

# Un aperçu de l'Univers et de ses histoires physico-mathématiques

Loïc Villain

Laboratoire de Mathématiques et Physique Théorique, Université de Tours  
loic@lmpt.univ-tours.fr  
(<http://www.lmpt.univ-tours.fr/~loic/PDF/galois13.pdf>)

Centre Galois

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier**
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier**
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier**
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Physique et cartographie du monde

- ▶ **Physique** : tentative de **compréhension du monde** (du plus proche au plus lointain, du plus gros au plus petit) et des **lois** qui le gouvernent
- ▶ construction de **modèles/cartes** et **confrontation avec le réel**
- ▶ **trouver le simple et universel derrière le complexe et particulier**
- ▶ **Galilée (1564–1642)** : *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.*
- ▶ **Koestler (1905–1983)** : *C'est une erreur flagrante que d'assimiler la science à la raison pure et à la logique, comme l'art à l'intuition et à l'émotion. Nulle découverte n'a jamais été faite par déduction logique, aucune oeuvre d'art sans calcul, ni métier ; dans l'une comme dans l'autre interviennent les jeux émotifs de l'inconscient. (« Le cri d'Archimède »).*

# Cosmologie et son histoire

- ▶ **cosmologie** : étude de l'objet « Univers »
- ▶ ici : aperçu **historique et conceptuel**
- ▶ **Richard Feynman, Nobel de physique 1965** « *ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment!* » (« *Lumière et matière, une étrange histoire* »)  
→ brève histoire **approximative** de la conception de l'Univers et de sa **modélisation**

# Cosmologie et son histoire

- ▶ **cosmologie** : étude de l'objet « Univers »
- ▶ ici : aperçu **historique et conceptuel**
- ▶ **Richard Feynman, Nobel de physique 1965** « *ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment!* » (« *Lumière et matière, une étrange histoire* »)  
→ brève histoire **approximative** de la conception de l'Univers et de sa **modélisation**

# Cosmologie et son histoire

- ▶ **cosmologie** : étude de l'objet « Univers »
- ▶ ici : aperçu **historique et conceptuel**
- ▶ **Richard Feynman, Nobel de physique 1965** « *ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment!* » (« *Lumière et matière, une étrange histoire* »)

→ brève histoire **approximative** de la conception de l'Univers et de sa **modélisation**

# Cosmologie et son histoire

- ▶ **cosmologie** : étude de l'objet « Univers »
- ▶ ici : aperçu **historique et conceptuel**
- ▶ **Richard Feynman, Nobel de physique 1965** « *ce que je vous raconte là, c'est une espèce de saga conventionnelle que les physiciens racontent à leurs étudiants, lesquels à leur tour la racontent à leurs étudiants, et ainsi de suite. Ça n'a pas forcément grand-chose à voir avec le développement historique réel de la physique... que j'ignore évidemment!* » (« *Lumière et matière, une étrange histoire* »)  
→ brève histoire **approximative** de la conception de l'Univers et de sa **modélisation**

# Un survol de nos connaissances actuelles

les échelles de l'Univers

# Plan

Cosmologie antique et d'ailleurs

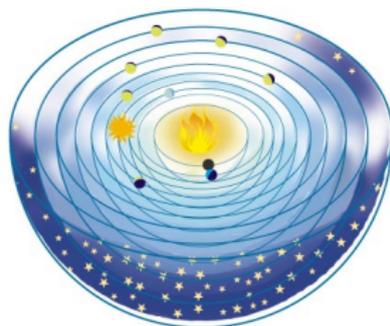
Physique classique et univers infini

Cosmologie relativiste

Résumé et épilogue

# 1

## Cosmologie antique et d'ailleurs



# Mythe et sciences

## Cosmologie mythique

- ▶ nature du monde : question au moins aussi ancienne que l'être humain
- ▶ réponse **mythologique** : **pas de remise en cause** ou de questionnement autorisés
- ▶ très **grande variété d'opinions** tant sur la nature du monde que son éventuelle création



modèles « pré-scientifiques » (géométriques, etc.), ou pas, mais avant tout **observation, classification** → **pas de véritable quête de compréhension**

## Grèce Antique (à partir d'environ -600)

### Liberté de pensée et diversité des modèles

- ▶ tentative d'explication **sans recours au surnaturel** (théorie des 5 éléments, etc.) mais à la **logique**
- ▶ nature **mathématique** (pythagoriciens et gammes, etc.)
- ▶ recherche d'un « **principe naturel unique** »

### Pré-socratiques

- ▶ nombreux philosophes, **sujets très variés** : géométrie, astronomie, biologie, philosophie, etc.
- ▶ points de vue très différents sur de nombreux sujets, mais **peu de connaissance directe de leurs travaux** (fragments, citations par autres, etc.)



# Géométrie et échelles de distance

- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : Terre sphérique

# Géométrie et échelles de distance

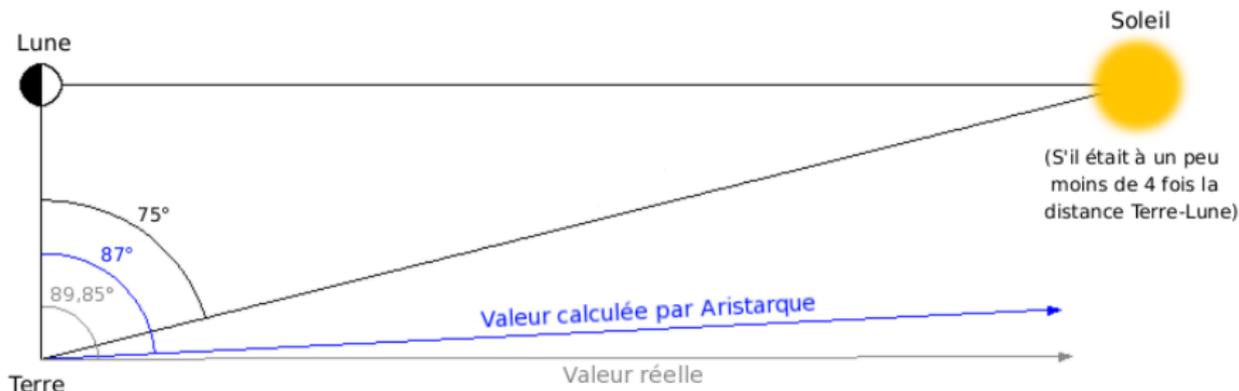
- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique**  
(voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)

## Géométrie et échelles de distance

- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique** (voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)
- ▶ **Aristarque de Samos** (−310/ − 230) : **Lune 3 fois plus petite que Terre** (et distance relative); tentative **distance Terre-Soleil**

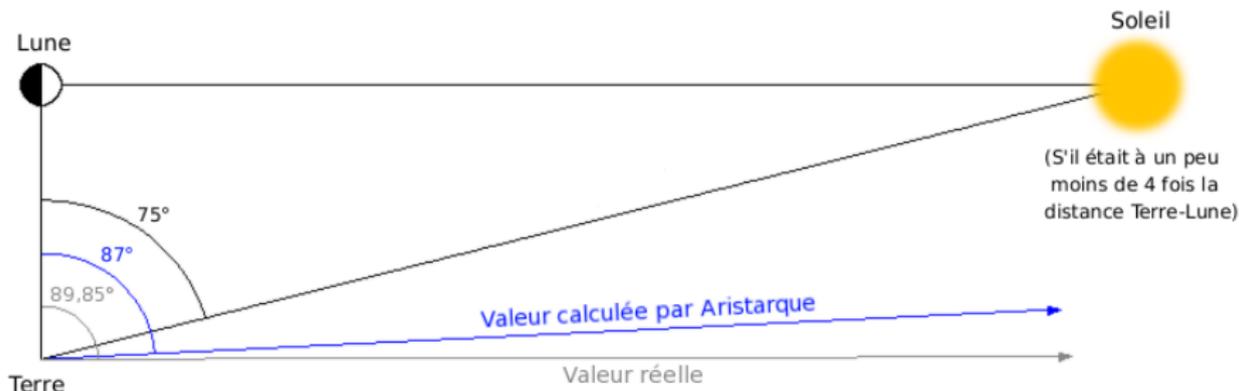
# Géométrie et échelles de distance

- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique** (voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)
- ▶ **Aristarque de Samos** (−310/ − 230) : **Lune 3 fois plus petite que Terre** (et distance relative); tentative **distance Terre-Soleil**



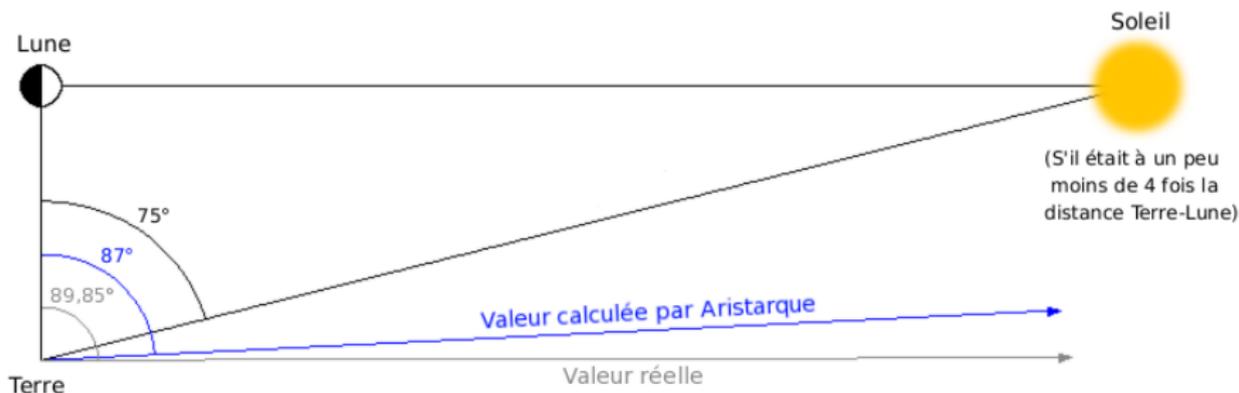
# Géométrie et échelles de distance

- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique** (voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)
- ▶ **Aristarque de Samos** (−310/ − 230) : **Lune 3 fois plus petite que Terre** (et distance relative); tentative **distance Terre-Soleil**
- ▶ **Ératosthène** (−276/ − 194) : **diamètre approximatif de la Terre**



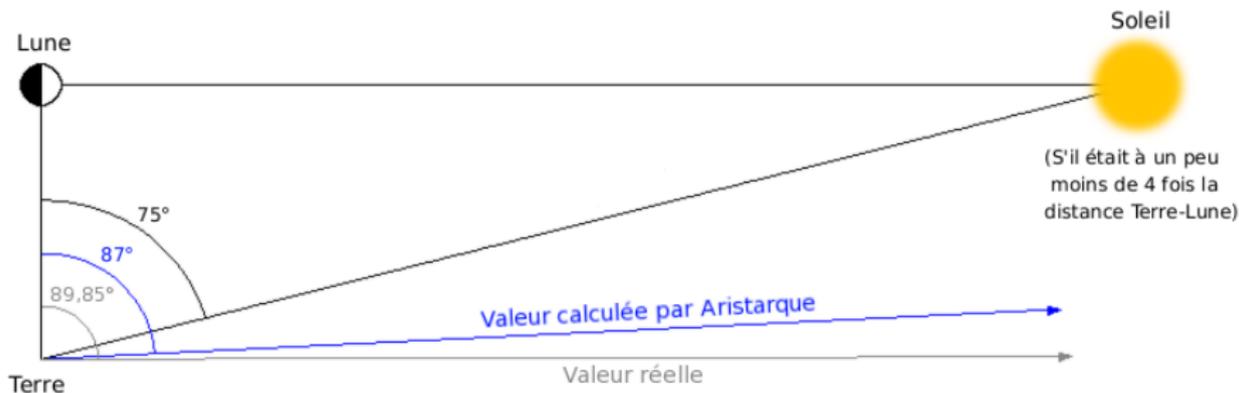
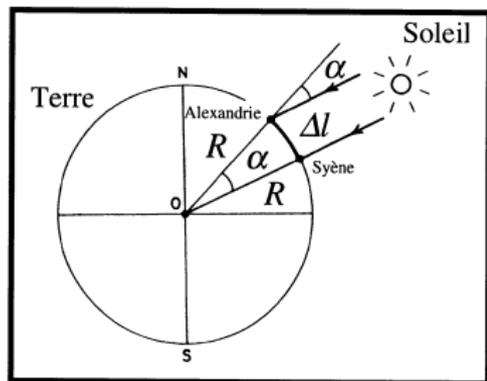
# Géométrie et échelles de distance

- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique** (voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)
- ▶ **Aristarque de Samos** (−310/ − 230) : **Lune 3 fois plus petite que Terre** (et distance relative); tentative **distance Terre-Soleil**
- ▶ **Ératosthène** (−276/ − 194) : **diamètre approximatif de la Terre** par ombre et puits



# Géométrie et échelles de distance

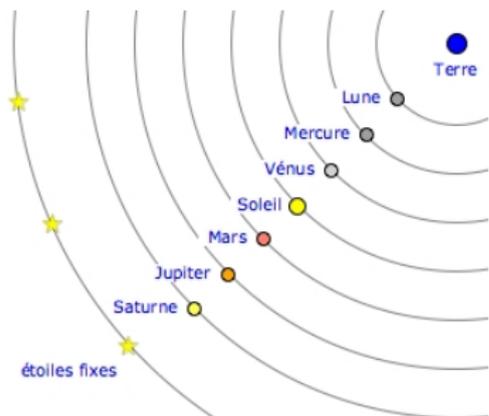
- ▶ **Pythagore** (−580/ − 495) : **Terre sphérique** (voile à l'horizon, analogie avec Lune, etc.)
- ▶ **Aristarque de Samos** (−310/ − 230) : **Lune 3 fois plus petite que Terre** (et distance relative); tentative **distance Terre-Soleil**
- ▶ **Ératosthène** (−276/ − 194) : **diamètre approximatif de la Terre** par ombre et puits



# Aristote (-384/ - 322) et la cosmologie

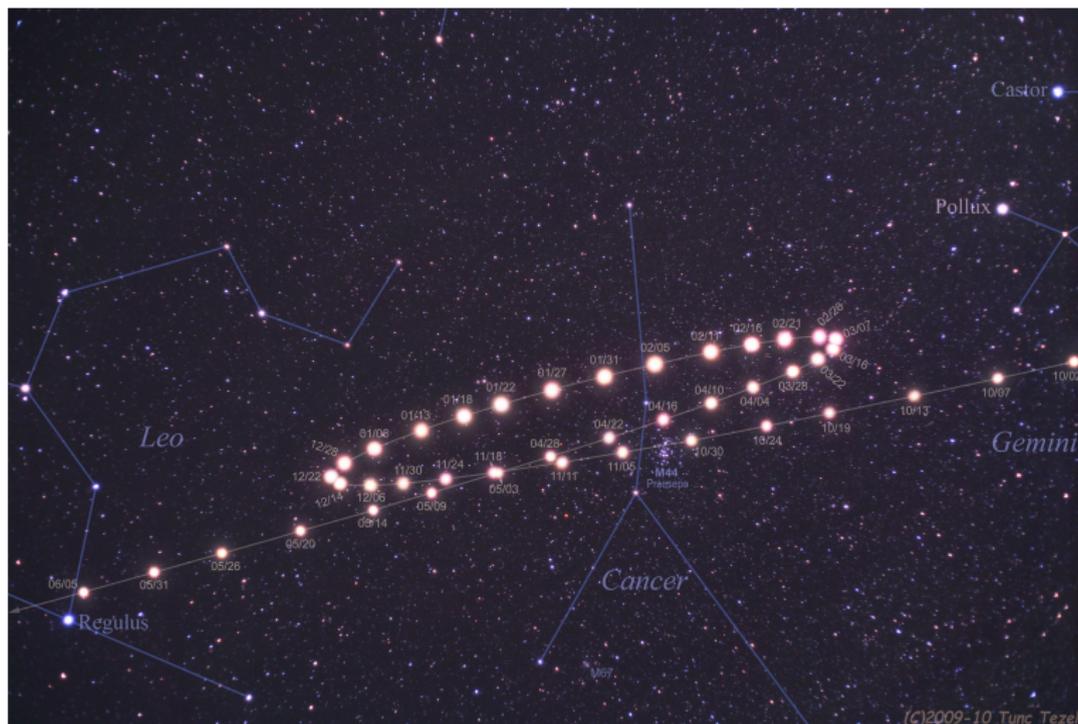
## Changement et immuabilité : mondes céleste et terrestre

- ▶ observation du monde : **opposition ciel/Terre**  
→ monde terrestre éphémère, monde céleste éternel
- ▶ idées d'une **perfection/intemporalité céleste** et d'une **imperfection/temporalité sub-lunaire**
- ▶ **sphère céleste** et sphères des « planètes » → **modèle géocentrique du Cosmos**
- ▶ premier pas vers une **mathématisation**



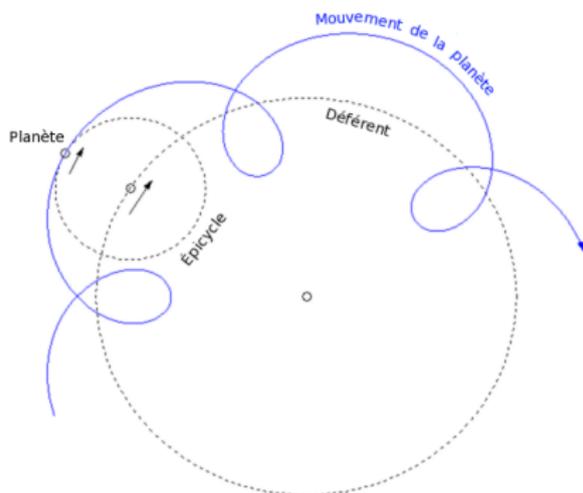
- ▶ orbites circulaires car **cercle ≡ perfection**
- ▶ **sphère des étoiles fixes** déjà imaginée par pré-socratiques

# Mouvements rétrogrades et fissures dans la cosmologie



- ▶ observation du **changement de direction** des planètes
- ▶ ici : montage avec photos de Mars (~ **une photo par semaine**)

# Cosmologie : système de Ptolémée



- ▶ observations en contradiction avec cercles parcourus à vitesse uniforme  
→ cycles pas tout à fait égaux ?  
→ combinaisons de cercles (épicycles, déférents, etc.)
- ▶ modèle de Ptolémée (90 – 170) admis pendant de nombreux siècles
- ▶ pour Aristote : sphère de cristal ; pour Ptolémée : mouvement dans un « fluide »

→ un même modèle « mathématique » peut correspondre à plusieurs « interprétations physiques »

## 2

# Physique classique et univers infini



## 2

# A : Copernic, Brahé et Kepler : prélude à la physique classique



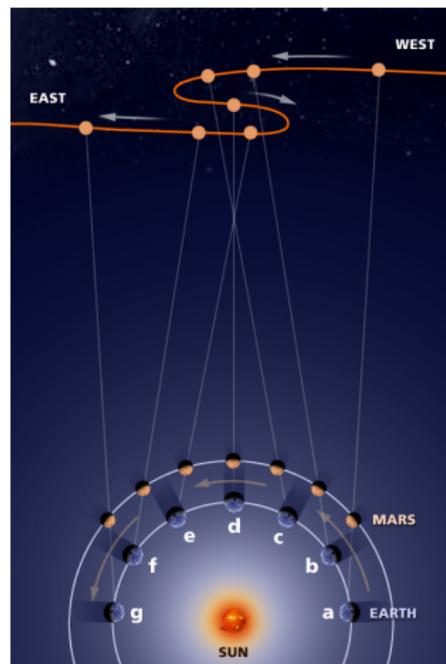
# Système de Copernic (1473/1543)

## *Des révolutions des sphères célestes* (1543)

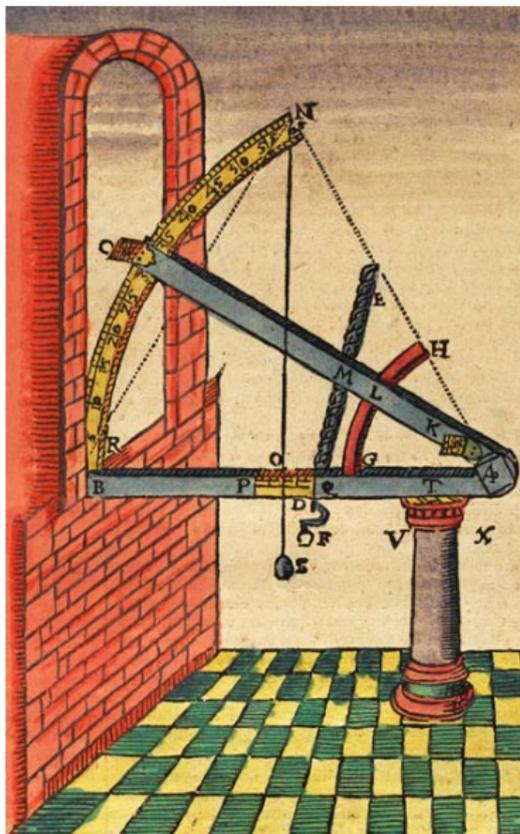
- ▶ ouvrage **posthume**
- ▶ **modèle héliocentrique** de l'Univers :
  - Terre en mouvement !
  - explication simple du **mouvement rétrograde** des planètes.

## Modèle de Copernic :

- ▶ **précision moins bonne que Ptolémée...**
  - ▶ comme Aristote : sphères cristallines...
  - ▶ conserve la « sphère des fixes »
  - ▶ **théorie peu soutenue au départ**
- 
- ▶ **grand vide dans l'histoire** (déclin de l'Occident, obscurantisme, etc.)
  - ▶ Bruno (1548/1600) propose la **pluralité des mondes et un univers infini**
    - **brûlé pour hérésie**



# Tycho Brahé (1546 – 1601)

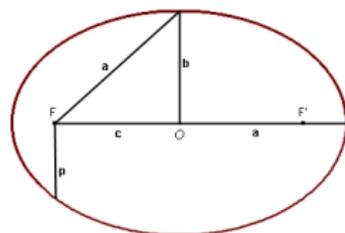


## Observateur remarquable

- ▶ à 17 ans constate erreur dans des tables astronomiques → vocation
- ▶ confection d'instruments de mesure  
→ **précision inégalée** (2 minutes de degré)
- ▶ **1572** : observe une **nouvelle étoile** !  
→ remise en cause de la perfection du Cosmos ?
- ▶ **1577** : comète dont la trajectoire coupait les orbites des planètes...
- ▶ propre système cosmologique : **géohéliocentrique**.
- ▶ peu avant sa mort, prend **Kepler** comme étudiant
- ▶ dans sa jeunesse : nez coupé lors d'un duel (→ prothèse)

# Johannes Kepler (1571/1630)

- ▶ grand mathématicien et calculateur
- ▶ hérite des observations minutieuses de Tycho Brahé (1546/1601)
- ▶ calcule les orbites à partir des données → **ellipses** !
- ▶ énonce **trois lois du mouvement** :
  - orbite **elliptique** avec Soleil en un foyer ;
  - **loi des aires**.

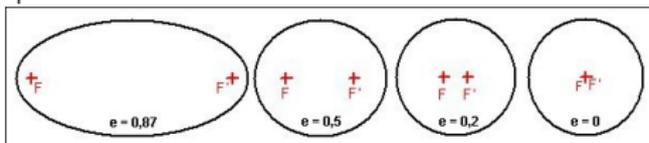


$$c = ea = \sqrt{a^2 - b^2} = \frac{eh^2}{1 - e^2}$$

$$b = a\sqrt{1 - e^2}$$

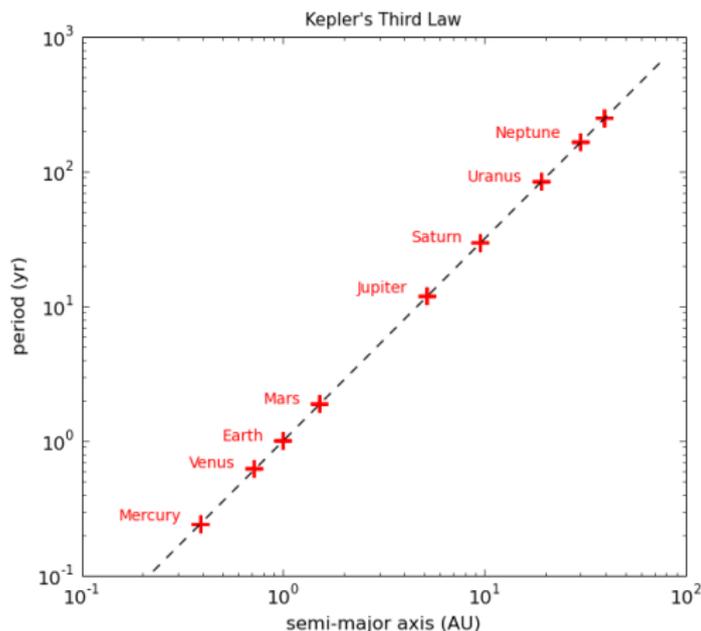
$$a = \frac{eh}{1 - e^2}$$

$$p = b^2/a$$



# Troisième loi de Kepler

- ▶ lien entre période  $T$  et demi-grand axe  $a$  de l'ellipse :  $a^3$  proportionnel à  $T^2$   
exemple : pour Jupiter,  $a \sim 5.2$  UA  $\rightarrow T \sim 11.86$  ans  
(1 Unité Astronomique = distance Terre-Soleil)
- ▶ une constante inexplicée ( $\sim$  la pente de la droite) apparaît



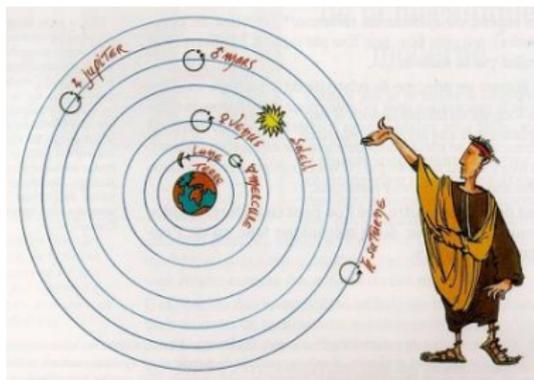
## 2

# B : Galilée vers la science moderne



# Galilée et le Système de Copernic

Fin du XVI<sup>ème</sup> Siècle : deux « systèmes du monde »



Système de **Ptolémée** (**Terre** au centre) et de **Copernic** (**Soleil** au centre)

## Galileo Galilei (1564/1642)

- ▶ surtout connu pour la défense du **Système de Copernic** (procès par l'Église)
- ▶ nombreuses contributions importantes à la science : père de la **physique moderne et de l'astronomie**

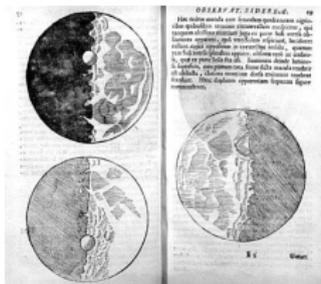
# Galilée et l'astronomie

- ▶ **1604** : supernova de Kepler  
→ événement dans l'Europe entière  
→ mène Galilée à l'**astronomie**  
→ tourne une **lunette** (forains hollandais) vers le ciel



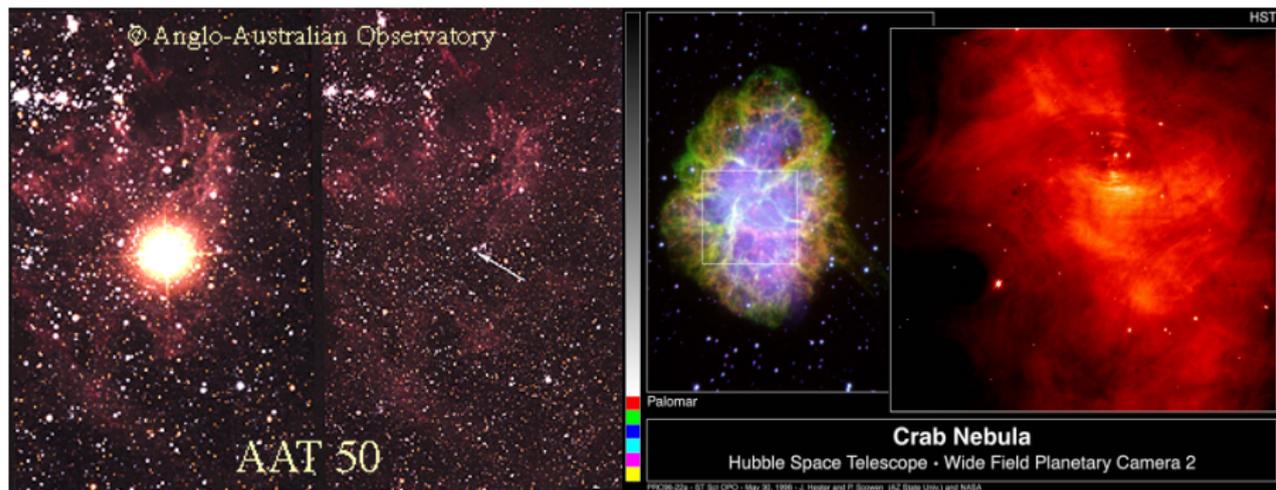
**Lunette de Galilée** : moins performante qu'un télescope amateur actuel de premier prix mais révolutionnaire à son époque !

## Quelques découvertes de Galilée



- ▶ la Lune possède des cratères
- ▶ Jupiter possède des satellites
- ▶ Saturne a des « oreilles » (anneaux)
- ▶ le Soleil a des taches
- ▶ Voie Lactée = étoiles
- ▶ **phases** de Vénus (cf. la Lune)  
→ **prédiction de Copernic** !

# Supernova SN1987a et nébuleuse du crabe



## 2

# C : Newton dynamique et gravitation universelle



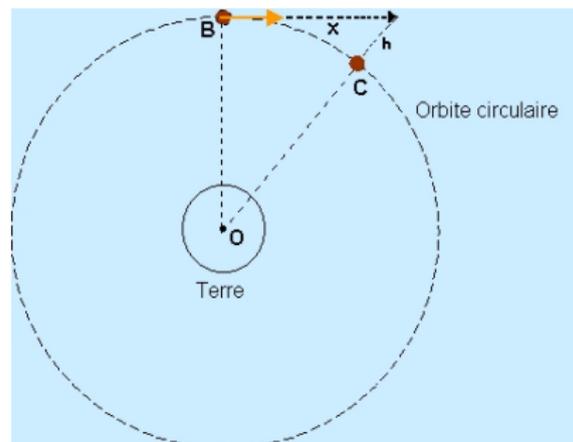
# Dynamique newtonienne et analyse

## Force

- ▶ force implique **changement de la quantité de mouvement** (vitesse si masse constante) :

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt};$$

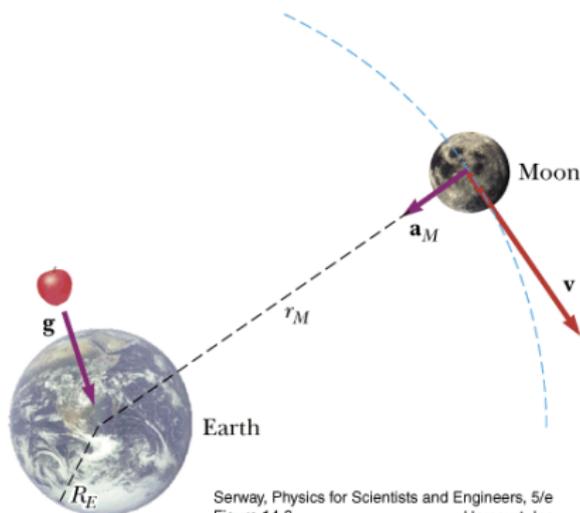
- ▶ invention du **calcul différentiel** (~ étude des **variations** de fonctions)
- ▶ approche initiale géométrique



Newton invente des **outils mathématiques** pour résoudre ses problèmes physiques

# Gravitation universelle de Newton (1643/1727)

- ▶ **Avant Newton** : séparation de nature entre mondes sublunaire et céleste
- ▶ lois de Kepler : description globale du mouvement des planètes
- ▶ **Après Newton** : force gravitationnelle universelle entre masses
- ▶ même action de la Terre sur une pomme ou sur la Lune
- ▶ idée d'un espace euclidien infini



# Conséquences de l'universalité

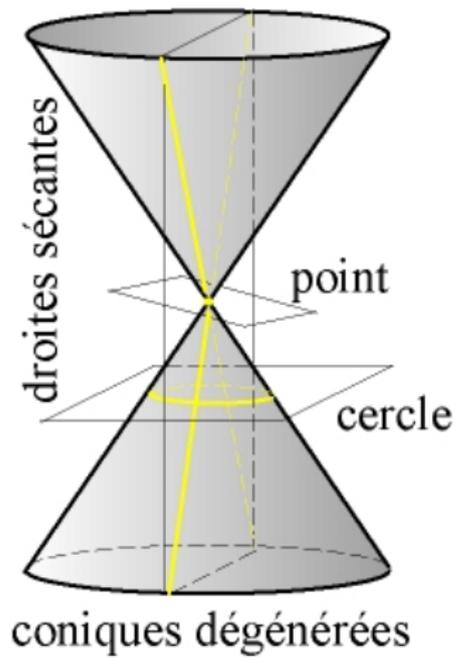
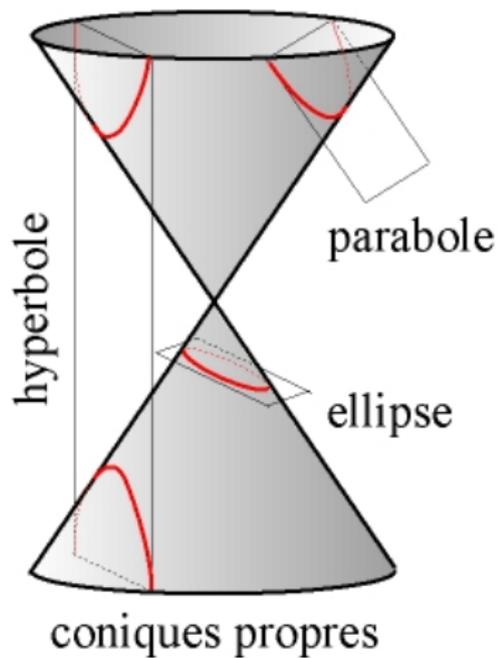
## Gravitation universelle

- ▶ permet la **démonstration de la forme des orbites** (ellipses mais pas seulement : **coniques**);
- ▶ **lois de Kepler prouvées** : la constante est proportionnelle à la **masse du Soleil**;
- ▶ résultat **universel** : les lunes de Jupiter, les exoplanètes, les systèmes binaires d'étoiles obéissent à des lois semblables aux lois de Kepler → **moyen de « peser à distance » un astre.**

## Tests et conséquences de la loi

- ▶ **explications** : **lois de Kepler**, phénomène des marées, forme sphérique des étoiles et planètes, etc.
- ▶ **prédictions** : forme de la Terre, retour prochain d'une comète (Halley), etc.

# Coniques



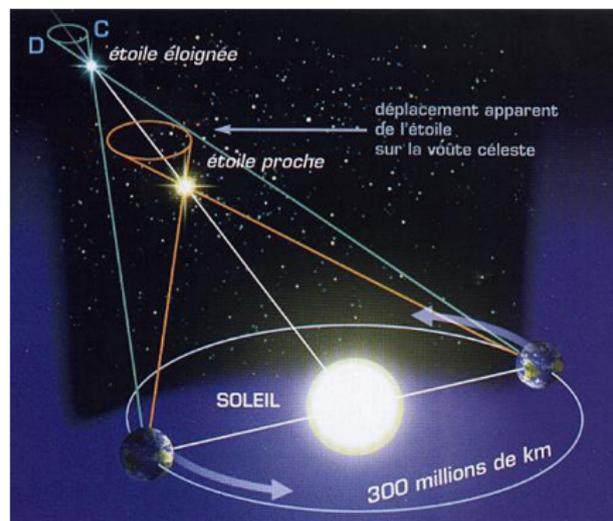
## 2

## D : Un univers infini (?)



# Vers un univers très grand...

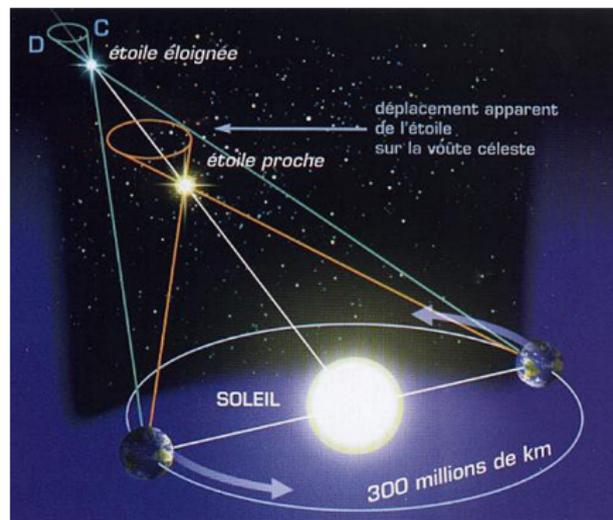
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire  
→ 61 Cygni à 630 000 UA



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** (~ taches informes)?

# Vers un univers très grand...

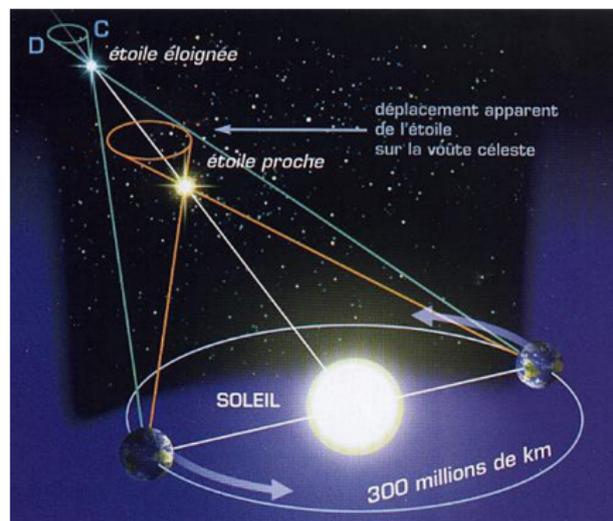
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire  
→ 61 Cygni à 630 000 UA  
(~ 10 années-lumière )



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** (~ taches informes)?

# Vers un univers très grand...

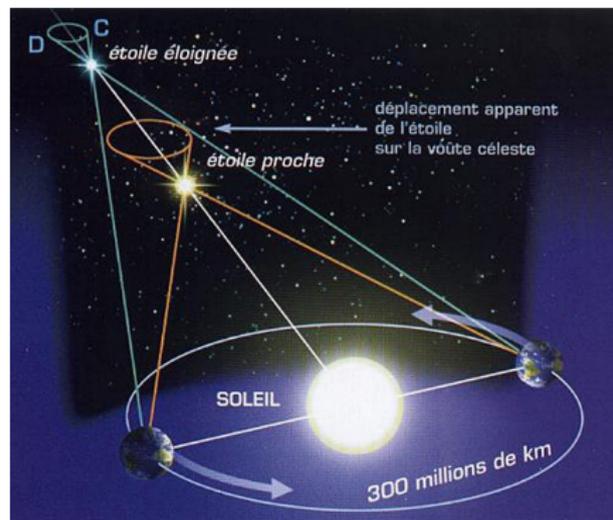
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire  
→ 61 Cygni à 630 000 UA  
( $\sim 10$  années-lumière  $\sim 10^{14}$  km)



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** ( $\sim$  taches informes)?

# Vers un univers très grand...

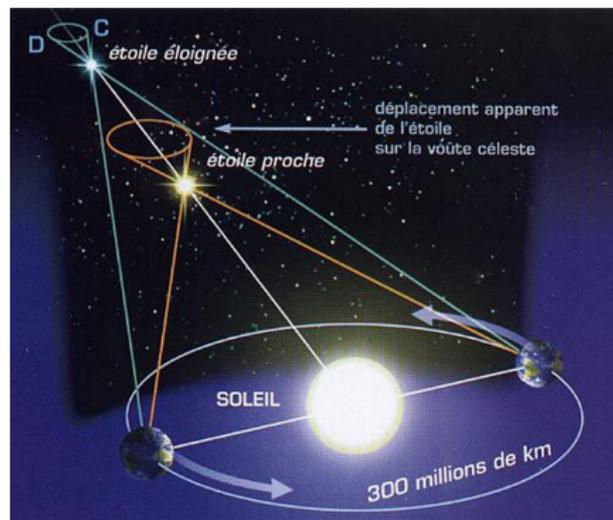
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire ( $\sim$  bras de 30 km)  
 → 61 Cygni à 630 000 UA  
 ( $\sim$  10 années-lumière  $\sim 10^{14}$  km)



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** ( $\sim$  taches informes)?

# Vers un univers très grand...

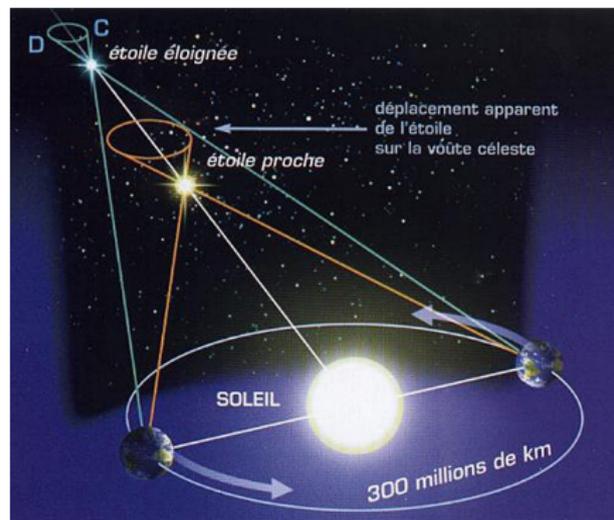
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire ( $\sim$  bras de 30 km)
  - 61 Cygni à 630 000 UA
  - ( $\sim$  10 années-lumière  $\sim 10^{14}$  km)
  - ( $\sim$  55 millions d'années en voyageant à 200 km/h)



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** ( $\sim$  taches informes)?

# Vers un univers très grand...

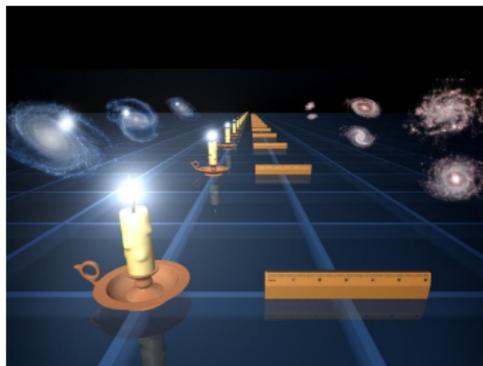
- ▶ **1718, Halley** : Sirius a bougé par rapport aux observations d'Hipparque (vers -100)
- ▶ pas de parallaxe annuelle visible : **distance trop grande?** (problème connu depuis l'Antiquité)
- ▶ **1838, Bessel** : première mesure d'une parallaxe stellaire ( $\sim$  bras de 30 km)
  - 61 Cygni à 630 000 UA
  - ( $\sim$  10 années-lumière  $\sim 10^{14}$  km)
  - ( $\sim$  55 millions d'années en voyageant à 200 km/h)
  - ( $\sim$  284 000 ans à la vitesse d'une fusée « Apollo »)



→ **étoiles très lointaines**... mais qu'en est-il des **nébuleuses** ( $\sim$  taches informes)?

# Vers un univers fini ?

- ▶ **1755, Kant :**  
nébuleuses = **étoiles naissantes** ?  
ou nébuleuses = **univers-îles** ?
- ▶ **1785, Herschel :** **forme de la Voie Lactée**  
estimée en supposant la même luminosité pour toutes les étoiles  
→ **sorte de soucoupe ou disque** ?
- ▶ suite aux mesures de Bessel estimation de la taille : **10 000 al × 1000 al**
- ▶ **1790, Herschel :** certaines **nébuleuses** sont de **petits amas d'étoiles** et d'autres contiennent **une seule étoile** et du « gaz »
- ▶ **1796, Laplace :** formulation **mathématique** de l'effondrement de Kant
- ▶ **1845, Parsons :** certaines nébuleuses sont des **spiraales**



# Le grand débat

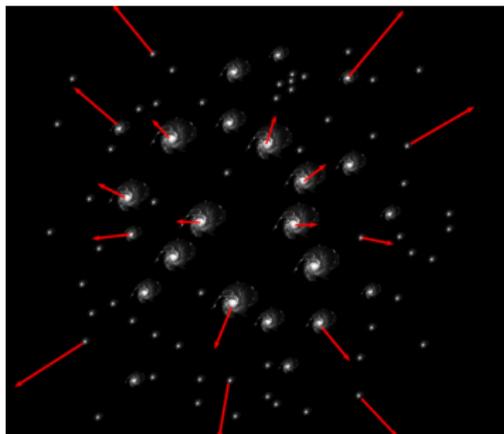
26 avril 1920, Shapley vs. Curtis

- ▶ 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 ?



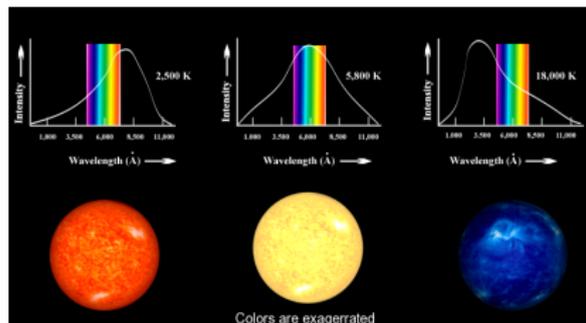
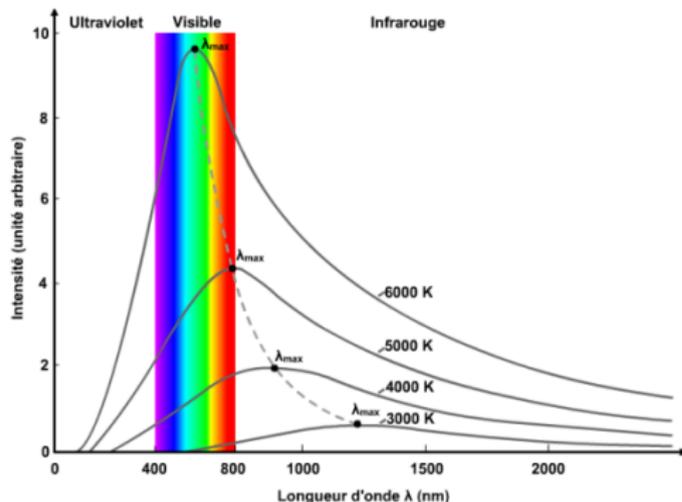
## 2

# E : Univers en expansion



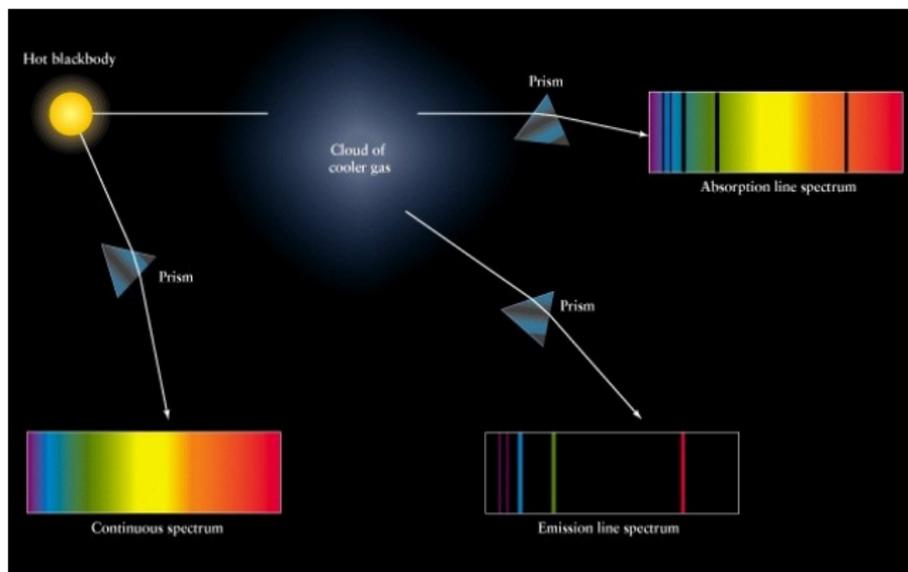
# Spectres continus

- ▶ tout corps chaud émet un **spectre continu** : position du maximum dépend de la température (« corps noir », Kirchhoff, 1860 ; Wien, 1893, etc.)
- ▶ couleur des étoiles renseigne sur leur température



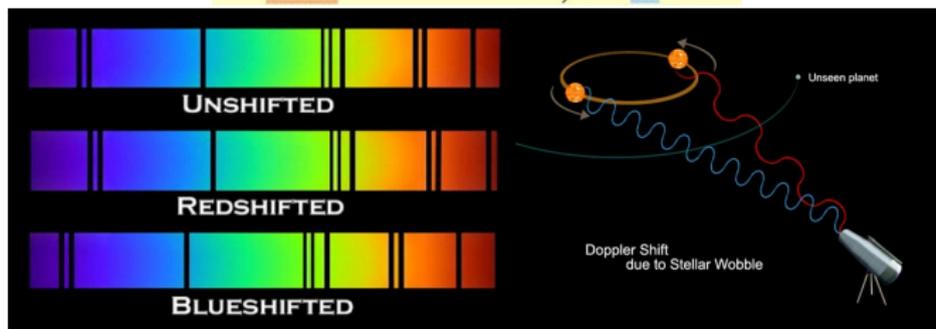
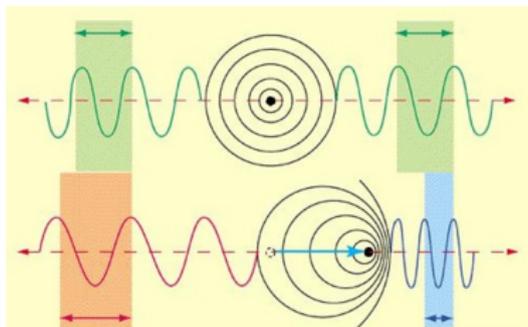
# Spectres de raies

- ▶ **spectres** de gaz **froids** contiennent des **raies** (**Wollaston, 1802 ; Fraunhofer, 1814**)
- ▶ raies caractérisent la **composition chimique** (**Talbot, 1834**)
- ▶ étoiles composées des **mêmes éléments** (**Huggins, 1860**) : surtout **hydrogène** (et un peu d'**hélium** puis **traces** d'autres **éléments plus lourds**)



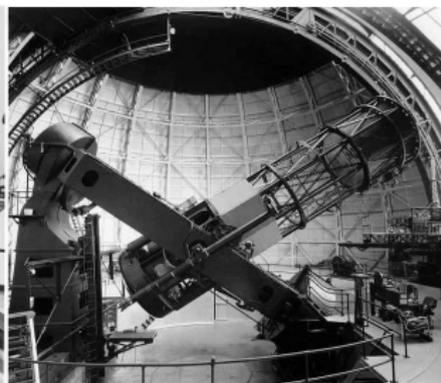
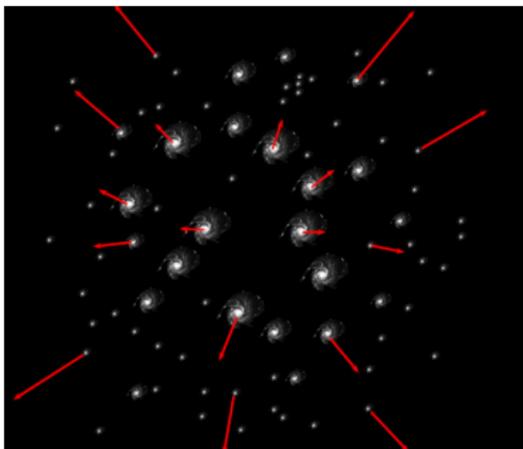
# Décalage vers le rouge et analyse spectrale

- ▶ objet **réel et chaud** : spectre continu avec raies
- ▶ analyse du **spectre** renseigne sur **composition** et **température** mais aussi **vitesse** (effet Doppler-Fizeau)



# Univers en expansion

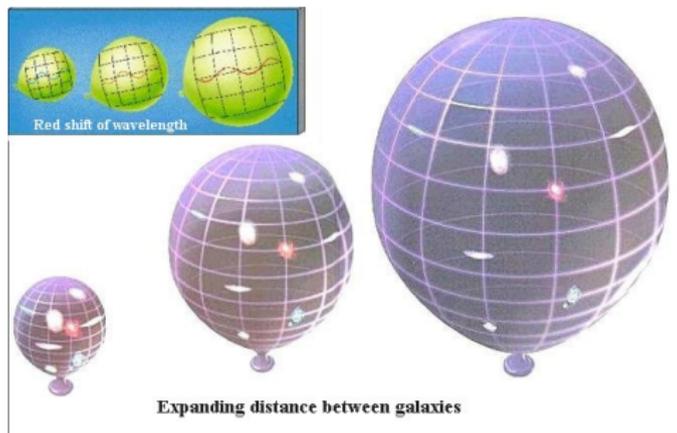
- ▶ à partir du XIX<sup>ème</sup>, **progrès optiques** → vision meilleure et plus lointaine
- ▶ **cartographie** des positions, vitesses et compositions des étoiles et nébuleuses
- ▶ **1912, Slipher** : **décalage vers le rouge (redshift)** des nébuleuses spirales
- ▶ **1924, Hubble** : **nébuleuses spirales = galaxies** (observatoire Mont Wilson)
- ▶ **1929, Hubble** : **les galaxies les plus lointaines ont des redshift plus importants** → idée d'un **univers en expansion**



Edwin Hubble (1889-1953) and Hooker Telescope (2.5m), Mt. Wilson Observatory  
Sources: Wikipedia, <http://www.astro.caltech.edu/>

# 3

## Cosmologie relativiste



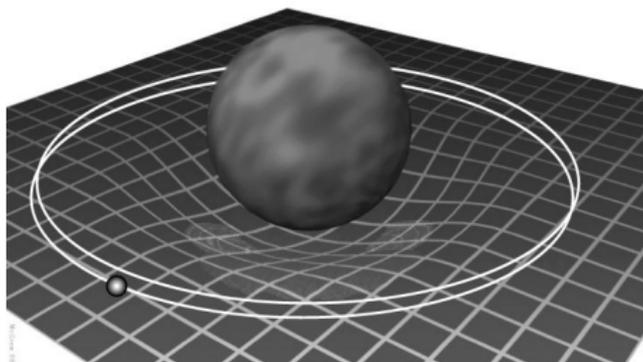
# La relativité restreinte (Lorentz, Poincaré, Einstein 1905)

- ▶ étude **expérimentale** du **champ électromagnétique** (lumière) pour observateurs en **mouvement relatif** → **invariance de la vitesse de la lumière**
- ▶ solution : **abandon des hypothèses d'un temps et d'un espace absolus** et statut de « méta-principe » donné au **principe de relativité**
  - lois de la physique identiques pour tous les **observateurs** (inertiels)
  - durée et longueur relatives à l'observateur
  - notion d'**espace-temps absolu** (espace à 4 dimensions) (**1907, Minkowski**)
  - espace-temps **absolu** : identique pour tous et pas influencé par ce qui s'y passe
- ▶ la masse est l'une des formes prises par l'énergie :  $E = mc^2$ 
  - possibilité de **convertir du mouvement en masse et inversement...**
  - seule l'**énergie est conservée, pas la masse**
  - **radioactivité, création de particules, annihilation, antimatière, etc.**
- ▶ **impossible de dépasser la vitesse  $c$  (pas d'omniscience)**

# Gravitation relativiste (1907 – 1915)

## Relativité générale

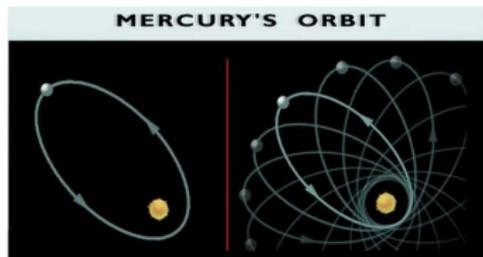
- ▶ généralisation du principe à **tous les observateurs**, description de la **gravitation** et **abandon d'un espace-temps absolu** → il est affecté par son contenu
- ▶ équivalence masse/énergie (relativité restreinte) → **l'énergie (et pas seulement la masse) crée la gravitation**
- ▶ la gravitation est une **manifestation de la courbure de l'espace (et du temps!)** → **mathématisation plus complexe**  $\equiv$  carte plus réaliste



# Prédictions et tests directs de la RG

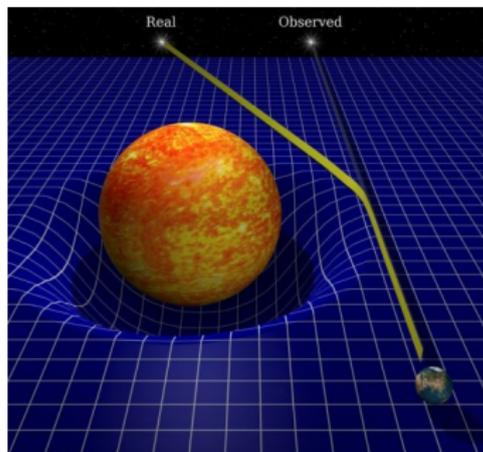
## Avance du périhélie de Mercure

- ▶ le mouvement de Mercure n'était pas parfaitement compris : l'orbite tournait plus vite que prévu par les calculs newtoniens  
→ la RG donne le résultat exact



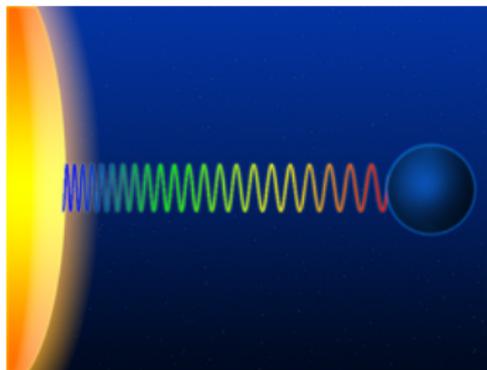
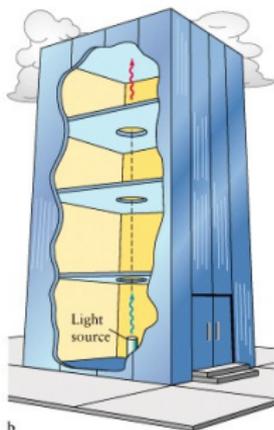
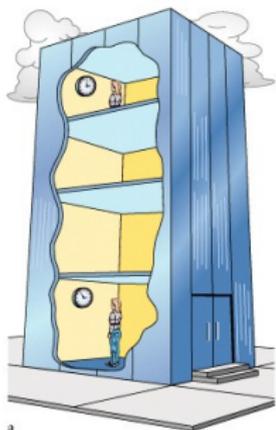
## Déviation de la lumière

- ▶ 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



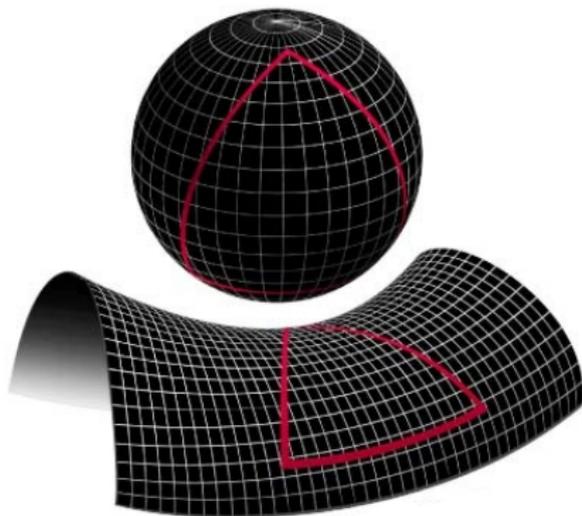
# L'effet Einstein et le décalage vers le rouge

- ▶ influence d'un champ de gravitation sur le temps : crucial pour le GPS
- ▶ une onde émise avec une certaine fréquence dans un champ de gravitation intense aura une fréquence plus faible là où le champ est moins intense  
→ décalage vers le rouge gravitationnel ( $\neq$  effet Doppler qui est lié à un mouvement relatif)
- ▶ vérifié même dans le champ de gravitation terrestre et sur une distance de 22 mètres (1960, Pound et Rebka, différence relative en fréquence de  $1/10^{15}$ )



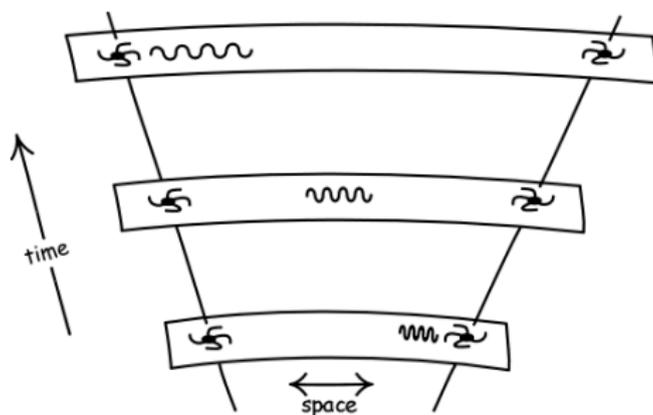
# Naissance de la cosmologie relativiste

- ▶ espace-temps  $\equiv$  objet physique  $\rightarrow$  Univers aussi  $\rightarrow$  cosmologie scientifique
- ▶ **1917, Einstein** : premier **modèle cosmologique** :
  - $\rightarrow$  solution **statique (indépendant du temps)**, **homogène et isotrope**
  - $\rightarrow$  besoin de supposer un univers « fermé » (hypersphère) avec une « **constante cosmologique** » (terme dans les équations qui a un **effet répulsif** pour empêcher l'effondrement)



# Expansion de l'Univers et début de la matière ?

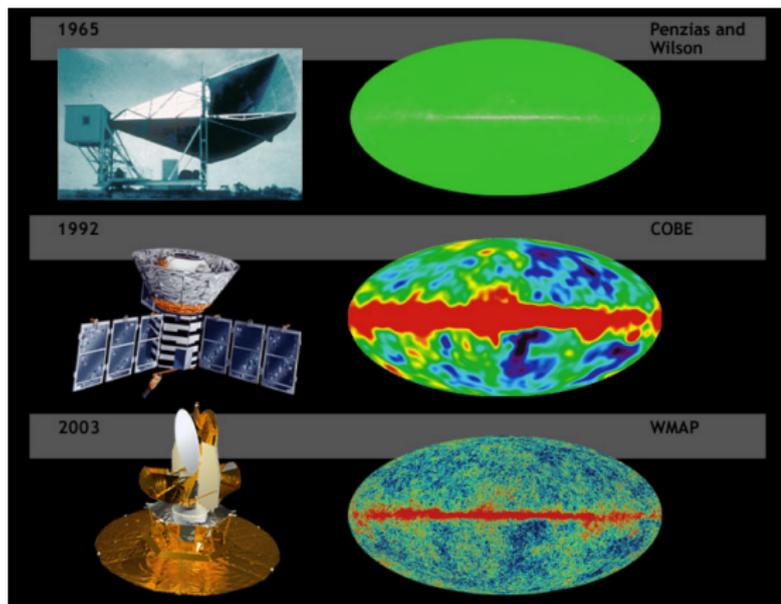
- ▶ **1922-1940, Friedman, Lemaître** : solutions dynamiques avec **expansion de l'Univers** (accord avec le redshifts observés par Slipher)
- ▶ **espace-temps dynamique**  $\neq$  matière en expansion (**pas une explosion !**)
- ▶ décalage vers le rouge cosmologique  $\equiv$  **variation du champ gravitationnel** ( $\sim$  géométrie de l'espace) et **pas mouvement de la matière**
- ▶ **Lemaître** : par le passé, **« atome primitif »** (modèle du « Big Bang »)



# Soupe primordiale chaude et opaque

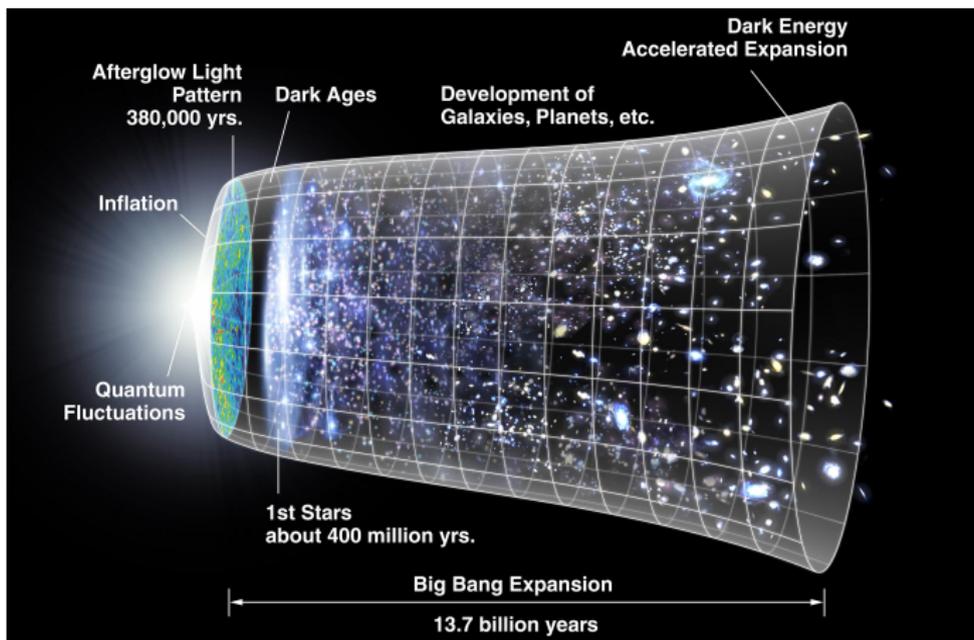
**1948, Alpher, (Bethe) et Gamow** : étude de la « soupe primordiale » **opaque** et **naissance des premiers atomes** (calculs de physique nucléaire)

- ▶ expansion → refroidissement  
→ soupe transparente à partir d'un moment
- ▶ 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
- ▶ lumière émise à cet instant : rayonnement de fond cosmologique (CMB, cosmic microwave background)



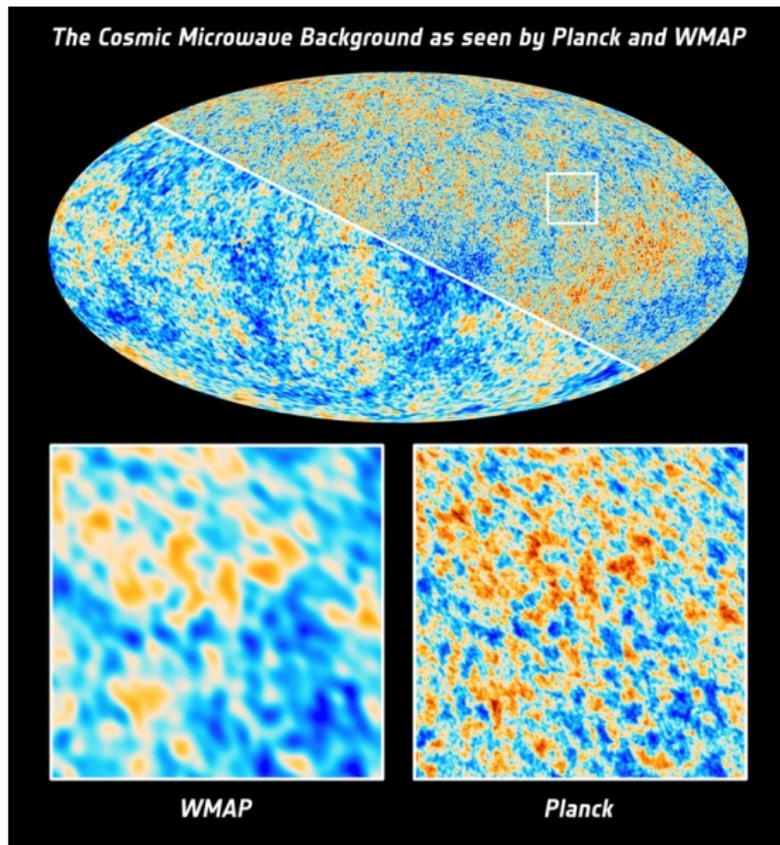
Évolution de la précision des mesures du CMB avec le temps

# Observation de l'univers primordial



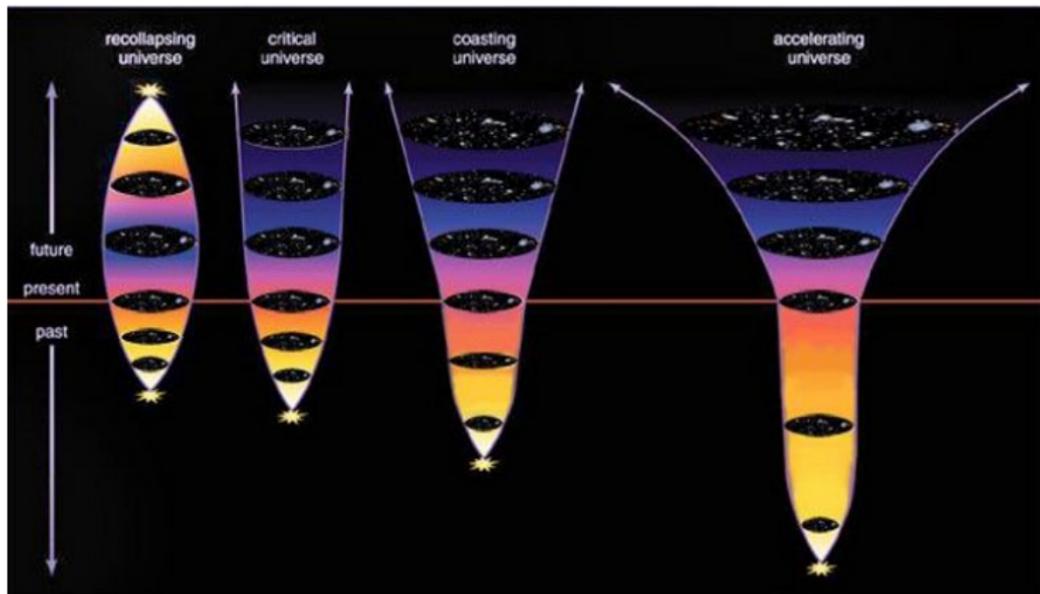
**1964, Penzias et Wilson** : observation faite par hasard d'un rayonnement de fond micro-onde homogène → relique du passé dense et chaud de l'Univers

# Observation du CMB : WMAP (2003) vs Planck (2013)



# Accélération de l'expansion et énergie sombre

- ▶ ~ **1990-2000** : mesures précises du rayonnement de fond (CMB)  
bon accord avec la relativité générale
- ▶ **1999** : **expansion de l'Univers accélérée (Nobel 2011)**  
→ à cause d'une « **énergie noire** »/constante cosmologique ?

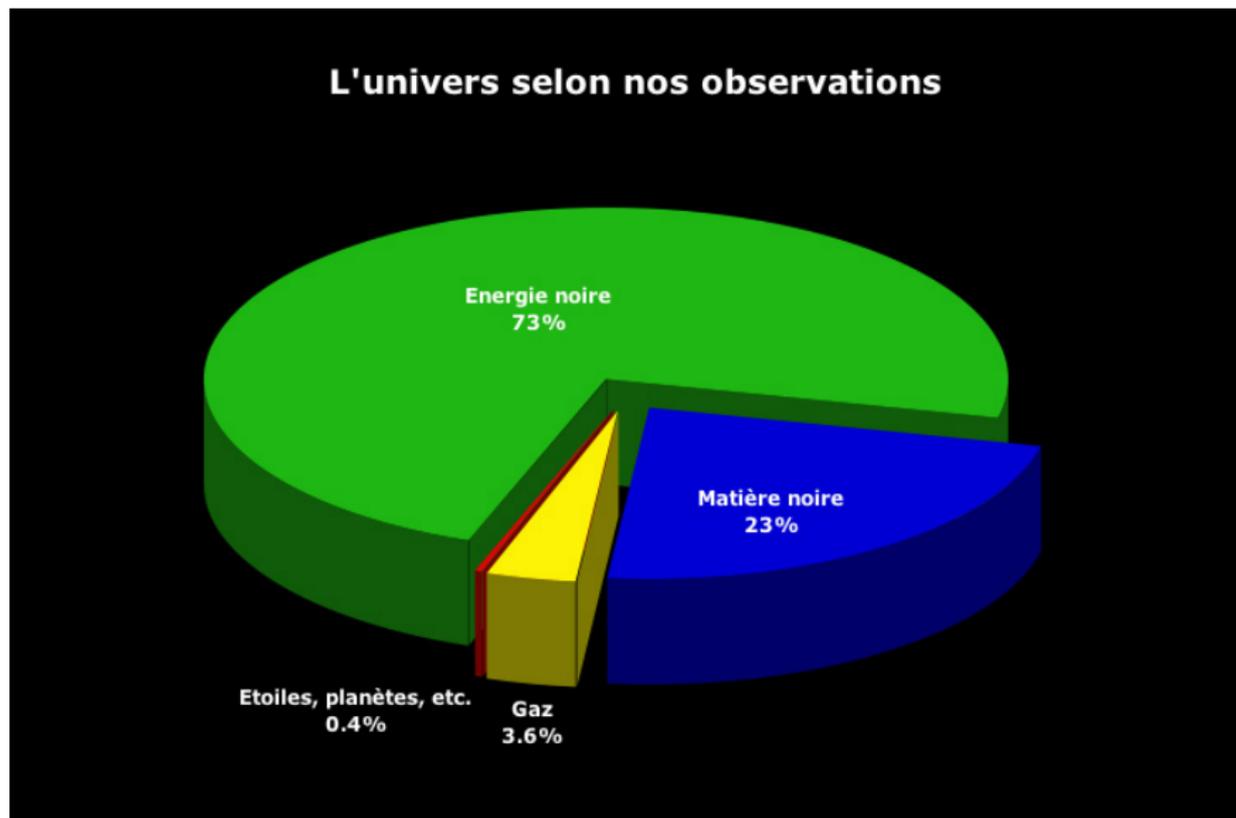


# Problème de la masse manquante

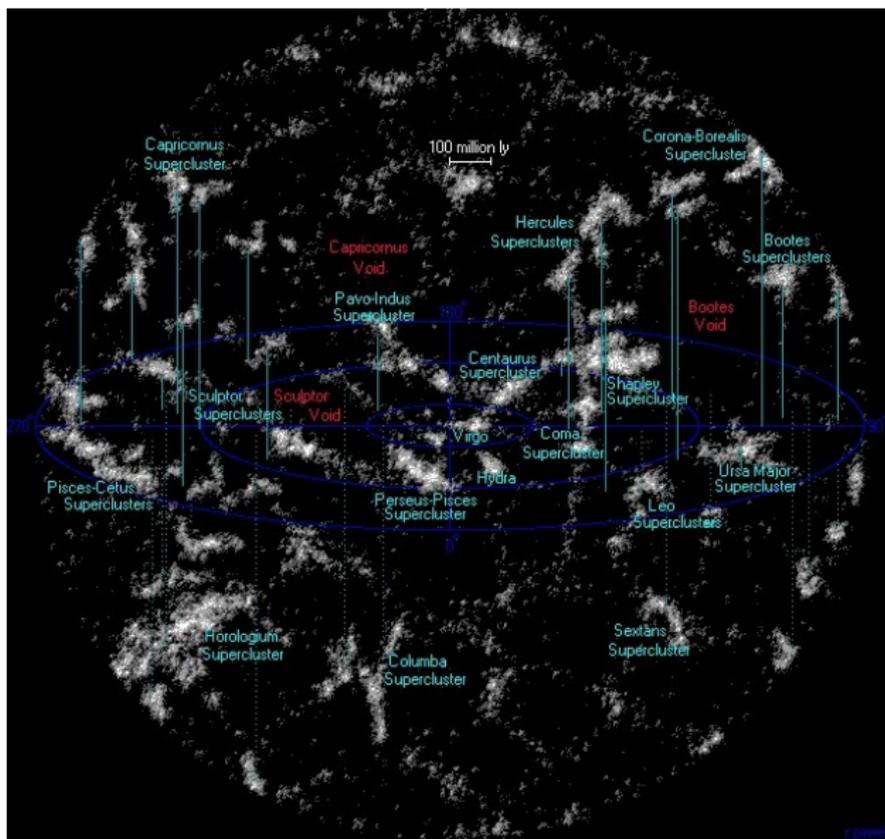
- ▶ **rappel** : on **pèse les astres** en les observant (lois de Kepler)
- ▶ **observations en désaccord avec la théorie** : les galaxies semblent contenir **plus de masse que ce que l'on voit**
- ▶ même conclusion avec les **mirages gravitationnels**
- ▶ **Interprétation** : il existe de la **matière noire** qui n'émet aucune lumière



# Bilan du contenu de l'Univers selon la cosmologie moderne



# Distribution de la matière visible



# Matière noire et énergie noire

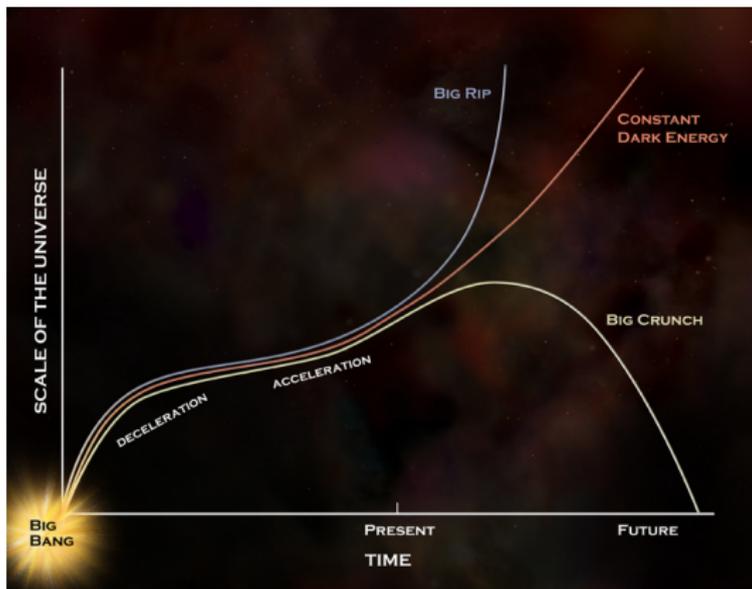
## Remarques :

1. **a priori sans rapport**
2. **90%** de la masse des galaxies semble **invisible**
3. modélisation prouve **répartition globale** : **vous baignez dans la matière noire et l'énergie noire si elles existent !**
4. des objets usuels (nuage de gaz, naines brunes, etc.) peuvent contribuer, mais l'abondance des éléments montre que la majeure partie de la **matière noire n'est pas « usuelle »**
5. la **physique des particules** fournit plein de candidats possibles pour la matière noire (supersymétrie, neutrinos, etc.) → expériences de détection (EDELWEISS, tunnel sous le Mont Fréjus)
6. **même stratégie** employée pour prédire l'**existence de Neptune** par **Adams** et **Le Verrier** (1843 – 1846)
7. **même stratégie** employée pour expliquer le mouvement de Mercure  
→ pas de planète Vulcain mais **besoin de changer de théorie de la gravitation**  
→ même chose ici ?

# Fin du temps et de tout ?

## Destin incertain de l'Univers

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



# Messages de la physique quantique

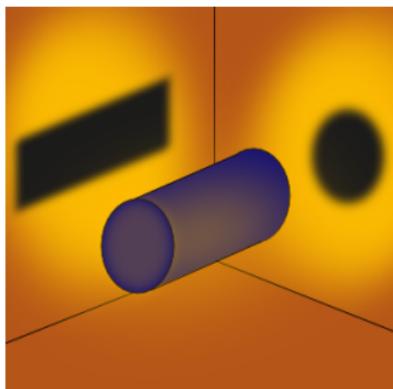
- ▶ selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs d'interaction » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :  
→ principe de complémentarité (**1927** : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?

# Messages de la physique quantique

- ▶ selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs d'interaction » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :  
→ principe de complémentarité (**1927** : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- ▶ exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?

# Messages de la physique quantique

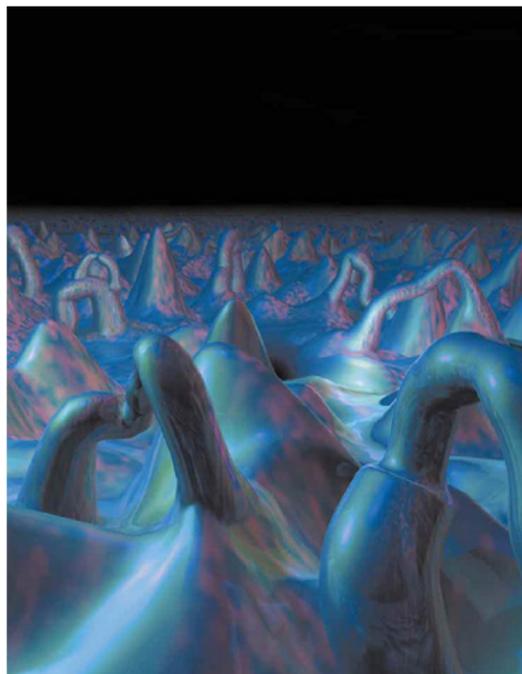
- ▶ selon l'expérience il faut décrire les « particules » et les « champs d'interaction » soit comme des corpuscules, soit comme des ondes :  
→ principe de complémentarité (1927 : diffraction d'électrons)
- ▶ besoin d'un changement de paradigme (« dialectique ») ?
- ▶ exemple similaire : que peut être un « système » si parfois on voit un rectangle et parfois un disque quand on l'observe ?



→ description des particules quantiques par de nouveaux objets mathématiques

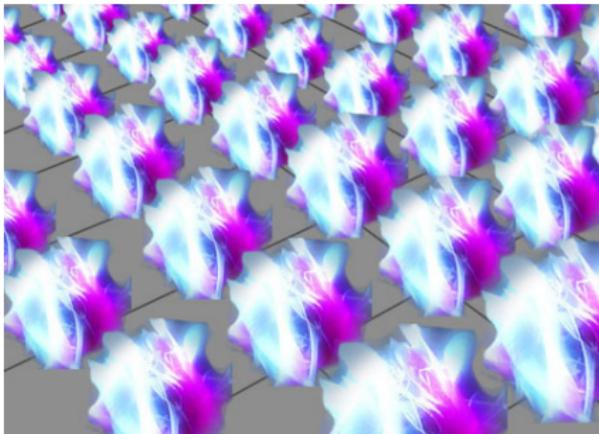
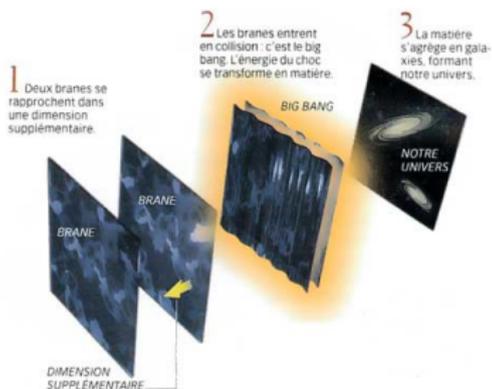
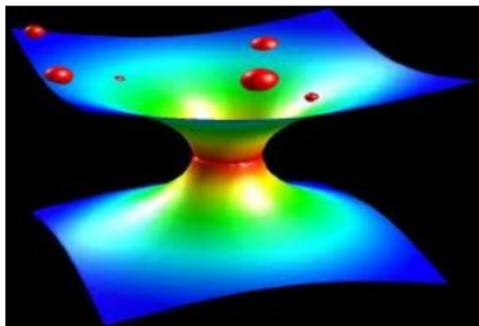
# Messages de la physique quantique relativiste

- ▶ le monde n'est **pas déterministe**, 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 (champ gravitationnel)  
→ **théorie des cordes ou autre ?**



# Quelques sujets non abordés

- ▶ univers dans trou noir ?
- ▶ dimensions supplémentaires ?
- ▶ « avant » le Big Bang ?



# Résumé

## Voir l'invisible

- ▶ étude de la nature  $\equiv$  dialogue continu entre expérience/observation et théorie
- ▶ Galilée avait raison : objets mathématiques complexes omniprésents en physique (importance de la notion de symétrie)
- ▶ **représentations** de la matière, de l'espace et du temps chamboulées au vingtième siècle
- ▶ progrès récents ( $\sim$  dernier siècle) révolutionnaires : existence des atomes, existence des galaxies, évolution et âge fini de l'Univers, physique quantique et relativité générale ( $\equiv$  espace, temps, nature fondamentale des objets plus complexes que prévu)
- ▶ en cosmologie/astrophysique : nombreux phénomènes exotiques encore imparfaitement compris
  - Univers = laboratoire naturel pour la physique fondamentale
  - retombées technologiques notables (GPS, etc.)

# Épilogue

## Géométrisation, mathématisation et humanisation de la physique

- ▶ descriptions apparemment assez « bonnes » aux plus petites (**physique quantique**) et plus grandes (**relativité générale**) échelles, mais **incompatibles...**
- ▶ « **humanisation** de la physique » : principe de relativité, impact de l'acte de mesure, non-séparabilité, notion de modèle effectif, etc. (**≠ relativisme total !**)
- ▶ « **dématérialisation et délocalisation** » des concepts → rapprochement avec les idées pythagoriciennes ? (**Nature = objets mathématiques**)

Toutes les approches modernes semblent aller dans le sens d'une révolution encore plus grande à venir de nos conceptions de la matière, de l'espace et du temps...  
 mais les théories sont encore incomplètes et spéculatives : du travail pour les générations à suivre...

# Épilogue

## Géométrisation, mathématisation et humanisation de la physique

- ▶ descriptions apparemment assez « bonnes » aux plus petites (**physique quantique**) et plus grandes (**relativité générale**) échelles, mais **incompatibles**...
- ▶ « **humanisation** de la physique » : principe de relativité, impact de l'acte de mesure, non-séparabilité, notion de modèle effectif, etc. (**≠ relativisme total !**)
- ▶ « **dématérialisation et délocalisation** » des concepts → rapprochement avec les idées pythagoriciennes ? (**Nature = objets mathématiques**)

Toutes les approches modernes semblent aller dans le sens d'une révolution encore plus grande à venir de nos conceptions de la matière, de l'espace et du temps...  
 mais les théories sont encore incomplètes et spéculatives : du travail pour les générations à suivre...

## Quelques références

### Livres :

- **Cohen-Tannoudji & Spiro**, *Particules élémentaires et cosmologie*
- **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*
- **Mouchet**, *L'étrange subtilité quantique - Quintessence de poussières*
- **Scarani**, *Initiation à la physique quantique : La matière et ses phénomènes*
- **Singh**, *Le roman du Big Bang*
- **Stannard & Gamow**, *Le Nouveau Monde de M. Tompkins*
- **Vannucci**, *Le vrai roman des particules élémentaires*

### Sites web :

- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier509-1.php> : dossier RR
- <http://www.futura-sciences.com/comprendre/d/dossier510-1.php> : dossier RG
- à chercher (youtube, dailymotion) « ce qu'Einstein ne savait pas encore » : documentaire sur la théorie des cordes (3 parties)