



HISTOIRE DE L'ASTRONOMIE

V. Physique et astrophysique au XX^e siècle

Pr François Vernotte

UTINAM - Université de Franche-Comté/CNRS

Observatoire des Sciences de l'Univers THETA de Franche-Comté/Bourgogne



Histoire de l'Astronomie

Sommaire

V. Physique et astrophysique au XX^e siècle

- 1 La relativité
 - Les deux postulats de la relativité
 - La relativité restreinte
 - La relativité générale
- 2 La mécanique quantique
 - L'irruption du discontinu
 - Notions clés de la mécanique quantique
 - L'interprétation de la mécanique quantique
- 3 La cosmologie
 - Les deux découvertes de Hubble
 - Le modèle standard
 - Dernières nouvelles de l'Univers. . .

Les quelques problèmes résiduels de la physique...

- **Newton** a résolu la mécanique
- **Maxwell** a unifié l'électricité, le magnétisme et l'optique

Fin XIX^e, il ne reste plus que **quelques infimes problèmes** :

- 1 **la constante c** : comment la vitesse de la lumière peut-elle être une constante de l'électromagnétisme alors qu'une vitesse est nécessairement relative ?
- 2 **la "catastrophe ultra-violette"** : pourquoi la loi de rayonnement du "corps noir" de Rayleigh-Jeans ne correspond pas aux observations pour le bleu, le violet et l'ultra-violet ?
- 3 **l'effet photoélectrique** : pourquoi l'effet photo-électrique ne se manifeste-t-il que pour des longueurs d'onde en-dessous d'un certain seuil, seuil qui dépend du matériau ?

La physique du XX^e siècle doit répondre à ces questions...

Le premier postulat

Selon Galilée :

- Il n'existe pas de vitesse absolue \Rightarrow référentiel
- Il n'existe pas de repos absolu \Rightarrow pas de centre de l'Univers !
- **Mouvement rectiligne uniforme** \Leftrightarrow repos absolu



Postulat (Einstein, 1905)

Les résultats de toute expérience entièrement conduite à l'intérieur d'un certain système de référence sont indépendants de tout mouvement de translation uniforme de ce système de référence.

Maxwell et l'électromagnétisme

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{div} \vec{D} = \rho \\ \operatorname{div} \vec{B} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$

- 1 Comment la vitesse de la lumière peut-elle être une constante ?
- 2 Par rapport à quoi la vitesse de la lumière est-elle mesurée ?
- 3 La vitesse de la lumière peut-elle être indépendante du référentiel ?

Par rapport à l'**éther** ?

L'expérience de Michelson-Morley

Les mouvements de la Terre dans l'espace

Si la Terre se déplace dans l'éther :

⇒ **différence entre la vitesse de la lumière** mesurée

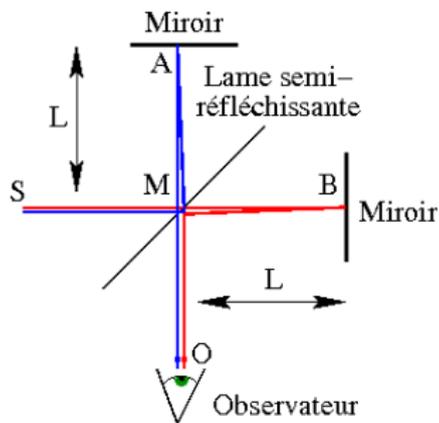
- dans le sens de déplacement de la Terre
- dans le sens perpendiculaire

En 1887, Michelson et Morley utilisent l'**interféromètre de Michelson** (1881) pour mesurer la vitesse de la lumière.

Au repos :

$\overline{MA} = \overline{MB}$ ⇒ **interférences constructives**

Sensibilité de l'expérience : $\Delta c \approx 5 \text{ km/s}$



Le second postulat

Résultat de l'expérience de Michelson-Morley :

Aucun déplacement de frange n'est observé !



Postulat (Einstein, 1905)

Dans tout système de référence, la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de la source

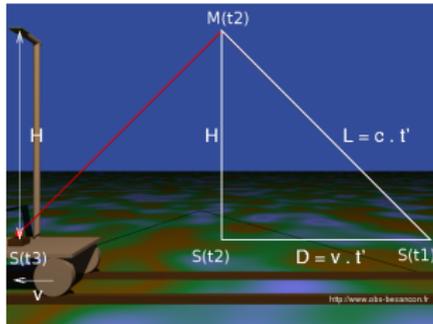
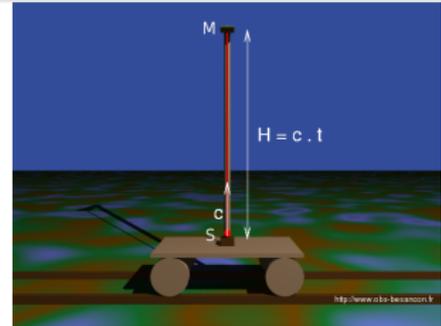
Corollaire du second postulat :

La vitesse de la lumière est la même dans tout référentiel inertiel

Ein Gedanken Experiment

On mesure **dans un train** le temps mis par un rayon lumineux pour parcourir l'aller/retour SMS :

$$\Delta t = \frac{2H}{c}$$



On mesure **sur le quai** le temps mis par le rayon lumineux pour parcourir l'aller/retour $S(t_1)M(t_2)S(t_3)$:

$$\Delta t' = \frac{\frac{2H}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \neq \Delta t$$

La durée d'une expérience varie en fonction du référentiel depuis laquelle on l'observe !

Temps propre et temps impropre

Dans le train Le signal lumineux est parti de S et est revenu en S :

⇒ **temps propre**

Sur le quai Les deux évènements (départ et arrivée du rayon lumineux) n'ont pas lieu au même point du référentiel :

⇒ **temps impropre**

Le temps propre est toujours inférieur au temps impropre

Soit un référentiel $(O', \vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$ se déplaçant à la vitesse \vec{v} par rapport au référentiel du temps propre :

$$\Delta t_{\text{propre}} = \Delta t'_{\text{impropre}} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

C'est la **dilatation du temps**

Symétrie

Si la *Gedanken Experiment* était réalisée sur le quai :

- La durée de l'expérience vue du quai serait :

$$\Delta t' = \frac{2H}{c}$$

⇒ temps propre

- La durée de l'expérience vue du train serait :

$$\Delta t = \frac{\frac{2H}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

⇒ temps impropre

Les deux expériences sont complètement symétriques et aboutissent aux mêmes résultats

(D'après le postulat 1 : il n'existe pas de référentiel privilégié)

Conseils pour une bonne réflexion relativiste...

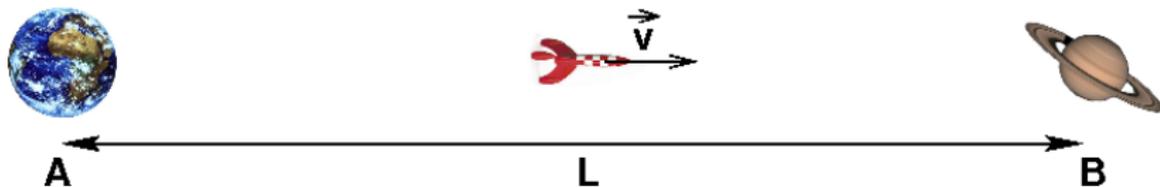
- Méfiez-vous des interprétations erronées :

~~“Plus on va vite, plus le temps s’écoule lentement !”~~

C’est un **contre-sens** complet :

- 1 la vitesse est relative (postulat 1)
 - 2 une expérience réalisée dans un référentiel peut être réalisée dans un autre (symétrie)
 - 3 seules les notions de **temps propre** et **temps impropre** sont légitimes
- Méfiez-vous aussi du “*bon sens*” !

Contraction des longueurs



Durée du voyage de A vers B

- Référentiel de A (ou de B) : $\Delta t = L/v$ temps impropre
- Référentiel de la fusée : $\Delta t' = \frac{L}{v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ temps propre

Distance parcourue

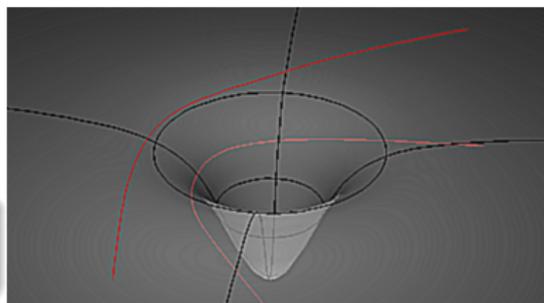
- Référentiel de A (ou de B) : L
- Référentiel de la fusée : $L' = v\Delta t' = L\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$

C'est la **Contraction des Longueurs**

La relativité générale : une approche géométrique

- Relativité **générale** : extension aux référentiels non-inertiels
 - fruit d'un travail acharné de 1907 à 1915
 - théorie de Newton = cas particulier
- pour vitesses petites devant c
- pour faibles champs gravitationnels

La **gravitation** n'est pas une force :
c'est une **courbure de l'espace-temps**



Effets prévus :

- **résolution** du problème de l'avance du périhélie de Mercure
 - déviation de la lumière par une masse (*lentille gravitationnelle*)
 - dilatation du temps au voisinage d'une masse
 - équivalence masse pesante/masse inertielle
 - existence des ondes gravitationnelles
 - existence du rayon de Schwarzschild pour les trous noirs
 - l'Univers devrait s'effondrer : contraire au **principe cosmologique**
- Einstein invente la **constante cosmologique** répulsive à distance

Confirmations expérimentales

L'éclipse de Soleil de 1919

- Eddington monte une expédition pour observer l'éclipse totale du 29 mai 1919
- ses photographies confirment la déviation relativiste de la position des étoiles

Dilatation du temps

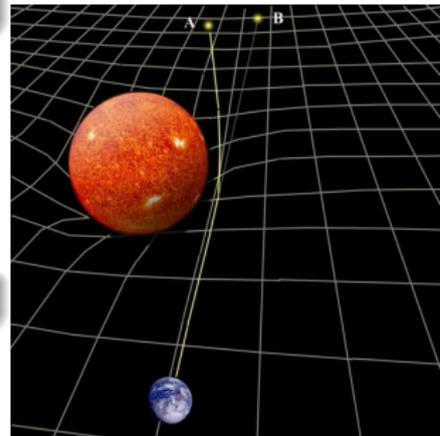
- confirmée par la physique des particules
- par les horloges atomiques
- par le positionnement GPS

Principe d'équivalence

- nombreux tests pour mettre en échec la relativité
- tous négatifs (*jusqu'à présent...*)

Vérifications attendues

- observations directes des ondes gravitationnelles



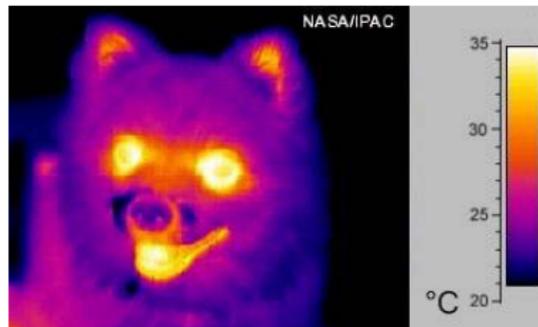
Le corps noir

Definition

Un **corps noir** est un corps qui absorbe tout le rayonnement électro-magnétique qu'il reçoit.

Conséquences :

- Le corps est noir !
- À l'équilibre, il émet autant d'énergie qu'il en reçoit.
- Tout corps émet un rayonnement électro-magnétique. . .

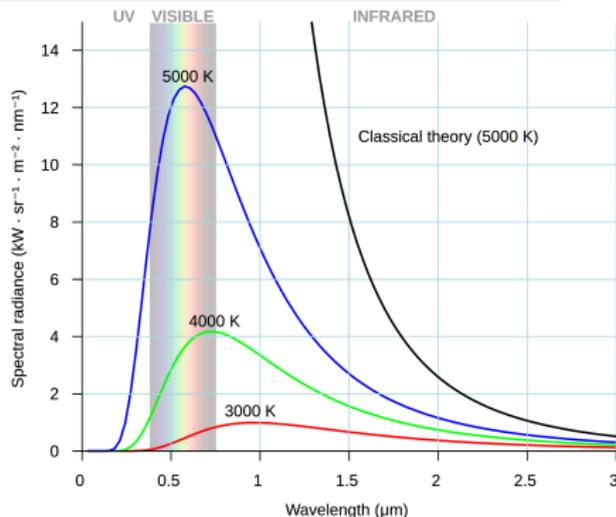


Planck et la loi du corps noir (1900)

La catastrophe ultra-violette

À la fin du XIX^e siècle Rayleigh et Jeans proposent une explication de l'émission du corps noir fondée sur la **physique classique** et la **thermodynamique statistique** :

- concordante pour les grandes longueurs d'ondes
- divergente pour les longueurs d'ondes courtes (UV)



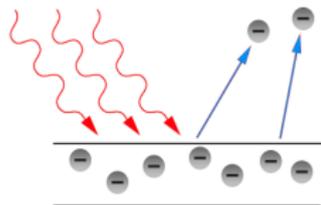
La loi de Planck

En 1900, Planck, pour trouver une loi en accord avec l'expérience, introduit un "**artifice de calcul**" : l'énergie lumineuse est **quantifiée**...

L'effet photoélectrique (1905)

Un matériau peut émettre des électrons lorsqu'il est éclairé

- La fréquence ν de la lumière doit dépasser une fréquence seuil ν_s
- ν_s dépend du matériau
- Le nombre d' e^- émis est proportionnel à l'intensité lumineuse
- L'énergie cinétique des e^- est proportionnelle à ν
- Le phénomène est très rapide (~ 1 ns)

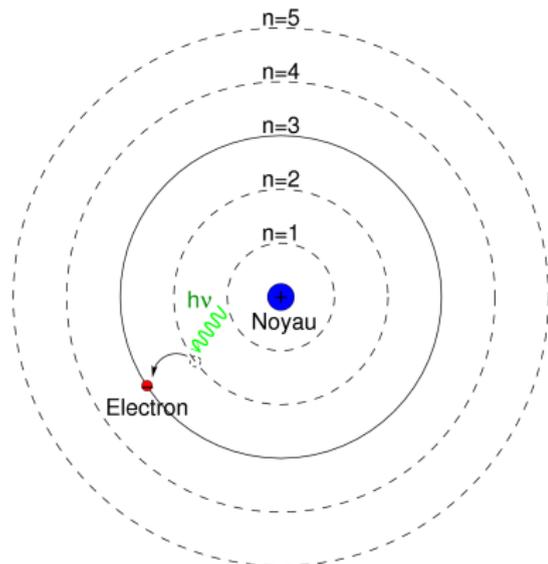


Einstein trouve la solution en 1905

- L'énergie lumineuse est **vraiment quantifiée**
- Elle arrive par paquets (ou *quanta*) : les **photons**

Prix Nobel de Physique en 1921

Le modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène (1913)



- L'électron (-) **tourne** autour du noyau (+)
- Il n'existe que quelques **orbites "permises"**
- À chaque orbite n correspond un **niveau d'énergie** de l'atome E_n (ionisation : $n \rightarrow \infty$)
- Les niveaux d'énergie E_n **augmentent avec n**
- Pour passer de E_3 à E_2 , l'électron doit **émettre un photon** d'énergie $h\nu = E_3 - E_2$
- Pour passer de E_2 à E_3 , l'électron doit **absorber un photon** d'énergie $h\nu = E_3 - E_2$

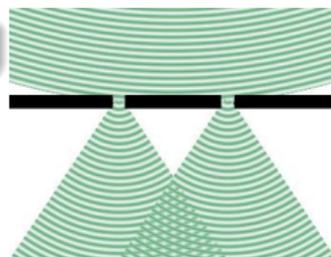
L'irruption du discontinu

- **1900** : Planck résout la loi du corps noir
 - un atome reçoit ou émet de l'énergie à une fréquence ν par **paquets** d'énergie $h\nu$ (h est la constante de Planck)
- **1905** : Einstein résout l'effet photoélectrique
 - la lumière cède de l'énergie par **quanta** d'énergie $E = h\nu$
- **1909** : Millikan mesure la charge de l'électron
- **1913** : Bohr décrit un modèle planétaire d'atome quantifié
 - nombre quantique $n =$ ordre de l'orbite depuis le noyau
 - pour passer d'une orbite n à $n + 1$ l'atome doit recevoir un photon possédant une énergie égale à la différence d'énergie des niveaux
 - il émet un photon de même énergie lorsqu'il revient à l'orbite n
- **1915** : Sommerfeld ajoute un second nombre quantique
 - l décrit la forme des orbitales
- **1918** : Bohr ajoute un troisième nombre quantique
 - m (nombre quantique magnétique) = orientation spatiale de l'orbitale
- **1925** : Uhlenbeck et Goudsmit découvre le "**spin**" de l'électron
 - s , interprété comme la rotation de l'électron sur lui-même

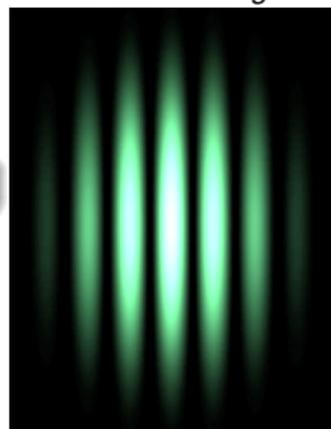
La nature de la lumière

L'expérience des fentes d'Young à un photon

- La source envoie 1 photon/sec. : interférence ?
- oui, les photons construisent les franges brillantes
- par quelle fente passe le photon ?
- on place un détecteur sur chaque fente
- la figure d'interférence disparaît !
- ⇒ dualité onde-particule : ni onde ni particule, les 2 ?



Expérience des fentes d'Young



Interférogramme

De Broglie est la mécanique ondulatoire

- “À toute particule est associée une onde” (de Broglie, 1924)
- confirmé par l'expérience de diffraction d'un faisceau d'électron en 1927 (Davisson et Germer)
- ⇒ dualité onde-particule : ni onde ni particule, les 2 ?

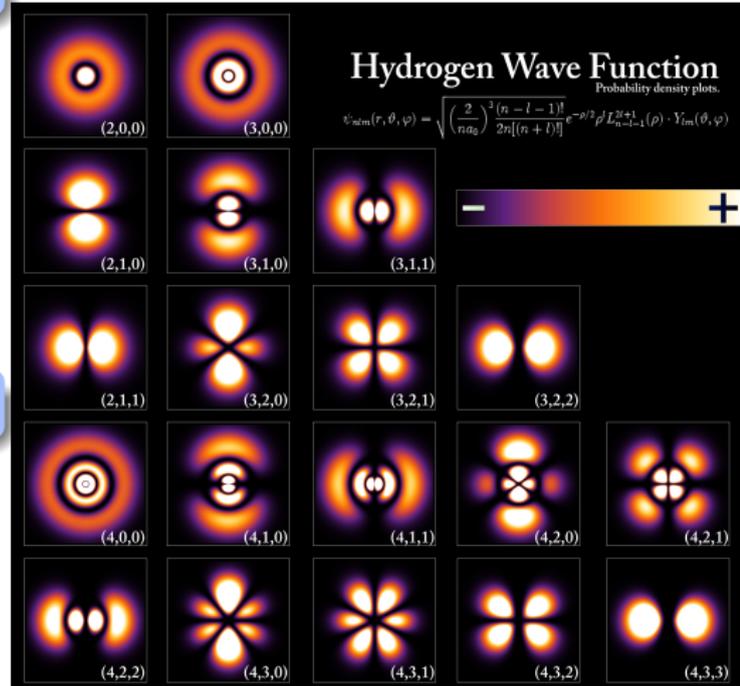
Schrödinger et la fonction d'onde

La fonction d'onde

- $\Psi(x, t)$ associée à chaque particule (Schrödinger, 1926)
- $|\Psi(x, t)|^2 =$ densité de probabilité de présence (Born, 1926)

L'équation de Schrödinger

- régit l'évolution spatiale et temporelle de la fonction d'onde
- ⇒ déduction des états quantiques associés à chaque niveau d'énergie



Le principe d'incertitude d'Heisenberg (1927)

Le théorème d'indétermination

(a) **onde :**

→ non localisée dans l'espace

→ fréquence parfaitement définie

(c) **corpuscule :**

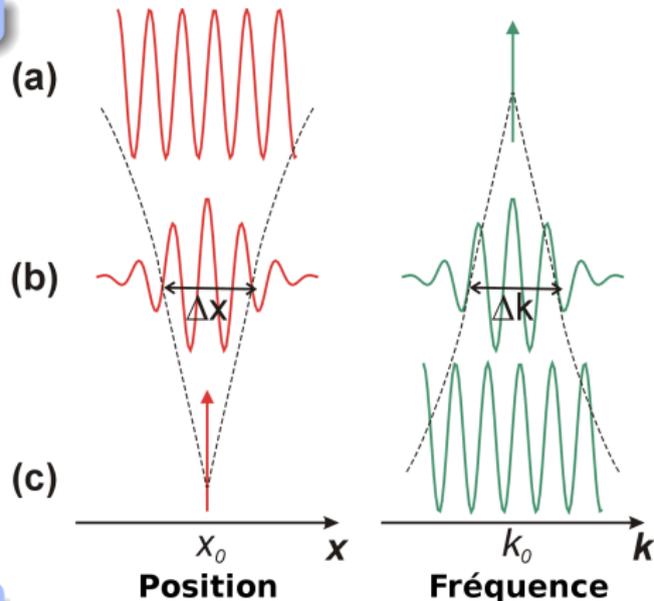
→ parfaitement localisé

→ fréquence indéfinie

(b) **paquet d'onde :**

→ localisé dans Δx

→ fréquence définie $\pm \Delta k$



Exemples d'indéterminations

- pulsation (fréquence)/temps (période) :
- énergie/temps :
- position/impulsion (vitesse) :

$$\Delta \omega \cdot \Delta t \geq 1$$

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$$

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$$

La réduction du paquet d'onde

Exemple des interférences à 1 photon

- la fonction d'onde du photon passe simultanément par les 2 fentes d'Young
- le photon est capté lorsqu'il arrive sur la plaque sensible
- le photon est localisé
- réduction de la fonction d'onde du photon
- si un détecteur est placé sur chacune des fentes
- la réduction du paquet d'onde est réalisée sur une des fentes
- la figure d'interférence disparaît

Réduction du paquet d'onde

- **avant la mesure** : le système physique est dans une superposition des états possibles
 - **au moment de la mesure** : un des états est sélectionné
 - **après la mesure** : système entièrement réduit à l'état mesuré
- ⇒ la mesure modifie l'état du système

Le chat de Schrödinger et autres bizarreries...



- Le chat est dans une caisse opaque
 - un mécanisme mortel a une chance sur 2 de se déclencher en 1 h
 - avant l'ouverture de la boîte le chat est dans la superposition des 2 états
- à la fois mort et vivant
- ⇒ l'ouverture sélectionne un état !

Autres conséquences étranges

- la nature probabiliste des états quantiques
- prouvé expérimentalement, pas de variables cachées
- caractère non-local : deux particules appariées se placent **simultanément** dans un état opposé quelle que soit leur distance
- prouvé expérimentalement
- comment interpréter la physique quantique ?
- **positivistes** : peu importe, ça marche très bien !
- **pour d'autres** : *choix quantique* ⇒ dédoublement de l'Univers

La découverte des galaxies

- **1919** : mise en service du télescope de 2,54 m de diamètre au Mont Wilson
 - **1924** : Hubble résout en étoiles la galaxie de Barnard (Sagittaire)
 - **1925** : Hubble estime la distance de ces étoiles : 700 000 années-lumière
- ⇒ au-delà des limites de la Voie Lactée
- **1926** : résolution et mesure de la distance de la *galaxie* du Triangle
 - **1929** : résolution et mesure de la distance de la *galaxie* d'Andromède

Les “*nébuleuses spirales*” sont des galaxies



La galaxie de Barnard



La fuite des galaxies

- **Depuis 1918** : mesures de vitesse par effets Doppler (décalage vers le rouge) de nombreux objets astronomiques
 - **1924** : identification des galaxies par Hubble
 - **1927** : en s'appuyant sur ses travaux théoriques de relativité générale, Lemaître prévoit une vitesse d'éloignement des galaxies proportionnelle à leur distance
 - **1925/29** : Hubble mesure la distance de nombreuses galaxies
 - **1929** : Hubble découvre une relation linéaire entre la vitesse de fuite des galaxies et leur distance
- ⇒ **loi de Hubble** : les galaxies s'éloignent d'autant plus vite qu'elles sont plus éloignées

L'Univers n'est pas immuable !



Edwin Hubble (1889/1953)



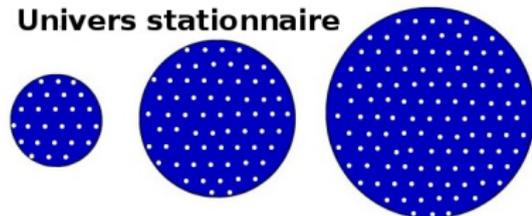
Deux modèles concurrents

L'univers stationnaire

Hoyle, Gold, Bondi (~ 1940)

- **Principe cosmologique parfait** :
Univers homogène, isotrope et
toujours identique
 - **création continue** de matière pour
compenser l'expansion de l'Univers
- ⇒ la densité de l'Univers est constante

Univers stationnaire

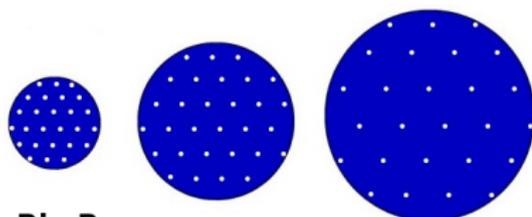


Le "Big Bang"

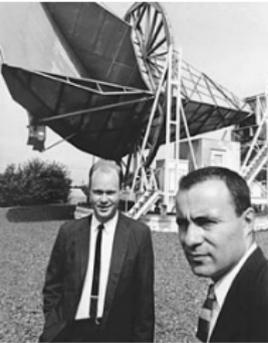
Friedmann, Lemaître, Gamow (1922)

- l'Univers est en expansion et **évolue**
 - il devient de **moins en moins dense**
et de **moins en moins chaud**
 - il y a eu une **singularité initiale**
- ⇒ l'âge de l'Univers est fini

Big Bang



La découverte du “*Fond Diffus Cosmologique*”

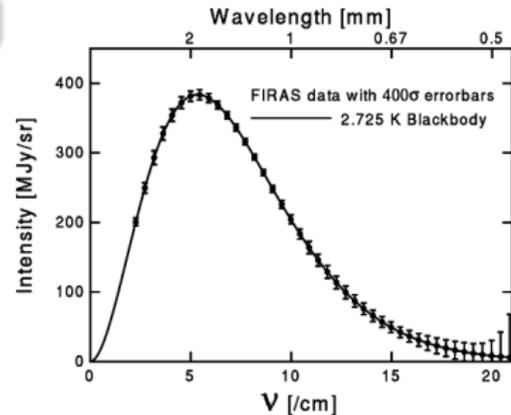


Robert Wilson et
Arno Penzias

- **1948** : Gamow prédit l'existence d'un rayonnement “écho” du Big Bang en micro-onde
 - **1964** : Penzias et Wilson observent par hasard ce rayonnement : le **Fond Diffus Cosmologique**
- ⇒ confirmation expérimentale du Big Bang
- **1978** : Nobel de physique pour Penzias et Wilson

COsmic Background Explorer

- **1989** : lancement du satellite **COBE**
- **1990** : le fond diffus cosmologique correspond à la courbe d'un corps noir à une température de **$2,728 \pm 0,002$ K**
- **1992** : d'**infimes fluctuations** sont détectées ($\sim 10^{-4}$ K)
- **2006** : prix Nobel de physique pour Mather et Smoot



Les briques théoriques pour l'étude du Big Bang

La dualité matière/rayonnement

- **Physique quantique** : énergie d'un photon

$$E = h\nu$$

h = constante de Planck, ν = fréquence de l'onde e.m.

- **Relativité** : énergie d'une particule de masse m

$$E = mc^2$$

- **Transformations matière/rayonnement**

- annihilation particule/antiparticule :

$$mc^2 + \bar{m}c^2 \rightarrow h\nu + h\nu$$

- interaction photon/photon :

$$h\nu + h\nu \rightarrow mc^2 + \bar{m}c^2$$

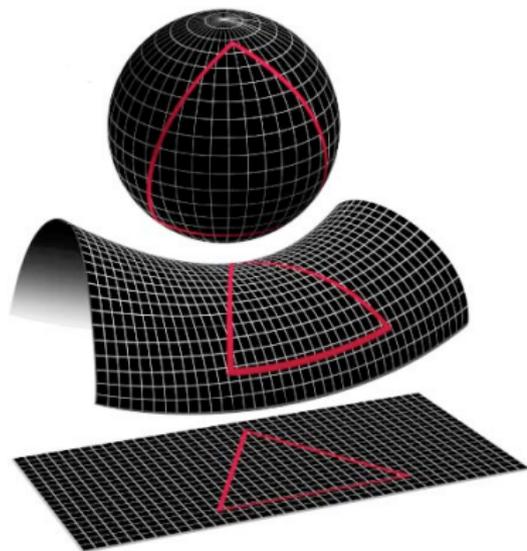
pas symétrique : le nombre de types de particule est **fini**

Chronologie du Big Bang

	ère de Planck (cosmologie quantique)	
10^{-43} s	mur de Planck	10^{32} K
	ère électroforte : unification forces e.m./faible/forte	
10^{-35} s		10^{28} K
	inflation : phase d'expansion très violente	
10^{-32} s		10^{26} K
	“soupe” indifférenciée (anti)particules/photons	
10^{-12} s	confinement des quarks : création des hadrons	10^{16} K
	ère hadronique	
10^{-4} s	hécatombe protons/antiprotons : reste 1 pr. sur 10^9	10^{12} K
	ère leptonique	
10^{-1} s	l'Univers est transparent pour les neutrinos	10^{11} K
4 s	hécatombe électrons/positons : reste 1 e^- sur 10^9	$5 \cdot 10^9$ K
	nucléosynthèse primordiale	
3 min	disparition des neutrons libre	10^9 K
380 000 ans	atomes neutres – Univers transparent	3 000 K
	formations des galaxies (puis ?) des étoiles	
13,7 Ma	aujourd'hui...	2,7 K

Pour bien comprendre le Big Bang

- Le Big Bang n'est pas une explosion dans un espace infini vide
 - l'Univers a toujours rempli l'espace-temps
 - l'espace-temps se dilate en même temps que l'Univers
- l'Univers peut être fini dans l'espace
 - l'Univers n'est pas borné
 - il peut être une **hypersphère**...
- l'Univers peut être infini dans le temps
 - l'instant initial de la chronologie du Big Bang est une tendance *asymptotique* du modèle
 - la science ne peut pas remonter avant le temps de Planck (10^{-43} s)



L'Univers doit être fini dans l'espace ou le temps...

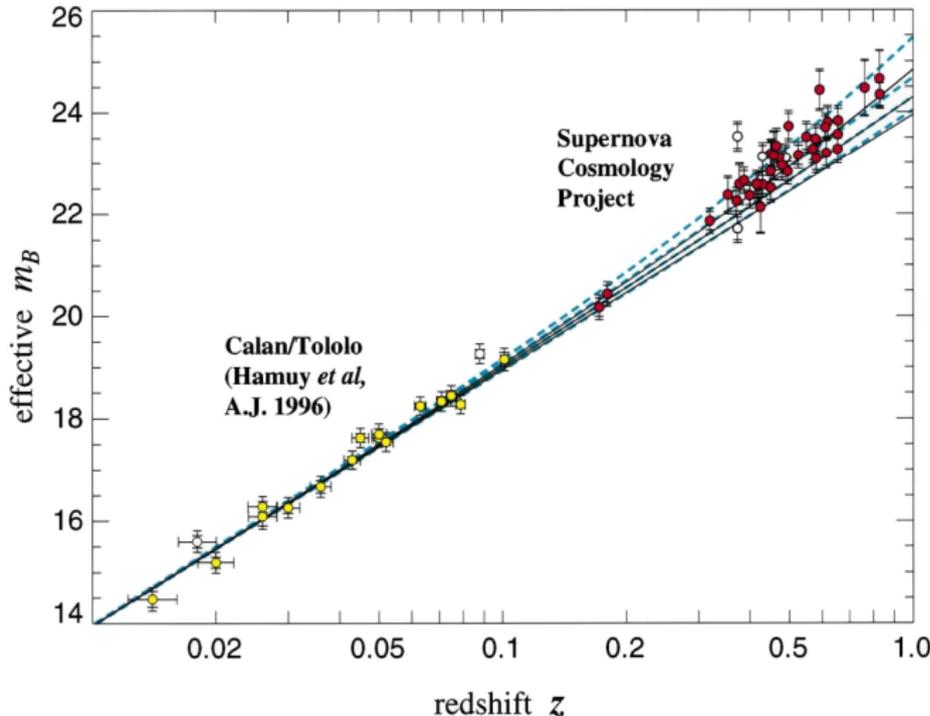
Les problèmes du Big Bang

- Une singularité initiale ?
 - peut-être pas...
 - un Univers étrangement homogène ?
 - résolu avec l'inflation
 - pourquoi une inflation ?
 - à cause du découplage des interactions forte et électro-faible
 - un milliardième de particules de plus que d'anti-particules ?
 - à cause de la grande unification des interactions
 - comment "franchir" le mur de Planck ?
 - en unifiant la physique quantique et la relativité

La théorie des cordes pourrait unifier la physique dans un espace-temps à 11 dimensions

Coup de théâtre en 1998

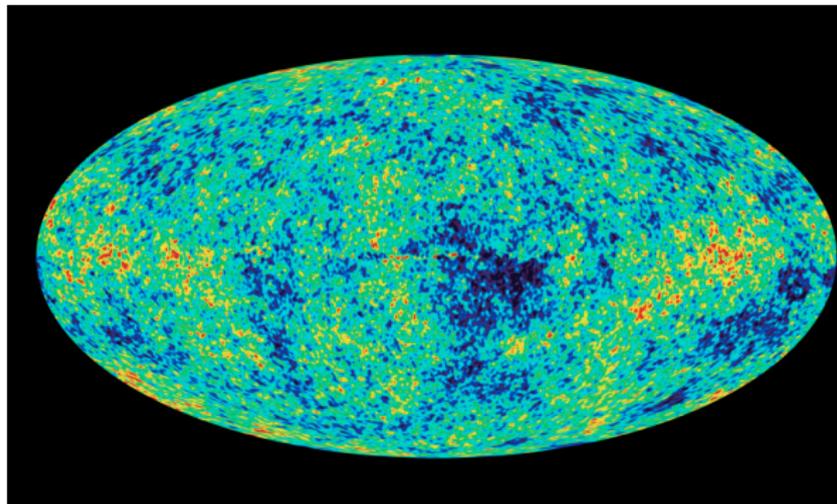
L'Univers accélère (Perlmutter, 1998, prix Nobel en 2011) !



- La **constante cosmologique** reprend du service
- **Cause de l'accélération** : l'énergie "noire" (énergie du vide)

WMAP : les anisotropies du CMB

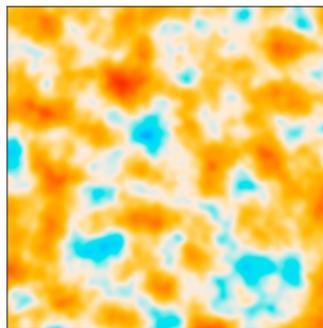
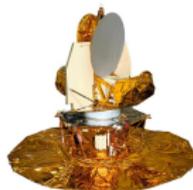
- **2001** : lancement du satellite **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)
- **Effet dipolaire** : le Soleil se déplace à $369 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ par rapport à la zone d'émission du rayonnement
- **Âge de l'Univers** : 13,75 milliards d'années
- **Composition de l'Univers** :
 - matière ordinaire : 4 %
 - matière noire : 22 %
 - énergie noire : 74 %
- **Anisotropies du CMB** : compatible avec les grandes structures de l'Univers actuel



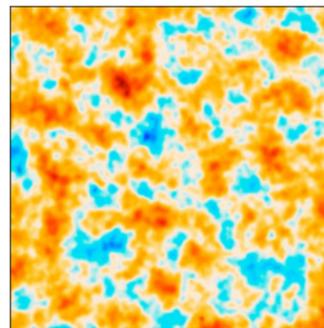
Planck : le CMB en détail



COBE



WMAP



Planck

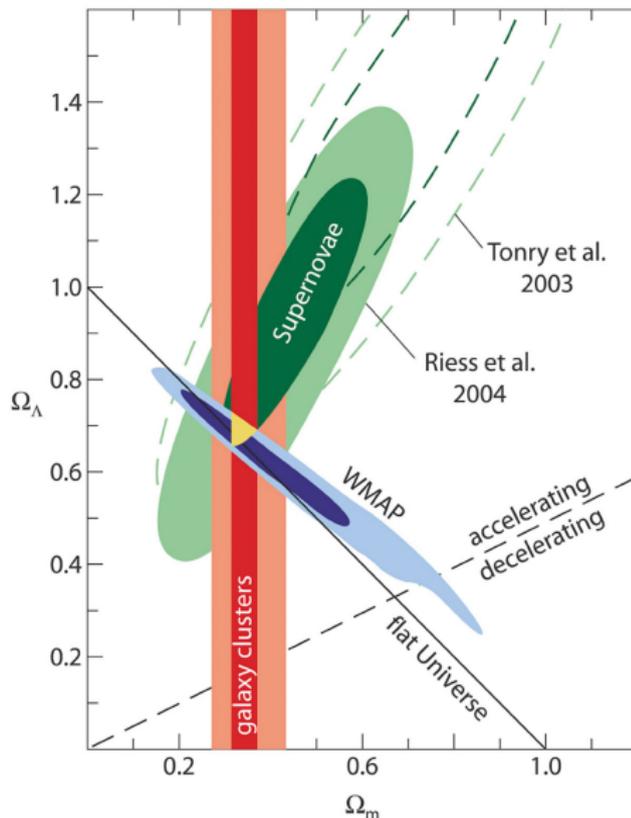
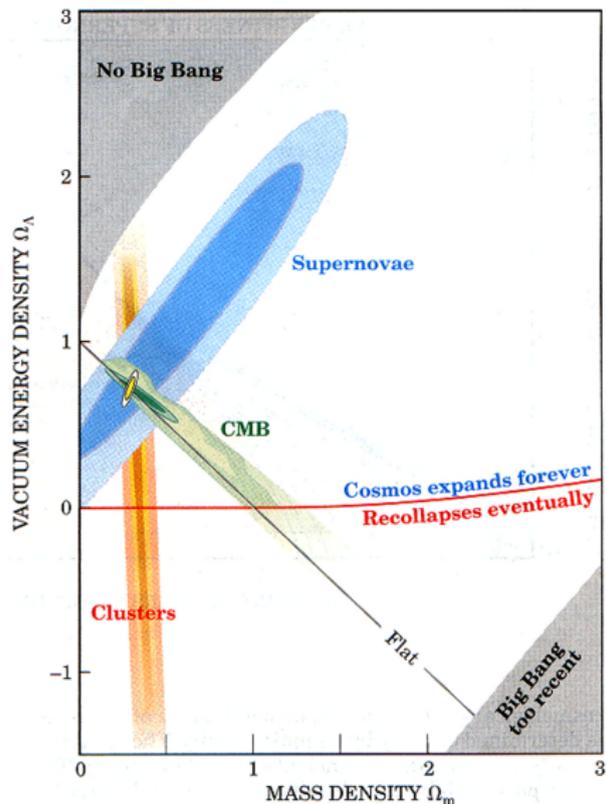
Lancement de Planck : 14 mai 2009

En position (point de Lagrange L2) : 3 juillet 2009

Première image intégrale du ciel : juillet 2010

Fin de mission : 17 janvier 2012

Dernières valeurs des paramètres de l'Univers



Premiers résultats de Planck

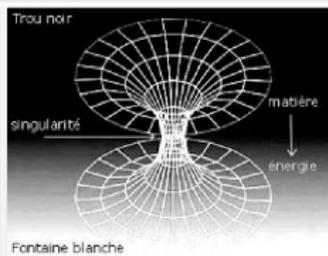
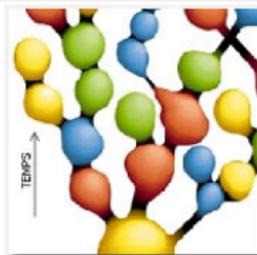
- **Composition de l'Univers :**
 - matière ordinaire : 4,8 %
 - matière noire : 25,8 %
 - énergie noire : 69,4 %
- **Âge de l'Univers :** 13,819 milliards d'années
- **Constante de Hubble :** $H_0 = 67,8 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}$
- **Modèle standard :** confirmation de plusieurs prédictions concernant l'inflation
- **Courbure de l'Univers :** observations compatibles avec un Univers plat

Un bilan plus complet sera fourni courant 2014...

Le destin de l'Univers

- **Le Big Crunch** : l'expansion de l'Univers pourrait s'arrêter puis s'inverser
→ **peu probable**
- **Le Big Chill** : l'expansion pourrait continuer indéfiniment, au-delà de l'extinction des dernières étoiles
→ **probable**
- **Le Big Rip** : l'énergie noire pourrait devenir répulsive à courte distance et disloquer la matière
→ **possible**

La réponse dépend (1) du taux d'accélération et d'énergie noire,
(2) de la densité et de la courbure de l'Univers



Vers la fin de la physique théorique ?

Un enjeu majeur pour le XXI^e siècle :

Unifier

la relativité générale

et la mécanique quantique

Pour développer la **gravitation quantique**, il nous faut :

- un nouveau Newton
- quelques philosophes

→ **et la physique théorique aura terminé son œuvre...**

Bibliographie

- **Galileo Galilei**, “*Dialogue sur les deux grands systèmes du monde*” (pp. 316-317), Seuil, 1992
- **Jean-Pierre Petit**, “*Les aventures d’Anselme Lanturlu – Tout est relatif*”, Belin, 1985
- **James Smith**, “*Introduction à la relativité*”, Masson, 1997
- **Jean-Marie Vigoureux**, “*L’univers en perspective*, Ellipses, 2006
- **Rémi Hakim**, “*Gravitation relativiste*, EDP Sciences, 2001
- **Werner Heisenberg**, “*Physique et philosophie*”, Éditions Albin Michel, Paris, 1961
- **Claude Cohen-Tannoudji**, “*Mécanique quantique*”, vol. I & II, 1997
- **Michel Bitbol**, “*Mécanique quantique, une introduction philosophique*”, Flammarion, 1997
- **Francis Bernardeau**, “*Cosmologie*”, EDP Sciences, 2007
- **Steven Weinberg**, “*Les trois premières minutes de l’univers*”, Seuil, 1988
- **Jacques Demaret**, “*Univers, les théories de la cosmologie contemporaine*”, Le Mail, 1991