

# Voir et entendre la gravitation

Pierre Vanhove

Club d'Astronomie de l'Université du Maine  
Le Mans

13 mars 2018

## 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 :  
la relativité générale

$$T_{\mu\nu} = \left( \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} - \sum_i \left\{ \begin{smallmatrix} i & \nu \\ \mu & \beta \end{smallmatrix} \right\} T_{i\beta} \right) - \sum_{\alpha, \beta} \left( \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} - \left\{ \begin{smallmatrix} \mu & \nu \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix} \right\} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha} \right)$$

Tensor 2. Rang

Wartere die  $\delta g_{\mu\nu}$

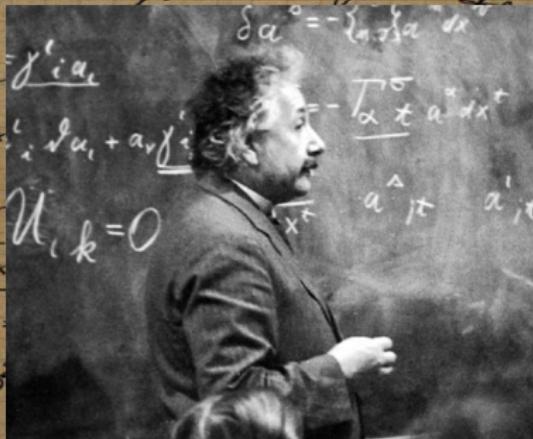
$$\frac{\partial \left\{ \begin{smallmatrix} \mu & \nu \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix} \right\}}{\partial x^\alpha} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x^\alpha} \left( g_{\mu\nu} \left( \delta u^\mu_i + a^\mu_i \delta x^\mu \right) \right) = - \frac{1}{2} a^\mu_i \delta x^\mu$$

Wir setzen voran  
 $- \sum_i g_{\mu\nu} \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} = 0$

Ferner  $\left\{ \begin{smallmatrix} \mu & \nu \\ \alpha & \beta \end{smallmatrix} \right\} \left\{ \begin{smallmatrix} \alpha & \beta \\ \gamma & \delta \end{smallmatrix} \right\} =$   
 $= - \delta_{\mu\alpha} \delta_{\nu\beta} \left( \frac{\partial}{\partial x^\gamma} \right)_{\mu\alpha}^{*\gamma\delta}$   
 $\stackrel{\alpha}{\alpha} \stackrel{\nu}{\beta} \stackrel{\mu}{\delta} \stackrel{\beta}{\gamma}$

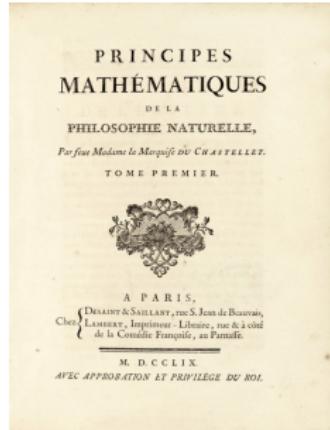
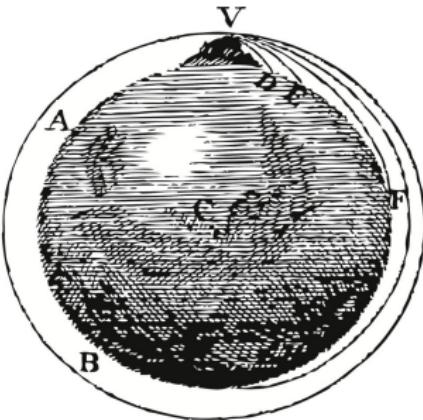
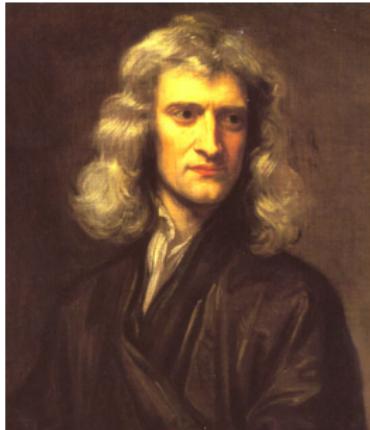
Hieraus

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



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

# La gravité est une force

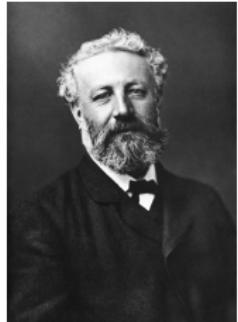


La même loi d'attraction étant posée, un corpuscule, placé en dehors de la surface sphérique, est attiré par cette surface en raison renversée du carré de la distance de ce corpuscule au centre

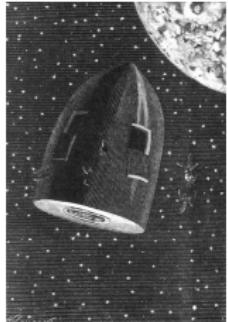
*Principia* livre 1 théorème XXXI traduction de la Marquise du Châtelet

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

# La 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

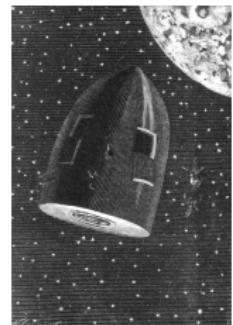


*On sait que l'attraction, autrement dit la pesanteur, est proportionnelle aux masses et en raison inverse du carré des distances. De là cette conséquence : si la Terre eût été seule dans l'espace, si les autres corps célestes, se fussent subitement annihilés, le projectile d'après la loi de Newton, 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.*

# L'attraction gravitationnelle vue par Jules Verne

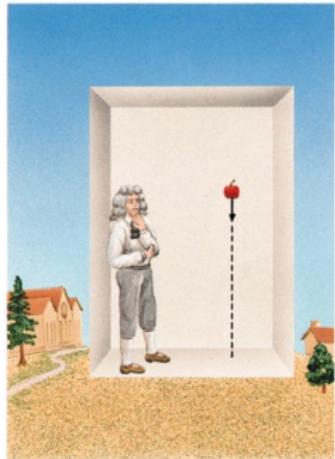


A mesure qu'il s'éloignait de la Terre, l'attraction terrestre diminuait en raison inverse du carré des distances, mais aussi l'attraction lunaire augmentait dans la même proportion. Il devait donc arriver un point où, ces deux attractions se neutralisant, le boulet ne pèserait plus. Si les masses de la Lune et de la Terre eussent été égales, ce point se fût rencontré à une égale distance des deux astres. Mais, en tenant compte de la différence des masses, il était facile de calculer que ce point serait situé aux quarante sept cinqante deuxièmes du voyage, soit en chiffres, à soixante dix huit mille cent quatorze lieues de la Terre.



$$\frac{D(\odot - \mathbb{C})}{1 + \sqrt{\frac{M\mathbb{C}}{M\odot}}} = \frac{47}{52} \times D(\odot - \mathbb{C})$$

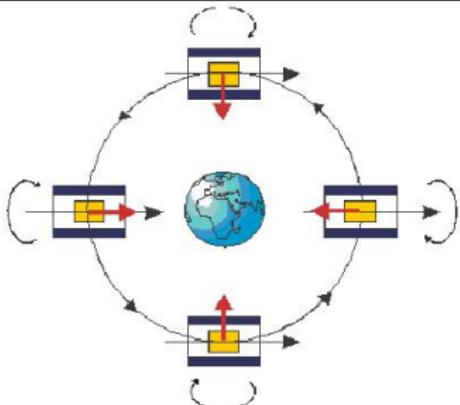
## Le Principe d'équivalence : l'idée merveilleuse d'Einstein



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)

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 orbite le 25 avril 2016 un satellite pour tester ce principe à une précision de  $10^{-15}$



## MICROSCOPE Mission: First Results of a Space Test of the Equivalence Principle

According to the weak equivalence principle, all bodies should fall at the same rate in a gravitational field. The *MICROSCOPE* satellite, launched in April 2016, aims to test its validity at the  $10^{-15}$  precision level, by measuring the force required to maintain two test masses (of titanium and platinum alloys) exactly in the same orbit. A nonvanishing result would correspond to a violation of the equivalence principle, or to the discovery of a new long-range force. Analysis of the first data gives  $\delta(\text{Ti}, \text{Pt}) = [-1 \pm 9(\text{stat}) \pm 9(\text{syst})] \times 10^{-15}$  ( $1\sigma$  statistical uncertainty) for the titanium-platinum Eötvös parameter characterizing the relative difference in their free-fall accelerations.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.119.231101](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.231101)

*Introduction.*—Gravity seems to enjoy a remarkable universality property: bodies of different compositions fall at the same rate in an external gravitational field [1–3]. Einstein interpreted this as an equivalence between gravitation and inertia [4], and used this (weak) equivalence principle (WEP) as the starting point for the theory of general relativity [5]. In terms of the Eötvös parameter  $\delta(A, B) = 2(a_A - a_B)/(a_A + a_B)$  ( $a_A$  and  $a_B$  being the free-fall accelerations of the two bodies  $A$  and  $B$ ), the best laboratory ( $1\sigma$ ) upper limits on  $\delta(A, B)$  are  $\delta(\text{Be}, \text{Ti}) = (0.3 \pm 1.8) \times 10^{-13}$  and  $\delta(\text{Be}, \text{Al}) = (-0.7 \pm 1.3) \times 10^{-13}$  [2], with similar limits on the differential acceleration between Earth and the Moon toward the Sun [3].

General relativity (GR) has passed all historical and current experimental tests [6], including, most recently, the direct observation of the gravitational waves emitted by two coalescing black holes [7]. However, it does not provide a consistent quantum gravity landscape and leaves many questions unanswered, in particular about dark energy and

the unification of all fundamental interactions. Possible avenues to close those problems may involve very weakly coupled new particles, such as the string-theory spin-0 dilaton [8,9], a chameleon [10], or a spin-1 boson  $U$  from an extended gauge group [11,12], generally leading to an apparent WEP violation.

The *MICROSCOPE* space mission implements a new approach to test the WEP by taking advantage of the very quiet space environment. Nongravitational forces acting on the satellite are counteracted by cold gas thrusters making it possible to compare the accelerations of two test masses of different compositions “freely falling” in the same orbit around Earth for a long period of time [13,14]. This is done by accurately measuring the force required to keep the two test masses in relative equilibrium. Present data allow us to improve the  $1\sigma$  upper limit on the validity of the WEP by an order of magnitude.

*The MICROSCOPE space mission.*—*MICROSCOPE* aims to test the equivalence principle with an unprecedented

# La gravitation comme courbure de l'espace-temps

$$\begin{aligned} [{}^{\mu\nu}_{\epsilon}] &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial g_{\mu\epsilon}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial g_{\nu\epsilon}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\epsilon} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\epsilon} \left[ {}^{(\mu)}_{\epsilon} \right] - \frac{1}{2} \left[ {}^{\kappa\lambda}_{\epsilon} \right] \\ (i\kappa, \ell m) &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 g_{im}}{\partial x_\kappa \partial x_\ell} + \frac{\partial^2 g_{\ell m}}{\partial x_i \partial x_m} - \frac{\partial^2 g_{i\ell}}{\partial x_\kappa \partial x_m} - \frac{\partial^2 g_{km}}{\partial x_i \partial x_\ell} \right) \\ &\quad + \sum_{\eta\sigma} f_{\eta\sigma} \left( \left[ {}^{\epsilon\mu}_{\eta} \right] \left[ {}^{\kappa\ell}_{\sigma} \right] - \left[ {}^{\epsilon\ell}_{\eta} \right] \left[ {}^{\kappa\mu}_{\sigma} \right] \right) \end{aligned}$$

*Grossmann  
unser weiter  
Hilfsfertigkeit*

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

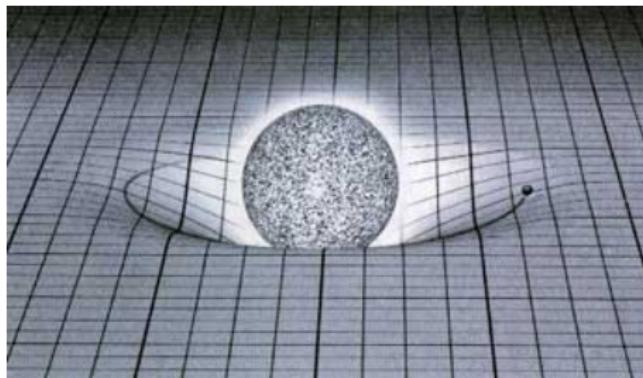
Il devance le grand mathématicien David Hilbert qui déclare



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

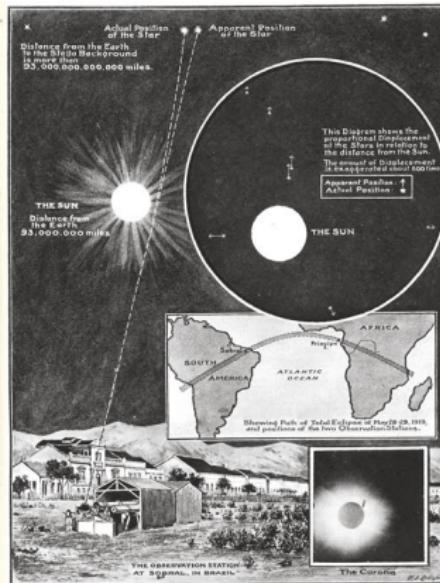
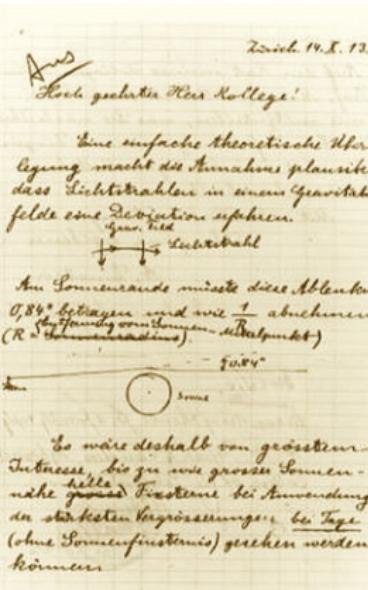
$$\begin{aligned} [{}^{\mu\nu}_{\ell}] &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial g_{\mu\ell}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial g_{\nu\ell}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\ell} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left[ {}^{\mu\nu}_{\text{Ric}} \right] - \frac{1}{2} \left[ {}^{\mu\nu}_{\text{Ric}} \right] \\ ({}^{\mu\nu}_{\text{Ric}}) &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 g_{\mu\mu}}{\partial x_\nu \partial x_\ell} + \frac{\partial^2 g_{\nu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\ell} - \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x_\mu \partial x_\ell} - \frac{\partial^2 g_{\nu\mu}}{\partial x_\nu \partial x_\ell} \right) \quad \left. \begin{array}{l} \text{grossmann} \\ \text{levi civita} \\ \text{minkowski metric} \end{array} \right\} \\ &\quad + \sum_{\kappa\ell} g_{\kappa\ell} \left( [{}^{\mu\kappa}_{\text{Ric}}][{}^{\kappa\nu}_{\text{Ric}}] - [{}^{\mu\ell}_{\text{Ric}}][{}^{\kappa\ell}_{\text{Ric}}] \right) \end{aligned}$$



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 courbe

# Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil



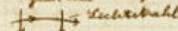
Confirmé par Eddington et Dyson avec l'éclipse de 1919

# Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil

*Ans*  
Sehr geehrter Herr Kollege!

Eine einfache theoretische Überlegung macht das Annahme plausibel, dass Lichtstrahlen in einem Gravitationsfelde eine Deviation sphärisch zeigen.



Am Sonnenrande misste diese Ablenkung  $0,84^\circ$  beißiger und wie  $\frac{1}{R}$  abnehmende  $(R = \text{Sonneabstand})$  Abweichung.

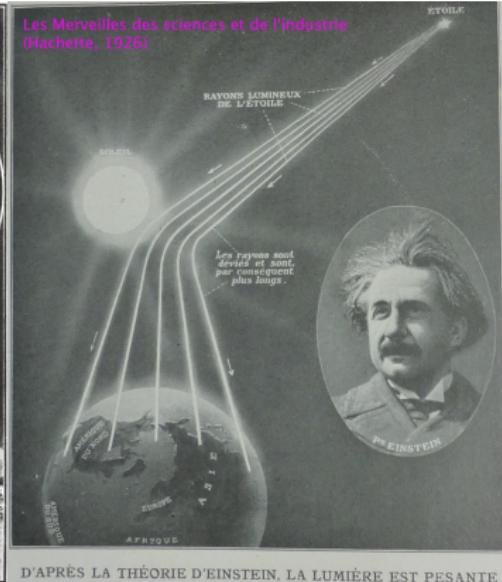
$0,84^\circ$



So wäre deshalb von großer Interesse, bis zu wie grosser Sonnen-nähe grosse Faktoren bei Anwendung der starken Vergrösserungen bei Tages (ohne Sonnenfinsternis) gesehen werden können.



Les Merveilles des sciences et de l'industrie  
(Hachette, 1926)



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

## Deuxième partie II

### La Gravitation aujourd'hui

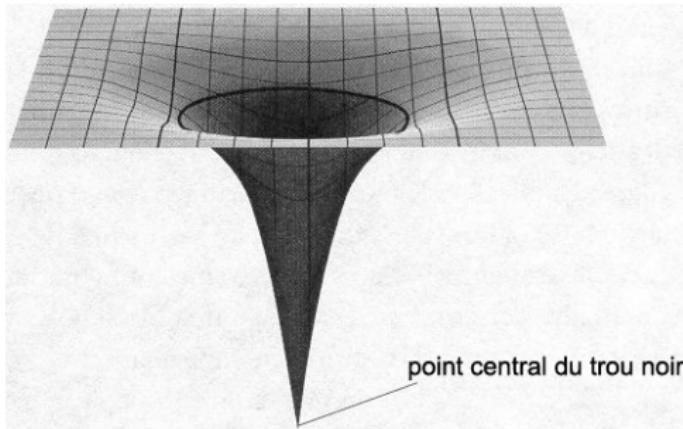
*Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténébreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.*

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

# Trous noirs

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

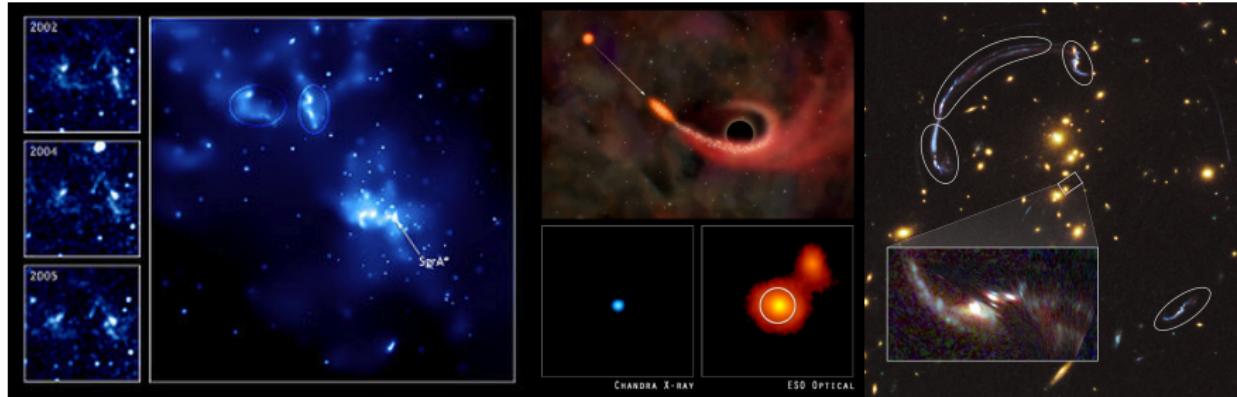
$$R_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$



Toute la masse du Soleil  $M_\odot \simeq 2 \times 10^{30} \text{ kg}$  dans une boule de  $R_\odot \simeq 3 \text{ km}$

# 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 due à l'effet de lentille gravitationnelles



# Einstein et les ondes gravitationnelles

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

Cet article rejeté par Physical Review apparaitra dans le *Journal of the Franklin Institute* sous le titre « On Gravitational Waves »

## ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY

A. EINSTEIN and N. ROSEN.

### ABSTRACT.

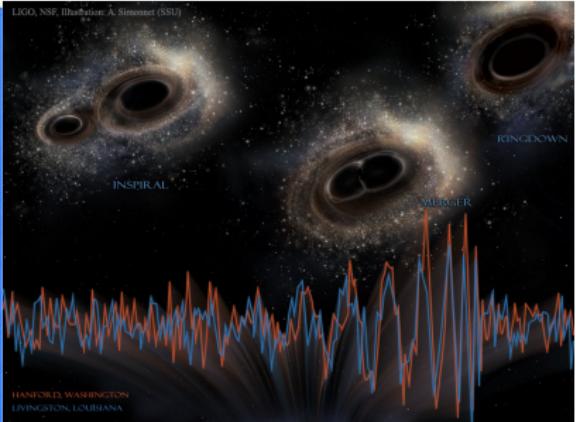
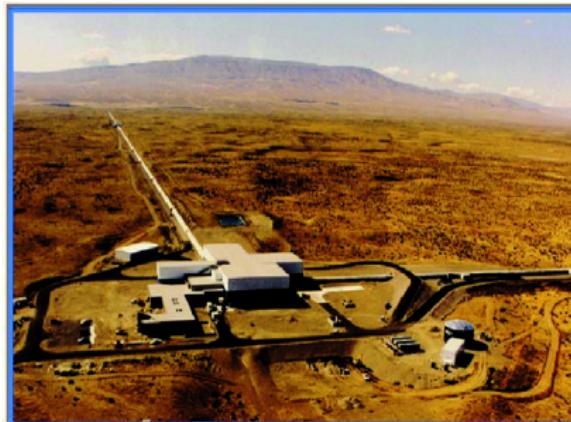
The rigorous solution for cylindrical gravitational waves is given. For the convenience of the reader the theory of gravitational waves and their production, already known in principle, is given in the first part of this paper. After encountering relationships which cast doubt on the existence of *rigorous*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

# Détection de l'onde : GW150914

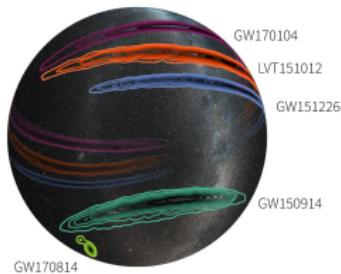
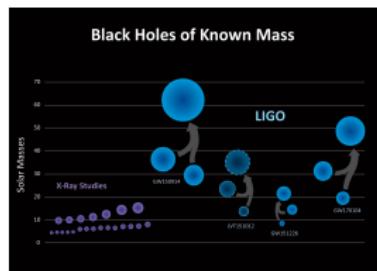
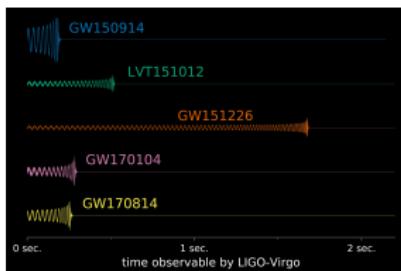


Le 14 septembre 2015 LIGO détecte des ondes gravitationnelles manifestation de la vibration de l'espace-temps



# Entendre les trous noirs : GW150914

Preuve directe de l'existence de trous noirs, et de leur dynamique jusqu'à leur fusion!



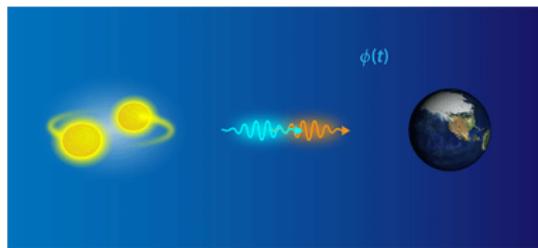
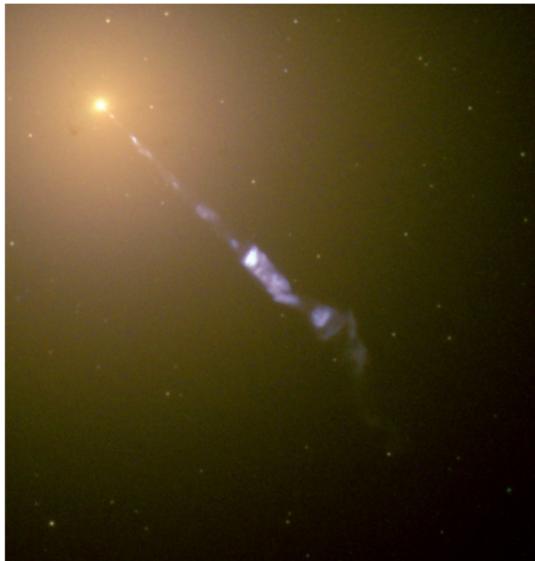
Après la mise à jour des détecteurs on devrait avoir une détection par semaine d'ondes gravitationnelles

## 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

# Ondes gravitationnelles : Une nouvelle astronomie



En corrélant la détection des ondes gravitationnelles avec les détections des rayons  $\gamma$ , X et radio on ouvre une nouvelle fenêtre observationnelle sur la nature de la gravitation dont on espère découvrir une physique qui va au delà de celle d'Einstein.

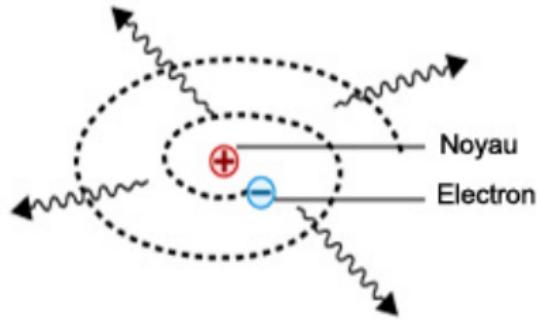
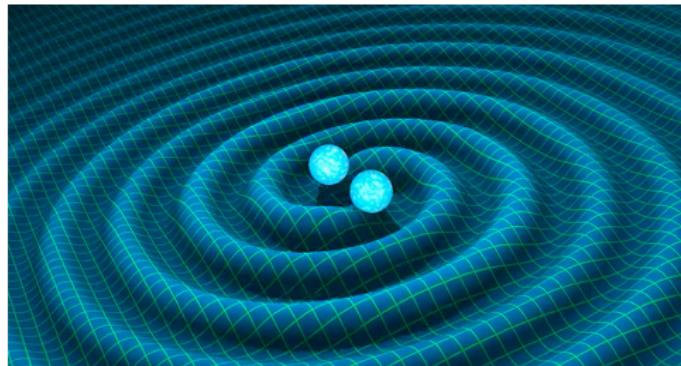
## Troisième partie III

### Quantification

*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 à propos de l'hypothèse des quanta de lumière par Einstein

# Nécessité de quantifier la gravitation

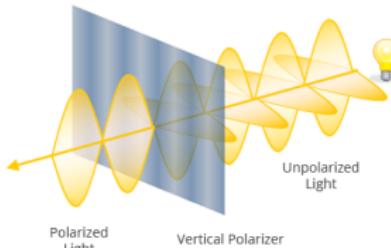
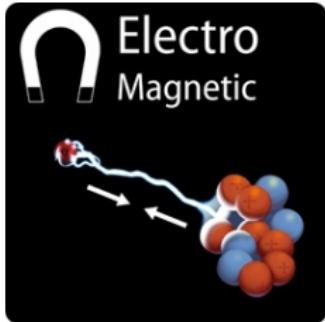


En 1916 Einstein écrit

*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

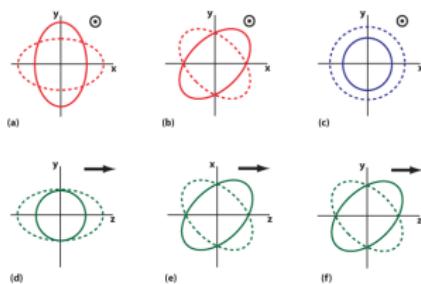


Le photon est la particule des ondes électromagnétiques

$$\gamma : \quad \epsilon_{\mu}^{+}, \quad \epsilon_{\mu}^{-}, \quad \text{masse} = 0$$

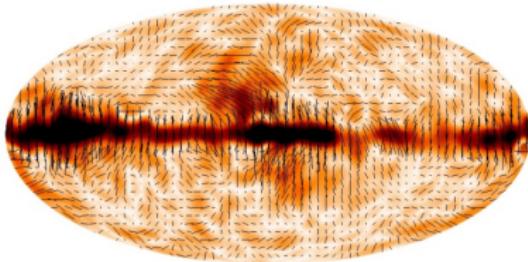


# Quantum d'espace-temps : Le graviton



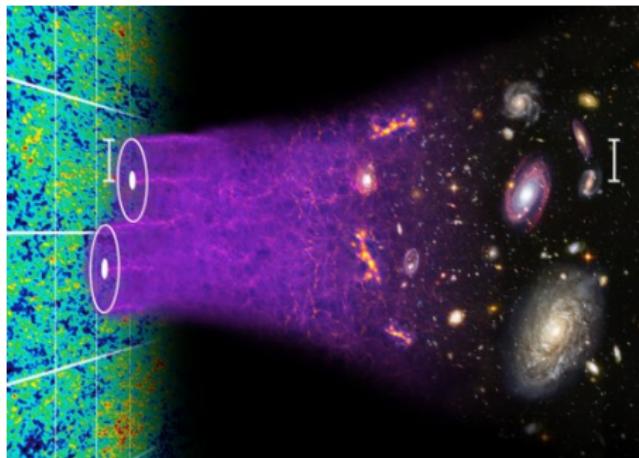
Le graviton est la particule des ondes d'espace-temps

$$h : \quad \epsilon_{\mu\nu}^{++}, \quad \epsilon_{\mu\nu}^{--}, \quad \text{masse} = 0$$



# Ondes gravitationnelles primordiales

Les ondes gravitationnelles quantiques polarisent le fond cosmique diffus et dépendent des effets *quantique de l'univers primordial*



# Ondes gravitationnelles primordiales

Malgré de nombreux espoirs encore aucune détection

**L'ÉCLAT**

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

Par Sylvestre Huet  
Journaliste à Libération

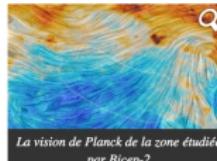
rechercher

À LIRE AUSSI

SUR LE BLOG SCIENCES

- L'essai nucléaire nord-coréen
- Novembre: la Terre au plus chaud
- Arianespace en plein boum
- 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



**LE FIGARO.fr**

Premium Actualité Economie Sport Culture Lifestyle Madame ► FigaroTV +

E FLASH ACTU 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, Cyril Vanderberghe | Publié le 18/04/2014 à 18:30

1 mois d'essai offert sans engagement

ES AUTEURS

UR LE MÊME SUJET

ÉGAL (27)

ARTAGER

f t g+ m

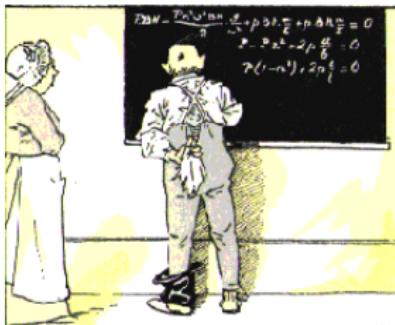
M'PRIMER

Les ondes gravitationnelles n'étaient pas sujet de l'équation. Bicep-2, installé en Antarctique, à la station Amundsen-Scott, était donc plus que prématûr. Elle est aujourd'hui réfutée et «la recherche continue», explique François Bouchet, de l'Institut d'Astrophysique de Paris.

C'est ce matin qu'affirment ce matin les deux émissaires

Expérience Planck 2015

# Gravité classique et quantique



Deux paramètres physiques :

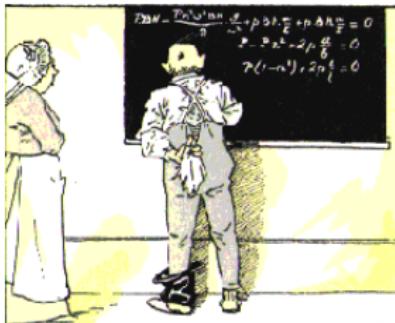
- paramètre classique : le rayon de Schwarzschild (trou noir)

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

- paramètre quantique : la longueur d'onde de Compton

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

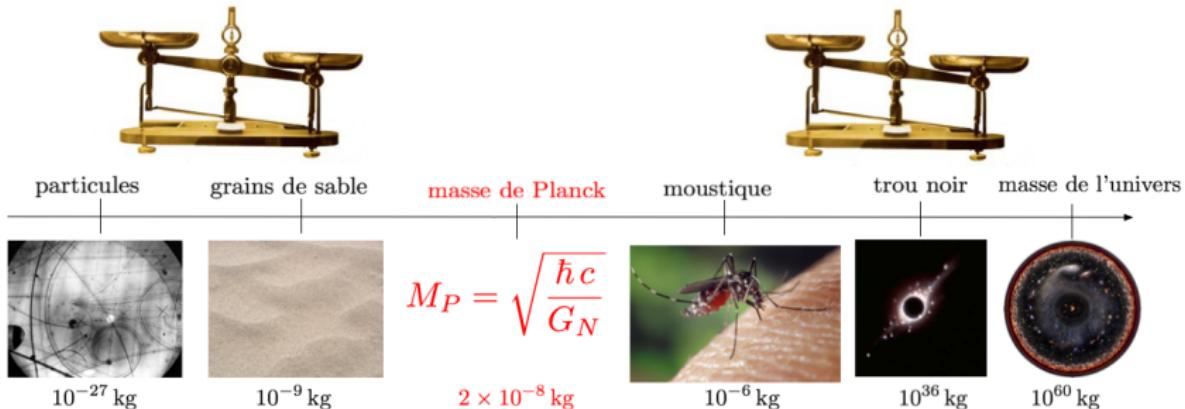
# Gravité classique et quantique



rayon de Schwarzschild  $\times$  longueur de Compton

= longueur de Planck : échelle de la gravité quantique

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



$$M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G_N}}$$

Un corps est un trou noir quantique si  $r_S = 2\lambda$

$$\frac{2G_N m}{c^2} = \frac{2\hbar}{mc} \implies m^2 = M_P^2 = \frac{\hbar c}{G_N}$$

Les particules élémentaires sont trop légères  $m \ll M$

Les objets macroscopiques sont trop lourds  $m \gg M$

# Quantifier la gravitation : un problème difficile

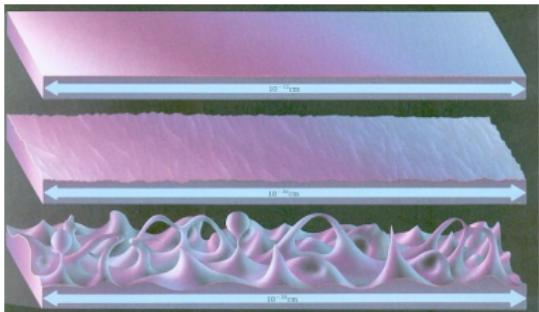
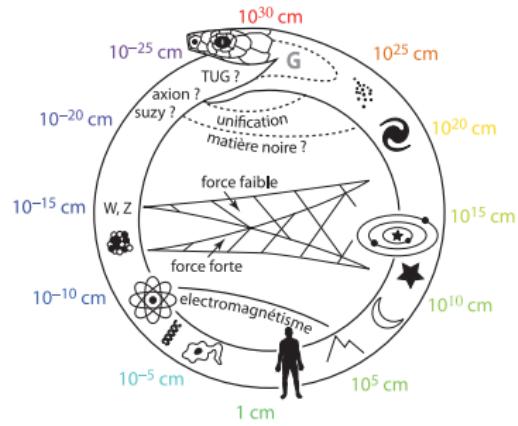


Quantifier la gravitation nécessite à modifier notre vision classique de l'espace-temps



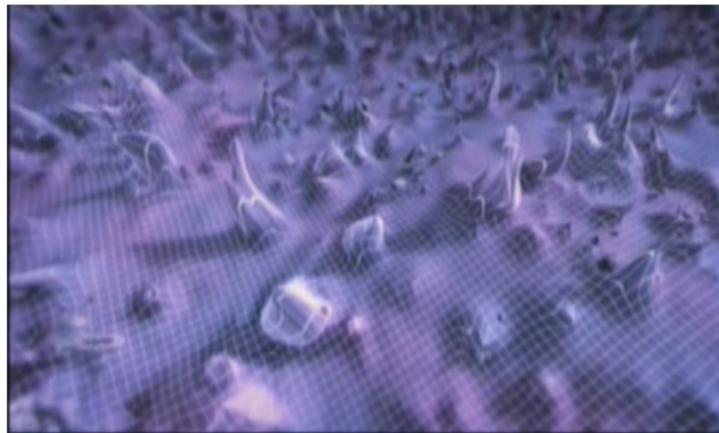
The elimination of the logical inconsistencies ... requires a radical reconstruction of the theory, ... and perhaps also the rejection of our ordinary concepts of space and time, replacing them by some much deeper and nonevident concepts. (Bronshten, 1936)

# Universalité de la gravitation



La gravitation affecte les phénomènes physiques aux échelles microscopiques et macroscopiques

# 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

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

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

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)



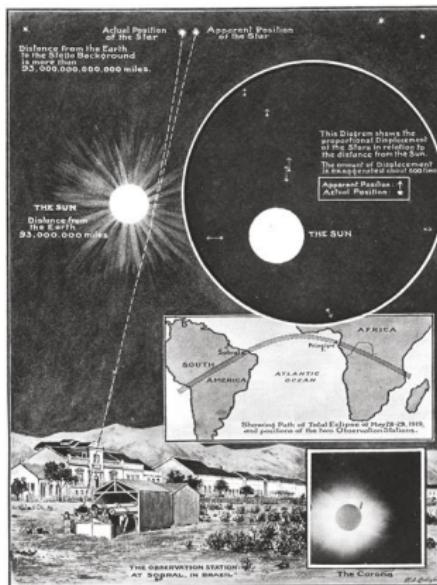
Barry Holstein Amherst University (USA)



Ludovic Planté Ministère de l'économie et des finances (France)

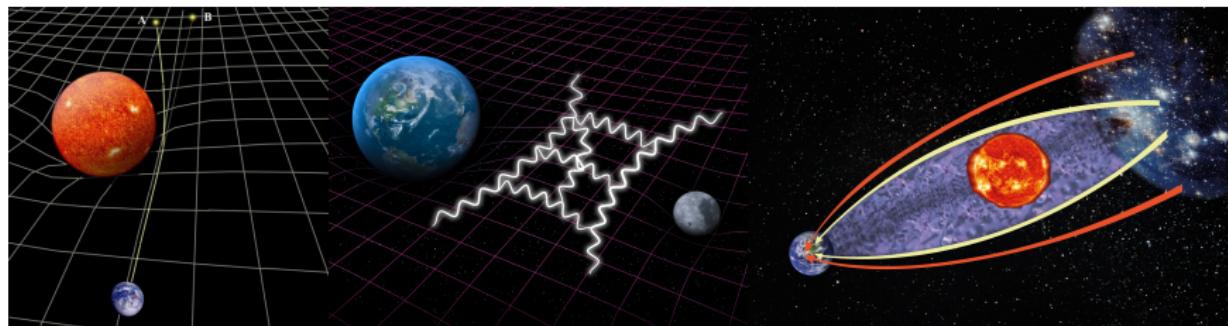
# Voir la gravité classique

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



Quelles sont les effets de gravité quantique ?

# Voir la gravité quantique : déviation de la lumière



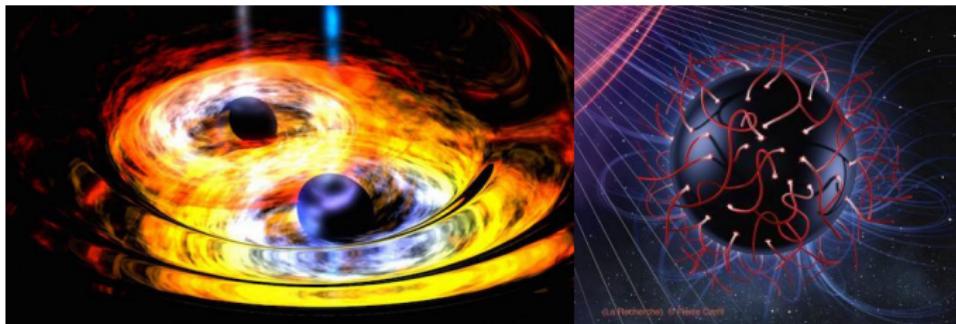
La contribution quantique dépend du spin

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

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

# Les promesses d'une nouvelle astronomie

Avec la détection des ondes gravitationnelles on peut espérer



- ▶ Physique des trous noirs : entropie, nature de l'horizon
- ▶ Théorie de gravitation modifiée au-delà de la théorie d'Einstein
- ▶ Objets compacts exotiques
- ▶ Matière exotique et inattendue ...