

L'attraction de la gravitation

Pierre Vanhove



IHÉS, 11 avril 2015

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

Wenn G eine Skalar ist, dann $\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_i} = T_{\mu\nu}$ Tensor + Ranges.

$$T_{\mu\nu} = \left(\frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_i \partial x_j} - \sum_k \left\{ \begin{array}{c} \mu \\ \nu \end{array} \right\}_{;k} T_{kk} \right) - \sum_{\alpha\beta} \left(\left\{ \begin{array}{c} \mu \\ \nu \end{array} \right\}_{;\alpha\beta} - \left\{ \begin{array}{c} \nu \\ \mu \end{array} \right\}_{;\alpha\beta} \right)$$

Tensor

Weitere Umformung:

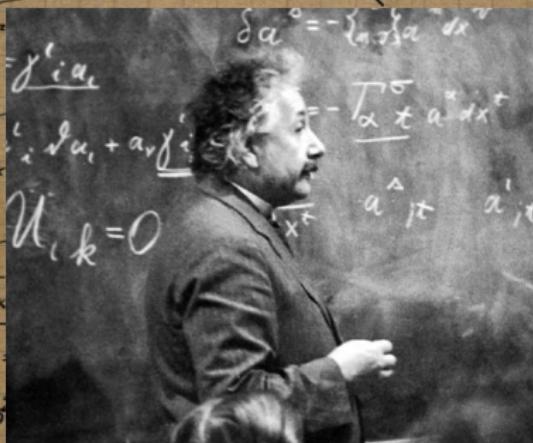
$$\frac{\partial \left\{ \begin{array}{c} \mu \\ \nu \end{array} \right\}}{\partial x_k} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_k} \left(g_{\mu\nu} \right) = g_{\mu\nu} \delta_{kk} + g_{kk} \delta_{\mu\nu}$$

Wir setzen voran:

$$- \sum_k g_{kk} \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu}$$

Erster: $\left\{ \begin{array}{c} \mu \\ \nu \end{array} \right\}_{;\alpha\beta} = - g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \left(\frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta} \right)$

$$\begin{matrix} \alpha & \mu & \nu & \beta \\ \alpha & \beta & \mu & \nu \end{matrix}$$



der Gravitations-
potentiale

des gravi-

$$\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_k}$$

$$g_{\mu\nu} \left(\frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\mu} + \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\nu} \right)$$

$$g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\alpha \partial x_\beta}$$

$$- \frac{\partial g_{\mu\alpha}}{\partial x_i} \frac{\partial g_{\nu\alpha}}{\partial x_i}$$

$$\text{oder } - \frac{\partial g_{\nu\alpha}}{\partial x_i} \frac{\partial g_{\mu\alpha}}{\partial x_i}$$

z. Hinweis

$$- T^\alpha_\mu = \sum_k \left(g_{\alpha\beta} \frac{\partial^2 g^{\beta\mu}}{\partial x_\alpha \partial x_\nu} - g_{\alpha\mu} g_{\beta\nu} \left(\frac{\partial^2 g_{\alpha\beta}}{\partial x_\alpha \partial x_\nu} - \frac{\partial^2 g_{\beta\alpha}}{\partial x_\alpha \partial x_\nu} \right) \right)$$

Il a changé notre vision de la gravitation et du Cosmos

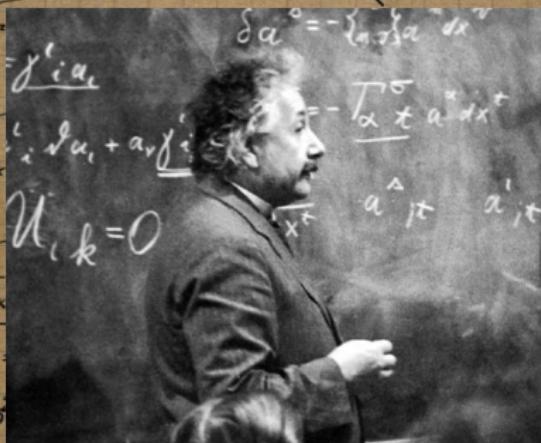
Est-ce le dernier mot sur la gravitation?

$$g_{\mu\nu} = \frac{\partial x^i}{\partial x_\mu} \frac{\partial x^j}{\partial x_\nu} + \text{terms like } \{ \cdot \}_{\mu\nu}^{\alpha\beta}$$

Wenn G eine Skalar ist, dann $\frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} = T_{\mu\nu}$ tensor of Ranges.

$$T_{\mu\nu} = \left(\frac{\partial T_0}{\partial x^\mu} - \sum_{\lambda} \{ \cdot \}_{\mu\lambda}^{\lambda\lambda} T_{\lambda\lambda} \right) - \sum_{\lambda\kappa} \left(\frac{\partial \{ \cdot \}_{\mu\lambda}^{\lambda\kappa}}{\partial x^\kappa} - \{ \cdot \}_{\mu\lambda}^{\lambda\kappa} \{ \cdot \}_{\lambda\kappa}^{\lambda\kappa} \right)$$

Tensors



her Gravitations-
potentiale

Wertbare Ue-

$$\frac{\partial \{ \cdot \}_{\mu\lambda}^{\lambda\lambda}}{\partial x^\lambda} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x^\lambda} \left(g_{\mu\lambda} \{ \cdot \}_{\lambda\lambda}^{\lambda\lambda} \right)$$

Wir setzen voran

$$- \sum_i g_{\mu\lambda} \frac{\partial^2 g_{\lambda\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} = 0$$

Ferner $\{ \cdot \}_{\mu\lambda}^{\lambda\lambda} \{ \cdot \}_{\lambda\lambda}^{\lambda\lambda} =$

$$= - g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^\mu \partial x^\nu} \right)_{\alpha\beta}^{11}$$

$$\begin{matrix} \alpha \\ \beta \end{matrix} \begin{matrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{matrix}$$

es gleich

$$\frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda}$$

$$g_{\mu\lambda} \left(\frac{\partial^2 g_{\mu\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} - \frac{\partial^2 g_{\lambda\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} + \frac{\partial^2 g_{\mu\mu}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} \right)$$

$$g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \frac{\partial^2 g_{\mu\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} \frac{\partial^2 g_{\nu\lambda}}{\partial x^\nu \partial x^\lambda}$$

$$- \frac{\partial g_{\mu\alpha}}{\partial x^\mu} \frac{\partial g_{\nu\beta}}{\partial x^\nu}$$

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 »

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]

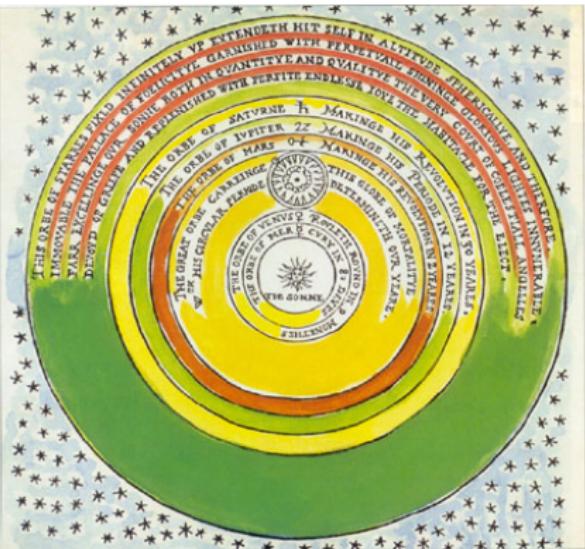
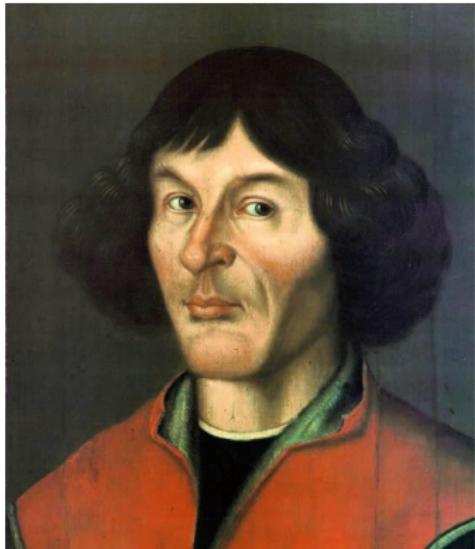
Tendance naturelle des corps lourds



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

Ce modèle servira à décrire le Monde pendant 1700 ans

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



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

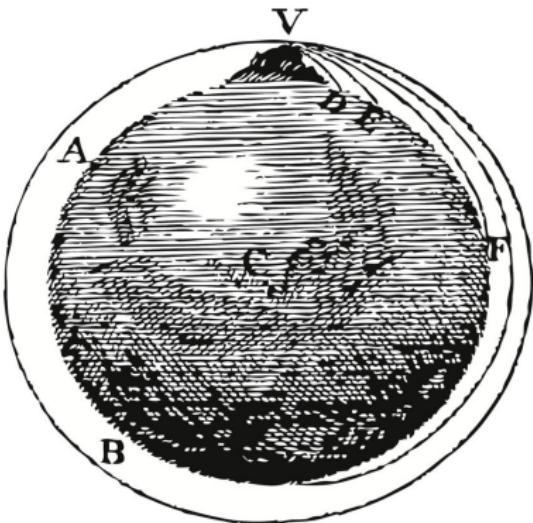
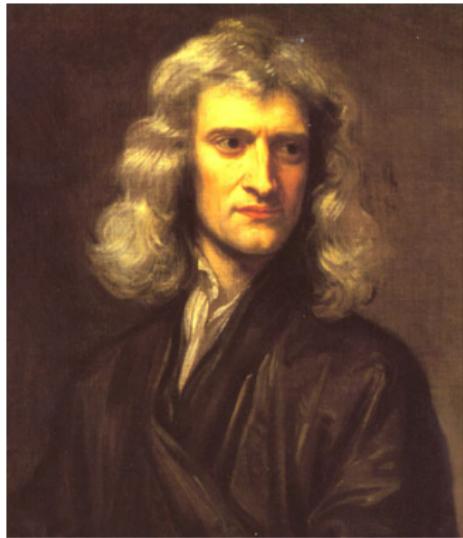
Les parties de la Terre se meuvent non parce qu'elles tendent vers le centre du Monde, mais pour se réunir avec leur tout, et que c'est pour cela qu'elles ont une inclination naturelle vers le centre du globe terrestre, (...)

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

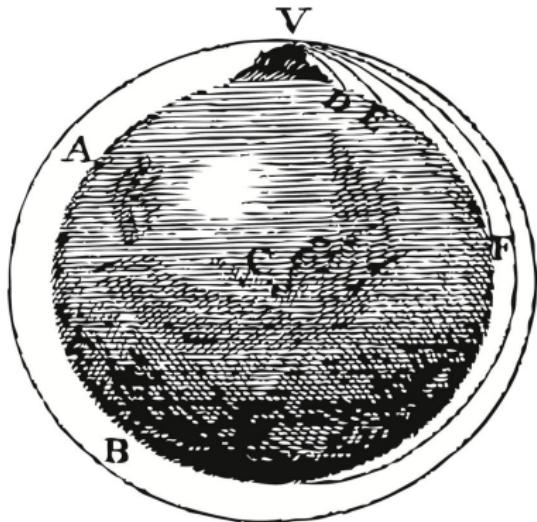
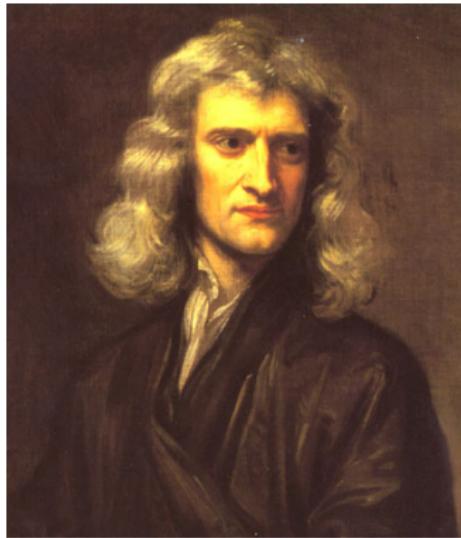
La gravitation universelle



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.

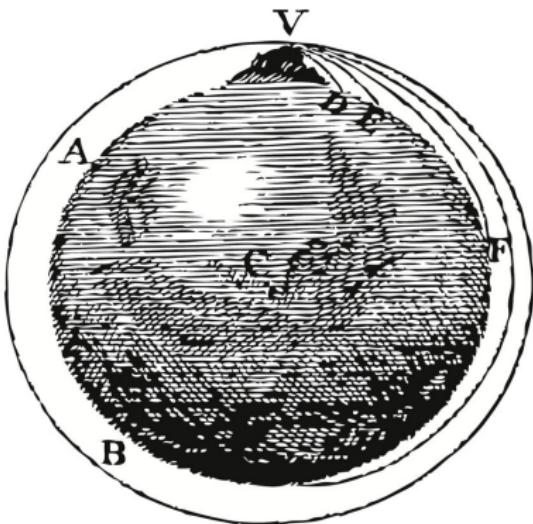
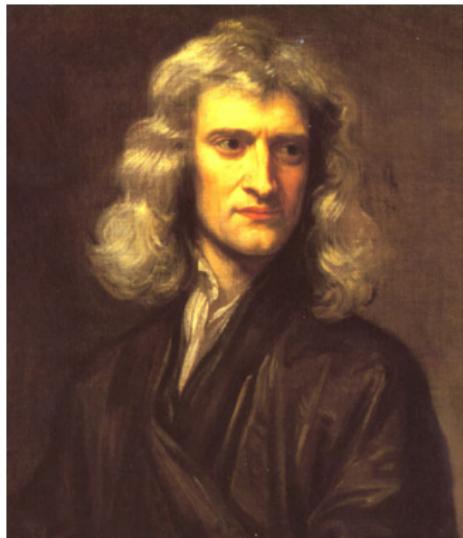
La gravitation universelle



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.

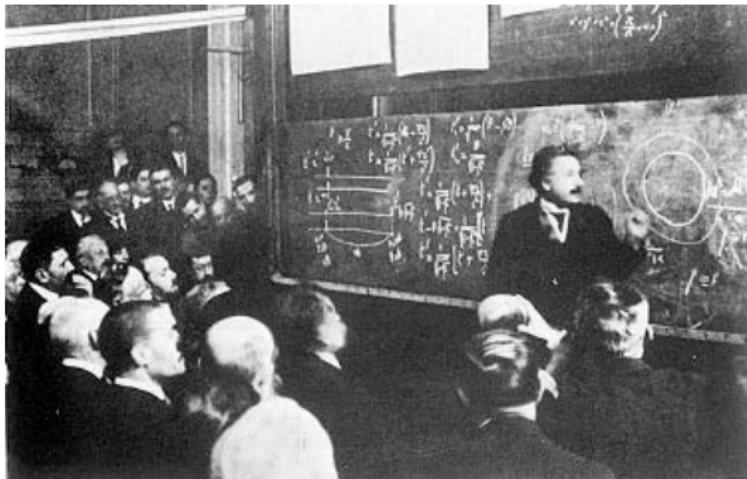
Une gravitation universelle ... mais mystérieuse



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.

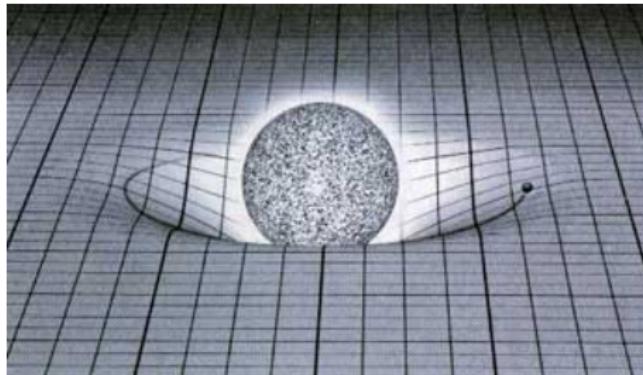
La gravitation comme courbure de l'espace-temps



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.

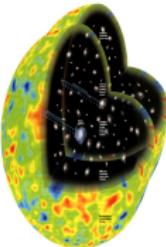
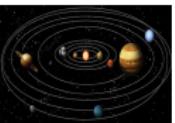
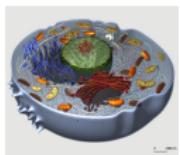
La gravitation comme courbure de l'espace-temps



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

 $10^{-35} m$ $10^{-6} m$ $1m$ $10^9 m$ $10^{19} m$ $10^{21} m$ $10^{27} m$ 

connaissance
faible

assez
correcte

bonne

données
peu précises

faible

expériences de laboratoire

sondes
spatiales

astronomie

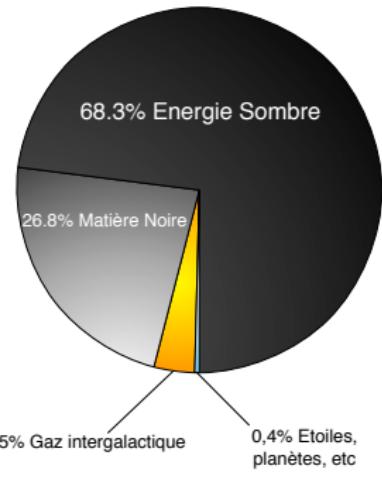
astrophysique

cosmologie



La gravitation et notre Univers

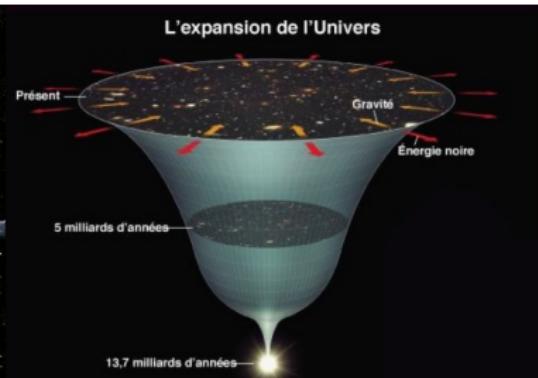
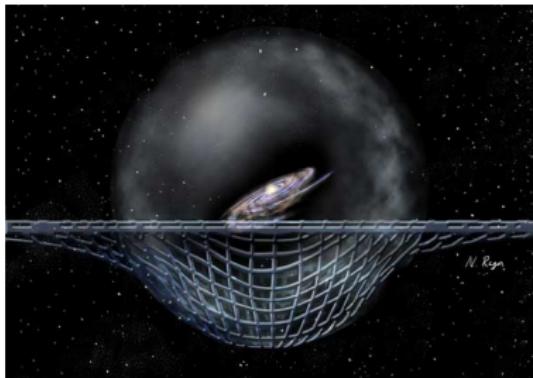
L'univers selon nos observations (expérience Planck 2013) :



- ▶ **4.9% de matière ordinaire**
(particules, nous dans cette salle, ...)
- ▶ **26.8% de matière noire**
(baignant les galaxies et les groupements de galaxies,
aidant à la formation des structures)
- ▶ **68.3% d'énergie sombre**
(densité d'énergie non compressible moteur de l'expansion de l'univers)
- ▶ **un univers en expansion et en accélération
(Prix Nobel 2011)**

Énergie noire et matière noire

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

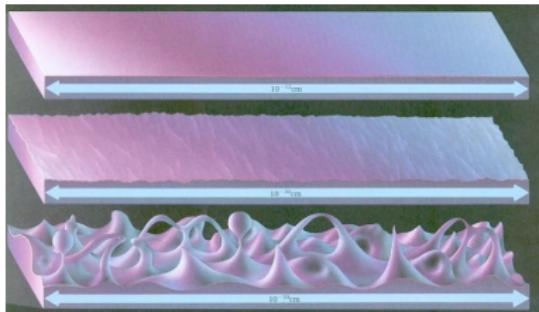
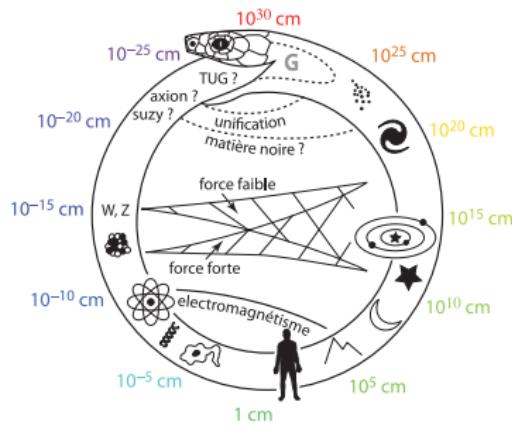


L'énergie Noire rappelle la *quintessence*, matière incréeé, inaltérable, invisible et omniprésente, dont Aristote remplissait les cieux

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 ?

Universalité de la gravitation



La gravitation affecte les phénomènes physiques aux échelles microscopiques et macroscopiques

Au-delà de la théorie classique



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. (Einstein 1916)

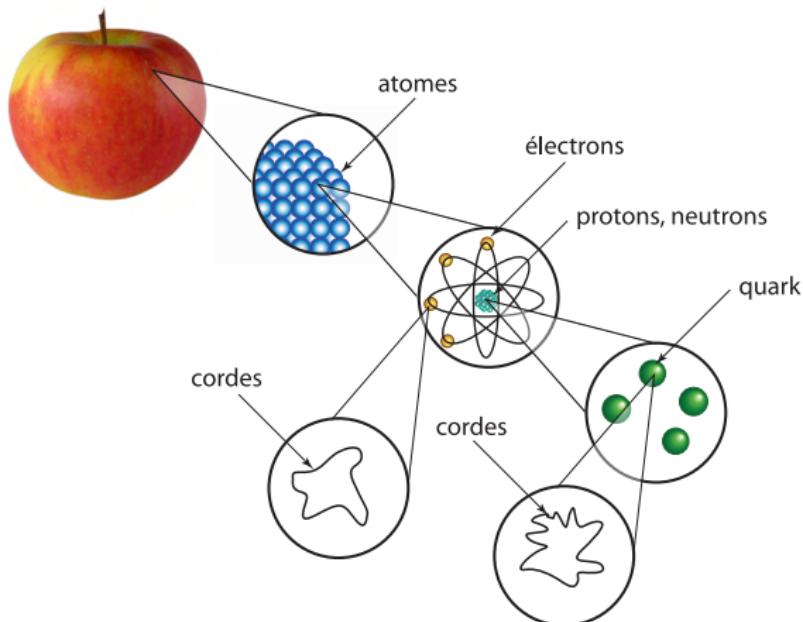
Gravitation quantique

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



La théorie des cordes

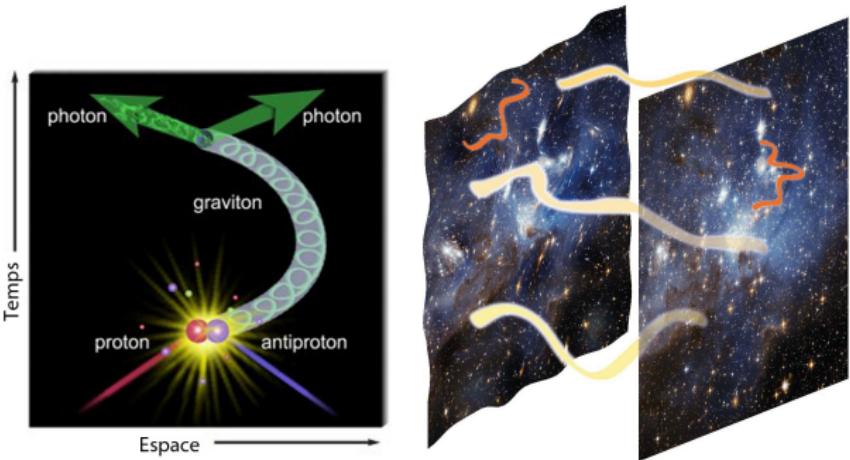
La théorie des cordes réalise le rêve d'Einstein d'une unification géométrique des lois de la physique



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



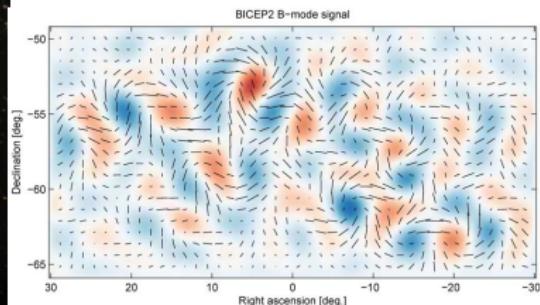
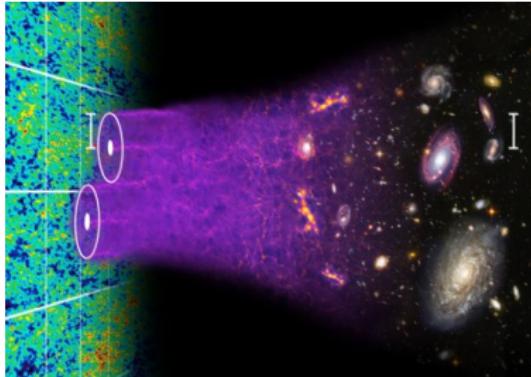
Les interactions entre les cordes favoriseraient un Univers observable avec 3 dimensions



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

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

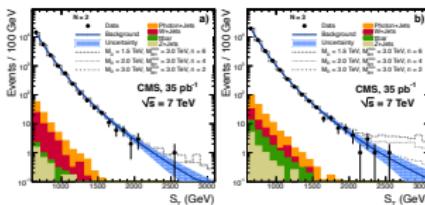
Des signatures expérimentales activement recherchées



Search for microscopic black hole signatures at the Large Hadron Collider^a

CMS Collaboration^b

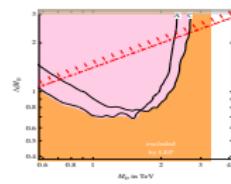
CERN, Switzerland



LHC bounds on large extra dimensions

Roberto Franceschini^a, Pier Paolo Giardino^b,
Gian F. Giudice^c, Paolo Lodone^d, Alessandro Strumia^{b,c}

$\delta = 1$ extra dimensions



$\delta = 2$ extra dimensions

