

Le Big Bang : mythes et réalités

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique,
Département de Physique, Université de Tours
loic@lmpt.univ-tours.fr

Centre Galois, le 29 juin 2017

Brève présentation

- ▶ **enseignant-chercheur** à l'Université de Tours (**dpt. de physique**) ;
- ▶ chercheur au **Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique** ;
- ▶ domaine : « (astro)physique relativiste » :
 - étude **théorique** de phénomènes ou objets astrophysiques dont la description nécessite le recours à la **relativité générale** ;
 - exemples : **étoiles à neutrons** et **trous noirs** ;
 - en particulier : propriétés macroscopiques (structure globale, oscillations, etc.) et microscopiques (superfluidité des nucléons, production de neutrinos, etc.), en lien avec l'émission d'**ondes gravitationnelles**.
- ▶ activités professionnelles hors-recherche : enseignement (du niveau L1 au niveau M2), communication scientifique (vulgarisation, etc.), tâches administratives, etc.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

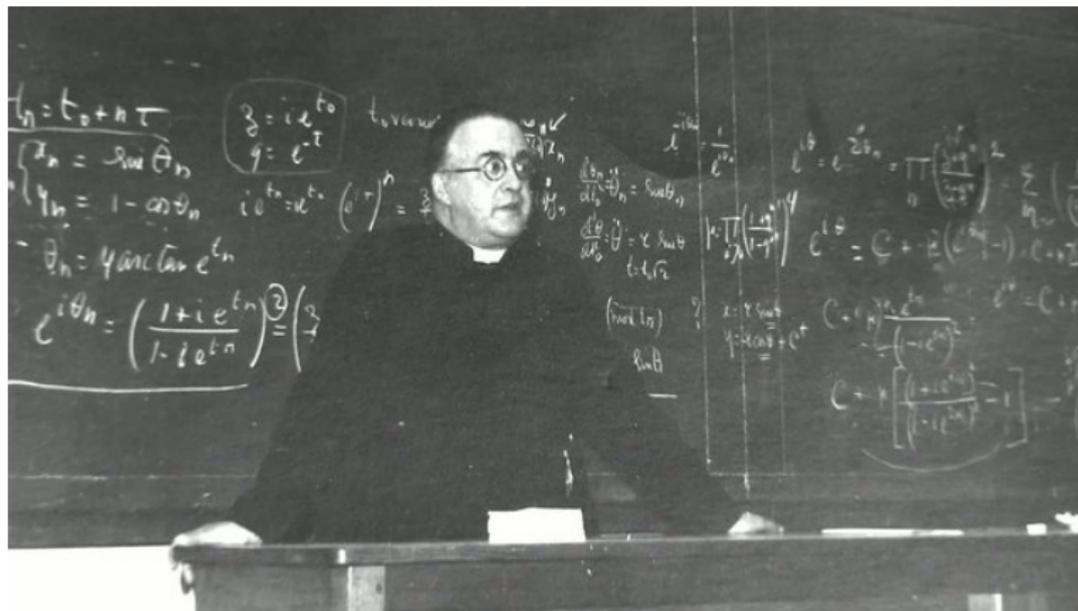
- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

Physique théorique

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent ;
- ▶ trouver le **simple et universel** derrière le complexe et particulier ;
- ▶ **Galilée (1623)** : « *La philosophie est écrite dans cet immense livre que nous tenons toujours ouvert sous nos yeux, je veux dire l'univers. Nous ne pouvons pas le comprendre si nous n'avons pas cherché à l'avance à en apprendre la langue, et à connaître les caractères au moyen desquels il a été écrit. Or il est écrit en langue mathématique, et ses caractères sont des triangles, des cercles et des figures géométriques, sans lesquels il serait impossible à tout homme d'en saisir le sens.* »
- ▶ **modèles** (« cartes ») **mathématiques** qui sont confrontés avec le réel
→ **expériences** ;
- ▶ **physicien théoricien** : « inventeur », « interprète » ou « testeur » de modèles.

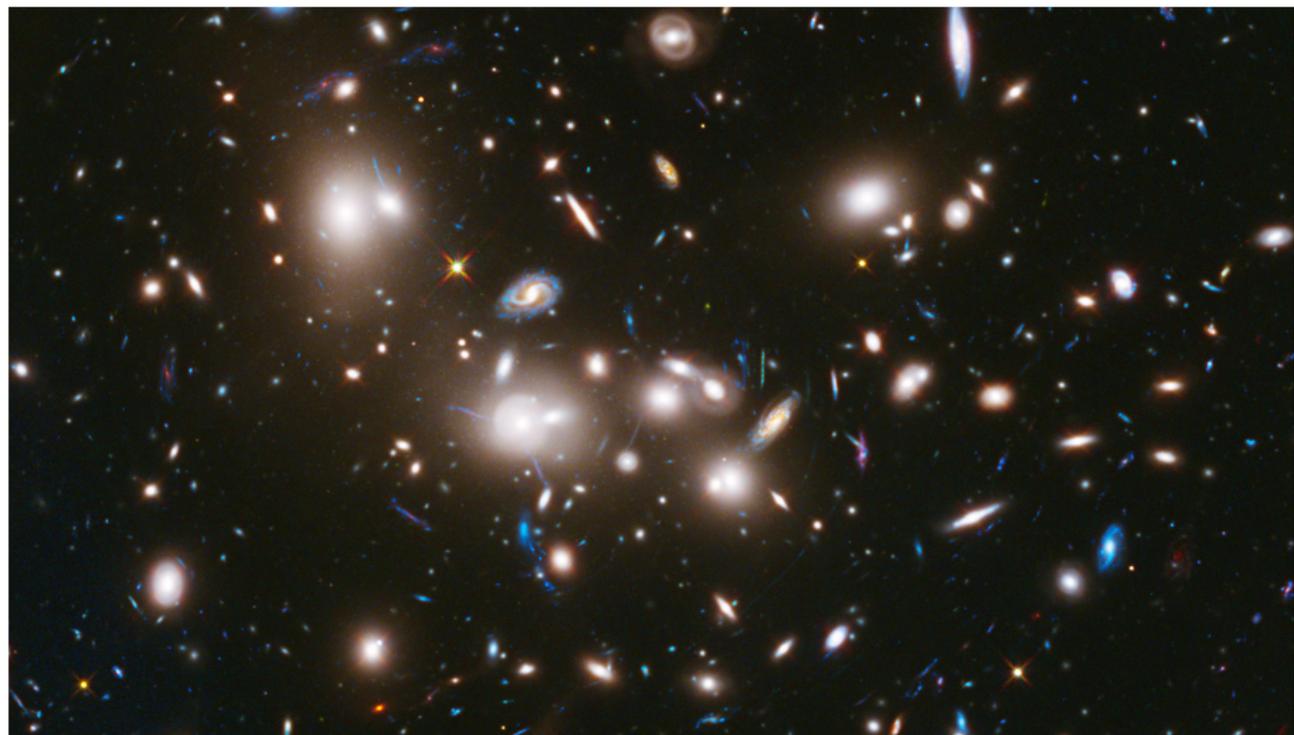
Big bang et cosmologie

Big Bang : concept né en **cosmologie** vers **1927**
(Georges Lemaître, chanoine catholique belge)
expression péjorative (Hoyle) vers **1955**



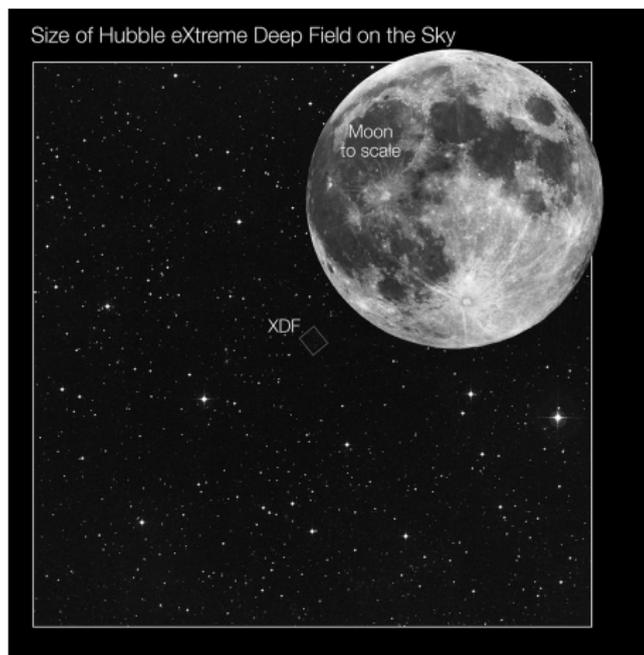
Cosmologie : étude de l'objet « Univers »

Univers \neq univers **observable** $\sim 100\,000\,000\,000$ galaxies (10^{11})



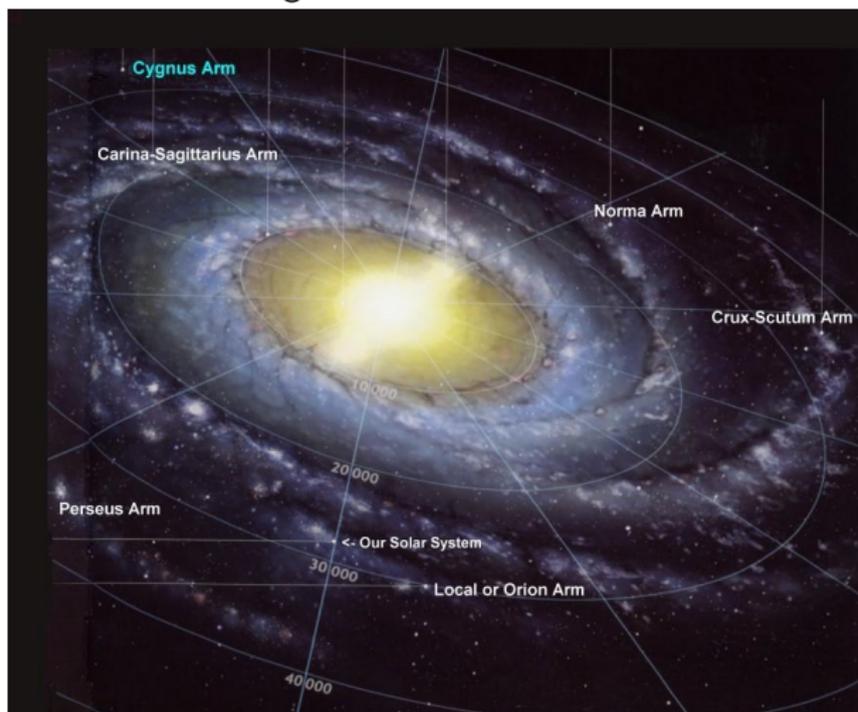
Cosmologie : étude de l'objet « Univers »

fraction du ciel visible sur la photo précédente (télescope spatial Hubble)



la Voie lactée (rayon $\sim 50\,000$ années-lumière)

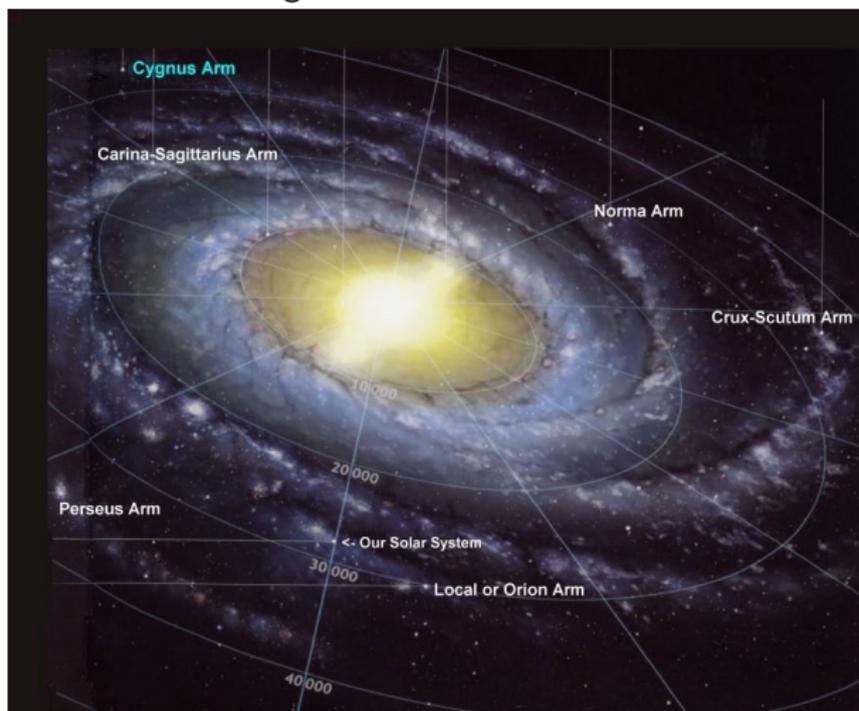
1 galaxie $\sim 10^{11}$ étoiles



Sagittarius A* : $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA.

la Voie lactée (rayon $\sim 50\,000$ années-lumière)

1 galaxie $\sim 10^{11}$ étoiles



Sagittarius A* : $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$, $r < 120$ UA.

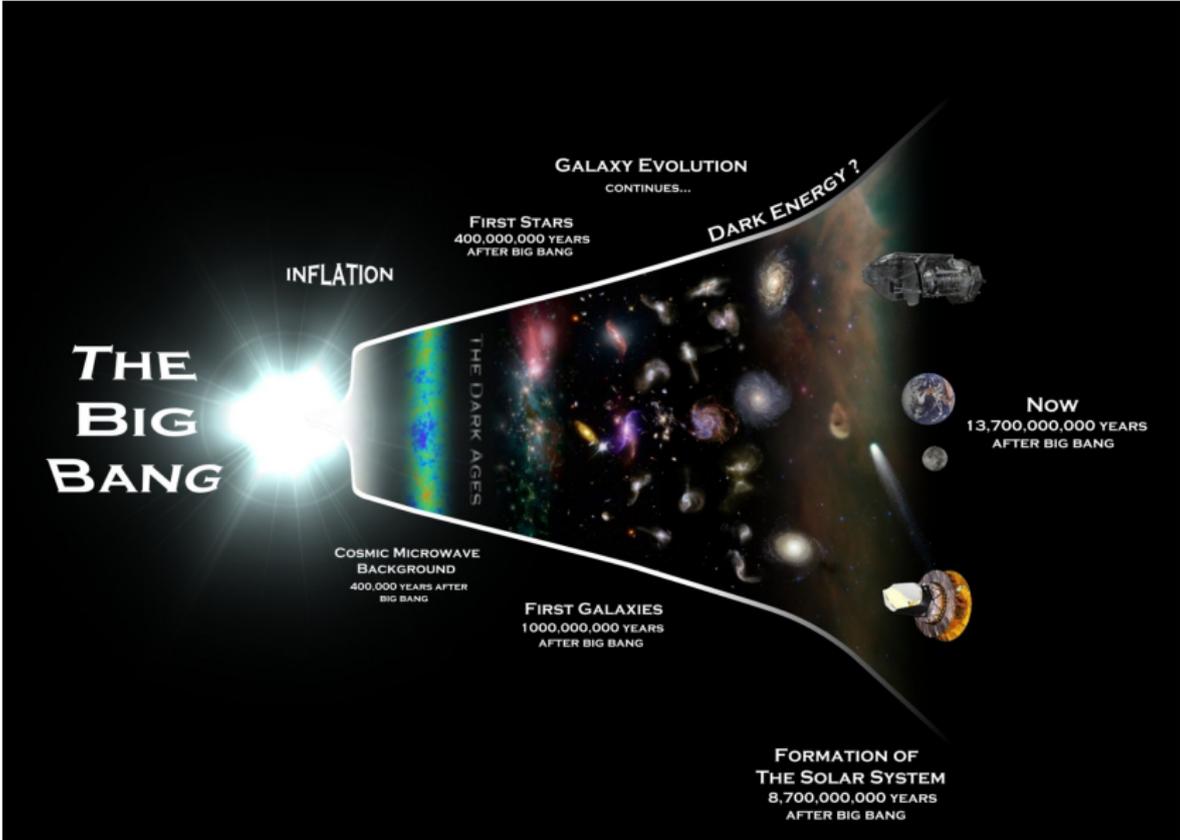
Et le Big Bang ?



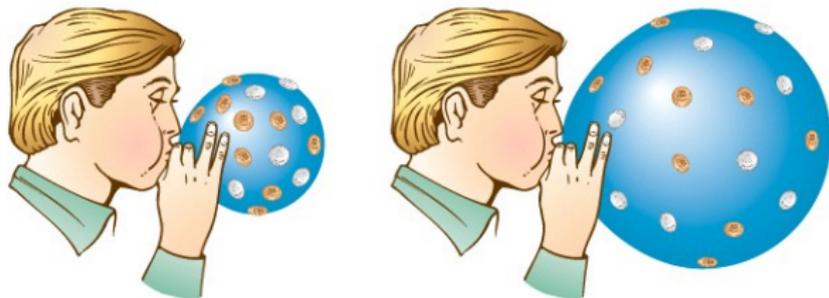
Big Bang : explosion



Big Bang : explosion créatrice



Big Bang : expansion



Big Bang : concept célèbre



Questions naturelles

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ? quand ? pourquoi ?
- ▶ **créatrice** : de quoi ? comment ?
- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

Questions naturelles

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ? quand ? pourquoi ?
- ▶ **créatrice** : de quoi ? comment ?
- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

Questions naturelles

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ? quand ? pourquoi ?
- ▶ **créatrice** : de quoi ? comment ?
- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

Questions naturelles

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ? quand ? pourquoi ?
- ▶ **créatrice** : de quoi ? comment ?
- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

Plan

Pré-histoire de la cosmologie moderne

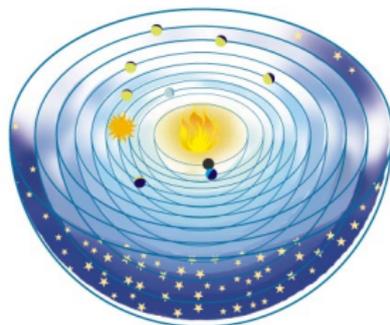
Univers en expansion

Cosmologie relativiste

Statut actuel et modèle de concordance

1

Pré-histoire de la cosmologie moderne

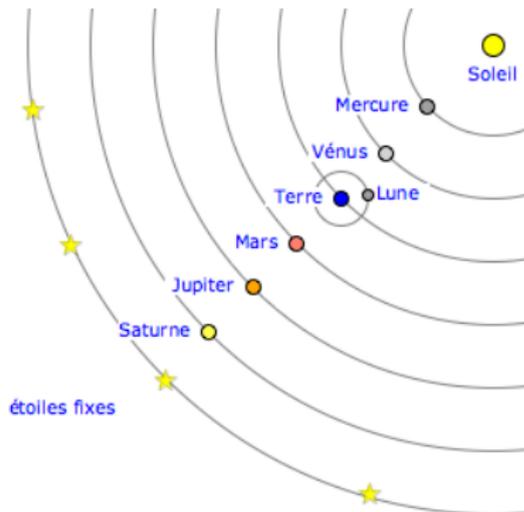
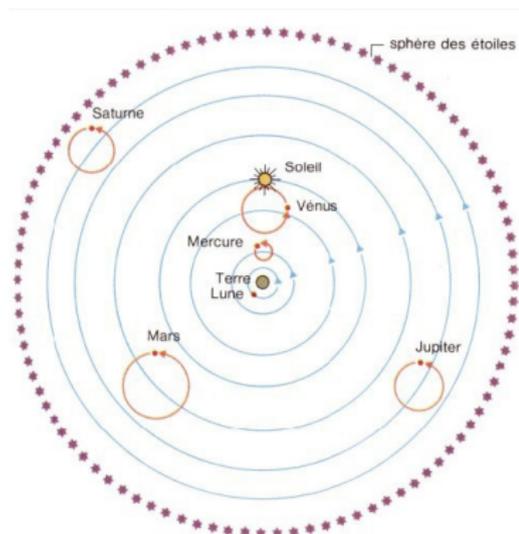


Big bang et cosmologie

nature du monde : question ancienne, réponses mythologiques
(Illustration du *Disque-Monde* par T. Pratchett)

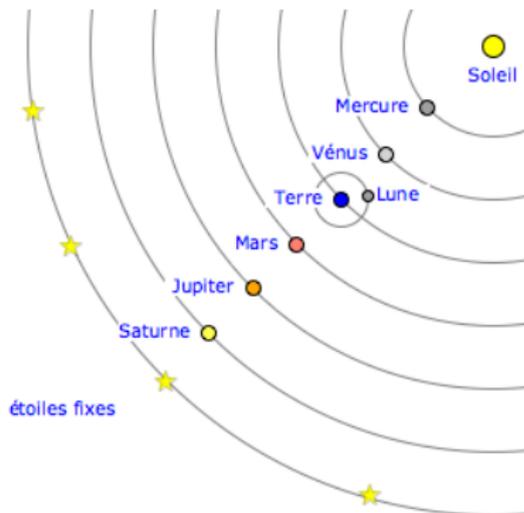
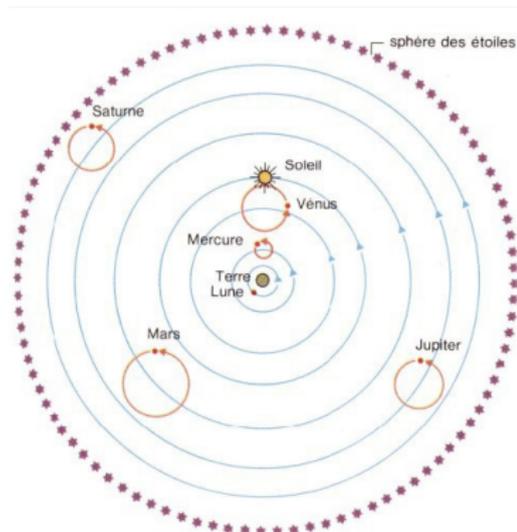


Modèles descriptifs : Ptolémée (~ 147) et Copernic (1543)



- ▶ Antiquité : Système de **Ptolémée** (à gauche, **Terre** au centre)
- ▶ **1543, Copernic** : **Soleil** au centre (à droite)
→ perte de place centrale/privilégiée, mais **Univers fini** (sphère céleste)

Modèles descriptifs : Ptolémée (~ 147) et Copernic (1543)



- ▶ Antiquité : Système de **Ptolémée** (à gauche, **Terre** au centre)
- ▶ **1543, Copernic** : **Soleil** au centre (à droite)
→ perte de place centrale/privilégiée, mais **Univers fini** (sphère céleste)

Principe cosmologique : Giordano Bruno (1548–1600)

- ▶ étoiles = autres soleils → pluralité des mondes
 - ▶ notre position dans l'Univers est quelconque
 - Univers homogène, isotrope et infini
 - brûlé pour hérésie
- (1995 : 1ère exoplanète ; juin 2017 ~ 3600 observées)



Principe cosmologique : Giordano Bruno (1548–1600)

- ▶ étoiles = autres soleils → pluralité des mondes
 - ▶ notre position dans l'Univers est quelconque
 - Univers homogène, isotrope et infini
 - brûlé pour hérésie
- (1995 : 1ère exoplanète ; juin 2017 ~ 3600 observées)



Principe cosmologique : Giordano Bruno (1548–1600)

- ▶ étoiles = autres soleils → pluralité des mondes
- ▶ notre position dans l'Univers est quelconque
→ Univers homogène, isotrope et infini
→ brûlé pour hérésie
(1995 : 1ère exoplanète ; juin 2017 ~ 3600 observées)



Principe cosmologique : Giordano Bruno (1548–1600)

- ▶ étoiles = autres soleils → pluralité des mondes
- ▶ notre position dans l'Univers est quelconque
→ Univers homogène, isotrope et infini
→ brûlé pour hérésie

(1995 : 1ère exoplanète ; juin 2017 ~ 3600 observées)



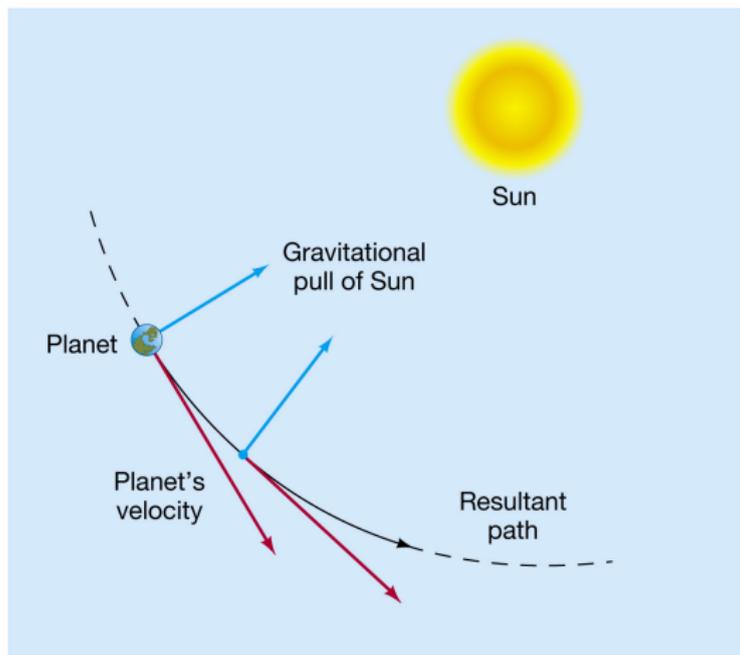
Principe cosmologique : Giordano Bruno (1548–1600)

- ▶ étoiles = autres soleils → pluralité des mondes
 - ▶ notre position dans l'Univers est quelconque
 - Univers homogène, isotrope et infini
 - brûlé pour hérésie
- (1995 : 1ère exoplanète ; juin 2017 ~ 3600 observées)



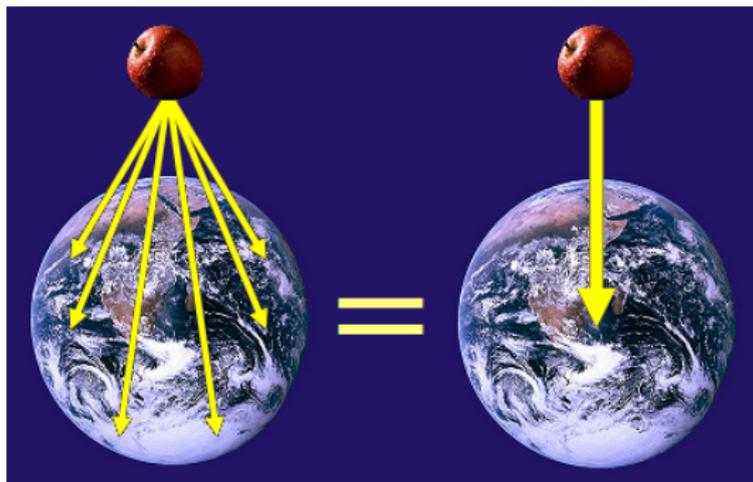
Isaac Newton, 1687 : Gravitation universelle

- ▶ union des mondes céleste et sublunaire
- ▶ théorie **quantitative et prédictive** (forme de la Terre, lois de Kepler, retour de la comète de Halley, etc.)



Univers fini ou infini ?

- ▶ **Newton** : gravitation universelle → attraction de toutes les masses dans un espace infini
- ▶ **Cosmologie newtonienne** : effondrement si quantité de masse finie, mais problème théorique si quantité infinie (correspondance avec **Bentley**)



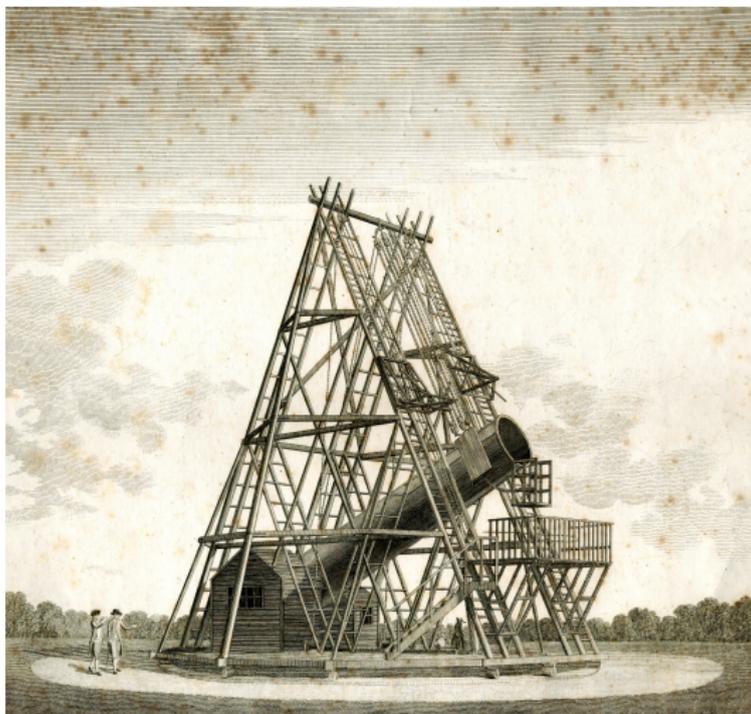
Observation d'un « Univers » fini ?

1610, Galilée : Voie lactée composée d'étoiles



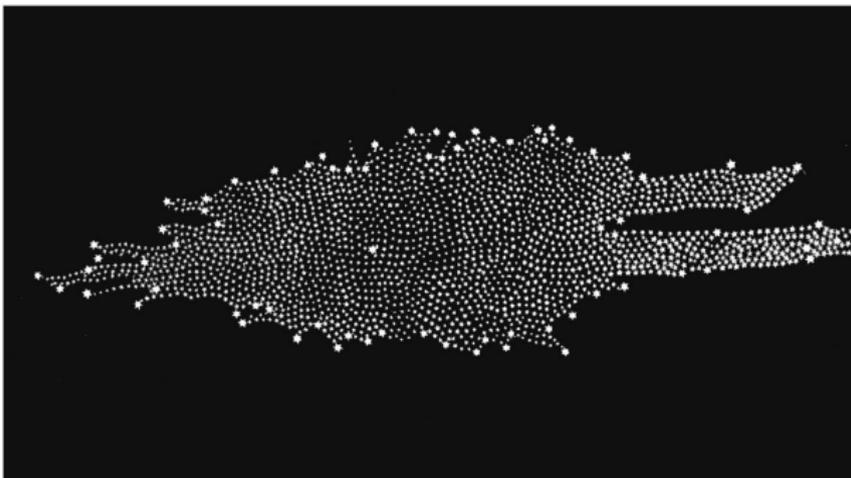
1785, William et Caroline Herschel : forme de l'Univers

Hypothèses : étoiles **réparties uniformément** et toutes visibles avec un télescope



Herschel et la forme de la Voie lactée (1785)

Résultat : « disque » (diamètre $\sim 10 \times$ épaisseur); Soleil très proche du **centre**

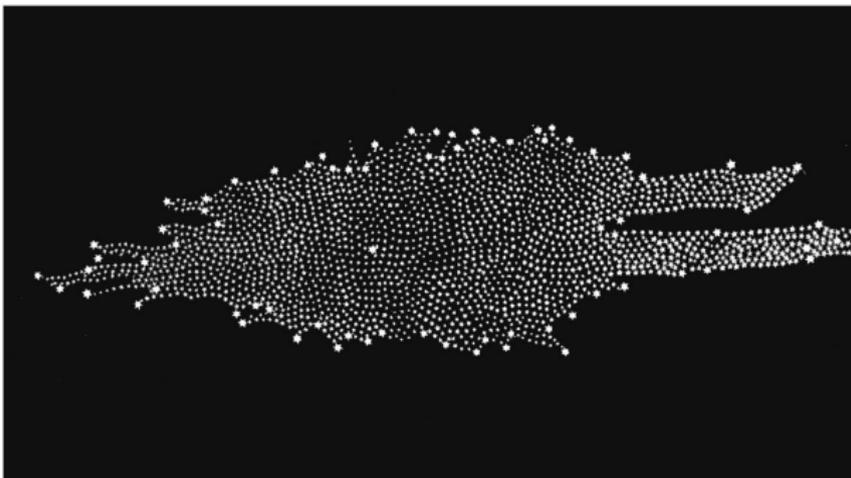


problèmes :

- ▶ existence de **poussière** (absorption), répartition pas homogène, etc.
- ▶ distances ?

Herschel et la forme de la Voie lactée (1785)

Résultat : « disque » (diamètre $\sim 10 \times$ épaisseur); Soleil très proche du **centre**

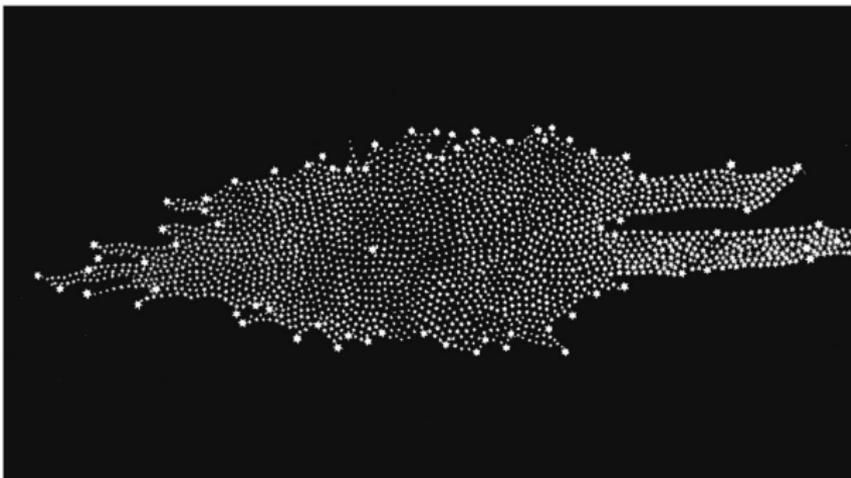


problèmes :

- ▶ existence de **poussière** (absorption), répartition pas homogène, etc.
- ▶ distances ?

Herschel et la forme de la Voie lactée (1785)

Résultat : « disque » (diamètre $\sim 10 \times$ épaisseur); Soleil très proche du **centre**

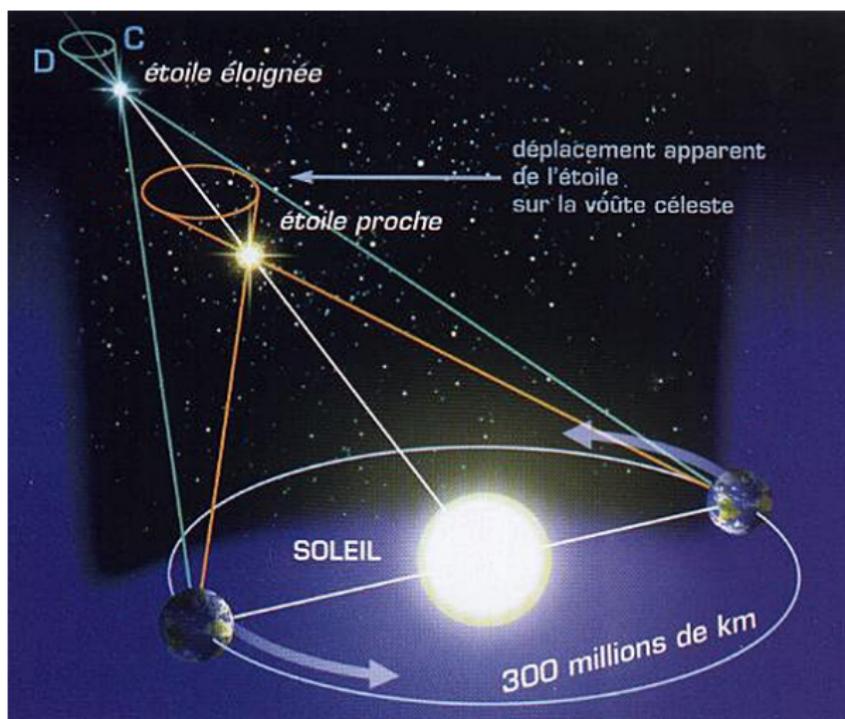


problèmes :

- ▶ existence de **poussière** (absorption), répartition pas homogène, etc.
- ▶ distances ?

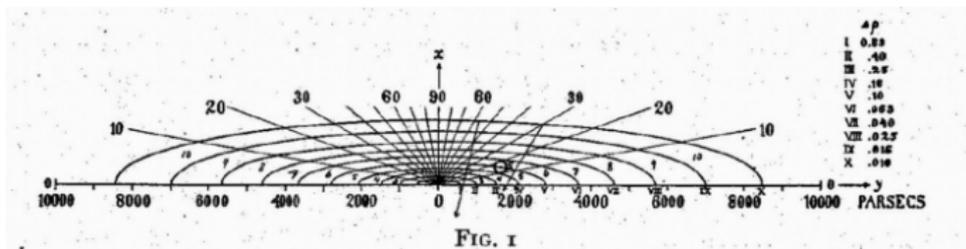
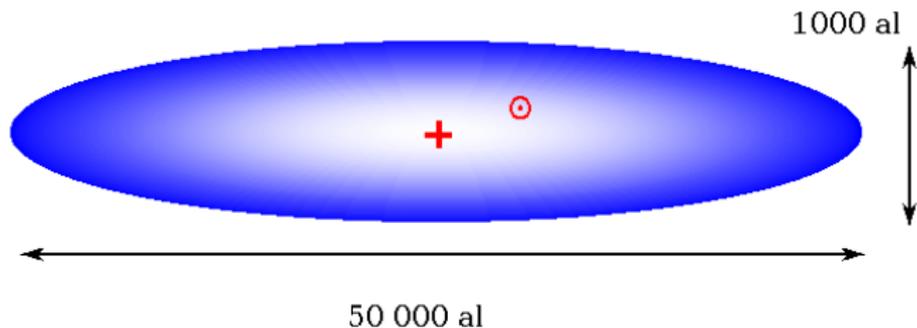
Un univers très grand...

1838, Bessel : première **mesure** d'une **parallaxe stellaire** (\sim bras de 30 km)
 → 61 Cygni à 10 années-lumière \sim 100 000 000 000 000 km ($= 10^{14}$ km)



Forme et taille de la Voie lactée (vers 1900-1920)

1922, **Kapteyn** : Voie lactée = **ellipsoïde** (grand axe $\sim 50\,000$ années-lumière)



Le grand débat : 26 avril 1920, Shapley vs. Curtis

- ▶ la Voie lactée est-elle tout l'Univers ?
- ▶ les nébuleuses sont-elles petites et incluses dans la Voie lactée ?
- ▶ sont-elles des « univers-îles » semblables à elle ?



Le grand débat : 26 avril 1920, Shapley vs. Curtis

- ▶ la Voie lactée est-elle tout l'Univers ?
- ▶ les nébuleuses sont-elles **petites et incluses** dans la Voie lactée ?
- ▶ sont-elles des « univers-îles » semblables à elle ?



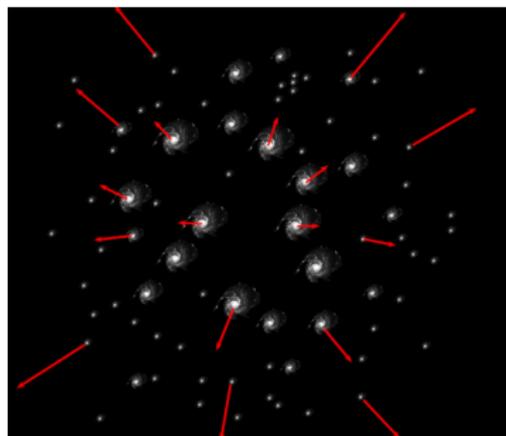
Le grand débat : 26 avril 1920, Shapley vs. Curtis

- ▶ la Voie lactée est-elle tout l'Univers ?
- ▶ les nébuleuses sont-elles **petites et incluses** dans la Voie lactée ?
- ▶ sont-elles des « **univers-îles** » semblables à elle ?



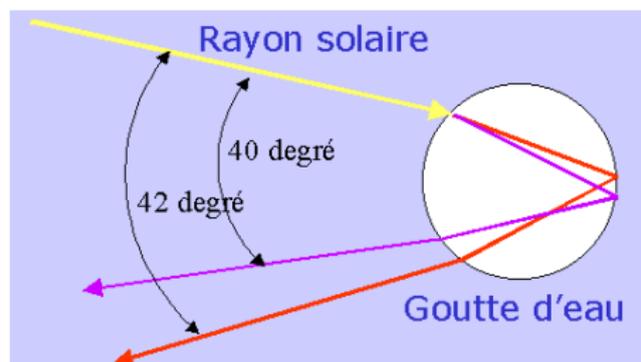
2

Univers en expansion



Parenthèse physique : spectre optique

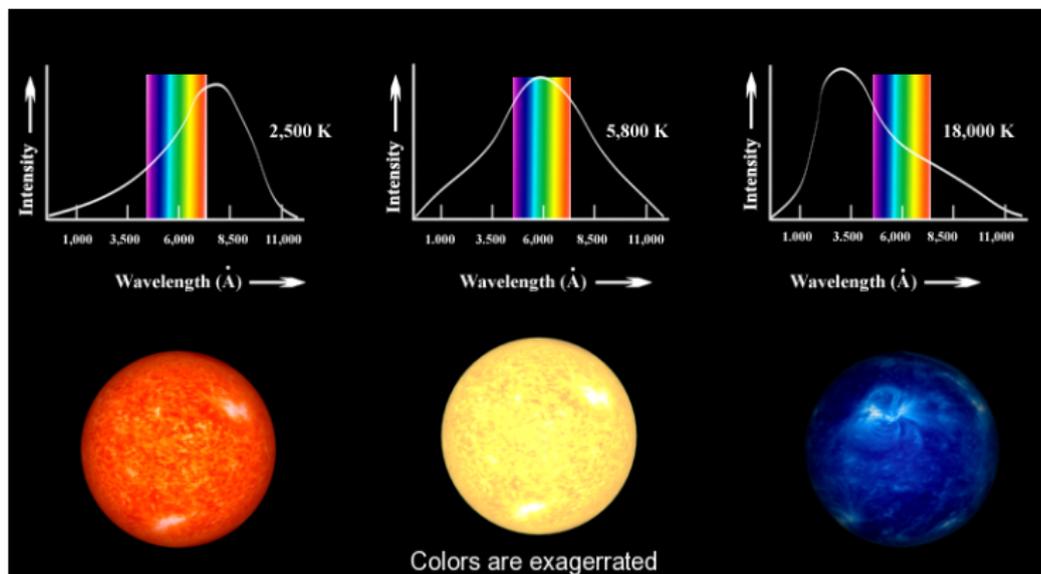
lumière blanche : composée de toutes les couleurs (longueurs d'onde)



Parenthèse physique : couleur des étoiles

objet chaud (étoile) : lumière blanche pas uniforme

→ analyse du spectre renseigne sur la température (plus chaud = plus bleu)

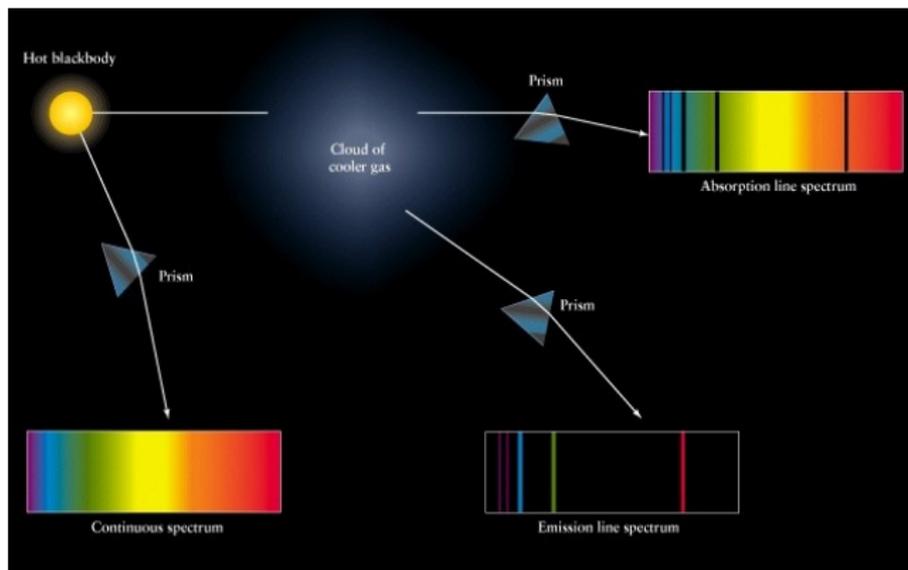


Parenthèse physique : analyse spectrale des étoiles

couches externes d'une étoile **froides** : raies d'absorption

→ analyse du **spectre** renseigne sur la **composition**

1861, **William et Margaret Huggins** : étoiles composées des **mêmes éléments**
(surtout **hydrogène** et un peu d'**hélium**)

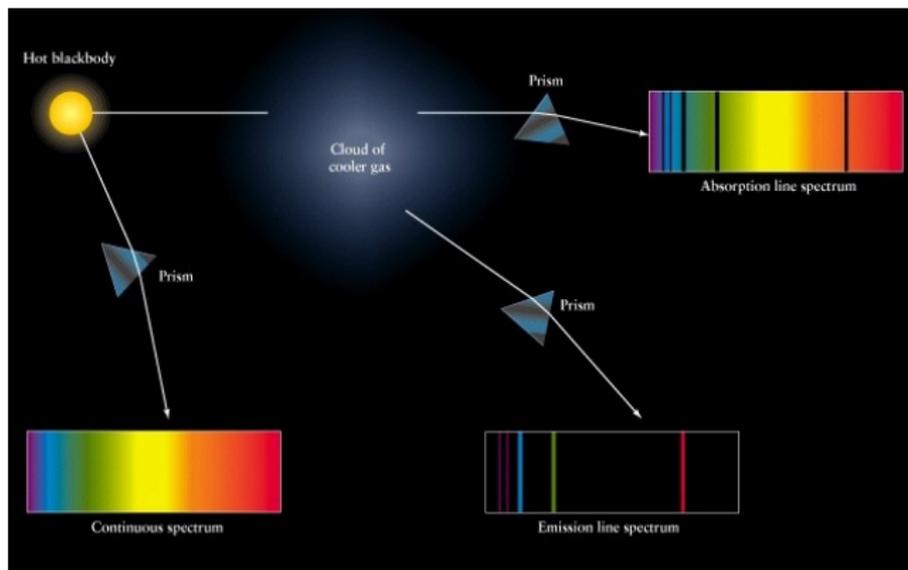


Parenthèse physique : analyse spectrale des étoiles

couches externes d'une étoile **froides** : **raies d'absorption**

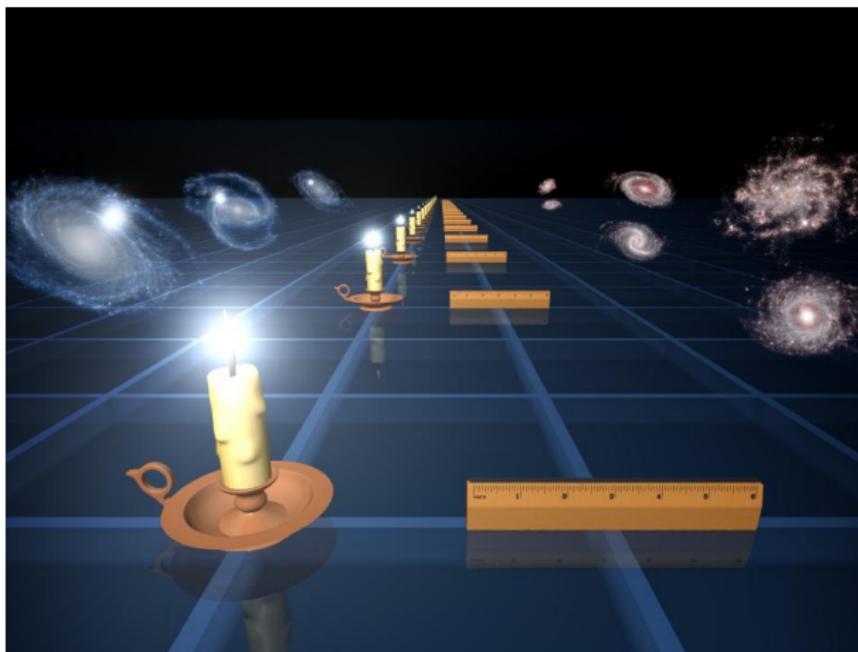
→ analyse du **spectre** renseigne sur la **composition**

1861, William et Margaret Huggins : étoiles composées des **mêmes éléments**
(surtout **hydrogène** et un peu d'**hélium**)



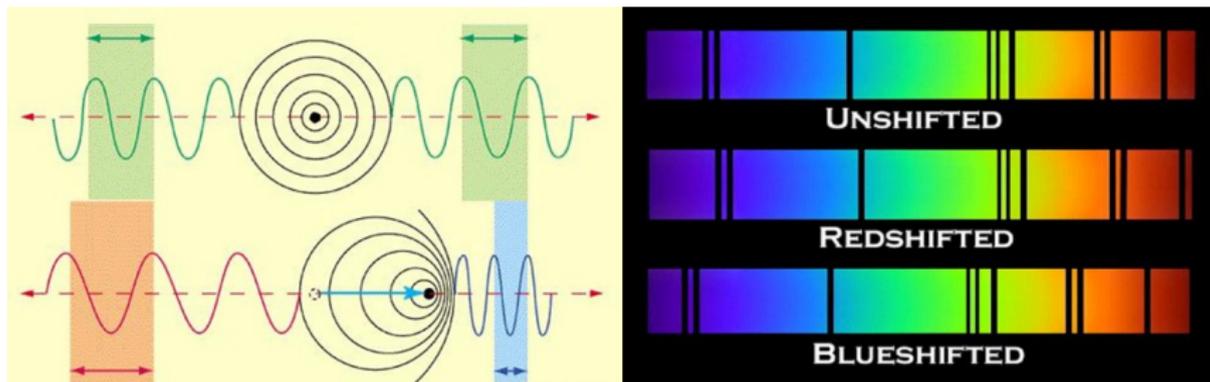
Parenthèse physique : mesure de distances stellaires

- ▶ étoiles proches (jusque 100 al) : **parallaxe**
- ▶ **1912, Henrietta Leavitt** (**Céphéides = chandelles standard**)



Parenthèse physique : effet Doppler-Fizeau

- source périodique en **mouvement** (effet Doppler-Fizeau) :
 signal reçu avec une **fréquence modifiée**
 → si éloignement : son plus grave ; lumière plus rouge (**redshift**)
 → position des raies liée à la **vitesse**



Univers grand et en expansion

- ▶ XIX^{ème} progrès optiques → vision meilleure et plus lointaine (Bessel, etc.)
- ▶ cartographie des positions et vitesses des étoiles et nébuleuses (spiraales)
- ▶ 1912-1925, Slipher : décalages des raies importants → nébuleuses spiraales en mouvement (v jusque 1000 km/s) et 41/45 s'éloignent
- ▶ 1924, Hubble : nébuleuses spiraales = galaxies (observatoire Mont Wilson, télescope Hooker de 250 cm de diamètre) : Andromède à 2,5 Mal...

Univers grand et en expansion

- ▶ XIX^{ème} **progrès optiques** → vision meilleure et plus lointaine (Bessel, etc.)
- ▶ **cartographie** des positions et vitesses des étoiles et nébuleuses (spiraales)
- ▶ **1912-1925, Slipher** : **décalages des raies importants** → nébuleuses spiraales en mouvement (v jusque 1000 km/s) et **41/45 s'éloignent**
- ▶ **1924, Hubble** : **nébuleuses spiraales = galaxies** (observatoire Mont Wilson, télescope Hooker de 250 cm de diamètre) : Andromède à 2,5 Mal...

Univers grand et en expansion

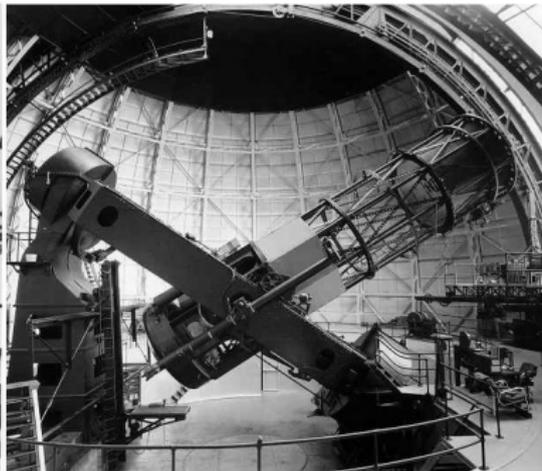
- ▶ XIX^{ème} **progrès optiques** → vision meilleure et plus lointaine (Bessel, etc.)
- ▶ **cartographie** des positions et vitesses des étoiles et nébuleuses (spiraales)
- ▶ **1912-1925, Slipher** : **décalages des raies importants** → nébuleuses spiraales en mouvement (v jusque 1000 km/s) et **41/45 s'éloignent**
- ▶ **1924, Hubble** : **nébuleuses spiraales = galaxies** (observatoire Mont Wilson, télescope Hooker de 250 cm de diamètre) : Andromède à 2,5 Mal...

Univers grand et en expansion

- ▶ XIX^{ème} **progrès optiques** → vision meilleure et plus lointaine (Bessel, etc.)
- ▶ **cartographie** des positions et vitesses des étoiles et nébuleuses (spirales)
- ▶ **1912-1925, Slipher** : **décalages des raies importants** → nébuleuses spirales en mouvement (v jusque 1000 km/s) et **41/45 s'éloignent**
- ▶ **1924, Hubble** : **nébuleuses spirales = galaxies** (observatoire Mont Wilson, télescope Hooker de 250 cm de diamètre) : Andromède à 2,5 Mal...

Univers grand et en expansion

- ▶ XIX^{ème} **progrès optiques** → vision meilleure et plus lointaine (Bessel, etc.)
- ▶ **cartographie** des positions et vitesses des étoiles et nébuleuses (spiraales)
- ▶ **1912-1925, Slipher** : **décalages des raies importants** → nébuleuses spirales en mouvement (v jusque 1000 km/s) et **41/45 s'éloignent**
- ▶ **1924, Hubble** : **nébuleuses spirales = galaxies** (observatoire Mont Wilson, télescope Hooker de 250 cm de diamètre) : Andromède à 2,5 Mal...



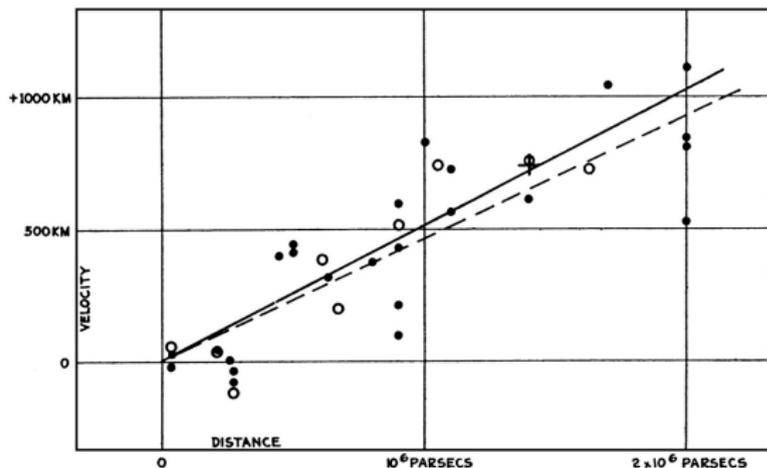
Edwin Hubble (1889-1953) and Hooker Telescope (2,5m), Mt.Wilson Observatory
Sources: Wikipedia, <http://www.astro.caltech.edu/>

Loi de Hubble

- ▶ **1929, Hubble** : les galaxies les plus lointaines ont des redshift plus importants → idée d'un univers en expansion (loi de Hubble)

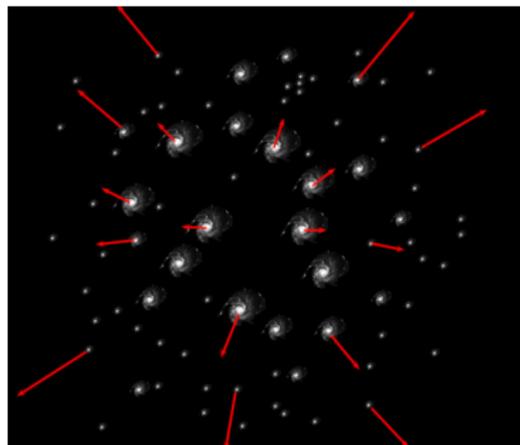
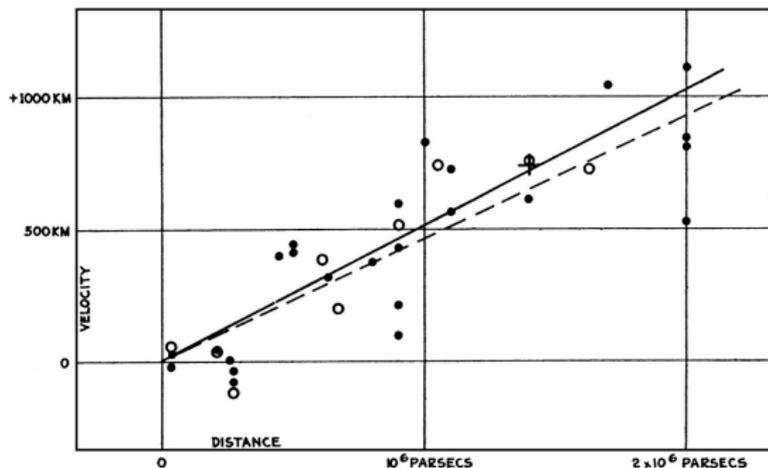
Loi de Hubble

- ▶ **1929, Hubble** : les galaxies les plus lointaines ont des redshift plus importants → idée d'un univers en expansion (loi de Hubble)



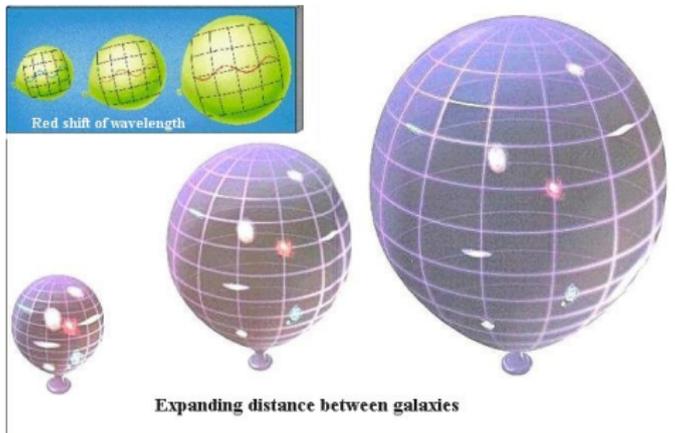
Loi de Hubble

- ▶ **1929, Hubble** : les galaxies les plus lointaines ont des redshift plus importants → idée d'un univers en expansion (loi de Hubble)



3

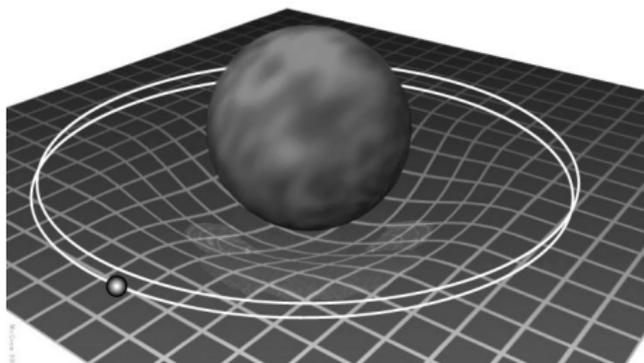
Cosmologie relativiste



Une histoire parallèle : la relativité générale (1915)

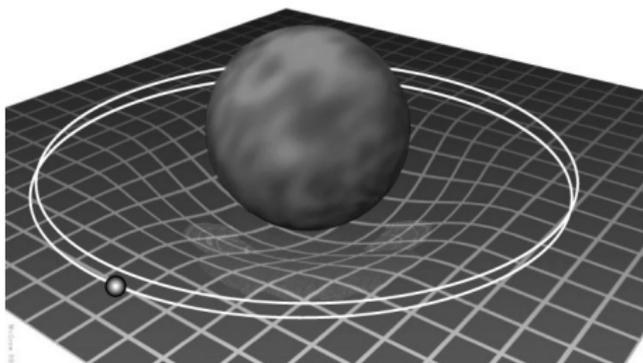
la gravitation est une **manifestation de la courbure de l'espace (et du temps)** !

→ espace(-temps) = « objet » physique dynamique



Une histoire parallèle : la relativité générale (1915)

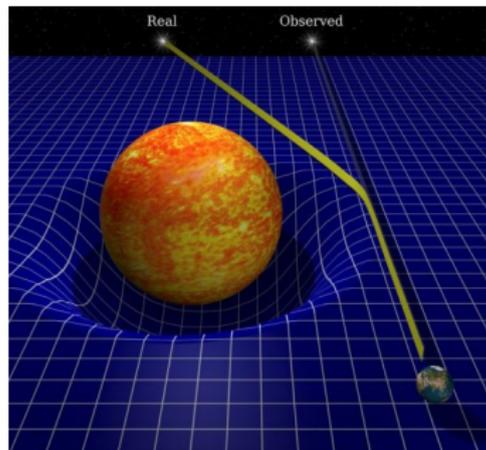
la gravitation est une **manifestation de la courbure de l'espace (et du temps)** !
→ **espace(-temps) = « objet » physique dynamique**



Prédiction et test de la relativité générale

Déviatoin de la lumière

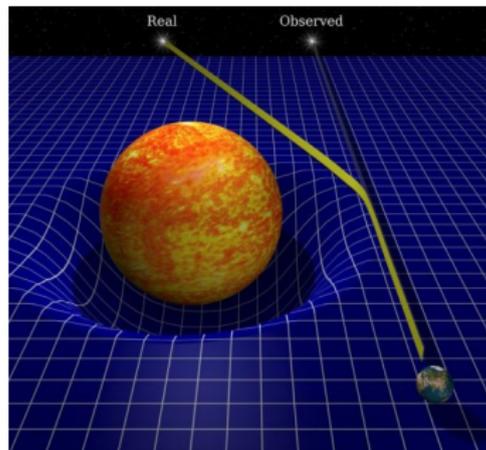
- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant à côté du Soleil est déviée
→ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil**
- ▶ **1919, Eddington** : vérification de la prédiction d'Einstein



Prédiction et test de la relativité générale

Déviations de la lumière

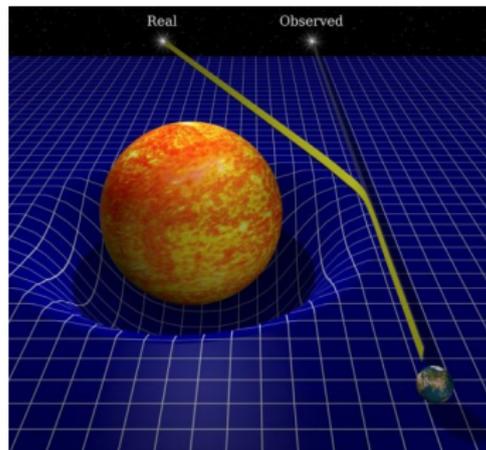
- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant à côté du Soleil est déviée
→ plus facile à constater pendant une éclipse de Soleil
- ▶ 1919, Eddington : vérification de la prédiction d'Einstein



Prédiction et test de la relativité générale

Déviations de la lumière

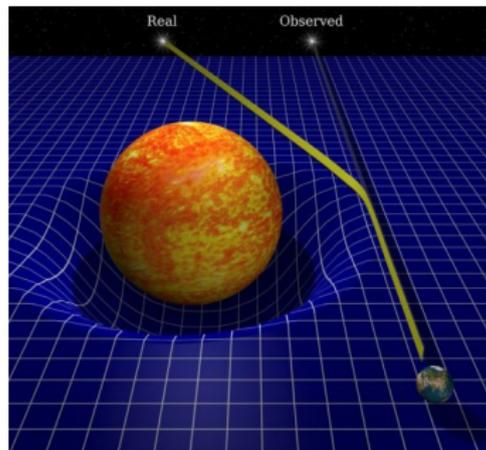
- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant à côté du Soleil est déviée
→ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil**
- ▶ 1919, **Eddington** : vérification de la prédiction d'Einstein



Prédiction et test de la relativité générale

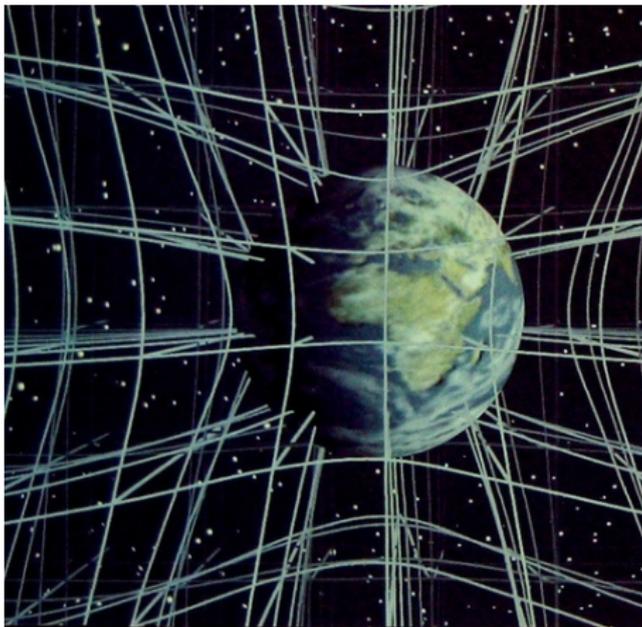
Déviations de la lumière

- ▶ la lumière provenant d'étoiles lointaines et passant à côté du Soleil est déviée
→ plus facile à constater pendant une **éclipse de Soleil**
- ▶ **1919, Eddington** : [vérification de la prédiction d'Einstein](#)



Courbure de l'espace-temps

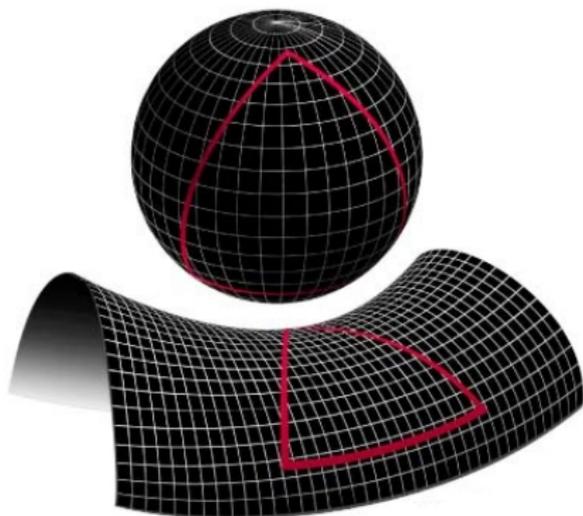
- ▶ mouvement orbital \sim courbure spatiale ;
- ▶ **courbure temporelle** : pieds vieillissent moins vite que tête (cf. **GPS**)...



visualisation tridimensionnelle de la courbure provoquée par la Terre

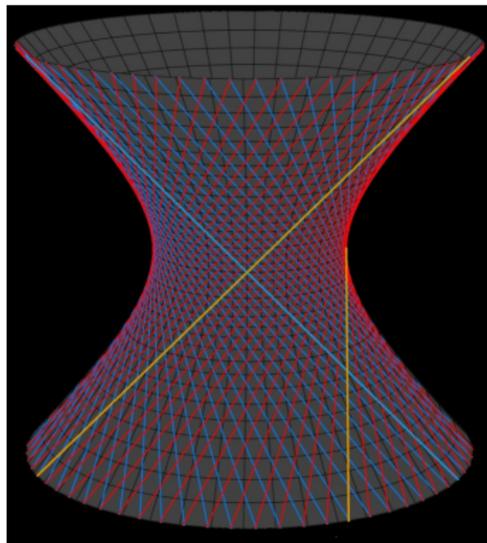
Naissance de la cosmologie relativiste

- ▶ espace-temps \equiv objet physique \rightarrow Univers aussi \rightarrow cosmologie scientifique
- ▶ **1917, Einstein** : premier modèle cosmologique :
 \rightarrow solution statique, homogène, isotrope et finie (\ll hypersphère \gg)
mais besoin d'une constante cosmologique (effet répulsif)
- ▶ **1895, Seeliger** : hypothèse semblable en cosmologie newtonienne



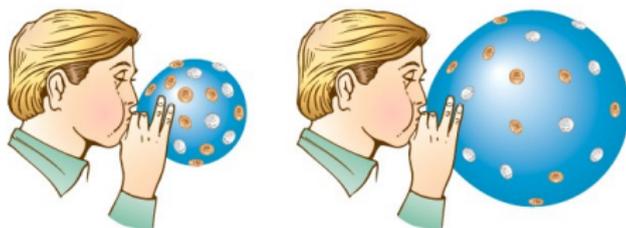
Univers de de Sitter (1917)

- ▶ modèle d'Univers fini et statique **vide de matière**
- ▶ **1917, de Sitter** : lumière lointaine **décalée vers le rouge** :
→ lien avec **observations de Slipher** ?



Expansion de l'Univers et espace-temps dynamique

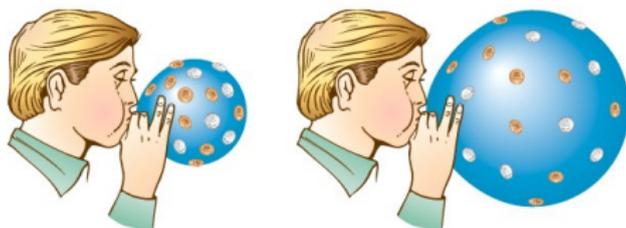
- ▶ **1922, Friedman ; 1927, Lemaître** : solutions dynamiques avec **expansion de l'Univers** → **avant les observations de Hubble !**
- ▶ **espace-temps dynamique** \neq matière en expansion



Problèmes de la représentation : vision « externe » ; rotation (dans l'animation).

Expansion de l'Univers et espace-temps dynamique

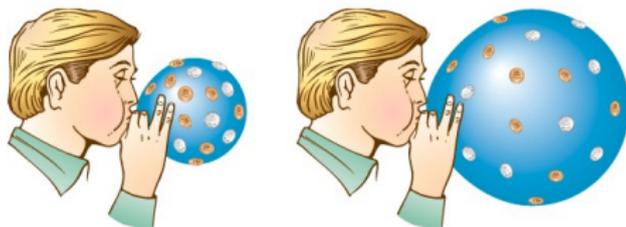
- ▶ **1922, Friedman ; 1927, Lemaître** : solutions dynamiques avec **expansion de l'Univers** → **avant les observations de Hubble !**
- ▶ **espace-temps dynamique** \neq matière en expansion



Problèmes de la représentation : vision « externe » ; rotation (dans l'animation).

Expansion de l'Univers et espace-temps dynamique

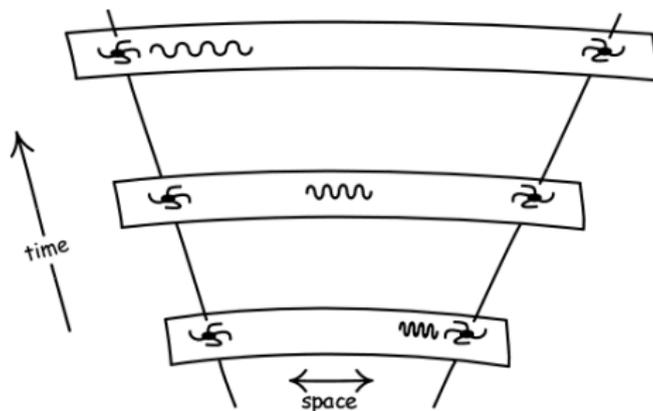
- ▶ **1922, Friedman ; 1927, Lemaître** : solutions dynamiques avec **expansion de l'Univers** → **avant les observations de Hubble !**
- ▶ **espace-temps dynamique** \neq matière en expansion



Problèmes de la représentation : vision « externe » ; rotation (dans l'animation).

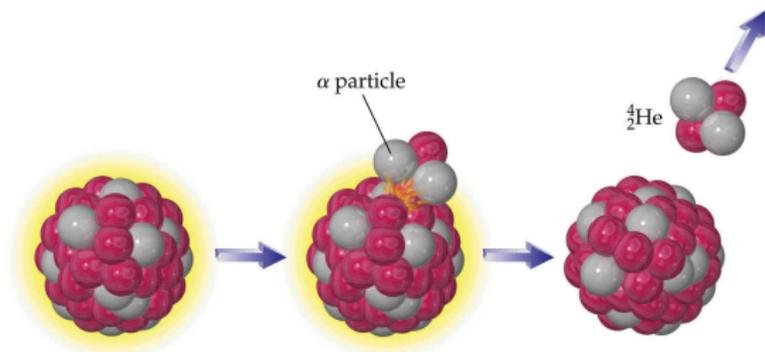
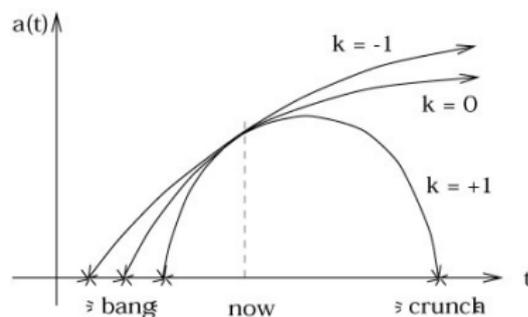
Redshift cosmologique

décalage vers le rouge cosmologique \sim évolution de la géométrie de l'espace
 \rightarrow pas mouvement de la matière



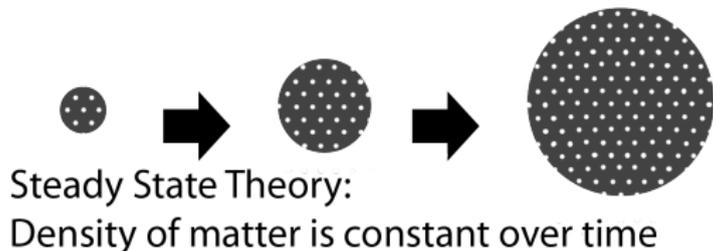
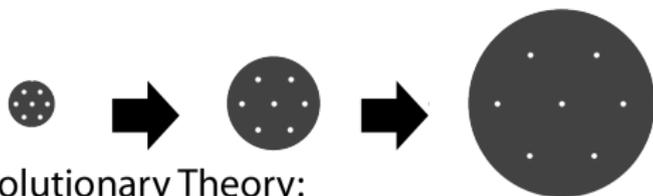
Passé de l'Univers ?

- Lemaître** : par le passé, matière plus « concentrée »
 → univers (observable) de **volume presque nul** (modèle du « Big Bang ») ?
 → « **atome primitif** »



Principe cosmologique complet

1948, Bondi, Gold et Hoyle : théorie de l'univers stationnaire
→ **création continue** de matière et **invariance au cours du temps**



Soupe primordiale chaude et opaque

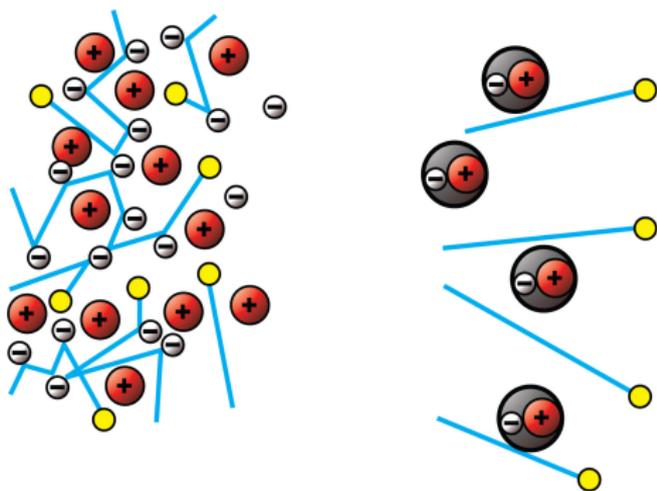
- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement → soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) → « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) → univers observable sphérique et fini

Soupe primordiale chaude et opaque

- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » opaque et naissance des premiers atomes (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement
→ soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie)
→ « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence)
→ univers observable sphérique et fini

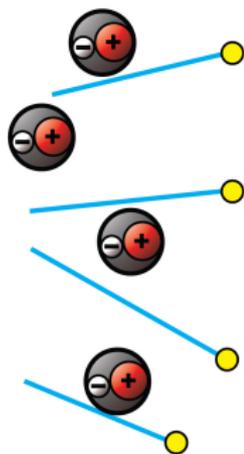
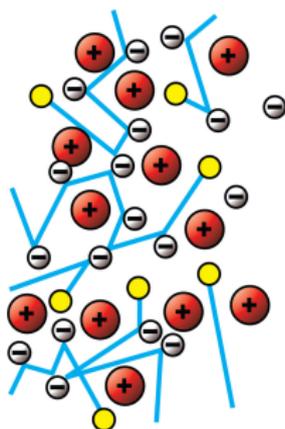
Soupe primordiale chaude et opaque

- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » **opaque** et **naissance des premiers atomes** (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement → soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) → « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) → univers observable sphérique et fini



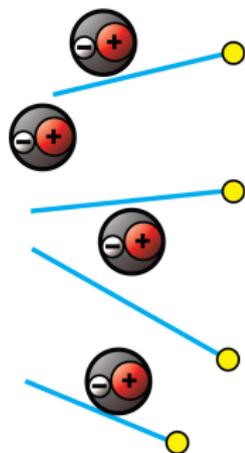
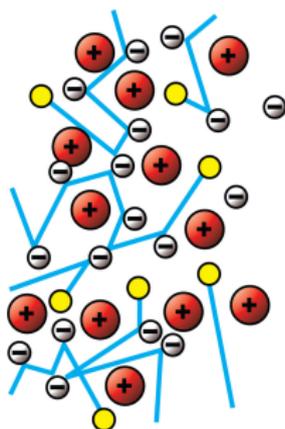
Soupe primordiale chaude et opaque

- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » **opaque** et **naissance des premiers atomes** (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement → soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (**vitesse de la lumière finie**) → « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) → univers observable sphérique et fini



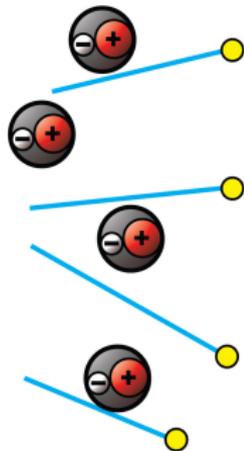
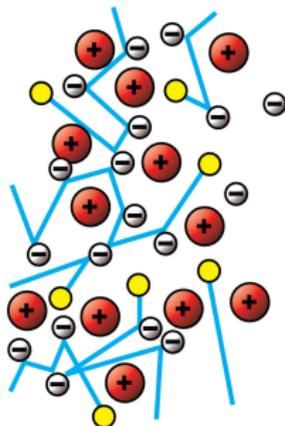
Soupe primordiale chaude et opaque

- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » **opaque** et **naissance des premiers atomes** (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement → soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) → « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) → univers observable sphérique et fini



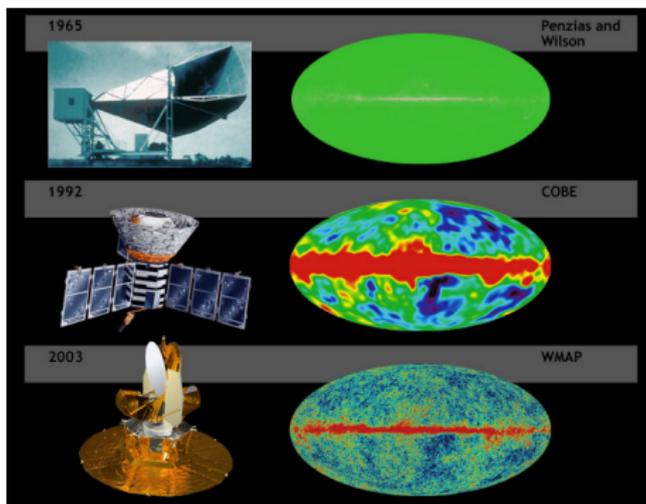
Soupe primordiale chaude et opaque

- ▶ **1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » **opaque** et **naissance des premiers atomes** (calculs de physique nucléaire)
- ▶ expansion → refroidissement → soupe opaque avant la « recombinaison »
- ▶ regarder loin = voir le passé (vitesse de la lumière finie) → « frontière » au-delà de laquelle on ne voit plus (moment de la transparence) → univers observable sphérique et fini



Observation de l'univers primordial

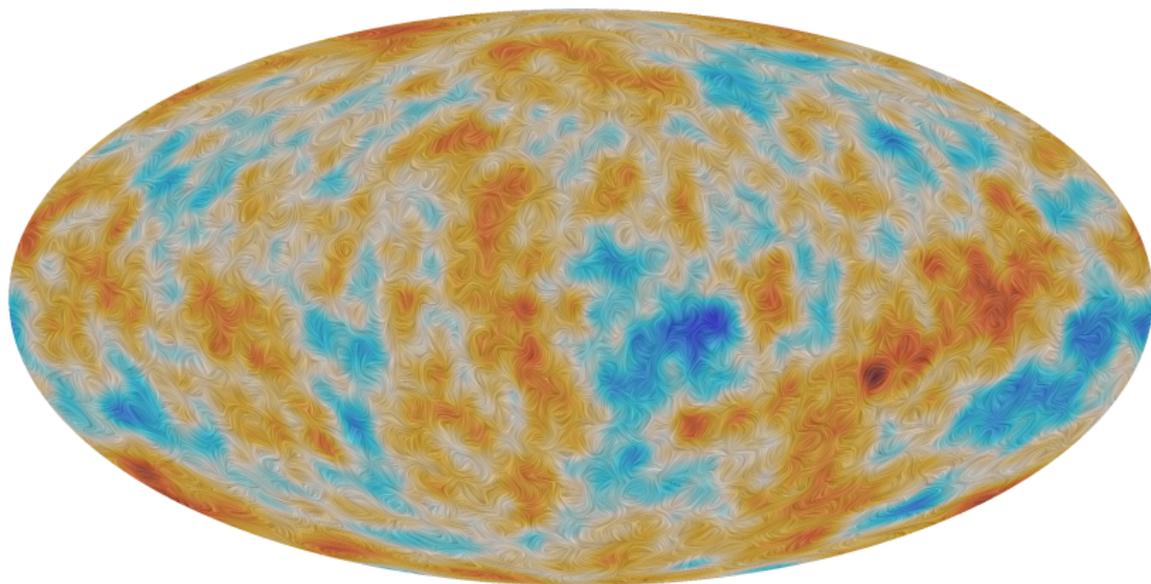
lumière émise à la recombinaison : **rayonnement de fond cosmologique**
(CMB, cosmic microwave background)



1964, Penzias et Wilson : observation faite par hasard d'un **rayonnement de fond micro-onde homogène** → relique du **passé dense et chaud de l'Univers**
Depuis : observation par divers satellites

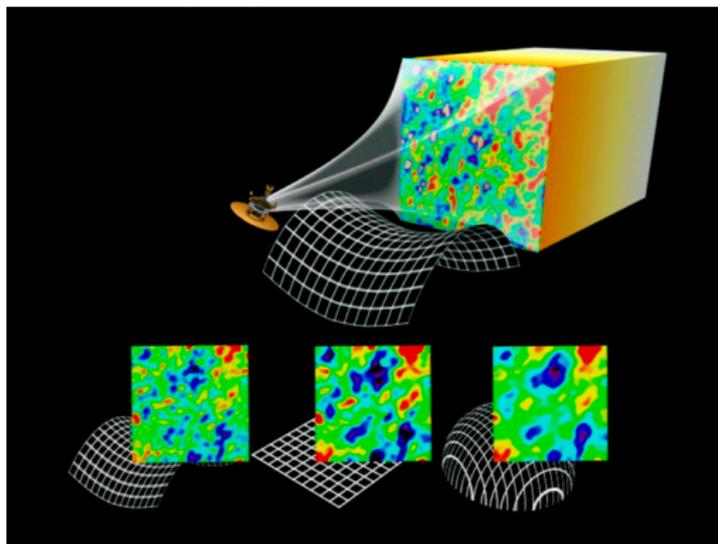
Analyse fine du rayonnement de fond

résultats de Planck publiés en 2013-2015



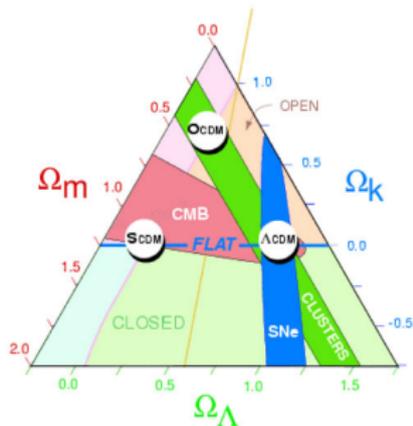
Mesure de la géométrie de l'Univers

Univers courbe \rightarrow rayons lumineux et géométrie influencés



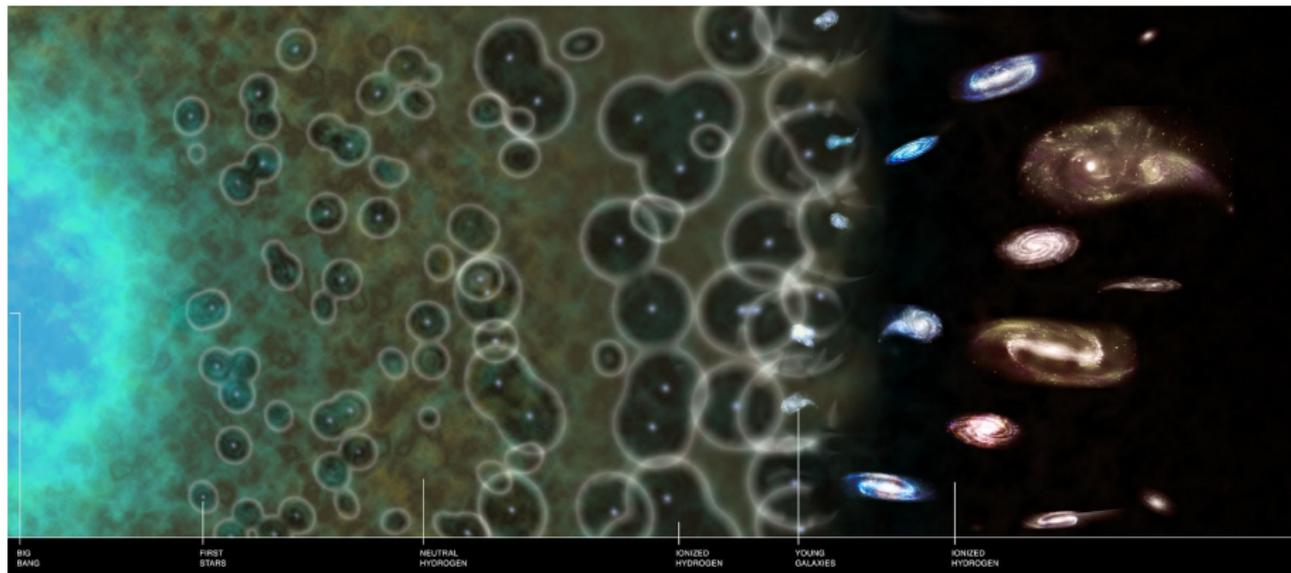
4

Statut actuel et modèle de concordance



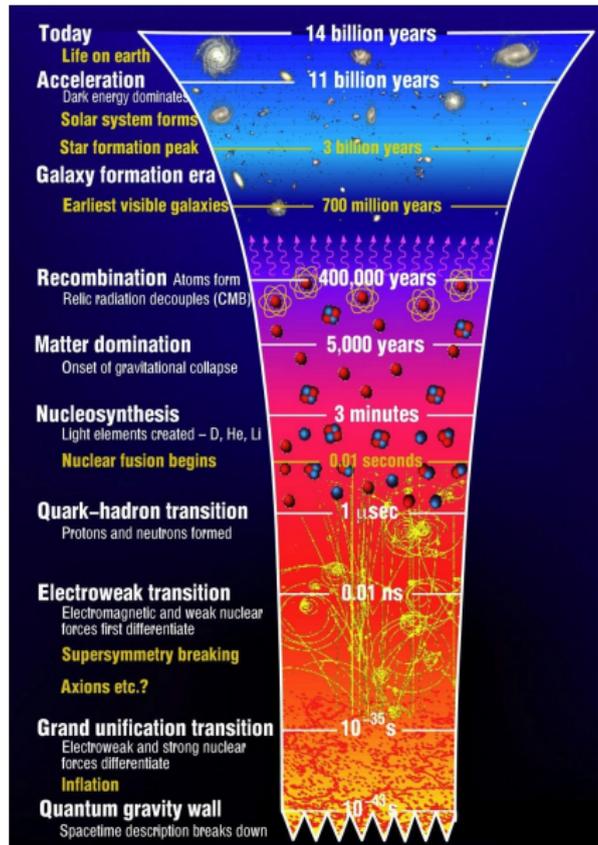
Un univers en évolution

- ▶ l'Univers a une **histoire**, il évolue
- ▶ la **matière** telle qu'on la connaît existe depuis environ **13,7 milliards d'années** (3 générations d'étoiles ?)



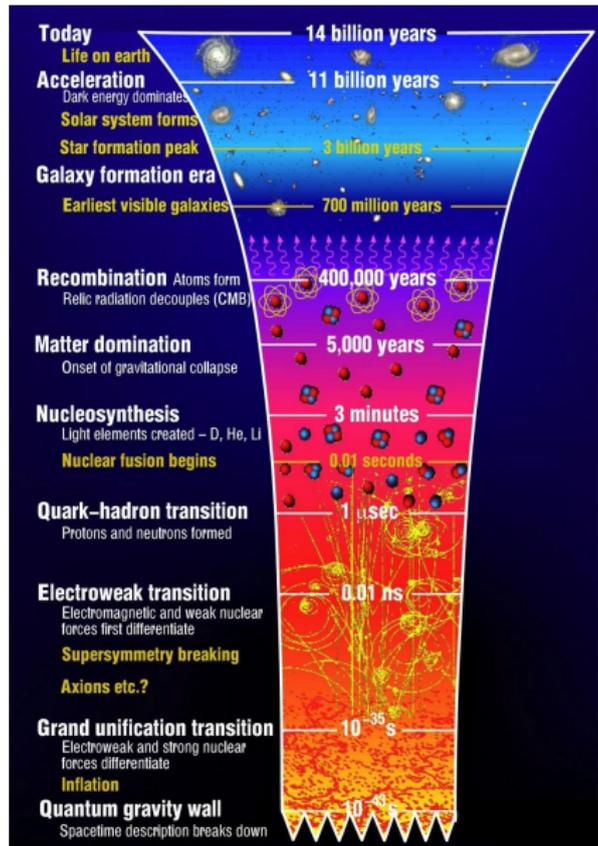
Composition de la soupe

- ▶ varie selon la **température** (cf. fusion de la glace, etc.) et donc le temps
- ▶ relativité → **énergie change de formes** ($E = mc^2$)
- ▶ à une certaine époque, **même la lumière n'existait pas !**



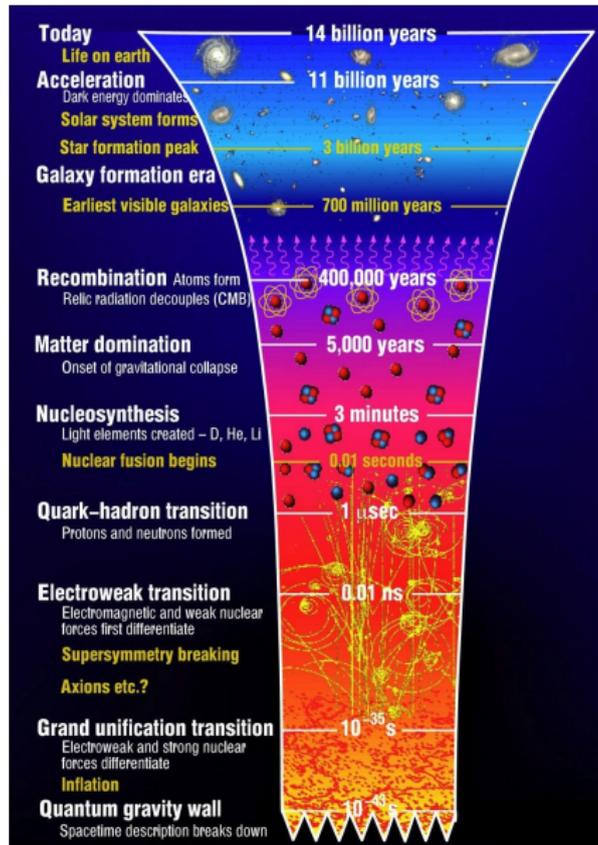
Composition de la soupe

- ▶ varie selon la **température** (cf. fusion de la glace, etc.) et donc le temps
- ▶ relativité → **énergie change de formes** ($E = mc^2$)
- ▶ à une certaine époque, **même la lumière n'existait pas !**



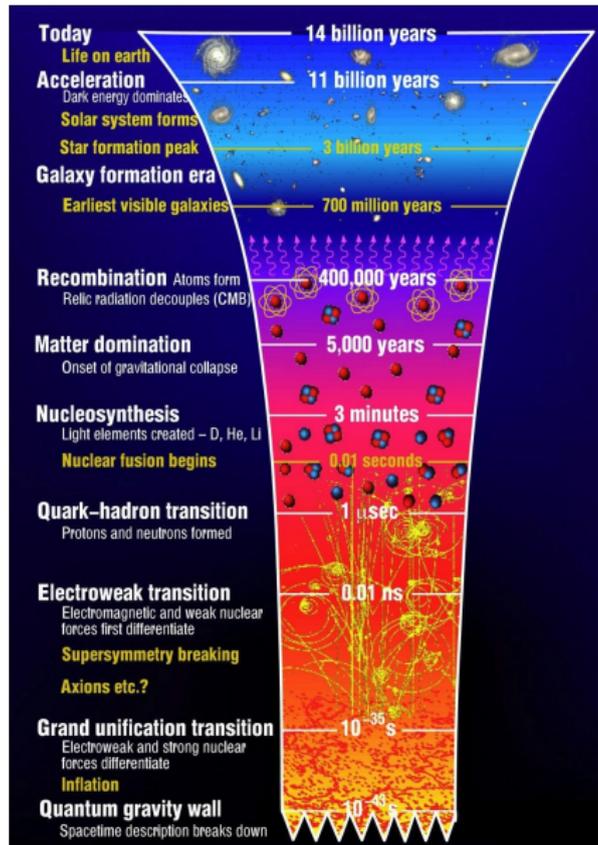
Composition de la soupe

- ▶ varie selon la **température** (cf. fusion de la glace, etc.) et donc le temps
- ▶ relativité → **énergie change de formes** ($E = mc^2$)
- ▶ à une certaine époque, **même la lumière n'existait pas!**



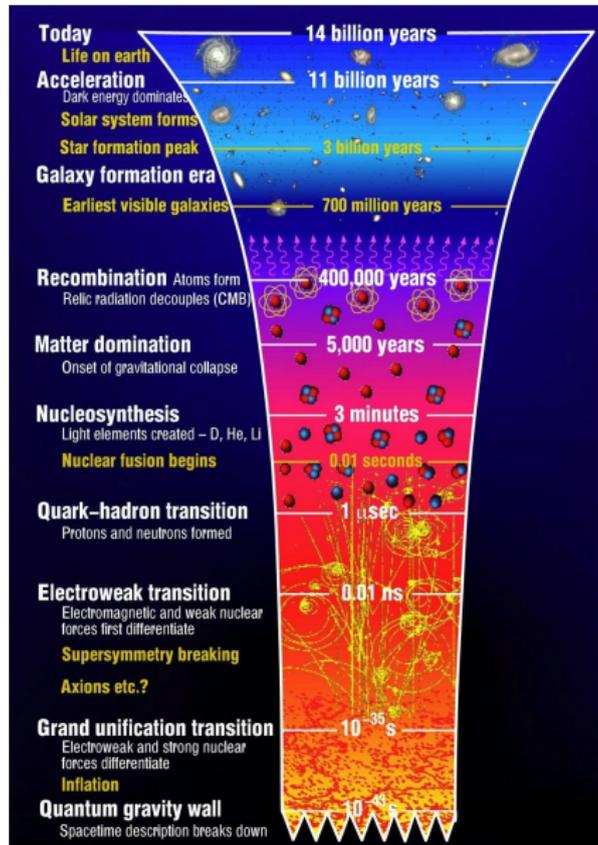
Composition de la soupe

- ▶ varie selon la **température** (cf. fusion de la glace, etc.) et donc le temps
- ▶ relativité → **énergie change de formes** ($E = mc^2$)
- ▶ à une certaine époque, même la lumière n'existait pas !



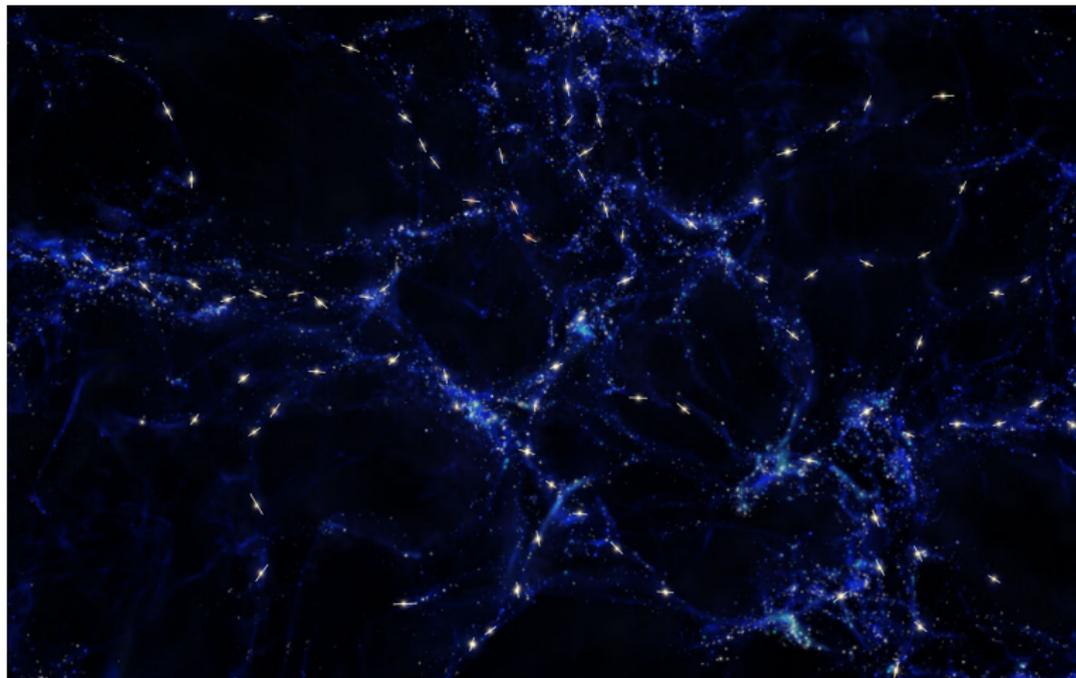
Composition de la soupe

- ▶ varie selon la **température** (cf. fusion de la glace, etc.) et donc le temps
- ▶ relativité → **énergie change de formes** ($E = mc^2$)
- ▶ à une certaine époque, **même la lumière n'existait pas!**



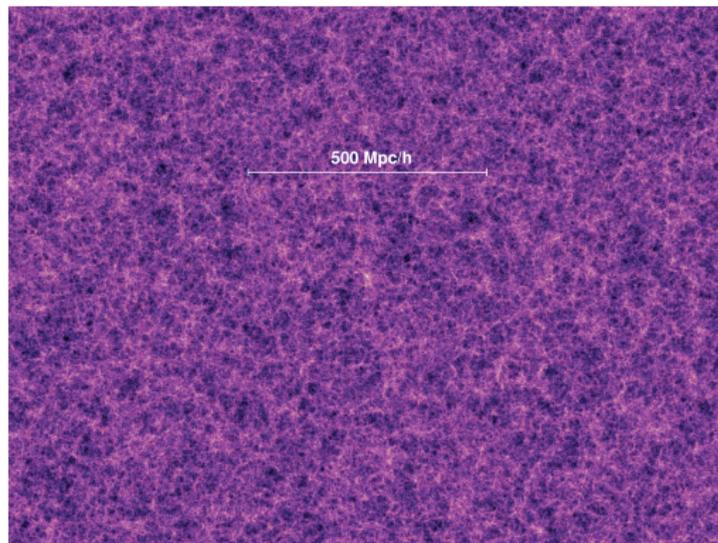
Du plus petit au plus grand...

répartition des « grandes structures » (amas de galaxies, etc.) : résultat des bouillonnements de la soupe primordiale (visibles dans le rayonnement de fond)



Observations et principe cosmologique

aux grandes échelles Univers (observable) plat, homogène et isotrope



Masse sombre (invisible)

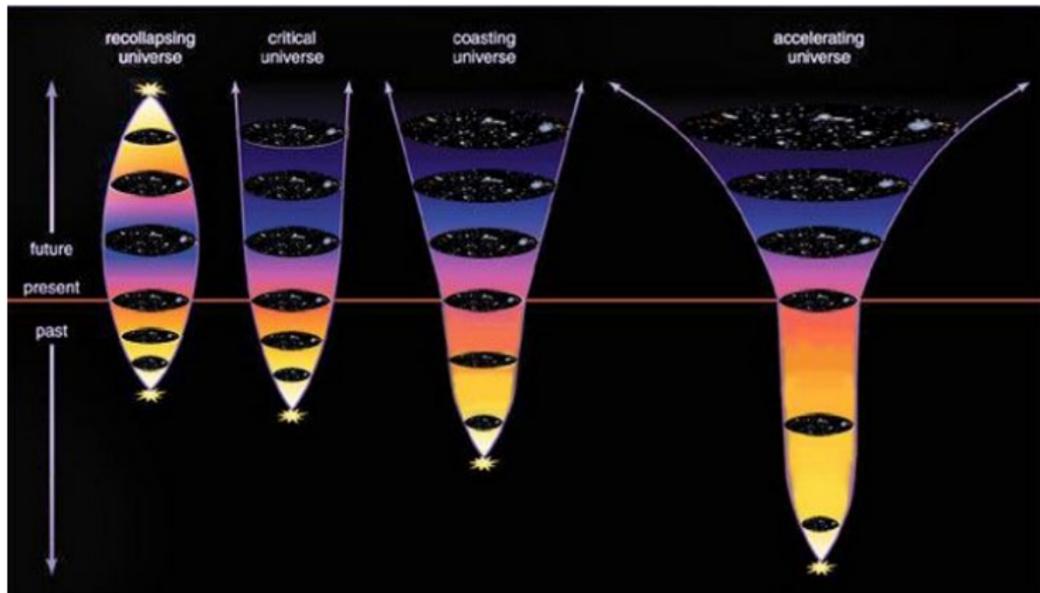
galaxies semblent contenir **plus de masse que ce que l'on voit**
→ **mirages gravitationnels** ; **Interprétation** : il existe de la **matière noire**



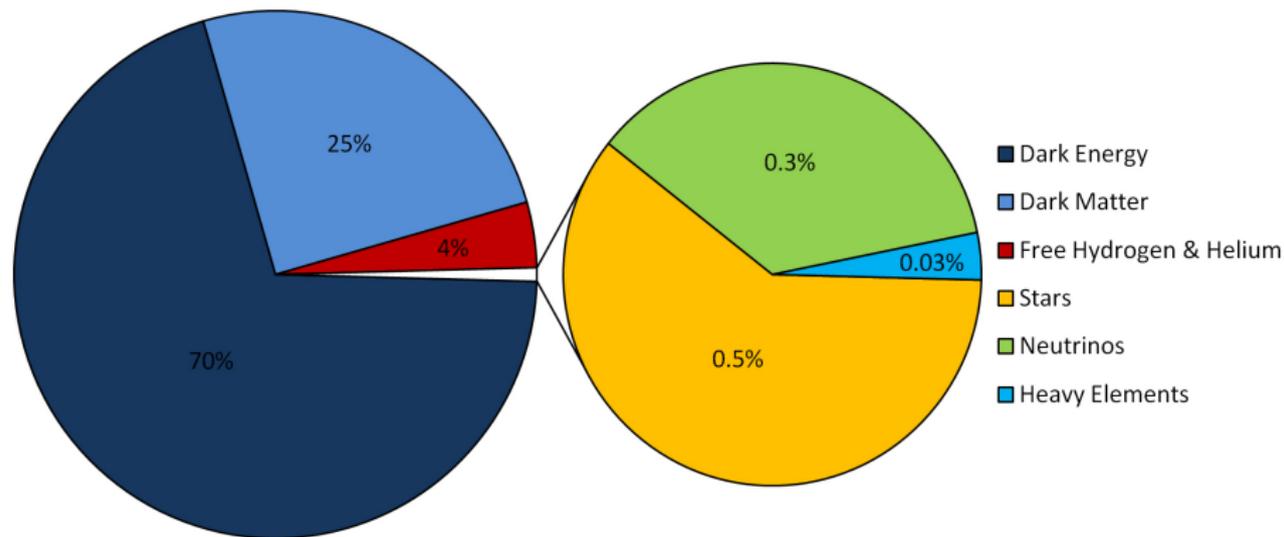
Accélération de l'expansion et énergie sombre

1999 : expansion de l'Univers accélérée (Nobel 2011)

→ à cause d'une « énergie noire » ou constante cosmologique ?

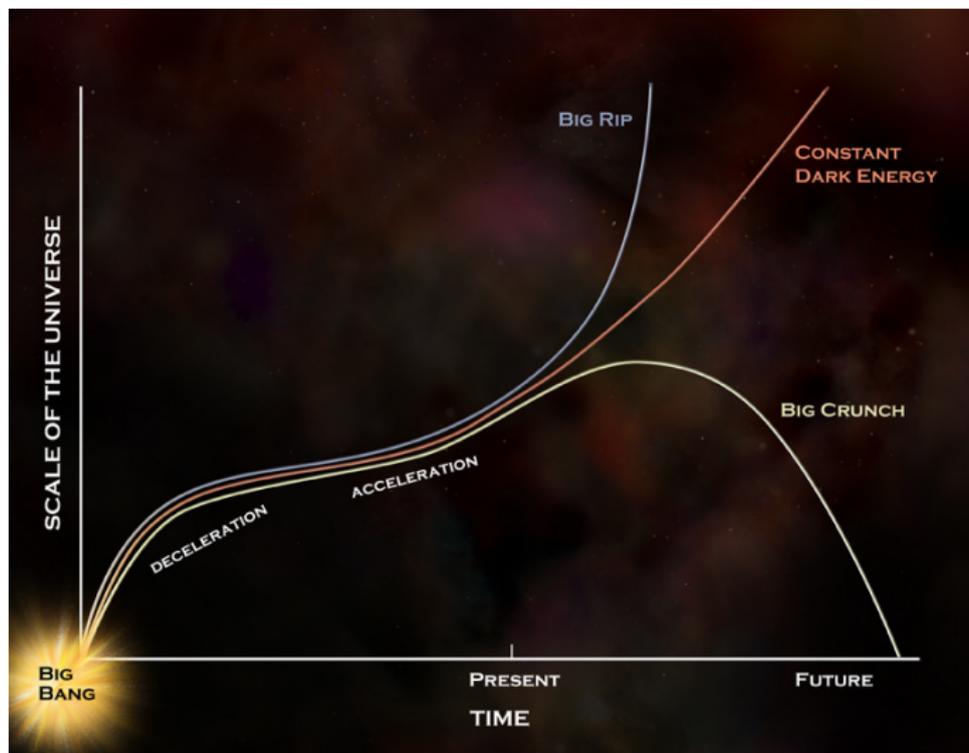


Bilan du contenu de l'Univers selon la cosmologie moderne



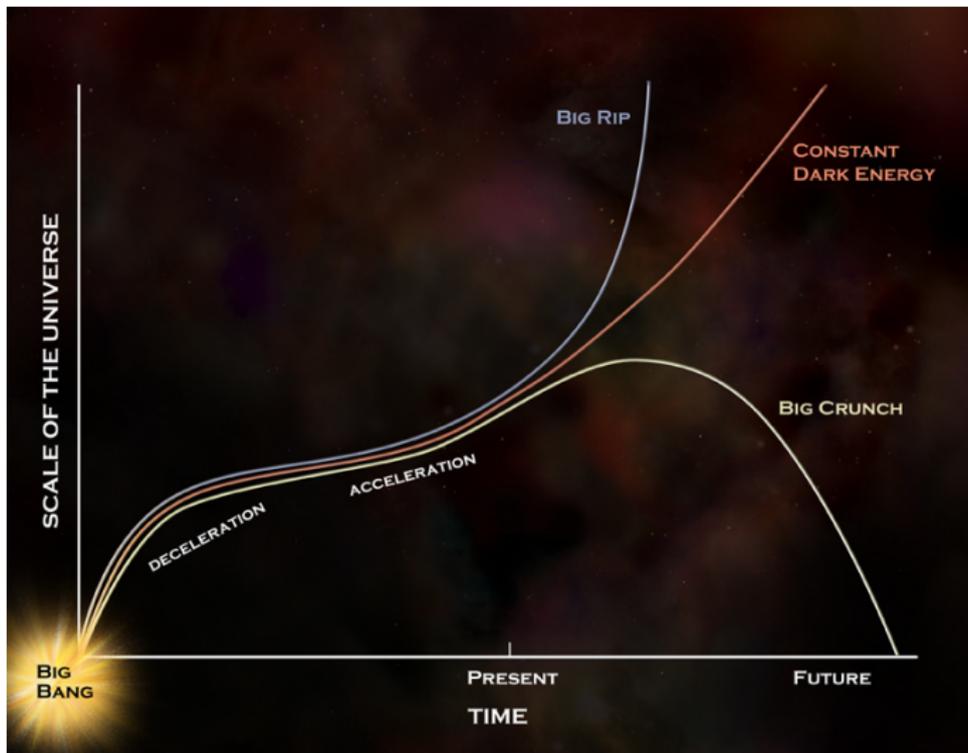
Destin incertain : fin du temps et de tout ?

- ▶ expansion indéfinie (?)
- ▶ Big Crunch (?)



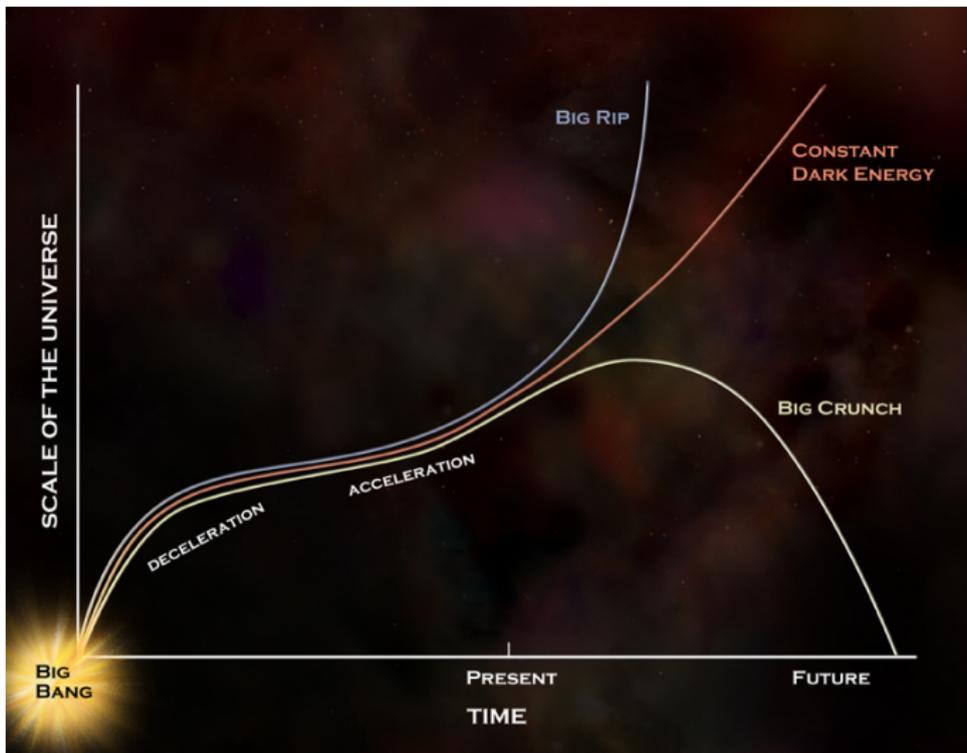
Destin incertain : fin du temps et de tout ?

- ▶ expansion indéfinie (?)
- ▶ Big Crunch (?)



Destin incertain : fin du temps et de tout ?

- ▶ expansion indéfinie (?)
- ▶ Big Crunch (?)



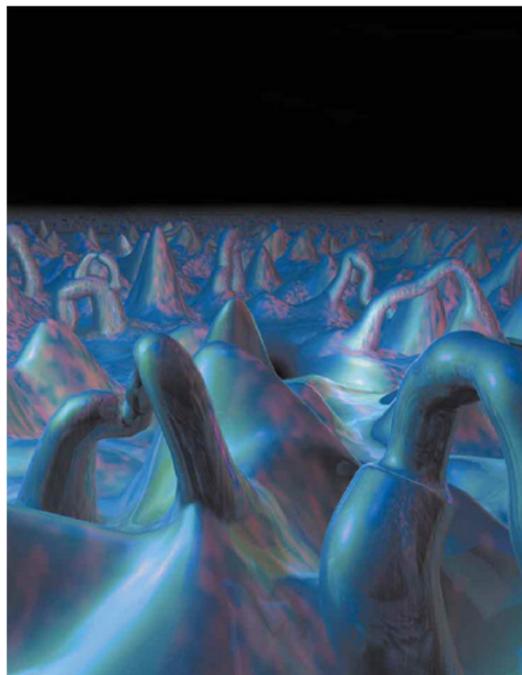
Messages de la physique quantique relativiste

- ▶ petites échelles ou temps reculés : monde **indéterministe**, tout n'est **pas** « local » (non-séparabilité)
- ▶ **espace-temps dynamique** : doit être décrit en « termes quantiques »
→ problème de la « **gravitation quantique** »
- ▶ **mesures de distances, de durées probabilistes**
→ notion d'espace-temps obsolète et émergente ?
- ▶ **unification** des notions de matière et d'espace-temps
→ **théorie des cordes** ou autre ?



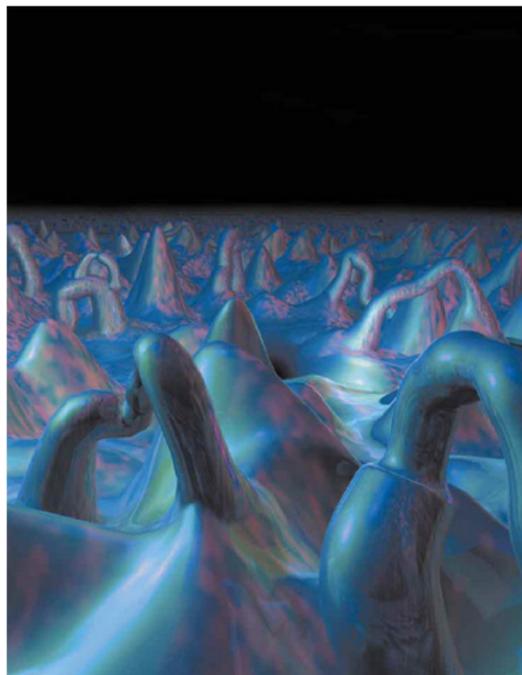
Messages de la physique quantique relativiste

- ▶ petites échelles ou temps reculés : monde **indéterministe**, tout n'est **pas** « local » (non-séparabilité)
- ▶ **espace-temps dynamique** : doit être décrit en « termes quantiques »
→ problème de la « **gravitation quantique** »
- ▶ **mesures de distances, de durées probabilistes**
→ notion d'espace-temps obsolète et émergente ?
- ▶ **unification** des notions de matière et d'espace-temps
→ **théorie des cordes** ou autre ?



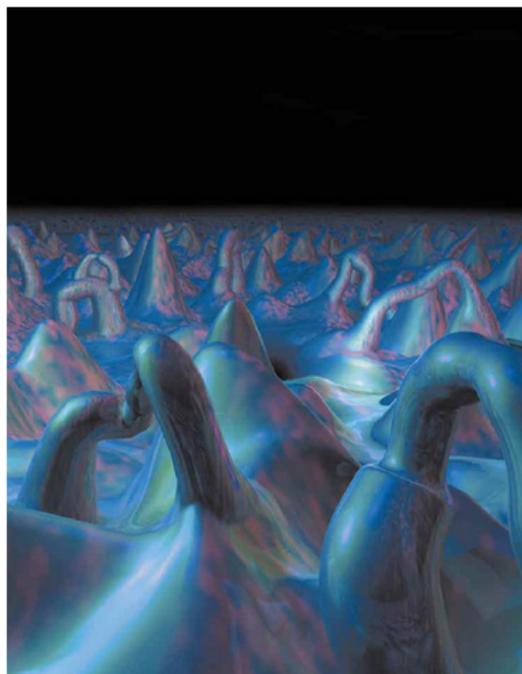
Messages de la physique quantique relativiste

- ▶ petites échelles ou temps reculés : monde indéterministe, tout n'est pas « local » (non-séparabilité)
- ▶ espace-temps dynamique : doit être décrit en « termes quantiques »
→ problème de la « gravitation quantique »
- ▶ mesures de distances, de durées probabilistes
→ notion d'espace-temps obsolète et émergente ?
- ▶ unification des notions de matière et d'espace-temps
→ théorie des cordes ou autre ?



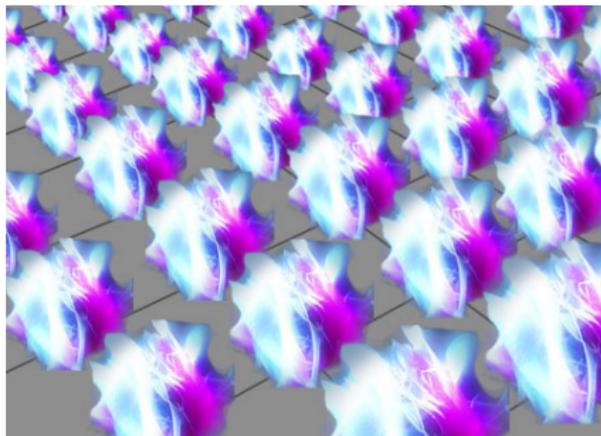
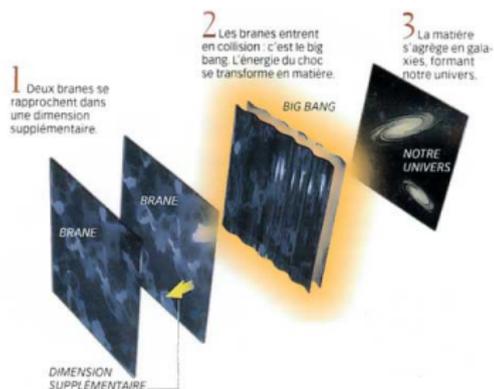
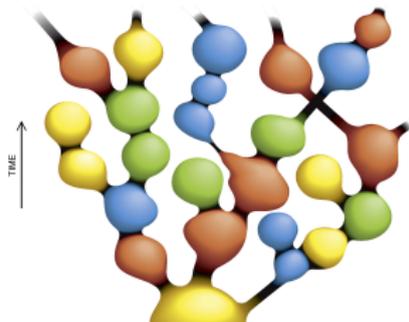
Messages de la physique quantique relativiste

- ▶ petites échelles ou temps reculés : monde indéterministe, tout n'est pas « local » (non-séparabilité)
- ▶ espace-temps dynamique : doit être décrit en « termes quantiques »
→ problème de la « gravitation quantique »
- ▶ mesures de distances, de durées probabilistes
→ notion d'espace-temps obsolète et émergente ?
- ▶ unification des notions de matière et d'espace-temps
→ théorie des cordes ou autre ?



Spéculations

- ▶ univers observable = bulle locale dans un multivers ?
- ▶ dimensions supplémentaires et univers parallèles ?
- ▶ « avant » le Big Bang ?



Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?
pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...
- ▶ **création** : de quoi ? comment ?
 $E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »
- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?
pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**
- ▶ quand ?
espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »
- ▶ pourquoi ?
la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?

pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...

- ▶ **création** : de quoi ? comment ?

$E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »

- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?

pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**

- ▶ quand ?

espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »

- ▶ pourquoi ?

la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?
pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...
- ▶ **création** : de quoi ? comment ?
 $E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »
- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?
pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**
- ▶ quand ?
espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »
- ▶ pourquoi ?
la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Résumé et épilogue : quelques réponses...

- ▶ **expansion** : depuis où ? dans quoi ?
pas de centre (**Univers homogène et isotrope**), pas de contenant...
- ▶ **création** : de quoi ? comment ?
 $E = mc^2$, **équivalence masse énergie** : contenu dynamique et fluctuant quand l'univers était très dense et chaud (« bouillonnant ») → noyaux hydrogène et hélium nés pendant les « trois premières minutes »
- ▶ **explosion** : de quoi ? où ?
pas une explosion, pas de centre : la matière « normale » naît **partout**
- ▶ quand ?
espace-temps dynamique et bouillonnant → pas de notion usuelle de temps universel ou de temps tout court → « gravité quantique »
- ▶ pourquoi ?
la physique fait des **modèles mathématiques** qu'elle confronte aux **expériences**...

Le plus incompréhensible, c'est que l'Univers soit compréhensible... (A. Einstein ?)

Quelques références

Livres :

- [Cohen-Tannoudji & Spiro](#), *Particules élémentaires et cosmologie*
- [Damour & Burniat](#), *Le mystère du monde quantique* (BD)
- [Damour](#), *Si Einstein m'était conté*
- [Eisenstaedt](#), *Einstein et la relativité générale*
- [Feynman](#), *Lumière et matière, une étrange histoire*
- [Greene](#), *L'Univers élégant*
- [Luminet](#), *Le destin de l'univers : Trous noirs et énergie sombre*
- [Singh](#), *Le roman du Big Bang*
- [Stannard & Gamow](#), *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*

Sites web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier relativité restreinte
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier relativité générale