

La cosmologie, d'Aristote au satellite Planck



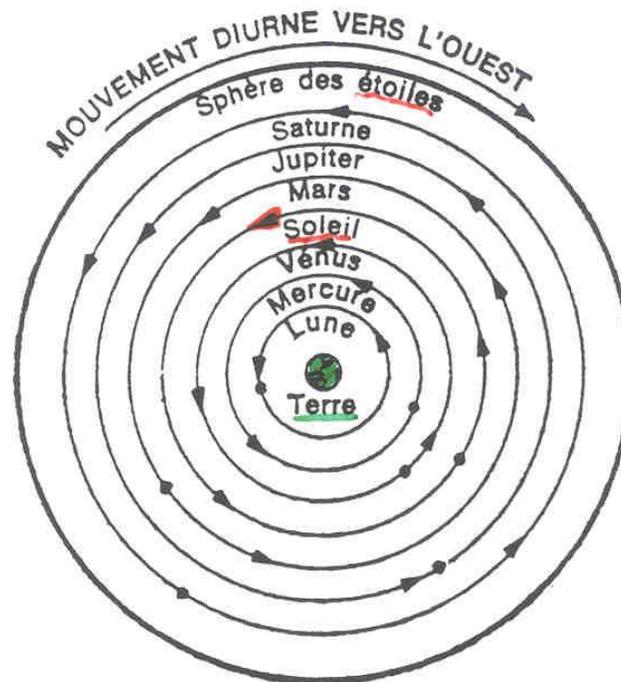
Pierre Marage
Université Libre de Bruxelles



Le cosmos des Grecs (Aristote)

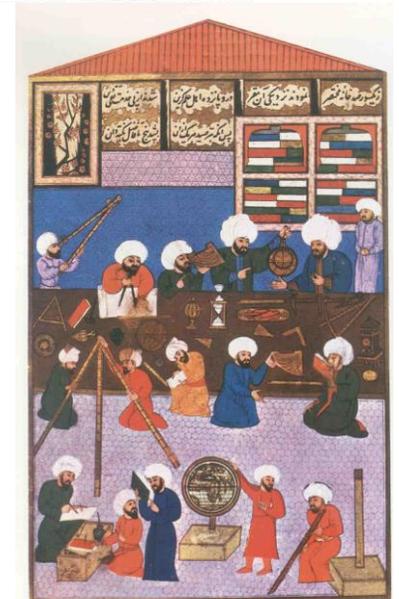
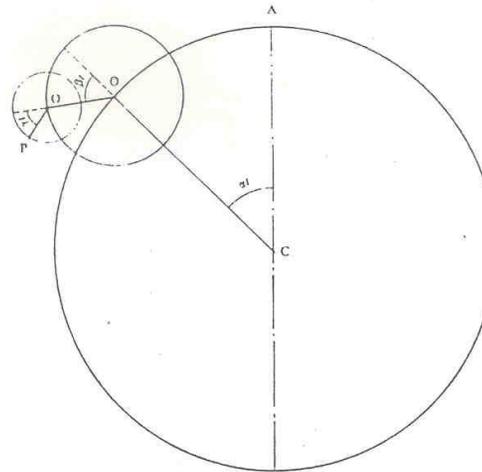
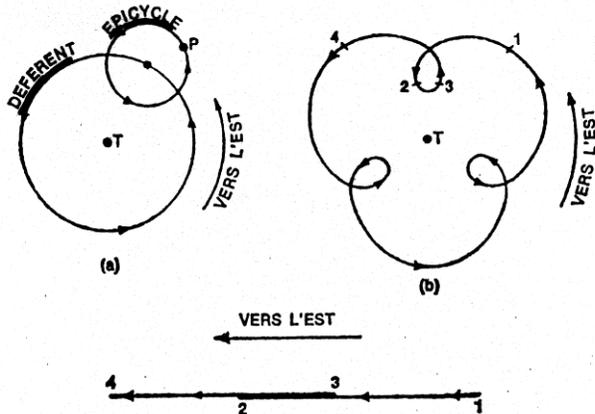
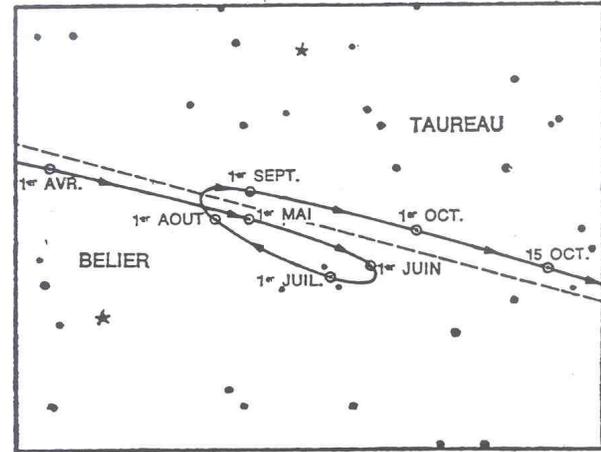
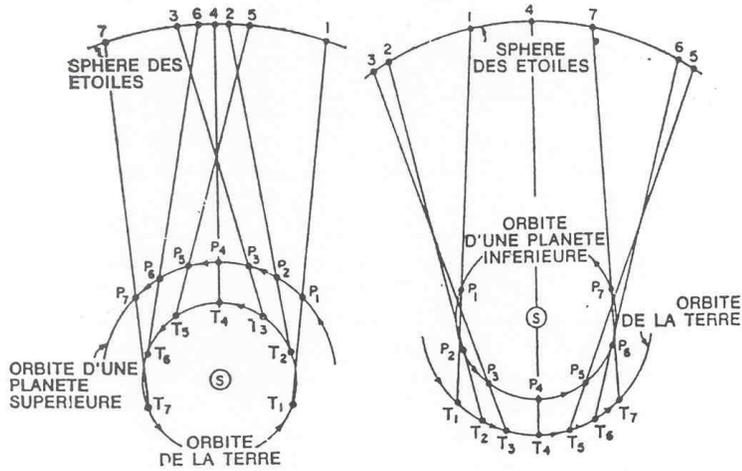
Terre sphérique, immobile au centre de l'univers fini, sphérique, plein
Séparation des mondes sublunaire et supralunaire

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



Le système de Ptolémée

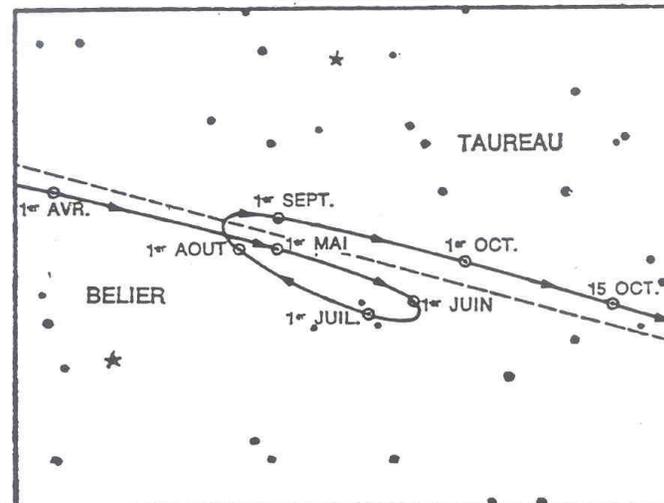
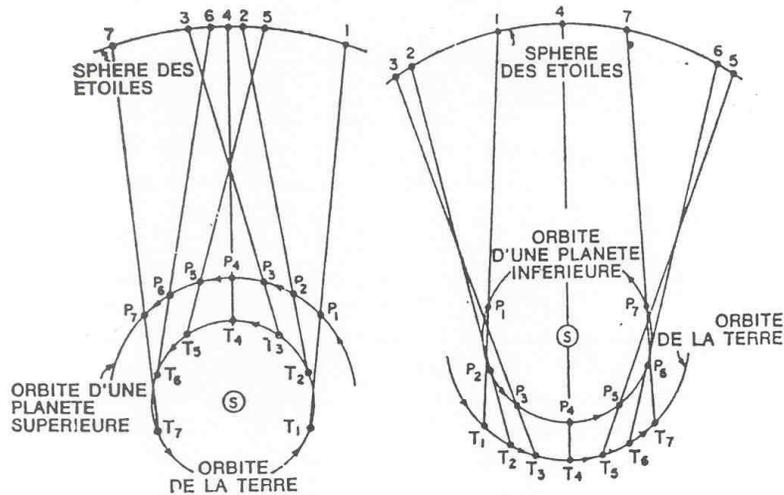
Cycles et épicycles



Copernic (1473-1543)

Le **renversement** héliocentrique

- relativité de l'observation
- « tellement plus harmonieux »



Galilée (1564-1642) : cosmologie copernicienne

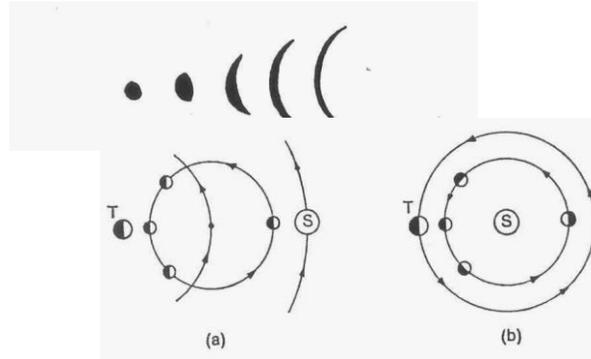
La lunette (1609)



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

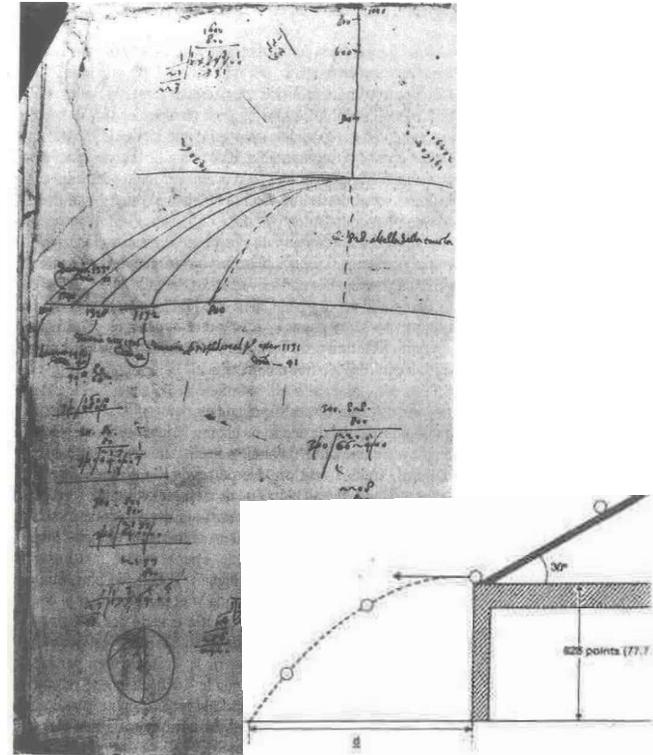
Galilée

- 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



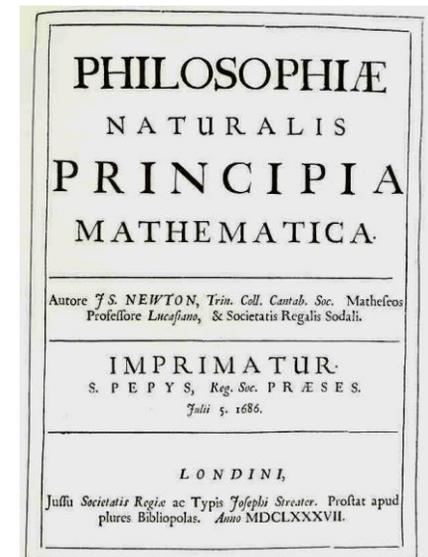
1666 : « annus mirabilis »

- 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^{ème} : la physique « presque achevée »

La mécanique

Halley : retour de la comète en 1758

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

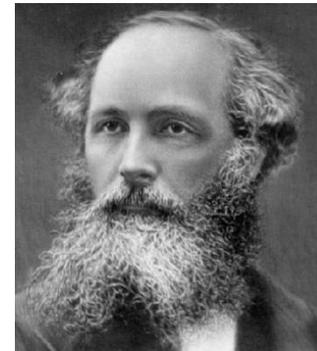
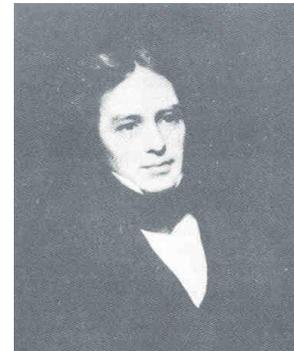
1846 : Le Verrier prédit Neptune

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**

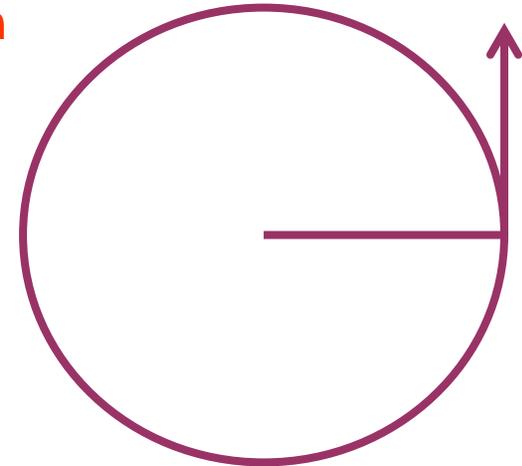
- constance de la mesure de c
- principe de relativité :
pas d'espace absolu
pas de simultanéité absolue
(\neq Newton)



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 :

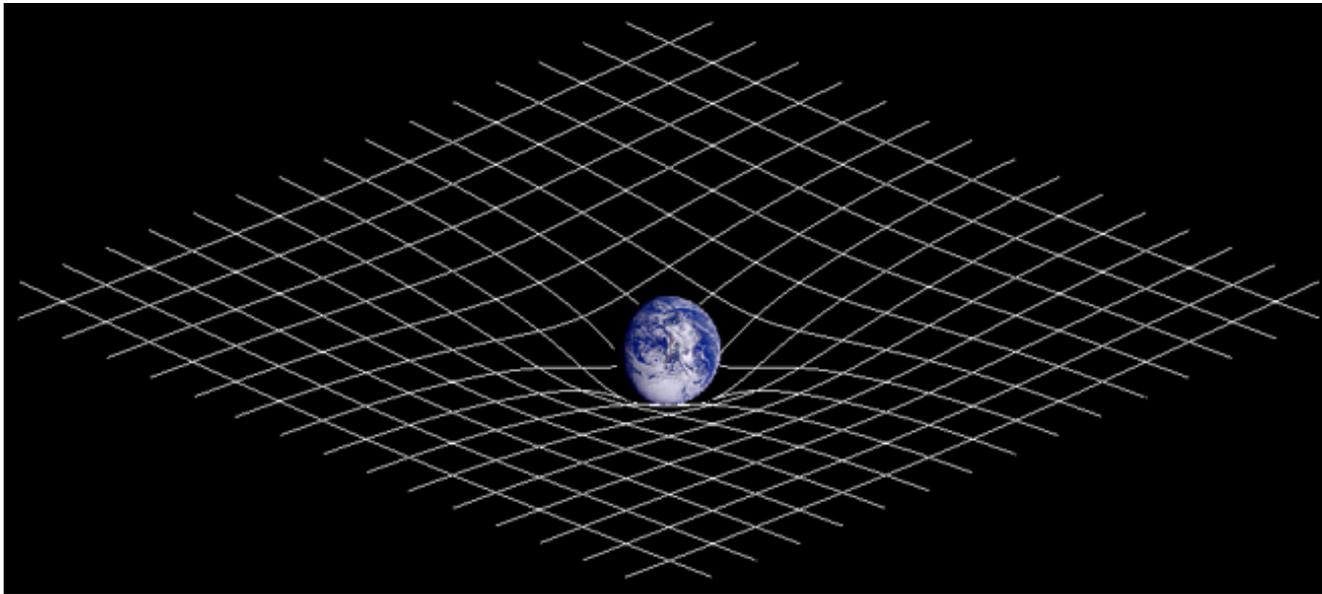
mesure de la courbure de l'espace-temps

<-> 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 »)**

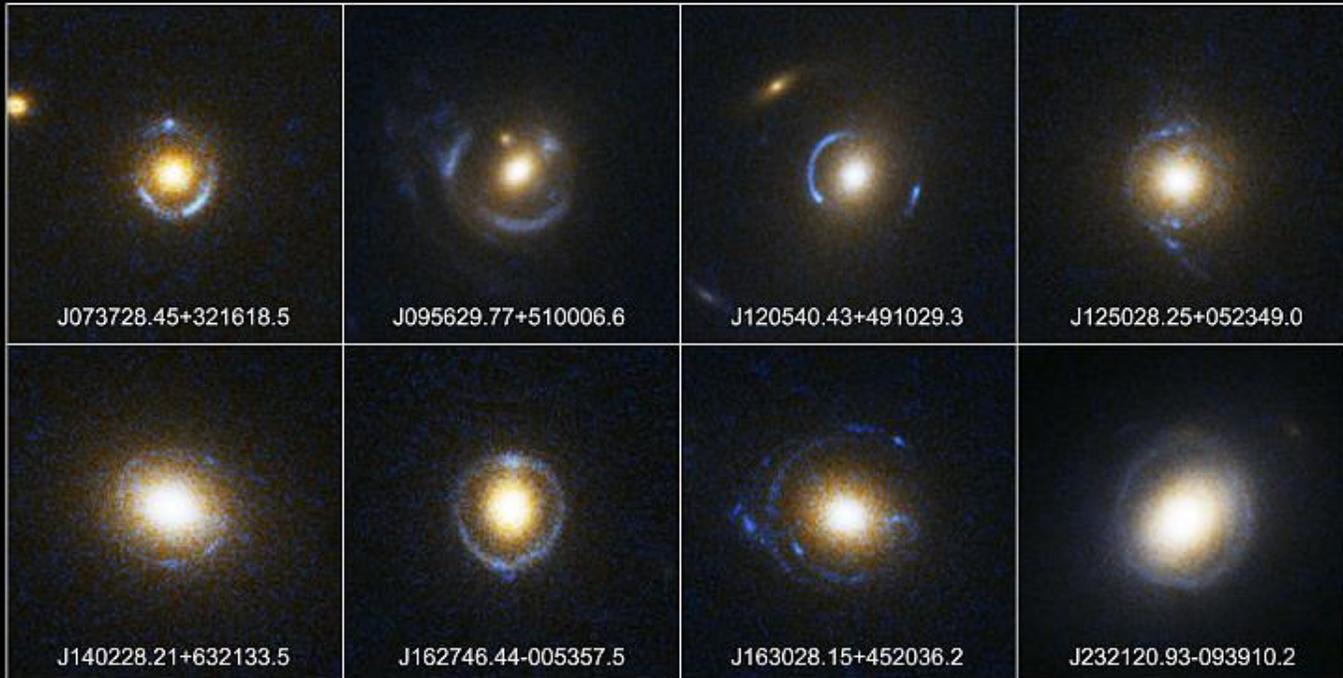
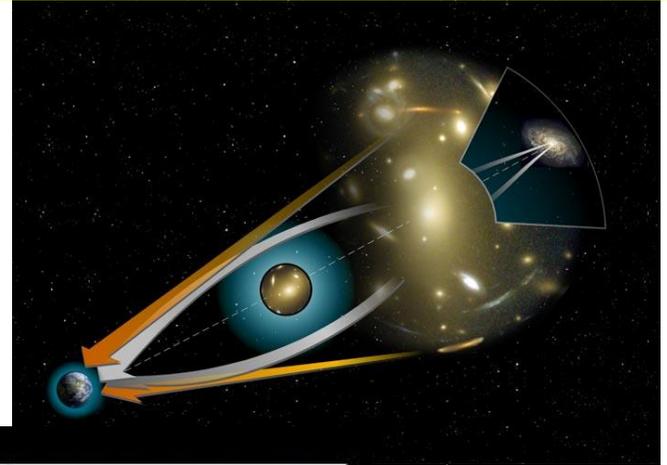


**Observation par Eddington lors de l'éclipse de 1919
-> triomphe d'Einstein**

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

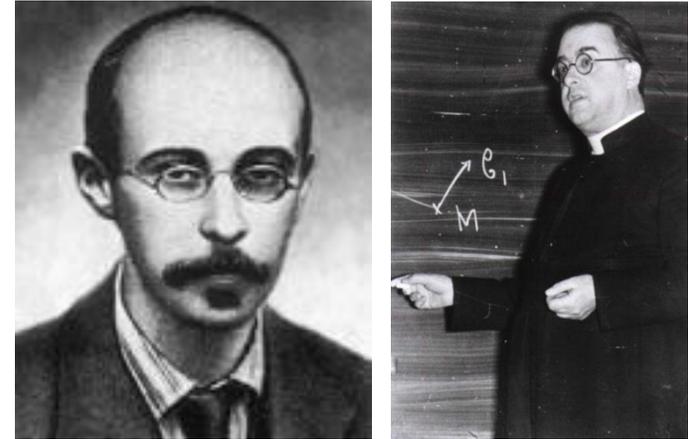
Lentilles gravitationnelles

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



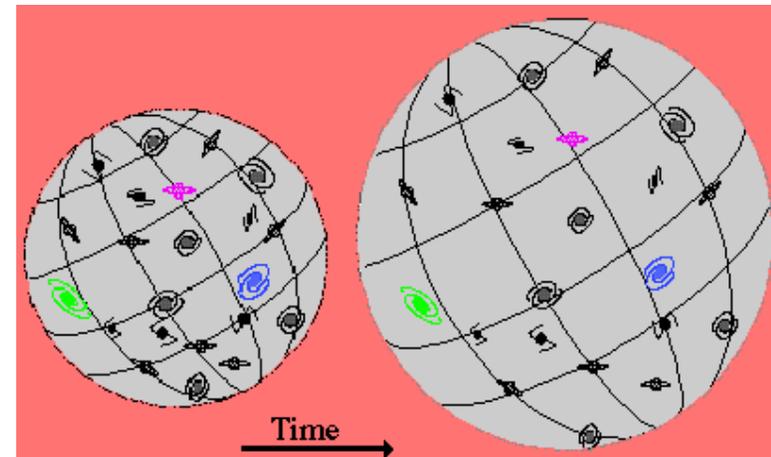
L'univers en expansion

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 »)



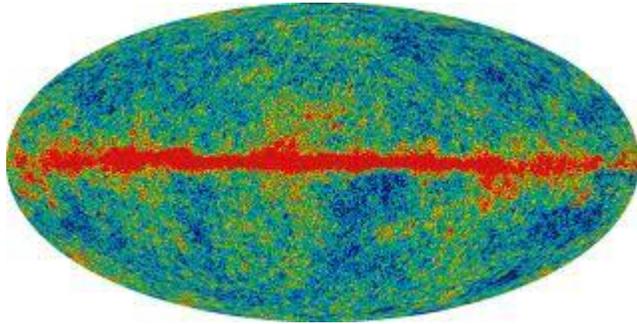
Loi de Hubble (1929) :
décalage vers le rouge (vitesse d'éloignement) proportionnel à la distance :
77 km / s / Mpsec
(1 Mpsec = env. 3 années lumière
= env. $30 \cdot 10^{12}$ km)

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



Le « big-bang »

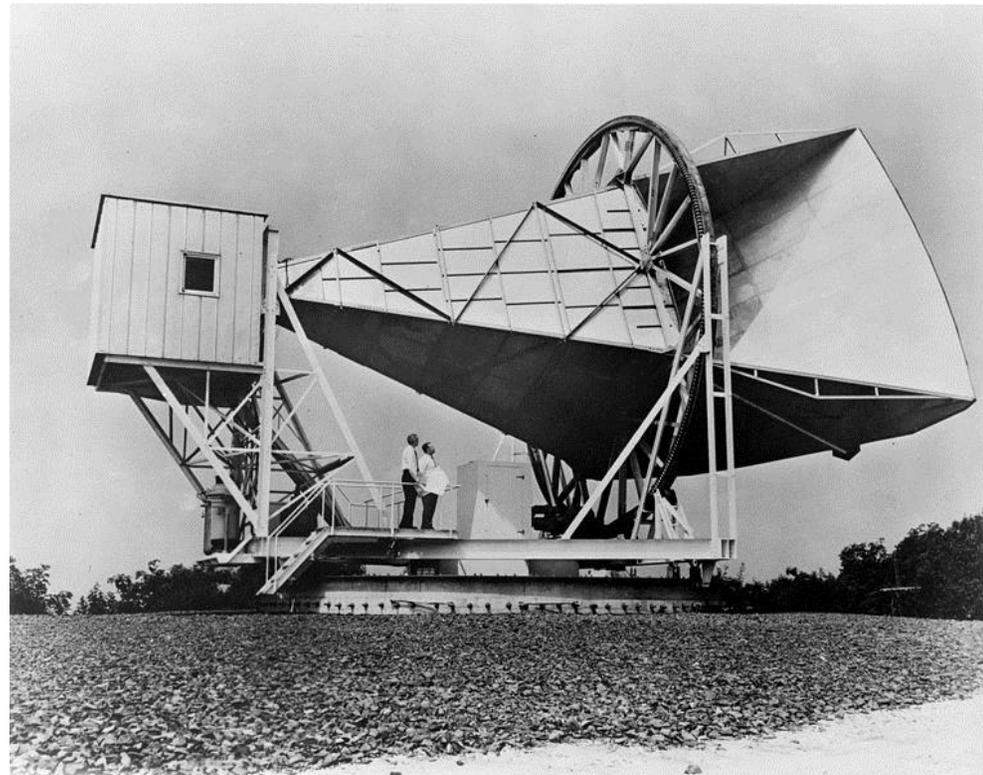
Fond cosmique diffus (Cosmic Microwave Background - **CMB**)



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

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

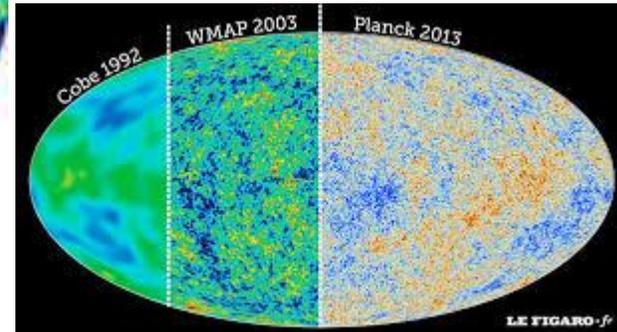
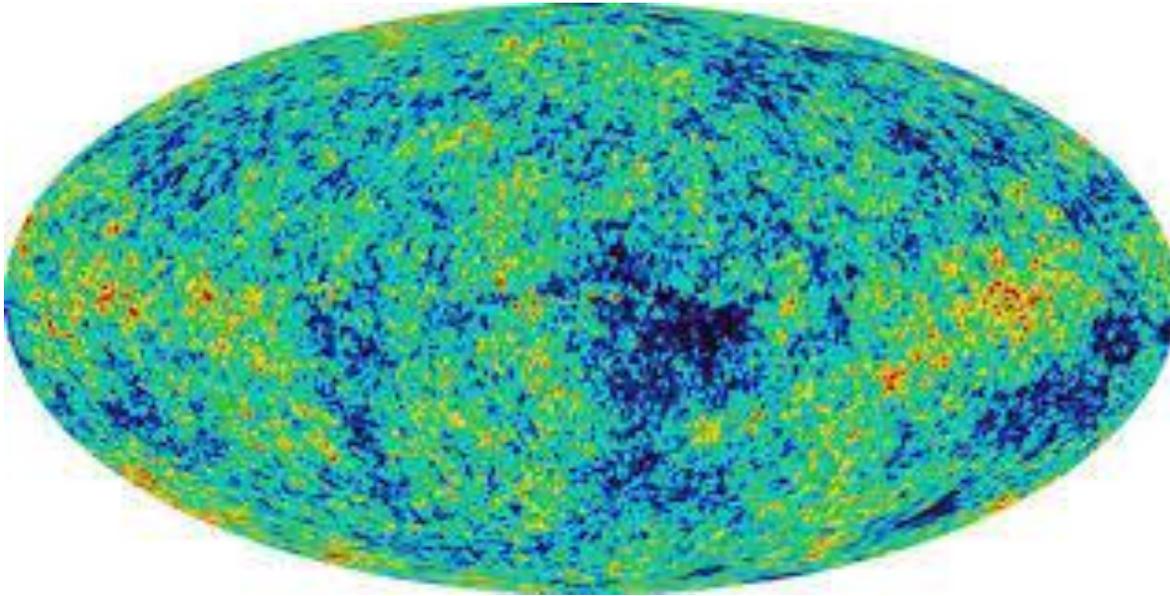
**Relique de l'univers très chaud,
refroidi par l'expansion
(température = **2.7 °K**)**



Le fonds diffus cosmique aujourd'hui

Satellite Planck (ESA), lancé en 2009

15,5 mois de données, présentées 21 mars 2013



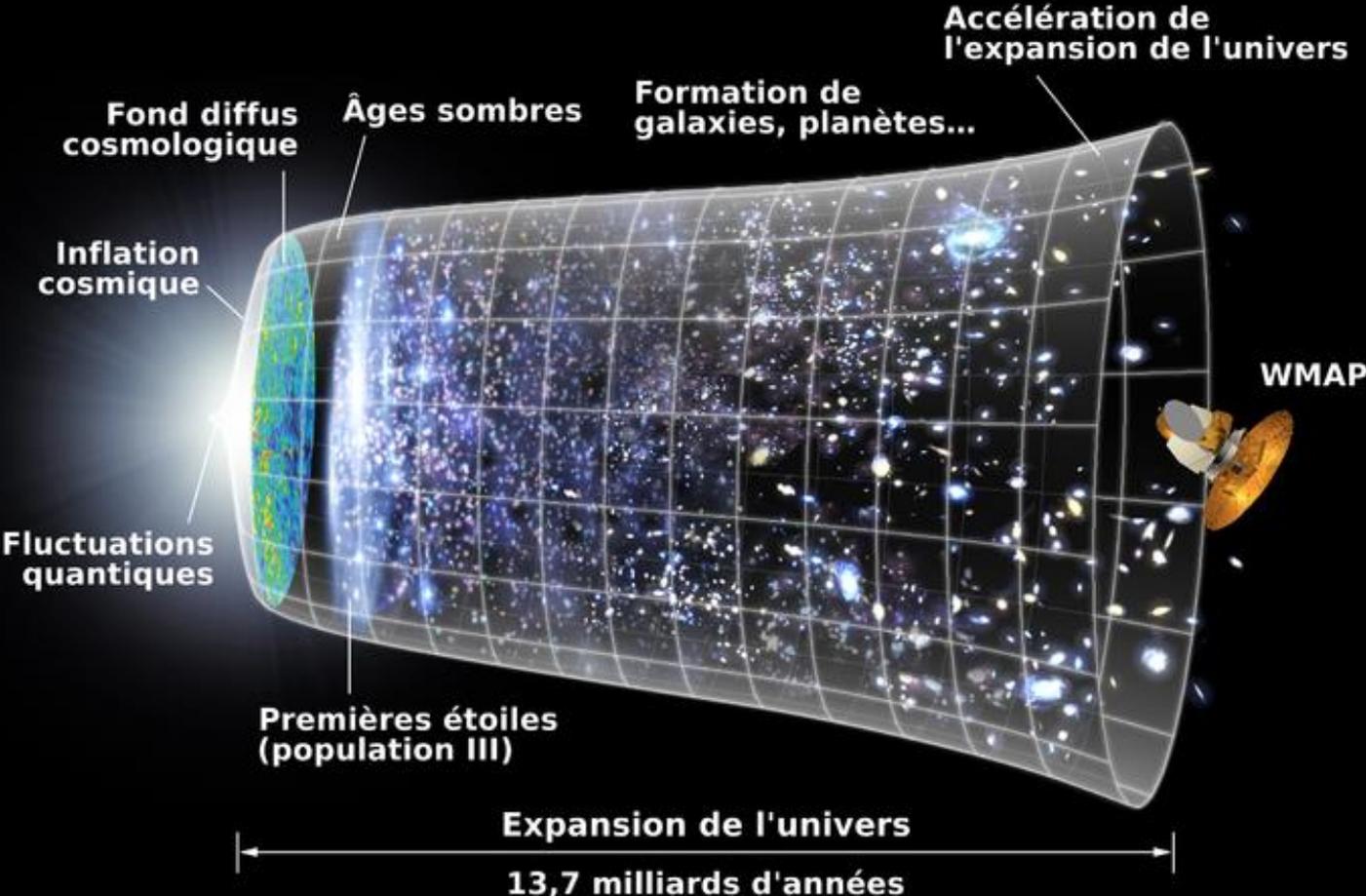
Température de l'Univers, au « découplage » matière-radiation,
380 000 ans après le Big Bang (13,7 milliards d'années)

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 ?

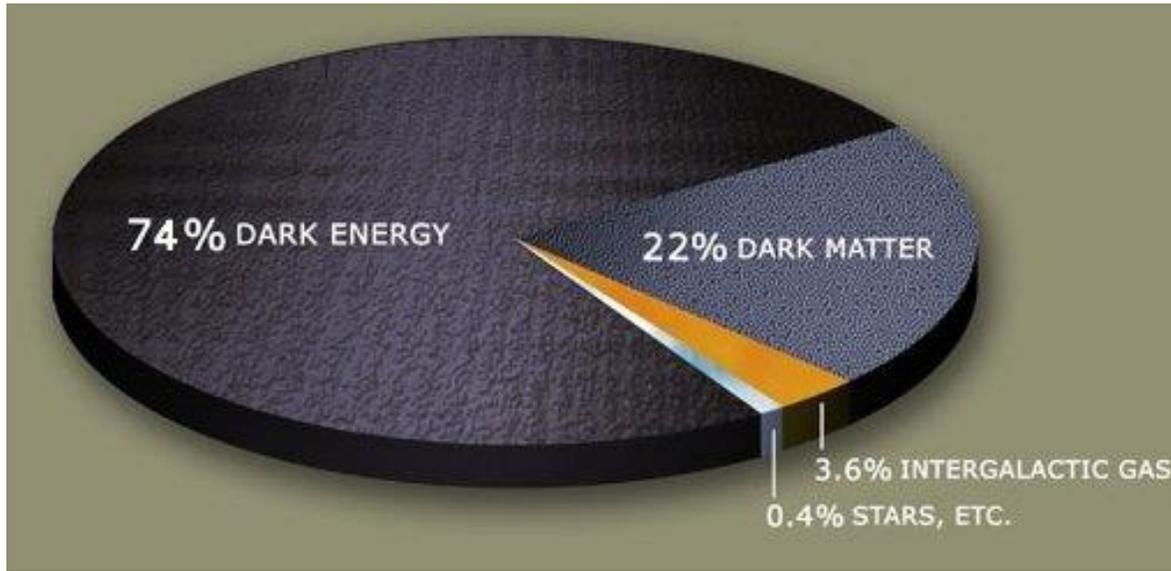
Solution : « **inflation** », avant l'ère de grande unification (T entre 10^{27} à 10^{32} degrés)

- 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



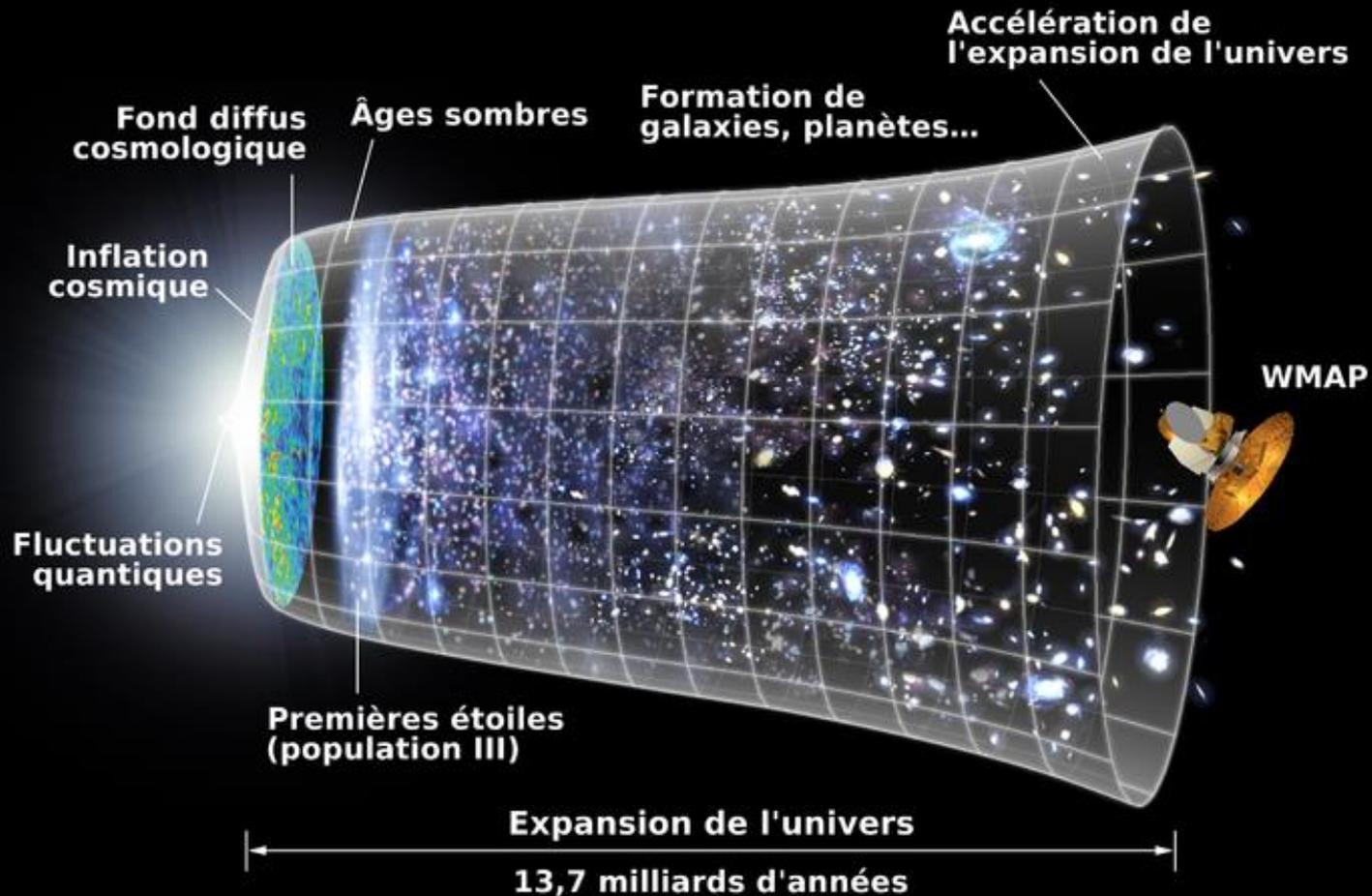
Matière noire (Zwicky '30s, années 1970-80)

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...