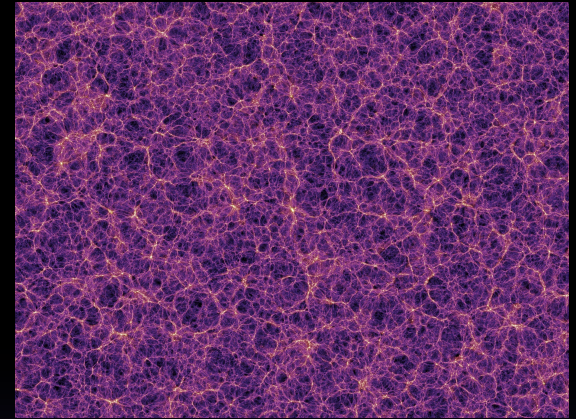
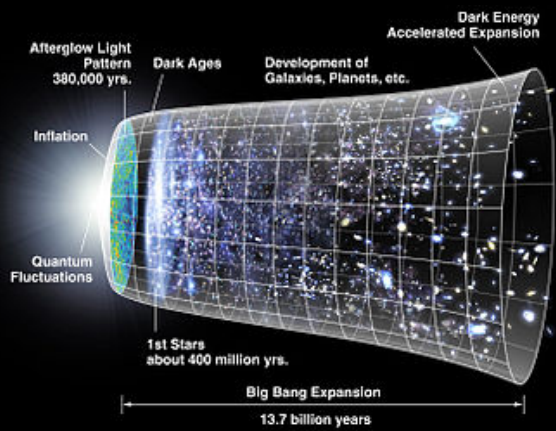
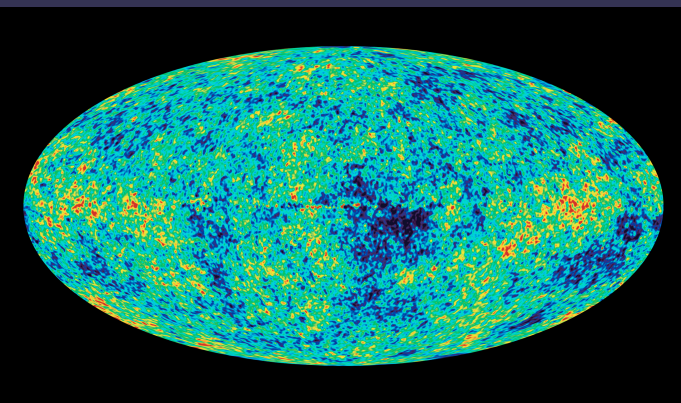




Cosmologie

Eric Lagadec



Les systèmes du Monde

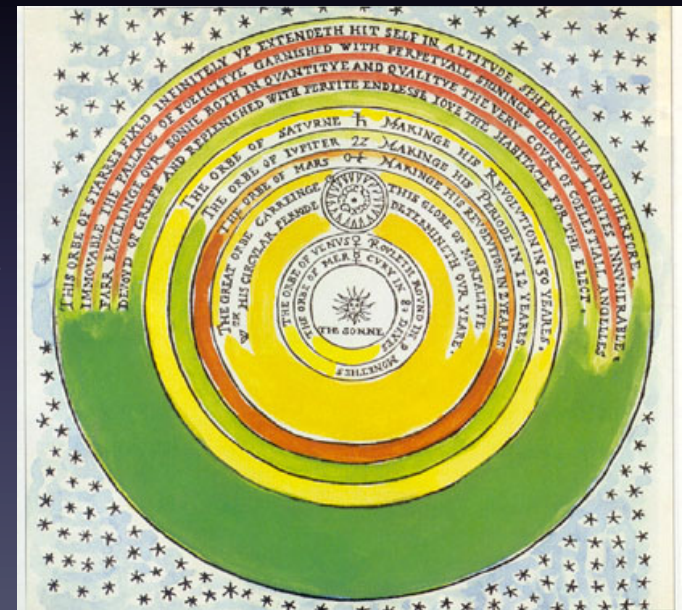
Platon et Aristote :

Terre au centre

Rôles du cercle et de la sphère : figures parfaites, harmonieuses
(=symétriques):

Éléments de base pour
la structure du ciel parfait.

Cercles et sphères :
structure concentrique de sphères emboîtées
Épicycles : combinaison de cercles



Les systèmes du Monde

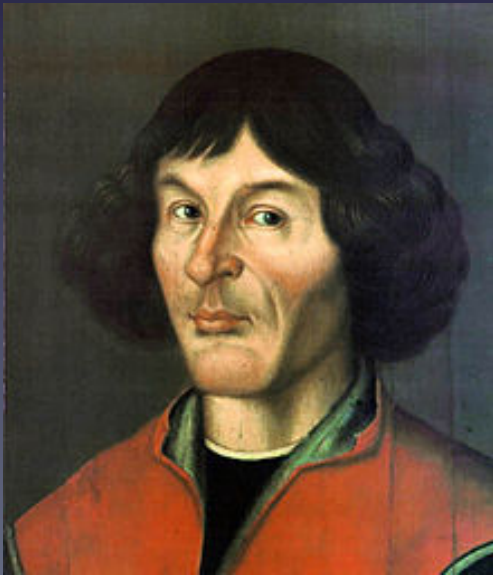
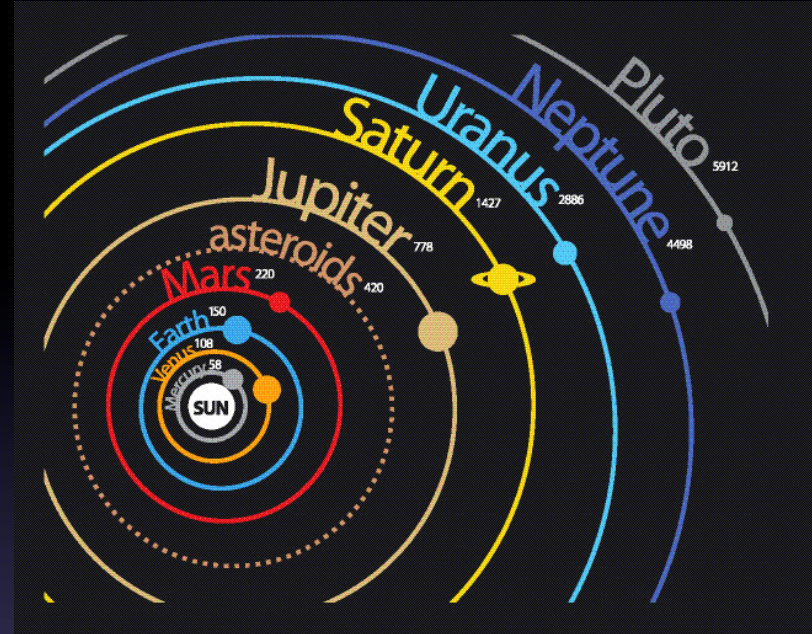
Copernic :

La révolution Copernicienne

Modèle héliocentrique

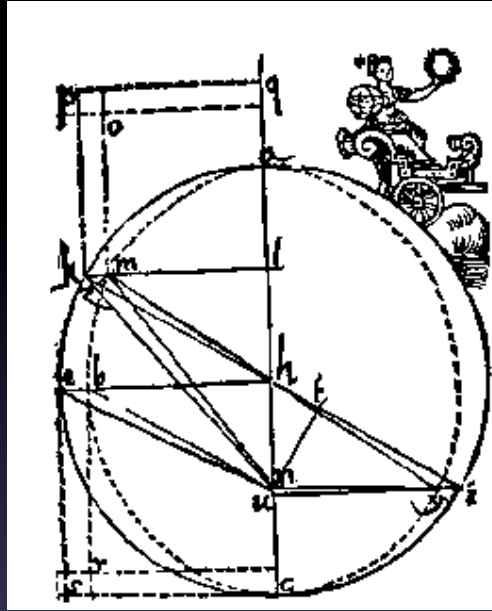
Changement de centre

Toujours les mouvements circulaires



Les systèmes du Monde

Kepler : cercles --> ellipses



Encore plus harmonieux ! (selon lui : harmonie des sphères)

Kepler : harmonie du monde

Encore plus harmonieux ! (selon lui : harmonie des sphères)



D'Aristote à Newton

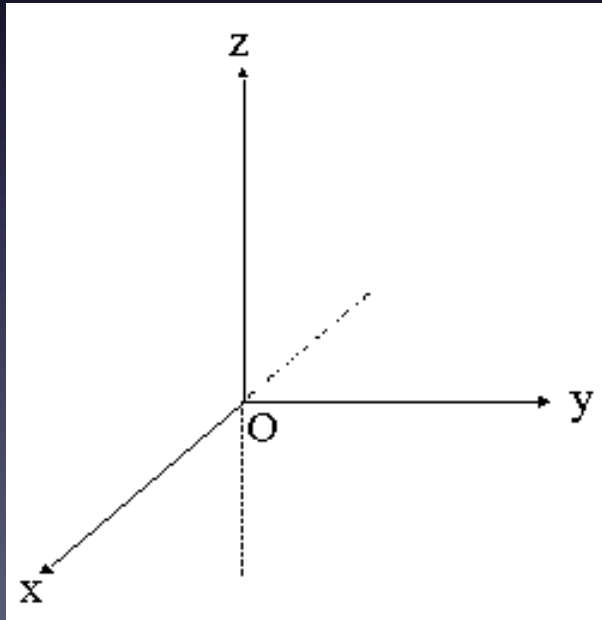


- Newton (1642-1727)

Théorie de la gravitation

L'univers est l'espace euclidien infini à trois dimensions. Les astres sont mus par la gravité.

Le temps est absolu.



« L'espace est de durée éternelle et de nature immuable, et ce parce qu'il est l'effet émanant d'un être éternel et immuable. Si jamais l'espace n'avait pas existé, Dieu, à ce moment-là, n'aurait été présent nulle part... » (Newton, *De Gravitatione*).

Problèmes cinématique de Newton

La cinématique de Newton est fondée sur la relativité (galiléenne) du mouvement

Au XIX^e, les physiciens s'aperçoivent que la loi d'addition des vitesses ne s'applique pas à la lumière (c constant) → crise

Doit-on considérer deux cinématiques différentes ?
Deux conceptions différentes de l'espace, du temps et de leurs rapports ?

La crise sera résolue par l'introduction de **la relativité restreinte**.

Le paradoxe d'Olbers

- La nuit est noire!
- Mais pourquoi?
- Heinrich Olbers (1824): implications très importantes, et une des preuves du Big Bang!!



Le paradoxe d'Olbers

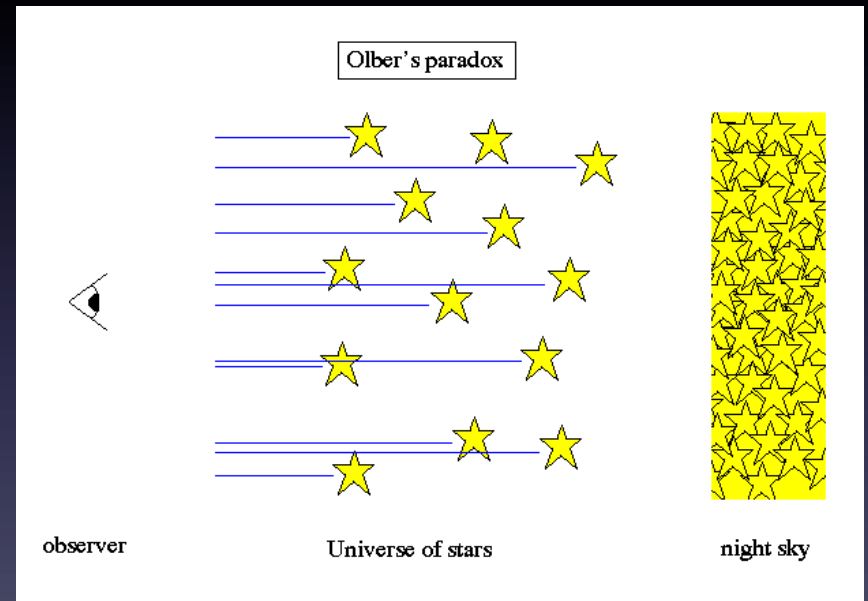
- L'Univers de Newton est:
- Eternel
- Infini (sinon il s'effondrerait sous son poids)
- L'espace est plan
- Le temps est indépendant de l'espace



Le paradoxe d'Olbers

A quoi ressemble le ciel selon le modèle de Newton?

- Dans n'importe quelle direction on devrait voir une étoile
- Le ciel devrait être brillant!!



Le paradoxe d'Olbers

La solution d'Olbers

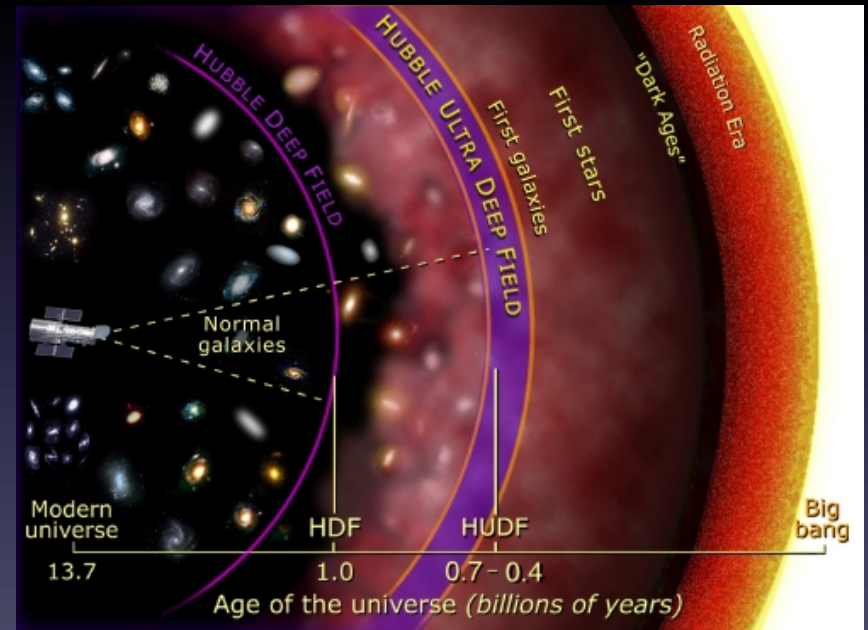
- L'univers est rempli de milieu absorbant, qui agit comme le brouillard (poussière)
- Mais dans ce cas la, la lumière devrait être réémise a une autre longueur d'ondes... ca ne marche pas!



Le paradoxe d'Olbers

La solution du Big Bang!

- L'Univers n'est pas infiniment vieux (13.7 milliards d'années)
- On ne peut pas voir au delà de 13.7 milliards d'années lumières
- Les étoiles ne brillent pas depuis toujours (Le soleil a 4.5 milliards d'années).



Le paradoxe d'Olbers

Résumé

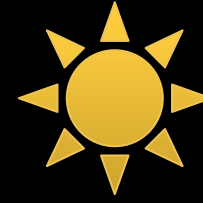
- Le ciel de nuit est noir
- L'émission de lumière doit être finie dans le temps, l'espace ou les deux
- Test fondamental pour les modèles cosmologiques
- Le modèle de Big Bang l'explique par le fait que l'âge de l'Univers n'est pas infini!
- L'Univers n'existe pas comme il est depuis toujours!!

Pourquoi le ciel est bleu?

- Diffusion de Rayleigh de la lumière du soleil par les particules d'air
- Plus la longueur d'onde est courte, plus la lumière est diffusée



Pourquoi le ciel est bleu?



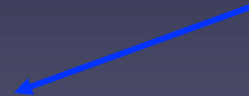
Lumiere blanche: RGB



**Le bleu est diffuse:
loin du soleil, le ciel
est bleu**



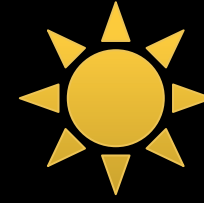
Soleil: rouge + vert =
jaune



Plus d'atmosphere
(soleil bas) il ne reste
plus que le rouge



Pourquoi le ciel est bleu?



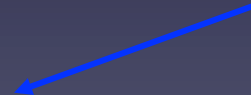
Lumiere blanche: RGB



Le bleu est diffuse:
loin du soleil, le ciel
est bleu



Soleil: rouge + vert =
jaune



Plus d'atmosphere
(soleil bas) il ne reste
plus que le rouge



Parcours vers la Relativité Générale

Newton et la Mécanique Classique

La Mécanique Classique

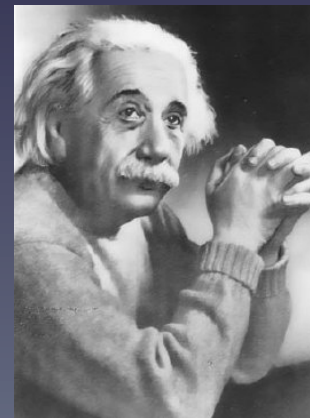
- Explique : la gravitation sur Terre.
- Prédit : la trajectoire des planètes (Kepler)
- N'explique pas : l'aberration de la lumière



Parcours vers la Relativité Générale

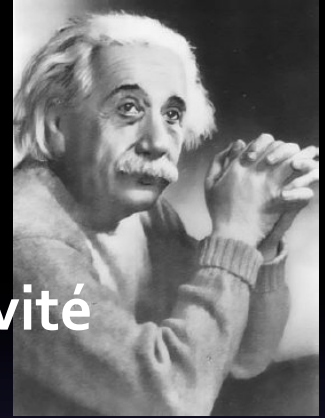
Einstein et la Relativité Restreinte

- Englobe : la Mécanique Classique
- Prédit : la dilation du temps
- N'explique pas : la déviation des rayons lumineux par le Soleil



Parcours vers la Relativité Générale

Einstein et la Relativité Générale



- Englobe : la Mécanique Classique, la Relativité Restreinte
- Explique : la déviation des rayons lumineux par le Soleil
- Prédit : les trous noirs, le big bang, le big crunch
- N'explique pas : le monde infiniment petit

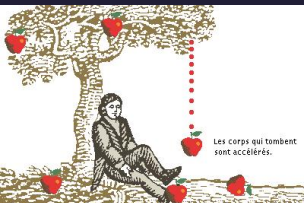
Newton

Théorie : les lois de la Mécanique Classique



Les trois lois de la mécanique de Newton :

- Un corps qui n'est soumis à aucune force est soit immobile, soit sur une trajectoire rectiligne à vitesse constante
- Un corps de masse constante soumis à une force accélère dans la direction de cette force
- Si on applique une force sur un corps maintenu immobile, alors ce dernier applique une force opposée appelée réaction

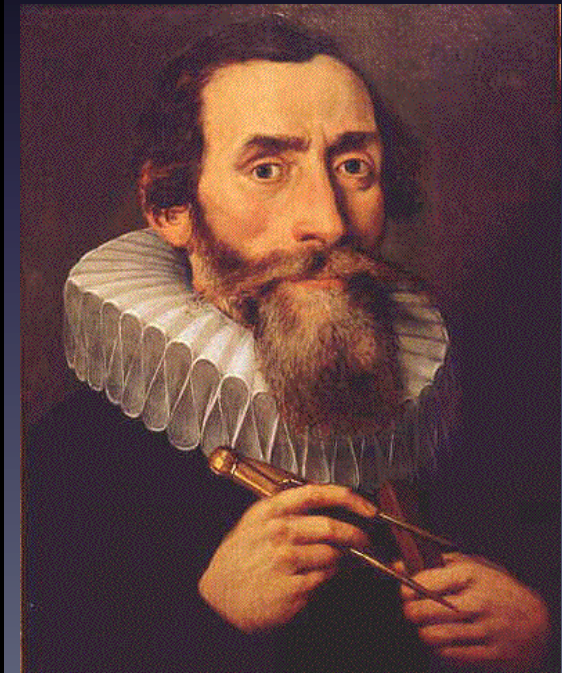


Newton

Prédictions : le mouvement des planètes par Kepler



Grâce aux trois lois de Newton, on peut retrouver les lois que Kepler a créées pour calculer les trajectoires des planètes autour du Soleil : ce sont des ellipses.

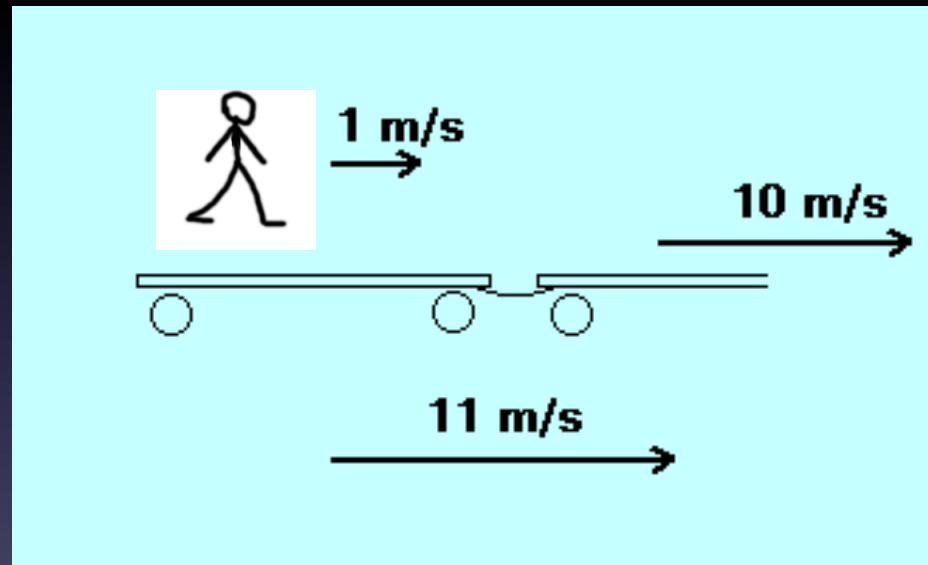


Newton

Prédiction : la loi d'addition des vitesses



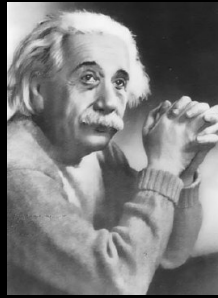
Dans la Mécanique Classique de Newton, les vitesses s'additionnent :



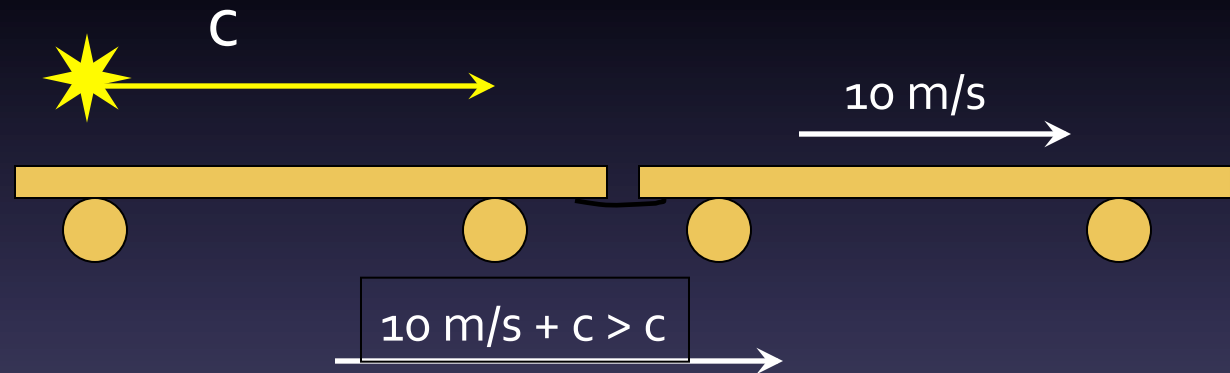
Un homme se déplace à 1 m/s dans un train qui avance à 10 m/s : la vitesse de l'homme est de 11 m/s par rapport au sol.

Relativité Restreinte d'Einstein

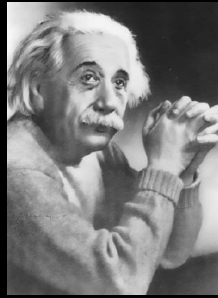
Problème : contradiction de la vitesse de la lumière



Principe : la vitesse de la lumière c est finie et constante.
Les limites de la Mécanique Classique de Newton:



La loi d'addition des vitesses de la théorie de Newton est **contradictoire** avec le fait que la **vitesse de la lumière c soit finie**



Relativité Restreinte d'Einstein

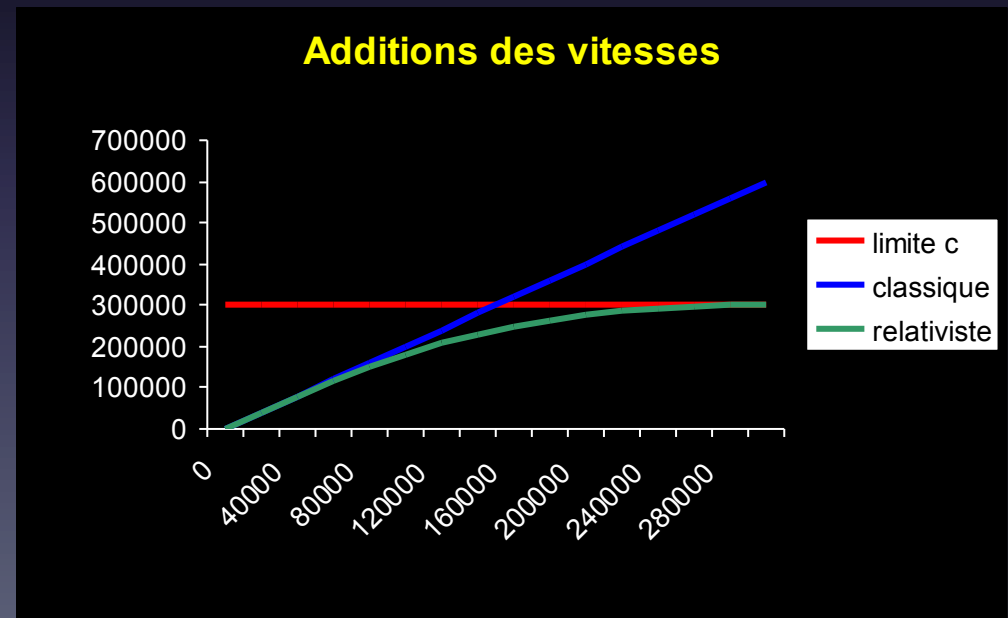
Théorie : l'addition relativiste des vitesses

Pour résoudre cette contradiction, il faut que les vitesses ne s'additionnent pas simplement comme le fait Newton.

Einstein a déduit une loi « d'addition relativiste » des vitesses qui contraint les vitesses en dessous de c :

$$v_{xAR} = \frac{v_{xAB} + v_{xBR}}{1 + \left(\frac{v_{xAB}}{c} \right) \left(\frac{v_{xBR}}{c} \right)}$$

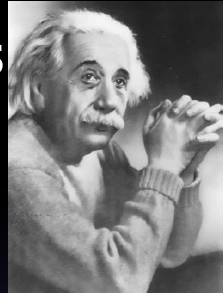
Ce facteur contraint les vitesses sous la limite de c



Relativité Restreinte d'Einstein

Prédictions : la contraction des longueurs, la dilatation du temps

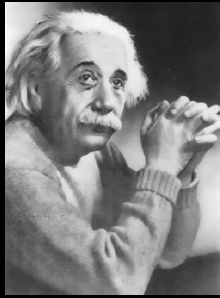
Cette loi des vitesses relativistes a des conséquences spectaculaires et bien connues :



- Les sommes de vitesses proches de c se « contractent », pour rester inférieures à c
- Une vitesse, c'est le rapport d'une longueur à une durée, donc les longueurs se « contractent » aux vitesses proches de c ...
- ... et le temps se « dilate » ou s'écoule plus lentement aux vitesses proches de c

Relativité Restreinte d'Einstein

Prédictions : le voyageur de Langevin



Les jumeaux de Langevin ne sont plus jumeaux

Je suis immobile. Le temps s'écoule normalement sur Terre! Mon frère jumeau reviendra de son voyage moins âgé que moi



A grande vitesse, le temps s'écoule moins vite pour moi! Je vieillis moins vite que mon frère jumeau

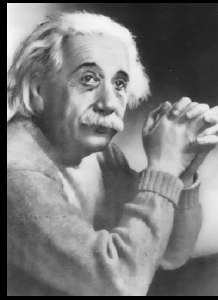


Vitesse proche de celle de la lumière



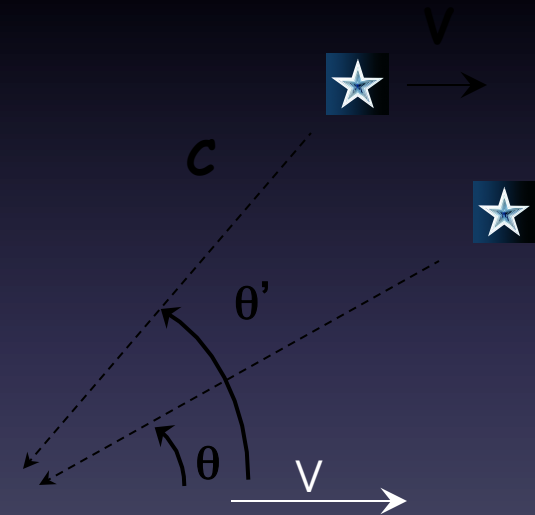
Relativité Restreinte d'Einstein

Prédictions : l'aberration de la lumière



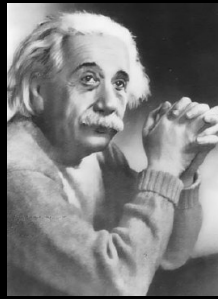
L'aberration de la lumière « déplace » les étoiles

L'observateur sur la Terre croit observer l'étoile dans la direction θ , au lieu de θ' . C'est un effet relativiste dû au fait que la somme relativiste des vitesses de l'étoile et de la lumière créent un décalage angulaire apparent.

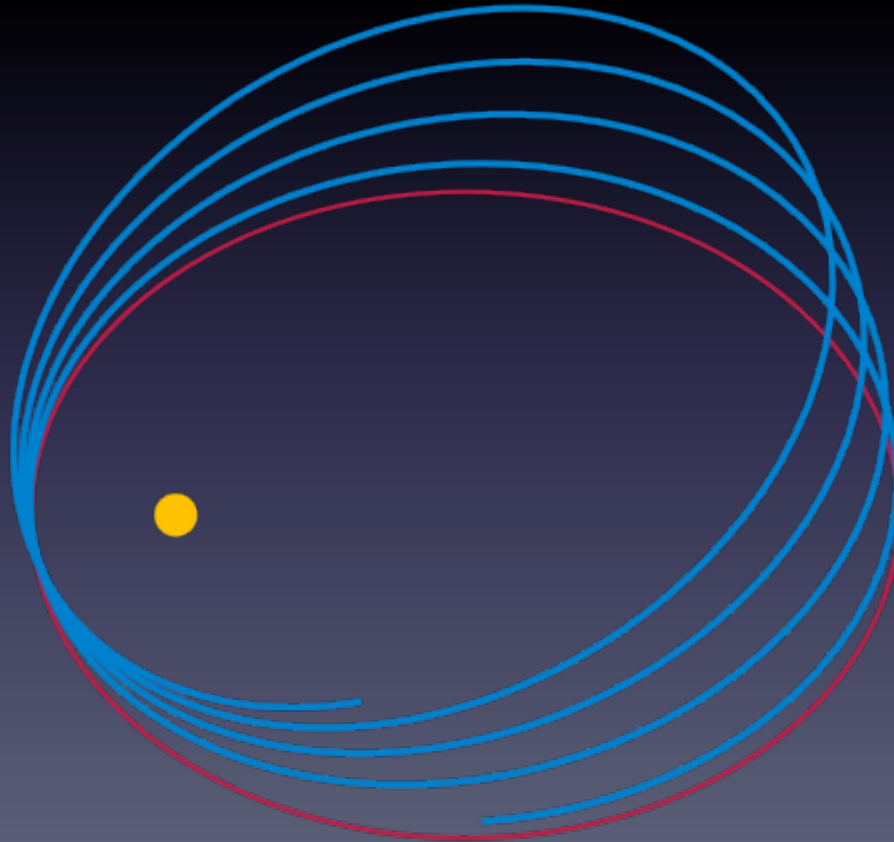


Relativité Générale d'Einstein

Problème : la précession du périhélie de Mercure

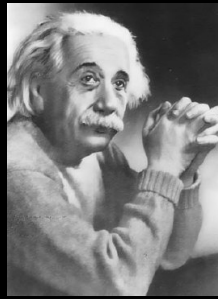


Les limites de la Relativité Restreinte : la précession du périhélie de Mercure inexpliquée

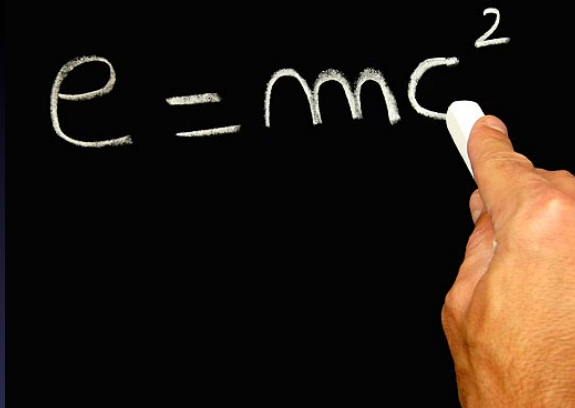


Relativité Générale d'Einstein

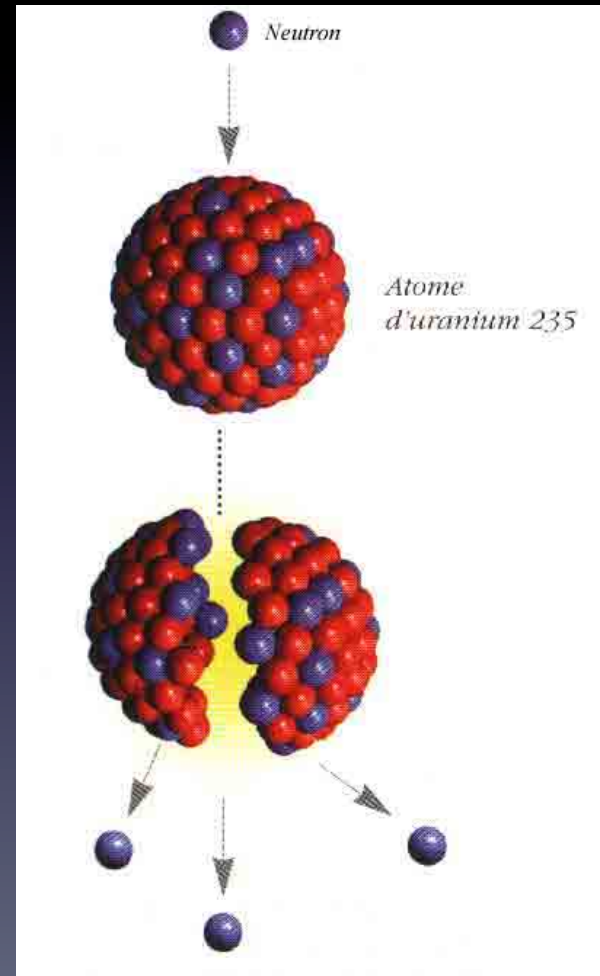
Théorie : l'équivalence entre masse et énergie

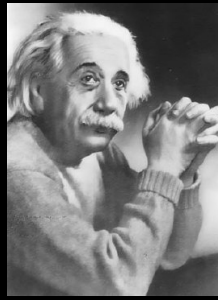


L'équivalence masse-énergie est déduite de la Relativité Restreinte :

A hand is shown writing the equation $E = mc^2$ on a blackboard with white chalk. The hand is holding a piece of chalk and is in the process of writing the equation.

Si un noyau était entièrement désintégré, sa masse serait convertie en une énergie mc^2 , ce qui représente une énergie considérable à cause du terme c^2 qui est très grand.

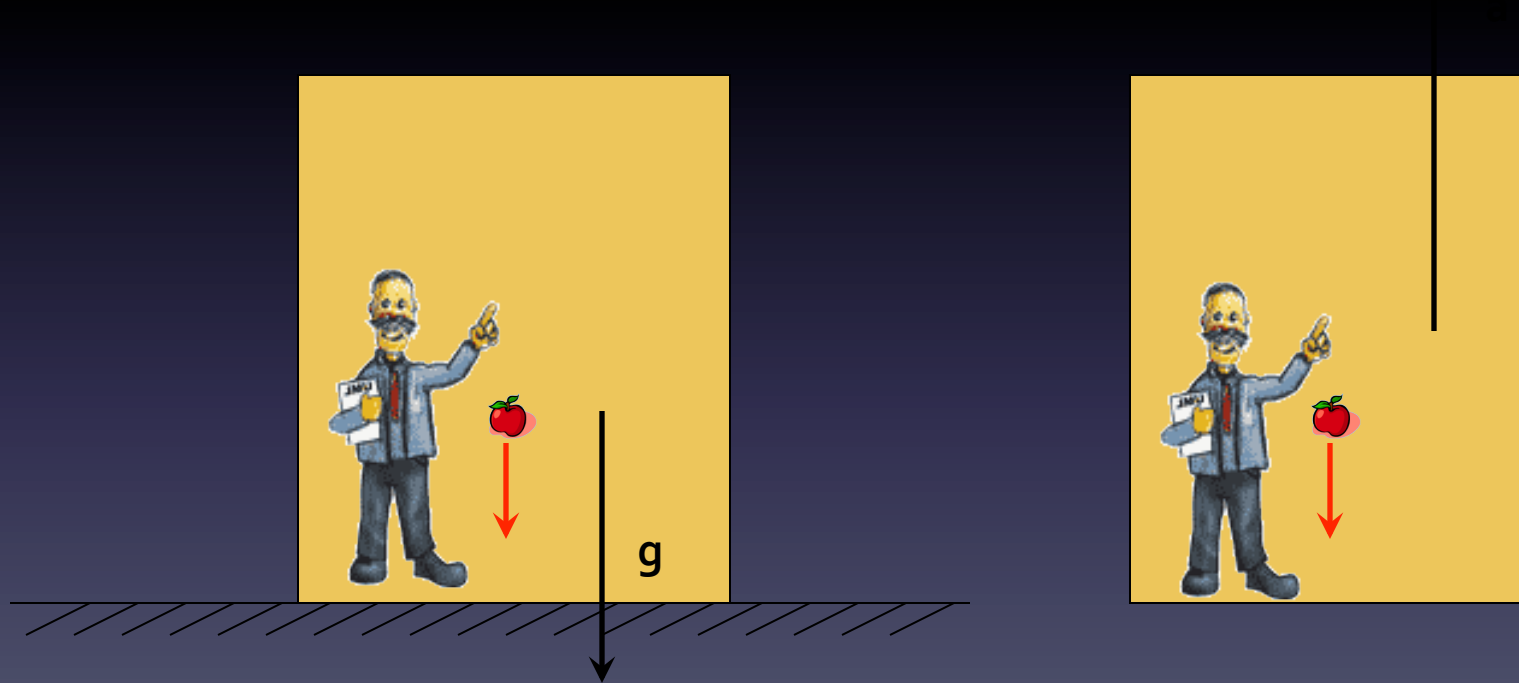




Relativité Générale d'Einstein

Théorie : le Principe d'Equivalence

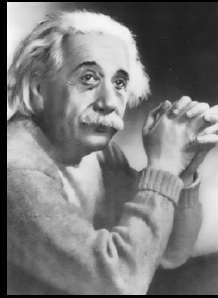
L'équivalence masse-énergie conduit à l'équivalence gravitation-accélération : c'est le Principe d'Equivalence



Pour l'observateur dans la cabine, l'accélération a ou la gravitation g ont le même effet sur la pomme et ses sensations

Relativité Générale d'Einstein

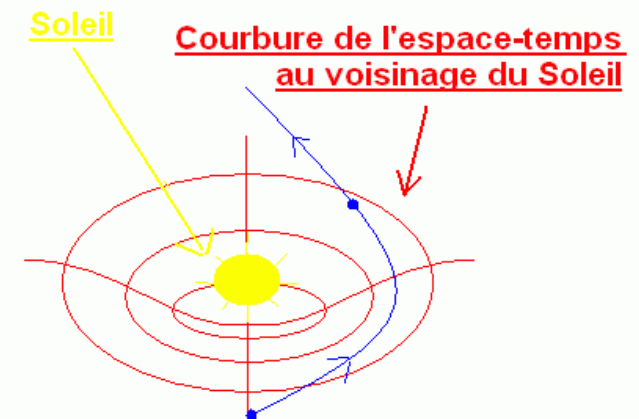
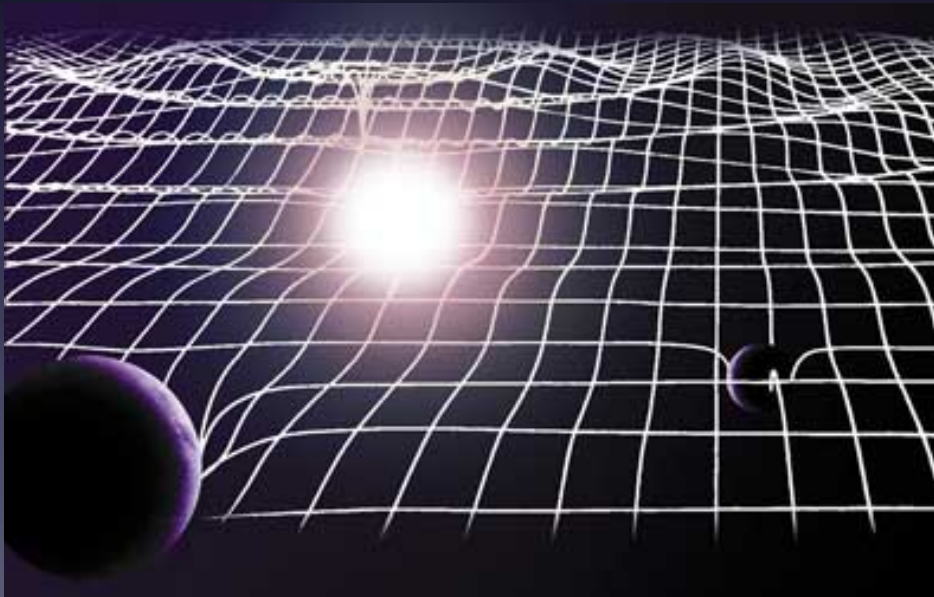
Théorie : la déformation de l'espace-temps (1)



Accélération, gravitation, masse, énergie sont fondamentalement un même phénomène.

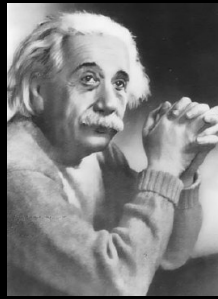
La masse ou l'énergie déforment l'espace temps.

Ce sont ces déformations qui provoquent les accélérations et les trajectoires non rectilignes uniformes



Relativité Générale d'Einstein

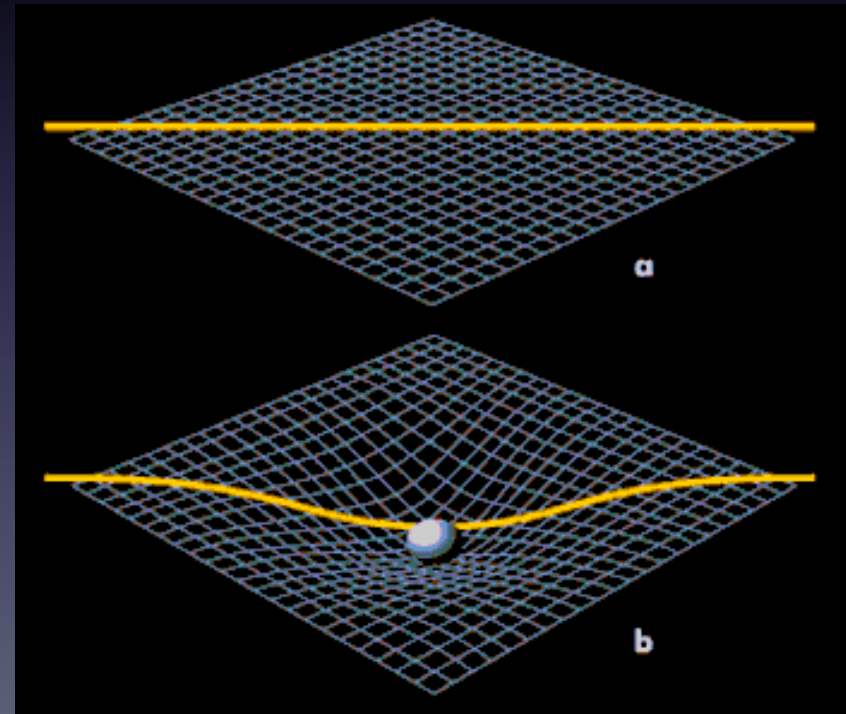
Théorie : la déformation de l'espace-temps (2)



Dans la théorie de Newton, les corps se déplacent suivant diverses trajectoires (droites, ellipses, paraboles, etc.)

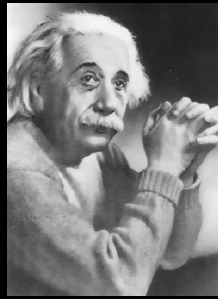
Dans la théorie de la Relativité Générale d'Einstein, les corps se déplacent toujours en ligne droite, mais c'est l'espace qui, déformé par l'énergie ou la masse, déforme les lignes droites.

Dans un espace courbe, ce sont les géodésiques (plus court chemin le long d'une surface courbe) qui remplacent les lignes droites.



Relativité Générale d'Einstein

Théorie : l'énergie courbe l'espace-temps



$$R^i_j - \frac{1}{2}g^i_j R = \frac{8\pi k}{c^4} T^i_j$$

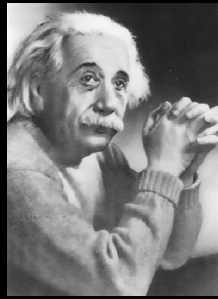
Il y a équivalence
entre énergie
et courbure

La courbure de l'espace-temps est représentée par un tenseur dans une variété différentiable (modèle d'espace géométrique non plat)

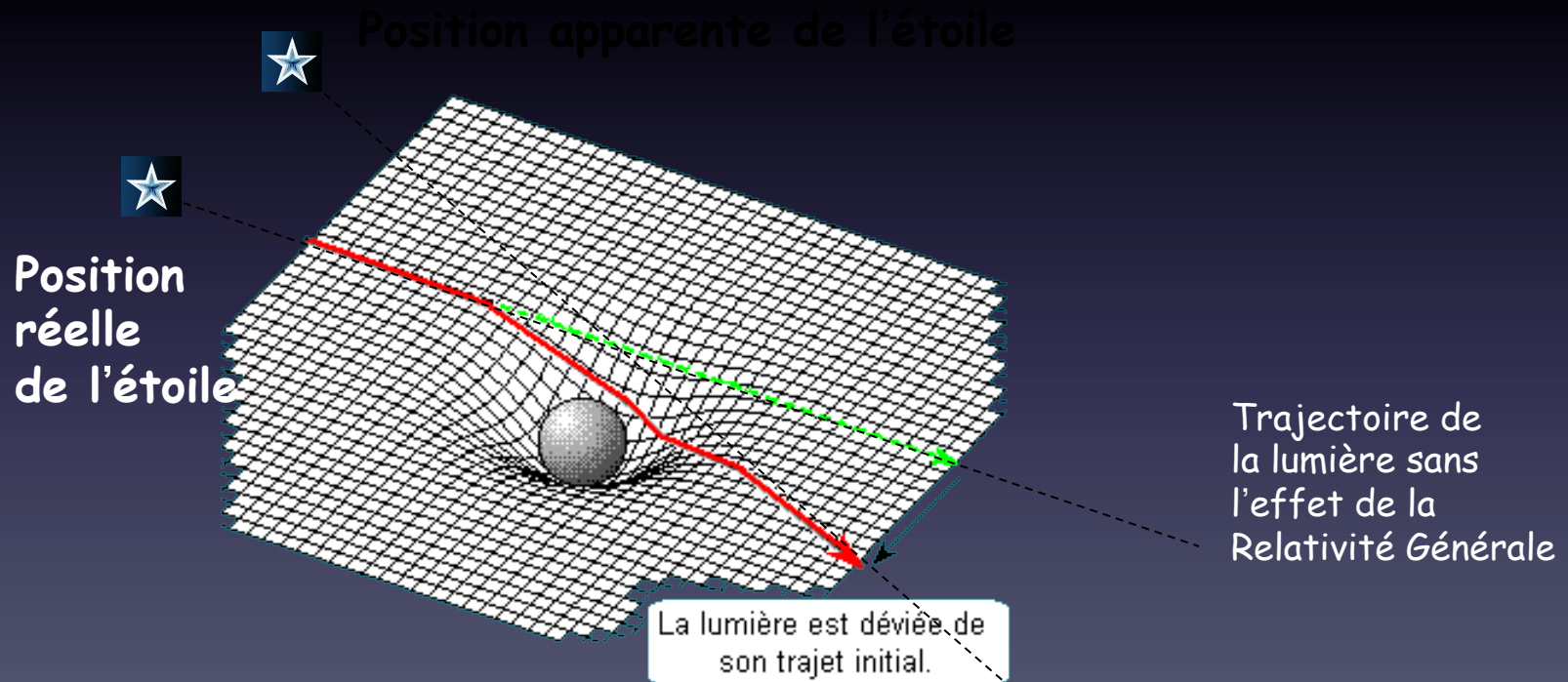
L'énergie est représentée par un tenseur (outil mathématique pour calculer les transformations) qui contient la masse, l'impulsion et la pression

Relativité Générale d'Einstein

Prédictions : déviation des rayons lumineux



Les rayons lumineux sont déviés par la courbure de l'espace-temps à proximité d'une masse importante

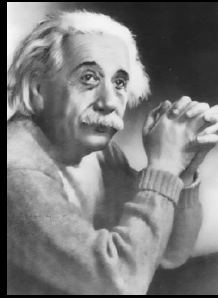


numiano

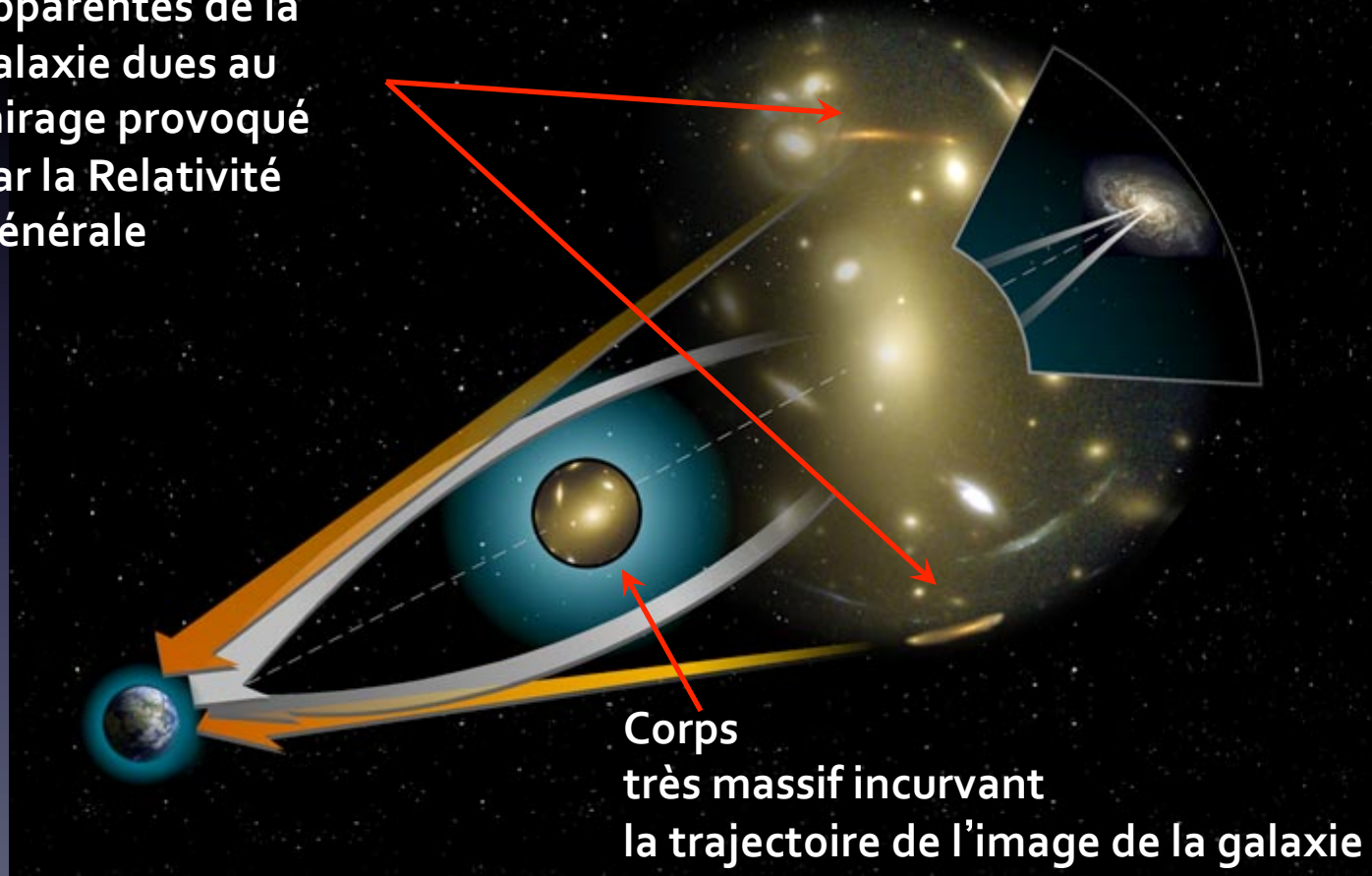


Relativité Générale d'Einstein

Prédictions : le mirage (ou lentille) gravitationnel(le)

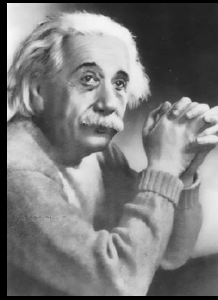


Deux positions
apparentes de la
galaxie dues au
mirage provoqué
par la Relativité
Générale

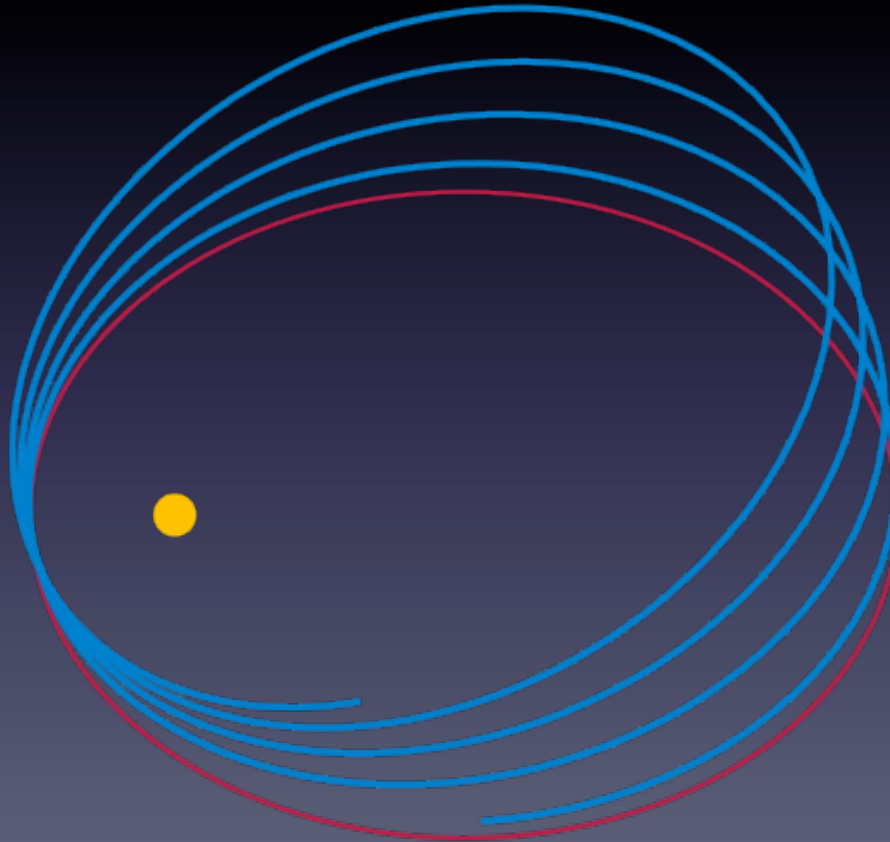


Relativité Générale d'Einstein

Prédictions : précession du périhélie de Mercure



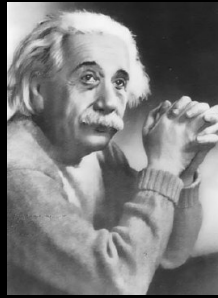
La précession du périhélie de Mercure est expliquée par la Relativité Générale.



La courbure de l'espace-temps, provoquée par les planètes et le Soleil voisins, déforme la trajectoire elliptique de Mercure, et entraîne sa précession

Relativité Générale d'Einstein

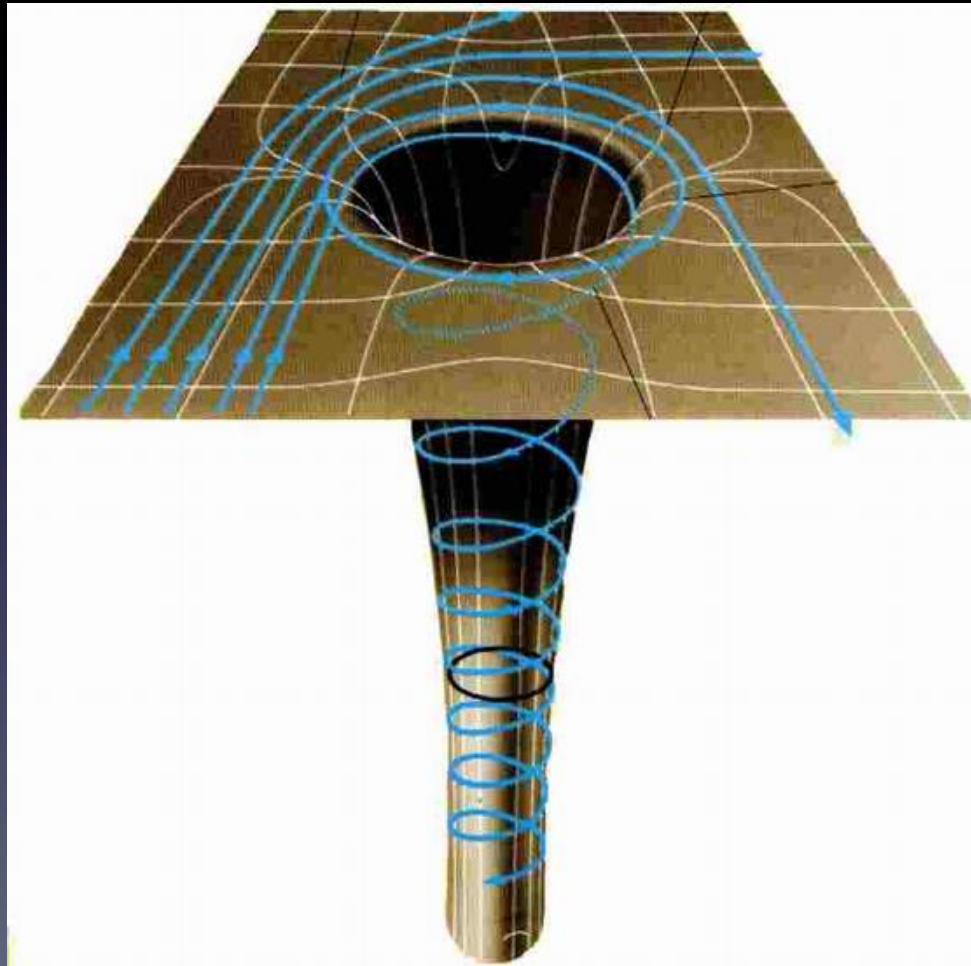
Prédictions : les trous noirs



Les trous noirs, un phénomène troublant...

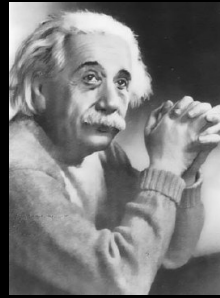


La masse au centre du trou noir est si grande que les rayons lumineux se courbent et ne peuvent pas s'échapper. Ils sont aspirés et restent prisonniers du trou noir... qui porte ainsi bien son nom !



Relativité Générale d'Einstein

Prédictions : le big bang et le big crunch



Le big bang, le début de notre histoire

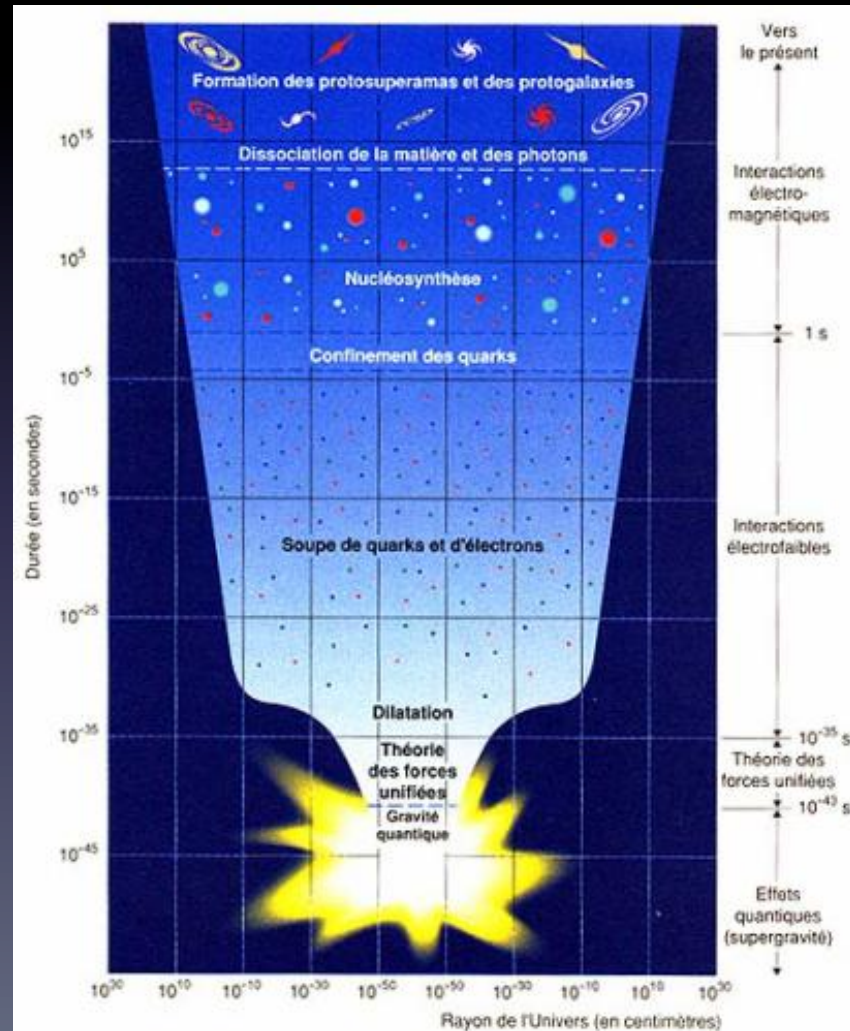
La Relativité Générale prédit assez bien l'histoire de l'Univers, à partir de ses premières microsecondes jusqu'à aujourd'hui.

Deux Univers sont possibles :

- L'un est en expansion pour l'éternité depuis sa naissance : le « big bang ».

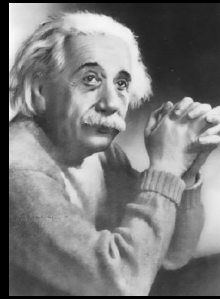
- L'autre est en expansion actuellement, mais s'écroulera sur lui-même dans le futur, en un « big crunch ».

C'est la mesure de la densité de l'Univers qui permettra de trancher...



Relativité Générale d'Einstein

Application : le GPS



Sans Einstein, le GPS n'existerait pas...



Le GPS calcule la position d'une voiture en mesurant les temps nécessaires aux rayons électromagnétiques pour parcourir la distance satellites/voiture.



Pour localiser la voiture au mètre près, il faut :

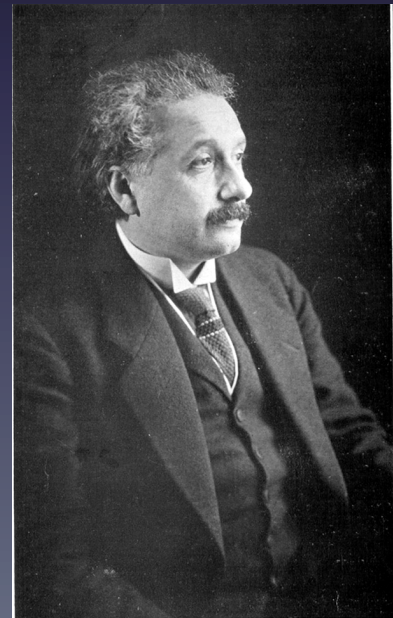
- tenir compte de la dilatation du temps de la relativité restreinte sur les satellites → erreur = 0,1 ns/s, entraînerait 10 mètres d'erreur au bout de 5 minutes !
- tenir compte de la courbure de l'espace-temps au voisinage de la Terre par la relativité générale, qui ralentit les horloges au sol → erreur = 0,5 ns/s, entraînerait 5 mètres d'erreur au bout de 5 minutes !

De La Relativité générale au Big-bang

- 1916 Einstein : Relativité générale
 - Univers : **espace-temps (espace à 4 dimensions) courbé par l'énergie et la matière.**
 - Interdépendance du temps et de l'espace.
 - Hypothèse : Univers homogène et isotrope.
 - La théorie est dynamique et instable (l'espace-temps évolue au cours du temps).
 - Ajout de la **Constante Cosmologique** pour obtenir un **Univers stable et éternel.**
- 1924 Alexandre Friedmann : l'Univers est dynamique, en expansion, et né d'une explosion initiale.
- 1929 Edwin Hubble : Découverte de l'expansion de l'univers
 - Plus les galaxies sont lointaines plus elles s'éloignent rapidement.
- 1933 Georges Lemaître : **Théorie du Big-bang.**



« les résultats concernant un monde non-stationnaire contenus dans les travaux de Friedmann me semblent douteux » (Einstein).



L'échelle des distances

Mesure des distances :

Un des problèmes les plus difficiles de l'astrophysique moderne !

→ on procède **par étapes**
des objets les plus proches...
... aux plus lointains

→ **échelle des distances cosmologique**



Georgia O'Keeffe
« Ladder to the Moon »

La parallaxe

La distance des étoiles assez proches peut être obtenue par la mesure de sa **parallaxe** annuelle

Les parallaxes les plus précises ont été mesurées par le satellite Hipparcos (**H**igh **P**recision **PAR**allax **C**ollecting Satellite) de l'ESA, lancé en 1989

La précision est ~ 0.001 secondes d'arc
→ les distances des étoiles situées à moins de 100 pc sont connues à $\sim 10\%$ près

Rappel : $1 \text{ pc} = 206265 \text{ UA}$
 $= 3.26 \text{ AL}$



Le satellite Hipparcos

Les Céphéides

1912 : Henrietta Leavitt découvre que la **période** des Céphéides est une fonction (proportionnelle) de leur **luminosité**

Ce sont des étoiles brillantes → observables à assez grande distance
→ étalons de distance très utiles

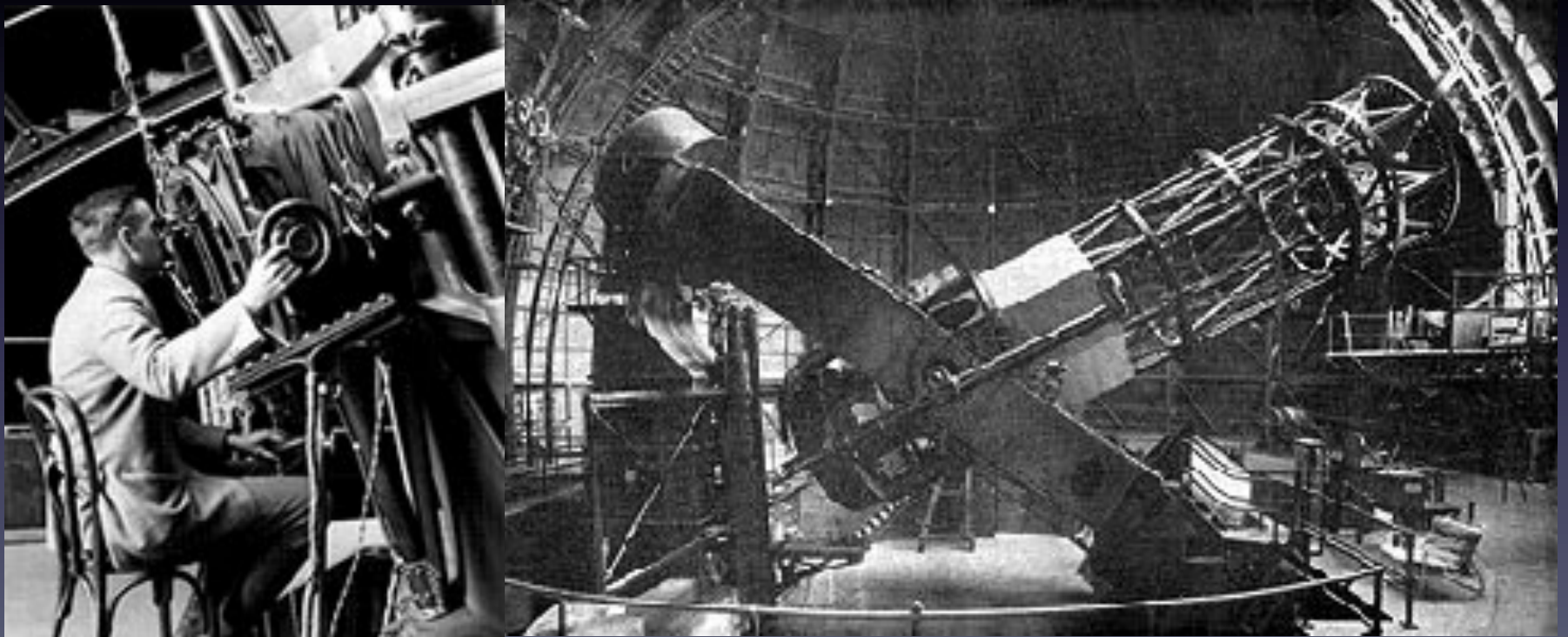
Difficultés :

- Il faut connaître la distance de certaines Céphéides pour calibrer la relation
- La relation période – luminosité dépend de la composition chimique de l'étoile



L'expansion de l'Univers:

Hubble (1929) mesure la « récession » des galaxies lointaines grâce au télescope de 1,5 mètres du Mt Wilson

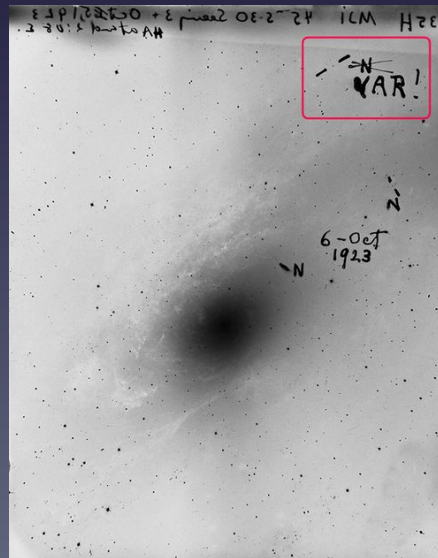


La loi de Hubble

1929 : Hubble découvre que les galaxies extérieures suffisamment lointaines s'éloignent de nous avec une **vitesse proportionnelle à leur distance** :

$$V = H_0 D$$

- d : mesuré par étalons de distance
- v : mesuré par effet Doppler :
- H_0 = **constante de Hubble** (en km/s/Mpc)



Edwin Hubble

La loi de Hubble

Hubble obtint $H_0 \approx 500 \text{ km/s/Mpc}$, ce qui est trop grand d'un facteur 7 à 8 par rapport à la valeur moderne

- Il estimait les distances par les étoiles les plus lumineuses
- Pour les galaxies éloignées, il prenait des amas pour des étoiles individuelles
→ sous-estimation des distances

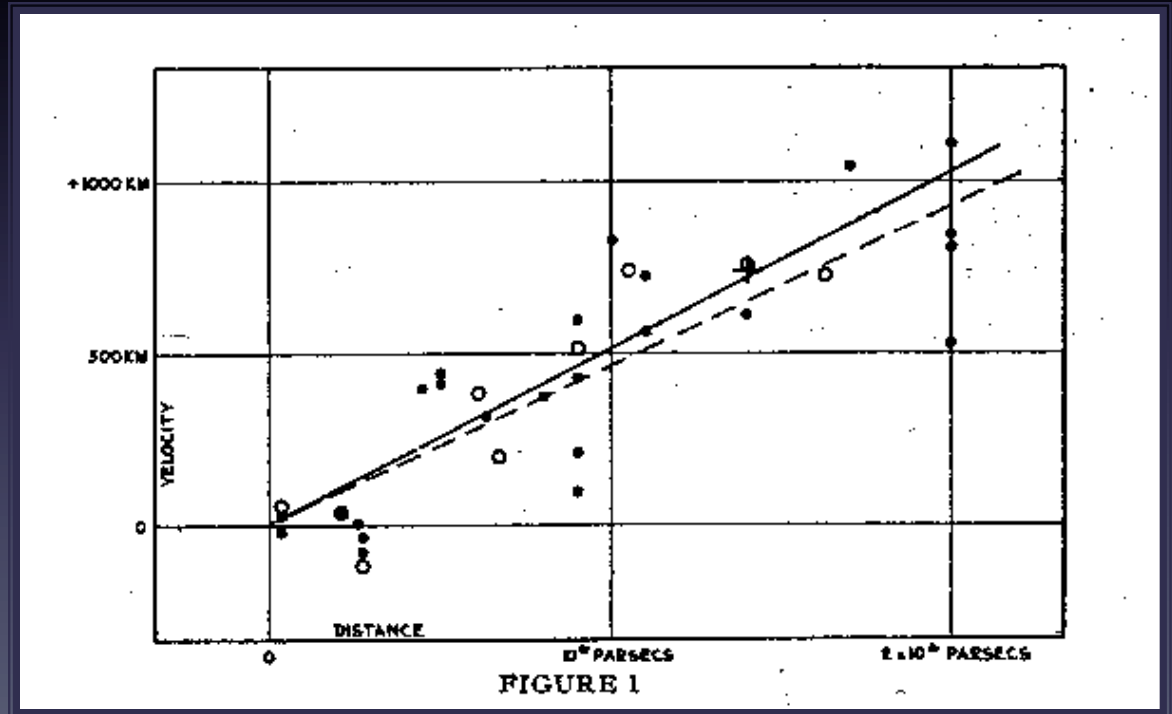
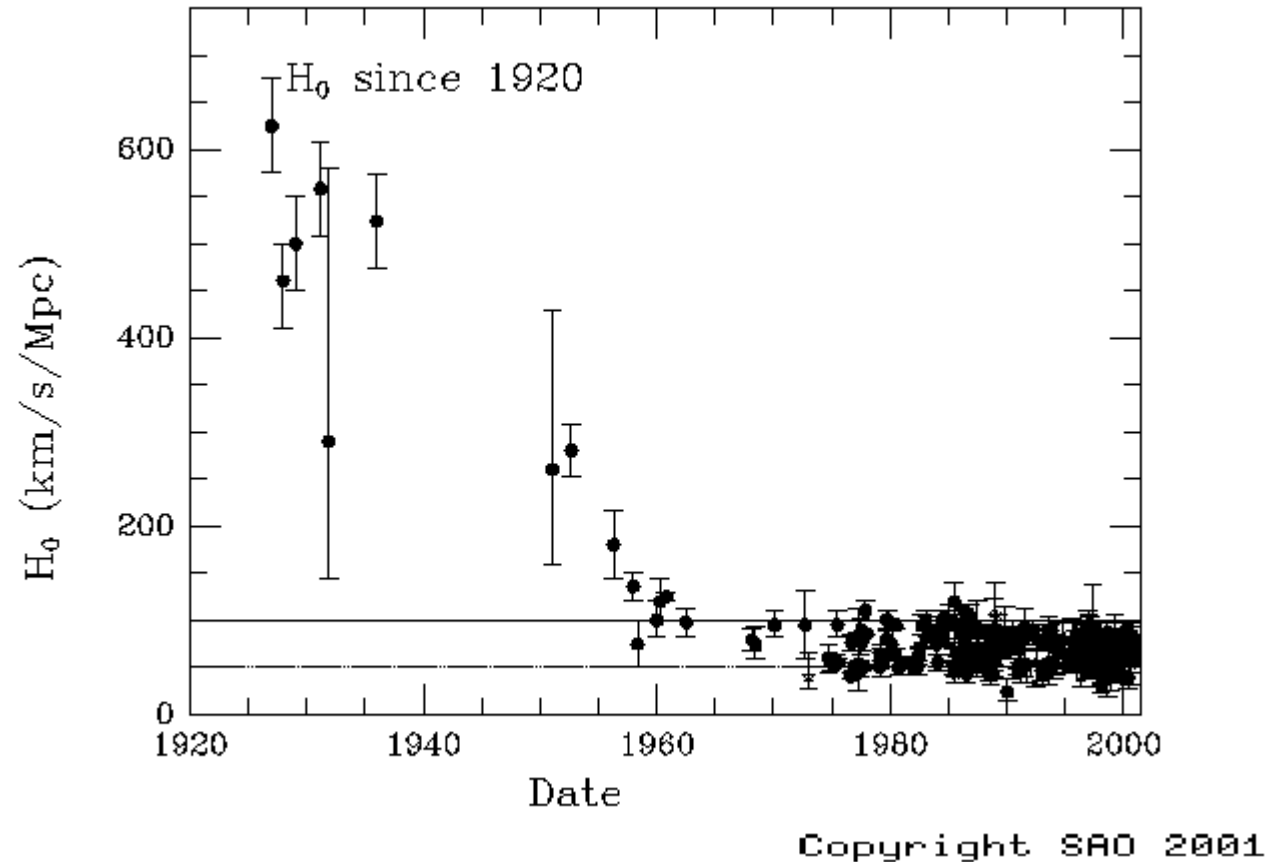


Diagramme original de Hubble

La constante de Hubble

À partir des années 1960, les mesures de la constante de Hubble donnent des valeurs proches de 50 ou 100 km/s/Mpc → querelles d'experts

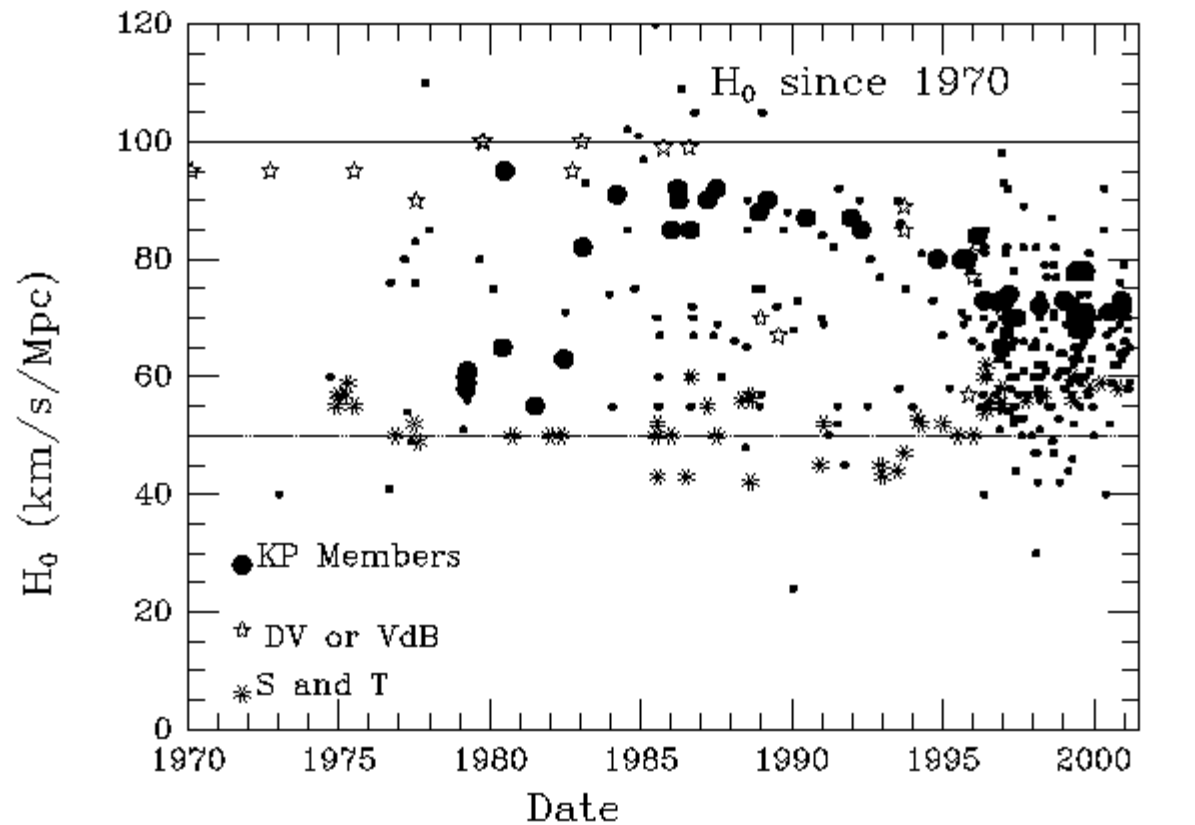


Mesures de la constante de Hubble depuis 1920

La constante de Hubble

Les mesures les plus récentes

Satellite Planck:
 $H_0 \sim 67$



Copyright SAO 2001

Mesures de la constante de Hubble depuis 1970

Constante d'Hubble

- Expansion de l'Univers maintenant mesurée avec les Supernovae de type IA.
- Age de l'Univers:
 - $T_0 = \frac{d}{H_0 d} \rightarrow T_0 = \frac{1}{H_0}$

Par exemple, si $H_0 = 73 \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$, alors

$$T_0 = 13.4 \text{ Milliards d'années}$$

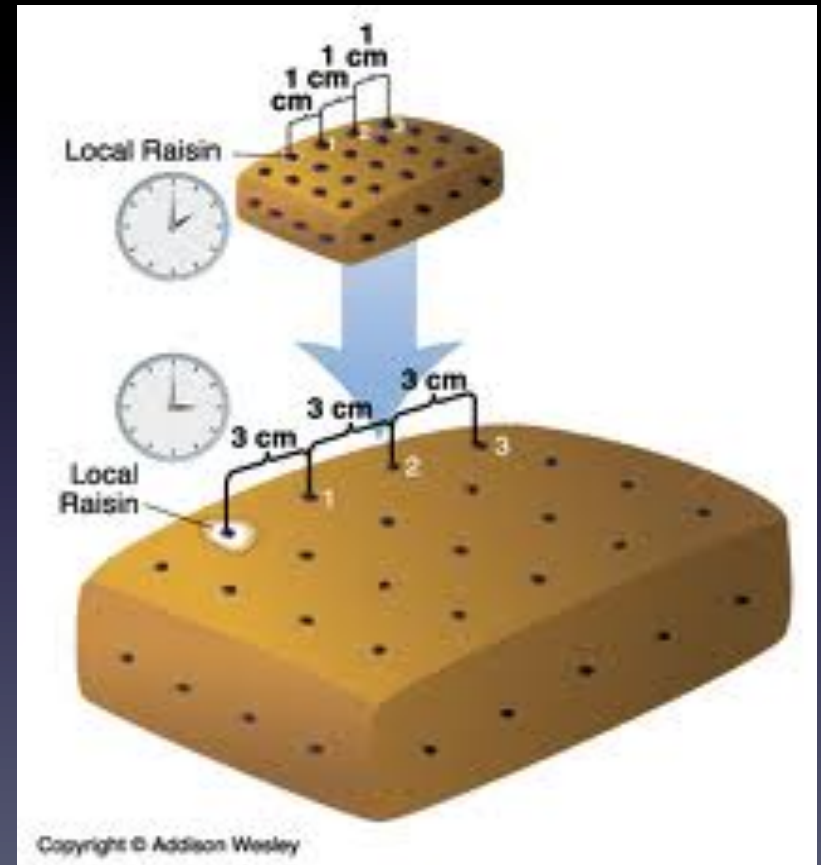
Age de l' Univers

- Dernière mesures:
 $T_0 \sim 13.7 \pm 0.2$ Milliards d'années
- Age des étoiles: ~ 13.4 milliards d'années $\pm 6\%$

Les plus vieilles étoiles sont plus jeunes que l'Univers.

Expansion de l'Univers

- L'espace entre les galaxies est en expansion, pas les galaxies elles même. La gravité l'emporte alors sur l'expansion
- Exemple: raisin dans un gâteau
 - Quand la pate gonfle, le pain est en expansion, l'espace entre les raisins aussi, mais pas les raisins



Centre de l'Univers?

- Il n'y a pas de centre de l'Univers
 - L'expansion semble la même peu importe où on se trouve
 - Tous les points semblent être le centre de l'expansion

Origines de la théorie du Big Bang

- Georges Lemaître (1927) conclut que si l'Univers est en expansion, il devait être plus petit hier qu'aujourd'hui: l'Univers a un instant de création
- A ce moment a commencé l'expansion observée aujourd'hui
- Idée non acceptée: Fred Hoyle "Big Bang"

Origins de la theorie du Big Bang

- George Gamow (1948) suggère que si l'Univers a été créé par un "Big Bang chaud" alors:
 - De l'H et de l'He devrait être créés juste après ce Big Bang.
 - La grande densité provoquerait une expansion rapide
 - L'expansion de l'Univers entrainerait un refroidissement et une condensation de H et He en étoiles et galaxies
 - Aujourd'hui, a cause du refroidissement progressif, le rayonnement du a la recombinaison (quand les atomes neutres se sont formes ~380,000 ans après le Big Bang) devrait avoir un température de 3K.
 - La production de H et He pendant le Big Bang (et non pas juste dans les étoiles) expliquerait pourquoi le rapport H:He dans l'Univers est plus grand que ce que les étoiles peuvent produire

Mise en evidence de l'expansion

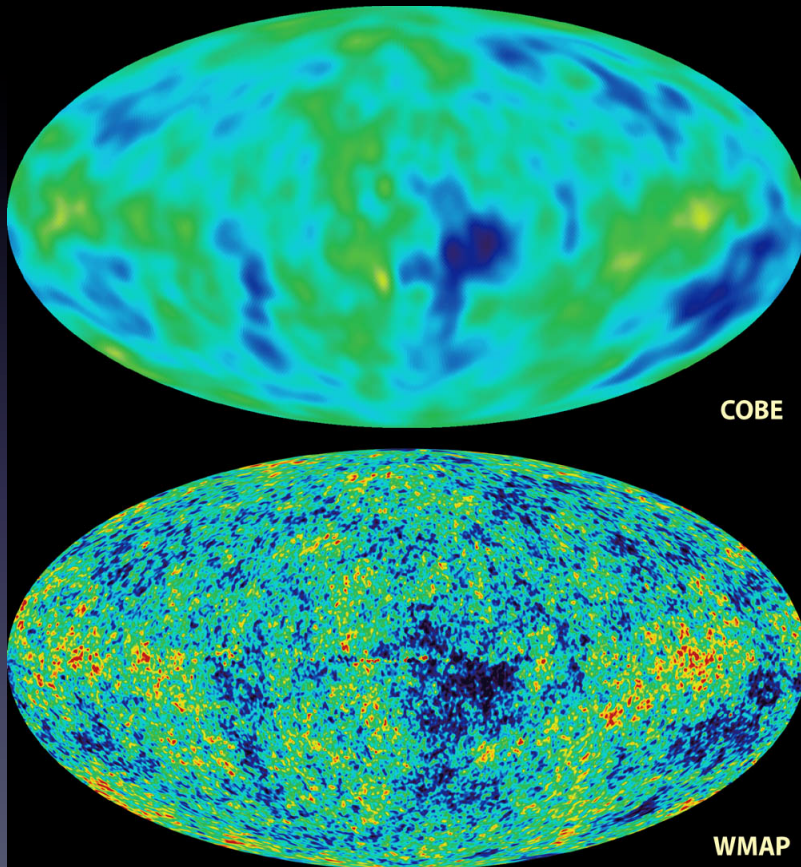
- Décalage vers le rouge de la lumière des galaxies éloignées
- Redshift cosmologique, du a l'expansion de l'Univers

- ✓ Le rayonnement fossile:
Détecté par Penzias et Wilson (1965)



Prix Nobel de Physique 1978

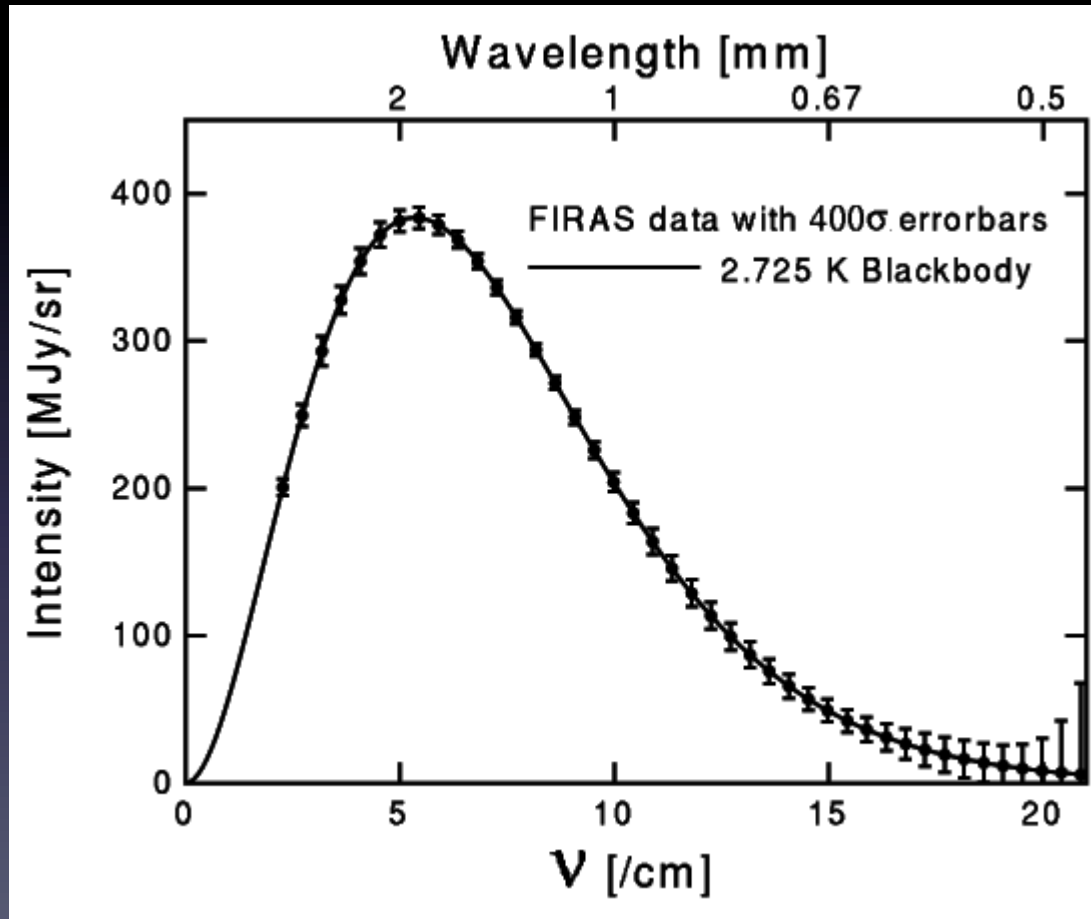
Fond diffus cosmologique



- Uniforme, mais avec grumeaux: nécessaire pour la formation de structures

✓ Le rayonnement fossile:

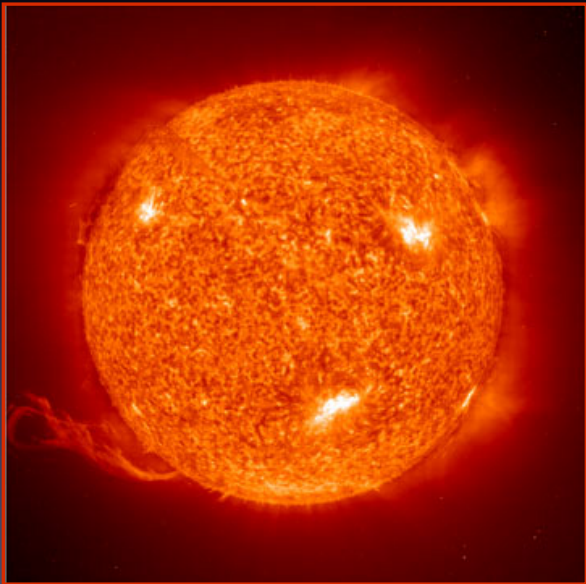
Spectre de corps noir a 2,725 Kelvin, mesuré très précisément par le satellite COBE (1996)



Autre test du modèle du Big Bang

Prédiction: L'Univers devrait être composé principalement d'hydrogène et d'Hélium.

Observation: L'Univers est composé de ~75% d'hydrogène, ~25% d'hélium



Le soleil: 74.5% H, 24% He

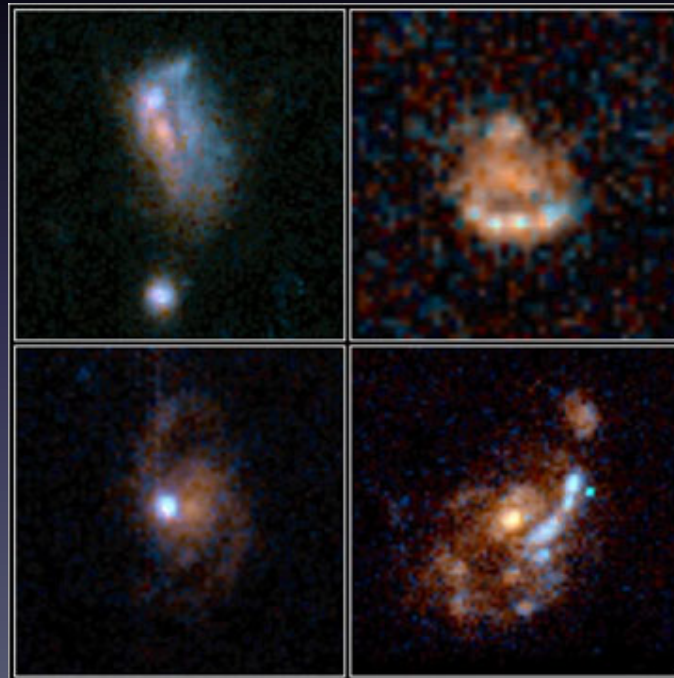


Cecilia Payne

Autre test du modèle du Big Bang

Prédiction: Un Univers en expansion devrait évoluer avec le temps. Si on regarde l'Univers jeune, il devrait être différent

Observation: Les galaxies lointaines sont moins évoluées, physiquement et chimiquement



Problème de l'Horizon

- Même température partout, information se déplaçant plus vite que la vitesse de la lumière

Théorie de l'inflation

- Alan Guth (1970s) :
 - Expansion exponentielle de l'Univers durant un très court instant
 - Cela expliquerait la formation de grumeaux.

Inflation

- A $T = 10^{-35}$ sec, Univers $d = 10^{-24}$ cm
- Entre $T = 10^{-35}$ sec et $T = 10^{-32}$ sec, l'Univers a grandi d'un facteur 10^{50} .
- Expansion plus rapide que la vitesse de la lumière!!

Frise chronologique du Big Bang

- La loi d'Hubble indique que l'Univers est en expansion depuis des milliards d'années.
L'univers était plus dense dans le passé.
- A un moment 0 arrive a un point de densité infinie:

$$T_{\text{age de l'univers}} = 0 \rightarrow \text{Big Bang}$$

$T = 0 \text{ seconde} - 10^{-43} \text{ seconde}$

- Le BIG BANG a lieu.
- Quelque chose provoque l'expansion de ce point infiniment dense.
- Densité si grande que les lois de la physique telles qu'on les connaît ne s'appliquent pas.
- Les 4 forces de la nature sont unifiées
- C'est ce qu'on appelle le temps de Planck

Separation des forces

Après le temps de Planck, la température est descendue à 10^{32} K et la gravité est la première force à se séparer

Les trois autres forces sont encore unifiées...
on essaie de reproduire cela au CERN

$$T = 10^{-35} - 10^{-32} \text{ secondes}$$

- Inflation: la taille de l'Univers augmente d'un facteur 10^{50} .
- C'est l'inflation

Après l'inflation

- La matière est créée
 - Les collisions de photons entraînent la formation de paires de particules élémentaires (électrons-positrons, quarks antiquarks)
 - Annihilation matière- antimatière: la matière l'emporte.
 - Brisure de symétrie

Production de particules dans l'Univers jeune

- Production de particules ayant une energie de moins en moins grande
- Les forces fondamentales sont les meme aujourd'hui qu'au moment de la brisure de symmetrie

$$T = 10^{-6} \text{ secondes}$$

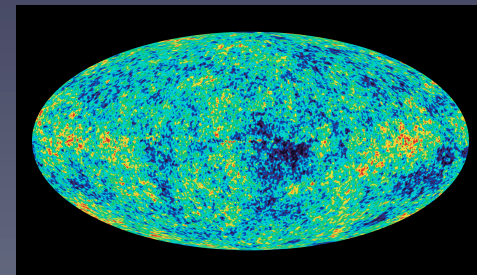
- Assez froid pour la formation de baryons (Protons, Neutrons).
- Baryons se forment en paires aussi
- Annihilation encore, disparition des antibaryons.
- La vitesse des particules n'est plus relativistique, Univers domine par les photons a haute énergie (dominé par la radiation).

T = quelques minutes

- Température ~ 1 GK, densité $\sim$ celle de l'air.
- Neutrons et protons combinent pour former des noyaux de deutérium, hélium et hydrogène
- La température est toujours trop grande pour former des atomes, car ils seraient immédiatement ionisés..
- L'Univers est opaque à cause de l'interaction entre les photons et la matière à haute température.

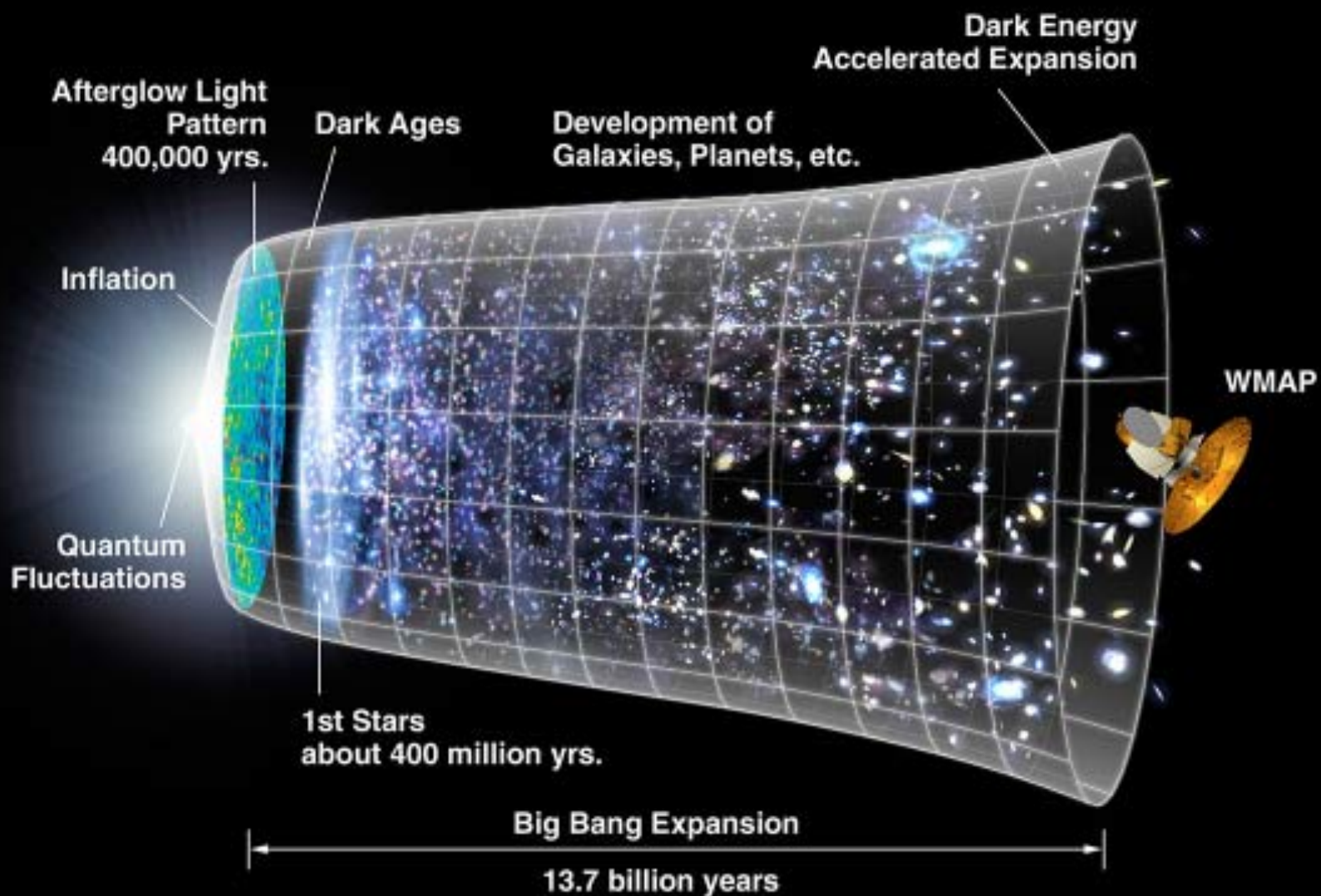
$$T = 379,000 \text{ ans}$$

- L'Univers est assez froid pour que les atomes se forment
- Découplage radiation-matière: les photons peuvent enfin s'échapper: origine du fond diffus cosmologique
- Recombinaison.
- L'Univers est dorénavant dominé par la matière.



$T \sim 400$ million d'années

- Les premières étoiles se forment dans les régions les plus denses
- Ces régions continuent d'accrêter de la matière, formation e galaxies et de gaz
- L'Univers commence a ressembler a ce qu'il est aujourd'hui, et continue a s'étendre et refroidir



✓ Preuves et prédictions du Big-Bang:

- L'expansion de l'Univers
- Le rayonnement fossile
- La formation des galaxies et des amas de galaxies
- Les abondances de H, He, D

