L'attraction de la gravitation

Pierre Vanhove

IPhT Saclay & ВШЭ

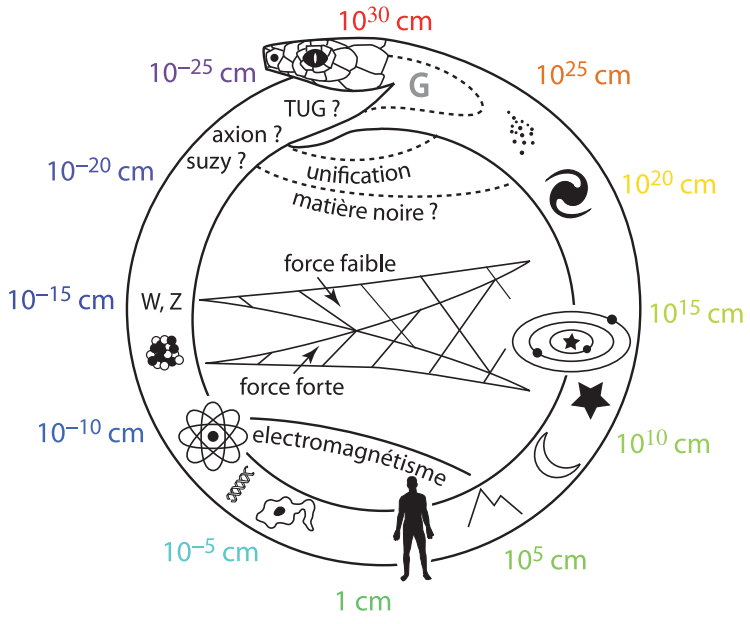
Séminaires de vulgarisation
Institut de Physique Théorique, CEA-Saclay,
18 septembre 2018

L'importance de la gravité

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)

La force de gravité est universelle

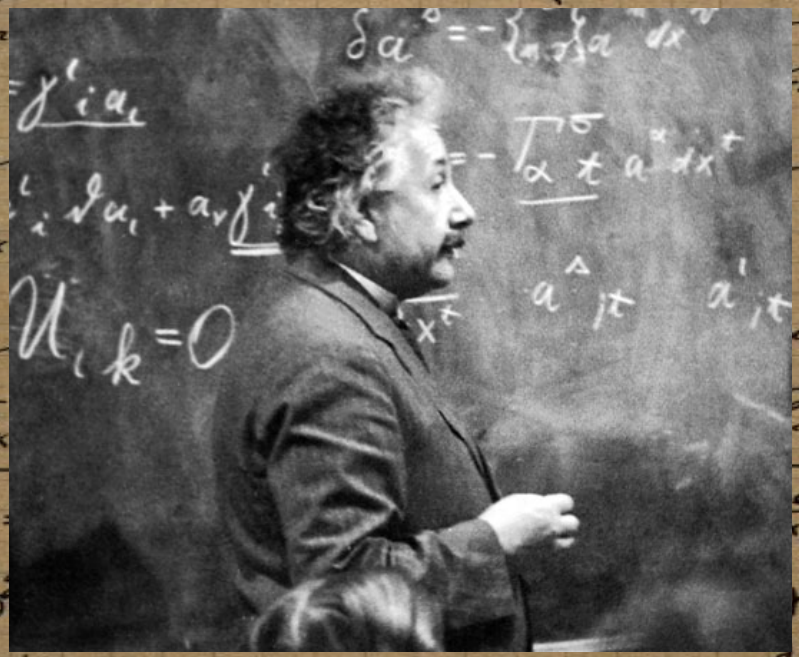


- elle agit sur tout type de matière et d'énergie
- Elle est toujours attractive
- elle est très faible comparée aux autres forces

Un sujet de recherche fortement représenté à l'IPhT et déjà traité dans ce séminaire de vulgarisation

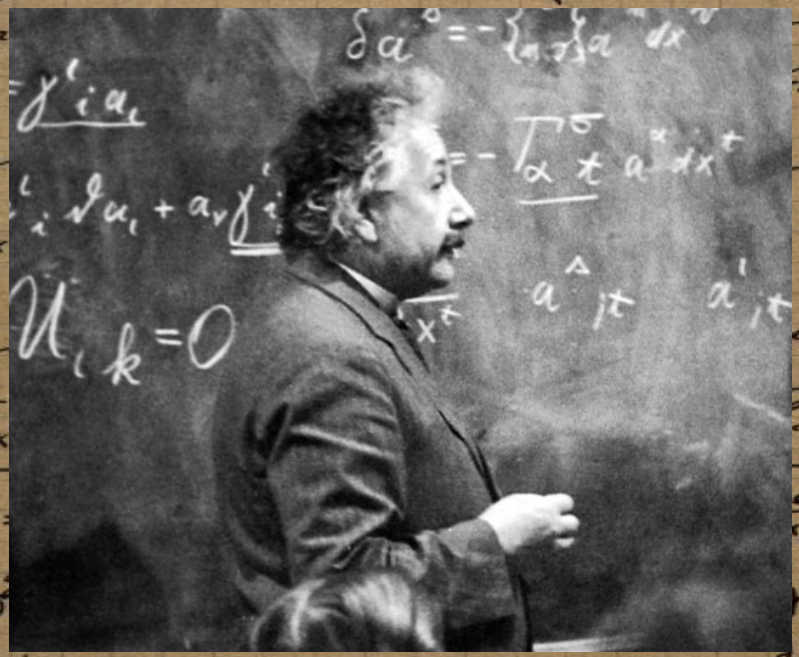
- *De Galilée au projet Euclid : questions croisées entre physique fondamentale et astrophysique,* Francis Bernardeau, 13 février 2018
- *Les trous noirs,* Iosif Bena, 13 décembre 2016
- *Les ondes gravitationnelles,* Chiara Caprini, 8 mars 2016
- *La théorie des cordes,* Mariana Graña, 2 février 2016
- *Une petite histoire du cosmos,* Philippe Brax, 27 janvier 2015

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



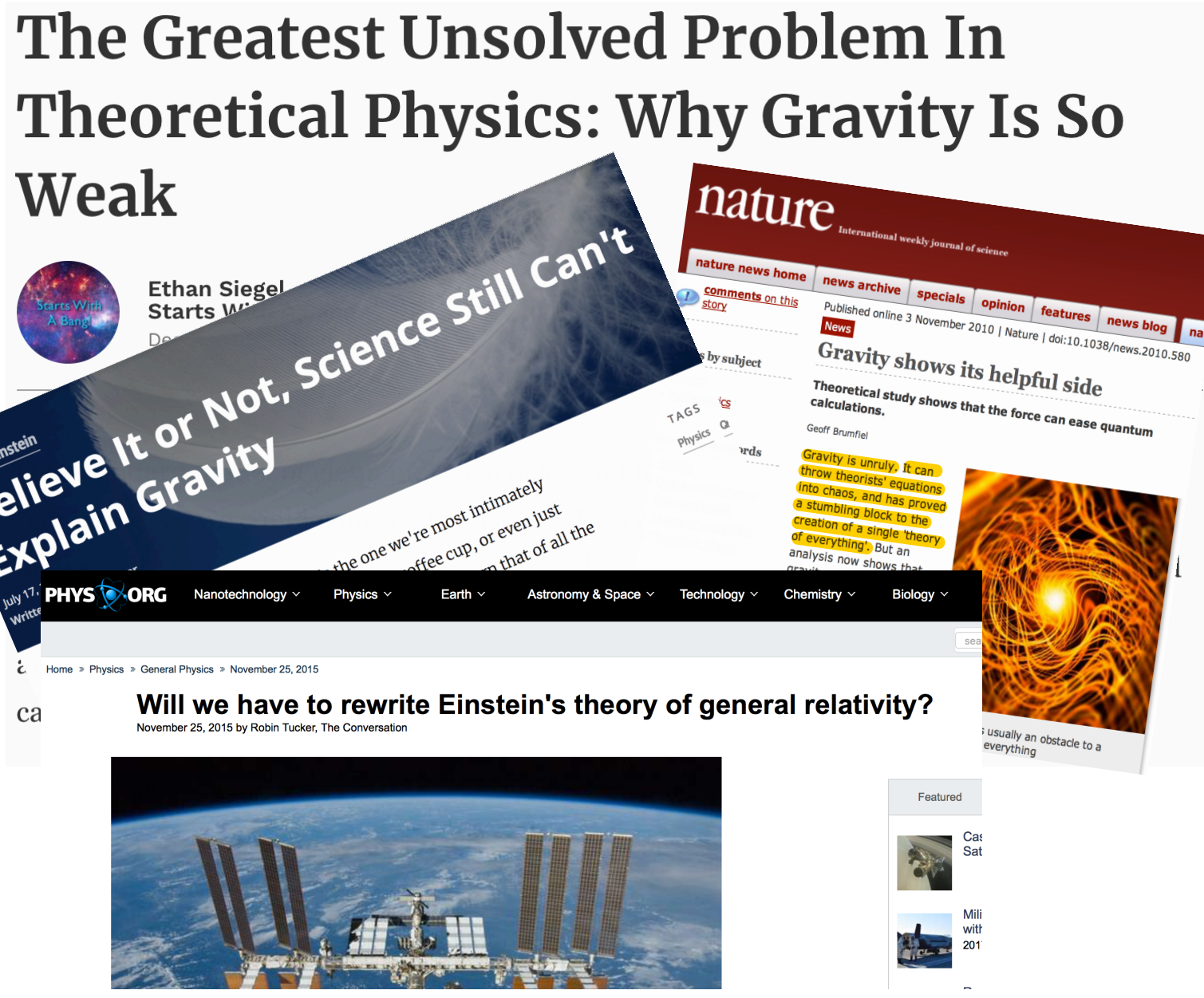
Il a profondément changé notre vision de l'espace et du temps

Est-ce le dernier mot sur la gravitation ?



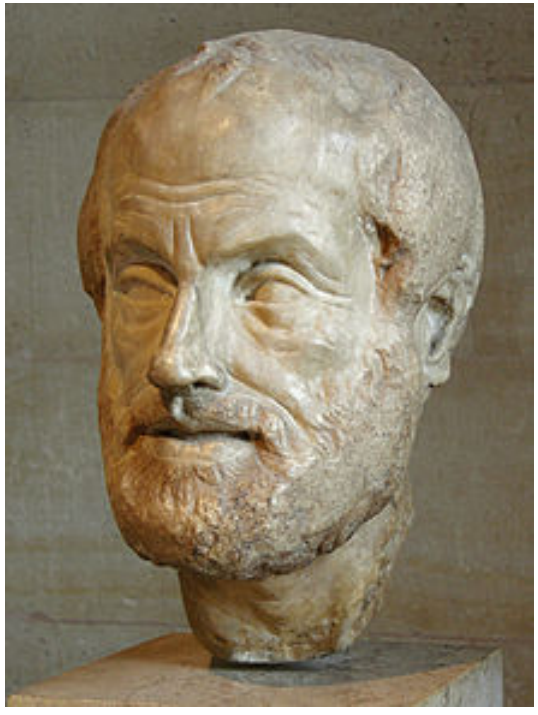
Il faut avoir calculé et mesuré bien des espaces réels et fictifs avant de s'attaquer, comme penseur, au problème de l'espace.

Hermann Hesse, « Narcisse et Goldmund »



C'est la force fondamentale la moins bien comprise

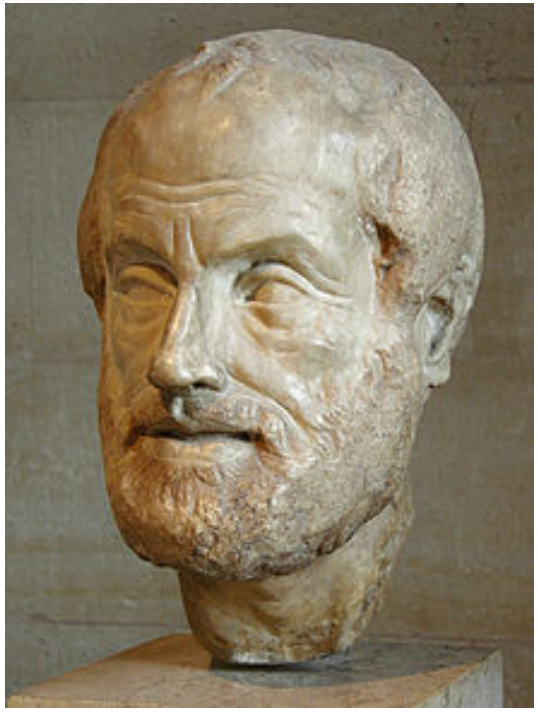
Tendance naturelle des corps lourds



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



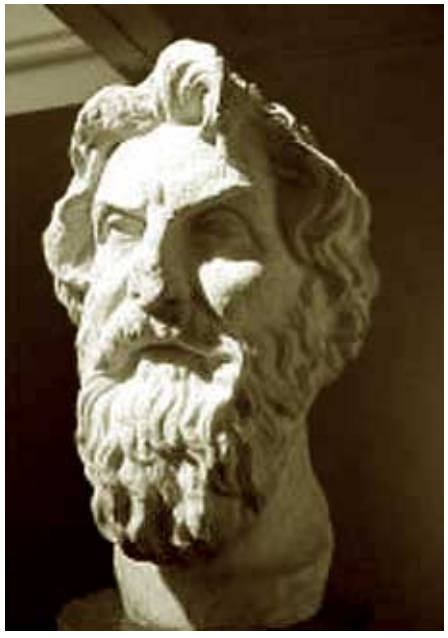
La Terre est sphérique au centre d'un Ciel clos sphérique

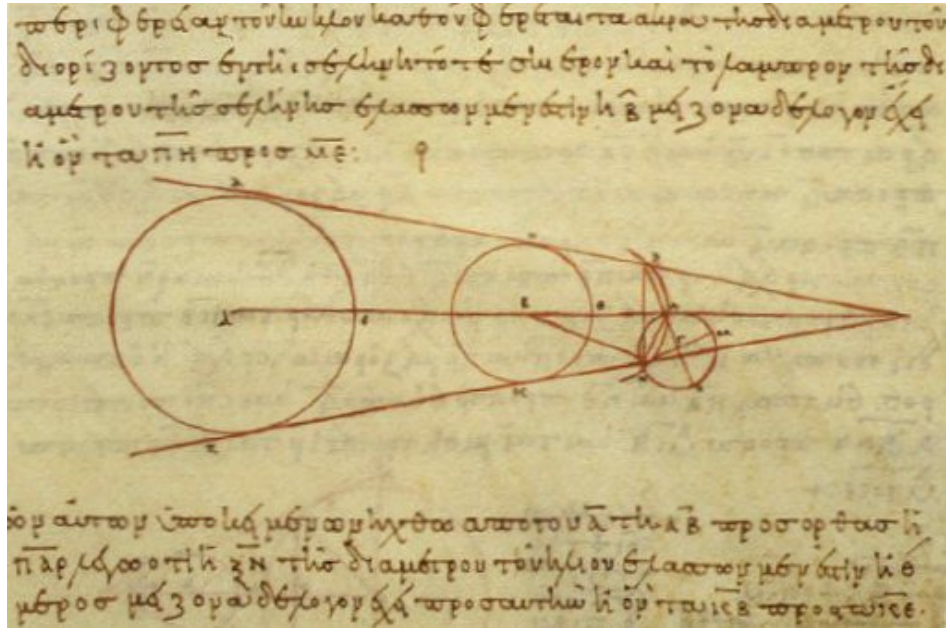
Et si l'on déplaçait la Terre et qu'on la mit là où est maintenant la Lune, chacune des parties qui composent la Terre ne se porterait pas vers la Lune, mais elles se porteraient là où elles se portent maintenant [vers le centre de l'Univers]

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

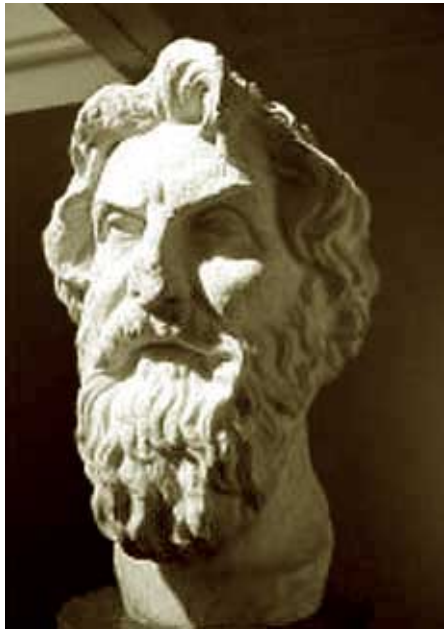


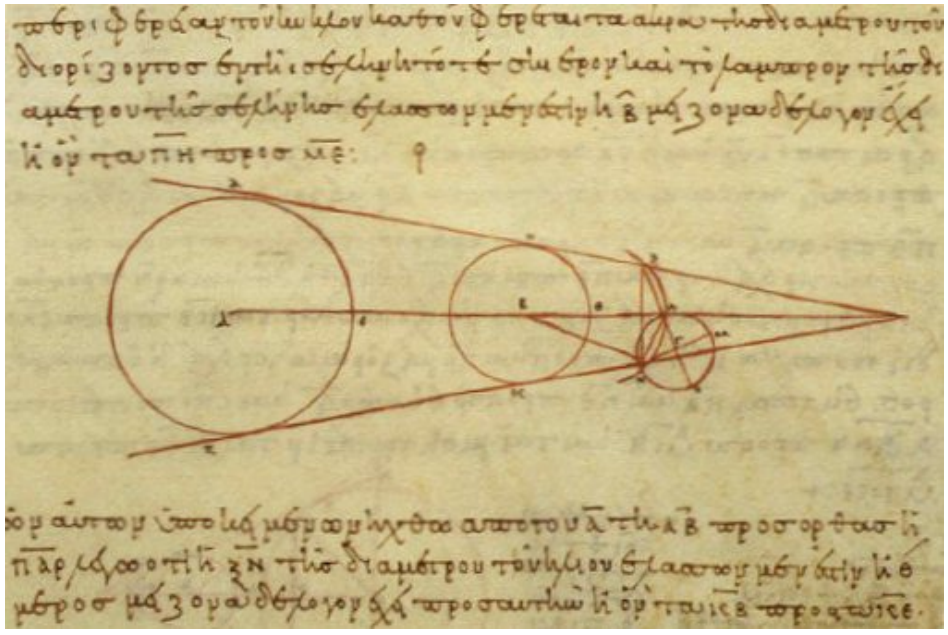


Aristarque de Samos (310–230 av. J.C.) utilisa le théorème de Thalès pour estimer le rayon du Soleil et sa distance à la Terre

Son calcul donna un Soleil beaucoup plus gros que la Terre.

Il conclut logiquement que la Terre tourne autour du Soleil.

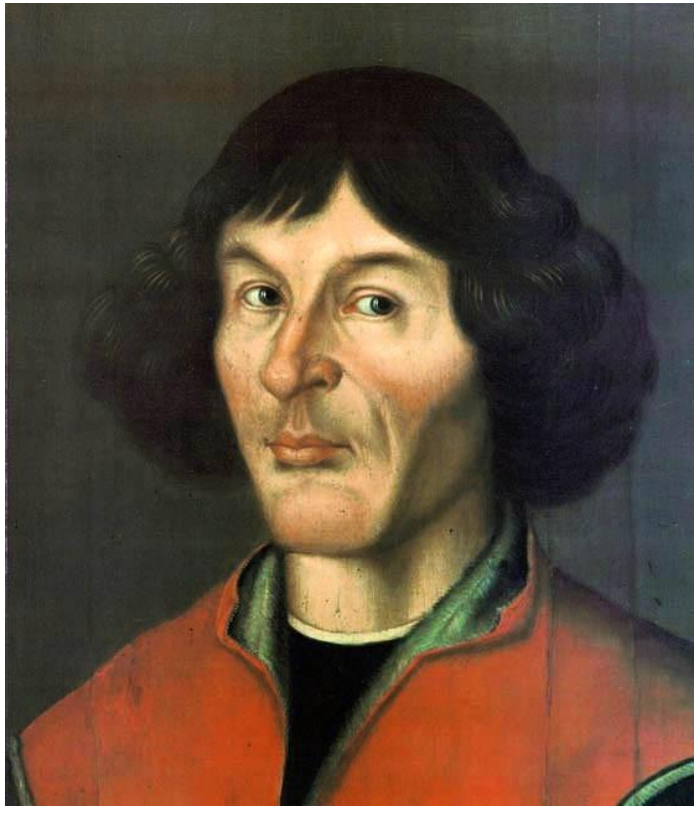


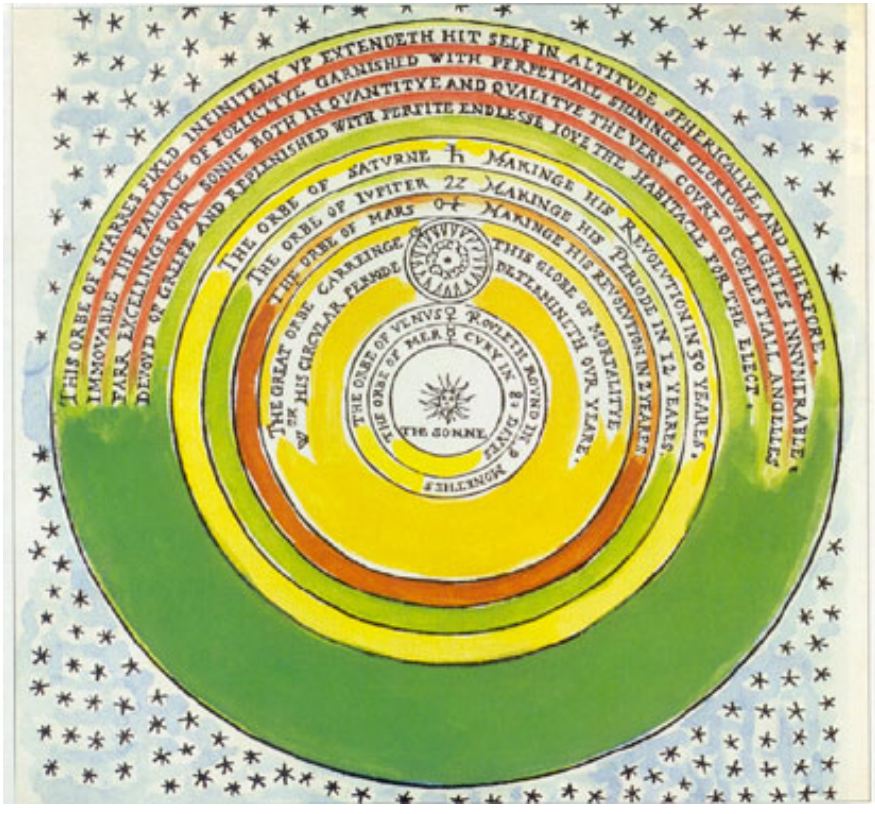


Dans la préface du traité « L'Arénaire » Archimède écrit

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.

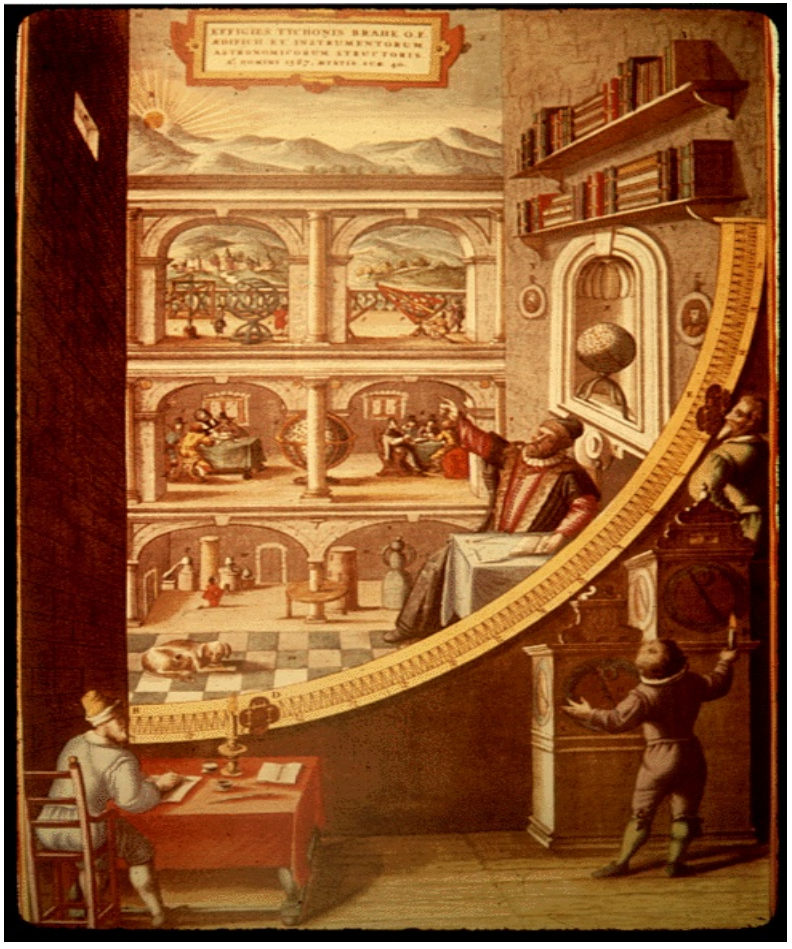
L'attraction par un corps apparenté





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.

L'attraction par un corps apparenté

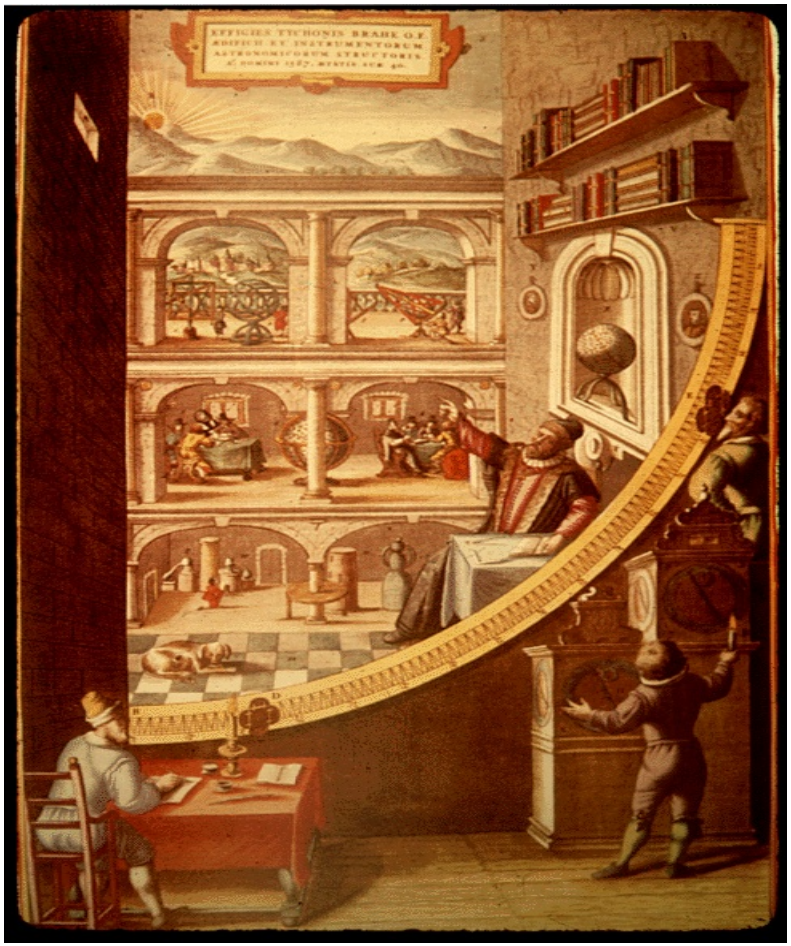


La gravité est une disposition corporelle réciproque entre des corps apparentés pour s'unir ou se conjoindre (...) en sorte que la Terre tire la pierre beaucoup plus que la pierre ne tend vers la Terre.

L'attraction par un corps apparenté

C'est pourquoi, où que la Terre soit placée, ou bien qu'elle se transporte par sa puissance animale, les corps lourds sont toujours portés vers elle.

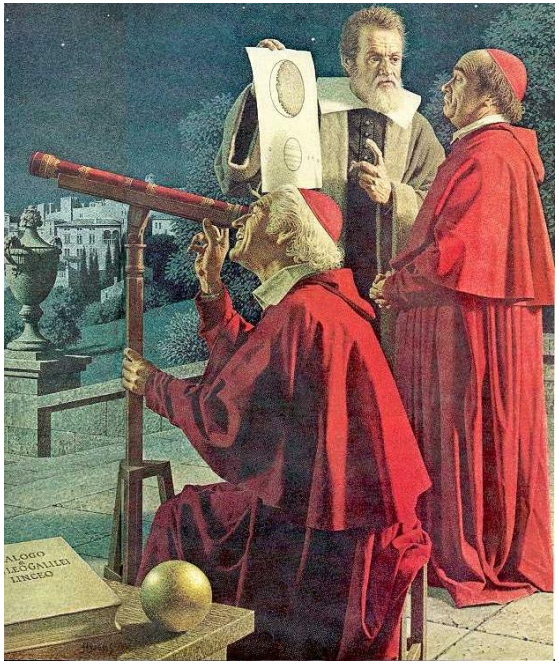
L'attraction par un corps apparenté



Kepler donnent trois lois empiriques, exactes et cohérentes des mouvements planétaires

Mais la gravitation n'est pas universelle : les planètes ne sont donc pas attirées mais entraînées par la rotation du Soleil

L'attraction par un corps apparenté



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

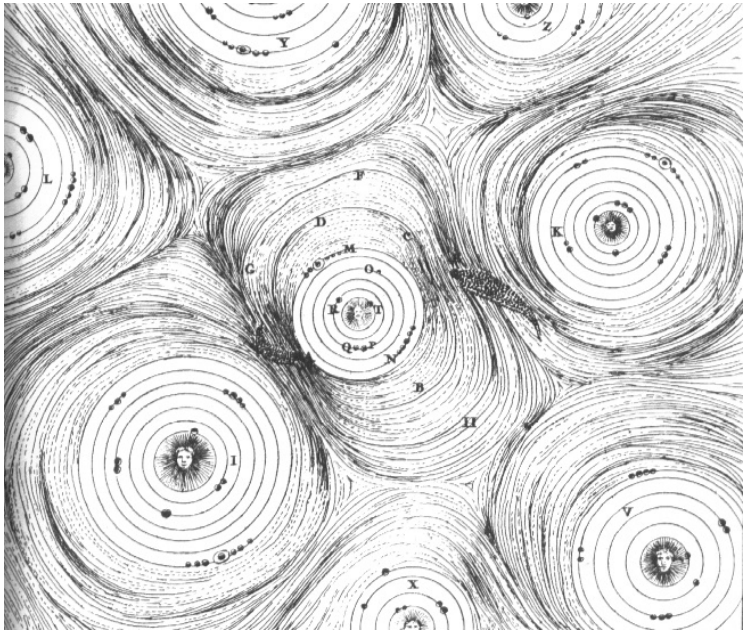
Les parties de la Terre se meuvent non parce qu'elles tendent vers le centre du Monde, mais pour se réunir avec leur tout, et que c'est pour cela qu'elles ont une inclination naturelle vers le centre du globe terrestre, (...)

Première loi de la gravitation

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

Vérification sur la lune de la loi de la chute des corps formulée par Galilée en 1638 par les astronautes de la mission Apollo 15

Gravitation et légèreté relative

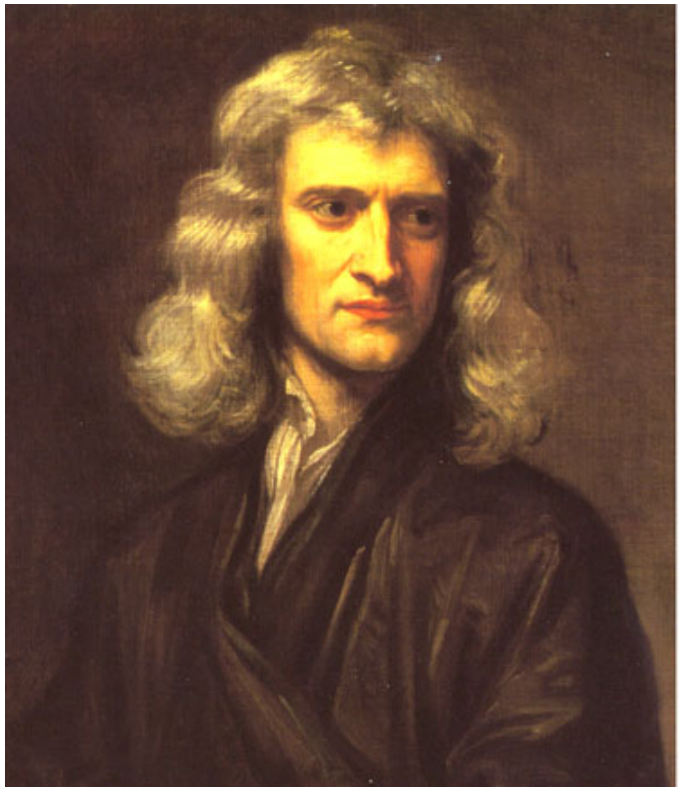


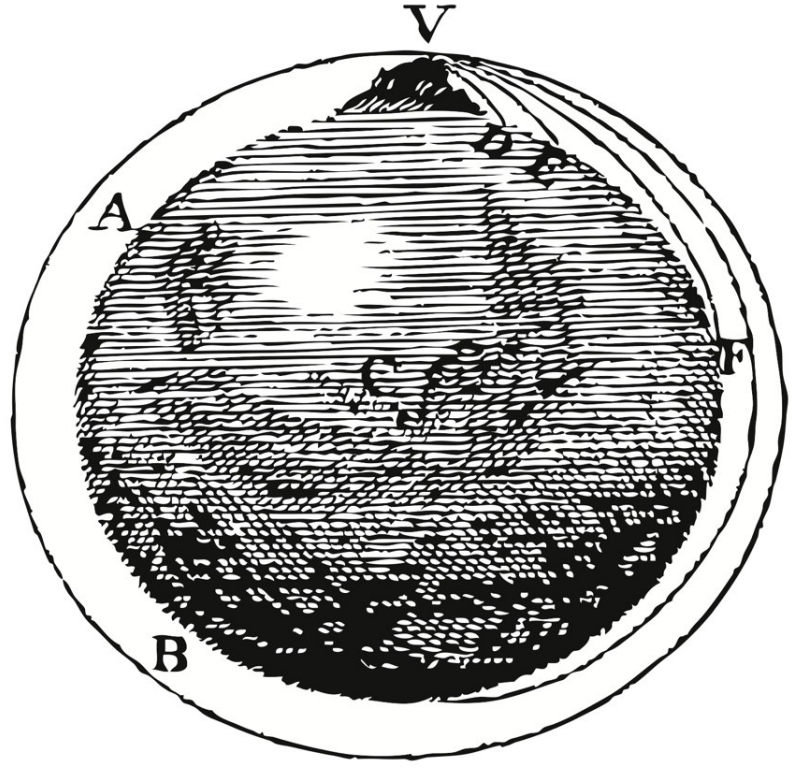
Pour Descartes chaque phénomène a une raison palpable

> 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 ...

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

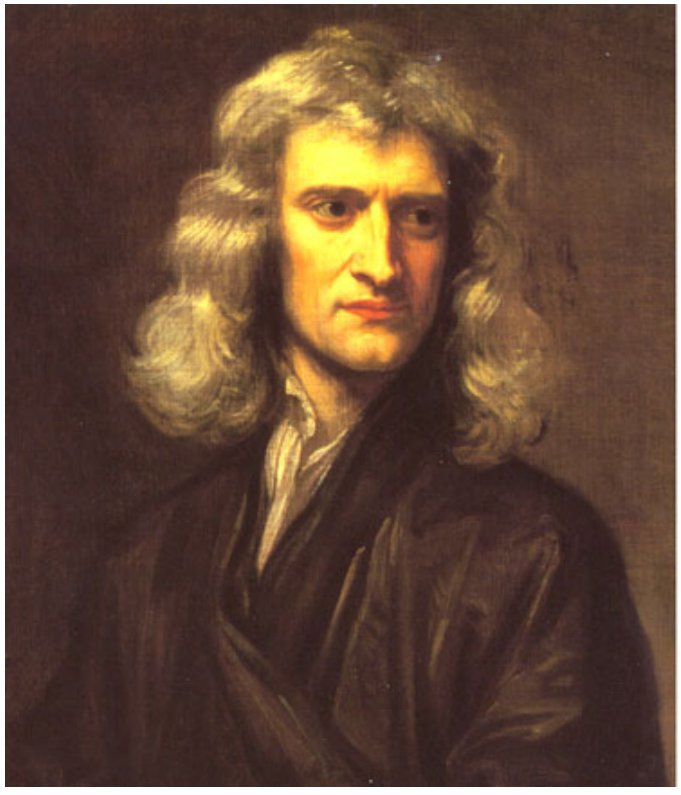
La gravitation universelle

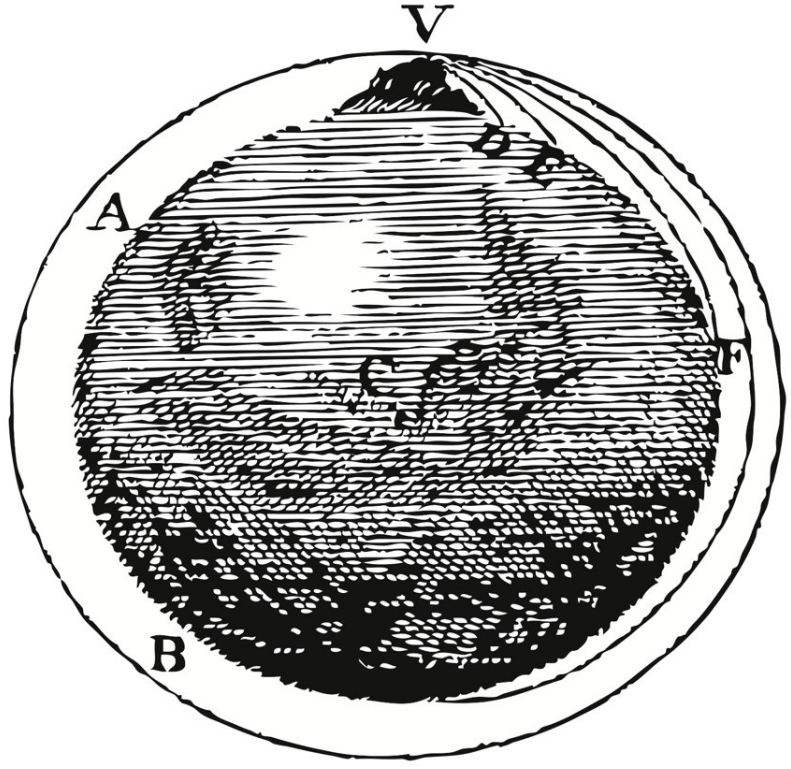




Les lois de Kepler, sans être totalement exactes, sont suffisamment proches de la vérité pour avoir amené à la loi d'attraction des corps du système solaire.

La gravitation universelle

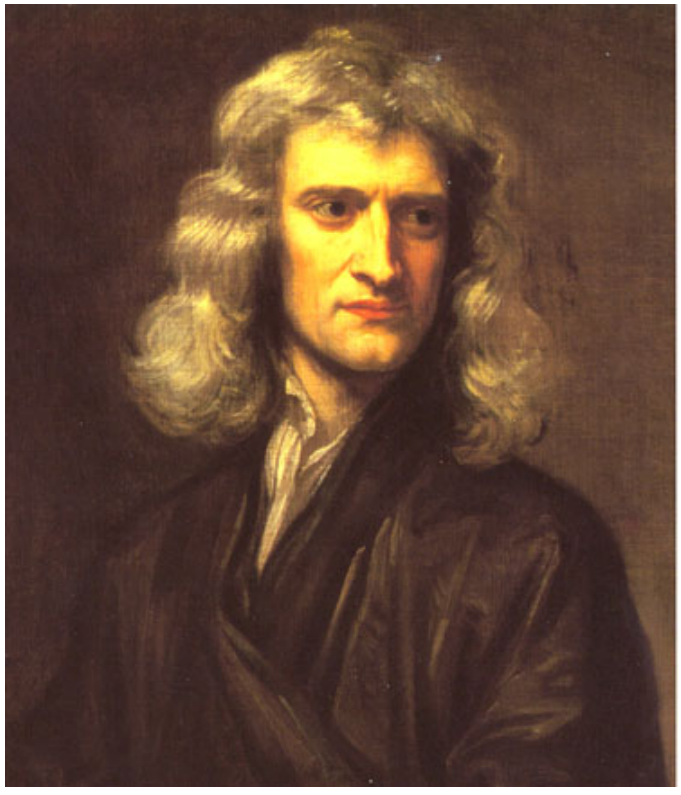


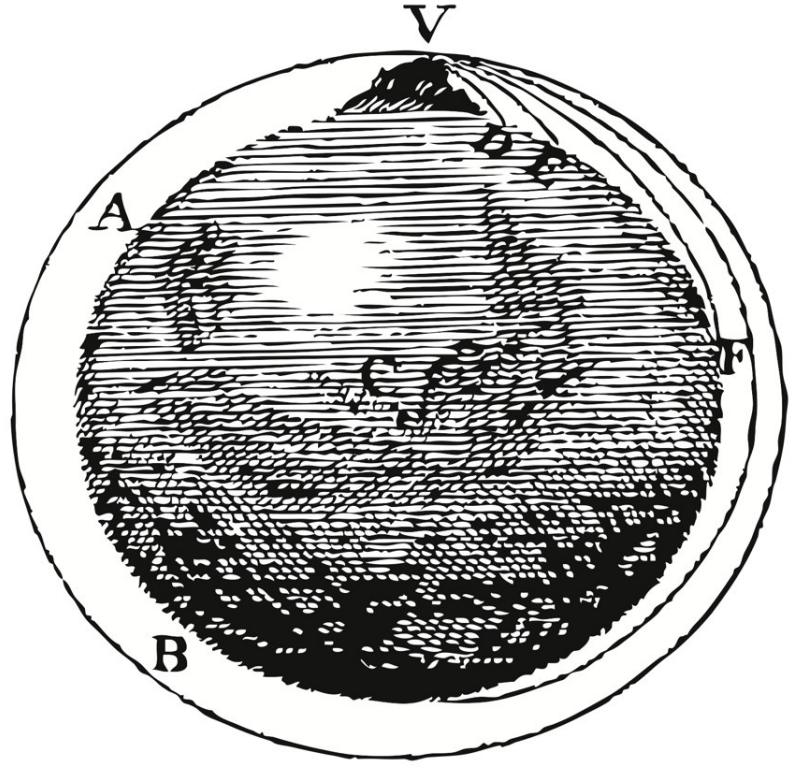


Hivers 1679-1680 formulation de la gravitation universelle

> *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

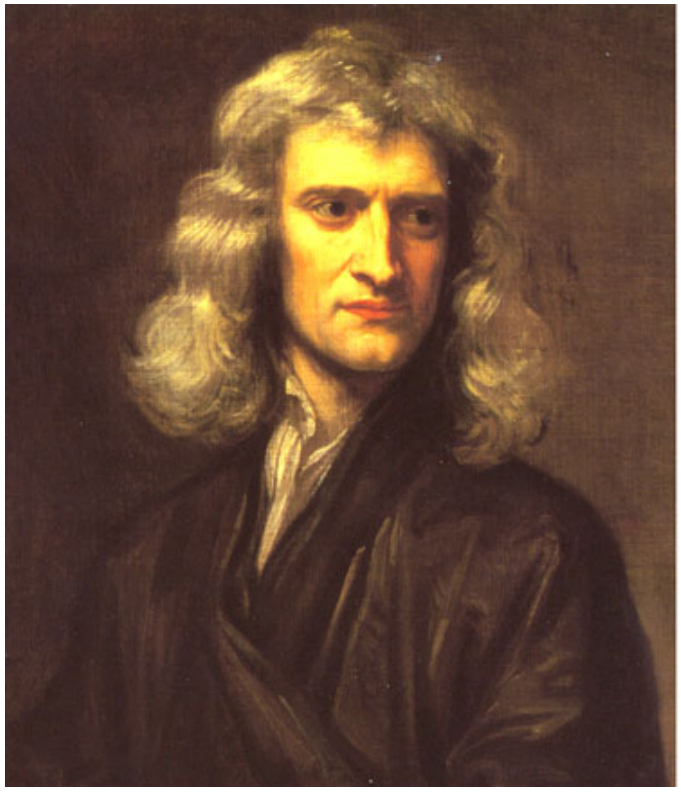


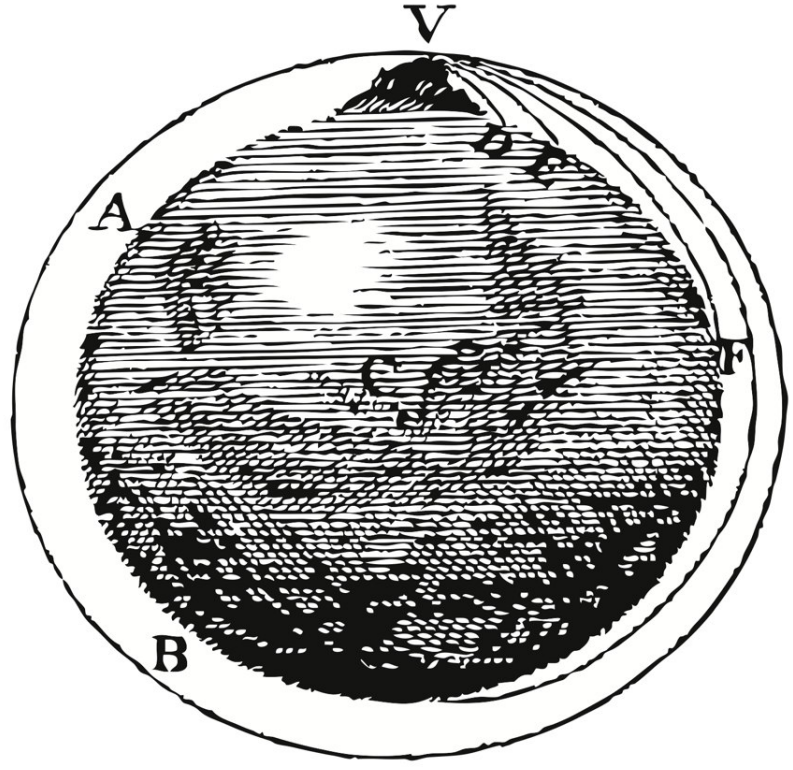


mais n'explique pas ce qui met les corps en mouvement

> *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





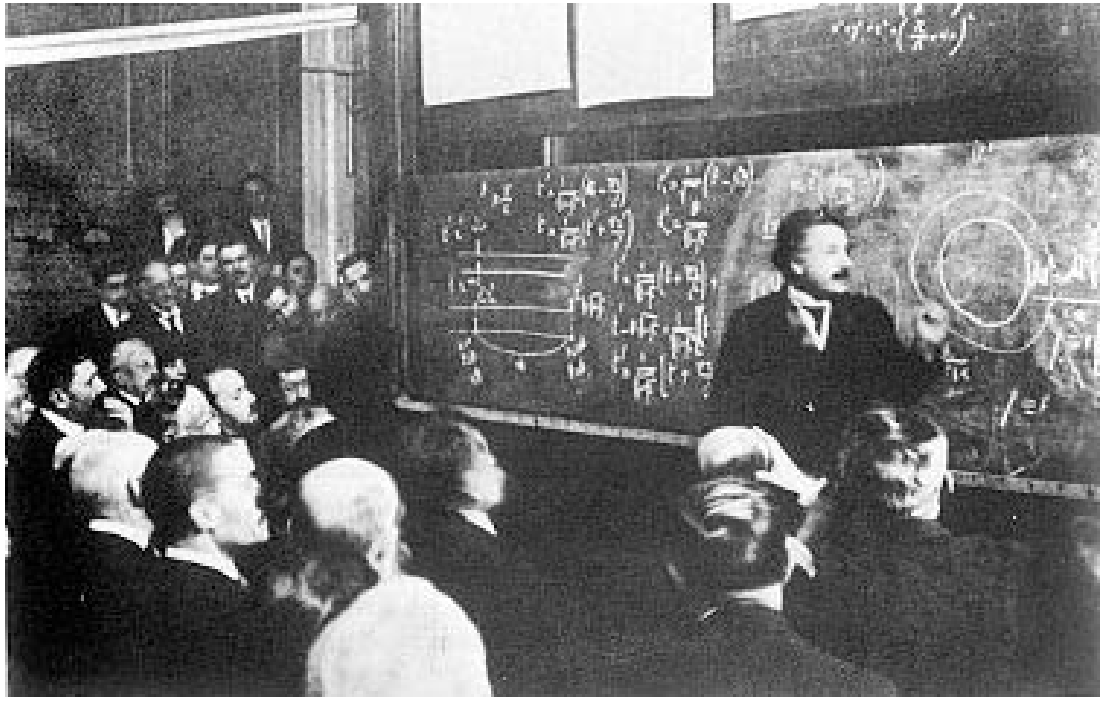
Comme Galilée, il renonce à déterminer la nature de la gravité

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 là où chaque phénomène avait avec Descartes une cause précise, palpable

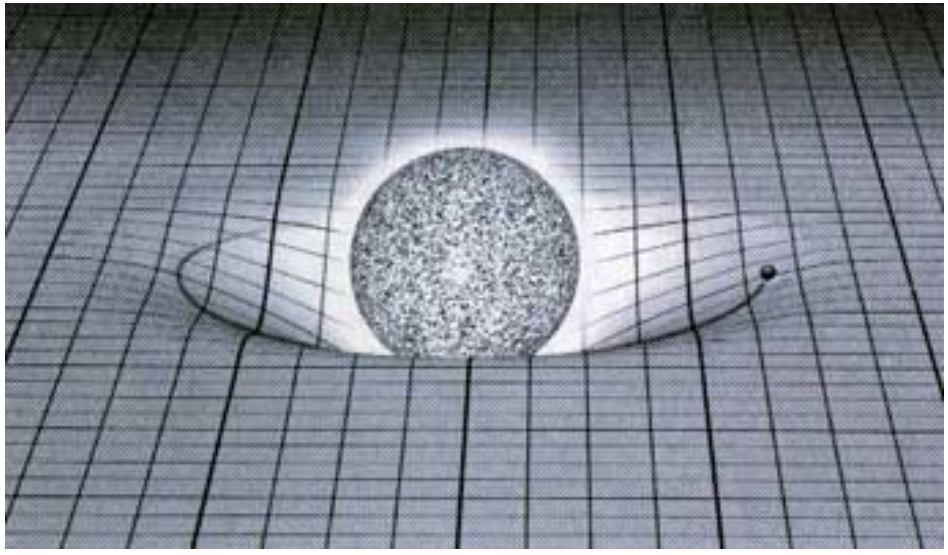
La gravitation comme courbure de l'espace-temps



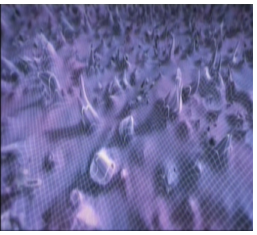
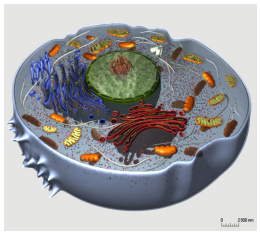
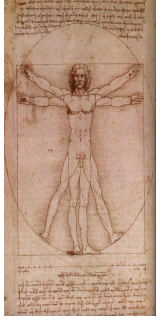
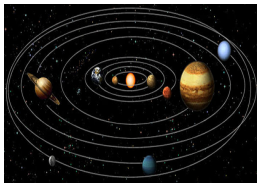
En 1915, Einstein formule la relativité générale

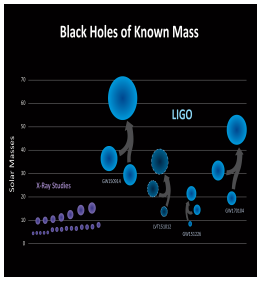
> J'étais assis sur ma chaise au Bureau Fédéral de Berne... Je compris que si une personne est en chute libre, elle ne sentira pas son propre poids. J'en ai été saisi. Cette pensée me fit une grande impression. Elle me poussa vers une nouvelle théorie de la gravitation.

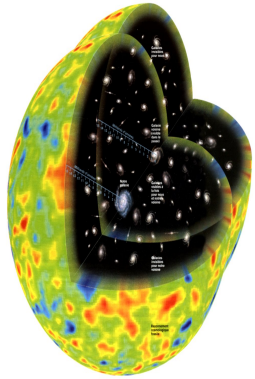
La gravitation comme courbure de l'espace-temps



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





$10^{-35}\,m$ $10^{-6}m$ $1m$ $10^{9}m$ $10^{19}m$ $10^{25}m$ $10^{27}\,m$

connaissance faible

assez correcte

bonne

données peu précises

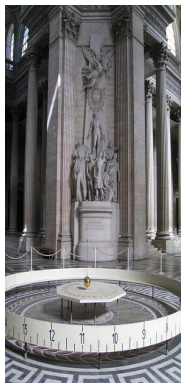
faible

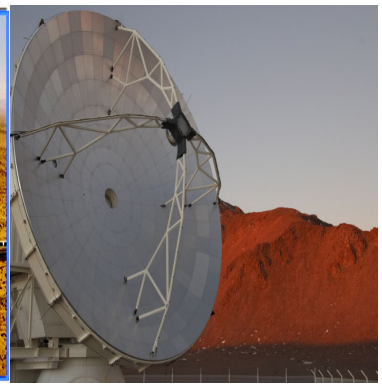
sondes spatiales

expériences de laboratoire

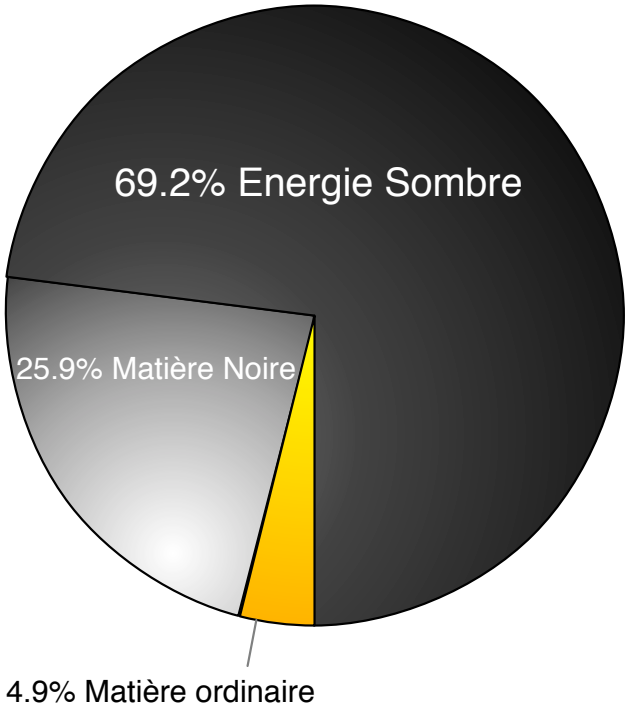
astronomie

cosmologie

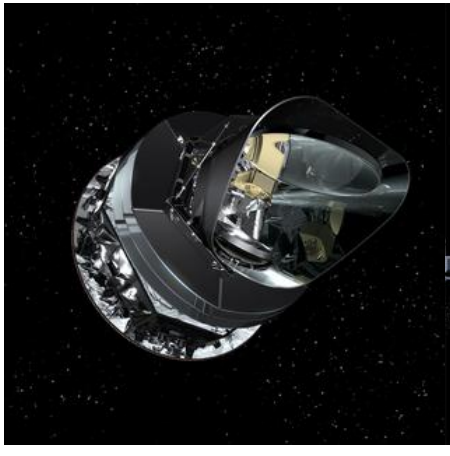


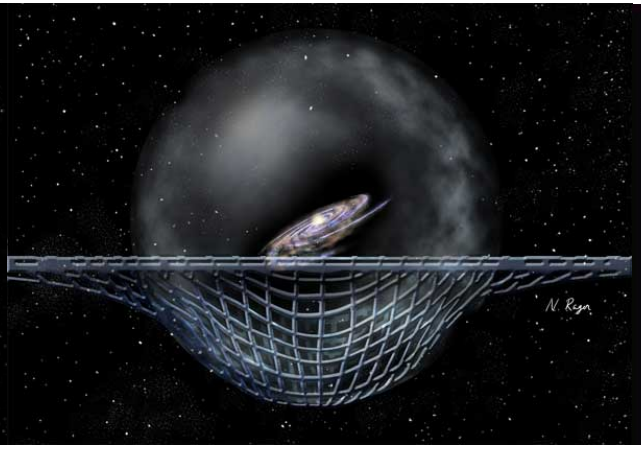


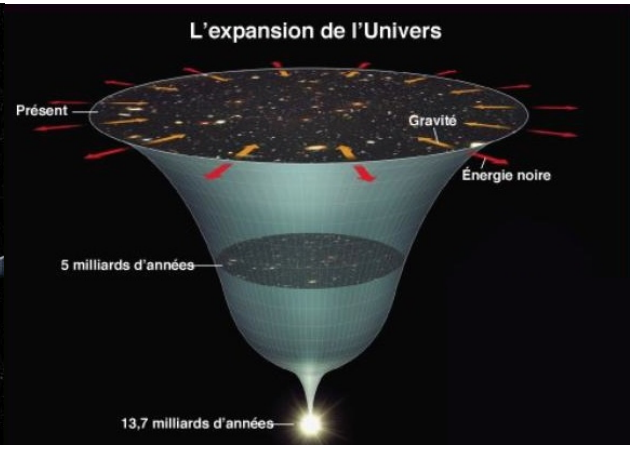
La gravitation et notre Univers



- 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)

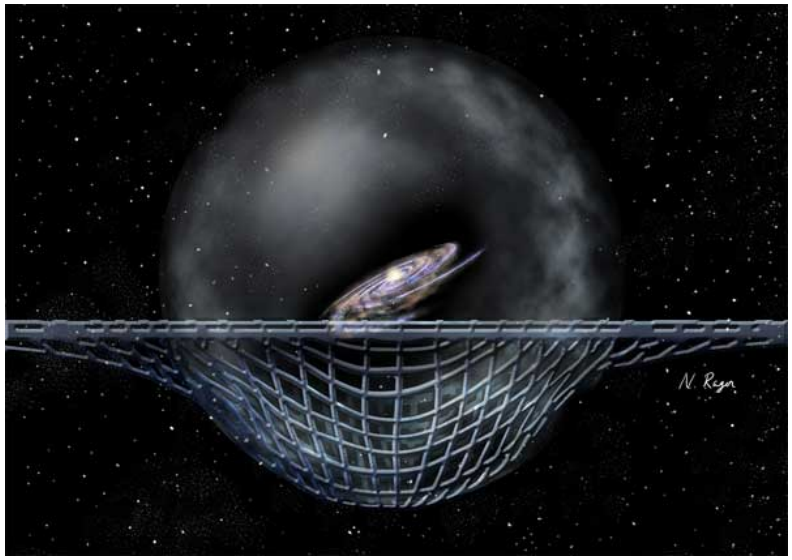


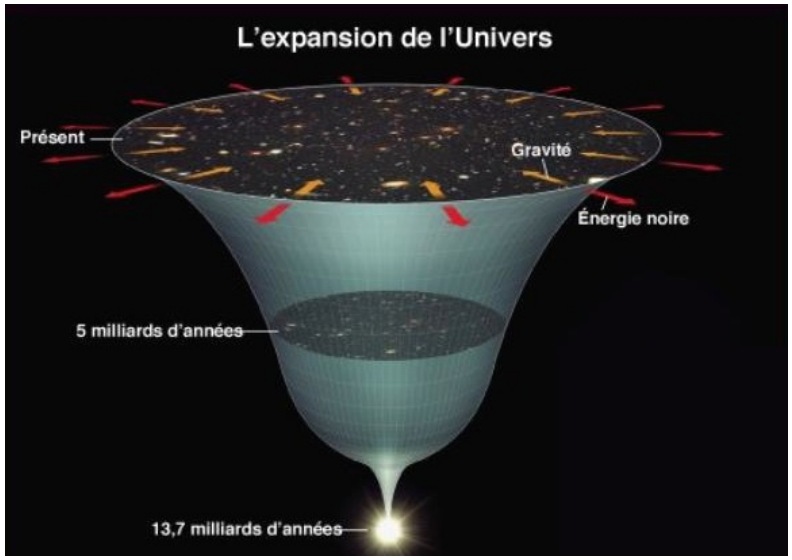




Énergie noire et matière noire

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



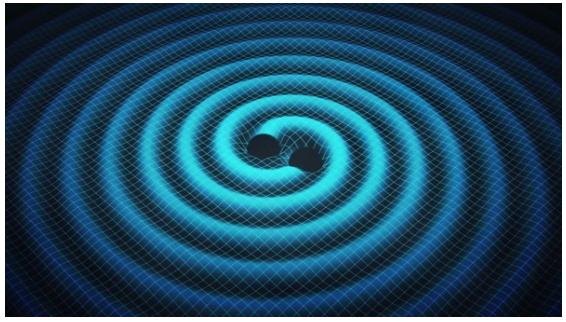


L'énergie Noire rappelle la *quintessence*, matière incréée, inaltérable, invisible et omniprésente, dont Aristote remplissait les cieux

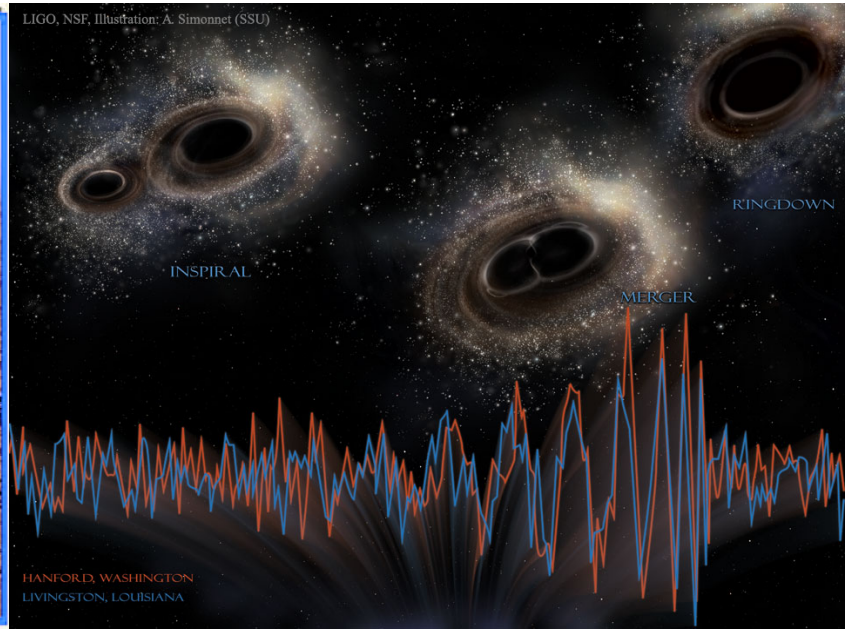
L'énergie noire est une sorte d'« antigravité »

Faut-il remettre à plat toute la physique de la gravitation élaborée depuis Newton et par Einstein ?

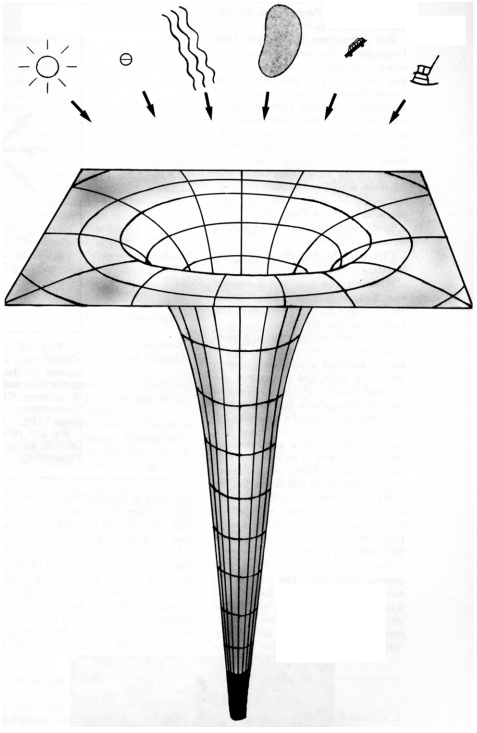
Ondes gravitationnelles



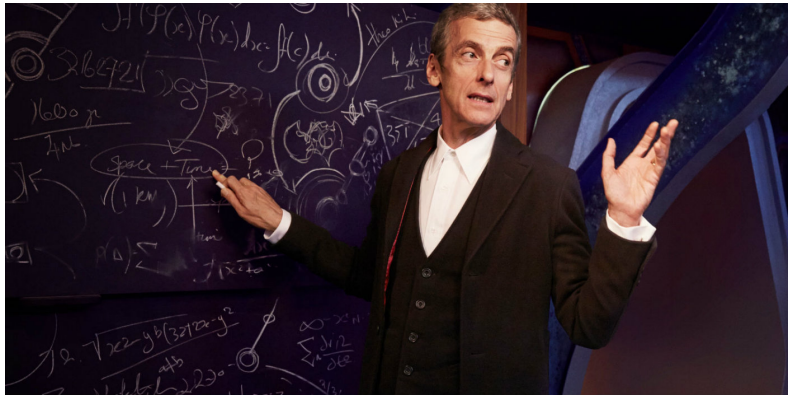
Le 14 septembre 2015 détection d'ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs par LIGO



Trous noirs



- The most perfect macroscopic objects there are in the universe : the only elements in their construction are our concepts of space and time (S. Chandrasekhar)
- Solutions de la théorie d'Einstein
- Attire tout type de matière et énergie



DOCTOR : Short version. Because of the black hole, time is moving faster at this end of the ship than the other. It's all about gravity. Gravity slows down time.
(World Enough And Time- Doctor Who, episode 275a)

Les doutes d'Einstein

ON A STATIONARY SYSTEM WITH SPHERICAL SYMMETRY CONSISTING OF MANY GRAVITATING MASSES

By Albert Einstein

(Received May 10, 1939)

If one considers Schwarzschild's solution of the static gravitational field of spherical symmetry

$$(1) \qquad ds^2 = -\left(1+\frac{\mu}{2r}\right)^4 (dx_1^2+dx_2^2+dx_3^2) + \left(\frac{1-\frac{\mu}{2r}}{1+\frac{\mu}{2r}}\right)^2 dt^2$$

sents the gravitating mass.)

There arises the question whether it is possible to build up a field containing such singularities with the help of actual gravitating masses, or whether such regions with vanishing g_{44} do not exist in cases which have physical reality. Schwarzschild himself investigated the gravitational field which is produced by an incompressible liquid. He found that in this case, too, there appears a region with vanishing g_{44} if only, with given density of the liquid, the radius of the field-producing sphere is chosen large enough.

This argument, however, is not convincing; the concept of an incompressible liquid is not compatible with relativity theory as elastic waves would have to travel with infinite velocity. It would be necessary, therefore, to introduce a compressible liquid whose equation of state excludes the possibility of sound

ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY

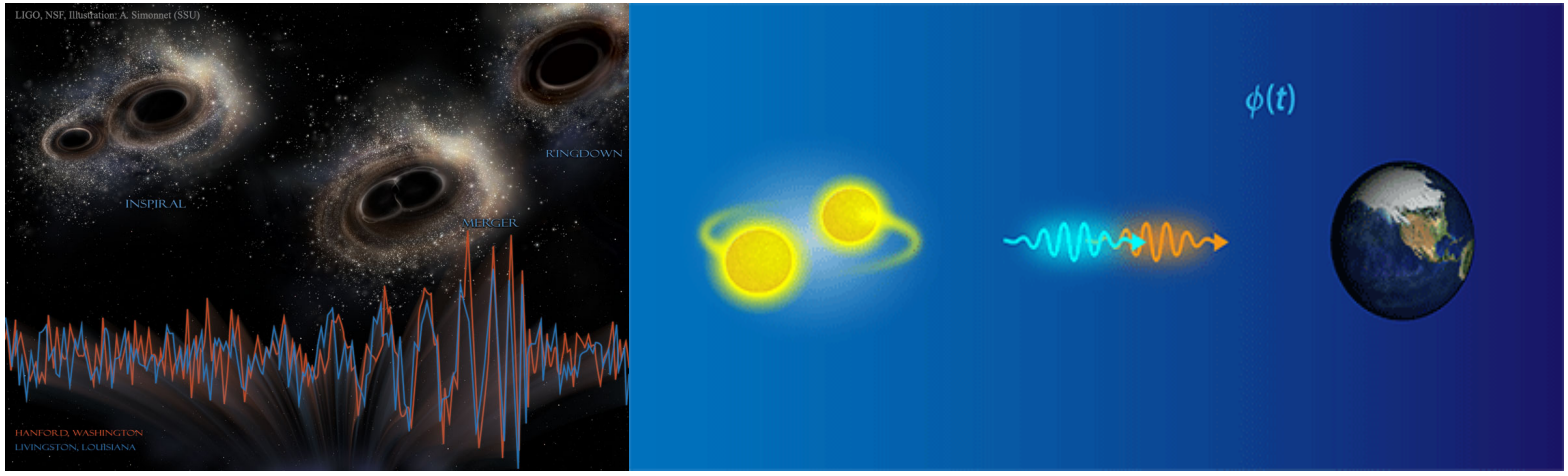
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

ABSTRACT.

The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of *rigorous* solutions for undulatory gravitational fields, we investigate rigorously the case of cylindrical gravitational waves. It turns out that rigorous solutions exist and that the problem reduces to the usual cylindrical waves in euclidean space.

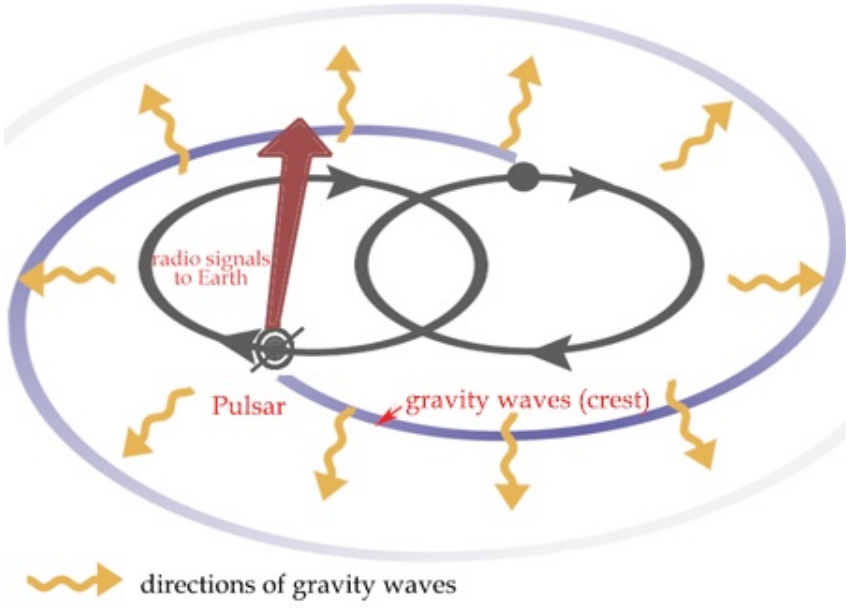
- Réalité des trous noirs : La singularité des trous noirs est-elle réelles ou fictive ? Comment la matière peut-elle créer un trou noir ?
- Réalité des ondes gravitationnelles : ces ondes sont-elles physiques ou juste des solutions mathématiques ?

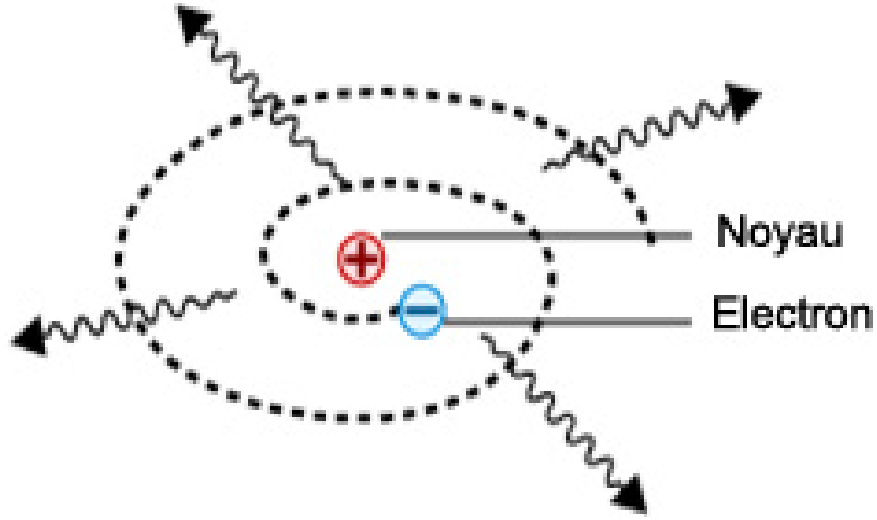
Nouvelles fenêtre d'observation



- Première détection de la dynamique des trous noirs
- Nouvelle fenêtre sur notre Universe
  - étoiles à neutrons : signaux multi-messager (GW, X-rays, γ, ...)
- Contraint fortement des modèles alternatif de la gravitation
- Après 2018 entre 1 et 50 détections par an d'ondes gravitationnelles sont attendues

Gravitation et mécanique quantique





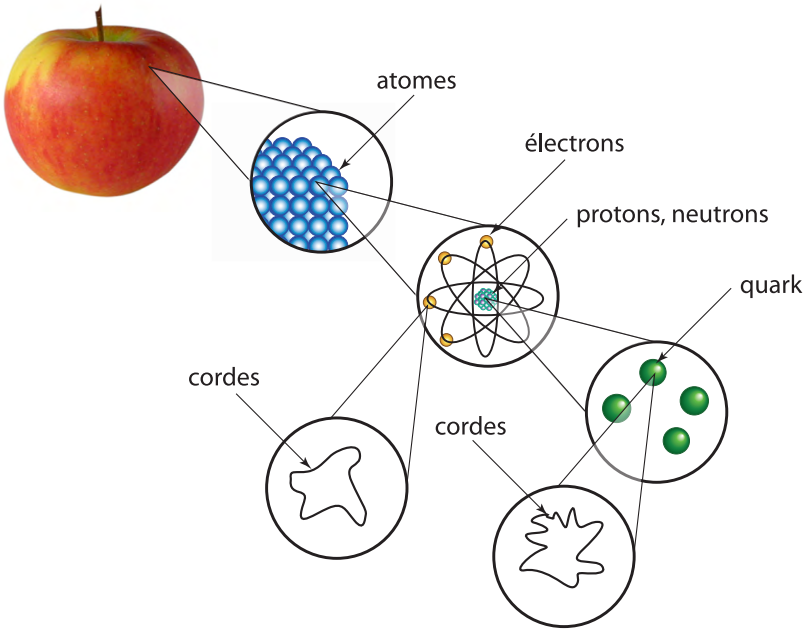
En 1916 Einstein écrit

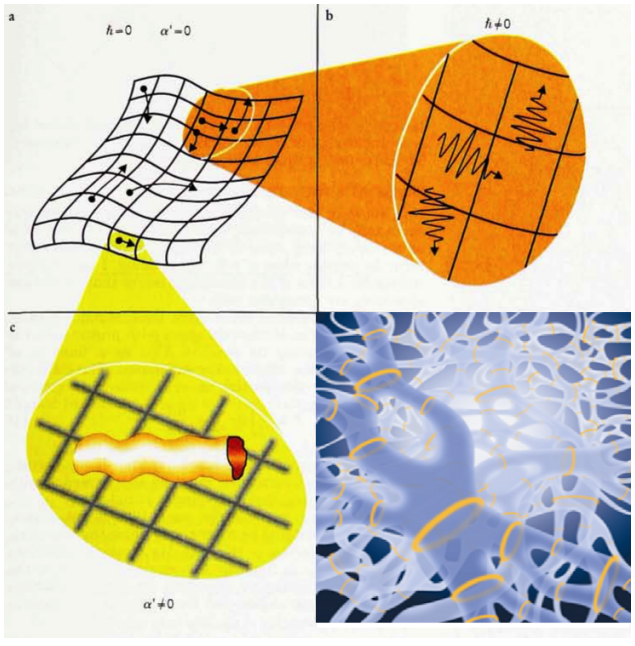
> À cause des mouvements intra-atomiques, l'atome doit rayonner (...) de l'énergie gravitationnelle, même en très faibles quantités.

> 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.

La théorie des cordes

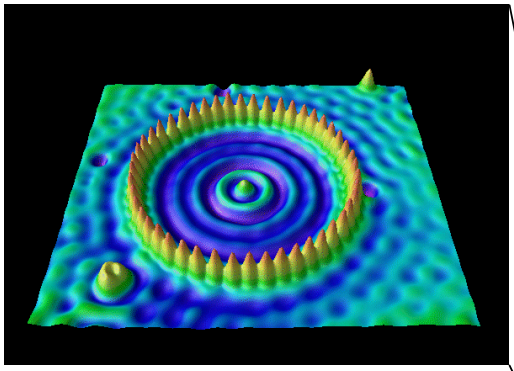
La théorie des cordes réalise le rêve d'Einstein d'une unification géométrique des lois de la physique



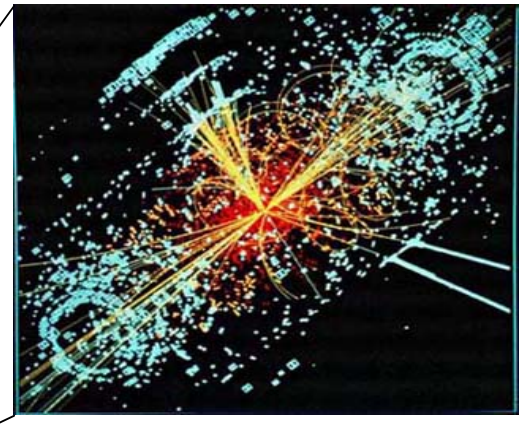


La théorie des cordes unifie la mécanique quantique et la théorie de la gravitation d'Einstein

La taille caractéristique des cordes est l'échelle de Planck $\ell_P \simeq 1.6\,10^{-35} m$

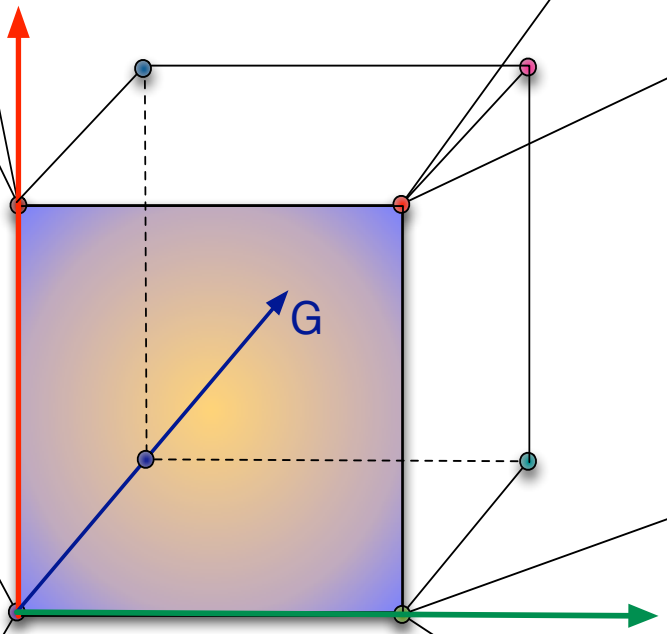


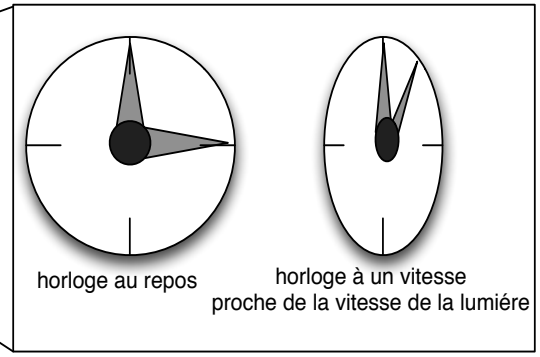
mécanique quantique



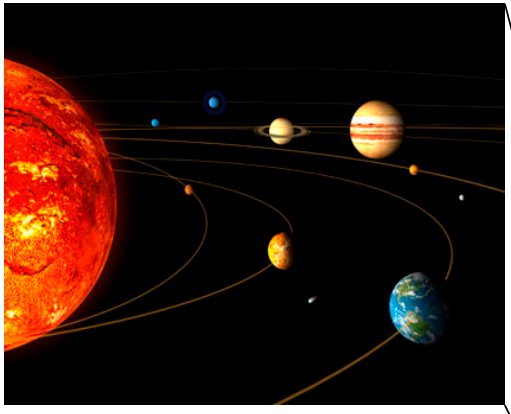
Théorie quantique des champs
Simulation d'un événement de production du Higgs au CERN

Physique Classique :
Les déviations du pendule de Foucault montrent la rotation de la Terre

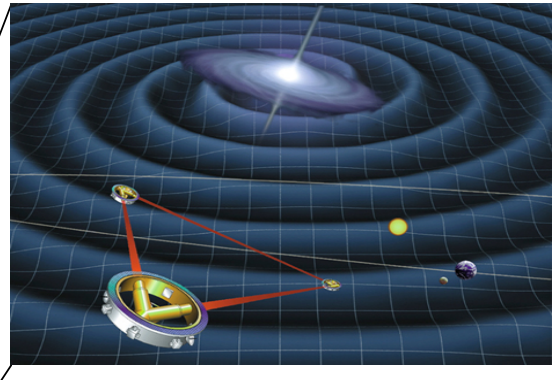




relativité restreinte:
unifie le temps et l'espace. Le temps se dilate pour les objets en mouvement.
L'énergie et la masse selon équivalent selon la formule E=mc^2

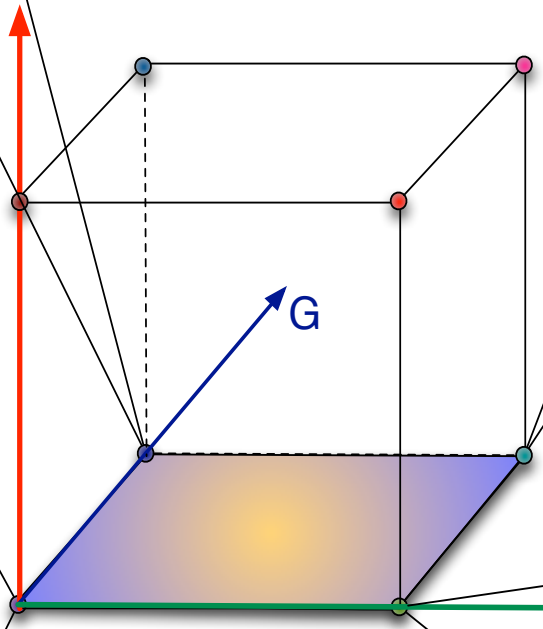


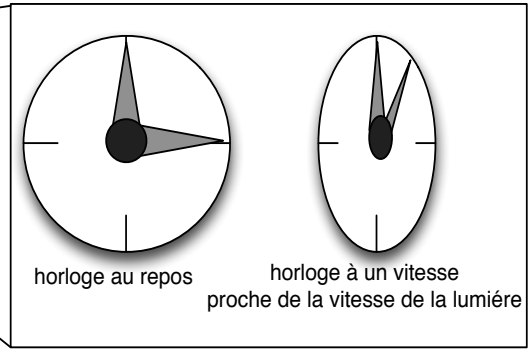
Loi de la gravitation universelle de Newton



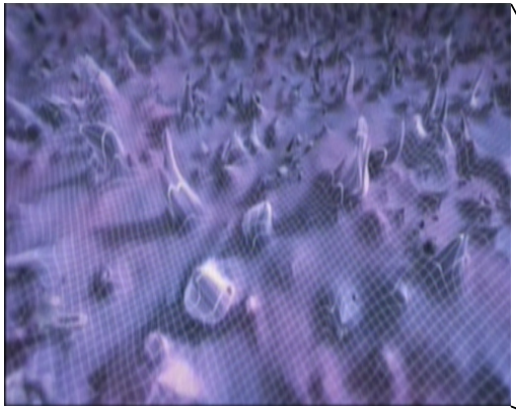
La théorie de la gravitation d'Einstein donne une description géométrique dynamique de l'espace-temps

Physique Classique :
Les déviations du pendule de Foucault montrent la rotation de la Terre

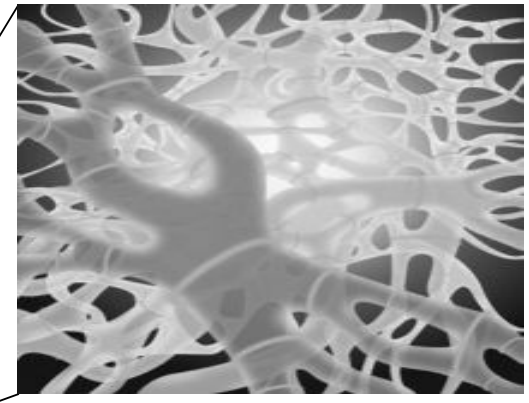




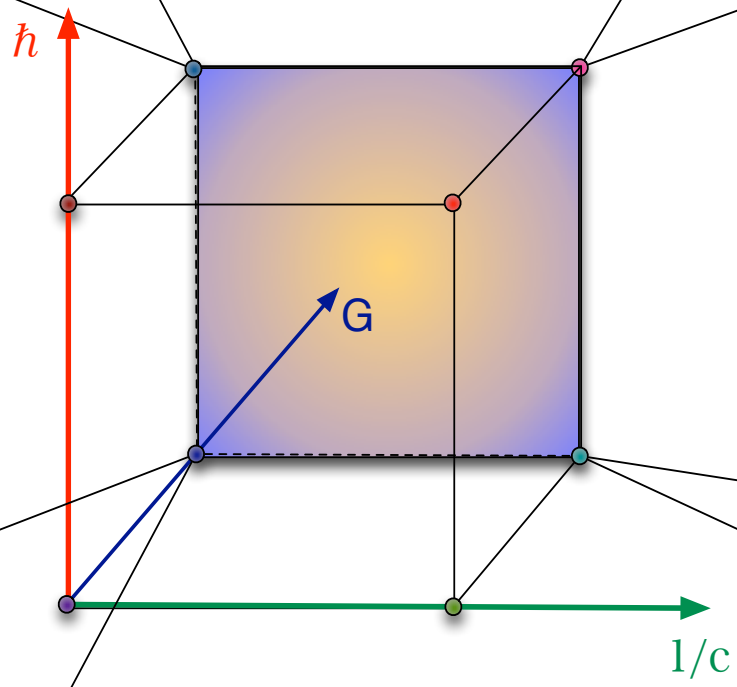
relativité restreinte:
unifie le temps et l'espace. Le temps se dilate pour les objets en mouvement.
L'énergie et la masse selon équivalent selon la formule E=mc^2

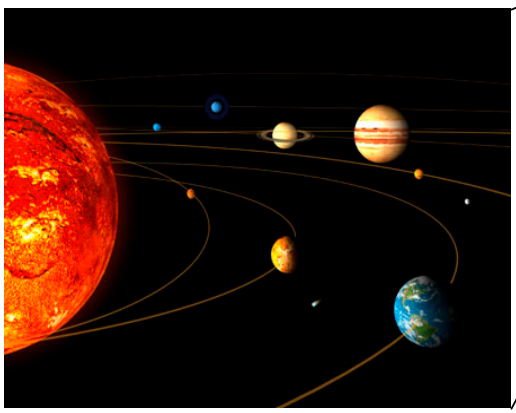


Gravité Quantique

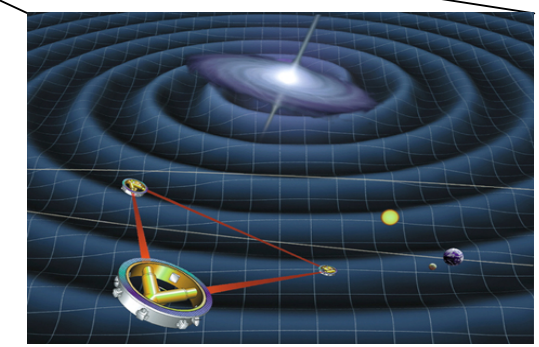


Théorie d'unification :
théorie des cordes, théorie M, ...





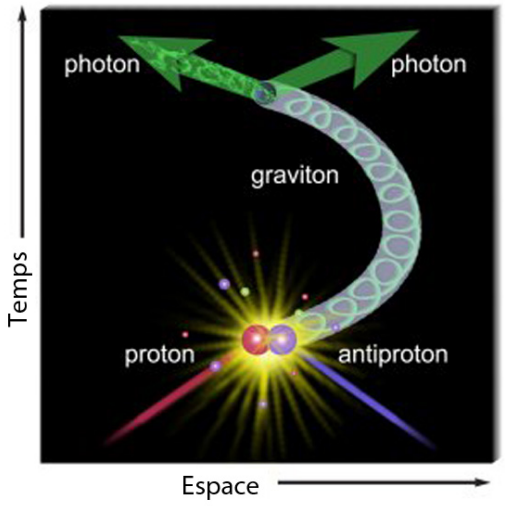
Loi de la gravitation
universelle de Newton

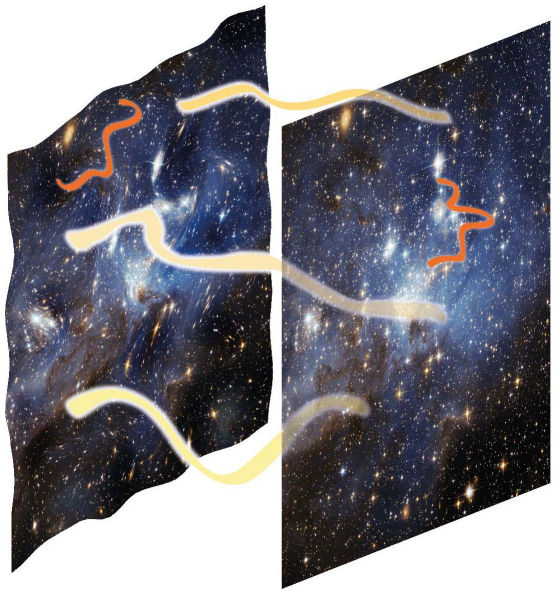


La théorie de la gravitation d'Einstein
donne une description géométrique
dynamique de l'espace-temps

Quelques instants après le Big Bang, la théorie des cordes dominerait l'évolution de l'univers

Selon Gabriele Veneziano il existerait une phase de l'Univers avant le Big Bang



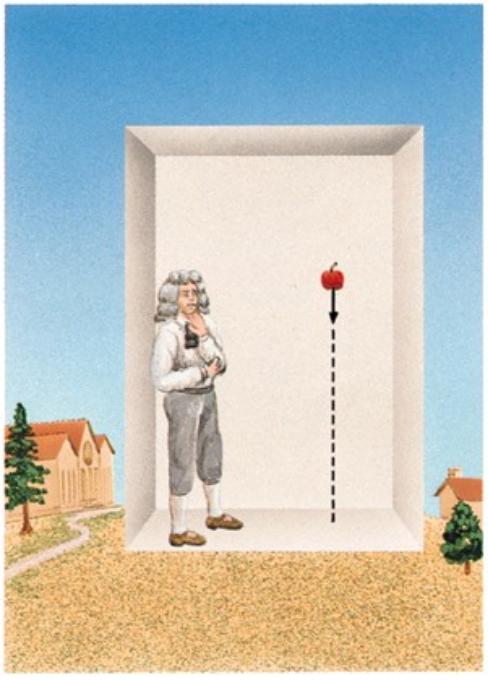


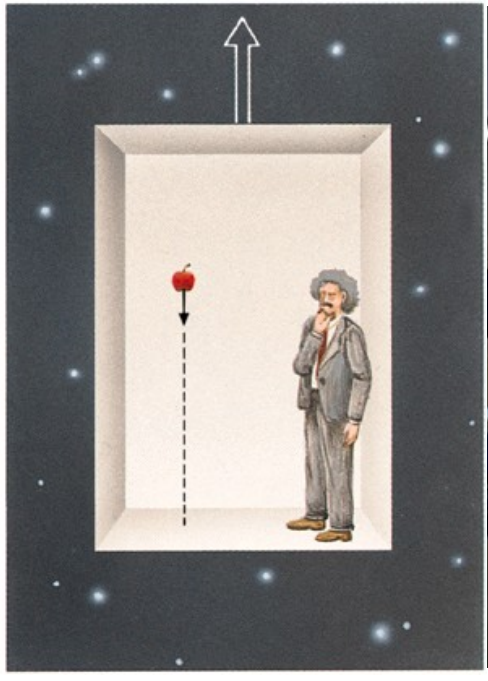
Andreï Sakharov a suggéré que la gravitation pourrait être induite par des fluctuations quantiques dans des dimensions transverses microscopiques

La théorie des corde permet de réaliser ce scénario expliquant pourquoi la gravitation est la plus faible des forces

Qu'est-ce que la gravitation ?

Les physiciens théoriciens travaillent activement sur la nature de la gravitation quantique et classique





We remember Isaac Newton for answers, we remember Hawking for questions. (Kip Thorne)