

# Gravité et mécanique quantique

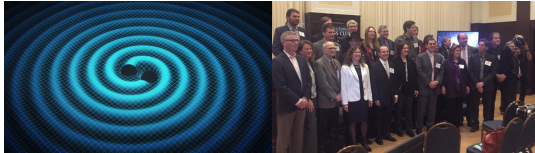
Pierre Vanhove

*IPHT  
Saclay*

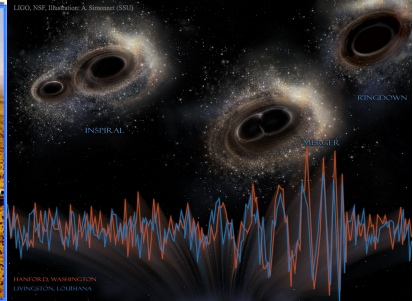
---

« Qu'est-ce que la gravité? »  
CEA-Saclay, Orme des merisiers,  
10 mai 2017

# Ondes gravitationnelles

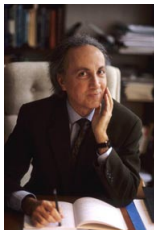


Le 14 septembre 2015 LIGO a détecté des ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs



# Prédiction théorique

Cette détection a été possible grâce au formidable travail théorique de prédiction des patrons d'ondes (cf. Exposé de Thibault Damour)



# Pourquoi est-ce important?

## 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

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

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

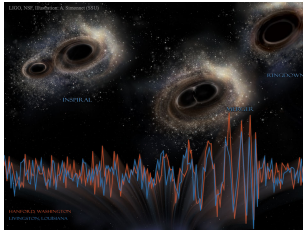
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

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.

Einstein doutait de la réalité physique des trous noirs et des ondes gravitationnelles

# Pourquoi est-ce important ?



La détection des ondes gravitationnelles ouvre une nouvelle fenêtre sur notre Univers

- ▶ Physique gravitationnelle en régime de couplage fort
- ▶ Dynamique des trous noirs
- ▶ Contraintes sur des modèles théoriques affectant la propagation des ondes gravitationnelles

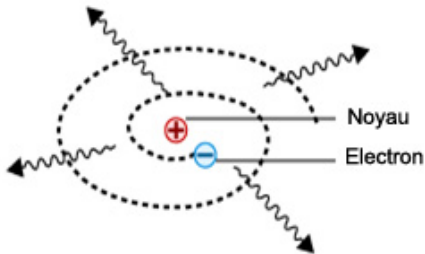
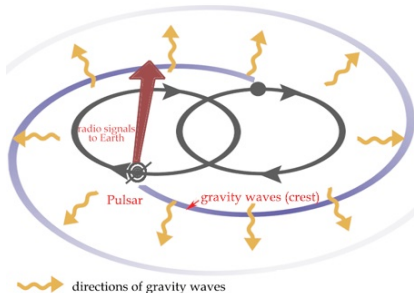
# La nature de la gravitation

La physique de la gravitation amène à de nombreuses questions

- ▶ Matière noire et énergie noire (cf. exposé de Marc Lazière-Rey)
- ▶ Cosmologie (cf. exposé d'Ugo Moschella)
- ▶ États microscopiques et entropie des trous noirs (cf. exposé de Monica Guica)
- ▶ Le multivers (cf. exposé d'Aurélian Barrau)
- ▶ Quelle théorie fondamentale pour la gravité quantique?

La théorie classique de la gravitation d'Einstein ne suffit pas pour répondre à ces questions

# Gravité et mécanique quantique

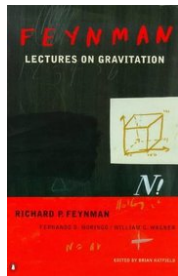
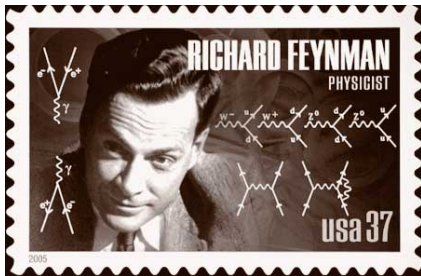


En 1916 Einstein écrit

*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.*

# Quantification de la gravitation

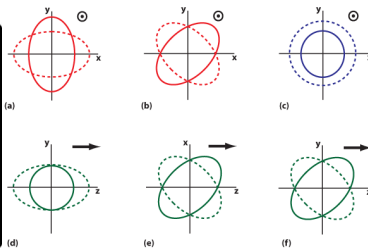


*My subject is the quantum theory of gravity. My interest in it is primarily in the relation of one part of nature to another. There's a certain irrationality to any work in gravitation, so it's hard to explain why you do any of it; ... (Feynman Jablonna, 1962)*

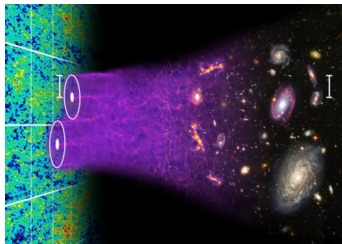




# Quantum d'espace-temps : le graviton



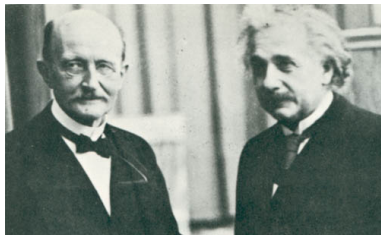
masse nulle, spin 2, (hypothétique) quantum d'espace-temps



On recherche toujours des indices expérimentaux du graviton

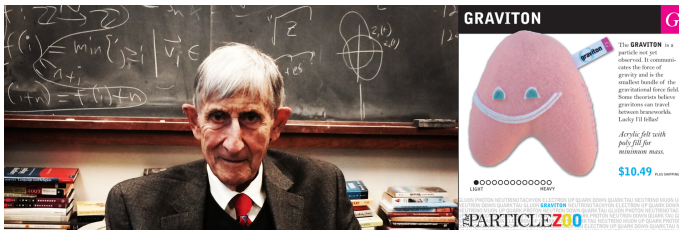
# Das Lichtquant

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, car même en science il est impossible d'introduire des idées nouvelles sans prendre de risque. (Max Planck)*

# Peut-on détecter un graviton ?



Dans sa conférence pour le prix Poincaré Prize, Freeman Dyson avance divers arguments contre la détection de graviton unique

Est-il concevable que le graviton n'existe pas ?

Peut-on penser à un cadre théorique, observationnel et expérimental fournissant des indications de la nature quantique de l'espace-temps ?

# La gravité quantique : une théorie incompréhensible ?



Natalie Wolchover

Senior Writer

March 14, 2014

PRINT THIS ARTICLE

Particle Physics Physics  
Quantum Gravity Quantum Gravity

THEORETICAL PHYSICS

## Betting on the Future of Quantum Gravity

New calculations suggest physicists may someday discover a fundamental theory of quantum gravity. It could require a radical new perspective on the universe.

7 | 0

Physics in a minute: What's the problem with quantum gravity?

Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015  
Submitted by Hansenne on October 29, 2015

## Gravity shows its helpful side

Theoretical study shows that the force can ease quantum calculations.

Geoff Brumfiel

**Gravity is unlikely to ease three theoretical equations into chaos, and has proved a stumbling block in the creation of a single theory of everything.** But an analysis now shows that



It usually is an obstacle to a everything

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



Cat Sat

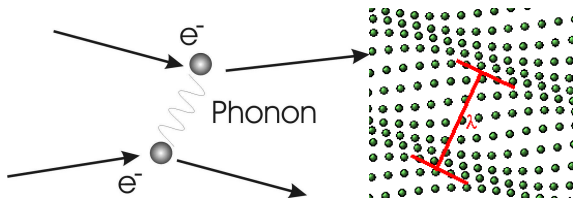


Mill

will

201

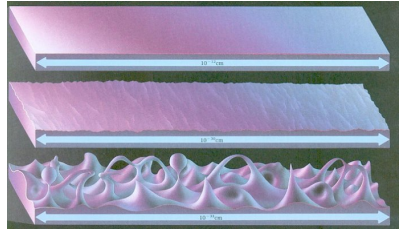
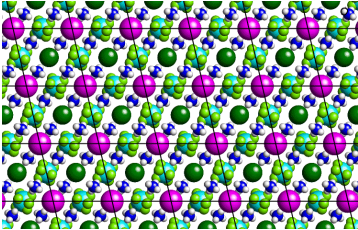
## Ondes acoustiques : le phonon



Les phonons décrivent les ondes acoustiques mais *ne sont pas des particules élémentaires*

On peut quantifier des quasi-particules même si elles ne sont pas particules fondamentales existant à toutes les échelles

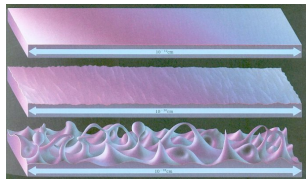
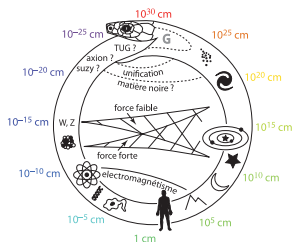
# Symétries fondamentales, émergentes ?



Les ondes gravitationnelles confirment la validité des symétries de la relativité générale jusqu'à une distance de l'ordre de 10% de la taille de l'Univers Observable

Quelle est leur domaine de validité de ces symétries de l'espace-temps ? Quelles sont les symétries aux grandes ou aux petites distances ?

# Échelles de la gravitation



- ▶ Classique : rayon de Schwarzschild des trous noirs

$$r_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$

- ▶ Quantique : longueur d'onde de Compton

$$\lambda = \frac{\hbar}{Mc}$$

- ▶ Gravité quantique : longueur de Planck

$$r_S \times \lambda = 2\ell_P^2 = 2 \frac{G_N \hbar}{c^3}$$



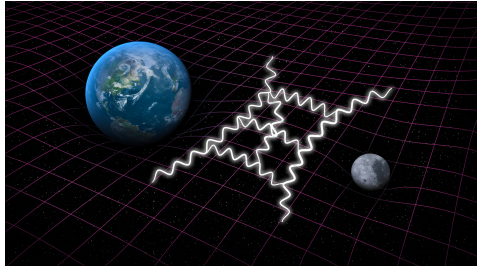
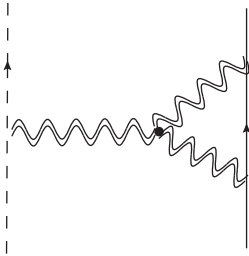
# Théorie effective pour la gravitation quantique

Selon Steven Weinberg et John Donoghue, la physique à grande distance permet d'extraire des résultats non triviaux de gravitation quantique indépendant de la physique à très courtes distances

On suppose

- ▶ les règles habituelles de la quantification
- ▶ Les degrés de liberté à l'échelle considérée (graviton)
- ▶ Les symétries observées (invariance sous difféomorphisme)

# La gravitation quantique : une théorie prédictive



Cette approche permet de calculer

- ▶ les correction classiques (post-Newtoniennes) induites par la théorie d'Einstein de la gravitation
- ▶ Des effets quantiques de grande distance

Cette approche est universelle car toute théorie de la gravité quantique avec les symétries de la relativité générale à grande distance doit donner les mêmes résultats

# Gravité classique et quantiques à grande distance

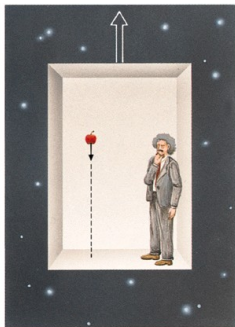
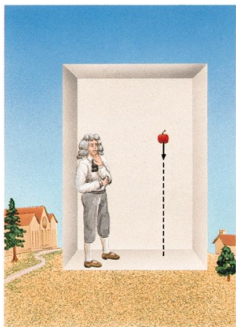


Contributions classique et quantique au potentiel gravitationnel sont liées

$$V(r) = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \left( 1 + \sum_{n \geq 1} \left( \frac{r_S}{r} \right)^{n-1} \left( C_n \frac{r_S}{r} + Q_n \left( \frac{\ell_P}{r} \right)^2 \right) + \dots \right)$$

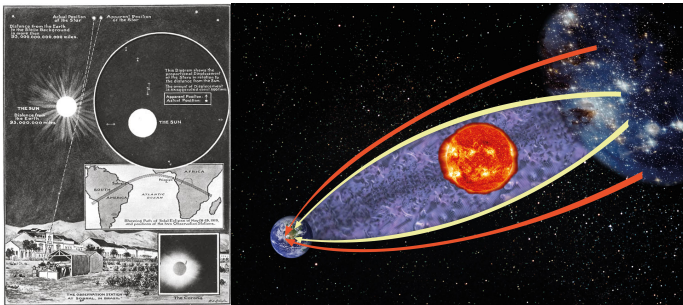
Les contributions classiques  $C_n$  et quantiques  $Q_n$  sont sans ambiguïtés pas besoin d'une théorie microscopique de haute énergie

# Le Principe d'équivalence



*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. (Einstein 1907)*

# Violation du Principe d'équivalence ?



La contribution quantique dépend du spin

$$\theta_\gamma - \theta_\varphi = \frac{8(bu^\gamma - bu^\varphi)}{\pi} \frac{G_N^2 \hbar M}{c^5 b^3}.$$

Effet numériquement très faible mais démontre que l'on peut calculer des signatures de gravité quantique non triviaux sans avoir à détecter un graviton directement