

# Voir et entendre la gravitation

Pierre Vanhove

Cycle « Autre Regard »

Monaco

17 mars 2016

## 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

$$T_{\mu\nu} = \left( \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} - \sum_{\lambda} \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ \lambda & \lambda \end{matrix} \right\} T_{\lambda\lambda} \right) - \sum_{\lambda k} \left( \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ \lambda & k \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \mu & k \\ \lambda & \lambda \end{matrix} \right\} \frac{\partial g_{\lambda\nu}}{\partial x^\lambda} \right)$$

Tensor 2.

Wertbare Umformung

$$\frac{\partial \left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ \lambda & \lambda \end{matrix} \right\}}{\partial x^\lambda} = \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x^\lambda} \left( g_{\mu\lambda} \frac{\partial^2 g_{\nu\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} \right)$$

Wir setzen voraus

$$-\sum_{\lambda} g_{\mu\lambda} \frac{\partial^2 g_{\nu\lambda}}{\partial x^\mu \partial x^\lambda} =$$

Ferner  $\left\{ \begin{matrix} \mu & \nu \\ \lambda & \lambda \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} \lambda & \lambda \\ \kappa & \kappa \end{matrix} \right\} = \delta_{\mu}^{\nu}$

$$= -g_{\mu\lambda} g_{\nu\lambda} \left( \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda} \right)$$

$$\begin{matrix} \alpha & \kappa & \alpha & \beta \\ \alpha & \beta & \kappa & \alpha \end{matrix}$$



stetiger Gravitations-  
Til  
tensoren

und das gleich

$$\left( \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda} \right)$$

$$\begin{aligned} & \left( \frac{\partial g_{\mu\beta}}{\partial x^\lambda} \right) \left( \frac{\partial g_{\nu\beta}}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x^\beta} + \frac{\partial g_{\lambda\beta}}{\partial x^\nu} \right) \\ & + g_{\mu\lambda} g_{\nu\lambda} \frac{\partial^2 g_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda \partial x^\nu} \\ & - \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda} \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x^\nu} \\ & - \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda} \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x^\nu} \end{aligned}$$

Hinweis

$$-T_{\mu\nu} = \sum_{\lambda} \left( g_{\mu\lambda} \frac{\partial^2 g_{\nu\lambda}}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} - g_{\mu\lambda} g_{\nu\lambda} \left( \frac{\partial g_{\alpha\beta}}{\partial x^\lambda} - \frac{\partial g_{\beta\lambda}}{\partial x^\alpha} \right) \left( \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\alpha} - \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x^\lambda} \right) \right) + \sum_{\lambda} \left( \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x^\lambda} \left[ \begin{matrix} \alpha & \beta \\ \alpha & \beta \end{matrix} \right] + \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x^\lambda} \left[ \begin{matrix} \alpha & \beta \\ \nu & \lambda \end{matrix} \right] \right) + \sum_{\lambda} \frac{1}{4} \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x^\lambda} \frac{\partial g_{\lambda\lambda}}{\partial x^\nu}$$

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

## 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

$$\begin{aligned} [{}^{\mu\nu}_{\epsilon}] &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial g_{\mu\epsilon}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial g_{\nu\epsilon}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\epsilon} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\epsilon} \left[ {}^{\mu\nu}_{\epsilon\lambda} \right] - \frac{1}{2} \left[ {}^{K\lambda}_{\epsilon\lambda} \right] \\ (i\kappa, \ell m) &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2 g_{\mu m}}{\partial x_i \partial x_\kappa} + \frac{\partial^2 g_{\kappa m}}{\partial x_i \partial x_\mu} - \frac{\partial^2 g_{\mu\kappa}}{\partial x_i \partial x_m} - \frac{\partial^2 g_{\kappa\mu}}{\partial x_i \partial x_\kappa} \right) \left. \begin{array}{l} \text{grossmann} \\ \text{unser weiter} \\ \text{Hilbert fahrt} \end{array} \right\} \\ &+ \sum_{\eta\sigma} g_{\kappa\sigma} \left( \left[ {}^{\mu\eta}_{\epsilon} \right] \left[ {}^{\kappa\ell}_{\eta} \right] - \left[ {}^{\mu\ell}_{\epsilon} \right] \left[ {}^{\kappa\eta}_{\eta} \right] \right) \end{aligned}$$

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

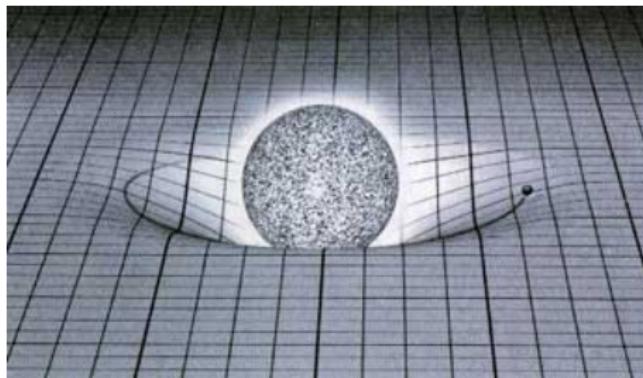
Il devance le grand mathématicien David Hilbert qui déclare



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

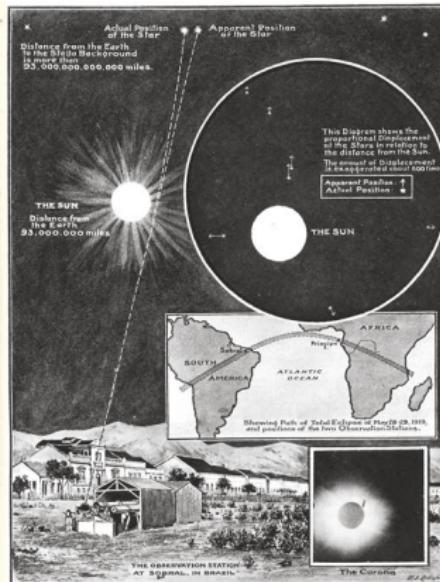
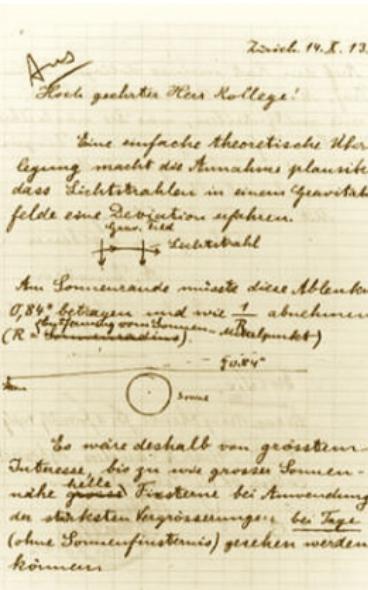
$$\begin{aligned} [{}^{\mu\nu}_{\ell}] &= \frac{1}{2} \left( \frac{\partial g_{\mu\ell}}{\partial x_\nu} + \frac{\partial g_{\nu\ell}}{\partial x_\mu} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_\ell} \right) - \frac{\partial}{\partial x_\ell} \left[ {}^{\mu\nu}_{\text{Ric}} \right] - \frac{1}{2} \left[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



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 courbé

# Voir la gravitation

Einstein prédit que la lumière est déviée par le Soleil



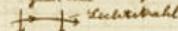
Confirmé par Eddington et Dyson avec l'éclipse de 1919

# 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  $(R = \text{Sonneabstand})$  Abzweigstelle

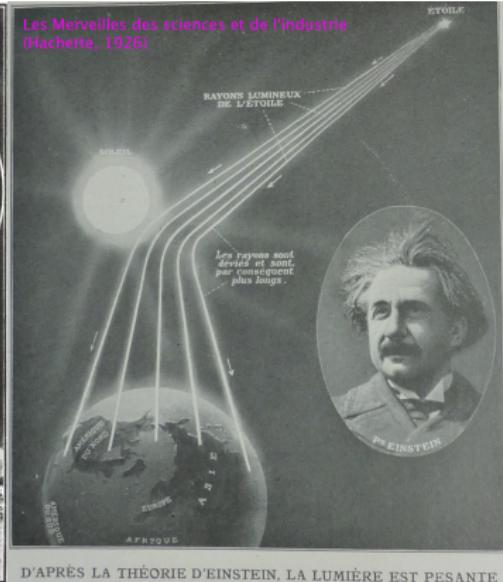
$0,84^\circ$



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)



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 😊

## Deuxième partie II

### La Gravitation aujourd'hui

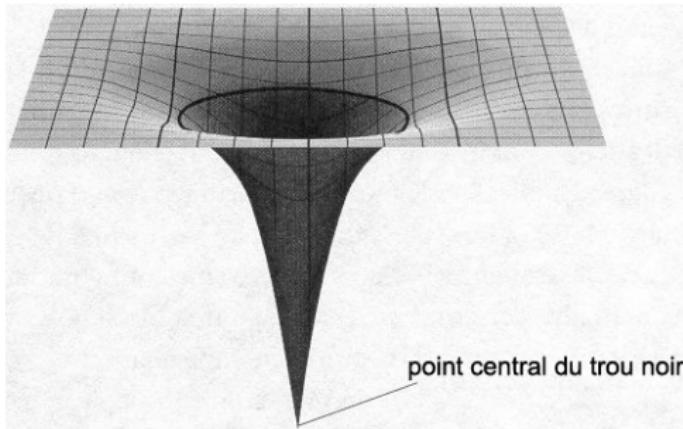
*Les physiciens disent des trous noirs qu'à force de se concentrer dans le ciel nocturne, il leur arrive d'enrouler, dans la substance ténèbreuse, l'espace qu'ils épanchent dans le temps.*

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

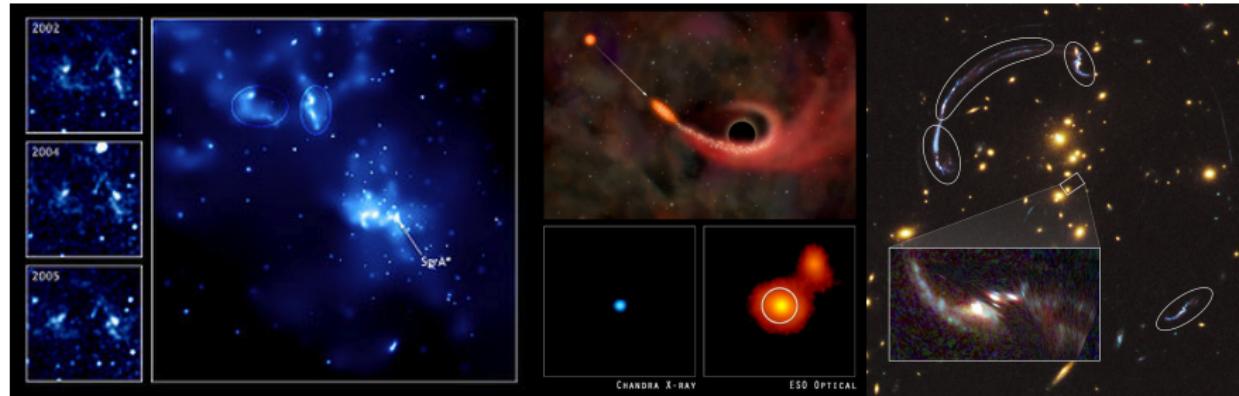
$$R_S = \frac{2G_N M}{c^2}$$



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

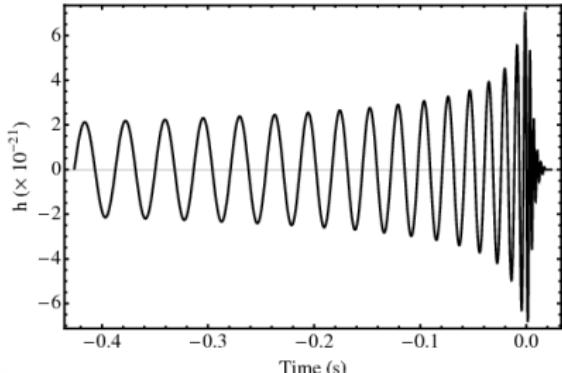
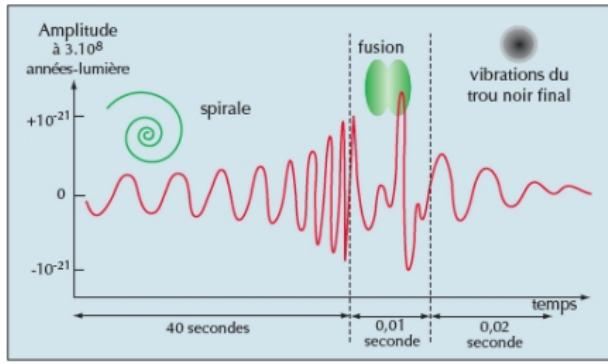
# Voir les trous noirs

Trou noir au centre de notre galaxie : *Sagittarius A\** d'une masse 4.1 millions fois  $M_{\odot}$



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

# Danse des trous noirs



# Einstein et les ondes gravitationnelles



## 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 il soumet à Physical Review un article  
« Do Gravitational Waves Exist ? »  
il argumente contre l'existence des ondes

## ON GRAVITATIONAL WAVES.

BY

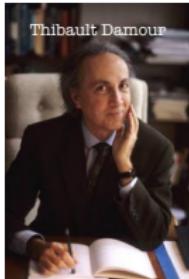
A. EINSTEIN and N. ROSEN.

### 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.

Cet article sera publié dans le Journal of the Franklin Institute avec le titre « On Gravitational Waves »

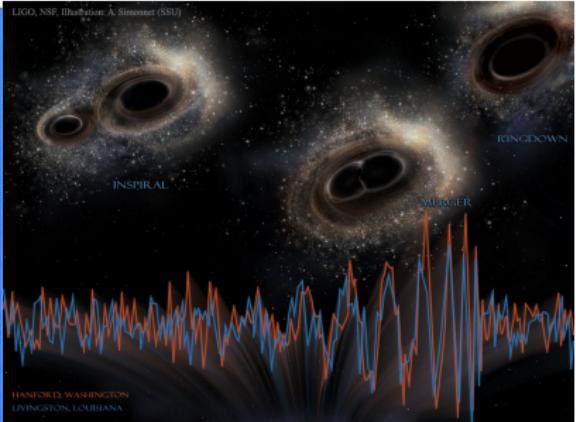
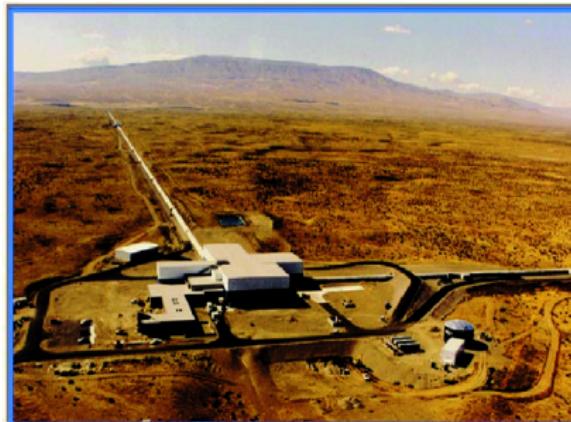
# Prédiction de la forme des ondes à l'IHÉS



# 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 la fusion!

## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*<sup>\*</sup>

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

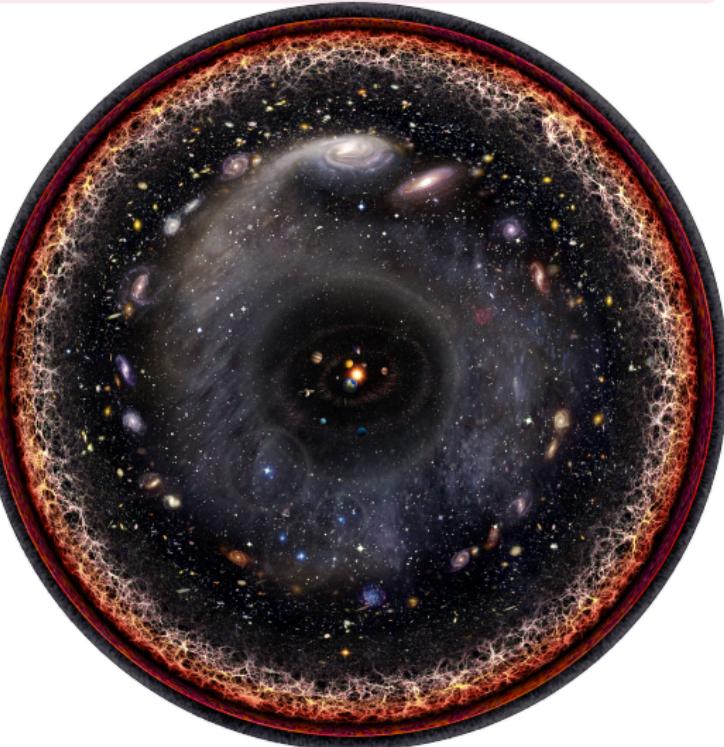
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1 $\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+180}_{-180}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , with  $3.0^{+0.6}_{-0.6} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

## Properties of the binary black hole merger GW150914

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration  
(compiled 12 February 2016)

On September 14, 2015, the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) detected a gravitational-wave transient (GW150914); we characterise the properties of the source and its parameters. The data around the time of the event were analysed coherently across the LIGO network using a suite of accurate waveform models that describe gravitational waves from a compact binary system in general relativity. GW150914 was produced by a nearly equal mass binary black hole of masses  $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$  (for each parameter we report the median value and the range of the 90% credible interval). The dimensionless spin magnitude of the more massive black hole is bound to be  $< 0.7$  at 90% probability. The luminosity distance to the source is  $410^{+180}_{-180}$  Mpc, corresponding to a redshift  $0.09^{+0.03}_{-0.04}$ , assuming standard cosmology. The source location is constrained to an annulus section of  $590$  deg $^2$ , primarily in the southern hemisphere. The binary merges into a black hole of mass  $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$  and spin  $0.67^{+0.05}_{-0.07}$ . This black hole is significantly more massive than any other known in the stellar-mass regime.



## Confirmation de la théorie d'Einstein il y a de 1.3 milliard d'années lumière

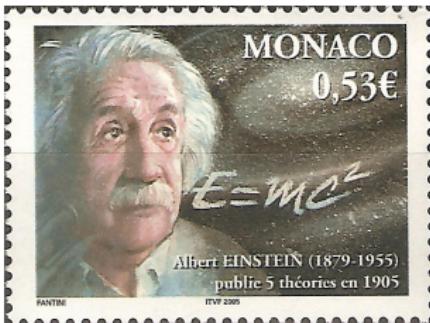
## Troisième partie III

### 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

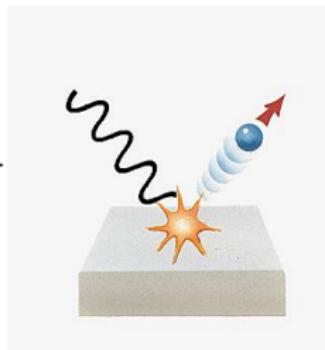
# Das Lichtquant



2015 fût l'année internationale de la lumière



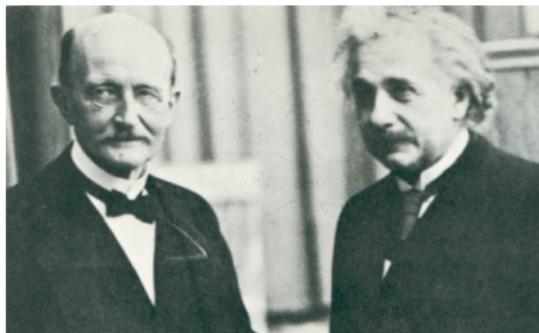
INTERNATIONAL  
YEAR OF LIGHT  
2015



célébrant la découverte du quantum de lumière par Einstein

# Das Lichtquant

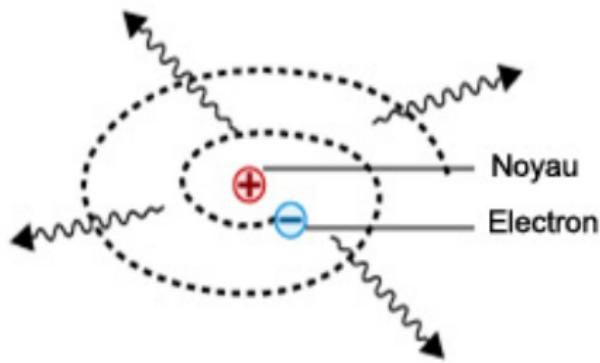
Scepticisme de Max Planck lors de l'élection d'Einstein à l'académie des sciences de Prusses (1913)



*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)

# Nécessité de quantifier la gravitation

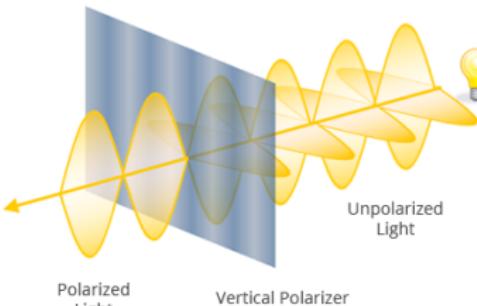
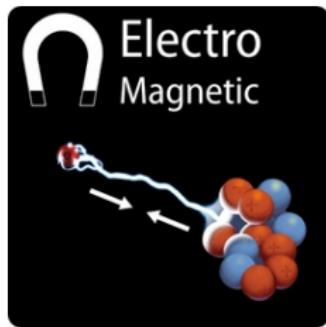


En 1916 Einstein écrit

*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

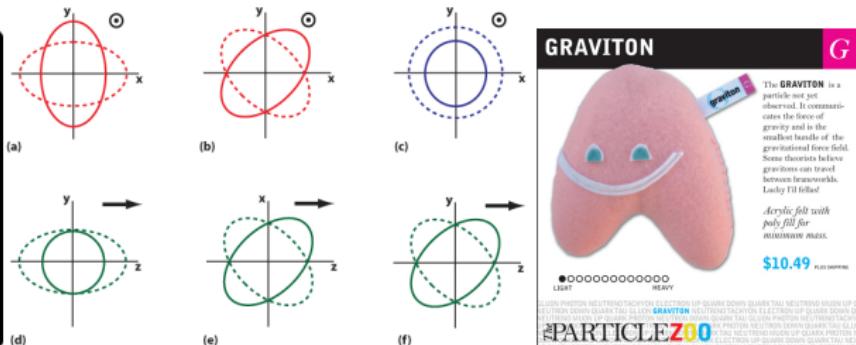


Le photon est la particule des ondes électromagnétiques

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

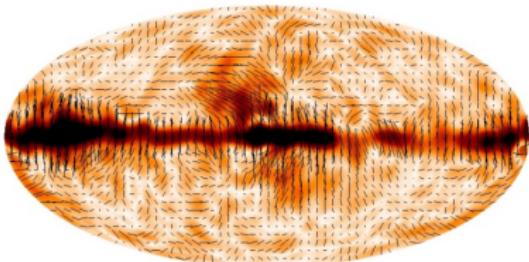


# Quantum d'espace-temps : Le graviton



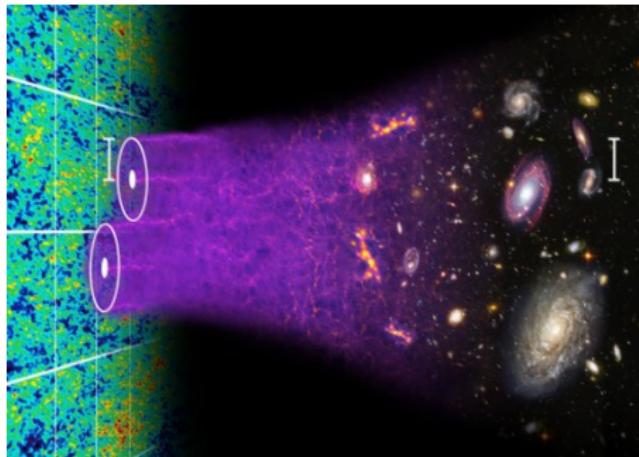
Le graviton est la particule des ondes d'espace-temps

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



# Ondes gravitationnelles primordiales

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



# Ondes gravitationnelles primordiales

**Liberation**  
**{SCIENCES<sup>2</sup>}**  
Par Sylvestre Huet  
Journaliste à Libération

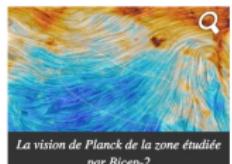
rechercher

## ONDES GRAVITATIONNELLES: PLANCK DÉMOLIT BICEP-2

### 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



La vision de Planck de la zone étudiée par Bicep-2

Les ondes gravitationnelles n'ont toujours pas été détectées. Le sujet de l'époque, 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 qui s'affirme ce matin les deux dernières

**LE FIGARO.fr**

Le journal 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](#) | [Cyrille Vanherberghe](#) | Publié le 18/04/2014 à 18:30

LE FIGARO PREMIUM

1 mois d'essai offert sans engagement

LES AUTEURS

SUR LE MÊME SUJET

ÉGALIS (27)

ARTAGER

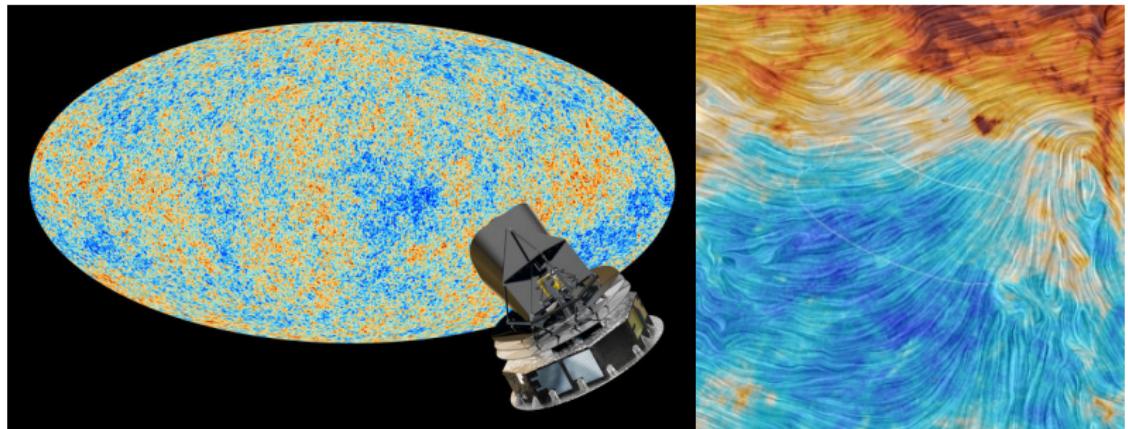
f t g m

MPRIMER



# Ondes gravitationnelles primordiales

Malgré de nombreux espoirs encore aucune détection



Expérience Planck 2015

# Quatrième partie IV

## La gravitation quantique rendue facile

*Romana : But how ? How did you know ?*

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

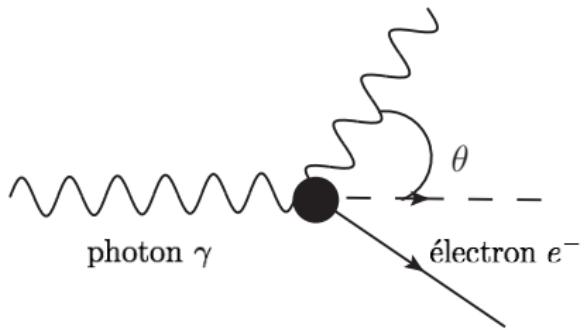
*Romana : And what does that mean ?*

*Doctor : Four !*

The Doctor and Romana, in « The Pirate Planet »



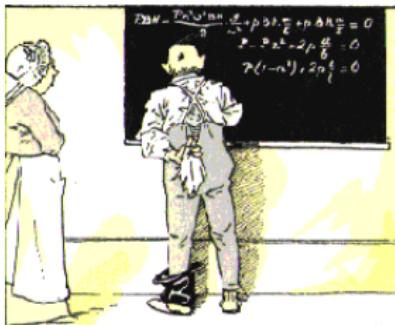
# Diffusion Compton



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

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

# Gravité classique et quantique



Deux paramètres physiques :

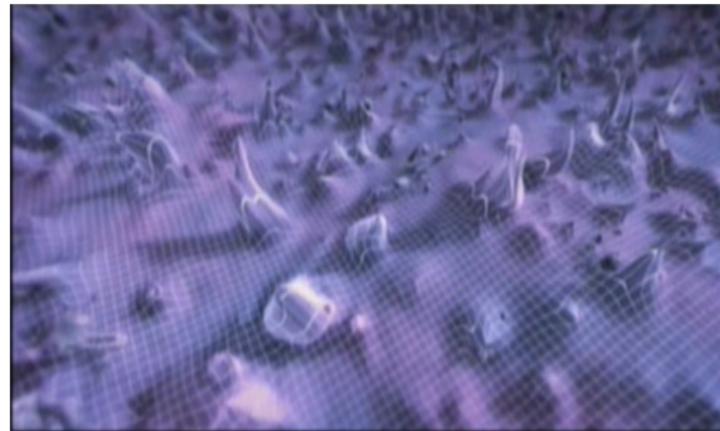
- paramètre classique : le rayon de Schwarzschild (trou noir)

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

- paramètre quantique : la longueur d'onde de Compton

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

# 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

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

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

# 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. (Bronshtein, 1936)

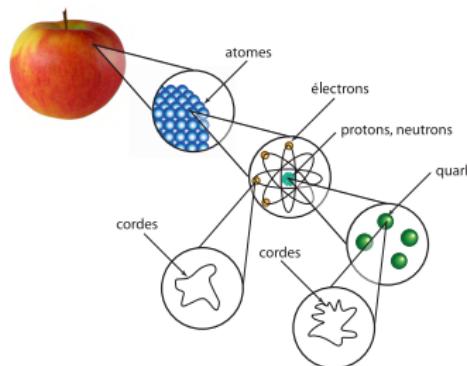


# La théorie des cordes à la rescousse

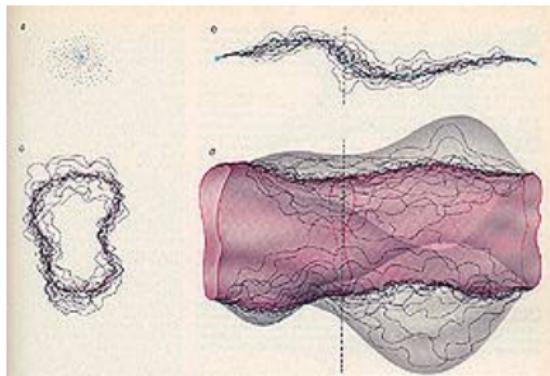
There is no intellectual exercise that is not ultimately pointless  
stringy

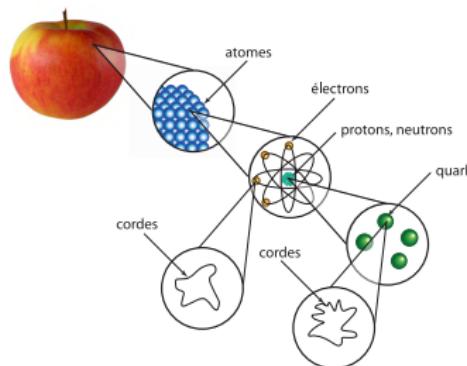


(J.-L. Borges, in «Pierre Ménard, Author of the Quixote»)



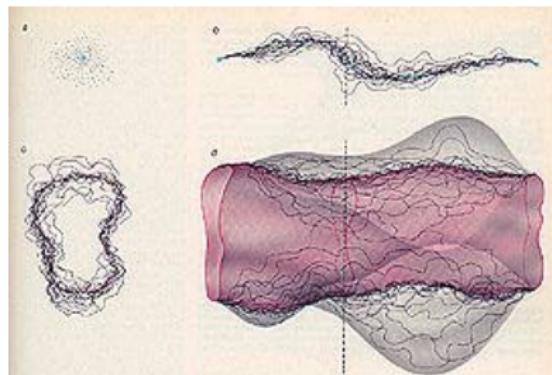
La corde est invisible à notre échelle mais on entend sa musique manifestée sous la forme des particules





En théorie des cordes le mode de vibration du graviton est composé de deux modes de vibration du photon

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



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)



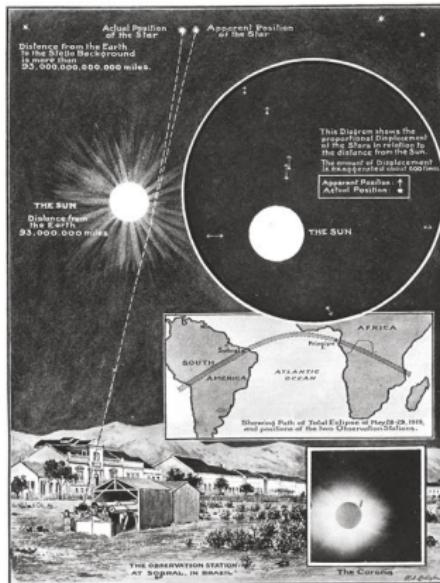
Barry Holstein Amherst University (USA)



Ludovic Planté Institut de Physique Théorique, CEA (France)

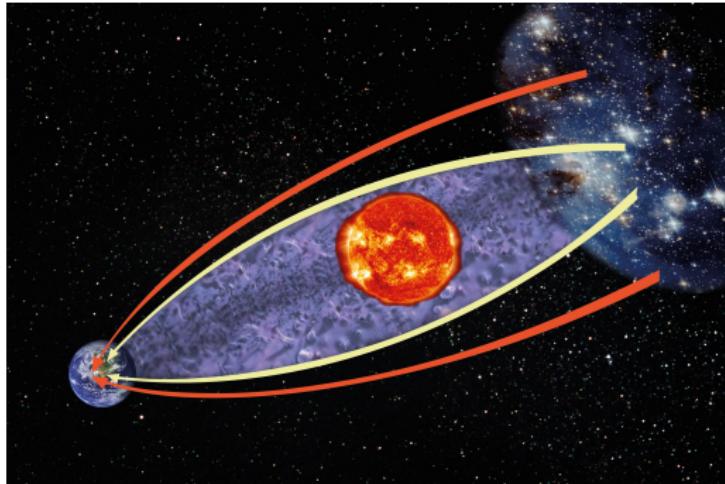
# Voir la gravité quantique

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



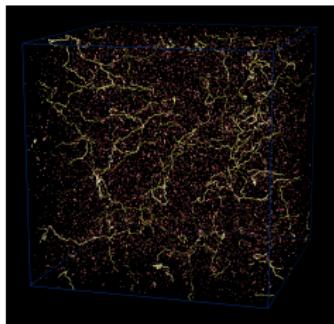
La contribution quantique dépend du spin

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

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

# Les promesses d'une nouvelle astronomie

On peut espérer découvrir des cordes cosmiques



Confirmer la thermodynamique des trous noirs et des effets de gravité quantique

