

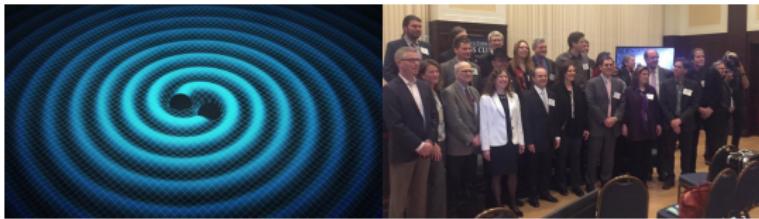
Gravité et mécanique quantique

Pierre Vanhove

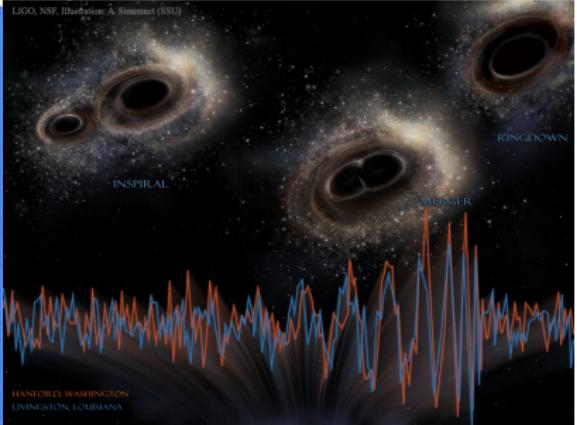


« Qu'est-ce que la gravité? »
CEA-Saclay, Orme des merisiers,
10 mai 2017

Ondes gravitationnelles

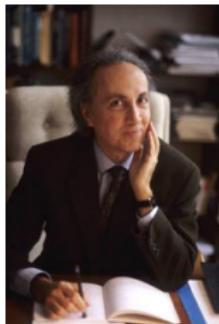


Le 14 septembre 2015 LIGO a détecté des ondes gravitationnelles émises par un système binaire de trous noirs



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_{tt} 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_{tt} 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

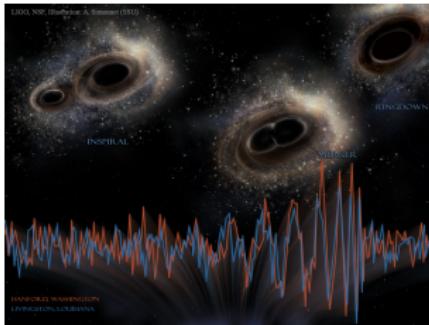
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

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

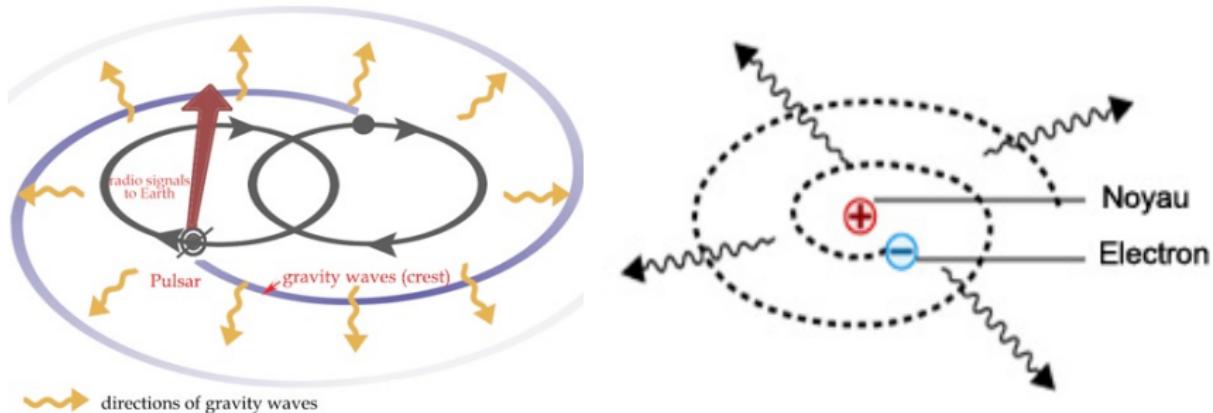
La nature de la gravitation

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

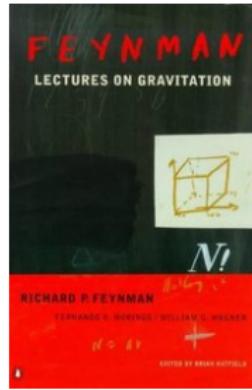
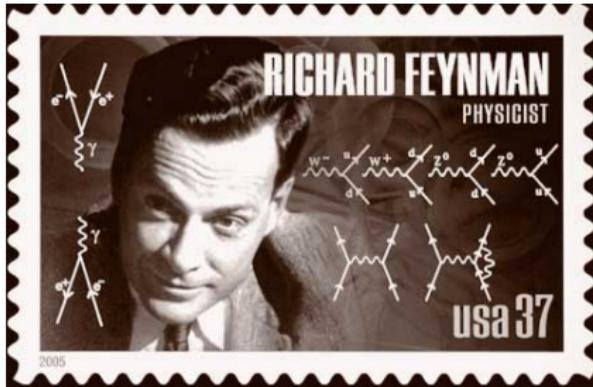
Gravité et mécanique quantique



En 1916 Einstein écrit

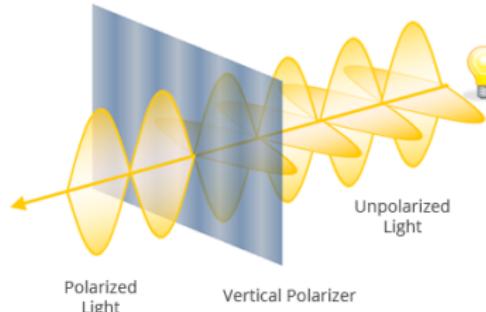
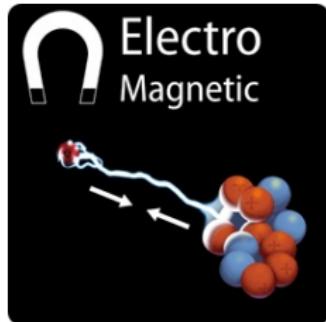
À cause des mouvements intra-atomiques, l'atome doit rayonner (...) de l'énergie gravitationnelle, même en très faibles quantités. Comme cela ne peut être le cas dans la nature, il apparaît alors que la théorie quantique doit modifier (...) la nouvelle théorie de la gravitation.

Quantification de la gravitation

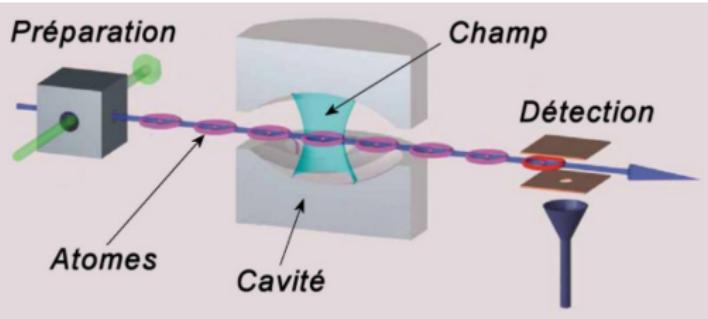


My subject is the quantum theory of gravity. My interest in it is primarily in the relation of one part of nature to another. There's a certain irrationality to any work in gravitation, so it's hard to explain why you do any of it; ... (Feynman Jablonna, 1962)

Quantum de lumière : le photon

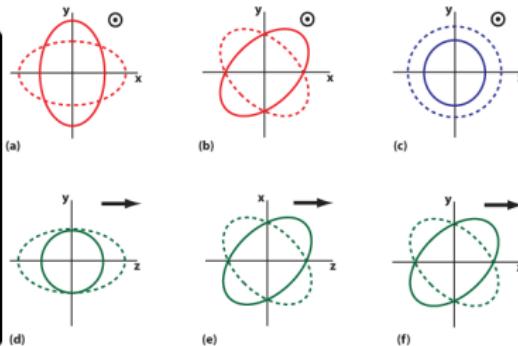
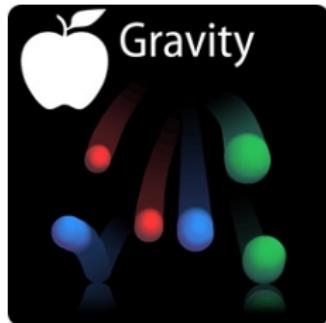


masse nulle, spin 1, quantum des ondes électromagnétiques

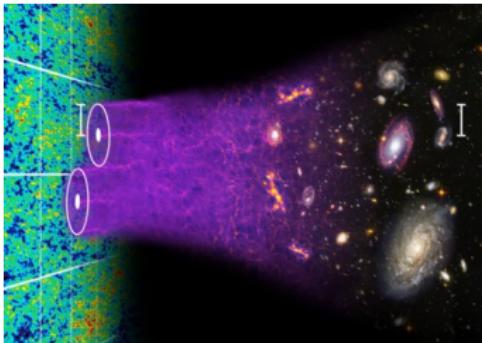


On sait détecter et manipuler des photons

Quantum d'espace-temps : le graviton



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



On recherche toujours des indices expérimentaux du graviton

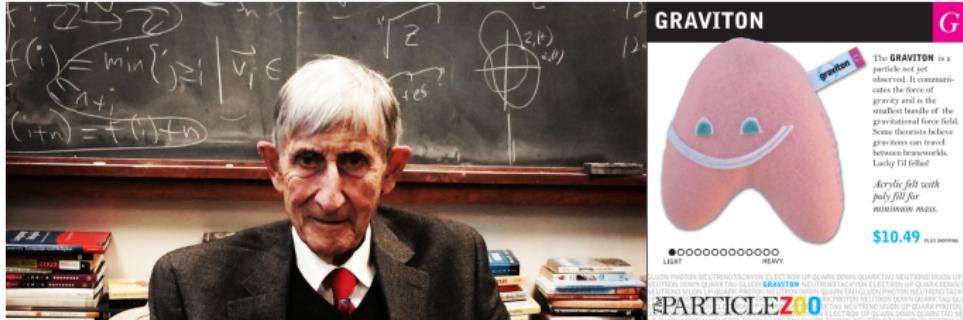
Das Lichtquant

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 ?

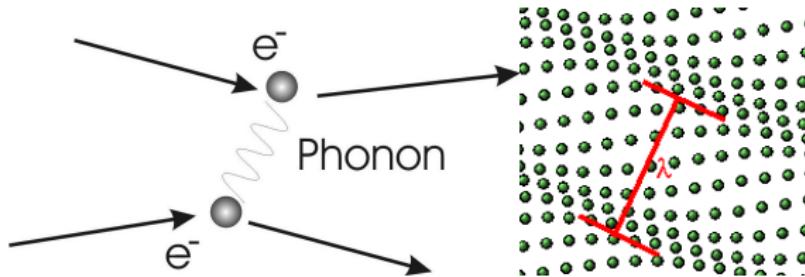
The image is a collage of three news articles from different scientific publications, all centered around the topic of quantum gravity.

Quanta Magazine Article: The article is titled "Betting on the Future of Quantum Gravity" by Natalie Wolchover. It discusses new calculations suggesting physicists may someday discover a fundamental theory of gravity. The author's photo and bio are shown, along with a "PRINT THIS ARTICLE" button and social sharing options.

Nature Article: The article is titled "Gravity shows its helpful side" by Graeme Smith. It highlights a theoretical study showing that the force of gravity can ease quantum calculations. The text includes a quote from Gautham Ramanujan: "Gravity is annoying. It can throw theories, equations, into chaos, and it's been a stumbling block to the creation of a single theory of everything." An image of a black hole is shown.

Phys.org Article: The article is titled "Will we have to rewrite Einstein's theory of general relativity?" by Robin Tucker. It explores whether the two main theories that describe the world we live in—Einstein's theory of relativity and quantum mechanics—can't be reconciled. The image shows the International Space Station orbiting Earth.

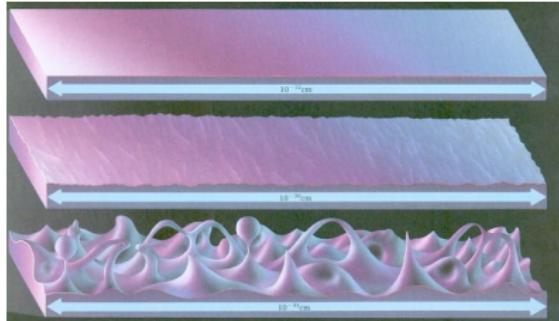
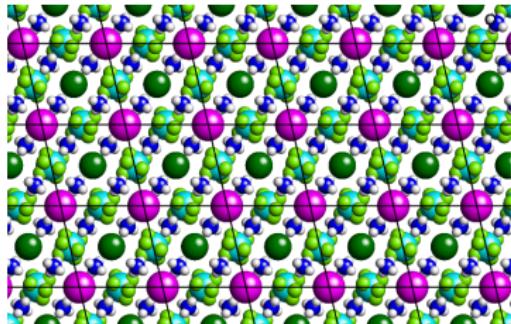
Ondes acoustiques : le phonon



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

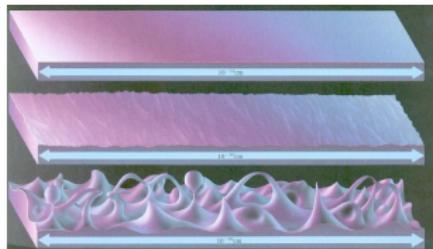
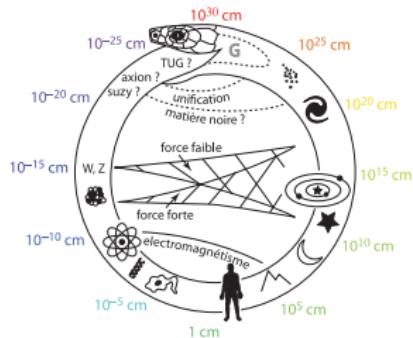
Symétries fondamentales, émergentes ?



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

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

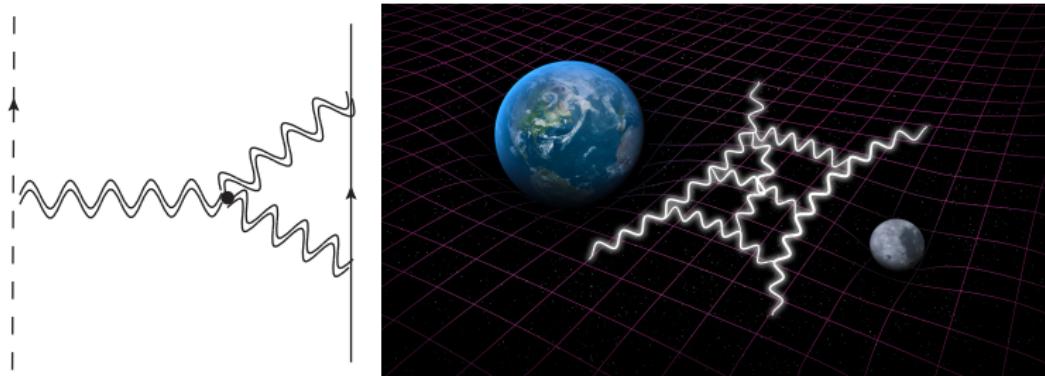
Théorie effective pour la gravitation quantique

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 corrections 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

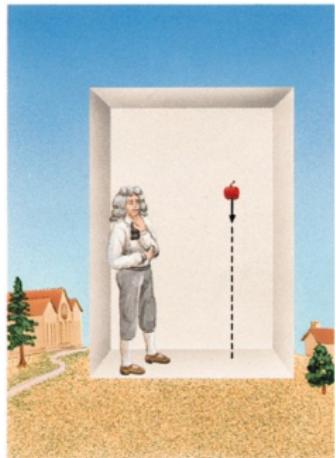


Contributions classique et quantique au potentiel gravitationnel sont liées

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

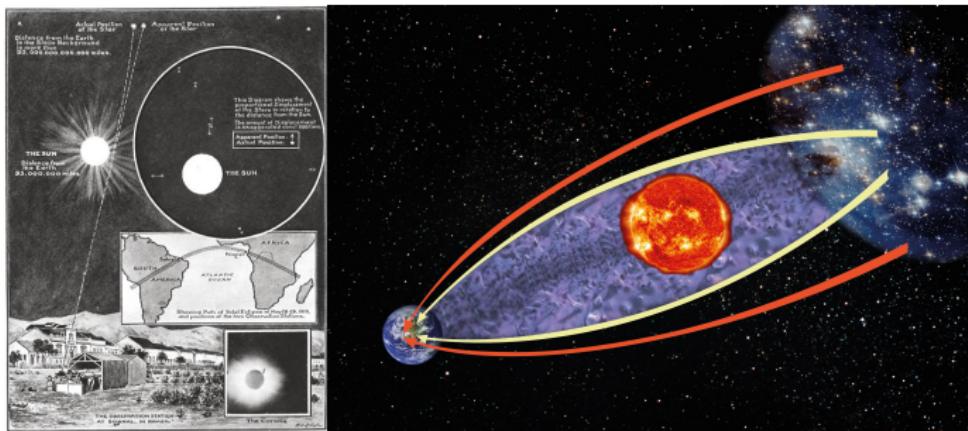
Les contributions classiques C_n et quantiques Q_n sont sans ambiguïtés pas besoin d'une théorie microscopique de haute énergie

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 triviales sans avoir à détecter un graviton directement