

Peut-on détecter un graviton?

Pierre Vanhove



Colloque de l'Orme
CEA-Saclay, Orme des merisiers,
10 décembre 2015

Première partie I

La Gravitation

Ça a été la plus heureuse idée de ma vie

Albert Einstein

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

$$T_{\mu\nu} = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\mu \partial x_\nu} - \sum_i \left\{ \begin{smallmatrix} i & \mu \\ \nu & \end{smallmatrix} \right\} T_{ii} \right) - \sum_{\mu, \nu} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\mu \partial x_\nu} - \left\{ \begin{smallmatrix} \mu & \nu \\ \nu & \mu \end{smallmatrix} \right\} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_\mu \partial x_\nu} \right)$$

Tensor 2. Rang

Wertbare Methode

$$\frac{\partial \left\{ \begin{smallmatrix} i & \mu \\ \nu & \end{smallmatrix} \right\}}{\partial x_\mu} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_\mu} \left(g_{\mu\nu} \left\{ \begin{smallmatrix} i & \mu \\ \nu & \end{smallmatrix} \right\} + g_{\nu\mu} \left\{ \begin{smallmatrix} i & \nu \\ \mu & \end{smallmatrix} \right\} \right)$$

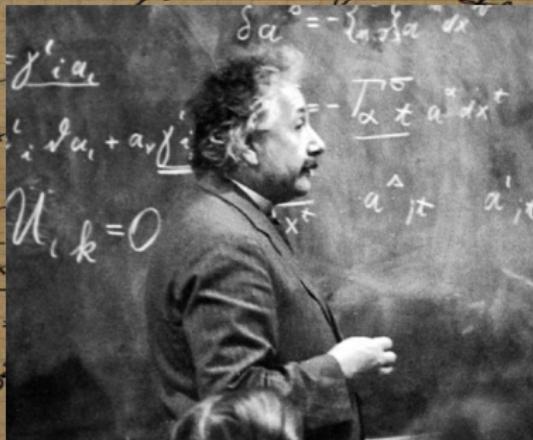
Wir setzen voran

$$-\sum_i g_{\mu\alpha} \frac{\partial^2 g^{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu} = 0$$

Ferner $\left\{ \begin{smallmatrix} i & \mu \\ \nu & \end{smallmatrix} \right\} \left\{ \begin{smallmatrix} \mu & \nu \\ k & \end{smallmatrix} \right\} =$
 $= -g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \left(\frac{\partial}{\partial x_\mu} \left\{ \begin{smallmatrix} i & \alpha \\ \beta & \end{smallmatrix} \right\} \right)$

Hieraus

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



$\delta \varphi = - \int g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ her Gravitations-

-potentiale

des gravi-

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

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

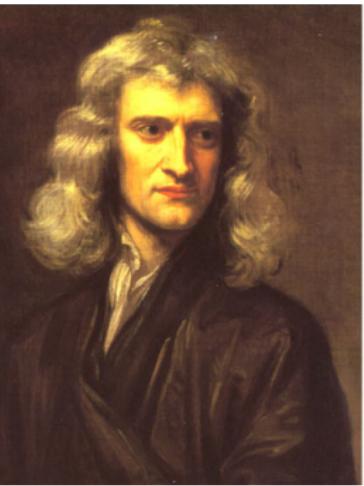
$$g_{\mu\alpha} g_{\nu\beta} \frac{\partial^2 g^{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu} \frac{\partial^2 g^{\alpha\beta}}{\partial x_\mu \partial x_\nu}$$

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

$$\text{oder } - \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu} \frac{\partial^2 g^{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\nu}$$

Révolutionne la conception de l'espace, du temps et du cosmos

Loi de la gravitation : Galilée et Newton



Galilée affirma l'identité des lois du Ciel et de la Terre. Il énonce la première loi de la gravitation : Tous les corps tombent de la même façon

Hivers 1679-1680 Newton formule de la gravitation universelle

J'ai expliqué jusqu'ici les phénomènes célestes et ceux de la mer par la force de gravitation,...

La gravitation universelle ... mais mystérieuse

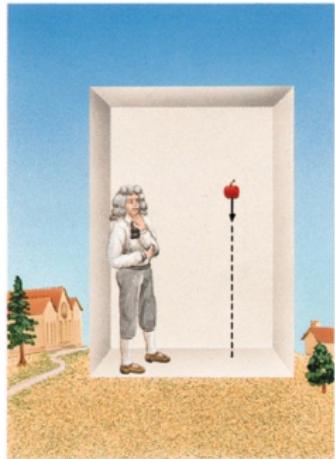


Rubrique à Brac © Gotlib - Dargaud

Ni Galilée, ni Newton ne donnent d'explication sur l'origine de la force de gravitation

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. (Newton)

Le Principe d'équivalence : l'idée merveilleuse d'Einstein

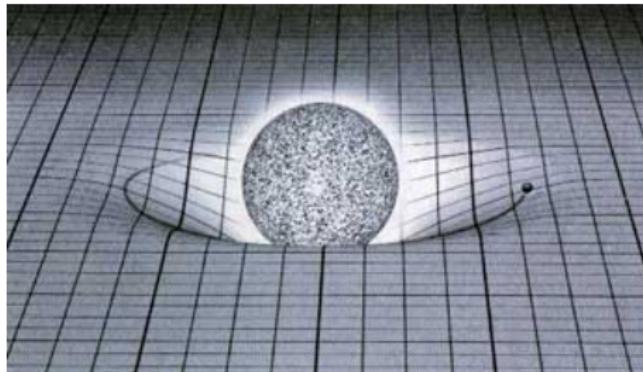


J'étais assis sur ma chaise au Bureau Fédéral de Berne... Je compris que si une personne est en chute libre, elle ne sentira pas son propre poids. J'en ai été saisi. Cette pensée me fit une grande impression. Elle me poussa vers une nouvelle théorie de la gravitation. (Einstein 1907)

La gravitation comme courbure de l'espace-temps

Le 25 novembre 1915, Einstein formule la relativité générale

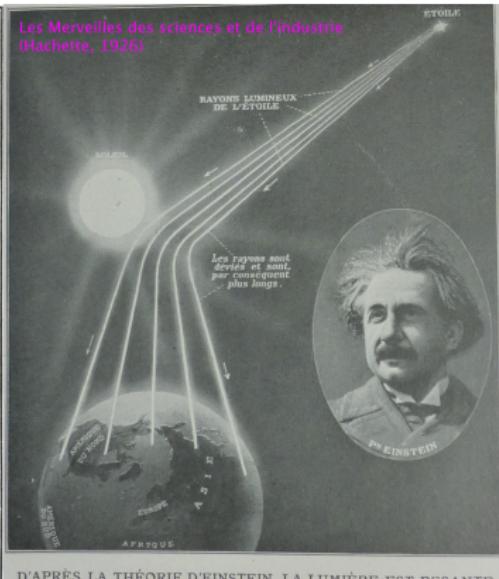
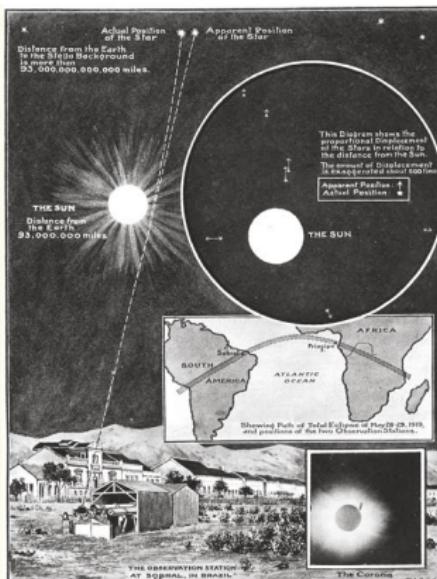
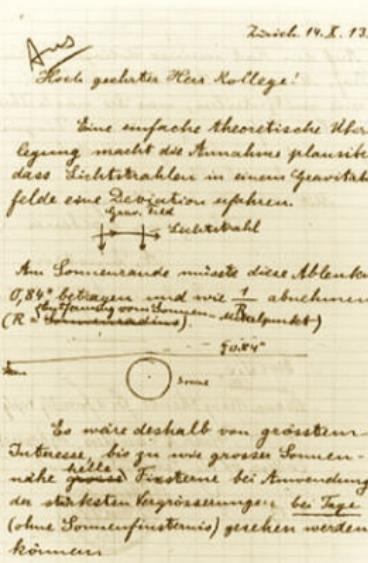
$$\begin{aligned} [{}^{\mu\nu}_{\nu}] &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial g_{\mu\ell}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial g_{\nu\ell}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\ell} \right) \quad \frac{\partial}{\partial x_\ell} [{}^{\kappa\ell}_{\alpha\beta}] = \frac{1}{2K_1} [{}^{\kappa\ell}_{\alpha\beta}] \\ (i\kappa, \ell m) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 g_{\mu m}}{\partial x_i \partial x_\kappa} + \frac{\partial^2 g_{\kappa m}}{\partial x_i \partial x_\mu} - \frac{\partial^2 g_{\mu\kappa}}{\partial x_i \partial x_m} - \frac{\partial^2 g_{\mu m}}{\partial x_i \partial x_\ell} \right) \left. \begin{array}{l} \text{grossmann} \\ \text{levi civita} \\ \text{handy faltungkeit} \end{array} \right\} \\ &+ \sum_{q6} \delta_{\ell\kappa} \left([{}^{\mu m}_{\nu}] [{}^{\kappa\ell}_{\alpha\beta}] - [{}^{\ell\kappa}_{\alpha\beta}] [{}^{\mu m}_{\nu}] \right) \end{aligned}$$



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

Déviation de la lumière

La prédiction d'Einstein est confirmée par les observations d'Eddington et Dyson en 1919



Curieuse illustration dans « Les merveilles des sciences et l'industrie (Hachette, 1926) », où soleil repousse la lumière 😊

Deuxième partie II

Quantification

Commentators on the whole agree on praising the logical and uncompromising clarity of his arguments and go on to differ fundamentally about what he meant.

D.H. Pennington about the work of Thomas Hobbes

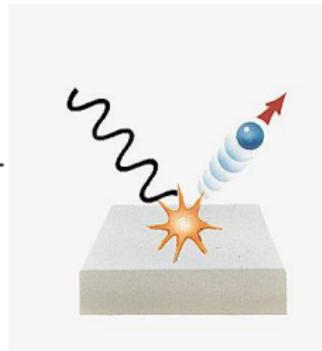
Das Lichtquant



2015 est l'année internationale de la lumière



INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



célébrant une autre découverte d'Einstein (1905)

le quantum de lumière : le photon

Das Lichtquant

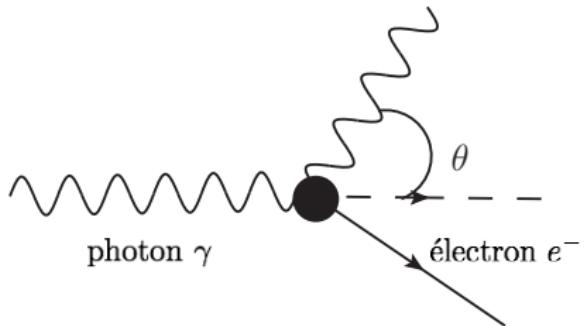
Scepticisme de Max Planck lors de l'élection d'Einstein à l'académie des sciences de Prusses (1913)



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)

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

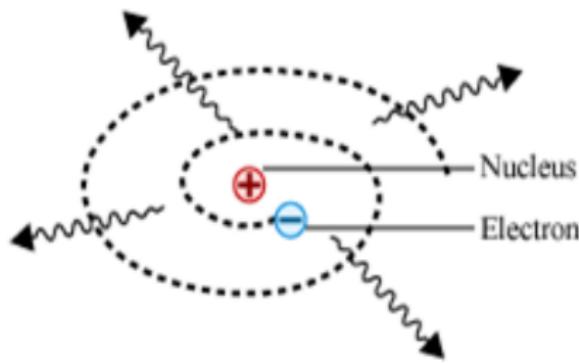
Diffusion Compton



$$\lambda' - \lambda = \frac{\hbar}{mc} (1 - \cos \theta)$$

L'expérience de diffusion par Arthur Compton (1923) confirme l'hypothèse d'Einstein de la quantification de la lumière et l'existence du photon

Nécessité de quantifier la gravitation



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.

Troisième partie III

La Gravitation aujourd'hui

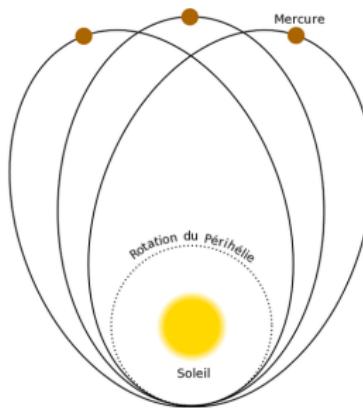
Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténèbreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.

Pascal Quignard (La barque silencieuse Chap XXV Extase et enstase)

Physique à grande distance

La théorie d'Einstein modifie le potentiel Newtonien

$$V(r) = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \left(1 + C \frac{G_N (m_1 + m_2)}{c^2 r} + \dots \right)$$



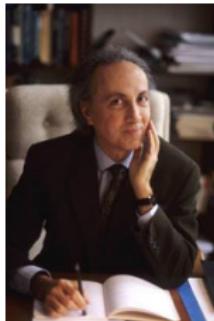
En 1915 Einstein explique la précession du périhélie de Mercure résolvant le désaccord avec la théorie de Newton trouvé par Le Verrier en 1859

Physique à grande distance

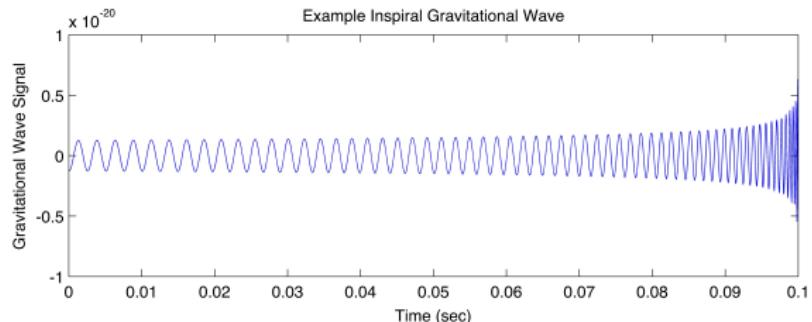
La théorie d'Einstein modifie le potentiel Newtonien

$$V(r) = -\frac{G_N m_1 m_2}{r} \left(1 + C \frac{G_N (m_1 + m_2)}{c^2 r} + \dots \right)$$

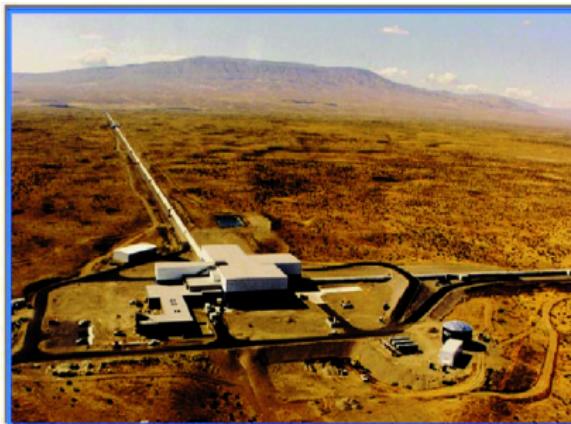
Une compréhension systématique est importante pour détecter les ondes gravitationnelles



Thibault Damour

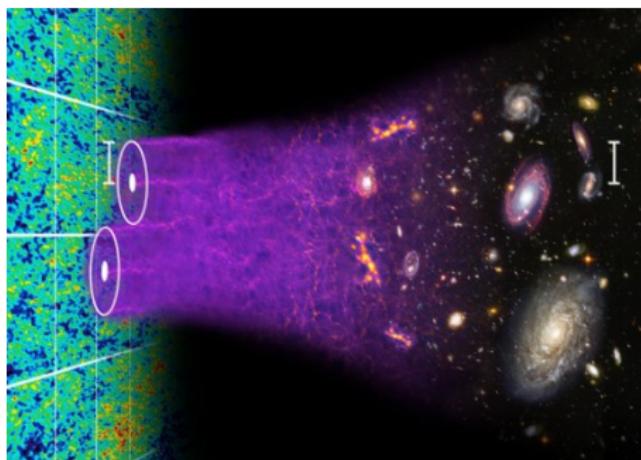


Les ondes gravitationnelles sont une manifestation *classique* de la dynamique de l'espace-temps que l'on essaie de détecter avec des interféromètres (LIGO et VIRGO)



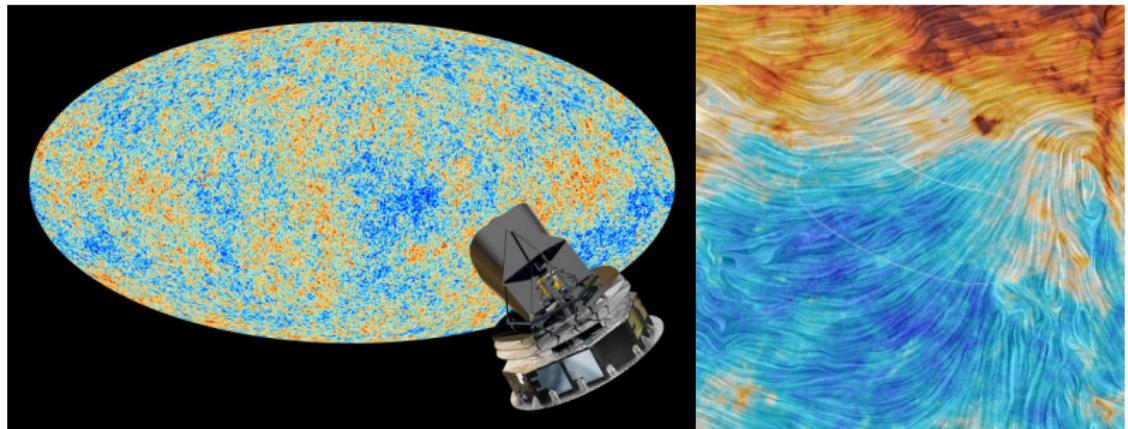
Ondes gravitationnelles primordiales

La détection d'ondes gravitationnelles primordiales nous renseignera sur des effets *de gravité quantique*



Ondes gravitationnelles primordiales

Malgré de nombreux espoirs encore aucune détection



Expérience Planck 2015

Quatrième partie IV

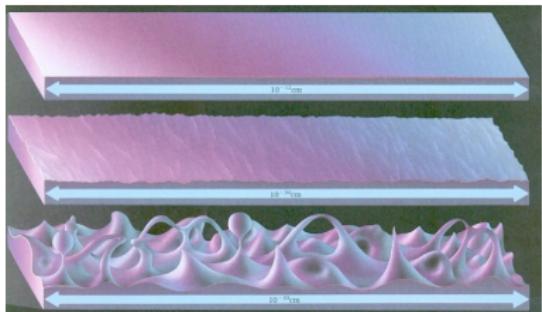
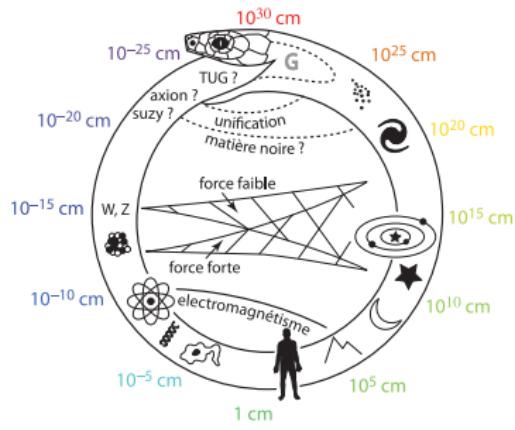
Physique à basse énergie

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

Herman Hesse, « Narcisse & Goldmund »

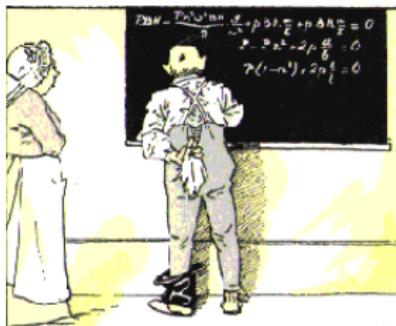
Universalité de la gravitation

La gravitation affecte les phénomènes physiques aux échelles microscopiques et macroscopiques



La gravité quantique agit aussi à grande distance

Potentiel classique et quantique



Deux paramètres physiques :

- paramètre classique : le rayon de Schwarzschild (trou noir)

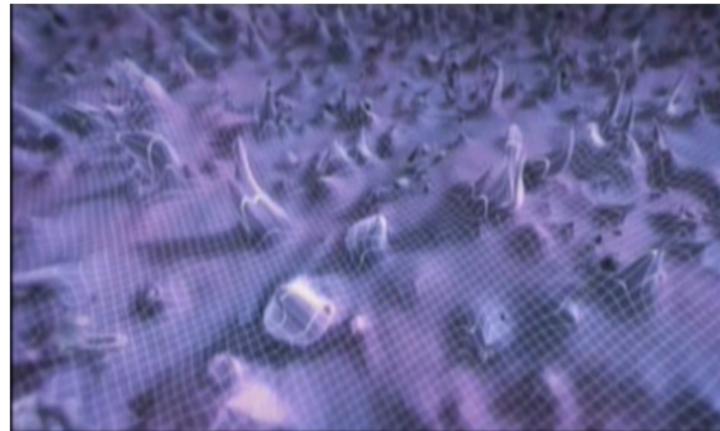
$$r_s = \frac{2G_N m}{c^2}$$

- paramètre quantique : la longueur d'onde de Compton

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

Corrections quantiques ?

À une contribution classique de l'ordre $(r_S/r)^n$



Incertitudes quantiques de l'ordre de la longueur d'onde de

$$\text{Compton } \lambda = \frac{\hbar}{mc}$$

$$\left(\frac{r_S}{r \pm \lambda}\right)^n \simeq \left(\frac{r_S}{r}\right)^n \mp n \left(\frac{r_S}{r}\right)^{n-1} \frac{r_S \lambda}{r^2} + \dots$$

Potentiel classique et quantique

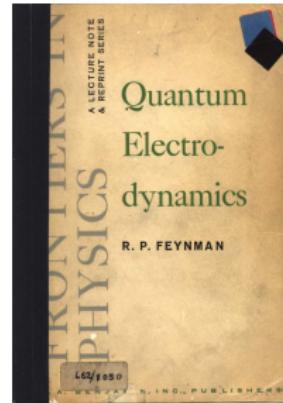
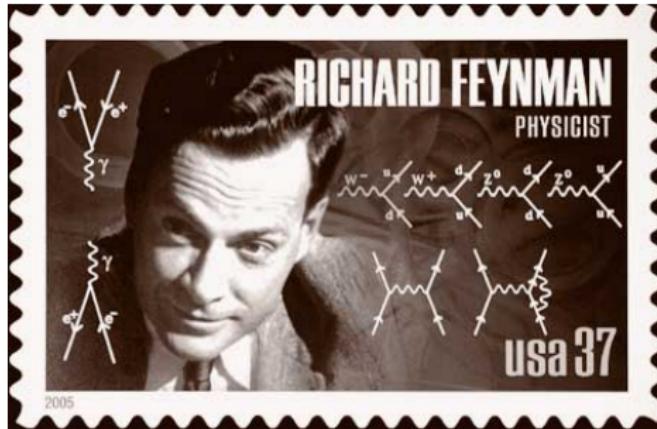
rayon de Schwarzschild \times longueur de Compton
= longueur de Planck

$$\frac{2mG_N}{c^2} \times \frac{\hbar}{mc} = 2\frac{\hbar G_N}{c^3} = 2\ell_P^2 \approx 2 \times (10^{-35} \text{ m})^2$$

À chaque ordre en perturbation contributions **classique et quantique** au potentiel gravitationnel sont liées

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

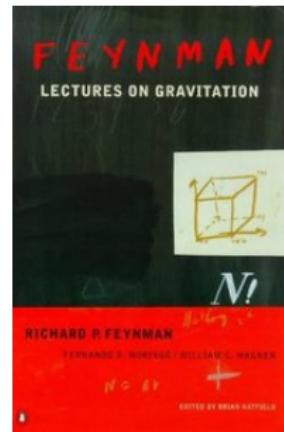
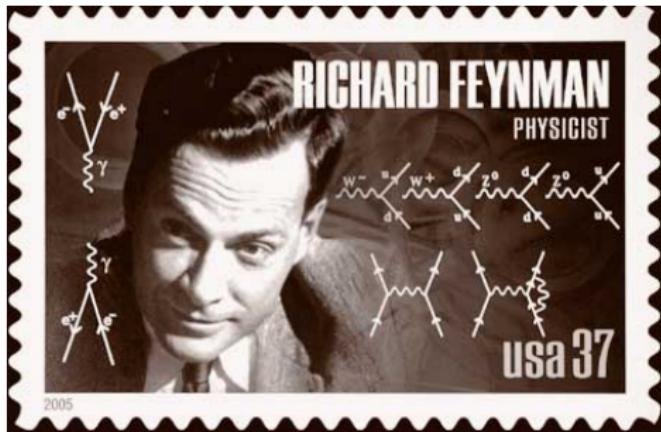
Quantification



Feynman a inventé le formalisme de l'intégrale chemin pour l'électrodynamique quantique

I would like to impress you with the vast range of phenomena that the theory of quantum-electrodynamics describes : its easier to say it backwards : the theory describes all the phenomena in the physical world except the gravitational effect, the thing that holds you in your seats ... (Feynman QED)

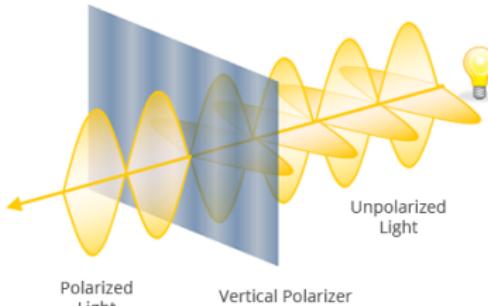
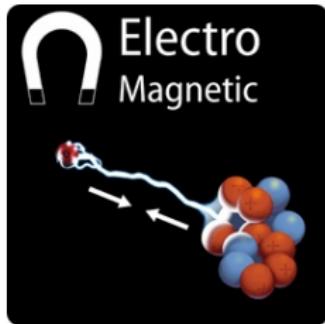
Quantification



Il a montré que le même formalisme s'applique à 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)

Photon et Graviton

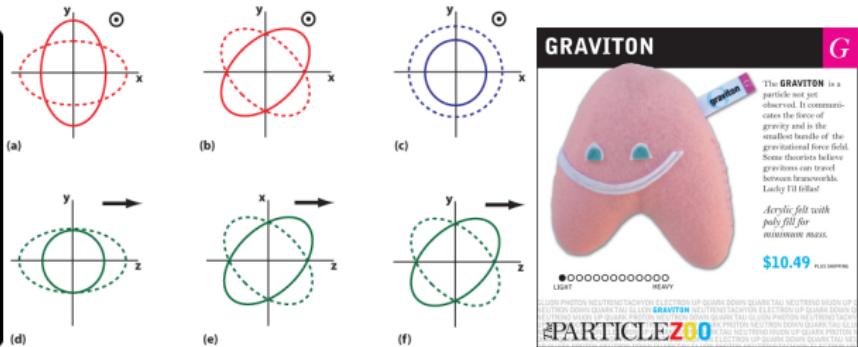


Le photon est une particule de masse nulle vectorielle (spin 1) avec deux états de polarisation + et -

$$\gamma : \quad \epsilon_{\mu}^{+}, \quad \epsilon_{\mu}^{-}$$

La force électrique et magnétique est due à l'échange de photon

Photon et Graviton



Le graviton est une particule de masse nulle tensorielle (spin 2) avec aussi deux états de polarisation

$$h : \quad \epsilon_{\mu\nu}^{++}, \quad \epsilon_{\mu\nu}^{--}$$

La graviton est responsable de la force d'attraction entre les masses

Cinquième partie V

La gravitation quantique rendue facile

Romana : But how ? How did you know ?

Doctor : Well, I just put 1.795372 and 2.204628 together.

Romana : And what does that mean ?

Doctor : Four !

The Doctor and Romana, in « The Pirate Planet »



Quantifier la gravitation : un problème difficile



C'est une théorie *non-linéaire en auto-interaction*

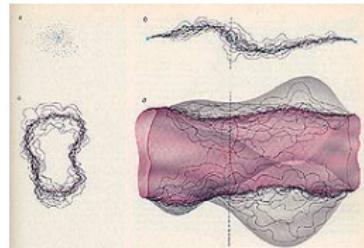
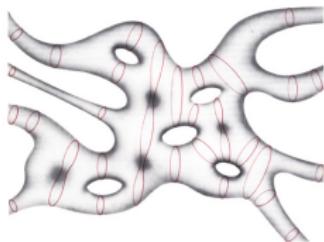
Quantifier la gravitation nécessite à modifier notre vision
classique de l'espace-temps

The elimination of the logical inconsistencies ... requires a radical reconstruction of the theory, ... and perhaps also the rejection of our ordinary concepts of space and time, replacing them by some much deeper and non-evident concepts. (Bronshtein, 1936)



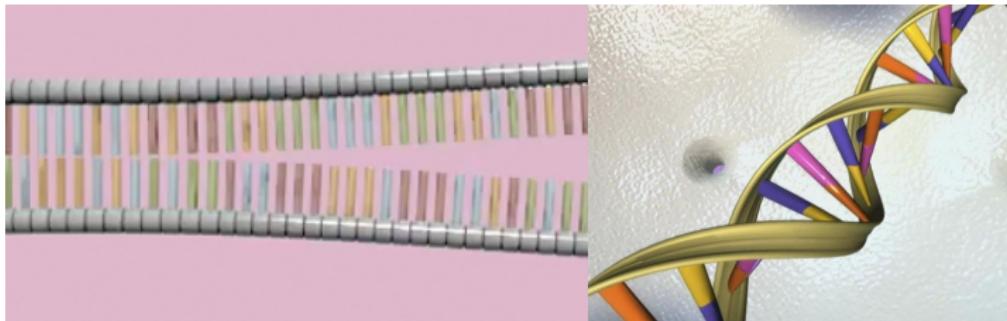
There is no intellectual exercise that is not ultimately pointless
(J.-L. Borges, in «Pierre Ménard, Author of the Quixote»)

There is no intellectual exercise that is not ultimately **stringy**
(J.-L. Borges, in «Pierre Ménard, Author of the Quixote»)



La théorie des cordes nous enseigne que l'on peut traiter le graviton comme un « produit » de deux photons

$$\epsilon_{\mu\nu}^{\pm\pm} = \epsilon_\mu^\pm \otimes \epsilon_\nu^\pm$$



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)



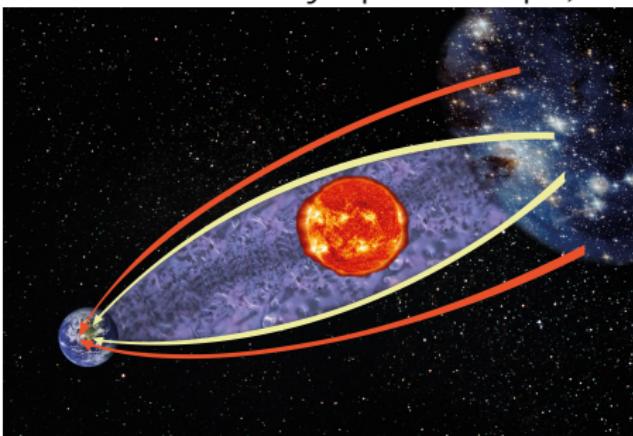
John Donoghue Amherst University (USA)



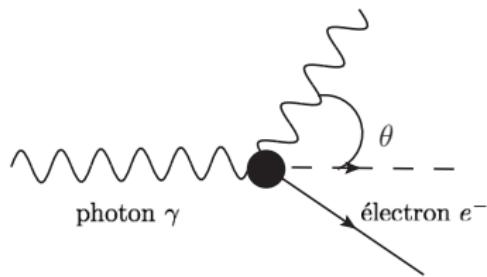
Barry Holstein Amherst University (USA)



Ludovic Planté Institut de Physique Théorique, CEA (France)



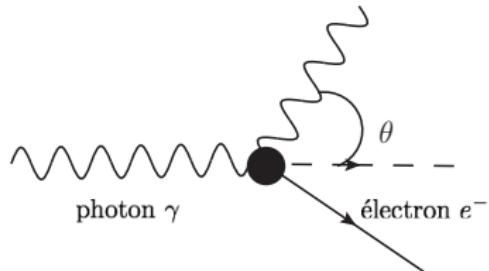
Diffusion Compton



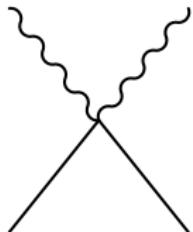
À basse énergie la diffusion Compton ne dépend pas de la nature de la cible

$$\frac{d\sigma_{lab,S}}{d\Omega} \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \frac{e^2}{8\pi c^2 m^2} \left[\cos^4 \frac{\theta}{2} + \sin^4 \frac{\theta}{2} \right]$$

Diffusion Compton

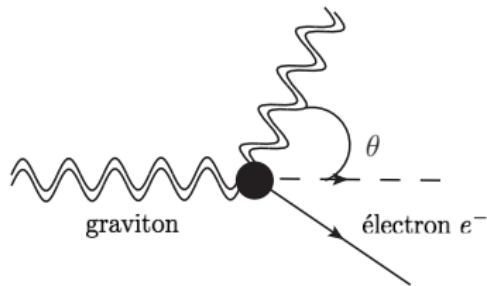


La limite des petits angles est dominée par le terme de contact



$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d\sigma_{lab,S}^{\text{Comp}}}{d\Omega} = \frac{e^2}{8\pi c^2 m^2},$$

Diffusion Compton Gravitationnelle

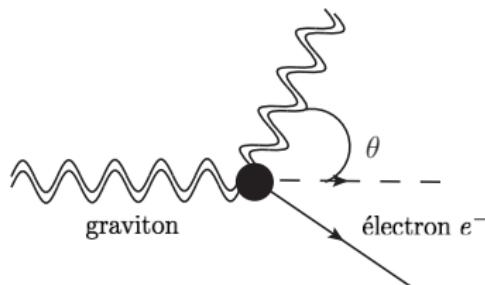


La limite de basse énergie est universelle

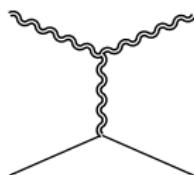
$$\frac{d\sigma_{lab,S}^{g-Comp}}{d\Omega} \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \frac{G_N^2 m^2}{c^4} \left[\text{ctn}^4 \frac{\theta}{2} \cos^4 \frac{\theta}{2} + \sin^4 \frac{\theta}{2} \right]$$

L'expression ressemble fortement à celle de la diffusion Compton

Diffusion Compton Gravitationnelle



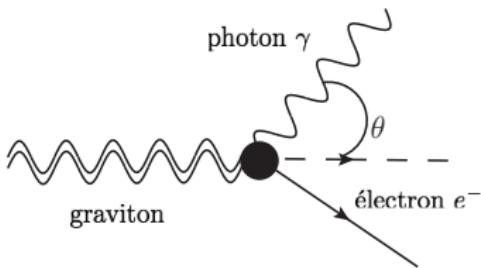
Le comportement à petit angle donne le comportement de la diffusion de Rutherford typique d'un potentiel en $\frac{1}{r}$



$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d\sigma_{lab,S}^{g-Comp}}{d\Omega} = \frac{16 G_N^2 m^2}{c^4 \theta^4}.$$

L'interaction est dominée par l'échange du graviton

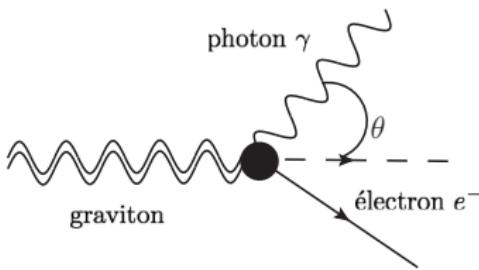
Photon produit par la gravitation



La théorie prédit la production de photon induite par la gravitation



Photon produit par la gravitation

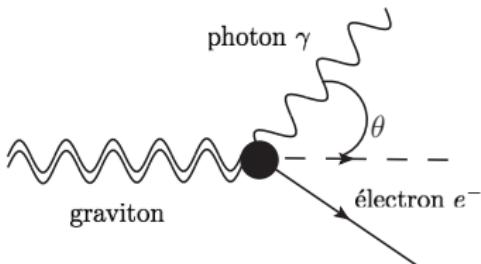


À basse énergie la section efficace est donnée par

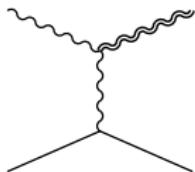
$$\frac{d\sigma_{lab,S}^{\text{photo}}}{d\Omega} \xrightarrow{\omega \rightarrow 0} \frac{G_N e^2}{8\pi} \text{ctn}^2 \frac{\theta}{2} \left[\cos^4 \frac{\theta}{2} + \sin^4 \frac{\theta}{2} \right]$$

L'expression est similaire à celle pour diffusion Compton à un facteur multiplicatif près. C'est une conséquence de la double copie.

Photon produit par la gravitation



Aux petits angles de diffusion

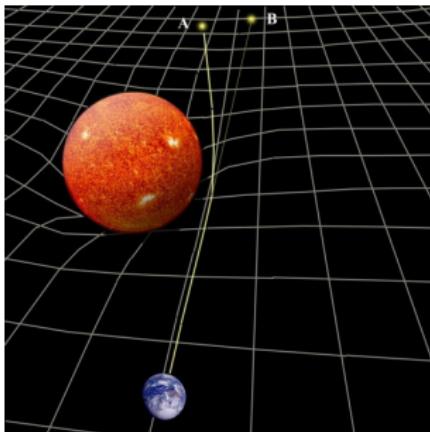


$$\lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{d\sigma_{lab,S}^{\text{photo}}}{d\Omega} = \frac{4G_N e^2}{8\pi\theta^2},$$

On pourrait détecter le photon émis par le graviton après interaction avec la cible

Déviation de la lumière

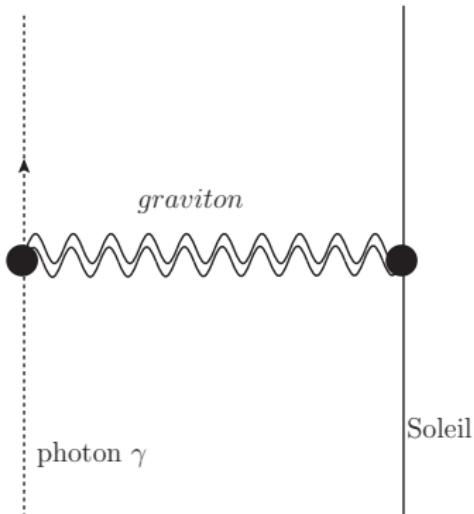
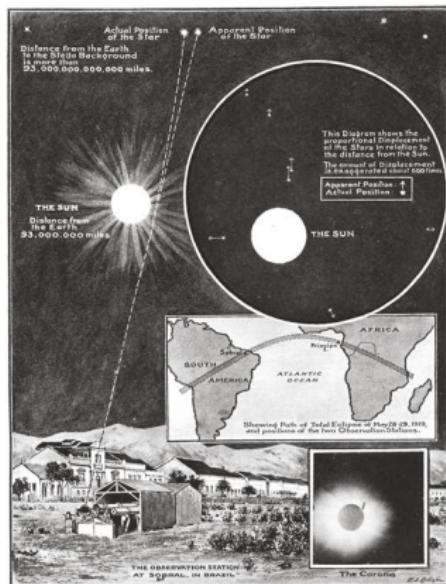
La déviation de la lumière fût un test crucial de la relativité d'Einstein



Quelles sont les effets de gravité quantique ?

Déviation de la lumière

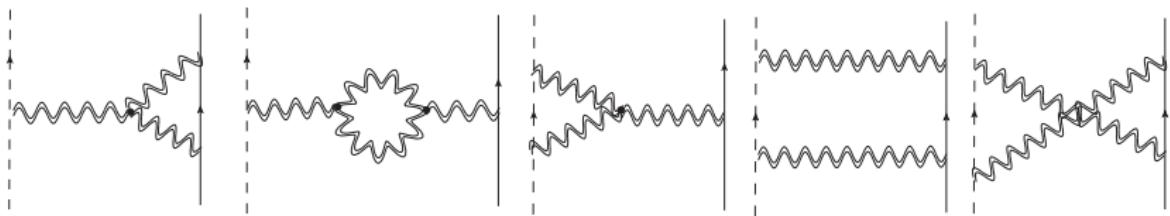
L'échange d'un graviton donne l'ordre classique dominant calculé par Einstein en 1915



$$\theta_S \simeq \frac{4G_N M}{c^2 b}$$

Déviation de la lumière

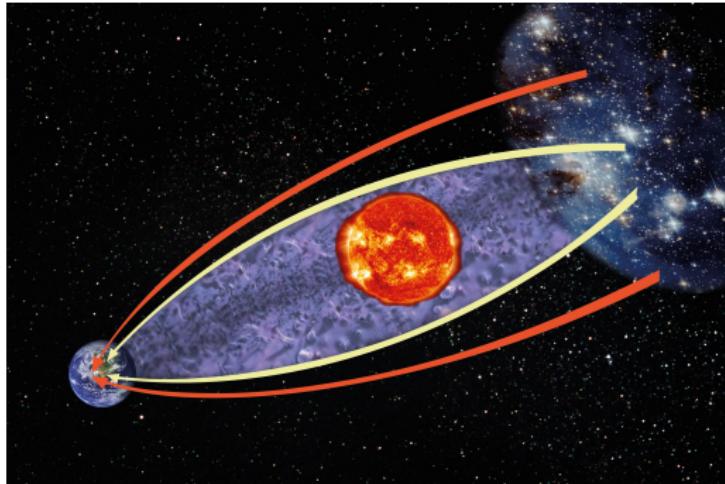
Les échanges à plusieurs gravitons donnent



$$\theta_S \approx \frac{4G_N M}{c^2 b} + \frac{15\pi}{4} \left(\frac{G_N M}{c^2 b} \right)^2 + \frac{8bu^S + 9 + 48 \log \frac{b}{2r_o}}{\pi} \frac{G_N^2 \hbar M}{c^5 b^3}$$

- ▶ les contributions classiques donnent celles de la relativité générale en puissances de r_S/r
- ▶ des corrections quantiques sont *nouvelles*

Déviation de la lumière

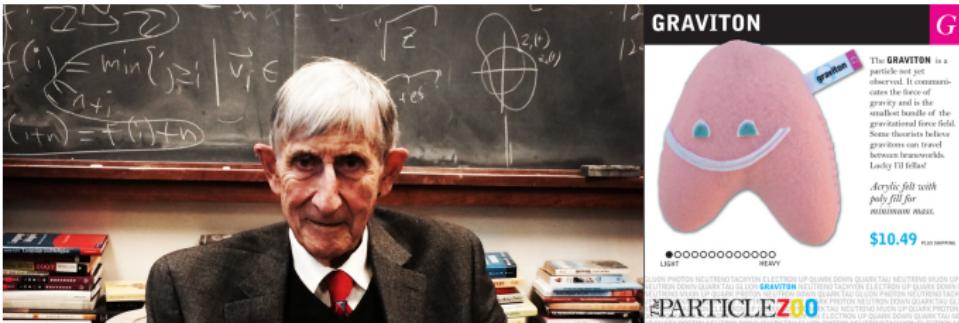


La contribution quantique dépend du spin

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

Effet numériquement très faible mais peut fournir un ouverture vers des signatures de gravité quantique

Peut-on détecter un graviton ?



Freeman Dyson a mis en doute la possibilité de détecter un graviton (Poincaré Prize lecture, 2012)

Nous avons expliqué que l'on peut calculer et espérer détecter des effets de gravitation quantique

Quelle expérience mettra en évidence le quantum du champs de gravitation ?