

L'attraction de la gravitation

Pierre Vanhove

*IPHT
Saclay*

&



Institut Pascal
Université Paris-Saclay
21 octobre 2019

Première partie I

Deux forces règnent sur l'univers : lumière et pesanteur

Simone Weil, « La pesanteur et la grâce »



I've been noticing gravity since I was very young. (Cameron Diaz)



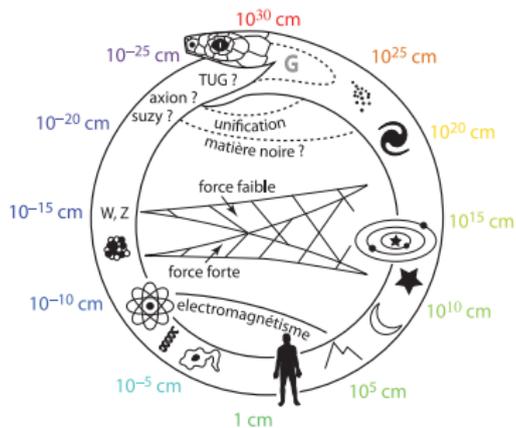
Painting is so poetic, while sculpture is more logical and scientific and makes you worry about gravity. (Damien Hirst)



Question : What is your secret for always staying down-to-earth ?

Keanu Reeves : Well I mean, gravity

La force de gravité est universelle



- ▶ elle agit sur tout type de matière et d'énergie
- ▶ Elle est toujours attractive
- ▶ elle est très faible comparée aux autres forces

En novembre 1915, Albert Einstein présente sa théorie de la gravitation : la relativité générale

Wenn g ein Skalar ist, dann $\frac{\partial g}{\partial x_i} = T_i$ Tensor 1. Ranges.

$T_{il} = \left(\frac{\partial T_i}{\partial x_l} - \sum \{i, l\} T_i \right)$

Tensor g'_{ik}

Wortere $U_{ik} = 0$

Wir setzen voraus

$-\sum \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\beta}$

Tensor $\left\{ \begin{matrix} i, k \\ l \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} l, l \\ k \end{matrix} \right\}$

$= -\gamma_{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta} \left(\frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} - \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha} \right) \left(\frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} - \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_\beta} \right) + \gamma_{\alpha\beta} \gamma_{\alpha\beta} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_i} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_l}$

$\alpha \quad \beta \quad \alpha \quad \beta$

oder $-\frac{\partial \gamma_{\alpha\beta}}{\partial x_i} \frac{\partial g^{\alpha\beta}}{\partial x_l}$

$\delta a^0 = -\left\{ \begin{matrix} i, l \\ k \end{matrix} \right\} a^i a^l$

$T_{\alpha\beta} x^{\alpha} x^{\beta}$

$a^{\alpha} x^{\beta} a^{\gamma}$

her Gravitations-
tensors

aus gleich

$\frac{\partial g_{ik}}{\partial x_k}$

$\left(\frac{\partial g_{ik}}{\partial x_k} - \frac{\partial g_{ik}}{\partial x_k} + \frac{\partial g_{ik}}{\partial x_l} \right)$

Il a profondément changé notre vision de l'espace et du temps

Sa nouvelle théorie de la gravitation fournit le cadre **actuel** pour décrire notre Univers **du Big Bang à nos jours**

Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil

Ans
Lieb. geliebter Herr Kollege!

Zürich, 14. I. 19.

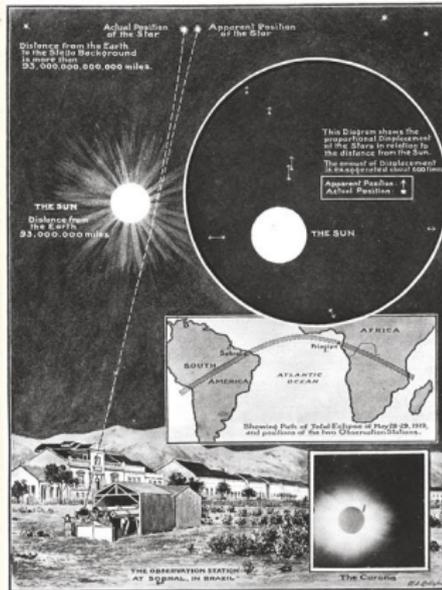
Eine einfache theoretische Herleitung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Parabelbahn beschreiben.

grav. field
↓ ↑
Lichtstrahl

An Sonnenscheibe müsste diese Ablenkung $0,84''$ betragen und wie $\frac{1}{2}$ abnehmen (für Parabel von Sonnenmittelpunkt) ($R = \text{Sonnensradius}$).

$\frac{1}{2} \cdot 0,84''$

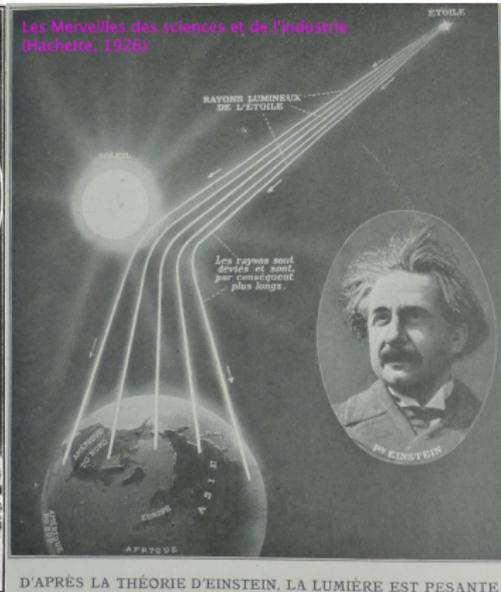
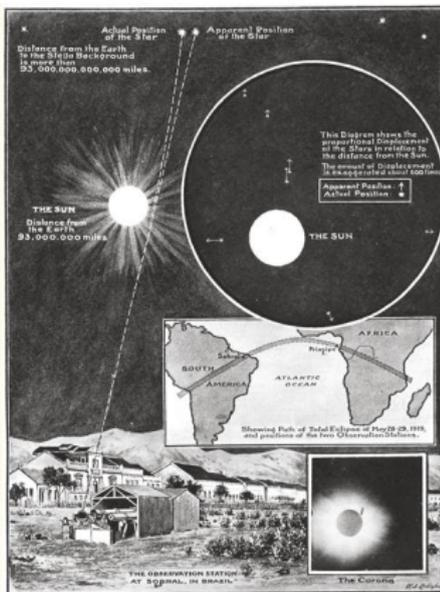
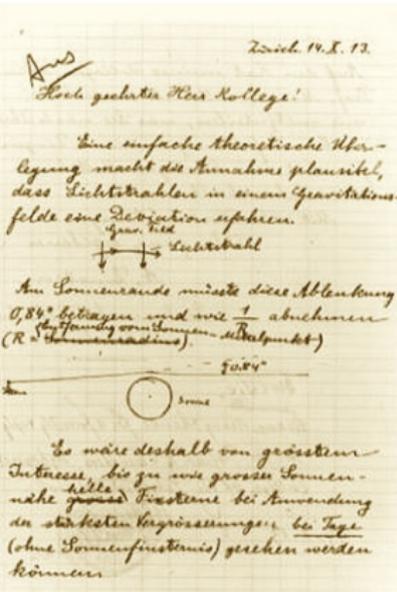
Es wäre deshalb von grösster Interesse, bis zu wie grosser Sonnennähe gewisse Fixsterne bei Annäherung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.



Confirmé par Eddington et Dyson avec l'éclipse de 1919

Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil



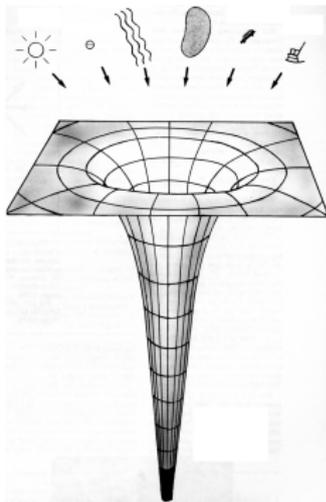
Curieuse illustration dans « Les merveilles des sciences et l'industrie (Hachette, 1926) », où soleil repousse la lumière 😊

Trous noirs



Les objets macroscopiques les plus parfaits dans l'univers :
leur constitution dépend seulement des concepts d'espace et
de temps

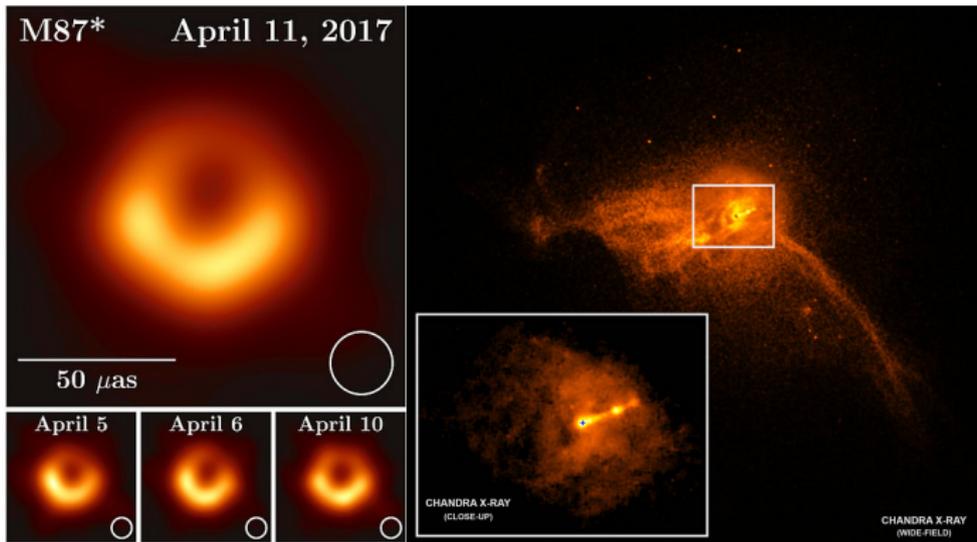
(S. Chandrasekhar - Prix Nobel 1983)



- ▶ Solutions de la théorie d'Einstein
- ▶ Attire tout type de matière et énergie
- ▶ Déforment fortement l'espace et le temps

Voir la gravitation

En avril 2019 le « Event Horizon Telescope » a rendu public l'« ombre » du trou noir au centre de la galaxie Messier 87 dans la constellation de la Vierge



- ▶ 6.5 milliard de masse solaire
- ▶ Diamètre 38 milliards de km soit 1,5 jour-lumière
- ▶ Distance environ 53,5 millions d'années-lumière

Voir la gravitation

Image calculée pour la première fois par Jean-Pierre Luminet en 1979. Cette image est apparue dans le film Interstellar



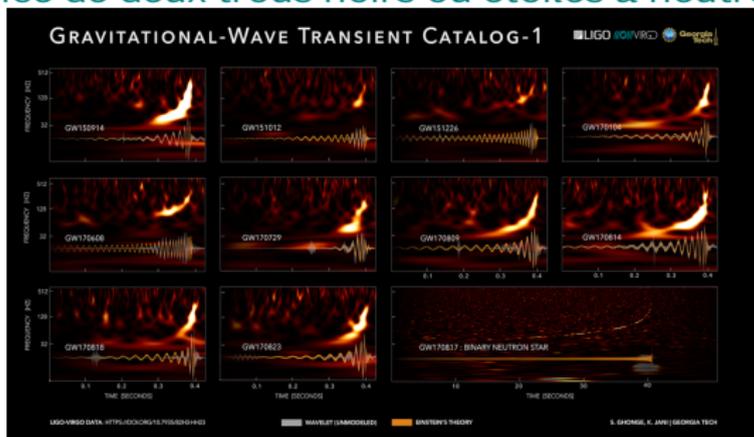
La forme de l'image est compatible avec la théorie d'Einstein et sa déformation indique que le trou noir est en rotation dans la sens horaire : c'est un trou noir de Kerr

Le 18 septembre 1986 Chandrasekhar déclarait

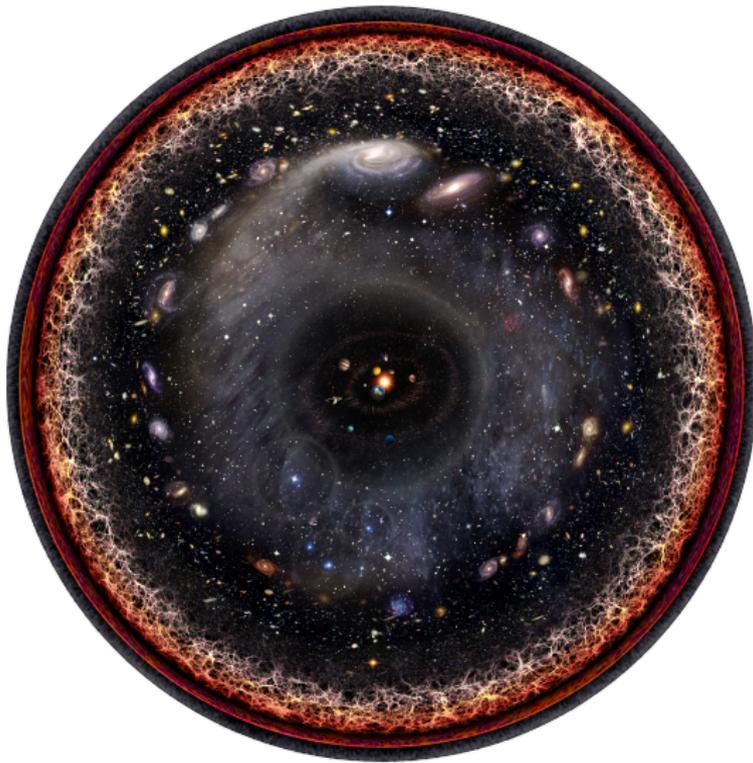
(...) une confirmation de la métrique des espace-temps de Kerr (ou certaines de leurs caractéristiques) ne peut pas être espéré dans un avenir proche.

Entendre la gravitation

Depuis le 14 septembre 2015 les collaborations LIGO/VIRGO ont détecté 10 signaux d'ondes gravitationnelles du à la coalescence de deux trous noirs ou étoiles à neutrons



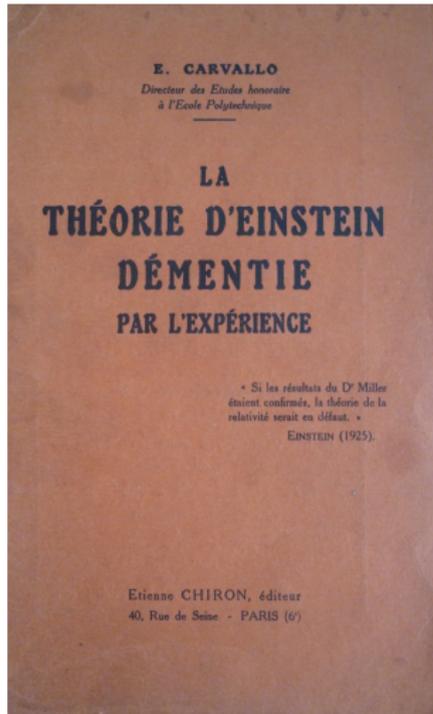
- ▶ Première détection de la dynamique des trous noirs
- ▶ Nouvelle fenêtre multimessagers sur notre Universe
 - ▶ fusion étoiles à neutrons (GW170817) : signaux GW, X-rays, γ , ...
- ▶ Après 2018 entre 1 et 50 détections par an d'ondes gravitationnelles sont attendues



La théorie de la gravitation d'Einstein est le paradigme principal pour comprendre la structure et la dynamique de notre Univers : du Big Bang à nos jours

Deuxième partie II

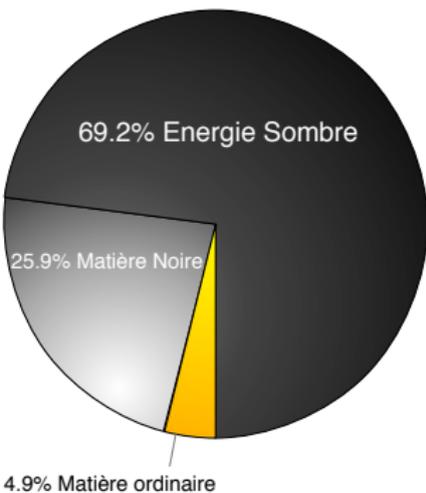
La gravitation en crise



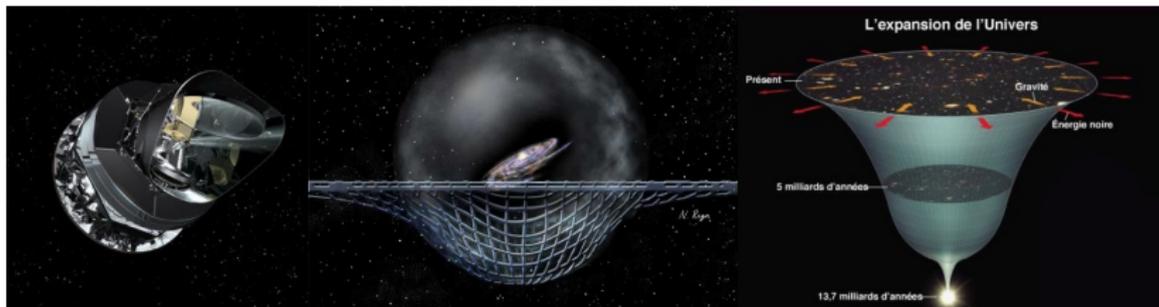
Je ne décrirais pas la situation comme une tension ou un problème mais comme une crise

David Gross (Nobel 2004), août 2019

La gravitation et notre Univers

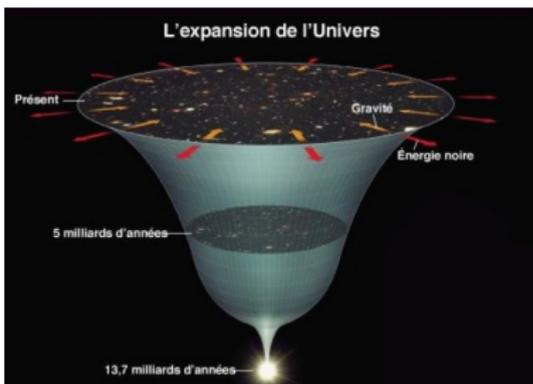
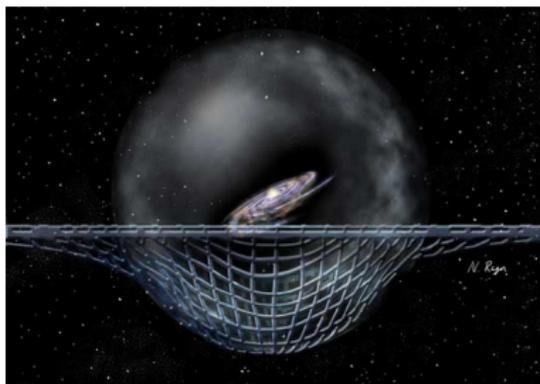


- ▶ Héritage scientifique de la mission Planck (17 juillet 2018)
- ▶ 4.9% matière ordinaire (particules, ...)
- ▶ 25.9% matière noire (autour des galaxies, ...)
- ▶ 69.2% énergie noire (moteur de l'expansion de l'univers)



Énergie noire et matière noire

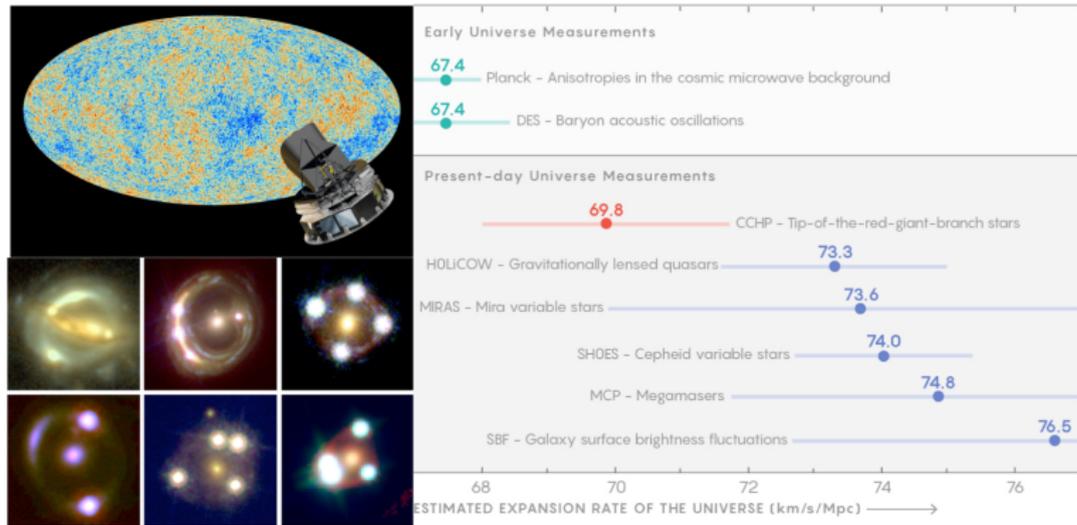
Matière noire et énergie noire **inconnues, invisibles,**
peupleraient massivement notre Univers observable



L'énergie noire est une sorte d' « antigravité » poussant notre
Univers à s'étendre

Thème de l'institut Pascal de cette semaine :
Dark energy where art thou?

Expansion de l'univers : mesures incompatibles



Adam Riess, Nobel 2011 pour la découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers

C'est la force fondamentale la moins bien comprise

The Greatest Unsolved Problem In Theoretical Physics: Why Gravity Is So Weak



Ethan Siegel
Starts With
De

Believe It or Not, Science Still Can't Explain Gravity

Albert Einstein

July 17,
Winter

the one we're most intimately
coffee cup, or even just
that of all the

nature

international weekly journal of science

nature news home news archive specials opinion features news blog nat

Published online 3 November 2010 | Nature | doi:10.1038/news.2010.580

Gravity shows its helpful side

Theoretical study shows that the force can ease quantum calculations.

Geoff Brumfiel

Gravity is tricky. It can solve 'prostate' equations into steam, and has proved a stumbling block to the creation of a single theory of everything. But an analysis now shows that



usually an obstacle to a everything.

PHYS ORG Nanotechnology Physics Earth Astronomy & Space Technology Chemistry Biology

Home Physics General Physics November 25, 2015

Will we have to rewrite Einstein's theory of general relativity?

November 25, 2015 by Robin Tucker, The Conversation



Featured



Car
Sat



Mil
wit
201

Gravitation et mécanique quantique

En 1916 Einstein argumentait déjà pour une modification de sa théorie de la gravitation



À cause des mouvements intra-atomiques, l'atome doit rayonner (...) de l'énergie gravitationnelle, même en très faibles quantités.

Comme cela ne peut être le cas dans la nature, il apparaît alors que la théorie quantique doit modifier (...) la nouvelle théorie de la gravitation.

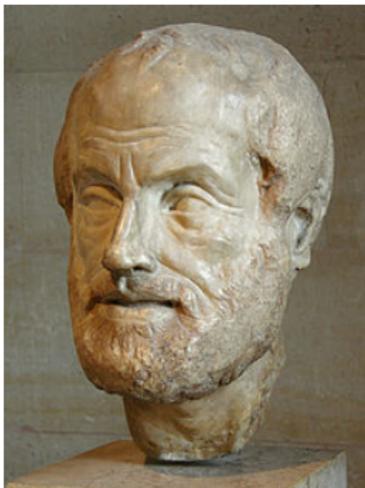
Troisième partie III

La gravitation à travers les âges

C'est le plus beau sort d'une théorie physique que d'ouvrir la voie à une théorie plus vaste dans laquelle elle continue à vivre comme cas particulier

Albert Einstein, « The Special and the General Theory » (1961)

Tendance naturelle des corps lourds



Pour Aristote le mouvement est intimement lié à l'organisation du cosmos, à sa structure et à son ordre

Il est donc évident que, les corps se précipitant également de toutes parts des extrémités vers un seul centre. ...

Tendance naturelle des corps lourds



La Terre est sphérique au centre d'un Ciel clos sphérique

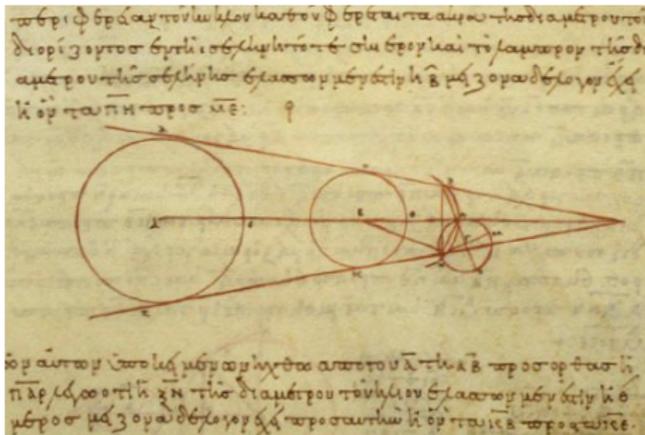
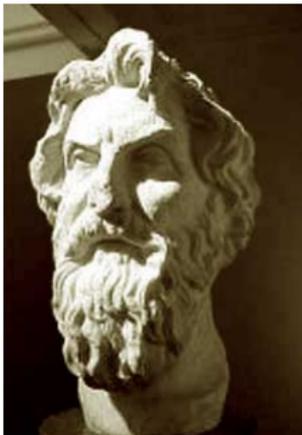
Et si l'on déplaçait la Terre et qu'on la mit là où est maintenant la Lune, chacune des parties qui composent la Terre ne se porterait pas vers la Lune, mais elles se porteraient là où elles se portent maintenant [vers le centre de l'Univers]

Tendance naturelle des corps lourds



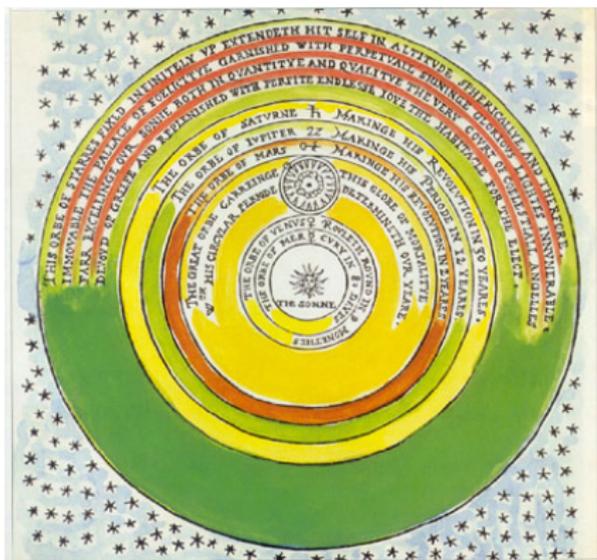
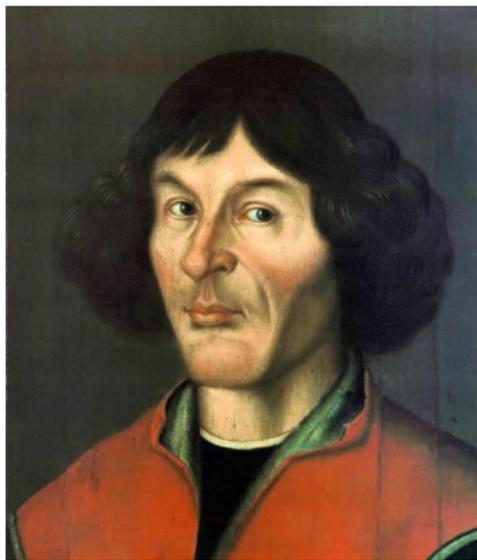
Suivant Aristote, Ptolémée propose un système mathématique cohérent du mouvement des Astres

Ce modèle servira à décrire le Monde pendant 1700 ans



Dans la préface du traité « L'Arénaire » Archimède écrit Aristarque de Samos [...] commence en fait avec l'hypothèse que les étoiles fixes et le Soleil sont immobiles. **Quant à la Terre, elle se déplace autour du Soleil sur la circonférence d'un cercle ayant son centre dans le Soleil.**

L'attraction par un corps apparenté



Quant à moi je considère que la gravité n'est rien d'autre qu'un certain désir naturel que la providence divine de l'artisan de toutes choses a implanté dans les parties pour qu'elles s'apportent la totalité dans l'unité en s'unissant en forme de globe.

Nicolaus Copernic (1473-1543)

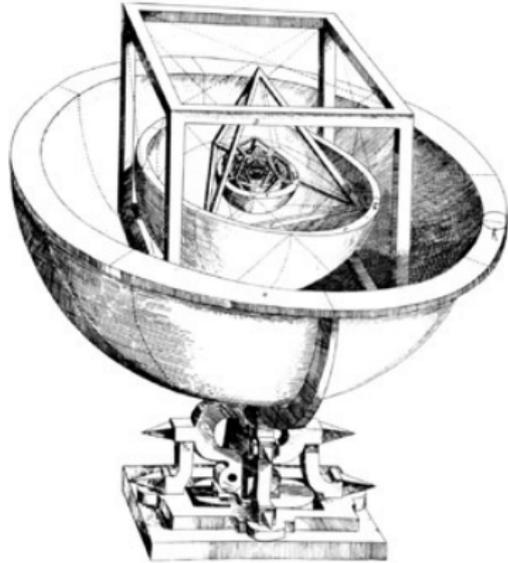
Premières lois empiriques



Kepler donne **trois lois empiriques, exactes et cohérentes des mouvements planétaires**

Il ne reste aucune figure possible, sinon une ellipse parfaite

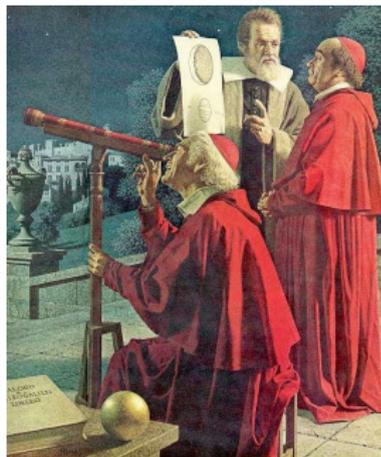
L'attraction par un corps apparenté



Mais la gravitation n'est pas universelle : les planètes de même nature (Terre et Lune) s'attirent mais elles ne sont pas attirées par le Soleil. Elles sont entraînées par la rotation du Soleil sur des orbites elliptiques

Johannes Kepler (1571-1630)

Première loi de la gravitation

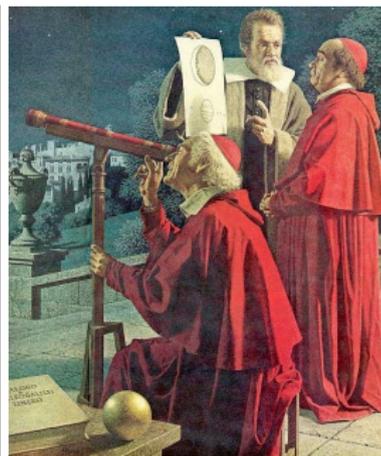


Galilée affirma l'identité des lois du Ciel et de la Terre

Les parties de la Terre se meuvent non parce qu'elles tendent vers le centre du Monde, mais pour se réunir avec leur tout, et que c'est pour cela qu'elles ont une inclination naturelle vers le centre du globe terrestre. (...)

Galileo Galilei (1564 - 1642)

Première loi de la gravitation



Galilée affirma l'identité des lois du Ciel et de la Terre

Il ne cherche pas à déterminer la nature de la gravité
mais ses effets traduits par des lois mathématiques précises

Galileo Galilei (1564 - 1642)

Gravitation propre et légèreté relative

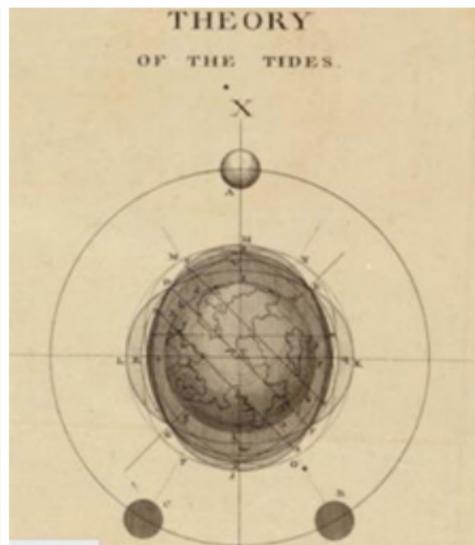
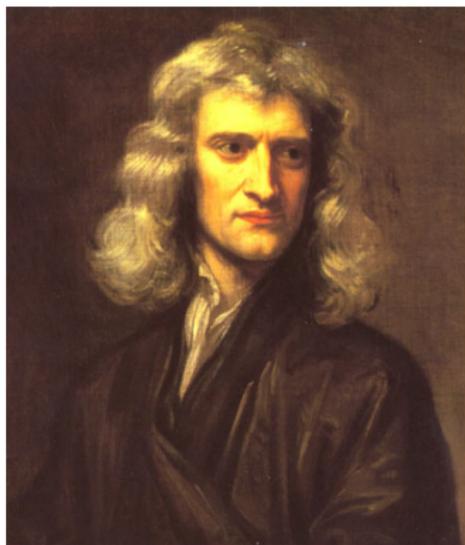


La gravité est propre à chaque astre résultat d'un processus local de légèreté relative : théorie mécaniste de tourbillons

Il est évident que, cette pierre contenant en soi beaucoup plus de la matière de la terre, et en récompense en contenant d'autant moins de celle du ciel. (...) elle ne doit pas avoir la force de monter au-dessus de lui, mais bien lui, au contraire, doit avoir la force de la faire descendre au-dessous ...

Réné Descartes (1596 - 1650)

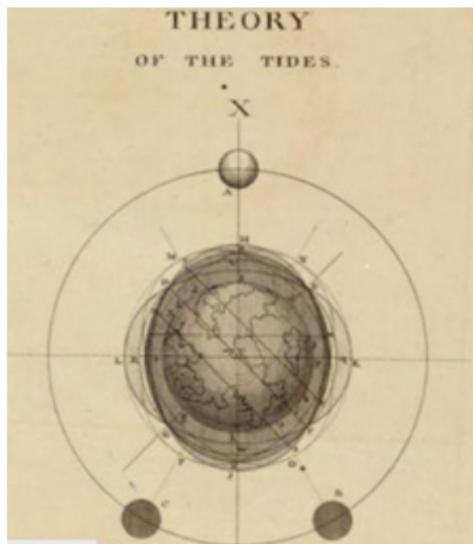
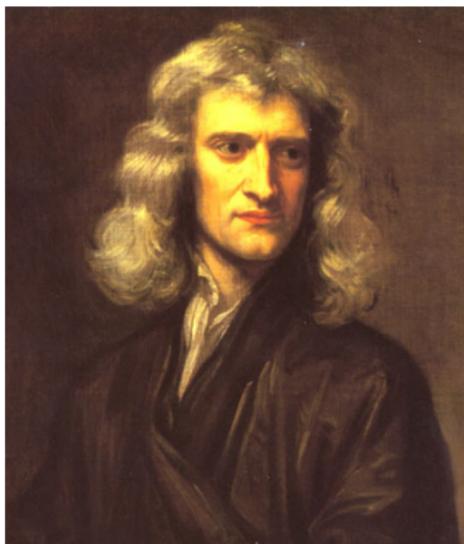
La gravitation universelle



Hivers 1679-1680 formulation de la **gravitation universelle**

J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de gravitation, mais je n'ai assigné nulle part la cause de la gravitation.

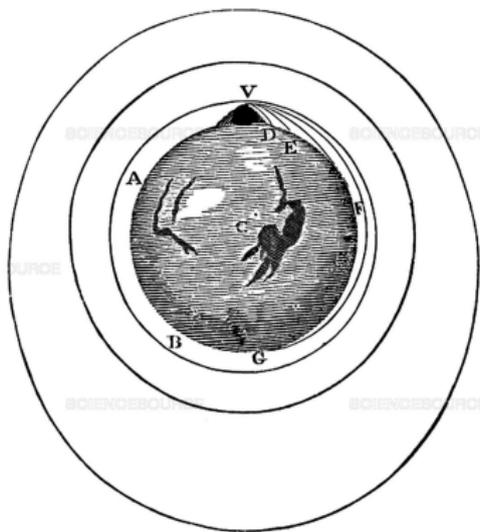
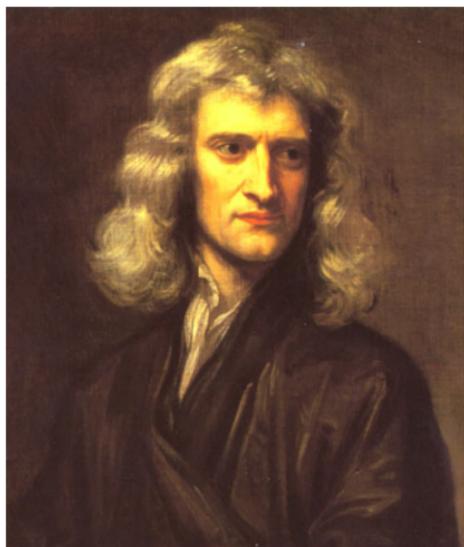
La gravitation universelle



mais n'explique pas ce qui met les corps en mouvement

qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose, (...) est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente dans les matières philosophiques, puisse jamais se rendre coupable.

Une gravitation universelle ... mais mystérieuse



Comme Galilée, il renonce à déterminer la nature de la gravité

Je n'ai pu encore parvenir à déduire des phénomènes la raison de ces propriétés de la gravité. et je n'imagine point d'hypothèse.

Une gravitation mystérieuse, occulte et rejetée

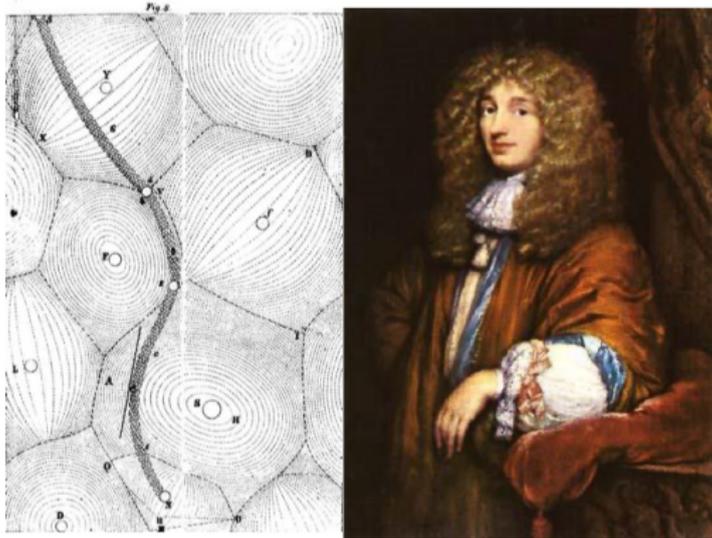


Leibniz et Huygens affirment que l'attraction newtonienne implique une qualité occulte pour les corps qui tient du miracle là où chaque phénomène avait avec Descartes une cause précise, palpable

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646 - 1716)

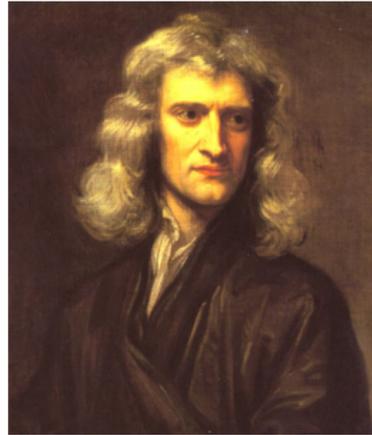
Christiaan Huygens (1629-1695)

Gravité comme réaction à l'éther



Il n'est pas difficile maintenant d'expliquer comment par ce mouvement la pesanteur est produite. (...) C'est donc en cela que consiste vraisemblablement la pesanteur des corps : laquelle on peut dire, que c'est l'effort que fait la matière fluide, qui tourne circulairement autour du centre de la Terre en tous sens, à s'éloigner de ce centre, et à pousser en sa place les corps qui ne suivent pas ce

Deux conceptions de la gravitation



- ▶ Newton action à distance
- ▶ Huygens gravité comme réaction au mouvement centrifuge de l'éther

Ces deux conceptions très différentes de la gravitation sont strictement équivalentes pour la mécanique céleste

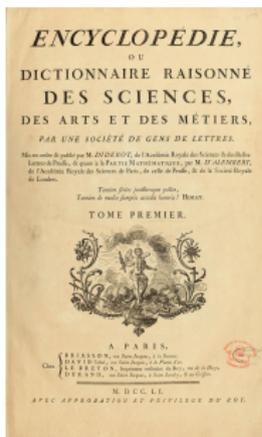
Elles impliquent des résultats différents la variation de la gravité à sa surface de la Terre et la forme de la Terre

Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759)



En 1728 séjour en Angleterre. Revient convaincu de la supériorité du système newtonien

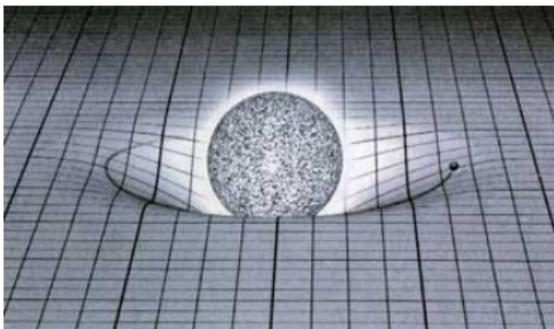
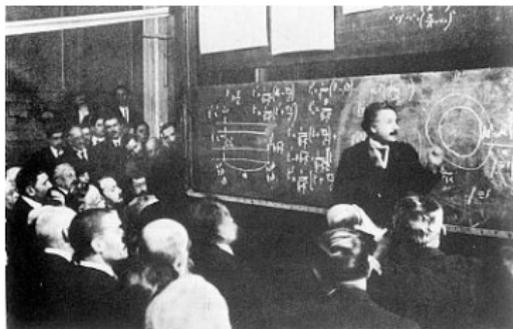
- ▶ Introduit les idées de Newton en France :
1756 traduction des Principia de Newton par Émilie du Châtelet
- ▶ S'oppose à la théorie des tourbillons de Descartes
- ▶ Dirige une expédition géodésique en Laponie pour y mesurer la longueur d'un arc de méridien : confirme la théorie de Newton et rejette celle de Huygens



Il a fallu plus d'un demi-siècle pour apprivoiser les Académiciens du Continent avec l'attraction.(..) on s'applaudissait tant d'avoir banni de la philosophie les qualités occultes, on avait tant de peur qu'elles revinssent, (...) on était si charmé d'avoir introduit dans l'explication de la nature une apparence de mécanisme, (...)

Mais quand la cause est inconnue, nous pouvons considérer simplement l'effet, sans avoir égard à la cause : (...) - Article « Attraction » Encyclopédie de Diderot et d'Alembert (1751)

La gravitation comme courbure de l'espace-temps



L'espace tout entier est la scène du champ gravitationnel :
un corps n'est pas attiré par un autre corps mais se déplace
librement dans un espace-temps courbé

Les corps suivent des mouvements naturels en réagissant aux
propriétés de l'espace-temps.

On retrouve un aspect de la physique d'Aristote

Quatrième partie IV

Plonger dans les trous noirs



Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténébreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.

Pascal Quignard (La barque silencieuse Chap XXV Extase et enstase)

Combien de trous noirs dans l'Univers ?

SCIENCE NEWS LETTER for January 18, 1964

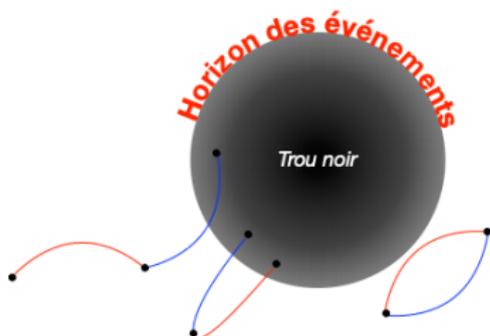
ASTRONOMY

"Black Holes" in Space

- ▶ Plus de 100 millions de trous noirs de masse solaire dans notre galaxie
- ▶ Au moins 100 milliard de trous noirs supermassif (million ou milliard de masse solaire) dans notre Univers
- ▶ Chaque seconde un trou noir est formé dans une supernovæ
- ▶ Le plus gros trou noir connu est dans la Galaxie NGC4889 : 21 milliards de masse solaire
- ▶ Le trou noir le plus proche connu est V4641 Sgr situé à 1600 année lumières de la Terre.

Stephen Hawking : trous noirs quantiques

En 1975 Stephen Hawking découvre que les trous noirs émettent un rayonnement quantique produit au voisinage de l'horizon des événements



Température

$$T_{BH} = 6.17 \times 10^{-8} \frac{M_{\odot}}{M_{\bullet}} \text{ Kelvin}$$

Temps d'évaporation

$$\tau = \left(\frac{M_{\bullet}}{10^{12} \text{ kg}} \right)^3 13.8 \text{ billion years}$$

10^{12} kg est la masse totale de la population humaine mondiale

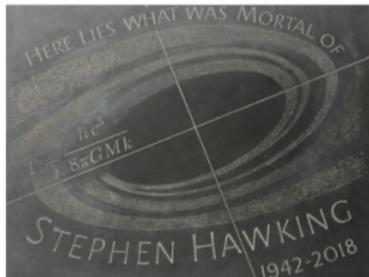
Comprendre la nature de ce rayonnement quantique est un défi majeur de la physique moderne

Les trous noirs poussent la théorie à ses limites



Jusqu'à la fin de sa vie il a étudié les trous noirs quantiques
Dans un article posthume « Black hole and soft hair » [1810.01847] avec Malcolm Perry et Andrew Strominger, il propose que l'information quantique est stockée autour du trou noir

- ▶ « halo quantique » affecte l' « ombre » des trous noirs
- ▶ Peut-on détecter des degrés de liberté quantiques avec les ondes gravitationnelles ?



We remember Isaac Newton for answers, we remember Hawking for questions. (Kip Thorne- Westminster Abbey ceremony - 15th June 2018)