $C / R \neq 2 \pi$   
(exemple : sur la surface d'une sphère)



=> équation d'Einstein :

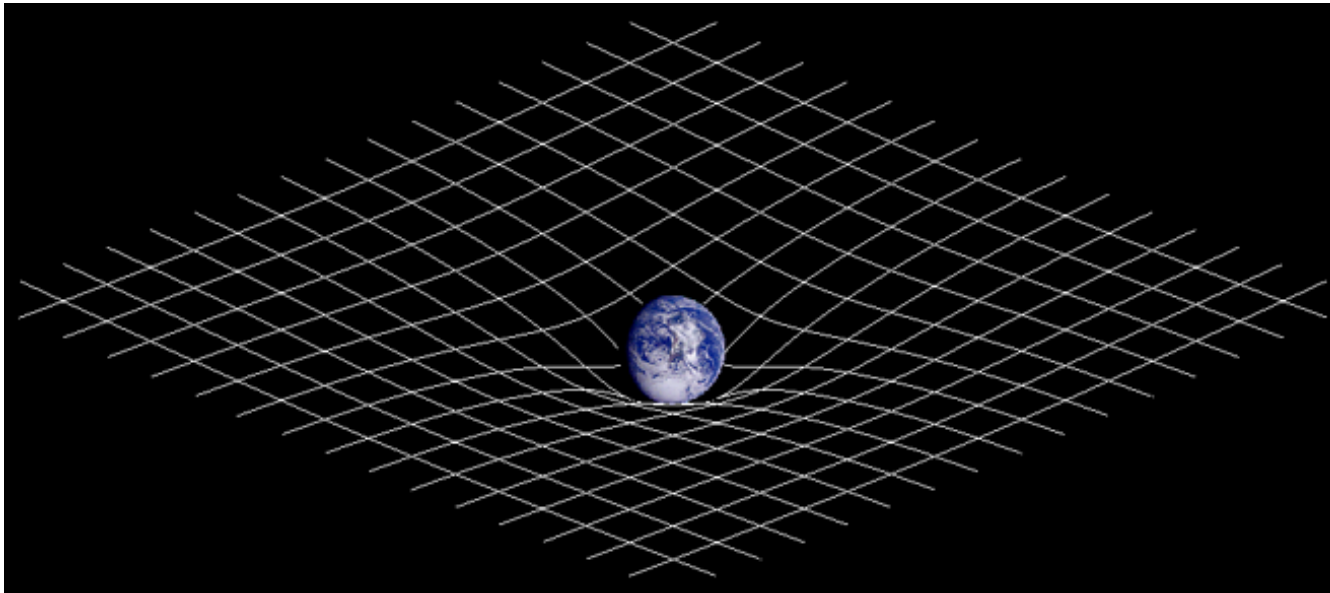
**mesure de la courbure de l'espace-temps**

**<-> mesure de la densité d'énergie**

**NB rétroaction (« non-linéarité ») : matière agit sur espace-temps qui agit sur matière qui agit sur espace-temps qui ...**

# Courbure des rayons lumineux

**Donc : la présence de matière (énergie) courbe l'espace-temps  
les particules (et les rayons lumineux !) suivent les « géodésiques »  
(la gravitation n'est pas une véritable « force »)**

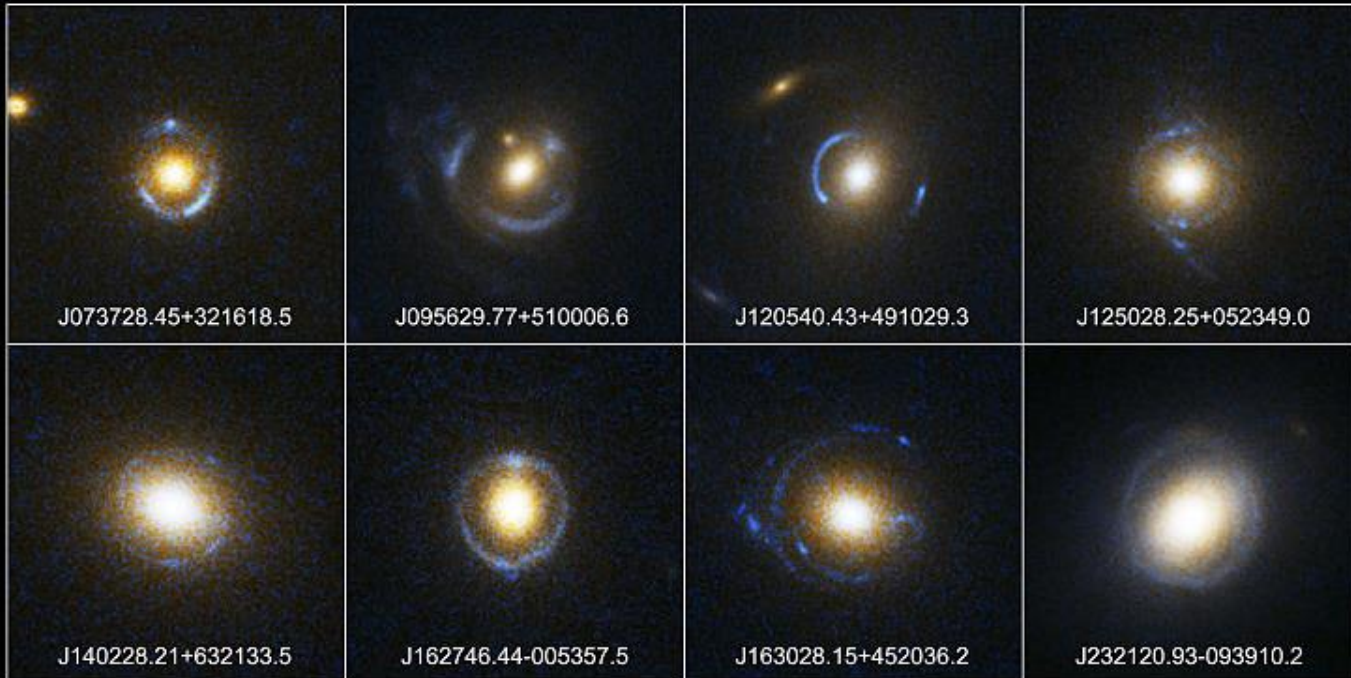
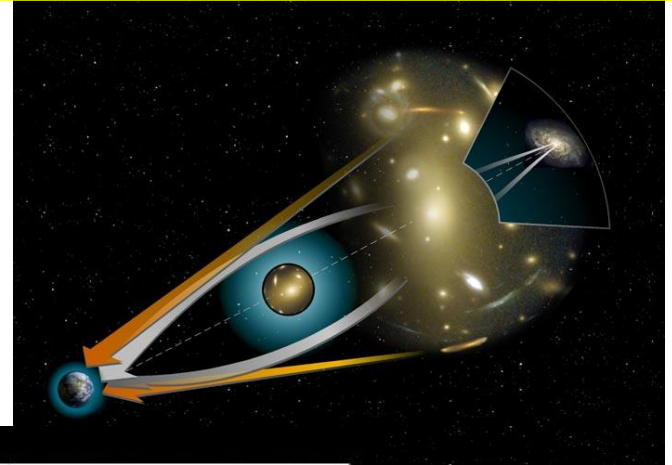


**Observation par Eddington lors de l'éclipse de 1919  
-> triomphe d'Einstein**

**NB pas seulement  $E = mc^2$  pour les photons, mais courbure de l'espace**

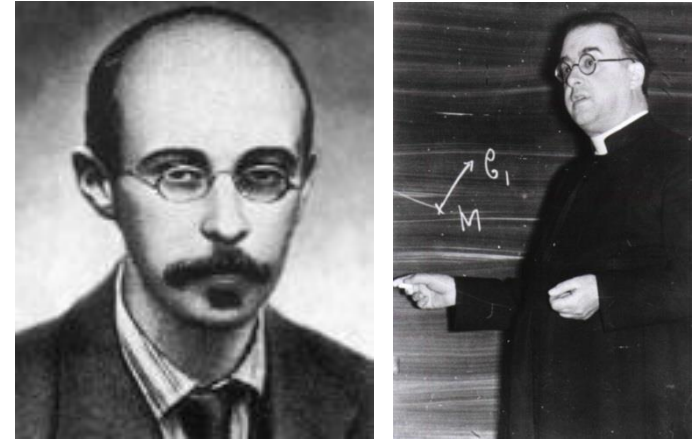
# Lentilles gravitationnelles

**Application :**  
**mesure de la masse des corps célestes**  
**(trous noirs, contribution de la matière**  
**noire)**



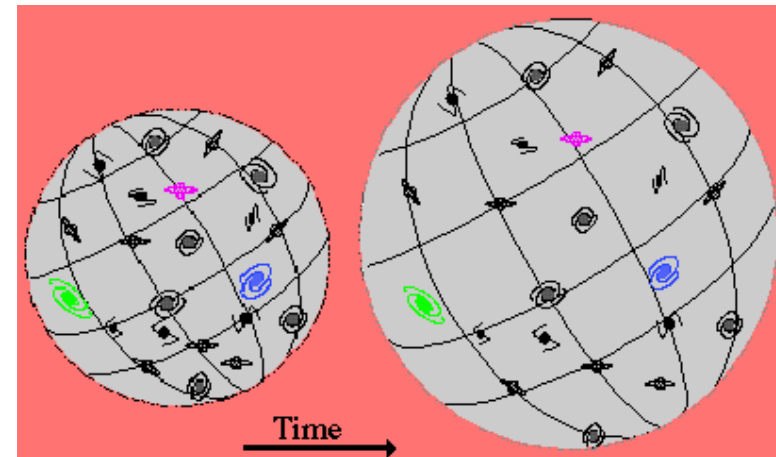
# L'univers en expansion

Friedmann (1888-1925) en 1922 et Lemaître (1894-1966) en 1927 : univers **homogène et isotrope en expansion** est compatible avec l'équation d'Einstein (« atome primitif » -> « big bang »)



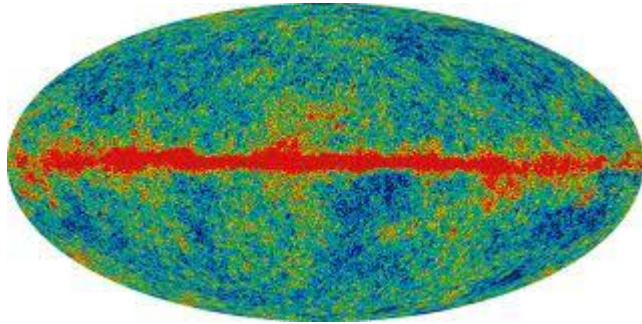
**Loi de Hubble (1929) :**  
décalage vers le rouge (vitesse d'éloignement) proportionnel à la distance :  
77 km / s / Mpsec  
(1 Mpsec = env. 3 années lumière  
= env.  $30 \cdot 10^{12}$  km)

**NB : décalage : cf. effet Doppler, mais dû à l'expansion de l'espace lui-même, pas au « mouvement » des galaxies**



# Le « big-bang »

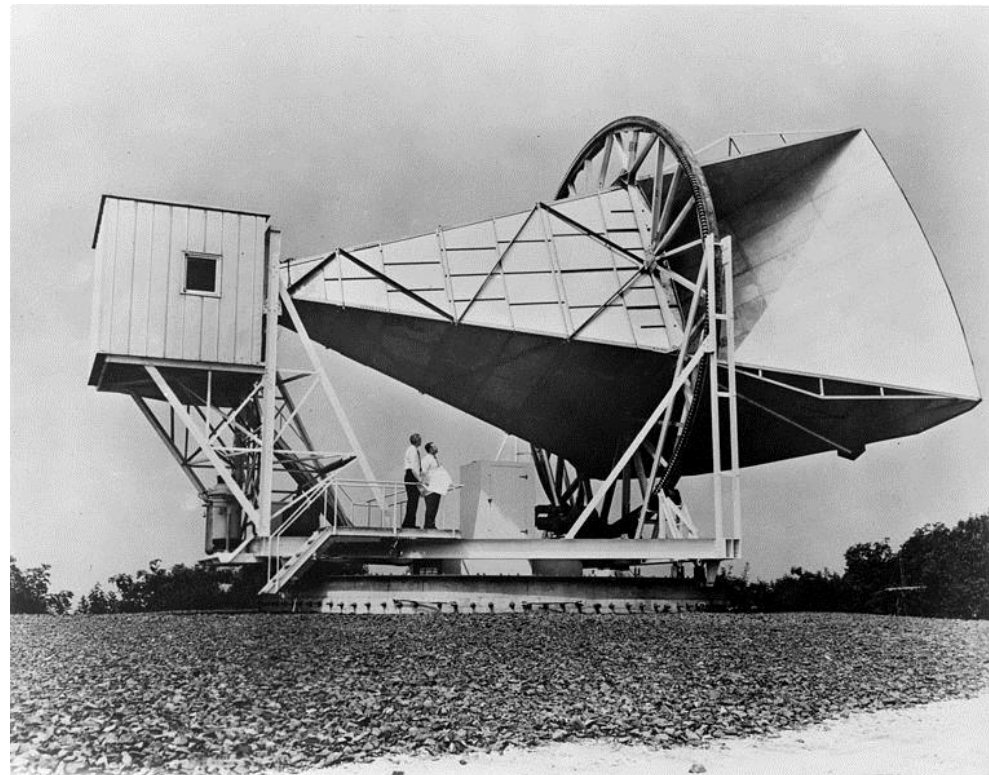
Fond cosmique diffus (Cosmic Microwave Background - **CMB**)



**Penzias et Wilson, 1964 :**  
émission radio (micro-onde  
isotrope

**Prédit par Alpher, Hermann et  
Gamow (1948)**

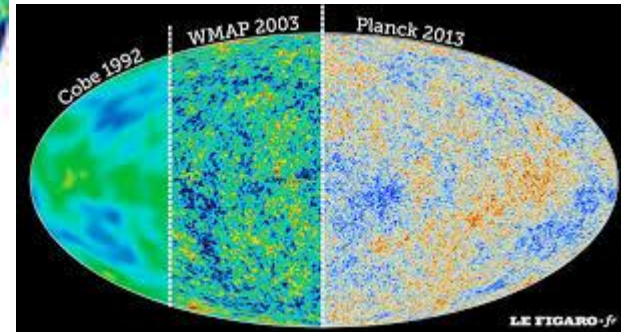
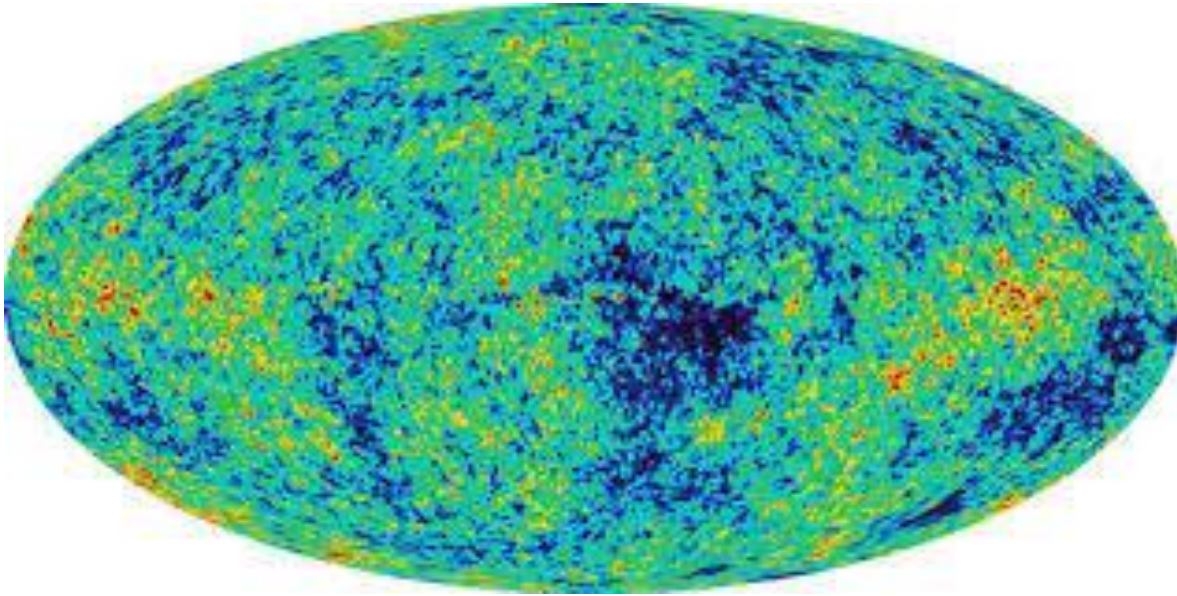
**Relique de l'univers très chaud,  
refroidi par l'expansion  
(température = **2.7 °K**)**



# Le fonds diffus cosmique aujourd'hui

Satellite Planck (ESA), lancé en 2009

15,5 mois de données, présentées 21 mars 2013



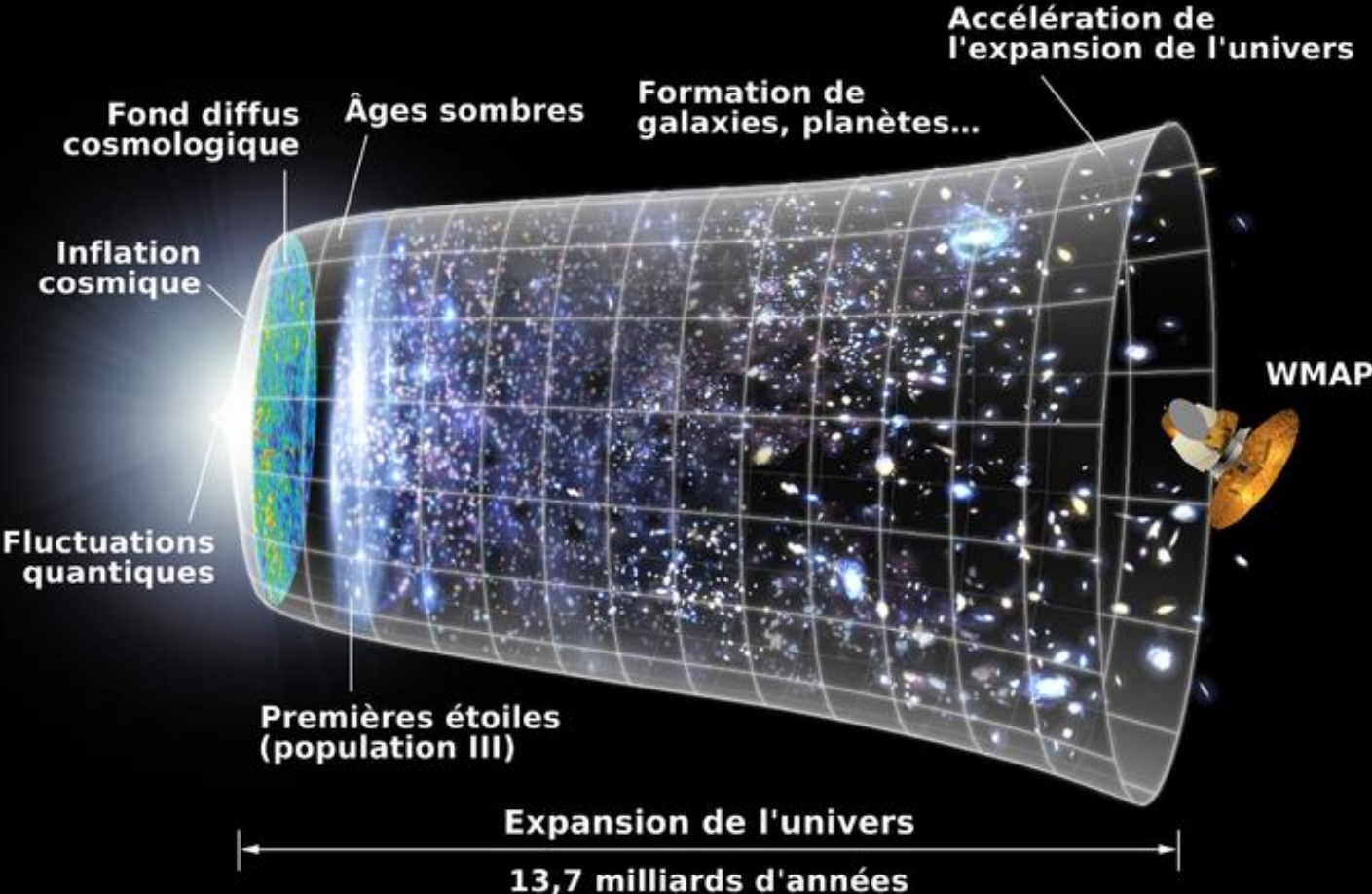
Température de l'Univers, au « découplage » matière-radiation,  
380 000 ans après le Big Bang (13,7 milliards d'années)

Univers extraordinairement **homogène** :

variations de température (et de densité) de  $10^{-5}$  (1 part sur 100 000) !

Mais ces inhomogénéités à l'origine des plus grandes structures  
astrophysiques (amas de galaxies), par attraction gravitationnelle

# L'évolution de l'Univers





## Après 380 000 ans

**380 000 ans après le big-bang:**

- température < 10 000 degrés
  - protons et électrons associés en atomes (hydrogène, aussi hélium)
  - densité de l'univers faible
  - photons se propagent librement
- => les photons du CMB sont ceux de l'époque du **découplage**, refroidis par l'expansion

**En plus :**

**attraction gravitationnelle sur le gaz d'hydrogène**

- > formation de **structures** : amas, galaxies, étoiles
- > réactions thermonucléaires -> **nucléosynthèse** (éléments lourds)  
(+ radiation mais contribution négligeable comparé au CMB)

## Avant 380 000 ans

Température > 10 000 degrés

=> électrons libres (pas d'atomes neutres)

=> le milieu est « opaque » pour les photons (jusqu'au moment de la « recombinaison » en atomes et du « découplage » = 380 000 ans)

Entre 1 s et 3 minutes : température (jusque 1 milliard de °) -> réactions thermonucléaires entre protons et neutrons -> **noyaux légers** (hélium, lithium): « nucléosynthèse primordiale » (env. 75% H, 25% He)

A plus haute température (et densité) (jusque  $10^{10}$  K) : électrons, positrons, neutrinos, antineutrinos, photons en équilibre thermique – à  $10^{10}$  K: découplage des neutrinos

La **baryogenèse** (entre  $10^{16}$  et  $10^{29}$  K ?) : déséquilibre en faveur de la matière, qui aujourd'hui domine l'univers – pourquoi ? (en physique des particules, matière et antimatière ont des propriétés parfaitement identiques)

Périodes de **l'unification électrofaible** et de la **grande unification** (?)

# L'inflation et l'ère de Planck

## Problème de l'homogénéité du CMB

En effet, taille de l'univers = env. 45 milliards d'années lumières et son âge 13.7 milliards d'années

Donc pas de « contact » possible : vitesse de la lumière limite l'« horizon »  
=> pourquoi homogénéité ?

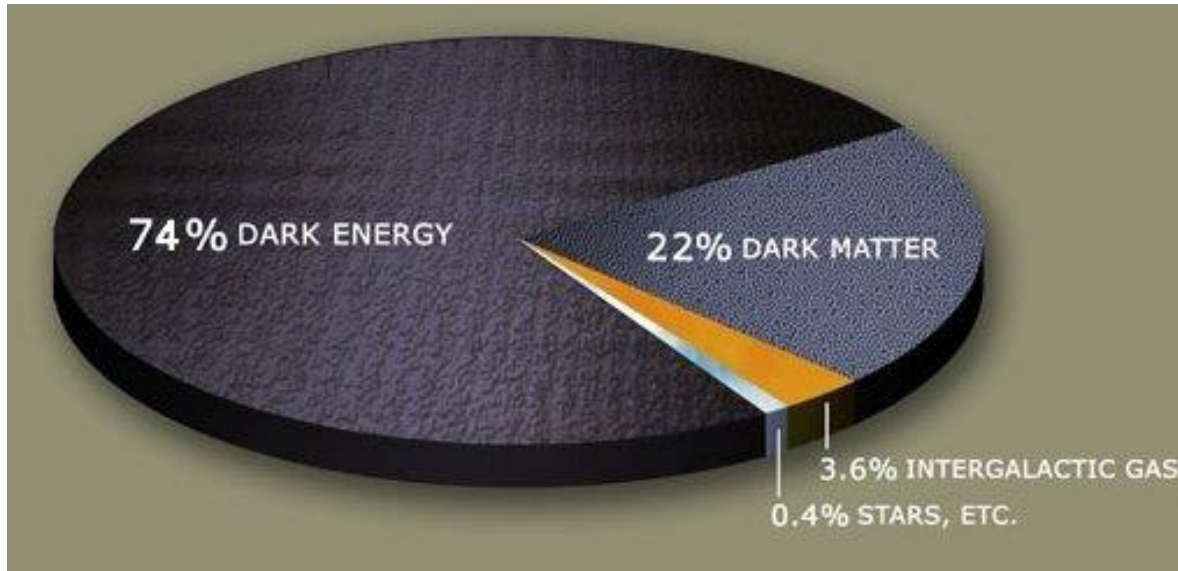
Solution : « **inflation** », avant l'ère de grande unification (T entre  $10^{27}$  à  $10^{32}$  degrés)

- dimension de l'univers multipliée par  $10^{26}$
- refroidissement facteur  $10^5$
- durée  $10^{-32}$  s

## Ère de Planck

La gravitation devient quantique (longueur de  $10^{-33}$  cm, masse de  $20 \mu\text{g}$ ) :  
température de l'univers  $10^{32}$  K,  $10^{-44}$  s après le big-bang  
Les lois de la physique connue cessent d'être valables...

# Matière noire et énergie sombre



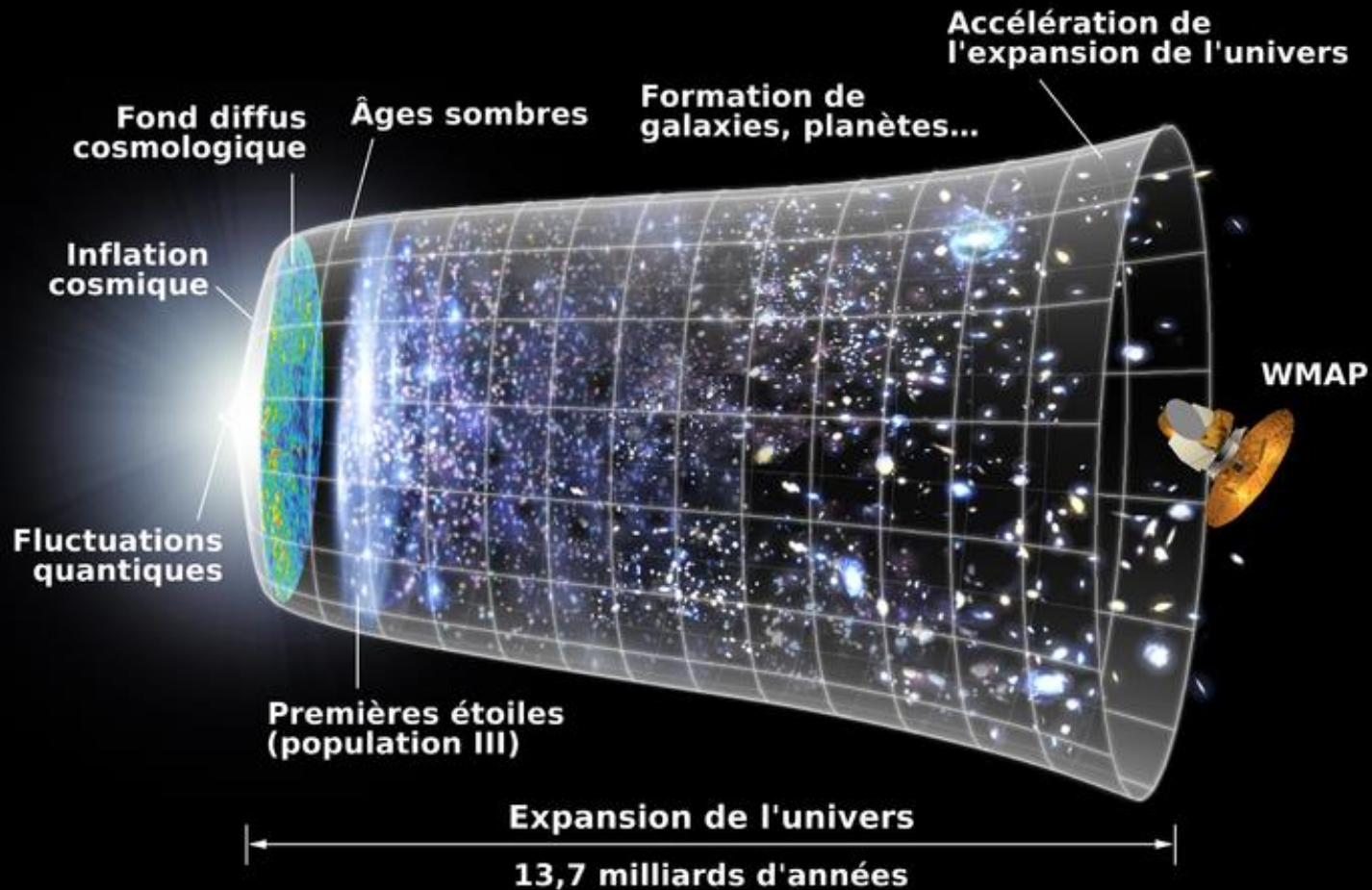
**Matière noire** (Zwicky '30s, années 1970-80)

courbes de rotation des galaxies spirales, lentilles gravitationnelles, etc.  
nature inconnue : particules supersymétriques ? (voir au LHC !)

**Énergie sombre** (années 1990)

accélération de l'expansion (vitesse d'après le décalage vers le rouge,  
distance d'après la luminosité des « chandelles standard » = supernova Ia)  
origine inconnue !

# L'avenir de l'Univers...



**Merci pour votre attention...**