Voir et entendre la gravitation

Pierre Vanhove

IPhT Saclay

Lycée Diderot
Langres
2 février 2017

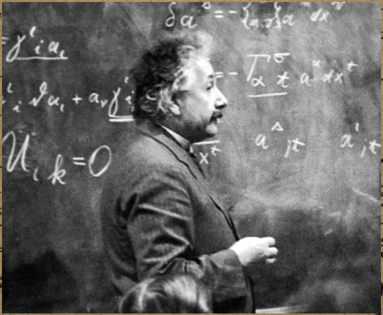
Première partie I

La Théorie de la Relativité Générale

Ça a été la plus heureuse idée de ma vie

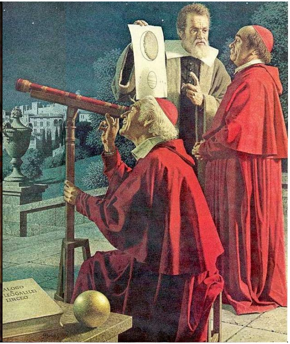
Albert Einstein

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



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

Loi de la chute des corps : Galilée



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

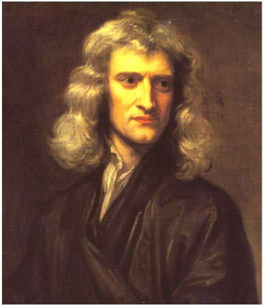
Loi de la chute des corps : Galilée

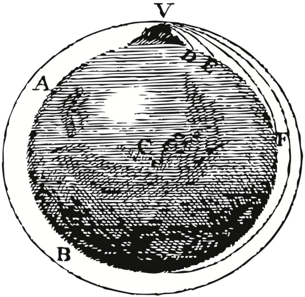
Tous les corps tombent de la même façon

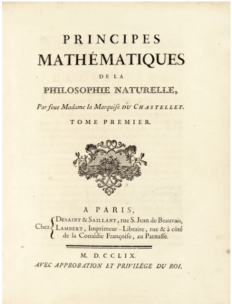
Play/Pause

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

Loi de la gravitation universelle : Newton






PRINCIPES
MATHÉMATIQUES
DE LA
PHILOSOPHIE NATURELLE,
Par feue Madame la Marquise DU CHASTELLET.
TOME PREMIER.

A PARIS,
Chez DESAINT & SAILLANT, rue S. Jean de Beauvais, LAMBERT, Imprimeur-Libraire, rue & à côté de la Comédie Françoise, au Parnasse.

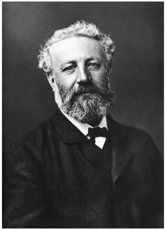
M. D.CCLIX.
AVEC APPROBATION ET PRIVILÉGE DU ROI.

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

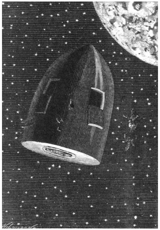
Théorème XXXI Livre 1er ≪ Principia ≫ traduction Marquise du Châtelet

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

La gravitation chez Jules Verne



Dans « Autour de la Lune » (1870) Jules Verne décrit l'influence de l'attraction terrestre et lunaire sur le projectile Colombiad



On sait que l'attraction, autrement dit la pesanteur, est proportionnelle aux masses et en raison inverse du carré des distances. De là cette conséquence : si la Terre eût été seule dans l'espace, si les autres corps célestes, se fussent subitement annihilés, le projectile d'après la loi de Newton, aurait d'autant moins pesé qu'il se serait éloigné de la Terre, mais sans jamais perdre entièrement son poids, car l'attraction terrestre se fût toujours fait sentir à n'importe quelle distance.

La gravitation chez Jules Verne

A mesure qu'il s'éloignait de la Terre, l'attraction terrestre diminuait en raison inverse du carré des distances, mais aussi l'attraction lunaire augmentait dans la même proportion.

La gravitation chez Jules Verne

Il devait donc arriver un point où, ces deux attractions se neutralisant, le boulet ne pèserait plus. Si les masses de la Lune et de la Terre eussent été égales, ce point se fût rencontré à une égale distance des deux astres.

La gravitation chez Jules Verne

Mais, en tenant compte de la différence des masses, il était facile de calculer que ce point serait situé aux quarante sept cinquante deuxièmes du voyage, soit en chiffres,à soixante dix huit mille cent quatorze lieues de la Terre.

$$d_{\text{Colombiad}} = \frac{D(\earth - \leftmoon)}{1 + \sqrt{\frac{M_{\leftmoon}}{M_{\earth}}}} = \frac{47}{52} \times D(\earth - \leftmoon)$$

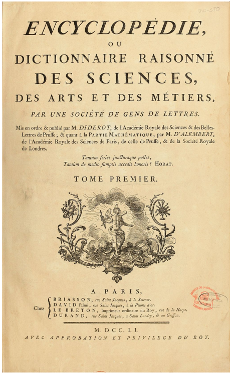
La gravitation universelle ... mais mystérieuse

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)

L'Encyclopédie de Diderot et d'Alembert


ENCYCLOPÉDIE,
OU
DICTIONNAIRE RAISONNÉ
DES SCIENCES,
DES ARTS ET DES MÉTIERS,
PAR UNE SOCIÉTÉ DE GENS DE LETTRES.

Mis en ordre & publié par M. DIDEROT, de l'Académie Royale des Sciences & des Belles-Lettres de Prusse ; & quant à la PARTIE MATHÉMATIQUE, par M. D'ALEMBERT, de l'Académie Royale des Sciences de Paris, de celle de Prusse, & de la Société Royale de Londres.

Tantùm series juncturaque pollet,
Tantùm de medio sumptis accedit honoris ! HORAT.

TOME PREMIER.

A PARIS,
Chez
BRIASSON, *rue Saint Jacques, à la Science.*
DAVID l'aîné, *rue Saint Jacques, à la Plume d'or.*
LE BRETON, Imprimeur ordinaire du Roy, *rue de la Harpe.*
DURAND, *rue Saint Jacques, à Saint Landry, & au Griffon.*

M. DCC. LI.
AVEC APPROBATION ET PRIVILEGE DU ROY.

Article « Attraction »

Il est facile de juger après cela combien sont injustes ceux des philosophes modernes qui se déclarent hautement contre le principe de l'attraction, sans en apporter d'autre raison, sinon qu'ils ne conçoivent pas comment un corps peut agir sur un autre qui est éloigné. (...)

Mais quand la cause est inconnue, nous pouvons considérer simplement l'effet, sans avoir égard à la cause ; (...)

Masse grave et masse inerte

La plume et le marteau touchent le sol au même instant car l'action de la force de gravitation est *indépendante* de leur *masse*

La *masse inerte* s'oppose au changement de vitesse

$$m_{\text{inerte}}\,\vec{a} = \vec{F}; \qquad m_{\text{inerte}}\,\frac{\vec{v}^2}{2} = E_{\text{cinétique}}$$

Masse grave et masse inerte

La plume et le marteau touchent le sol au même instant car l'action de la force de gravitation est *indépendante* de leur *masse*

La *masse inerte* s'oppose au changement de vitesse

$$m_{\text{inerte}}\,\vec{a} = \vec{F}; \qquad m_{\text{inerte}}\,\frac{\vec{v}^2}{2} = E_{\text{cinétique}}$$

La gravitation agit sur la *masse grave*

$$\vec{F}_{\text{gravitation}} = m_{\text{grave}}\,\vec{g}; \qquad E_{\text{potentielle}} = m_{\text{grave}}\,g\,h$$

Masse grave et masse inerte

La plume et le marteau touchent le sol au même instant car l'action de la force de gravitation est *indépendante* de leur *masse*

La *masse inerte* s'oppose au changement de vitesse

$$m_{\text{inerte}}\,\vec{a} = \vec{F}; \qquad m_{\text{inerte}}\,\frac{\vec{v}^2}{2} = E_{\text{cinétique}}$$

La gravitation agit sur la *masse grave*

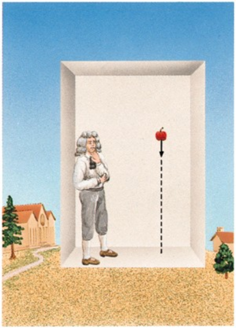
$$\vec{F}_{\text{gravitation}} = m_{\text{grave}}\,\vec{g}; \qquad E_{\text{potentielle}} = m_{\text{grave}}\,g\,h$$

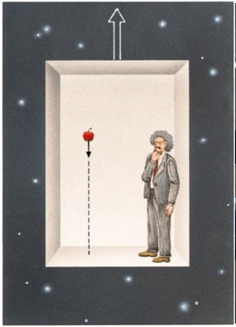
$\vec{g}_{♁/☾}$ est l'accélération gravitationnelle sur Terre ou la lune

$$\vec{a} = \frac{m_{\text{grave}}}{m_{\text{inerte}}}\,\vec{g}_{♁/☾}\,; \qquad \frac{\vec{v}^2}{2} = \frac{m_{\text{grave}}}{m_{\text{inerte}}}\,g_{♁/☾}\,h + \text{Constante}$$

Si $m_{\text{inerte}} = m_{\text{grave}}$ les équations sont identiques pour la plume et le marteau

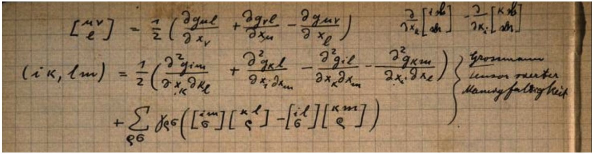
Le Principe d'équivalence : l'idée merveilleuse d'Einstein





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

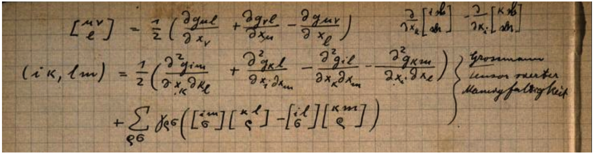


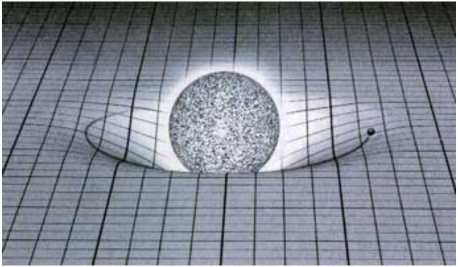
Le 25 novembre 1915, Einstein formule la relativité générale, pour cela il doit maîtriser les géométries non-Euclidiennes et le formalisme tensoriel associé

Il devance le grand mathématicien David Hilbert qui déclare

N'importe quel gamin des rues de Göttingen comprend mieux la géométrie à quatre dimensions qu'Einstein, mais c'est lui qui a fait la révolution conceptuelle de la physique.

La gravitation comme courbure de l′espace-temps



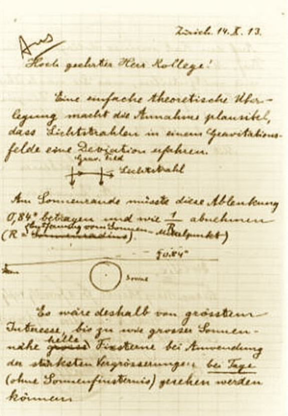


L′espace tout entier est la scène du champ gravitationnel :

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

Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil



Zürich 14. X. 13.

Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.

Grav. Feld

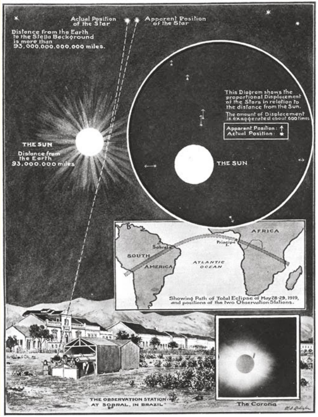
Lichtstrahl

Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung 0,84" betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = Abstand vom Sonnen-Mittelpunkt).

0,84"

Sonne

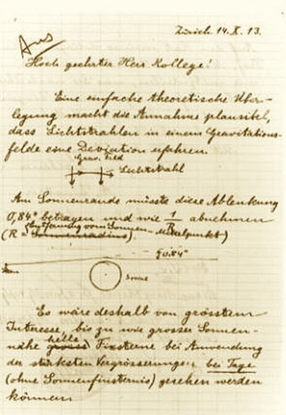
Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnennähe ~~grosse~~ helle Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.



Confirmé par Eddington et Dyson avec l'éclipse de 1919

Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil


Ans

Zürich 14. X. 13.

Hoch geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht die Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation erfahren.

Grav. feld

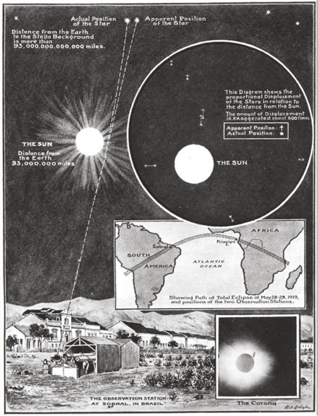
Lichtstrahl

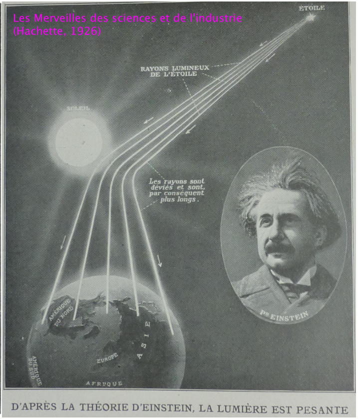
Am Sonnenrande müsste diese Ablenkung 0,84" betragen und wie $\frac{1}{R}$ abnehmen (R = ~~Sonnenradius~~ Abstand vom Sonnenmittelpunkt)

0,84"

Sonne

Es wäre deshalb von grösstem Interesse, bis zu wie grosser Sonnennähe ~~grosse~~ helle Fixsterne bei Anwendung der stärksten Vergrösserungen bei Tage (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.

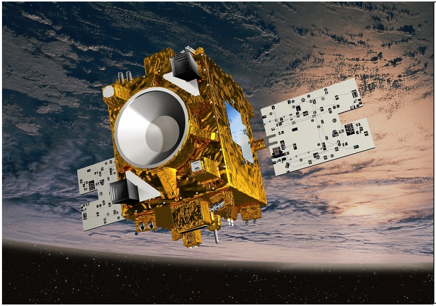


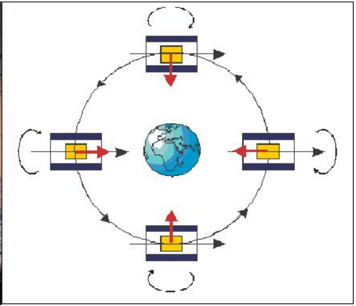


D'APRÈS LA THÉORIE D'EINSTEIN, LA LUMIÈRE EST PESANTE

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

Tests expérimentaux du principe d′équivalence





Le principe d′équivalence, c′est-à-dire l′égalité en masse grave et masse inerte, est testé expérimentalement à la précision

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

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}

Deuxième partie II

La Gravitation aujourd'hui

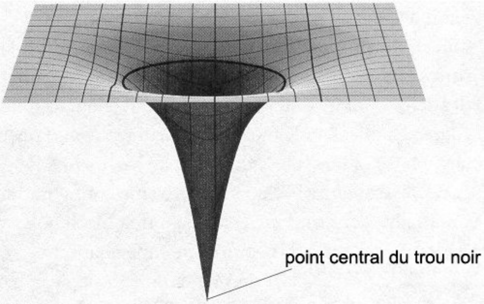
Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténébreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.

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

Trous noirs

En 1916 Karl Schwarzschild calcule la déformation de l'espace-temps obtenue en concentrant une masse M dans une région de rayon

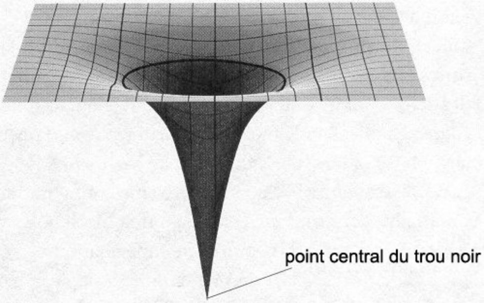
$$R_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$



Toute la masse du Soleil $M_\odot \simeq 2 \times 10^{30}\,\mathrm{kg}$ dans une boule de $R_\odot \simeq 3\,\mathrm{km}$, pour la Terre le rayon est $R_{\oplus} \simeq 8.9 mm$.

Trous noirs et Albert Einstein

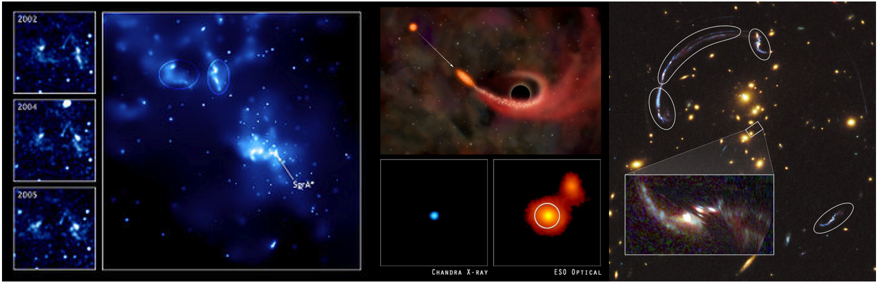
En 1939 Einstein explique que les trous noirs sont *incompatible* avec la réalité *physique* de sa théorie de la gravitation



Il faudra attendre les années 1950 pour que les trous noirs soient vus comme des objets astrophysiques présents dans l'Univers et observables

Voir les trous noirs

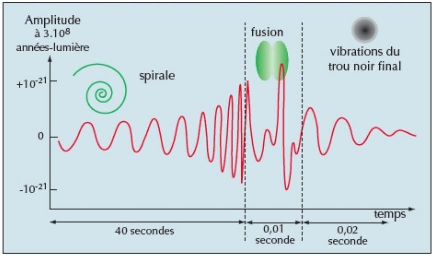
Trou noir au centre de notre galaxie : *Sagittarius A** d'une masse 4.1 millions fois celle du Soleil

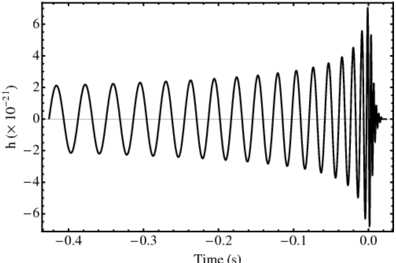


Vu en observant la matière attirée par le trou noir ou par la déformation des étoiles et effets de lentilles gravitationnelles

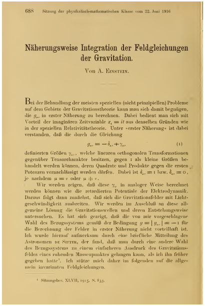
Danse des trous noirs

Play/Pause





Einstein et les ondes gravitationnelles



688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

Von A. Einstein.

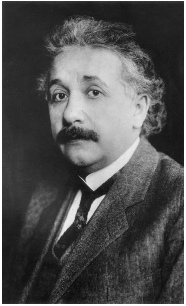
Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

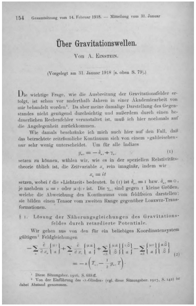
$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \tag{1}$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik. Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung $g = |g_{\mu\nu}| = -1$ für die Berechnung der Felder in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen de Sitter, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihn früher gegeben hatte[1]. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemein invarianten Feldgleichungen.

[1] Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.





154 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

Über Gravitationswellen.

Von A. Einstein.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden[1]. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \tag{1}$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die »Lichtzeit« bedeutet. In (1) ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$ ist. Die $\gamma_{\mu\nu}$ sind gegen 1 kleine Größen, welche die Abweichung des Kontinuums vom feldfreien darstellen; sie bilden einen Tensor vom zweiten Range gegenüber Lorentz-Transformationen.

§ 1. Lösung der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes durch retardierte Potentiale.

Wir gehen aus von den für ein beliebiges Koordinatensystem gültigen[2] Feldgleichungen

$$-\sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\alpha} \begin{Bmatrix} \mu\nu \\ \alpha \end{Bmatrix} + \sum_{\alpha} \frac{\partial}{\partial x_\nu} \begin{Bmatrix} \mu\alpha \\ \alpha \end{Bmatrix} + \sum_{\alpha\beta} \begin{Bmatrix} \mu\alpha \\ \beta \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \nu\beta \\ \alpha \end{Bmatrix} - \sum_{\alpha\beta} \begin{Bmatrix} \mu\nu \\ \alpha \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha\beta \\ \beta \end{Bmatrix} = -\varkappa \left(T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right). \tag{2}$$

[1] Diese Sitzungsber. 1916, S. 688 ff.

[2] Von der Einführung des »λ-Gliedes« (vgl. diese Sitzungsber. 1917, S. 142) ist dabei Abstand genommen.

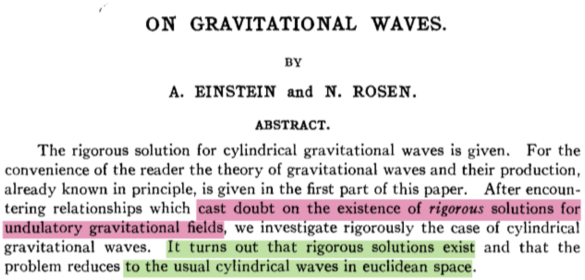
Entre 1916 et 1918 Einstein détermine l'intensité de production d'ondes gravitationnelles

$$L = \frac{G_N}{3c^5} \left(\frac{d^3}{dt^3} Q_{ab} \right)^2$$

Il trouva une luminosité rayonnée très faible

Einstein et les ondes gravitationnelles

En 1936 dans un article article intitulé « Do Gravitational Waves Exist ? » Il argumente contre la réalité physique des ondes.



ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY

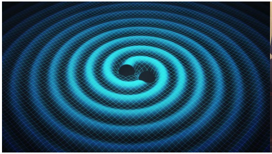
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

ABSTRACT.

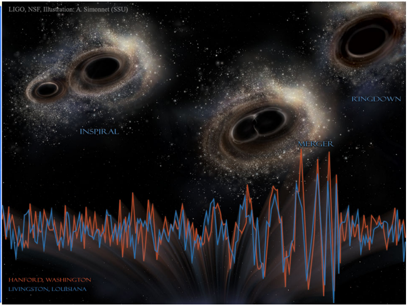
The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of *rigorous* 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 pose la question importante : Sont-elles des manifestations de l'espace-temps ou des ondes mathématiques de coordonnées ?

Détection de l'onde : GW150914




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

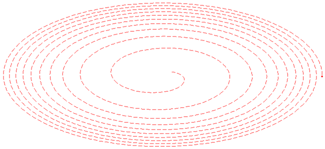



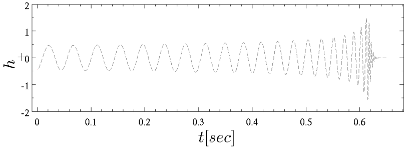
Entendre les trou noirs : GW150914

Play/Pause

Calcul théorique de la forme des ondes

Cette découverte a été possible grâce aux calculs théoriques prédisant la forme du signal à observer

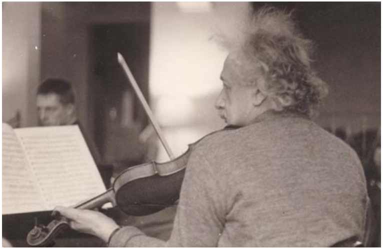




C'est une confirmation fantastique de la validité de la théorie de la relativité d'Einstein dans un régime encore non testé

Troisième partie III

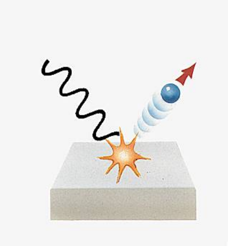
Gravitation et mécanique quantification



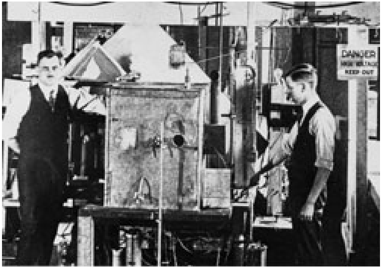
Das Lichtquant

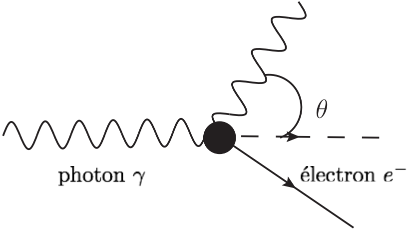
En 1905 Einstein décrit la lumière comme une onde et un corpuscule

INTERNATIONAL
YEAR OF LIGHT
2015



Diffusion Compton

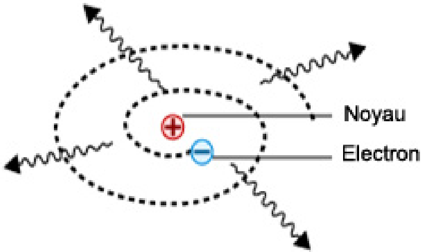




$$\lambda' - \lambda = \frac{\hbar}{mc}(1 - \cos\theta)$$

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

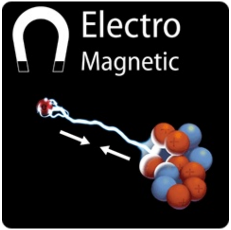
Nécessité de quantifier la gravitation

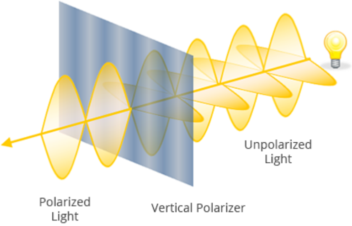


En 1916 Einstein écrit

> 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.

Quantum de lumière : Le photon

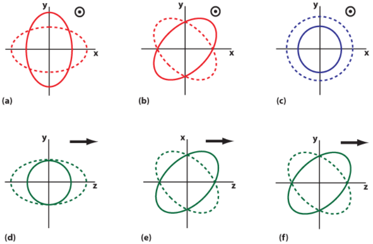




Le photon est la particule des ondes électromagnétiques

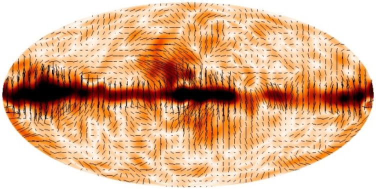
$$\gamma : \qquad \epsilon^{+}_{\mu}, \qquad \epsilon^{-}_{\mu}, \qquad \text{masse} = 0$$

Quantum d'espace-temps : Le graviton

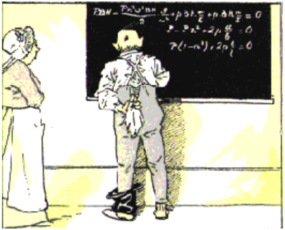


Le graviton est la particule des ondes d'espace-temps

$$h: \qquad \epsilon^{++}_{\mu\nu}, \qquad \epsilon^{--}_{\mu\nu}, \qquad \text{masse} = 0$$



Gravité classique et quantique



Deux paramètres physiques :

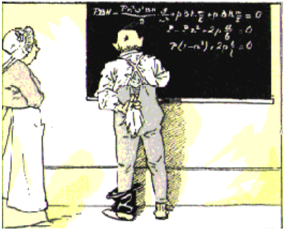
- paramètre classique : le rayon de Schwarzschild (trou noir)

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

- paramètre quantique : la longueur d'onde de Compton

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

Gravité classique et quantique

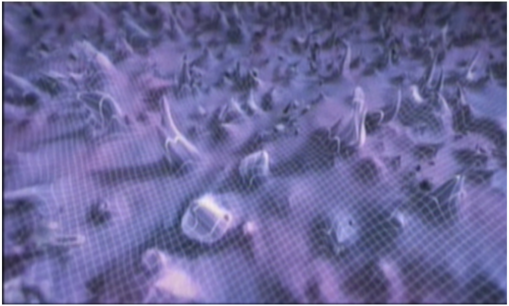


rayon de Schwarzschild $\times$ longueur de Compton

$=$ longueur de Planck

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

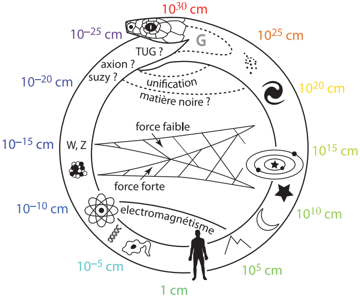
Contributions quantiques ?

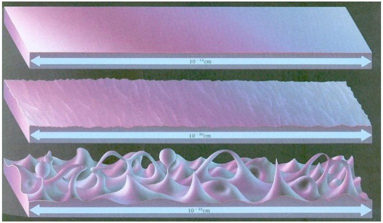


Une contribution classique d'ordre $(r_S/r)^n$ a une incertitude quantique de l'ordre de la longueur d'onde de Compton $\lambda = \dfrac{\hbar}{mc}$

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

Universalité de la gravitation





La gravitation affecte les phénomènes physiques aux échelles microscopiques et macroscopiques

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

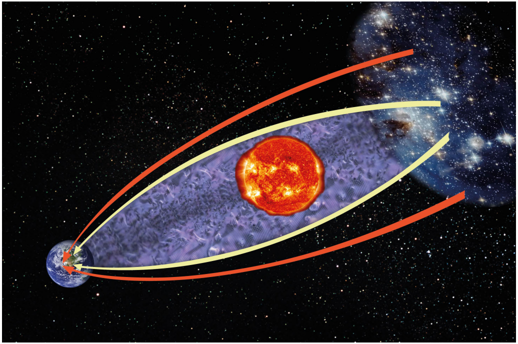

N.E.J. Bjerrum-Bohr Niels Bohr Institute (Danemark)


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



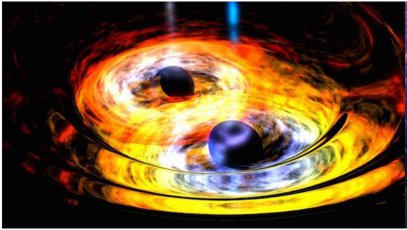
La contribution quantique dépend de la nature du la matière

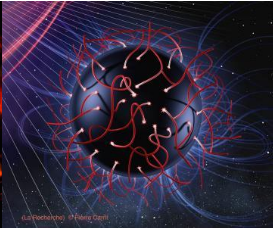
$$\theta_\gamma - \theta_\varphi = \frac{8(bu^\gamma - bu^\varphi)}{\pi} \frac{G_N^2 \hbar M}{c^5 b^3} .$$

Effet numériquement très faible mais fournit, en principe, une signature de gravité quantique

Les promesses d'une nouvelle astronomie

Avec la détection des ondes gravitationnelles on peut espérer





- Spectroscopie des trous noirs : théorème d'absence de cheveux
- Théorie de gravitation modifiée au-delà de la théorie d'Einstein
- Objets compacts exotiques
- Matière exotique et inattendue ...