

Introduction à la mécanique

Des structures aux mouvements

20 octobre 2021

Table des matières

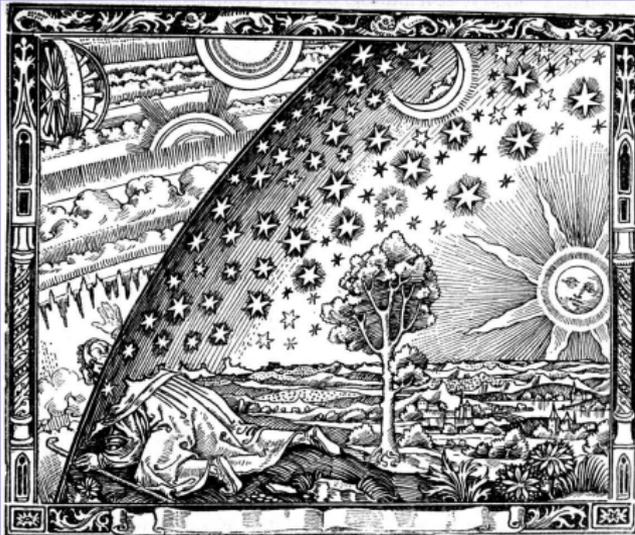
1 Structures

- L'infiniment grand
 - L'univers
 - Galaxies
 - Étoiles
 - Planètes extrasolaires
 - Système solaire
- L'infiniment petit
 - Les molécules
 - L'atome
 - Le noyau
 - Les particules élémentaires

2 Mouvements

- L'infiniment grand
 - Les galaxies
 - Le système solaire
 - La terre
 - La lune
- L'infiniment petit
 - Probabilités
 - Principe d'incertitude
 - À la limite

Qu'est-ce que l'univers ?



Un missionnaire du moyen âge raconte qu'il avait trouvé le point où le ciel et la Terre se touchent...

Pour Aristote, l'univers se compose de deux parties bien distinctes : les mondes sub et supra lunaires. Les lois de l'univers y sont différentes.¹.

Cette image correspond à la fausse idée (aujourd'hui très répandue) que les chercheurs médiévaux croyaient en une terre plate. Aujourd'hui, les professionnels du Moyen-âge et les historiens des sciences sont d'accord pour dire qu'il s'agit d'une idée du dix-neuvième siècle.

Qu'est-ce que l'univers ?

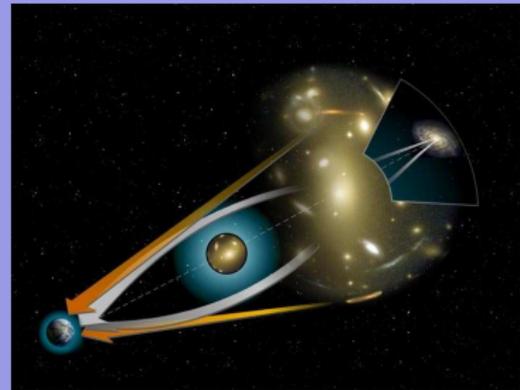
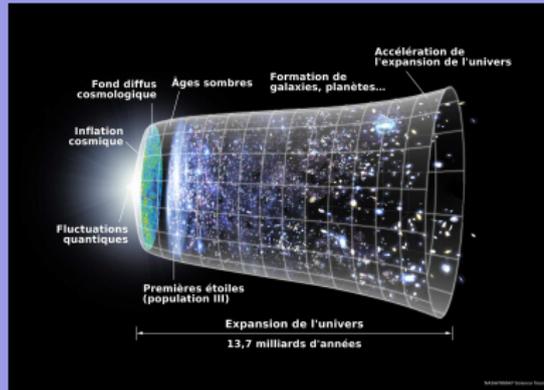
La réponse de Newton est :

$$\begin{aligned}MRU &\iff \sum \vec{F} = 0 \\ \sum \vec{F} &= m \cdot \vec{a} \\ \overrightarrow{\text{Action}} &= -\overrightarrow{\text{Réaction}} \\ \vec{F} &= G \cdot \frac{M \cdot m}{r^3} \cdot \vec{r}\end{aligned}$$

La réponse d'Einstein est :

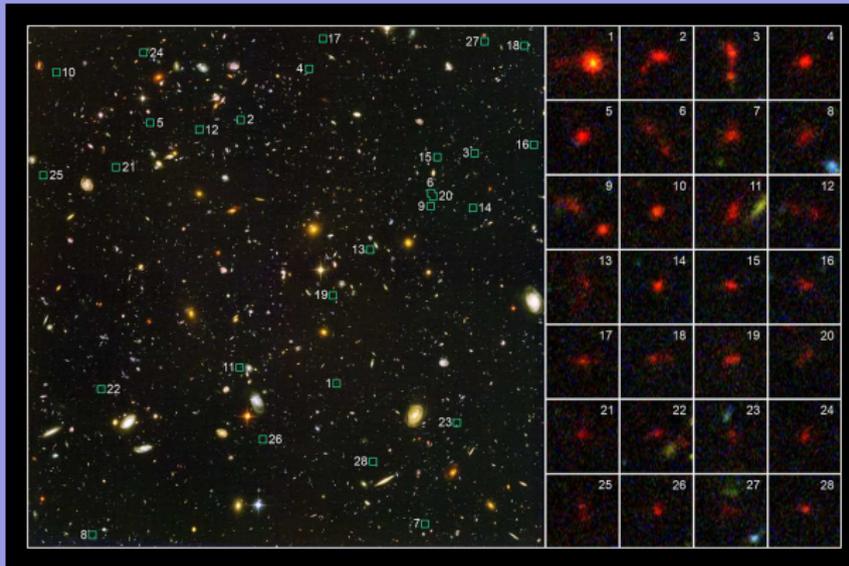
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \cdot g_{\mu\nu} \cdot R - \Lambda \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8 \cdot \pi \cdot G}{c^4} \cdot T_{\mu\nu}$$

Courbure de l'univers



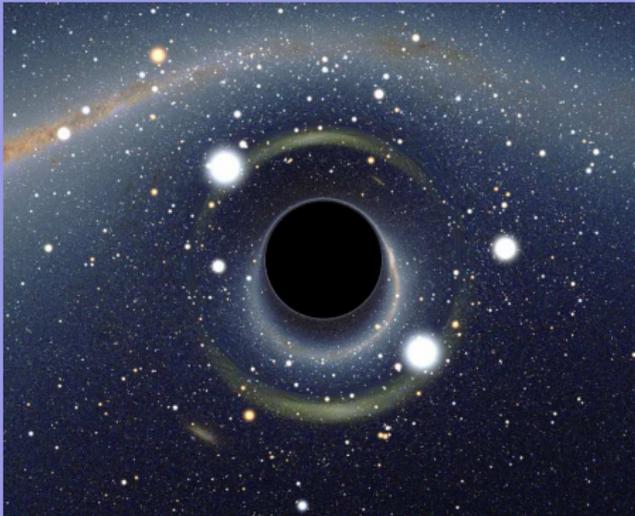
La relativité générale présente l'idée d'un espace courbe² dans un univers plat en expansion³. Comment se le représenter? A gauche l'expansion de l'univers. A droite une lentille gravitationnelle, c'est-à-dire la déviation de la lumière d'un objet lointain par un autre plus proche, produisant une image éclatée du premier.

Champ profond



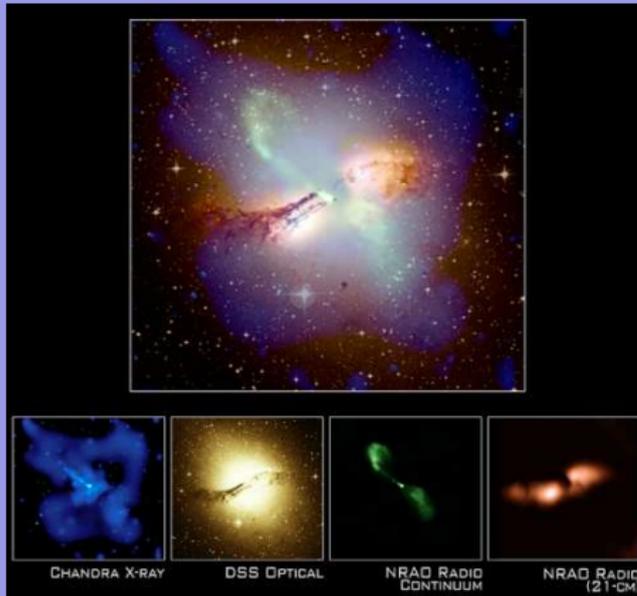
Champ profond avec Hubble. Tous ces objets sont des galaxies. Vingt huit de celles-ci sont les plus jeunes jamais observées moins de un milliard d'années après le big-bang.⁴

Trous noirs



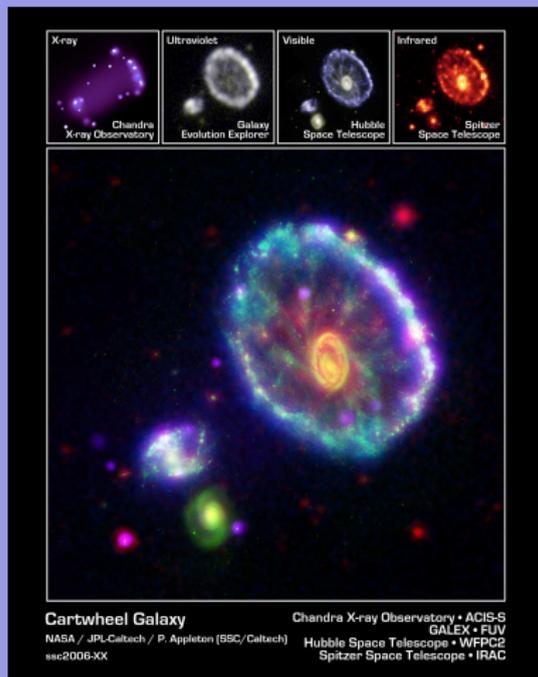
“Image simulée d’un trou noir stellaire situé à quelques dizaines de kilomètres d’un observateur et dont l’image se dessine sur la voûte céleste. L’image de celui-ci apparaît dédoublée sous la forme de deux arcs de cercle, en raison de l’effet de lentille gravitationnelle fort. La Voie lactée qui apparaît en haut de l’image est également fortement distordue, au point que certaines constellations sont difficiles à reconnaître. Une étoile relativement peu lumineuse est située presque exactement derrière le trou noir. Elle apparaît ainsi sous la forme d’une image double, dont la luminosité apparente est extraordinairement amplifiée, d’un facteur d’environ $4\,500^5$ ”.

Trous noirs réels



“Image composite en fausses couleurs d’une galaxie contenant un trou noir supermassif produisant des jets. L’image est décomposée en bleu pour les rayons X observé par le satellite Chandra, en jaune l’image dans le domaine optique prise par le Digitized Sky Survey, en vert l’image du NRAO dans le domaine radio, et finalement en rouge l’image radio. L’image illustre bien la complémentarité des observations dans des longueurs d’onde très différentes pour étudier les différents aspects des trous noirs.⁶”.

La galaxie du chariot



- Elle doit sa forme à l'une des deux petites galaxies qui l'a traversée, il y a plusieurs centaines de millions d'années.
- Les zones vertes révèlent les pouponnières d'étoiles produites quand le gaz est comprimé.
- L'anneau extérieur est plus grand que notre galaxie.
- Au centre se trouve vraisemblablement un trou noir.⁷

Supernovæ



Galaxie sombre NGC 4526 avec la supernovæ 1994D en bas⁸.

La galaxie du Sombrero

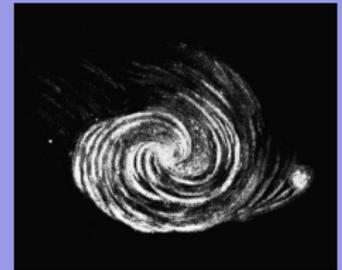


Une fantastique galaxie elliptique⁹.

Vincent Van Gogh : Nuit étoilée

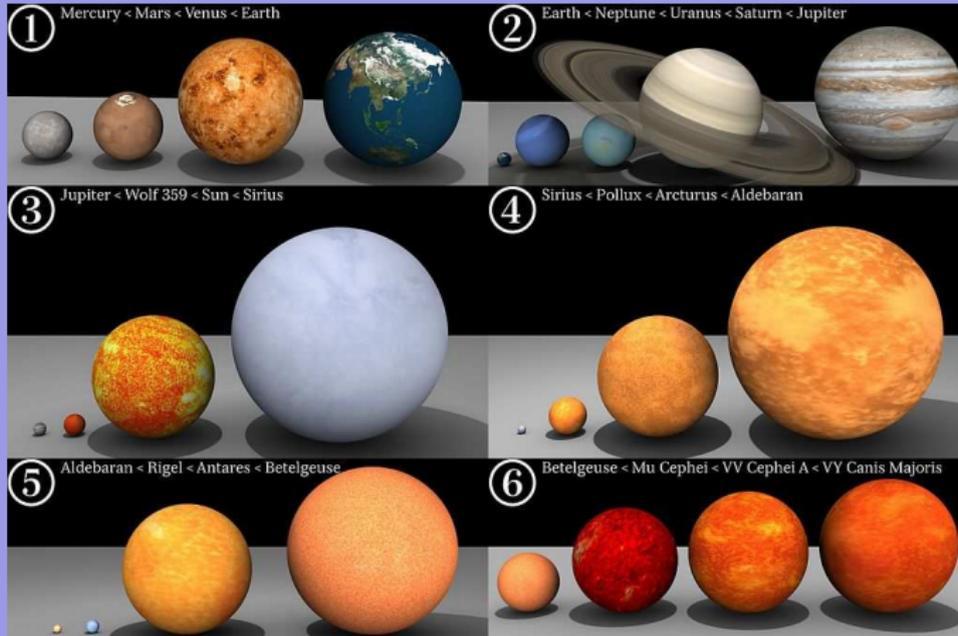


Dessin de la galaxie du tourbillon¹⁰ par Lord Rosse en 1845, 44 ans avant la peinture de van Gogh.



Pour le pavillon de l'astronomie d'une exposition universelle, une commande annulée¹¹.

Types d'étoiles¹³



- 1 Mercure < Mars < Vénus < Terre
- 2 Terre < Neptune < Uranus < Saturne < Jupiter
- 3 Jupiter < Proxima Centauri < Soleil < Sirius

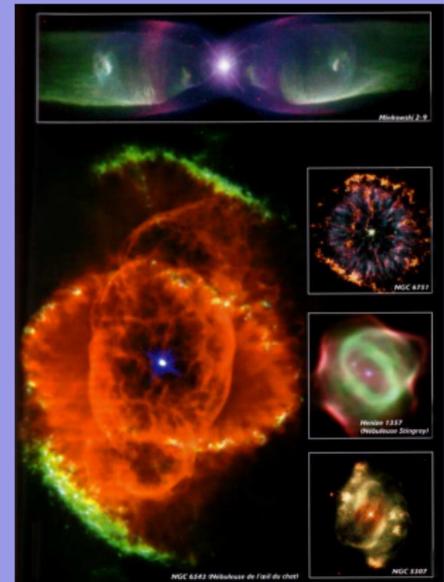
- 4 Sirius < Pollux < Arcturus < Aldébaran
- 5 Aldébaran < Rigel < Antarès < Bételgeuse
- 6 Bételgeuse < Mu Cephei < VV Cephei A < VY Canis Majoris

Nébuleuse planétaire

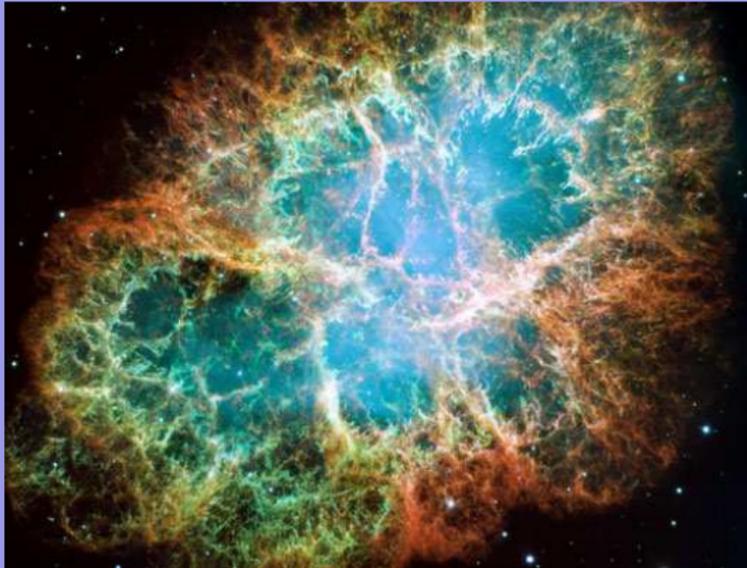


Le soleil est une étoile qui finira en nébuleuse planétaire¹⁴ : le cœur de l'étoile s'effondre laissant les couches extérieures autour d'une naine.

Ci-contre différentes nébuleuses planétaires.¹⁵



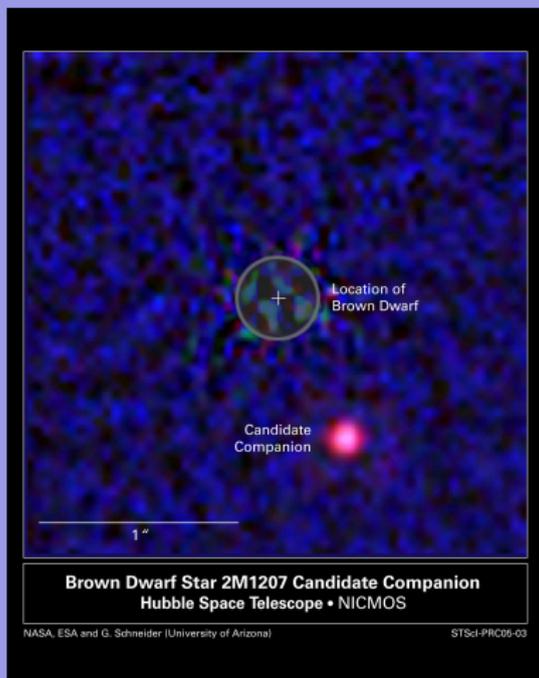
Supernovæ



Une supernovæ est l'explosion d'une grosse étoile en fin de vie. Pour des étoiles de masse supérieures à cinq fois celle du soleil, l'évolution passe par une géante rouge, puis une supergéante et enfin une supernovæ.

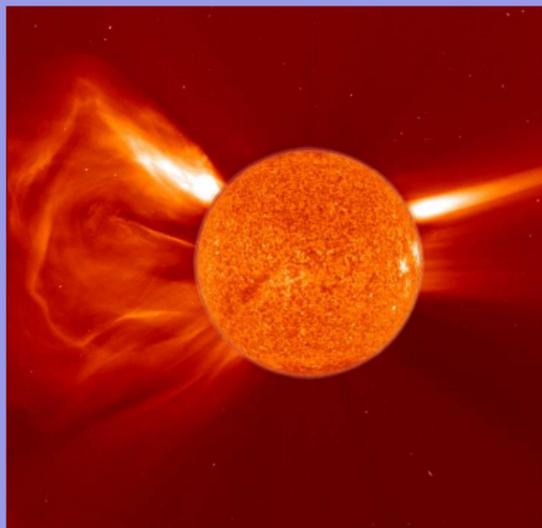
Ici, la nébuleuse du crabe, restes d'une supernovæ ayant explosé aux alentours de l'an mille¹⁶.

Exoplanètes



Une exoplanète est une planète qui tourne autour d'une autre étoile que le soleil. Ci-contre la première exoplanète photographiée (2005). Il s'agit d'une planète de cinq fois la masse de jupiter, tournant à une distance de 55 unités astronomiques de son étoile, la naine brune 2M1207, une étoile avortée. En raison de son éloignement à la naine, son environnement est donc particulièrement peu propice à la vie. Ci-contre, la naine brune 2M1207 et son compagnon¹⁷.

Le soleil



Le soleil est une boule de “gaz” extrêmement complexe. On est loin de l'astre parfait d'Aristote.



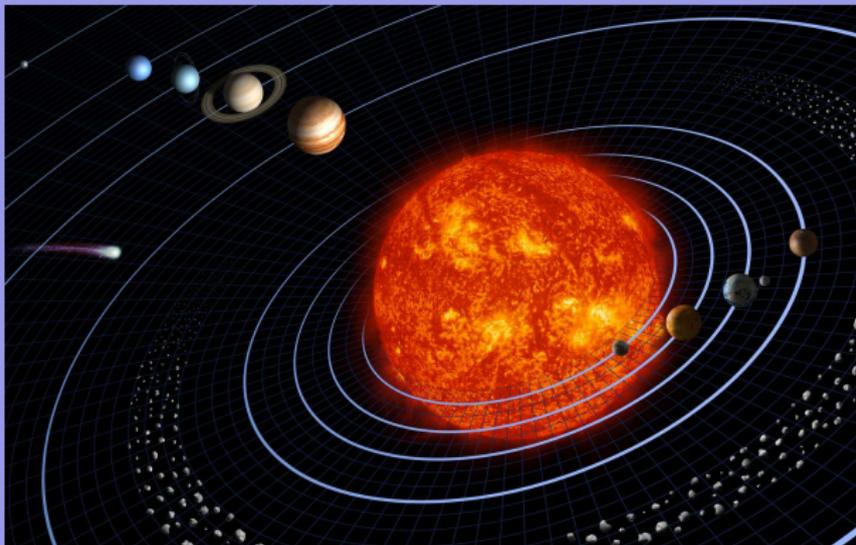
Les champs magnétiques y créent de somptueux arcs lumineux : les protubérances solaires¹⁸.

La petite terre



Le 14 février 1990, la NASA demande à la sonde Voyager 1 de se retourner pour photographier la terre. Voici la Terre à 6,4 milliards de kilomètres, juste « un point bleu pâle » perdu dans la lueur du Soleil²¹.

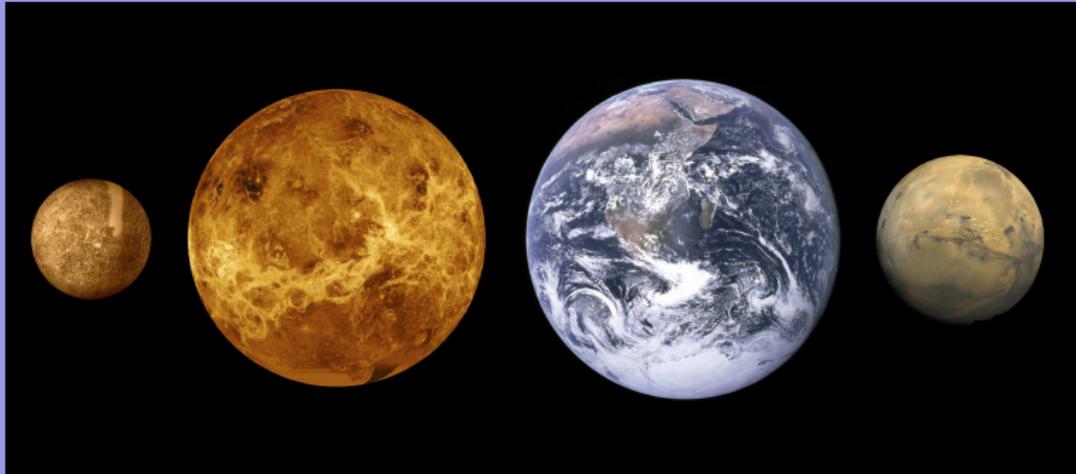
L'ordre des planètes



Le système solaire dans son ensemble.

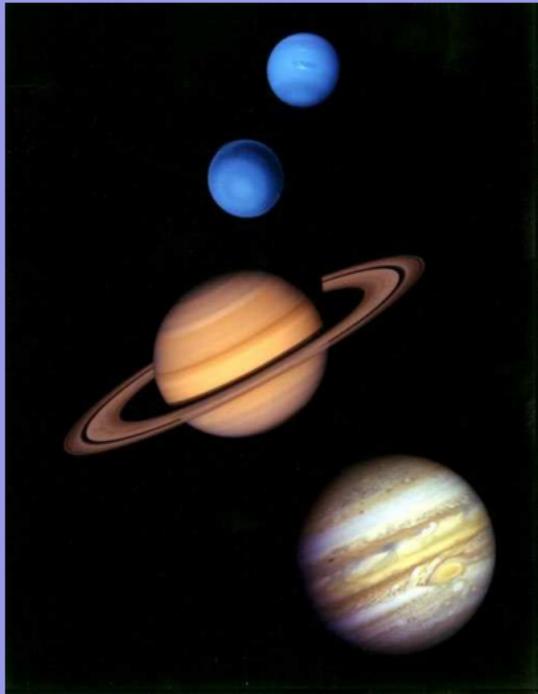
Notez la ceinture d'astéroïde, une comète et pluton qui n'est plus une planète.²²

Les planètes telluriques



Mercure, vénus, la terre et mars.
Notez que la surface de vénus est une image radar.²³

Les planètes joviennes



Jupiter, saturne, uranus et neptune sont des planètes géantes et gazeuses. Saturne est très légère, sa densité est plus faible que celle de l'eau. Elles ont toutes un anneau.

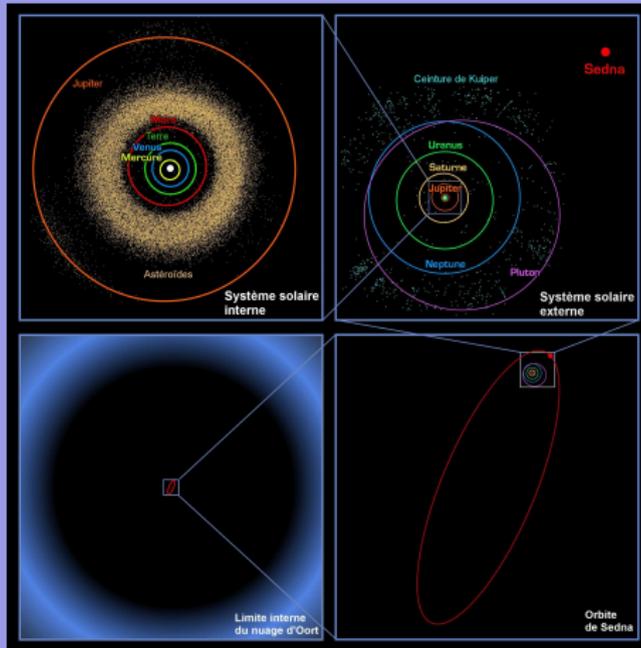
Notez que neptune a été découverte par calculs.²⁴

Les comètes



Les comètes sont de petits corps encore relativement mal connus. Elles viendraient du nuage de Oort aux confins du système solaire. Leur queue est due au vent solaire, un flux de petites particules, qui l'oriente à l'opposé du système solaire. Ici Hale-Bopp²⁵.

Astéroïdes, météorites et étoiles filantes



Sedna est un astéroïde particulier. Il ne vient pas de la ceinture de Kuiper, ni de la ceinture d'astéroïde, mais ce n'est pas une comète du nuage de Oort. Tous les astéroïdes ne sont pas des étoiles filantes, mais les étoiles filantes sont des astéroïdes. Ce sont de petits corps d'origine diverse, des poussières de la queue des comètes lors des pluies d'étoiles filantes par exemple, qui brûlent dans l'atmosphère.

Table des matières

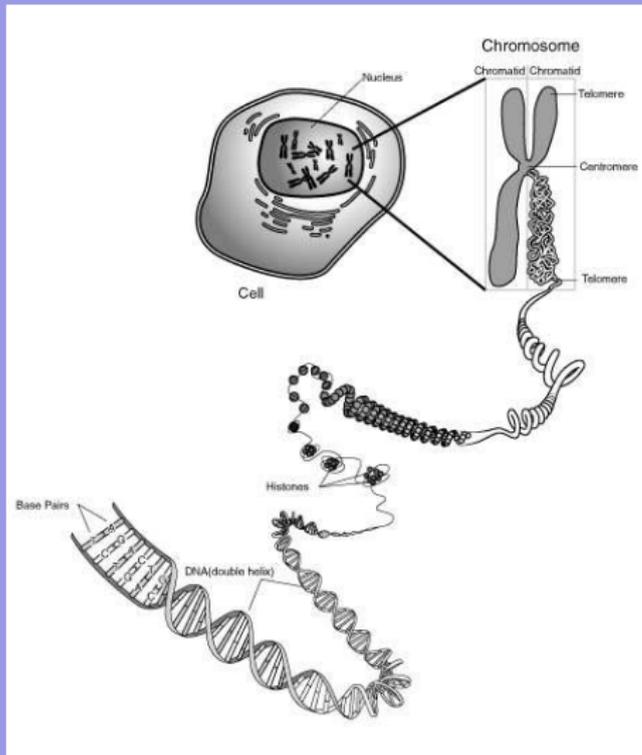
1 Structures

- L'infiniment grand
 - L'univers
 - Galaxies
 - Étoiles
 - Planètes extrasolaires
 - Système solaire
- L'infiniment petit
 - Les molécules
 - L'atome
 - Le noyau
 - Les particules élémentaires

2 Mouvements

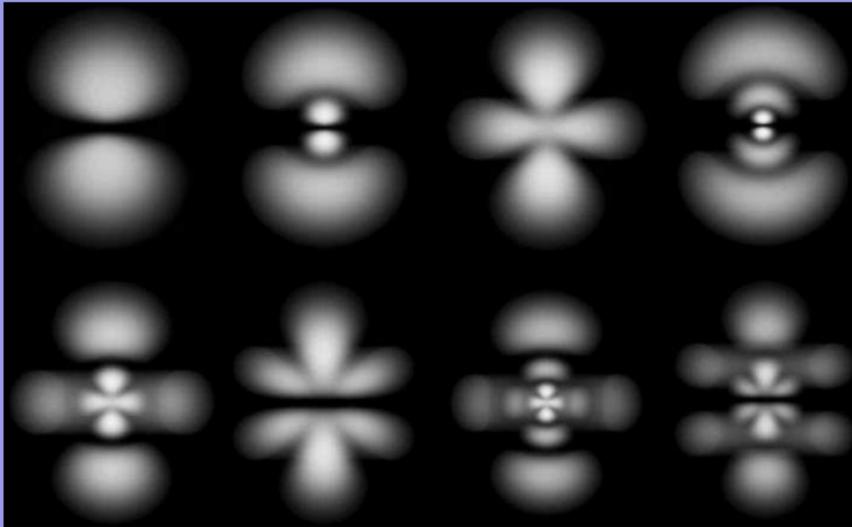
- L'infiniment grand
 - Les galaxies
 - Le système solaire
 - La terre
 - La lune
- L'infiniment petit
 - Probabilités
 - Principe d'incertitude
 - À la limite

L'ADN



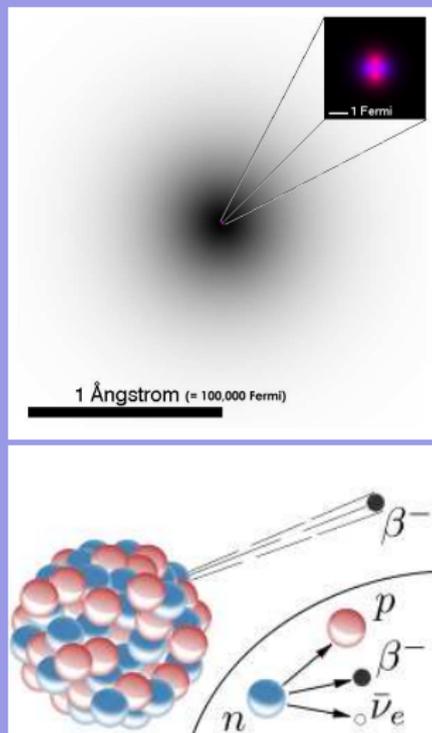
De la cellule à la molécule d'ADN, une formation d'atomes classiquement représentés²⁶.

Les orbitales



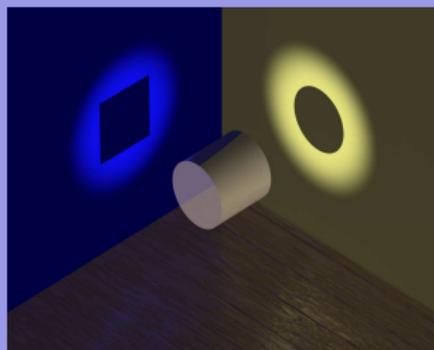
L'image classique de l'atome sous la forme d'un système planétaire (modèle de Bohr) n'est depuis longtemps plus d'actualité. Il s'agit d'une structure bien plus complexe comme le montre l'image ci-dessus²⁷.

Radioactivité

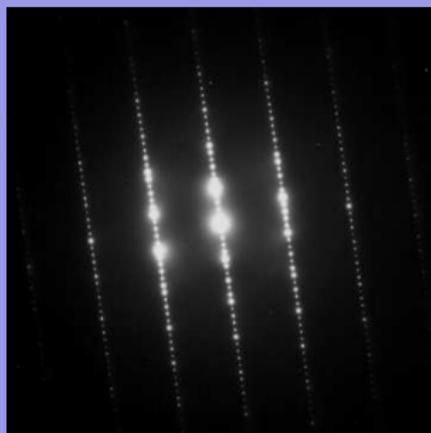


Même le noyau atomique est un “objet” complexe²⁸. Il peut émettre des électrons, par exemple. On nomme cela de la radioactivité bêta²⁹. De plus, on peut se demander comment les protons, des particules positives qui se repoussent électriquement, peuvent tenir ensemble. Cela est dû à la présence de gluons, les particules responsables de la force forte.

Dualité onde-particule



Au niveau quantique, les objets ne sont ni des particules, ni des ondes. Ce sont des quanta qui peuvent présenter en fonction des circonstances un aspect particulaire ou ondulatoire³⁰.



Un exemple de dualité : la diffraction des électrons ou le comportement ondulatoire d'une particule élémentaire³¹.

• TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD •

MATIÈRE		ATOME	NOYAU	NUCLÉONS (Protons & Neutrons)	Quarks
LEPTONS <small>peuvent se déplacer librement</small>			QUARKS <small>porteurs de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.</small>		
FERMIONS					
<p>La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe</p> <p><i>Première Famille</i></p>	<p>ELECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1.</p>	<p>NEUTRINO ELECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.</p>	<p>BAS Sa charge électrique est - 1/3e. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.</p>	<p>HAUT Sa charge électrique est + 2/3e. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.</p>	
<p>Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.</p> <p><i>Deuxième Famille</i></p>	<p>MUON Un compagnon plus massif de l'électron.</p>	<p>NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p>	<p>ETRANGE Un compagnon plus lourd du "Bas".</p>	<p>CHARME Un compagnon plus lourd du "Haut".</p>	
<p><i>Troisième Famille</i></p>	<p>TAU Un compagnon encore plus lourd que le Muon.</p>	<p>NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du Neutrino électron.</p>	<p>BEAUTÉ Un compagnon encore plus lourd du "Bas".</p>	<p>VÉRITÉ ou TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du "Haut".</p>	
BOSONS VECTEURS					
<p>Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.</p>	<p>PHOTON Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.</p>	<p>GLUON Porteur de la force "forte" entre Quarks.</p>	<p>BOSONS INTERMÉDIAIRES : W⁻, W⁺ et Z⁰ Porteurs de la force "faible", responsables de certaines formes de désintégrations radioactives.</p>		
<p>BOSON DE HIGGS ?</p> <p><i>Hypothétique</i></p>	<p><i>Hypothétique</i> Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"</p>			<p><i>Hypothétique</i> GRAVITON ?</p>	

©2011 SCHNEIDER - CEA/DSM/IN2P3 Revue 1992 (24/1 sept. 2005)

Le monde des particules ne se limite pas aux protons, neutrons et électrons. Des dizaines d'autres particules existent au niveau subatomique et subnucléaire. Le tableau ci-dessus³² en donne un classement.

Table des matières

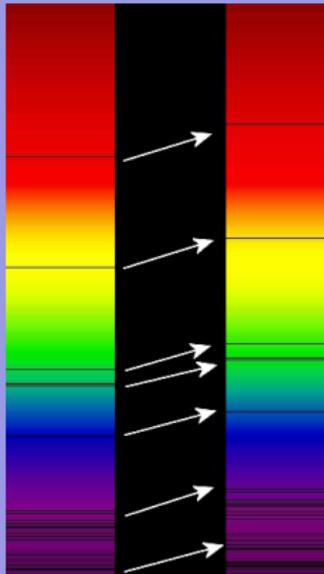
1 Structures

- L'infiniment grand
 - L'univers
 - Galaxies
 - Étoiles
 - Planètes extrasolaires
 - Système solaire
- L'infiniment petit
 - Les molécules
 - L'atome
 - Le noyau
 - Les particules élémentaires

2 Mouvements

- L'infiniment grand
 - Les galaxies
 - Le système solaire
 - La terre
 - La lune
- L'infiniment petit
 - Probabilités
 - Principe d'incertitude
 - À la limite

Redshift galactique



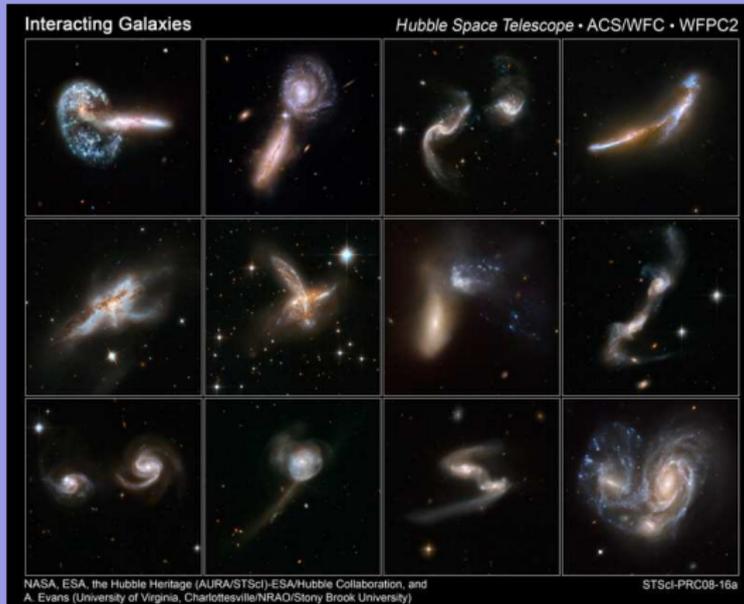
Le mouvement de certaines galaxies peut être très complexe. Cependant, pour la plupart, il s'agit simplement d'un mouvement d'éloignement qui se traduit par un décalage vers le rouge de leur lumière³³. Il est interprété comme une expansion de l'univers. C'est comme si les galaxies bougeaient à l'intérieur d'un espace qui grandit et les emporte avec elles.

Mouvements galactiques



Les mouvements des grosses structures se traduisent par des interactions comme celles de la galaxie NGC 4676 étudiée par Joshua Edward Barnes dans la simulation ci-contre. Il s'agit du résultat de la rencontre de deux galaxies différentes.

Bien d'autres exemples



Bien d'autres exemples existent et font l'objet d'études approfondies³⁴. Même notre galaxie, la Voie Lactée est en collision avec une galaxie fine.

Andromède et la Voie Lactée



Andromède³⁵ se dirige vers nous. Dans combien de temps va-t-elle nous rencontrer³⁶ ?

Vitesse d'approche : $500'000 \text{ km/h}$; distance : $2,55 \cdot 10^6 \text{ AL}$; vitesse de la lumière : $300'000 \text{ km/s}$.

Andromède et la Voie Lactée



Réponse :

$$\textcircled{1} \quad 2,55 \cdot 10^6 \text{ AL} = 2,55 \cdot 10^6 \cdot 300'000 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 2,41 \cdot 10^{19} \text{ km}$$

$$\textcircled{2} \quad v = \frac{d}{t} \Rightarrow t = \frac{d}{v} = \frac{2,41 \cdot 10^{19}}{500'000} = 4,8 \cdot 10^{13} \text{ h} = 5,5 \cdot 10^9 \text{ ans en réalité } (v \neq \text{const}) \quad 3 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

Transformation des unités

Le calcul précédent est intéressant car il montre que les changements d'unités sont omniprésents en physique.

Revenons sur la toute dernière partie du calcul : transformer des heures en années. En y réfléchissant, on comprend vite qu'une clé du calcul sera le chiffre

$$r = 24 \cdot 365 = 8760 \text{ h/an}$$

Voici trois manières de savoir si ce chiffre r doit diviser ou multiplier le nombre d'heures qu'on veut transformer en années.

Rapport de grandeurs

Question : dans une année, le nombre d'heures est plus grand que 1 ou plus petit ?

Réponse : plus grand. Cela implique que si deux chiffres représentent une durée identique, celui en heures est plus grand que celui en années ou celui en années est plus petit que celui en heures.

Conséquence : il faut diviser le nombre d'heures par le chiffres rapport r .

Règle de trois

$$1 \text{ an} \rightarrow 8760 \text{ h}$$

$$? \leftarrow 4,8 \cdot 10^{13} \text{ h}$$

Par produits croisés :

$$? \cdot 8760 = 1 \cdot 4,8 \cdot 10^{13}$$

$$\begin{aligned} ? &= \frac{4,8 \cdot 10^{13}}{8760} \\ &= 5,5 \cdot 10^9 \text{ ans} \end{aligned}$$

On a donc bien une division par r .

Unités

Les crochets [...] signifient : « les unités de »

$$t_h = 4,8 \cdot 10^{13} \text{ h} \quad [t_h] = \text{h}$$

$$r = 8760 \text{ h/an} \quad [r] = \text{h/an}$$

La question est :

$$t_{an} = t_h \cdot r \text{ ou } t_{an} = t_h / r$$

Un calcul d'unité donne :

$$\begin{aligned} [t_{an}] &= [t_h] \cdot [r] = \text{h} \cdot \text{h/an} \\ &= \text{h}^2/\text{an} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [t_{an}] &= [t_h] / [r] = \text{h} / (\text{h/an}) \\ &= \text{h} \cdot (\text{an/h}) = \text{an} \end{aligned}$$

Pour avoir des années, il faut donc diviser par r .

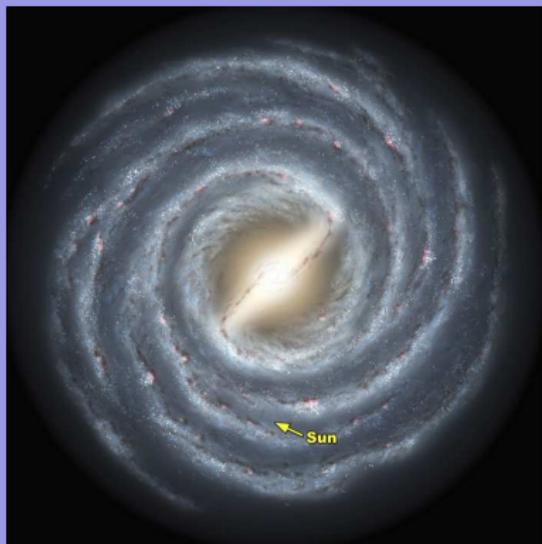
Mouvement du soleil



Le soleil tourne autour du centre galactique³⁷. Calculez sa vitesse.

Distance soleil-centre galactique : 26'000 AL ; Période de révolution : 220 millions d'années.

Mouvement du soleil



Réponse :

- Distance parcourue en une période :

$$d = 2 \cdot \pi \cdot 26'000 \cdot 300'000 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 3600 = 1,6 \cdot 10^{18} \text{ km}$$

- Période de rotation :

$$t = 220 \cdot 10^6 \cdot 365 \cdot 24 = 1,9 \cdot 10^{12} \text{ h}$$

- Vitesse de déplacement du soleil :

$$v = \frac{d}{t} = \frac{1,6 \cdot 10^{18}}{1,9 \cdot 10^{12}} \simeq 800'000 \text{ km/h} = 220 \text{ km/s}$$

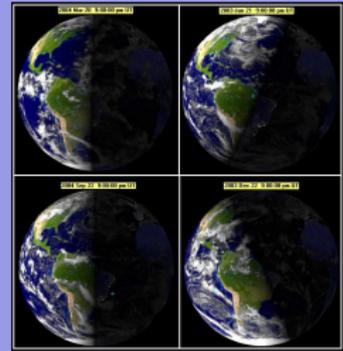
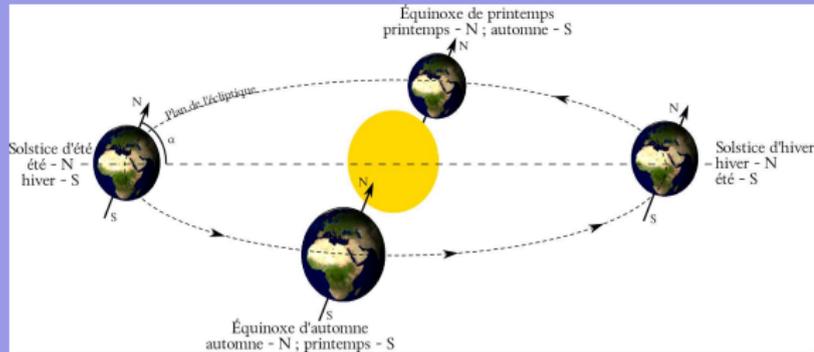
Mouvement de la terre

Évidemment la terre tourne autour du soleil. A quelle vitesse ...
laissons cela pour ... plus tard.

Et la terre tourne sur elle-même.

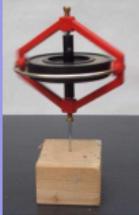
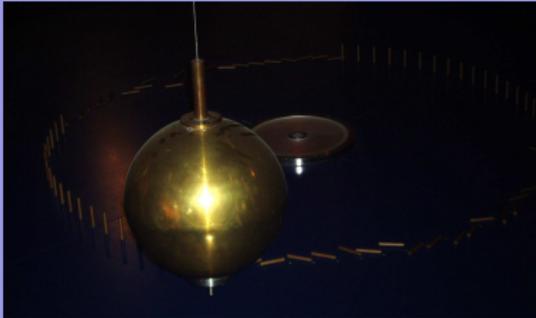
Sachant que le rayon de la terre vaut environ 6400 km , calculez de
tête la vitesse d'une personne immobile à l'équateur sous l'effet de
la rotation diurne uniquement.

Les saisons



Elles ne sont pas dues à l'éloignement de la terre par rapport au soleil. Sinon, on aurait deux été et deux hivers par année. Elles sont dues à l'inclinaison α de l'axe de la terre sur l'écliptique (le plan dans lequel tournent presque toutes les planètes). On voit sur la figure à droite³⁸, qu'en été les rayons du soleil frappent la terre plus verticalement qu'en hiver.

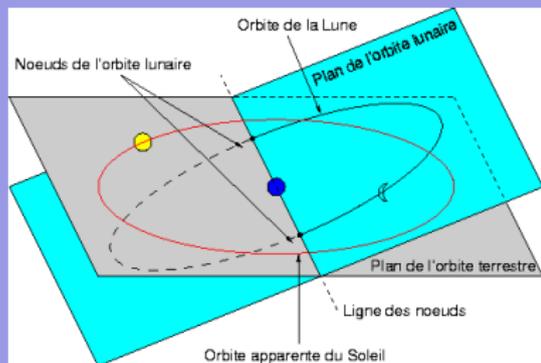
La journée



La terre tourne sur elle-même à une vitesse considérable (un point à l'équateur se déplace à $\sim 1600 \text{ km/h}$). Comme pour une toupie, c'est ce mouvement de rotation qui donne à son axe une direction fixe. C'est donc ce mouvement qui est à l'origine des saisons. Ce mouvement se traduit par la rotation du plan du pendule de Foucault³⁹.

Mouvement de la lune

Ci-dessous, une représentation à l'échelle de la terre et de la lune⁴⁰.



Quand la ligne des nœuds passe par le soleil⁴¹, on a deux éclipses à quinze jours d'intervalle. Quand elle n'est pas alignée avec lui, la lune présente en plus du premier et dernier quartier, une nouvelle lune ou lune noire et une pleine lune.

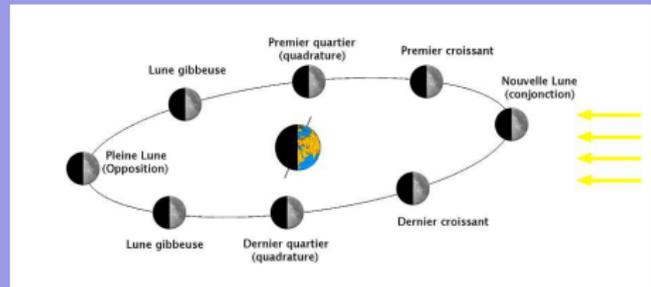
Éclipses et phases



Éclipse de soleil⁴².

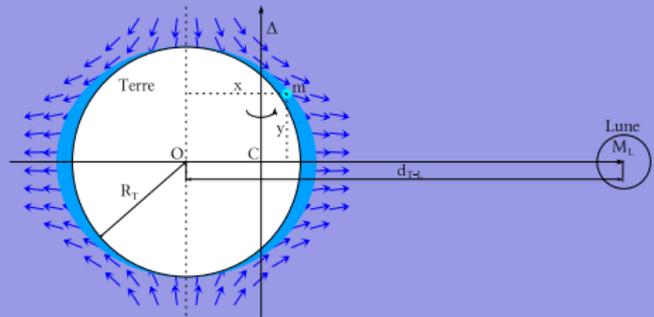


Éclipse de lune⁴³.



Les phases de la lune⁴⁴.

Les marées



L'explication du rythme de deux marées par jour et du rapport de marnage dû à la lune et au soleil par la théorie de la gravitation universelle de Newton est un succès de la physique classique.

Table des matières

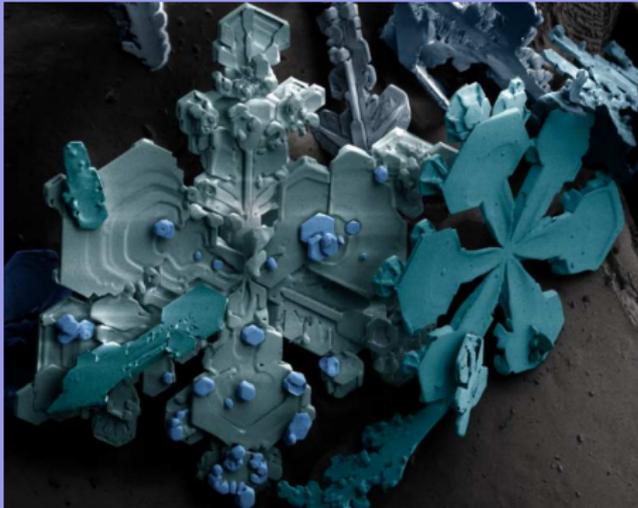
1 Structures

- L'infiniment grand
 - L'univers
 - Galaxies
 - Étoiles
 - Planètes extrasolaires
 - Système solaire
- L'infiniment petit
 - Les molécules
 - L'atome
 - Le noyau
 - Les particules élémentaires

2 Mouvements

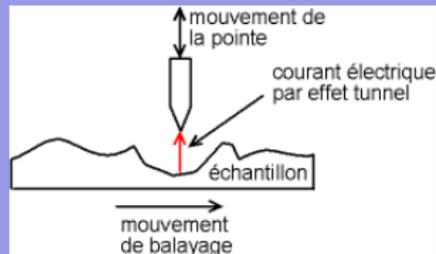
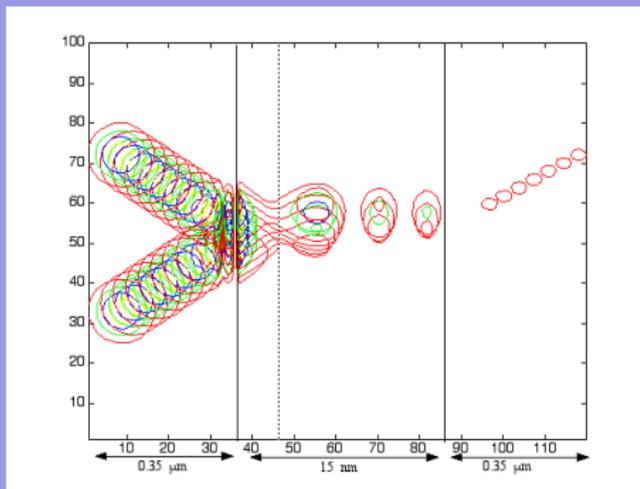
- L'infiniment grand
 - Les galaxies
 - Le système solaire
 - La terre
 - La lune
- L'infiniment petit
 - Probabilités
 - Principe d'incertitude
 - À la limite

Fonction d'onde



Les électrons sont simultanément de petites particules et des ondes. La microscopie électronique tire parti de la nature ondulatoire de ces particules pour permettre une imagerie exceptionnelle⁴⁶.

Effet tunnel



Une particule quantique (niveau atomique et en-dessous) est capable de franchir des barrières qu'une particule classique est incapable de traverser. Sur la figure ci-dessus⁴⁷ une onde arrive sur une barrière. Il existe alors une certaine probabilité pour que celle-ci la franchisse. Ce phénomène est utilisé pour la microscopie à effet tunnel⁴⁸.

Paradoxe EPR

Dieux, joue-t-il aux dés ?

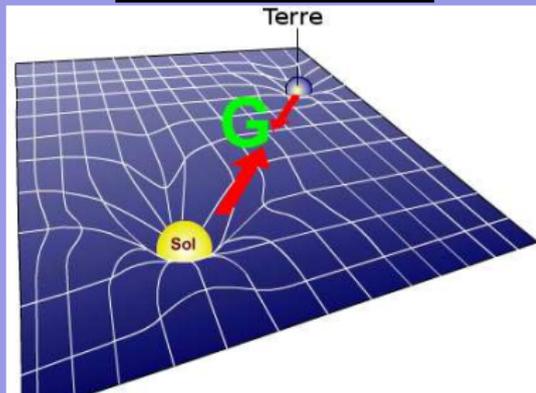
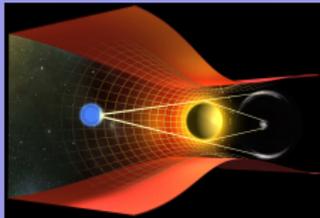
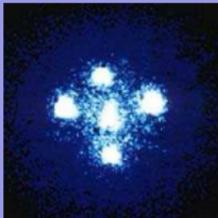
C'est la question que pose la mécanique quantique (celle des objets plus petit que l'atome). Einstein n'y a jamais cru. Son univers était déterministe et, pour lui, si les probabilités interviennent en mécanique quantique, ce n'est pas le fruit du hasard mais parcequ'il existe des variables cachées que nous ne connaissons pas. On sait maintenant qu'il avait tort. Le paradoxe EPR (Einstein, Podolsky et Rosen) a été réalisé expérimentalement par Alain Aspect en 1981 et a donné tort à Einstein. Le résultat montre que deux corps peuvent se trouver à des distances considérables et se comporter comme un seul et unique objet. On s'intéresse aujourd'hui à cette propriété pour tenter de transmettre de l'information.

Forces fondamentales⁴⁹

Il existe aujourd'hui quatre forces fondamentale dont une description est donnée ci-dessous. Trois de celles-ci semblent pouvoir être unifiées, mais la quatrième, la gravitation, résiste. Peut-être est-elle imparfaite ?

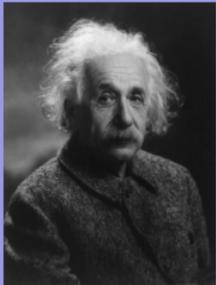
Interaction	Théorie courante	Médiateurs	Rayon d'action	Puissance relative	Masse (GeV/c^2)	Dépendance vs distance
Forte	Chromodynamique quantique	8 gluons	$2,5 \cdot 10^{-15} m$	1	0	$\frac{1}{r^7}$
Électromagnétique	Électrodynamique quantique	1 photon	∞	10^{-2}	0	$\frac{1}{r^2}$
Faible	Théorie électrofaible	3 bosons	$10^{-18} m$	10^{-13}	80, 80 et 91	$\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$
Gravitation	Relativité générale	1 graviton (postulé)	∞	10^{-38}	0	$\frac{1}{r^2}$

La gravitation



L'explication donnée par la relativité générale de la gravitation tient dans la courbure de l'espace par les masses⁵⁰ (qui produit un phénomène de lentille gravitationnelle : figures en haut⁵¹). Mais la physique des particules en donnerait bien une description sous la forme d'un échange de gravitons G .

Des gens comme vous et moi ?⁵²



Albert Einstein
Isaac Newton



Marie Curie
Stephen Hawking



Werner Heisenberg
Richard Feynman



Carlo Rubbia



Crédits photographiques I

L'ensemble des illustrations utilisées dans cette présentation sont publiées sur le net soit sous licence GFDL, soit dans le domaine publique. Elles viennent essentiellement de la NASA, du télescope spatial Hubble et de l'encyclopédie Wikipedia. Je remercie ces organisations de mettre à disposition de tous des documents exceptionnels. Ci-dessous se trouvent les liens permettant de vérifier les licences. Ils donnent aussi accès aux auteurs que je remercie tout particulièrement pour leur travail sans lequel cette présentation n'aurait pas pu exister.

¹<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/Flammarion.jpg>

²http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Gravitational_lens-full.jpg

³[http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Universe_Expansion_Timeline_\(fr\).png](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Universe_Expansion_Timeline_(fr).png)

⁴<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/cosmology/2006/12/>

⁵Pour l'image : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:BH_LMC.png

Pour le texte : http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou_noir

Remerciements à Alain Riazuelo, cosmologue à l'Institut d'Astrophysique de Paris et chercheur au CNRS.

⁶Pour l'image : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:BlackHole1.jpg>

Pour le texte : http://fr.wikipedia.org/wiki/Trou_noir

Remerciements à Alain Riazuelo, cosmologue à l'Institut d'Astrophysique de Paris et chercheur au CNRS.

⁷http://www.galex.caltech.edu/media/glx2006-01r_img02.html

⁸http://hubblesite.org/gallery/album/the_universe_collection/pr1999019i/hires/true/

⁹http://hubblesite.org/gallery/album/galaxy_collection/pr2003028a/hires/true/1280_wallpaper

¹⁰<http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:M51Sketch.jpg>

¹¹http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:VanGogh-starry_night.jpg

¹²<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/cosmology/2006/12/>

¹³<https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Star-sizes.jpg>

¹⁴http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Vue_du_soleil.jpg

¹⁵http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Solar_sys.jpg

¹⁶http://hubblesite.org/gallery/album/nebula_collection/pr2005037a/hires/true/

Crédits photographiques II

- 17 <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2005/03/image/a/>
- 18 Pour l'image à gauche : <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/SolarCorona/>
 Pour le film : <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/Movies/latest.html>
 Pour l'image à droite : <http://soho.nascom.nasa.gov/gallery/bestofsoho.html>
- 19 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Ptolemaicsystem-small.png>
- 20 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:ThomasDiggesmap.JPG>
- 21 <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:PaleBlueDot.jpg>
- 22 http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Solar_sys.jpg
- 23 http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Terrestrial_planet_size_comparisons_edit.jpg
- 24 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Gas_giants_in_the_solar_system.jpg
- 25 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Halebopp031197.jpg>
- 26 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Chromosome.gif>
- 27 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:8orbitals.jpg>
- 28 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Helium_atom_QM.png
- 29 http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Beta-minus_Decay.svg
- 30 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Dualite.jpg>
- 31 <http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:DifraccionElectronesMET.jpg>
- 32 [http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Tableau_particules_%C3%A91%C3%A9mentaires_750px_\(bis\).jpg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Tableau_particules_%C3%A91%C3%A9mentaires_750px_(bis).jpg)
- 33 Référence pour l'image à gauche : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Redshift.png>
 et pour l'image à droite http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Schema_Redshift.png
- 34 http://hubblesite.org/gallery/album/entire_collection/pr2008016a/web_print
- 35 http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:M31_Lanoue.png
- 36 http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Andromeda_collision.jpg
- 37 http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Milky_Way_2005.jpg
- 38 <http://en.wikipedia.org/wiki/Image:Seasonearth.png>
- 39 http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9c/Foucault_pendulum.jpg, <http://commons.wikimedia.org>
- et http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Diabolo_large_and_small.jpg
- 40 <http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Earth-Moon2.jpg>

Crédits photographiques III

- ⁴¹<http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Orbite-lune-soleil.png>
- ⁴²http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Film_eclipse_soleil_1999.jpg
- ⁴³http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Eclipse_lune.jpg
- ⁴⁴<http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:TerreOrbiteLune.png>
- ⁴⁵Images de la NASA/NOAA
- ⁴⁶http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Snow_crystals.png
- ⁴⁷http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Tunnel_bar4.png
- ⁴⁸http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Microscope_effet_tunnel.png
- ⁴⁹http://fr.wikipedia.org/wiki/Interaction_%C3%A9l%C3%A9mentaire
- ⁵⁰http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Interacci%C3%B3n_de_la_gravedad.png
- ⁵¹à gauche : http://fr.wikipedia.org/wiki/Image:Lent_grav.jpg
à droite : <http://www.spacetelescope.org/images/html/heic0814f.html>
- ⁵²Tous ces portraits proviennent de Wikipedia ou Wikicommons, sous leur nom propre.