

# La gravitation quantique

Pierre Vanhove



Stage « Ondes gravitationnelles »  
École normale supérieure  
6 avril 2017

# Première partie I

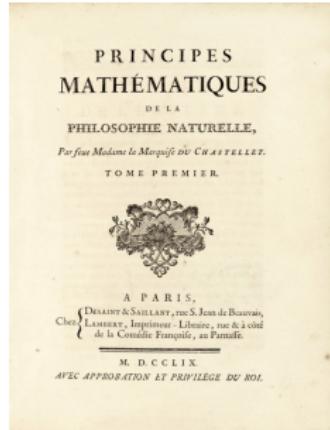
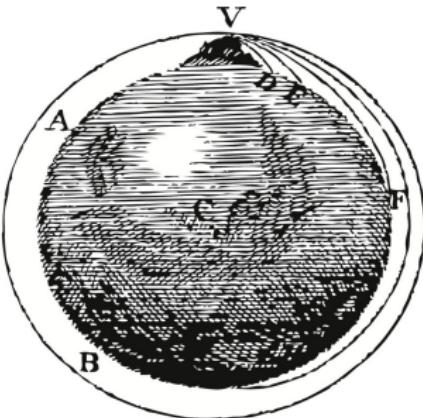
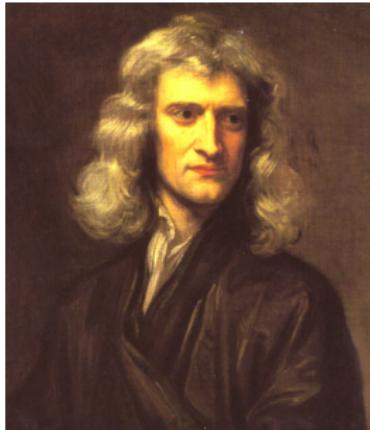
## Qu'est-ce que la gravitation ?

- [...] Mais il m'est impossible d'admettre que la résolution de ces exercices formels ait un autre intérêt que celui d'un dressage de l'esprit à l'usage des écoliers. Je trouverais puéril et stupide qu'un homme se tienne sa vie entière sur des calculs et couvre éternellement du papier avec des rangées de chiffres.

- Tu te trompes, Goldmund; tu supposes qu'un calculateur comme celui-là ne cesserait de résoudre de nouveaux exercices scolaires qu'un maître lui poserait. Mais il peut aussi se poser les questions lui-même; elles peuvent se poser en lui avec une force irrésistible.

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

# La gravité est une force

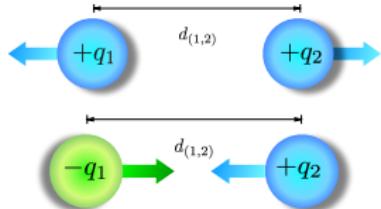


La même loi d'attraction étant posée, un corpuscule, placé en dehors de la surface sphérique, est attiré par cette surface en raison renversée du carré de la distance de ce corpuscule au centre

*Principia* livre 1 théorème XXXI traduction de la Marquise du Châtelet

$$F_{1-2} = -\frac{G_N m_1 m_2}{d_{(1,2)}^2}$$

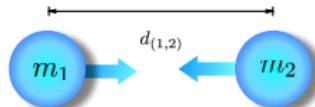
# La gravité est une force



Deux charges identiques se repoussent

Deux charges opposées s'attirent

$$F_{\text{électrique}} = \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{d_{(1,2)}^2}$$



Deux masses s'attirent par gravitation  
Il n'y a pas de masse négative!!

$$F_{\text{gravité}} = -G_N \frac{m_1 m_2}{d_{(1,2)}^2}$$

# La gravité est une force universelle

Un objet de masse  $m_{\text{grave}}$  est attiré par la Terre selon

$$F_{\text{gravité}} \simeq -G_N \frac{m_{\text{grave}} M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2} \simeq -m_{\text{grave}} \underbrace{\frac{G_N M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}}_{=g_{\oplus} \simeq 9.80 \text{ m/s}^2}$$

Un object en chute libre sur la Terre satisfait l'équation

$$m_{\text{inerte}} a = F_{\text{gravité}}$$

soit

$$a = -\frac{m_{\text{grave}}}{m_{\text{inerte}}} g_{\oplus}$$

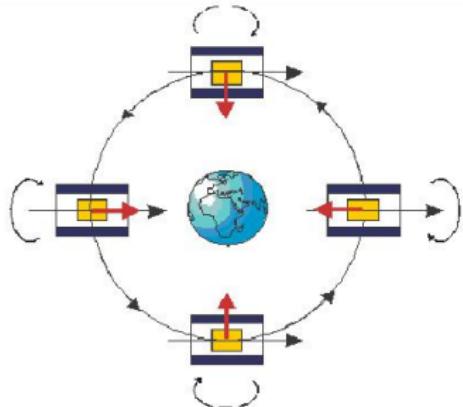
Si la masse grave est égale à la masse inerte alors

$$a = g_{\oplus}$$

Tous les corps tombent de la même manière

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

# Tests expérimentaux dans l'espace



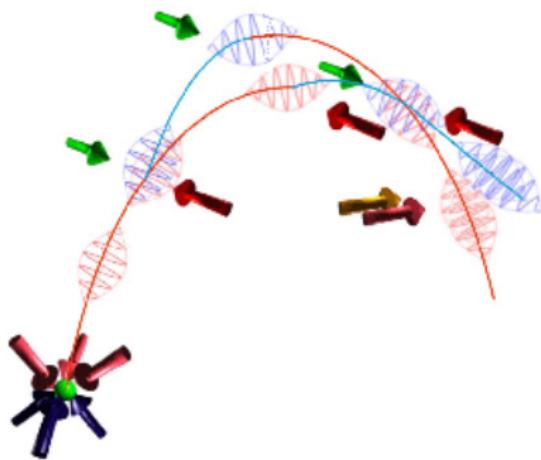
Les expériences donnent une égalité entre masse grave et masse inerte à la précision

$$\frac{m_{\text{inerte}} - m_{\text{grave}}}{m_{\text{grave}}} \simeq 10^{-13}$$

La collaboration française MICROSCOPE a mis sur en orbite le 25 avril 2016 un satellite pour tester ce principe à une précision de  $10^{-15}$

# Chute libre des atomes

C. Salomon vous parlera de la chute libre d'atomes



# Chute libre de l'antimatière

L'antimatière chute-elle comme la matière ?

Volume 88B, number 3,4

PHYSICS LETTERS

17 December 1979

## ANTIGRAVITY: A CRAZY IDEA? <sup>†</sup>

J. SCHERK

*Laboratoire de Physique Théorique de l'Ecole Normale Supérieure<sup>1</sup>, Paris Cedex 05, France*

Received 11 September 1979

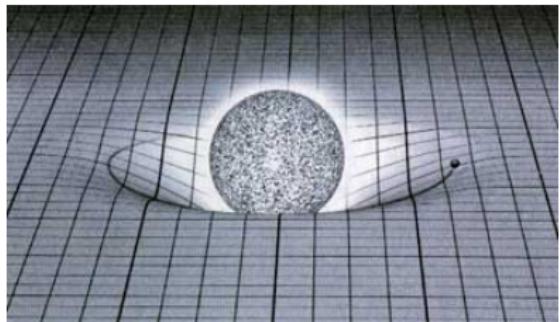
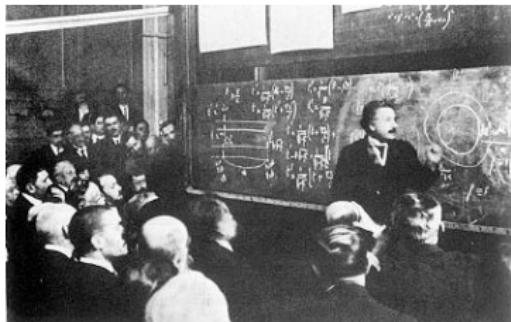
The theoretical aspect of antigravity is briefly discussed. It is shown that supergravity with  $N = 2, 3, \dots, 8$  fermionic generators leads naturally to antigravity.

Des expériences au CERN testent la chute libre d'antimatière



# La gravitation est la courbure de l'espace-temps

Le 25 novembre 1915, Einstein formule la relativité générale



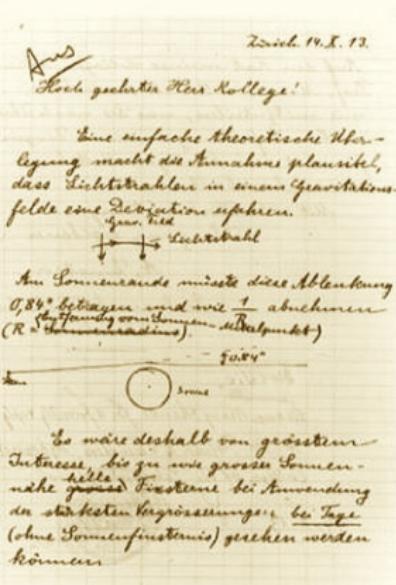
L'espace tout entier est la scène du champ gravitationnel :

la gravitation résulte de la déformation de l'espace-temps

un corps n'est pas attiré par un autre corps mais se déplace  
librement dans un espace-temps courbé

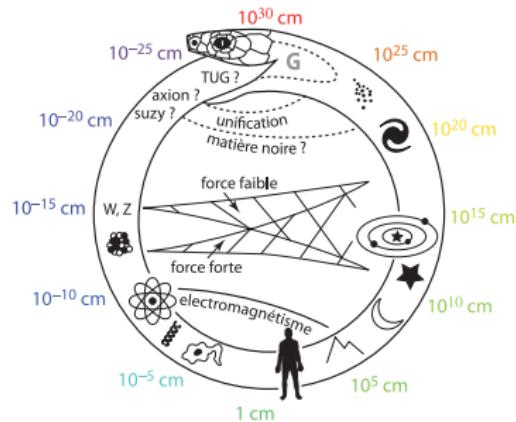
# Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil



Confirmé par Eddington et Dyson avec l'éclipse de 1919  
Lentilles gravitationnelles produit par le groupement de galaxies MACSJ0717.5+3745 vue par le télescope Hubble

# Universalité de la gravitation



La gravitation affecte les phénomènes physiques aux échelles microscopiques et macroscopiques

# Qu'est-ce que la Gravité?

A list of names within a white-bordered box:

- Adrien Barrau
- Philippe Brax
- Thibault Damour
- Elie Dourmashkin
- Monica Guica
- Etienne Klein
- Marc Lachièze-Rey
- Ugo Moschella
- Renaud Parentani
- Yves Sacquin
- Jean-Philippe Uzan
- Patrick Vazeilles
- Pierre Vanhoucke

(c) Radio-Casse Bureau

9 - 10 mai 2017  
IPhT Orme des Merisiers, France  
<http://phbrax.wixsite.com/gravite>  
[gravitegreat@gmail.com](mailto:gravitegreat@gmail.com)  
Inscription recommandée

## Deuxième partie II

### Pourquoi quantifier la gravitation ?

[...] on ne peut pas.

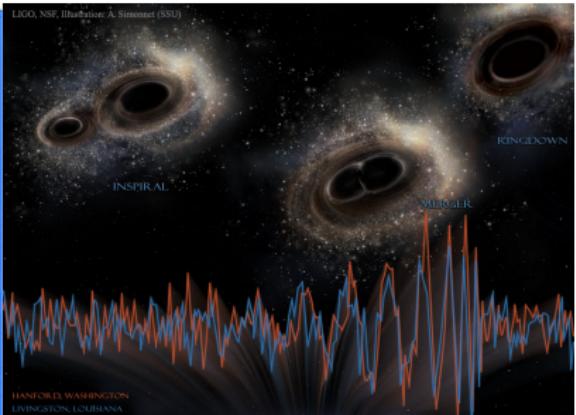
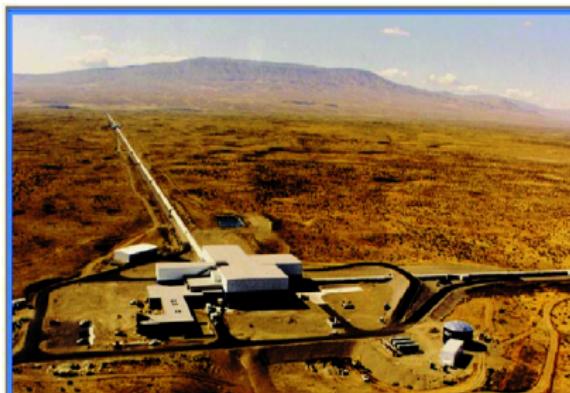
- C'est qu'on ne sait pas s'y prendre.
- On le démontre.
- Mais c'est scandaleux.
- Comme vous le dites. C'est scandaleux parce qu'il y a là une réalité rebelle au langage algébrico-logique, parce qu'il y a là une réalité qui nous dépasse [...]

R. Queneau, Odile

# Ondes gravitationnelles

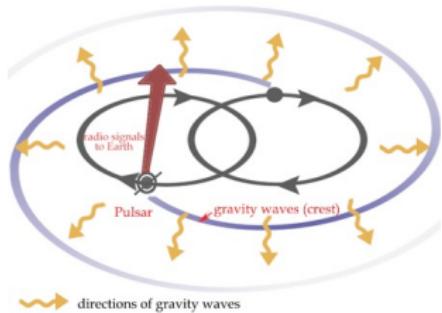


Le 14 septembre 2015 LIGO détecte des ondes gravitationnelles manifestation de la vibration de l'espace-temps



# La danse des trous noirs

Deux trous noirs s'attirent pour fusionner en un seul trou noir

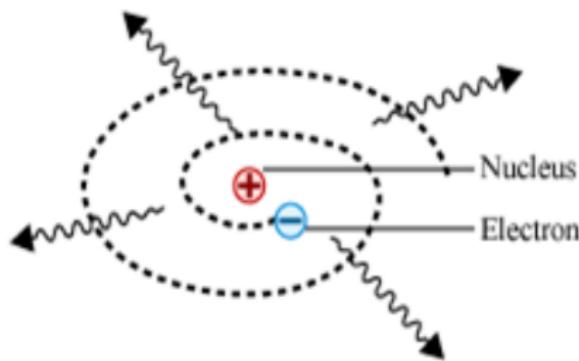


Les ondes gravitationnelles correspondent à l'énergie perdue par les deux trous noirs lors de leur danse dans l'espace-temps

# Stabilité des atomes

Dans les atomes les électrons et le noyau interagissent sous l'effet de la force de gravité

C'est la même physique que celle des trous noirs mais en miniature dans l'atome



Sous l'influence de la force de gravité l'électron doit tomber sur noyau

# Stabilité des atomes

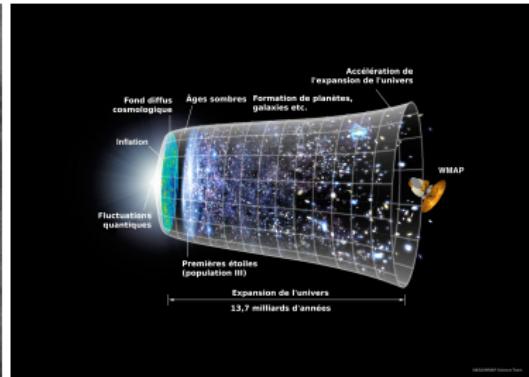
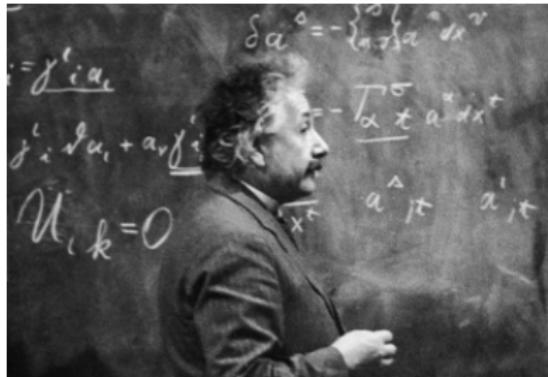
En 1916 Einstein l'avait déjà compris



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.

# Stabilité des atomes



Einstein calcule que l'atome s'effondre sous l'effet de la gravité en  $10^{30}$  ans

À l'époque il pensait que l'univers était infiniment vieux (dans début, sans fin)

On estime que l'univers observable est âgé de 13.8 milliard d'années

Mais la question de la stabilité des atomes se pose toujours

# Stabilité des atomes



A 5-

Hydrogen [H]      Central force:  $\frac{e^2}{r^2}$

$H_2$       •  $\frac{1}{r}$  •       $\frac{e^2}{r^2} + 2 \cdot \frac{e^2 a}{(2\pi\hbar)^2} = \frac{e^2}{r^2} \cdot 4$        $4 - 4\sqrt{3}$

Central force:  $2 \cdot \frac{e^2}{(2\pi\hbar)^2} - \frac{e^2}{r^2} \cdot \frac{105}{4} = \frac{e^2}{r^2} \cdot 109$

Helium

$H_2$       •  $\frac{1}{r}$  •      Central force:  $\frac{2e^2}{r^2} - \frac{e^2}{r^2} \cdot \frac{175}{4} = \frac{e^2}{r^2} \cdot 175$

$[He_2]$       •  $\frac{1}{r}$  •       $\frac{2e^2}{r^2} - \frac{4 \cdot \frac{2e^2 a}{(2\pi\hbar)^2}}{r^2} = \frac{2e^2}{r^2} \cdot 169$

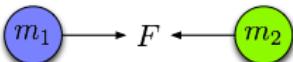
Central force:  $2 \cdot \frac{2e^2}{(2\pi\hbar)^2} - \frac{2e^2}{r^2} \cdot \frac{169}{4} = \frac{2e^2}{r^2} \cdot 169$

If one puts the force equal to  $\frac{e^2}{r^2}$  we get       $109 : H_2 : 175 : [He_2] = 1 : 1.099 : 1.75 : 1.69$

En théorie classique à cause de l'attraction électrique l'atome devait s'effondrer en  $10^{-11}$  secondes

La mécanique quantique a été inventée pour résoudre la question de la stabilité l'atome

# Les constantes de la physique fondamentale



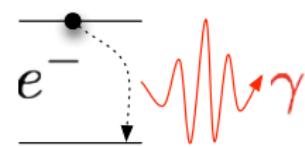
- ▶ La gravitation (constante de Newton)

$$E_{\text{pot.}} = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \quad G_N \simeq 6,67384(80) \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$$



- ▶ La relativité (vitesse de la lumière)

$$E_{\text{relat.}} = m c^2 \quad c = 299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

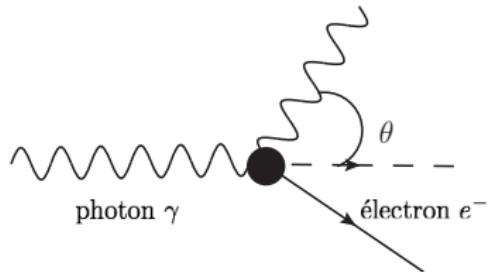


- ▶ La mécanique quantique (constante de Planck)

$$E_{\text{photon}} = 2\pi\hbar f \quad \hbar \simeq 1,054571726 \times 10^{-34} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}}$$

# Échelle quantique

Pour mesurer la position d'une particule, il faut l'éclairer avec de la lumière



L'interaction de la lumière modifie la position de la particule  
Cela implique la relation d'incertitude d'Heisenberg

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

## Échelle quantique

Pour que la lumière ne modifie pas la position de la particule il faut une énergie de la lumière faible devant l'énergie au repos de l'électron  $\Delta p < mc$

La relation d'incertitude d'Heisenberg implique que la précision sur la position est

$$2\Delta x \geq \frac{\hbar}{\Delta p} \geq \lambda = \frac{\hbar}{mc}$$

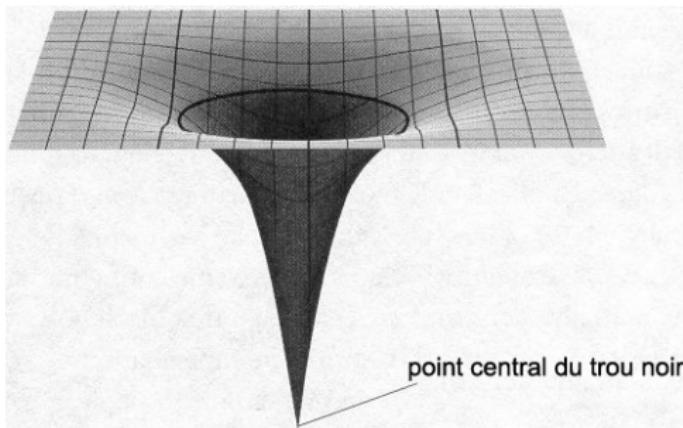
La longueur d'onde de Compton  $\lambda$  est la limite quantique pour obtenir une information sur la position dans l'espace

Corps	Masse (en Kg)	$\lambda$ (en m)
électron	$3.1 \times 10^{-31}$	$4 \times 10^{-13}$
Soleil	$2 \times 10^{30}$	$1.6 \times 10^{-73}$

Taille d'un atome  $10^{-10}$  m. Taille de l'électron  $10^{-15}$  m.

# Rayon gravitationnel classique

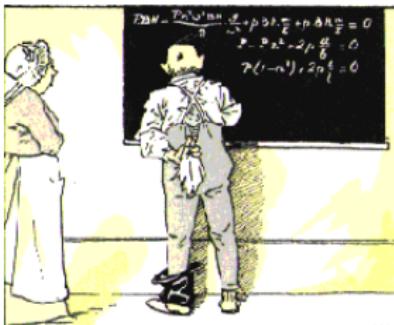
Rayon gravitationnel critique  $r_S = 2G_N M/c^2$



Corps	Masse (en Kg)	$r_S$ (en m)
électron	$3.1 \times 10^{-31}$	$1.3 \times 10^{-57}$
Soleil	$2 \times 10^{30}$	3000

Rayon du soleil  $7 \times 10^8$  m. Taille de l'électron  $10^{-15}$  m.

# Gravité classique et quantique



Le rayon gravitationnel critique est égal à l'échelle quantique

$$\frac{2G_N M_p}{c^2} = r_S = 2\lambda = \frac{2\hbar}{M_p c}$$

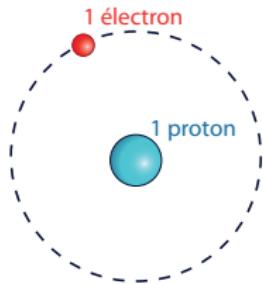
pour une masse de

$$M_p = \sqrt{\frac{c\hbar}{G_N}} = 2.1 \times 10^{-8} \text{ kg}$$

Alors les tailles sont données par la longueur de Planck

$$r_S = 2\lambda = \ell_P \simeq 10^{-35} \text{ m}$$

# La gravité est une force très faible



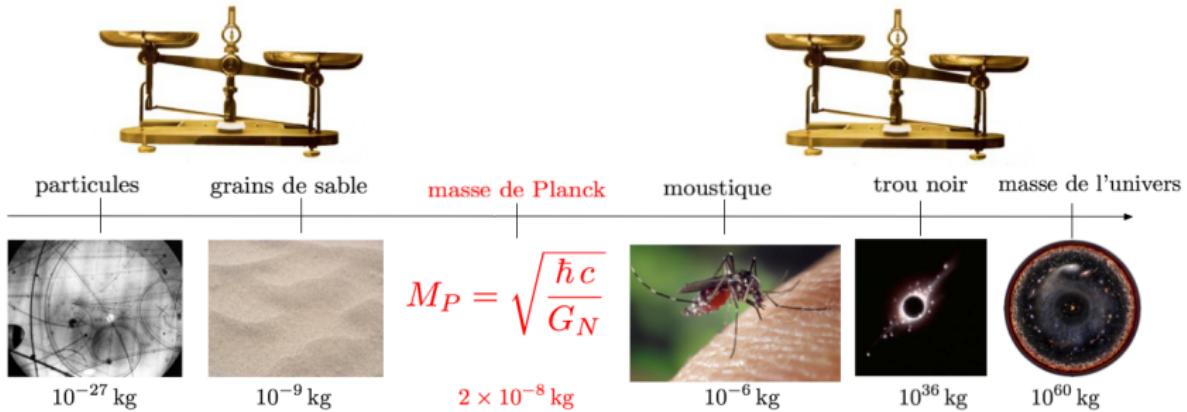
$$\text{Force électrique } F_{\text{électrique}} = \pm \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{d_{(1,2)}^2}$$

$$\text{Force de gravitation } F_{\text{gravité}} = -G_N \frac{m_1 m_2}{d_{(1,2)}^2}$$

On voit donc que pour les particules élémentaires

$$\left| \frac{F_{\text{gravité}}}{F_{\text{électrique}}} \right| \simeq 2 \times 10^{-43}$$

C'est la raison pour laquelle l'électron tombe classiquement sur le noyau en  $10^{-11}$  secondes et en  $10^{30}$  ans.



Les particules élémentaires sont trop légères en comparaison avec la masse de Planck

Les objets macroscopiques sont beaucoup plus lourds que la masse de Planck

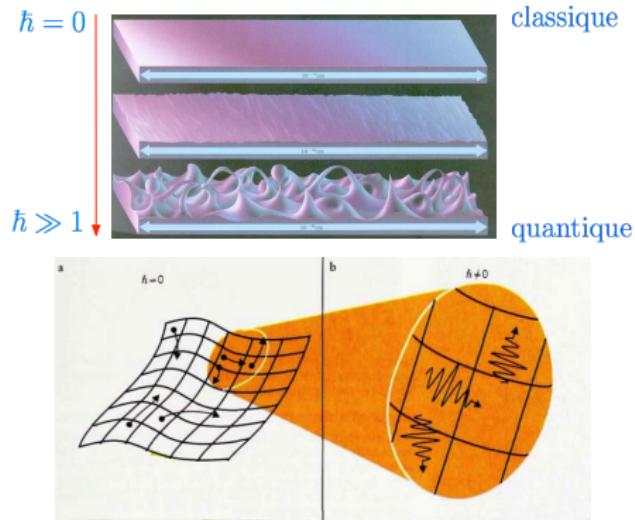
## Troisième partie III

### Gravitation et mécanique quantification



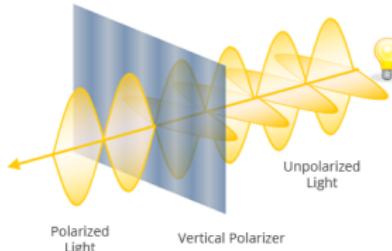
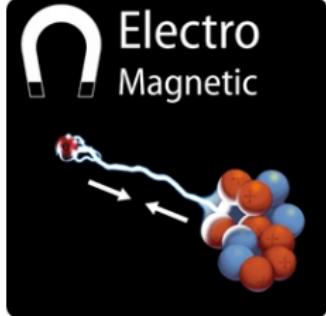
# Quantum d'espace-temps

En mécanique quantique la notion de point, de trajectoire disparaît

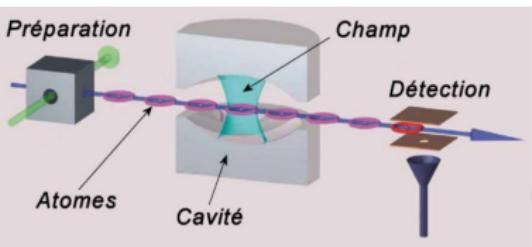


La beauté de la théorie d'Einstein de la gravitation repose sur la formulation géométrique d'un espace-temps courbe  
Que devient sa théorie si l'espace-temps disparaît ?

# Quantum de lumière : Le photon



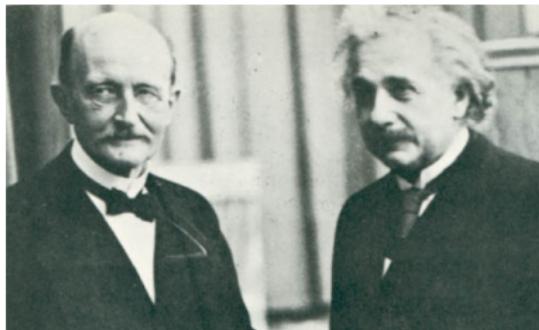
Le photon est le quantum des ondes électromagnétiques



2012

# Das Lichtquant

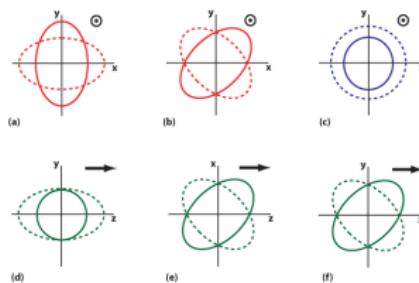
Scepticisme de Max Planck lors de l'élection d'Einstein à l'académie des sciences de Prusses (1913)



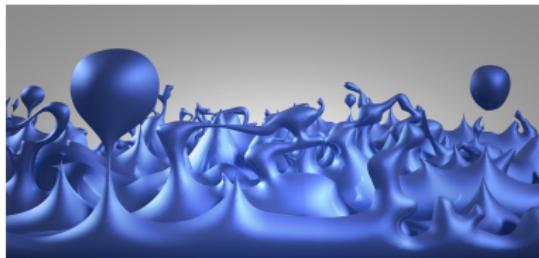
Il ne faut pas trop lui tenir rigueur de ce que, dans ses spéculations, il ait occasionnellement pu dépasser sa cible, comme par exemple avec son hypothèse des quanta de lumière. (Max Planck)

Existence du photon établie par l'expérience de Millikan (1915)

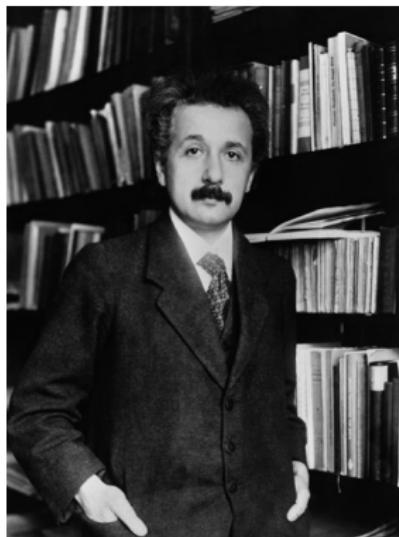
# Quantum d'espace-temps : Le graviton



Le graviton est la particule des ondes d'espace-temps



# Que devient l'espace-temps ?

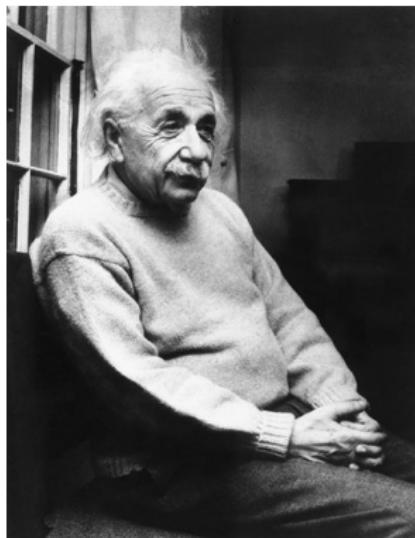


Einstein en 1916

Comment formuler des énoncés relatifs au dis-continu sans avoir recours à un continuum - l'espace-temps - ; ce dernier devrait être exclus de la théorie, en tant qu'il est une construction adventice que ne justifie pas l'essence du problème et qui ne correspond à rien de réel.

*A cet égard nous manquons cruellement de formalisme mathématique adéquat.*

# Que devient l'espace-temps ?



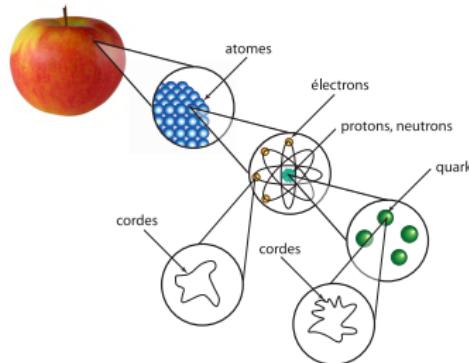
Einstein en 1954

(année de sa mort)

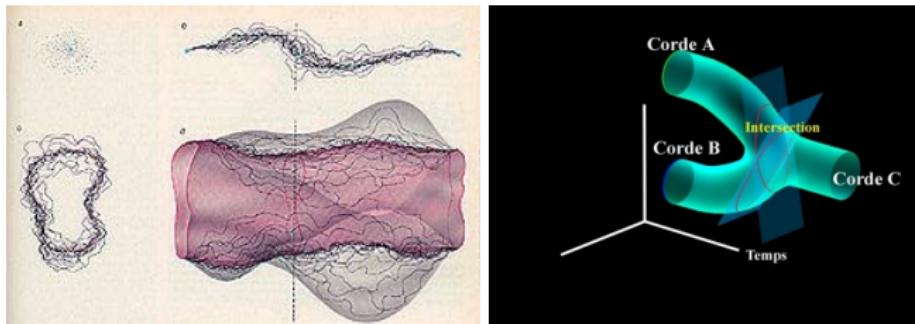
Il me semble en tout cas que l'alternative continu-discontinu est une authentique alternative ; cela veut dire qu'ici il n'y a pas de compromis possible.

Dans cette théorie, il n'y a pas de place pour l'espace et le temps, mais uniquement pour des nombres, des constructions numériques et des règles pour les former sur la base de règles algébriques excluant le processus limite.

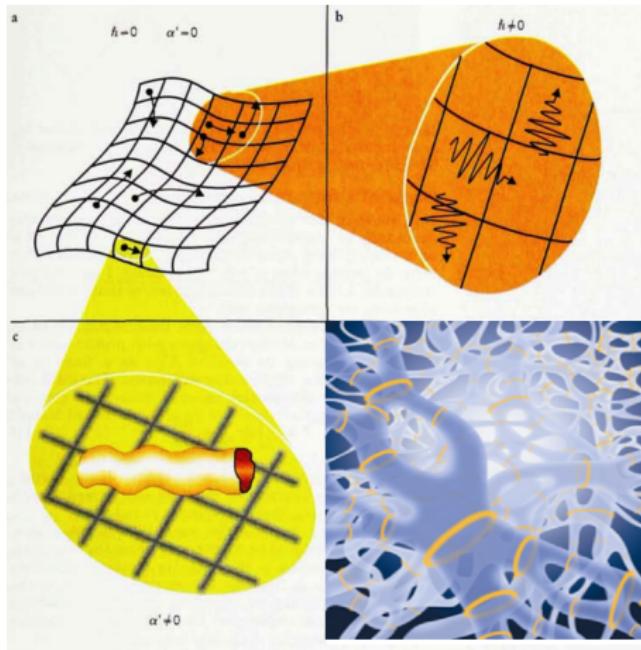
Quant à savoir quelle voie sera la bonne, seule la qualité du résultat nous l'apprendra.



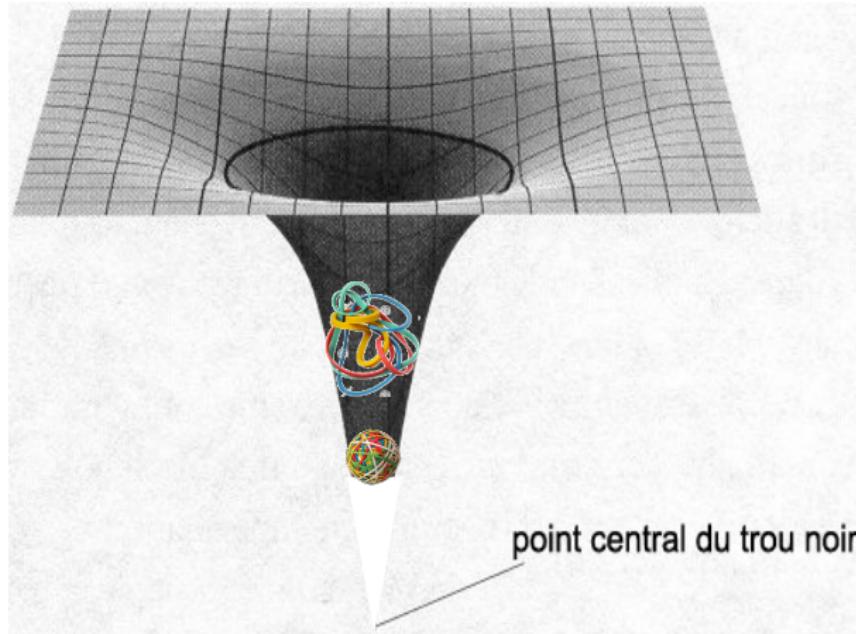
La corde est invisible à notre échelle mais on entend sa musique manifestée sous la forme des particules



# L'espace-temps vu par les cordes



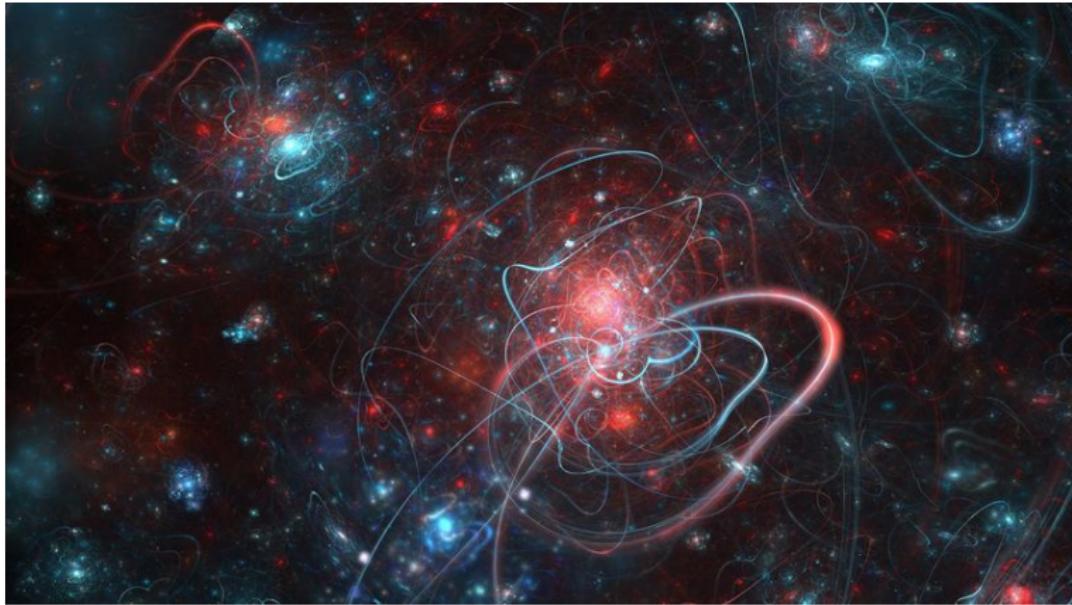
## Les trous noirs vus par les cordes



Les cordes écrantent la singularité classique du trou noir

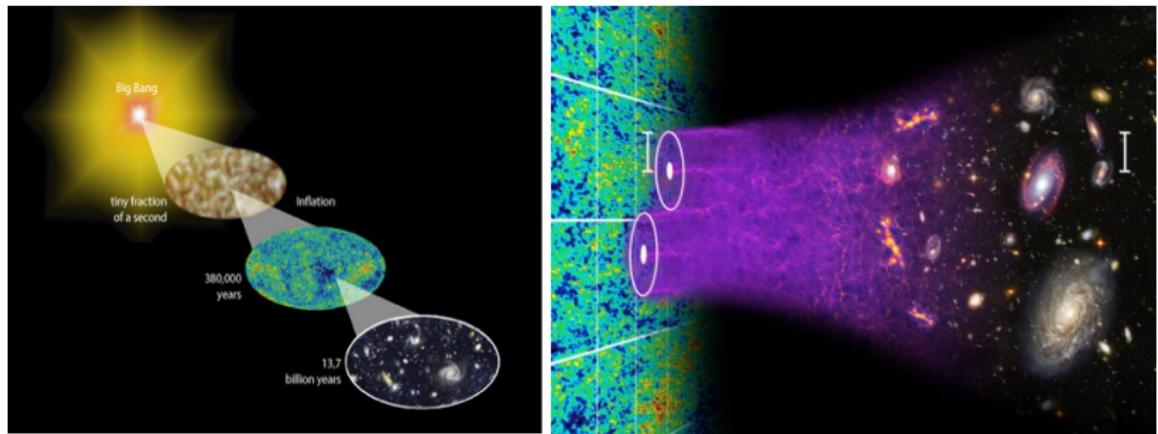
# Quatrième partie IV

Voir la gravitation quantique



# Ondes gravitationnelles primordiales

La gravité quantique polarise le fond diffus cosmologique



# Ondes gravitationnelles primordiales

**Liberation**

## {SCIENCES<sup>2</sup>}

Par Sylvestre Huet  
Journaliste à Libération

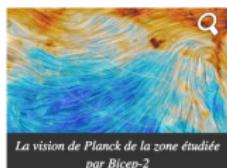
rechercher

### À LIRE AUSSI

#### SUR LE BLOG SCIENCES

- L'essai nucléaire nord-coréen
- Novembre: la Terre au plus chaud
- Arianespace en plein broum
- Darwin l'original à la Cité des sciences
- Ravines de Mars : le CO<sub>2</sub>, pas l'eau

## ONDES GRAVITATIONNELLES: PLANCK DÉMOLIT BICEP-2



La vision de Planck de la zone étudiée par Bicep-2

**LE FIGARO.fr**

Premium Actualité Economie Sport Culture Lifestyle Madame ► FigaroTV +

11h14 FMI : les migrants «grave problème» pour l'UE

Tout le flash

## « Nous ne pensions pas trouver les ondes gravitationnelles du big bang aussi vite »

ACTUALITÉ > SCIENCES & ENVIRONNEMENT Par [Tristan Vey](#) | [Cyrille Vanherberghe](#) | Publié le 18/04/2014 à 18:30

1 mois d'essai offert sans engagement

ES AUTEURS

UR LE MÊME SUJET

DÉGAGER (271)

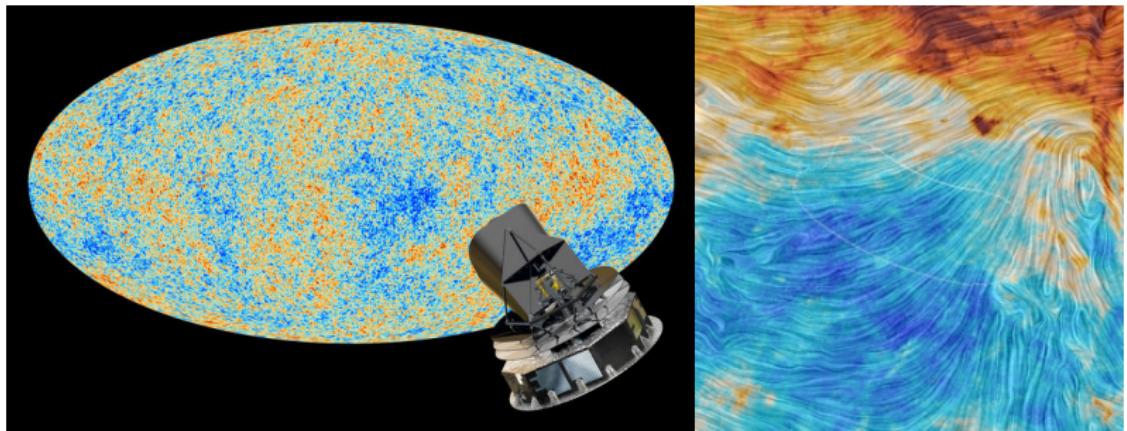
ARTICULER

MPRIMER

C'est ce matin les deux émissaires

# Ondes gravitationnelles primordiales

Malgré de nombreux espoirs encore aucune détection



Expérience Planck 2015

Nous avons pu déterminer des corrections de gravité quantique à de la physique de basse énergie



N.E.J. Bjerrum-Bohr Niels Bohr Institute (Danemark)



John Donoghue Amherst University (USA)

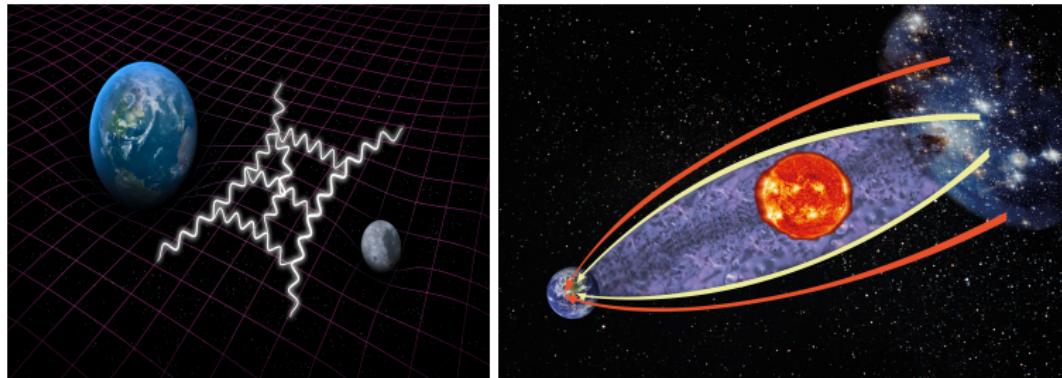


Barry Holstein Amherst University (USA)



Ludovic Planté Institut de Physique Théorique, CEA (France)

# Voir la gravité quantique : déviation de la lumière



Corrections quantiques à l'interaction gravitationnelle

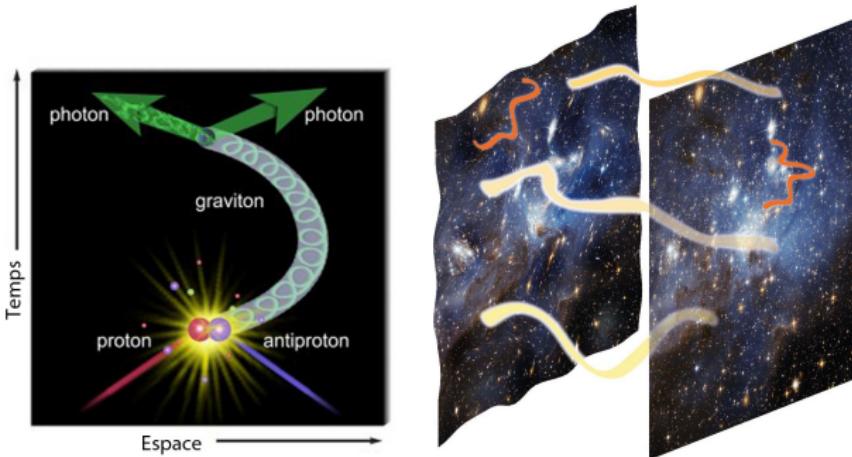
$$\theta_\gamma - \theta_\varphi = \frac{8(bu^\gamma - bu^\varphi)}{\pi} \frac{r_s \ell_P^2}{b^3}.$$

Effet numériquement très faible mais démontre que l'on sait maintenant calculer des signatures de gravité quantique

En 1747 Kant remarque que la loi de gravitation universelle de Newton est caractéristique d'un espace à 3 dimensions



Pour la première fois, la dimension de l'espace est vue comme la conséquence d'une force et pas d'un point de vue métaphysique ou purement géométrique.

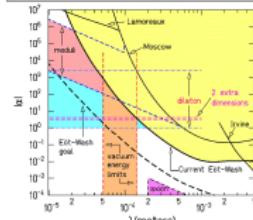
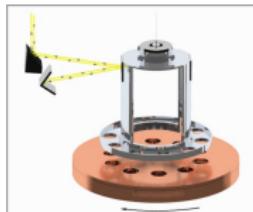


La faiblesse de la force de gravitation pourrait être due à l'existence de dimensions supplémentaires

La gravité pouvant s'échapper dans des dimensions supplémentaires voit l'intensité de son action diluée

$$\left| \frac{F_{\text{gravité}}}{F_{\text{électrique}}} \right| = \frac{1}{\text{Volume}}$$

# Des dimensions supplémentaires activement recherchées

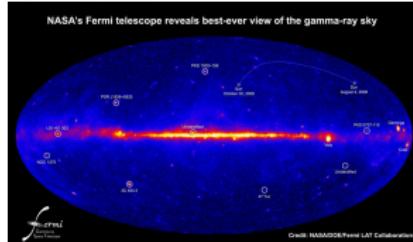


**J**ournal of Cosmology and Astroparticle Physics  
An IOP and SISSA journal

Limits on large extra dimensions based  
on observations of neutron stars with  
the Fermi-LAT

**JCAP**

Fermi-LAT collaboration



NASA's Fermi telescope reveals best-ever view of the gamma-ray sky

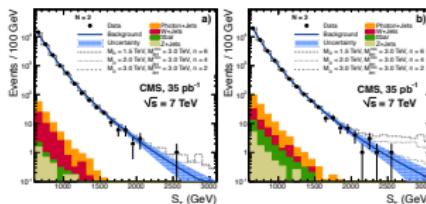
Credit: NAM02/Fermi LAT Collaboration

Physics Letters B 697 (2011) 454–463  
Contents lists available at ScienceDirect  
**Physics Letters B**  
[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

Search for microscopic black hole signatures at the Large Hadron Collider<sup>a</sup>

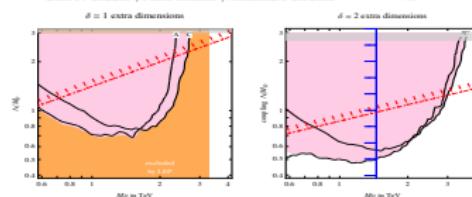
CMS Collaboration\*

CERN, Switzerland



LHC bounds on large extra dimensions

Roberto Franceschini<sup>a</sup>, Pier Paolo Giardino<sup>b</sup>  
Gian F. Giudice<sup>c</sup>, Paolo Lodone<sup>c</sup>, Alessandro Strumia<sup>b,c</sup>



**jhep**

Les contraintes expérimentales actuelles sur le nombre et la taille des dimensions supplémentaires sont :

La dérive du périhélie de mercure, les corrections quantiques au moment magnétique anormal de l'électron indiquent que  
 $|d - 3| < 4 \cdot 10^{-11}$ .

La supernova 1987A donne des indications importantes sur le nombre de dimensions supplémentaires et leurs tailles

dimensions $d = 3+$	2	3	4	5	6
taille en m	$10^{-6}$	$10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-11}$	$8 \cdot 10^{-12}$	$2 \cdot 10^{-12}$

# La gravité quantique : rêve ou réalité ?

Pour l'instant on n'a pas observé directement de phénomènes de gravité quantique



- ▶ Peut-être que nous détecterons un jour des effets à très haute énergies : Big Bang, trou noir,...
- ▶ Dans les accélérateurs : CERN, ...
- ▶ En astrophysique : effets quantiques à grande distance,...