

Relativité générale : 100 ans déjà !

B. Lamine

brahim.lamine@irap.omp.eu

IRAP (UPS, Toulouse)



27 juin 2017



UNIVERSITÉ
TOULOUSE III
PAUL SABATIER

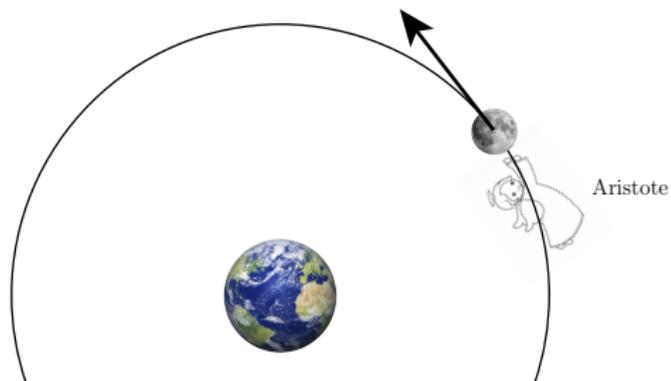


Université
de Toulouse



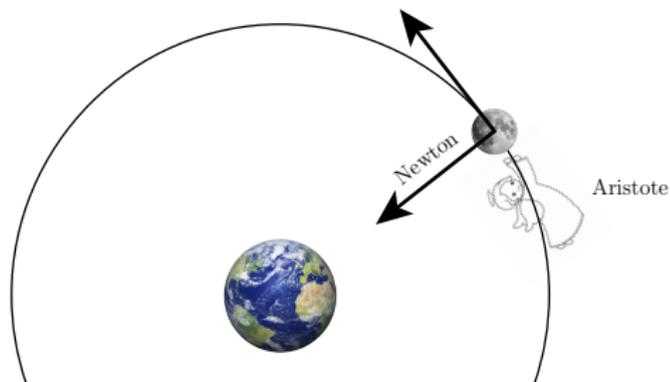
La gravitation selon Newton

Les anges de Feynman



La gravitation selon Newton

Les anges de Feynman

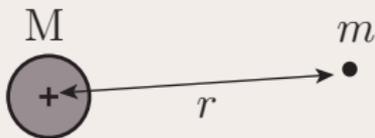


P. Valéry, *Mélange*, 1939

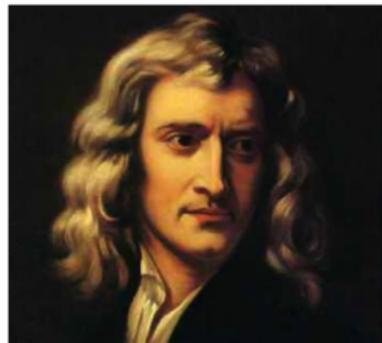
« Il fallait être Newton pour apercevoir que la lune tombe, quand tout le monde voit bien qu'elle ne tombe pas. »

La gravitation selon Newton

Postulat : force gravitationnelle

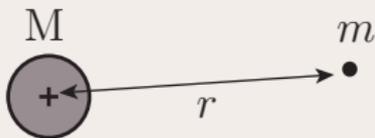


$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad , \quad F = \frac{GMm}{r^2}$$



La gravitation selon Newton

Postulat : force gravitationnelle



$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \quad , \quad F = \frac{GMm}{r^2}$$



Aspect positifs

- Rend bien compte de l'universalité de la chute des corps.

$$F = ma \quad \Rightarrow \quad a = \frac{GM}{r^2}$$

- Explique (presque) toutes les observations jusqu'à la fin du 19ème siècle.

La gravitation selon Newton

Universalité de la chute des corps



Appolo 15 (1971).

La gravitation selon Newton

Universalité de la chute des corps

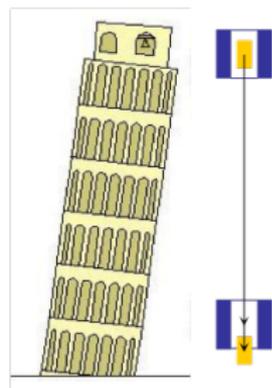
- Version moderne.



Universalité de la chute des corps

Test moderne

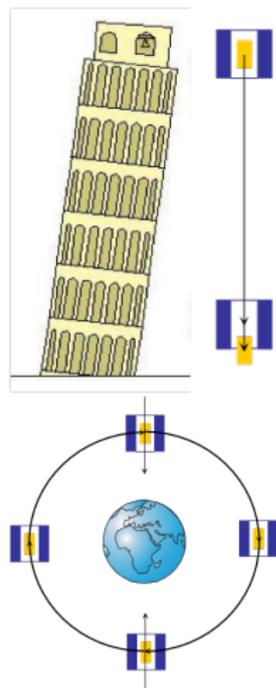
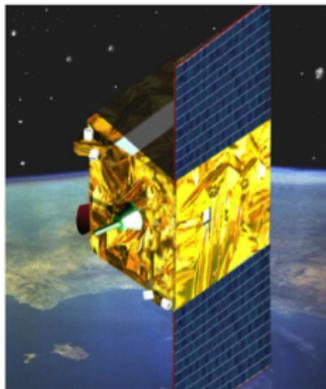
- Expérience terrestre limitée par le temps de chute.



Universalité de la chute des corps

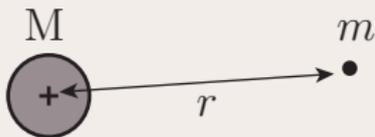
Test moderne

- Expérience terrestre limitée par le temps de chute.
- Projet spatial Microscope (CNES/ONERA).
 - Lancé le 25 avril 2016.
 - Durée de chute : 2 ans!
 - Précision attendue 10^{-15} .

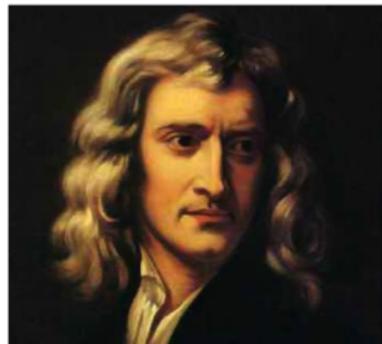


La gravitation selon Newton

Postulat : force gravitationnelle

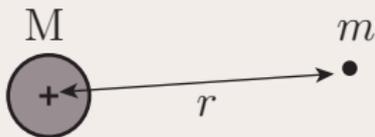


$$F(t) = \frac{GM(t)m}{r(t)^2}$$



La gravitation selon Newton

Postulat : force gravitationnelle



$$F(t) = \frac{GM(t)m}{r(t)^2}$$

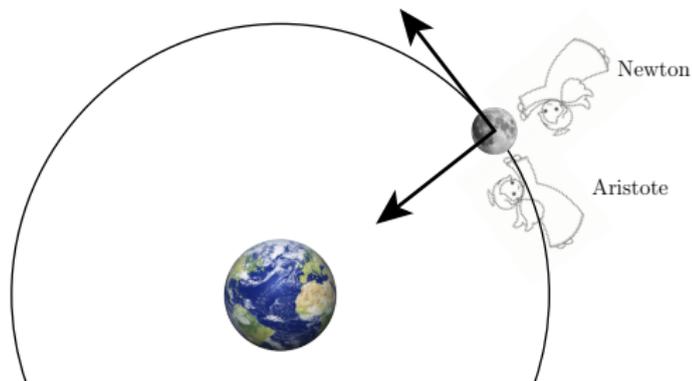


Aspect négatifs

- Problème de simultanéité : comment la masse m connaît-elle instantanément la position de la masse M ?
- N'explique pas l'avance anormale du périhélie de Mercure (Le Verrier, 1859).

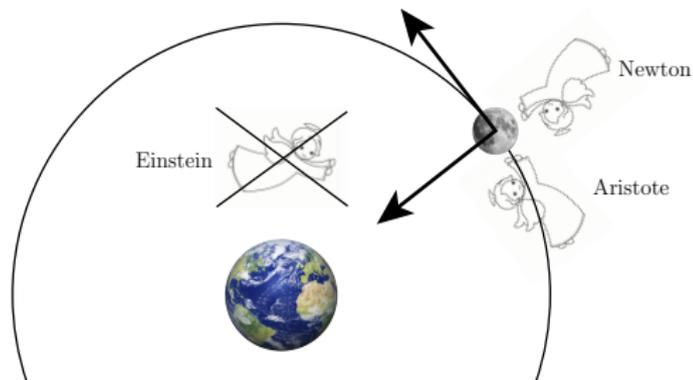
La gravitation selon Newton

Les anges de Feynman



La gravitation selon Newton

Les anges de Feynman

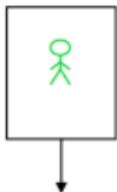


La gravitation selon Einstein : 1915

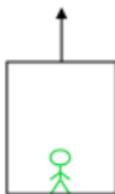
Postulat : pas de force gravitationnelle

- Expériences de pensées d'Einstein.

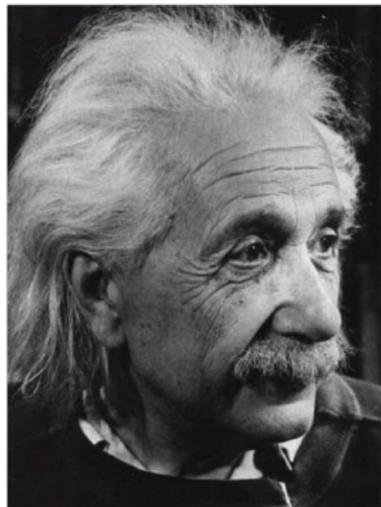
chute
libre



accélération
constante



$$\frac{D\vec{p}}{D\tau} = \vec{0}$$

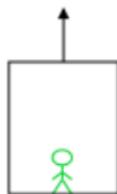
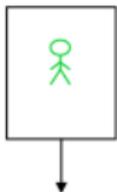


La gravitation selon Einstein : 1915

Postulat : pas de force gravitationnelle

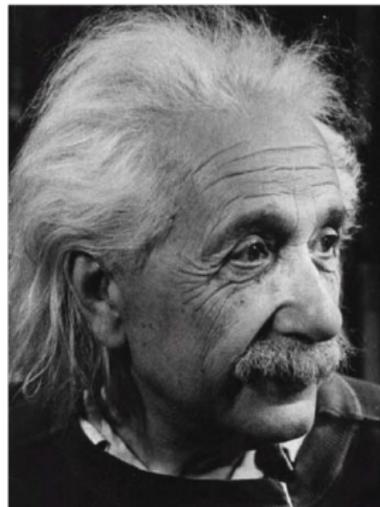
- Expériences de pensées d'Einstein.

chute
libre



accélération
constante

$$\frac{D\vec{p}}{D\tau} = \vec{0}$$

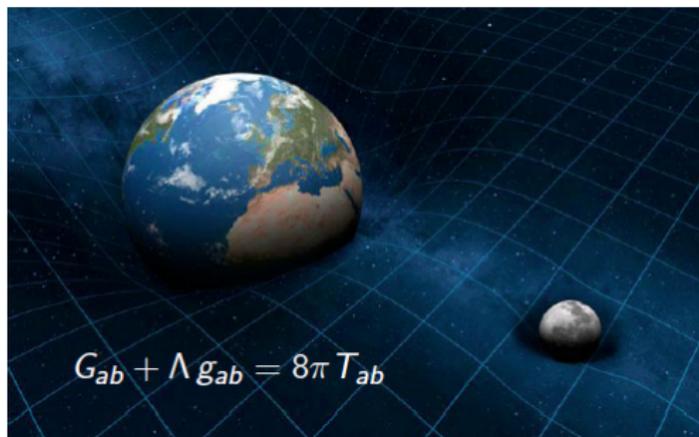


Aspect positifs

- Gravitation = géométrie.
 - préserve l'uniformité de la chute des corps

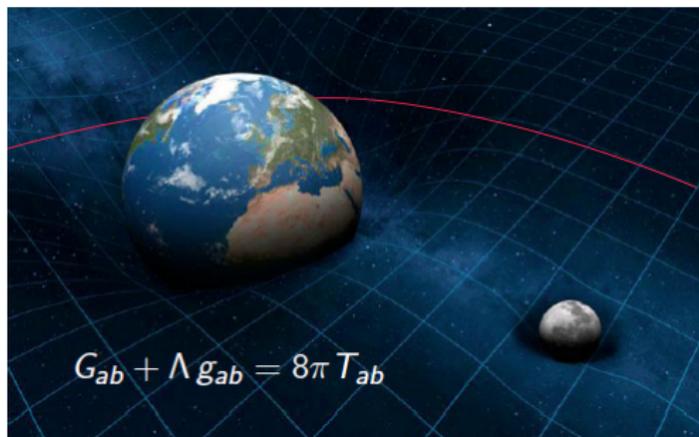
La gravitation selon Einstein : 1915

- Nous vivons dans un espace courbe!
- Les particules libres se déplacent en « ligne droite ».



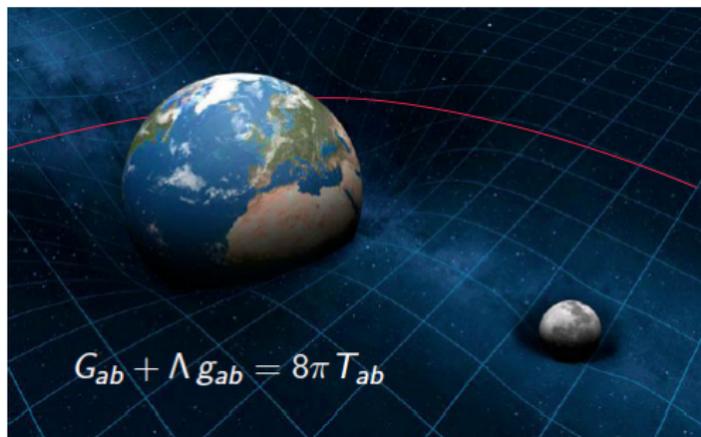
La gravitation selon Einstein : 1915

- Nous vivons dans un espace courbe!
- Les particules libres se déplacent en « ligne droite ».



La gravitation selon Einstein : 1915

- Nous vivons dans un espace courbe!
- Les particules libres se déplacent en « ligne droite ».

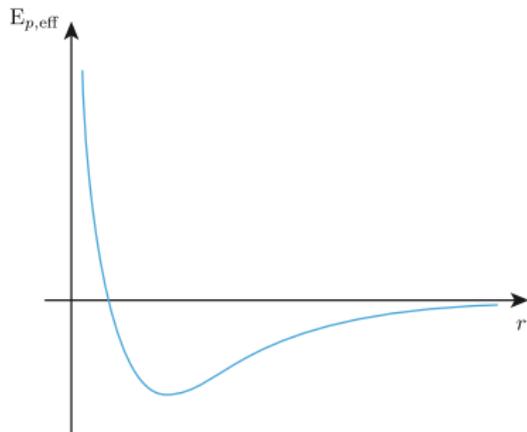


Equations d'Einstein

- Ce qui crée la courbure, c'est l'énergie.
- L'espace(-temps) devient un objet *dynamique* : la courbure peut se propager!

- Équation d'un mouvement géodésique (libre)

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}m \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 - \underbrace{\frac{GMm}{r} + \frac{m\ell^2}{2r^2}}_{E_{p,\text{eff}}}$$

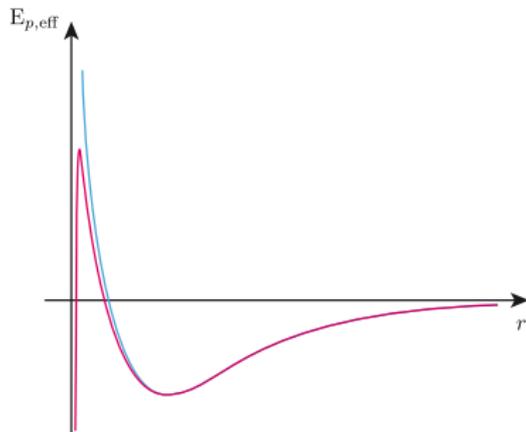


Quelques équations

- Équation d'un mouvement géodésique (libre)

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2}m \left(\frac{dr}{d\tau} \right)^2 - \underbrace{\frac{GMm}{r} + \frac{ml^2}{2r^2} - \frac{GMml^2}{r^3 c^2}}_{E_{p,\text{eff}}}$$

→ Trajectoire de capture désormais possible!



- Point de vue Newtonien : l'accélération gravitationnelle est donnée par (équation Einstein-Infeld-Hofmann)

$$\mathbf{a}_G = -\frac{GM}{r^3}\mathbf{r} + \frac{GM}{r^3} \left[\left(4\frac{GM}{rc^2} - \frac{v^2}{c^2} \right) \mathbf{r} + 4\frac{(\mathbf{r} \cdot \mathbf{v})\mathbf{v}}{c^2} \right]$$

- Présence de termes orthoradiaux.

Quand est-ce que cette théorie compte ?

Les corrections de relativité générale par rapport à Newton sont pilotées par la compacité \mathcal{C}

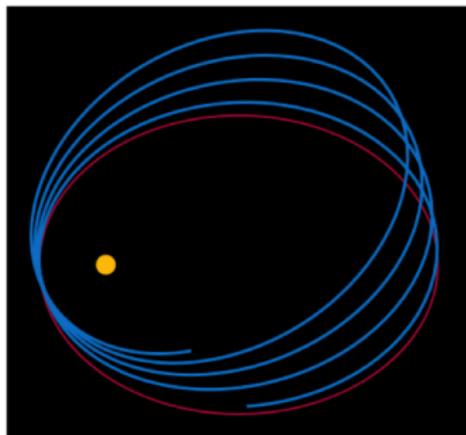
$$\mathcal{C} = \frac{GM}{Rc^2}$$

Système	\mathcal{C}
Terre	$\sim 10^{-9}$
Soleil	$\sim 10^{-6}$
Naine blanche	$\sim 10^{-3}$
Trou noir	$\sim 0,5$

Postdiction (1915) : avance du périhélie de Mercure

- Connus depuis 1859!
- Désaccord avec Newton de $43''$ d'arc par siècle ($5 \times 10^{-7} \text{ rad.s}^{-1}$ par orbite).
- En accord quantitatif avec la RG.

$$\Delta\varphi = \frac{6\pi GM}{a(1 - e^2)c^2}$$



Preuves expérimentales historiques

Prédiction (1915) : déviation de la lumière

- La lumière est défléchié lorsqu'elle passe au voisinage du Soleil.
- Prédiction de $1,7''$ d'arc.

$$\Delta\varphi = \frac{4GM}{R_{\odot}c^2}$$

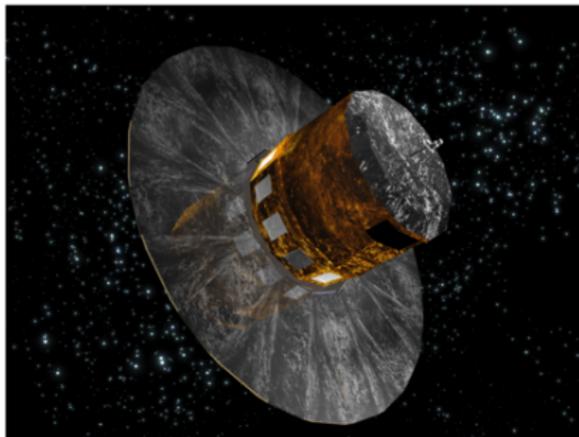
- Confirmation historique de Eddington lors de l'éclipse de 1919.



From The Illustrated London News, November 22nd 1919

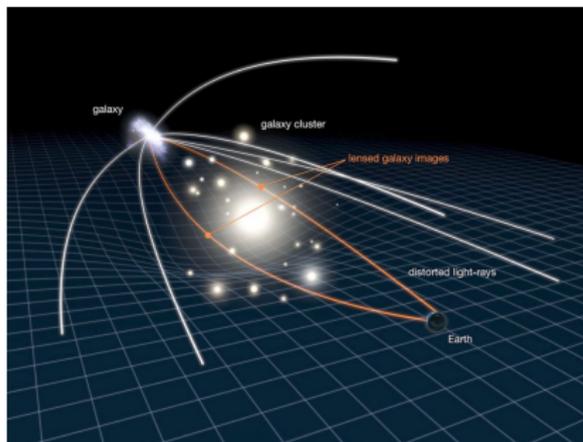
Projet GAIA (en vol depuis 2014)

- Cartographie 3D de la position d'un milliard d'étoiles dans le ciel ($\sim 1\%$ de la Galaxie).
- 100 000 fois plus précis que les mesures d'Eddington.



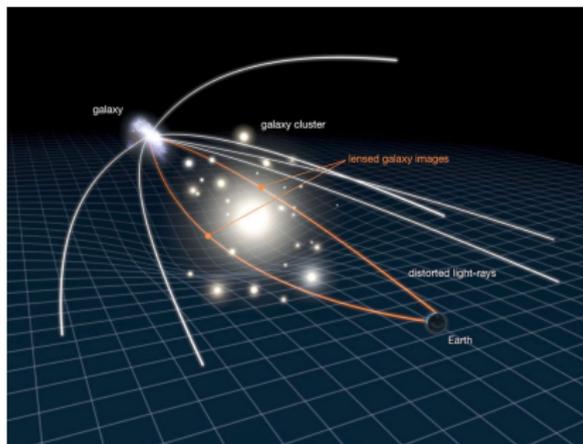
Autre conséquence de la déviation

- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle



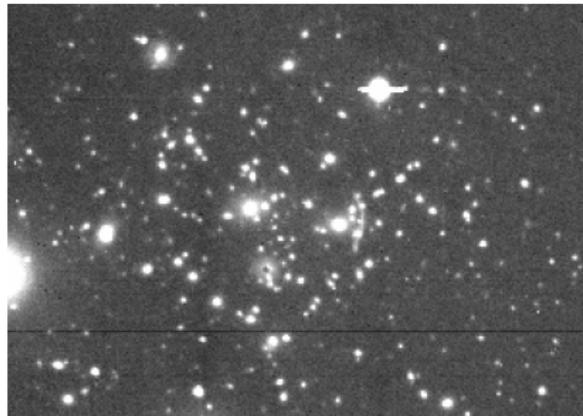
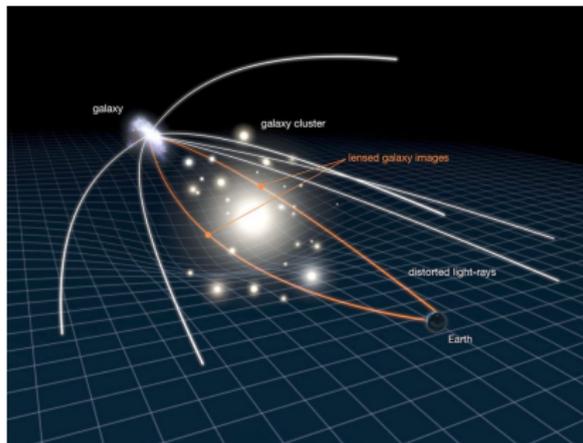
Autre conséquence de la déviation

- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle
- 1979 : confirmation



Autre conséquence de la déviation

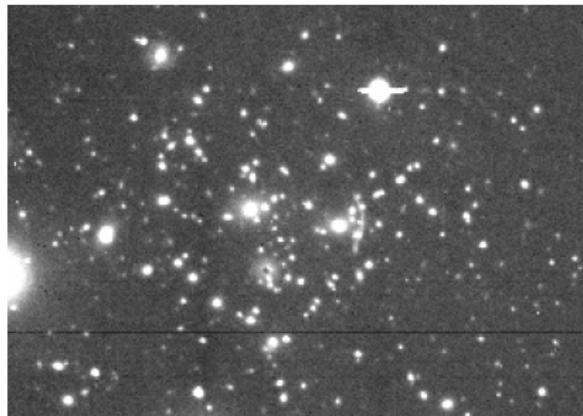
- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle
- 1979 : confirmation
- 1985 : premier arc



Crédit : Geneviève Soucail

Autre conséquence de la déviation

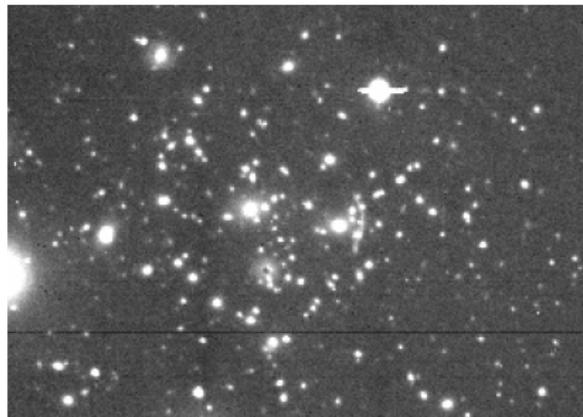
- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle
- 1979 : confirmation
- 1985 : premier arc



Crédit : Geneviève Soucail

Autre conséquence de la déviation

- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle
- 1979 : confirmation
- 1985 : premier arc



Crédit : Geneviève Soucail

Autre conséquence de la déviation

- 1936 : prédiction du phénomène de lentille gravitationnelle
- 1979 : confirmation
- 1985 : premier arc

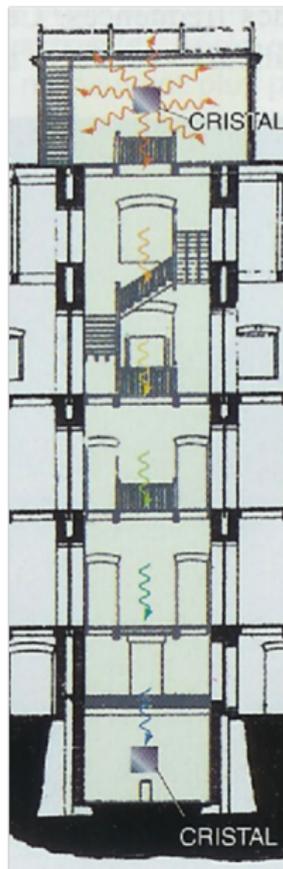


Prédiction (1911) : Redshift gravitationnel

- Le temps s'écoule plus lentement dans un champ gravitationnel intense.

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{GM}{R_{\oplus} c^2} \frac{H}{R_{\oplus}}$$

- Confirmation historique par Pound et Rebka en 1959.
 - Comparaison des raies d'émission γ de noyaux de Fe (isotope 57) au sol et au sommet d'une tour du campus de Harvard ($H = 22\text{m}$).
 - Accord à quelques %.



Expérience de Vessot (GPA, 1980)

- Comparaison de deux horloges (masers à hydrogène) placées dans une fusée et dans une station sur Terre.
- Différence d'altitude jusqu'à 10 000 km.
- Test à 0,02%.



Test moderne du redshift gravitationnel

Expérience de Vessot (GPA, 1980)

- Comparaison de deux horloges (masers à hydrogène) placées dans une fusée et dans une station sur Terre.
- Différence d'altitude jusqu'à 10 000 km.
- Test à 0,02%.



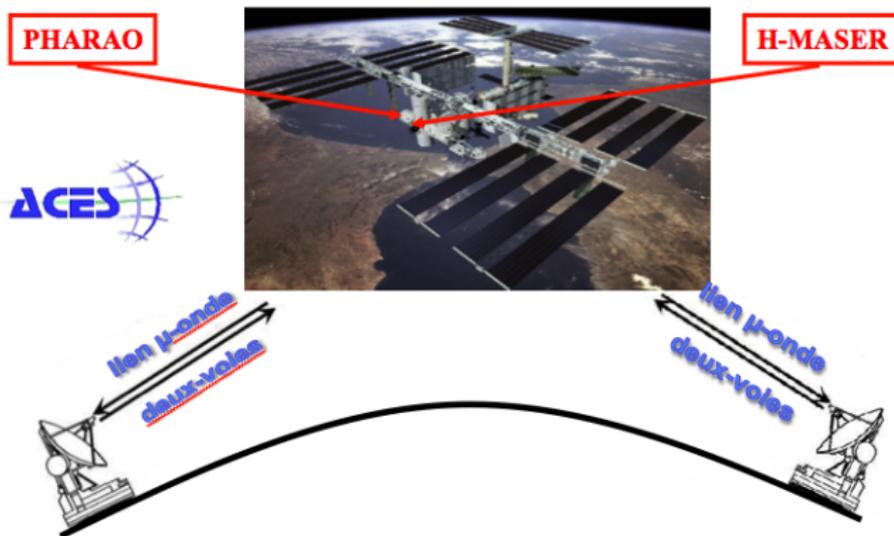
GPS

- L'effet est testé tous les jours : le redshift gravitationnel est 1000 fois plus important que la précision du GPS.
- Les horloges en vol et au sol sont désaccordées à la construction.

Test moderne du redshift gravitationnel

Projet PHARAO (lancement 2017)

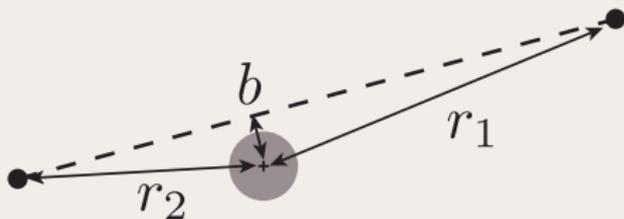
- précision attendue 10^{-6} .



Prédiction (1964) : Effet Shapiro

- La lumière est retardée par de la courbure.
→ Comme un milieu d'indice n .

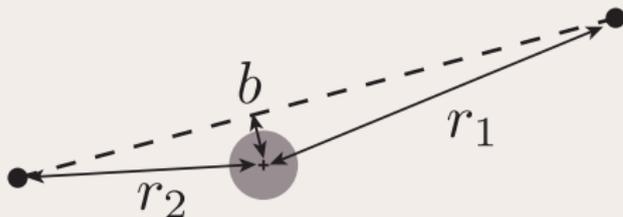
$$\Delta t = \frac{4GM_{\odot}}{c^3} \ln \left(\frac{4r_1 r_2}{b^2} \right)$$



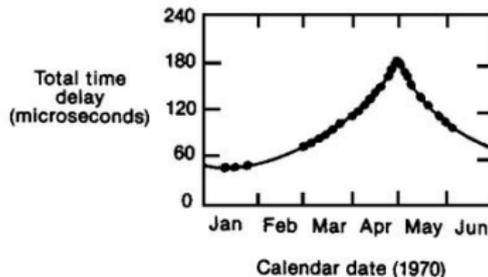
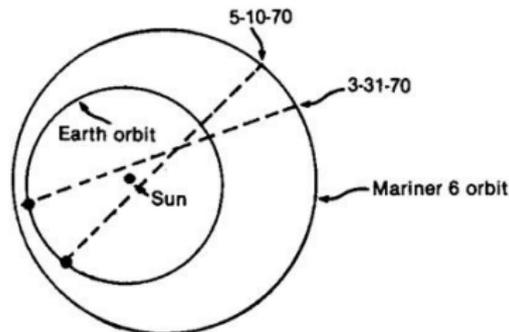
Prédiction (1964) : Effet Shapiro

- La lumière est retardée par de la courbure.
→ Comme un milieu d'indice n .

$$\Delta t = \frac{4GM_{\odot}}{c^3} \ln \left(\frac{4r_1 r_2}{b^2} \right)$$



- Preuve expérimentale précise grâce à la sonde Viking sur Mars.



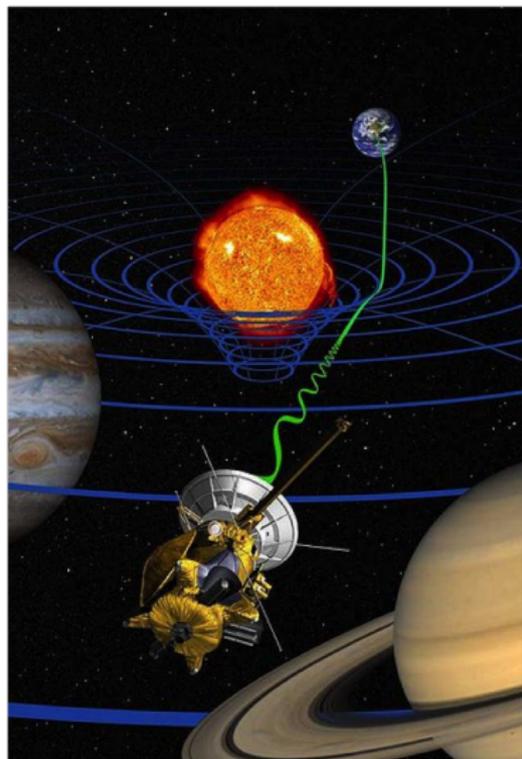
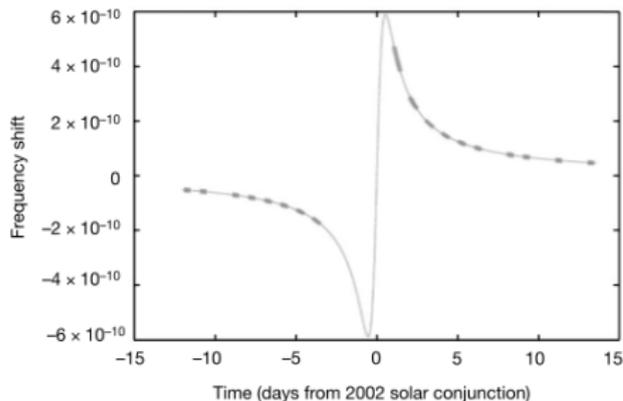
Test moderne de l'effet Shapiro

Mission Cassini (2003)

- Mesure en fréquence.

$$\frac{d\Delta t}{dt} = -\frac{4GM_{\odot}}{bc^3} \frac{db}{dt}$$

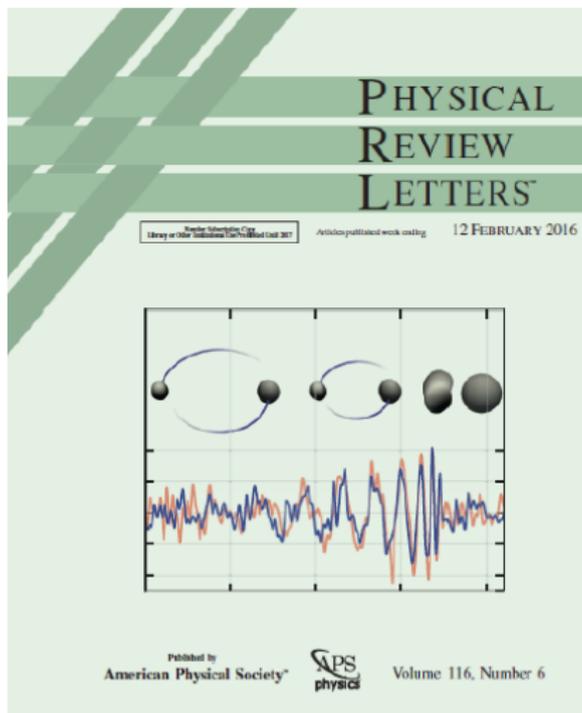
- Actuellement le meilleur test de la RG, précision de 2×10^{-5} .



Ondes gravitationnelles

Dernière prédiction historique ... testée en 2015!

- Découverte de GW150914 le 14 septembre 2015

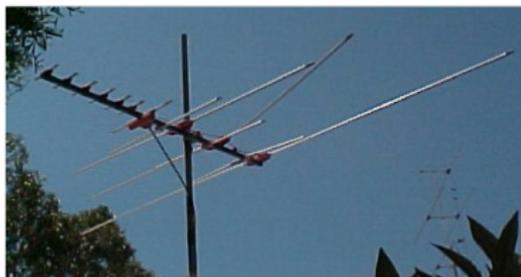


Ondes gravitationnelles

Dernière prédiction historique testée en 2015

Prédiction 1916

- 1887 (Hertz) : rayonnement électromagnétique
 - Une charge accélérée rayonne une onde EM qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière.



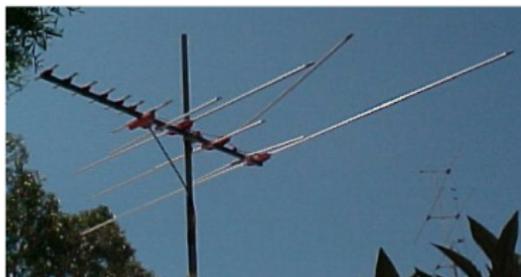
Ondes gravitationnelles

Dernière prédiction historique testée en 2015

Prédiction 1916

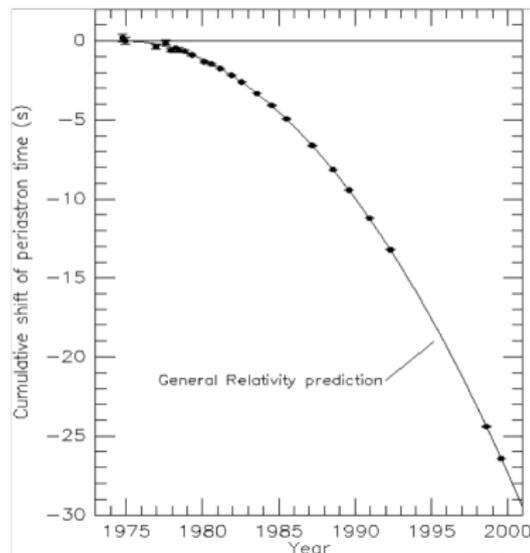
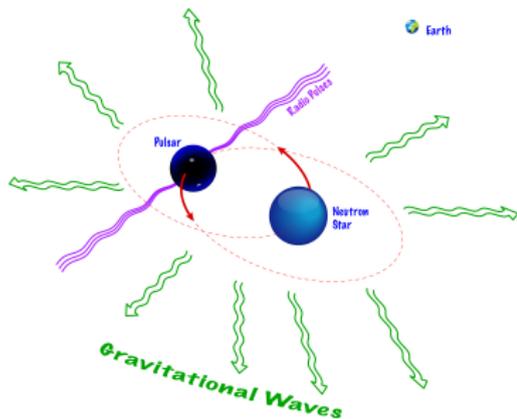
- 1887 (Hertz) : rayonnement électromagnétique
 - Une charge accélérée rayonne une onde EM qui se propage dans l'espace à la vitesse de la lumière.
- 1916 (Einstein) : rayonnement gravitationnel
 - Une masse accélérée crée une déformation de l'espace-temps qui se propage à la vitesse de la lumière.
 - Théorie élémentaire :

$$\vec{g}(M,t) = -G \int \left(\frac{\rho}{PM} - \frac{1}{c} \frac{\partial \rho}{\partial t} \right) \frac{\vec{PM}}{PM^3} d^3P$$



Les ondes gravitationnelles existent

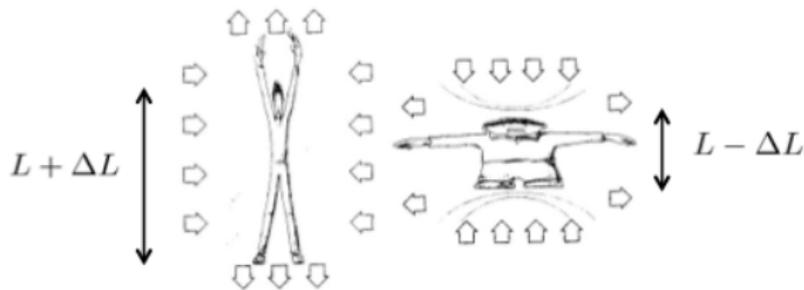
- 1960 : découverte du pulsar binaire PSR1913+16 par Hulse et Taylor.
 - Perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles.
 - Accord avec la RG à 0,2%.
- Prix nobel de physique en 1993.



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Effet des ondes gravitationnelles (OG)

- Forces de marée.
- L'amplitude h de l'OG représente la variation relative de distance.



$$h = \frac{\Delta L}{L}$$

Comment détecter les ondes gravitationnelles ?

Ordre de grandeur sur h

$$h \sim \frac{2G}{rc^4} \frac{d^2Q}{dt^2} \sim \frac{GM}{rc^2} \left(\frac{R}{cT} \right)^2 \sim \underbrace{c}_{\ll 1} \times \underbrace{\frac{R}{r}}_{\lll 1} \times \underbrace{\frac{v^2}{c^2}}_{\ll 1}$$

Comment détecter les ondes gravitationnelles ?

Ordre de grandeur sur h

$$h \sim \frac{2G}{rc^4} \frac{d^2Q}{dt^2} \sim \frac{GM}{rc^2} \left(\frac{R}{cT} \right)^2 \sim \underbrace{c}_{\ll 1} \times \underbrace{\frac{R}{r}}_{\lll 1} \times \underbrace{\frac{v^2}{c^2}}_{\ll 1}$$

Créer une OG en laboratoire ?

- Barreau d'acier de 20m de long et de 500 tonnes en rotation à 5 Hz, $h \sim 10^{-34}$ à une distance de 1 m.
- C'est-à-dire moins de la taille d'un atome sur la distance à la prochaine Galaxie...

Comment détecter les ondes gravitationnelles ?

Ordre de grandeur sur h

$$h \sim \frac{2G}{rc^4} \frac{d^2Q}{dt^2} \sim \frac{GM}{rc^2} \left(\frac{R}{cT} \right)^2 \sim \underbrace{c}_{\ll 1} \times \underbrace{\frac{R}{r}}_{\lll 1} \times \underbrace{\frac{v^2}{c^2}}_{\ll 1}$$

Créer une OG en laboratoire ?

- Barreau d'acier de 20m de long et de 500 tonnes en rotation à 5 Hz, $h \sim 10^{-34}$ à une distance de 1 m.
- C'est-à-dire moins de la taille d'un atome sur la distance à la prochaine Galaxie...

Source astrophysique

- Coalescence de 2 trous noirs stellaires dans une Galaxie à 10Mpc, $h \sim 10^{-20}$.
- C'est-à-dire la taille d'un atome sur la distance Terre-Soleil !

Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Précurseur : Joseph Weber 1960

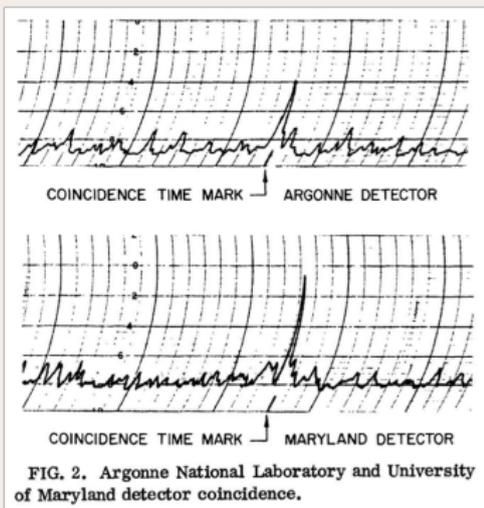
- Exploiter les résonances mécaniques pour amplifier l'effet de déformation.



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Précurseur : Joseph Weber 1960

- Exploiter les résonances mécaniques pour amplifier l'effet de déformation.



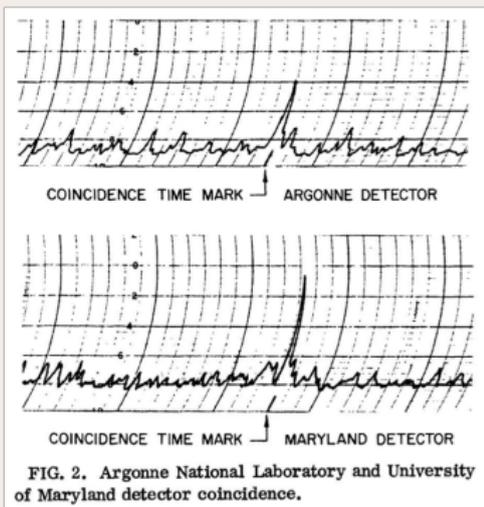
Physical Review Letters 1969



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Précurseur : Joseph Weber 1960

- Exploiter les résonances mécaniques pour amplifier l'effet de déformation.



Physical Review Letters 1969

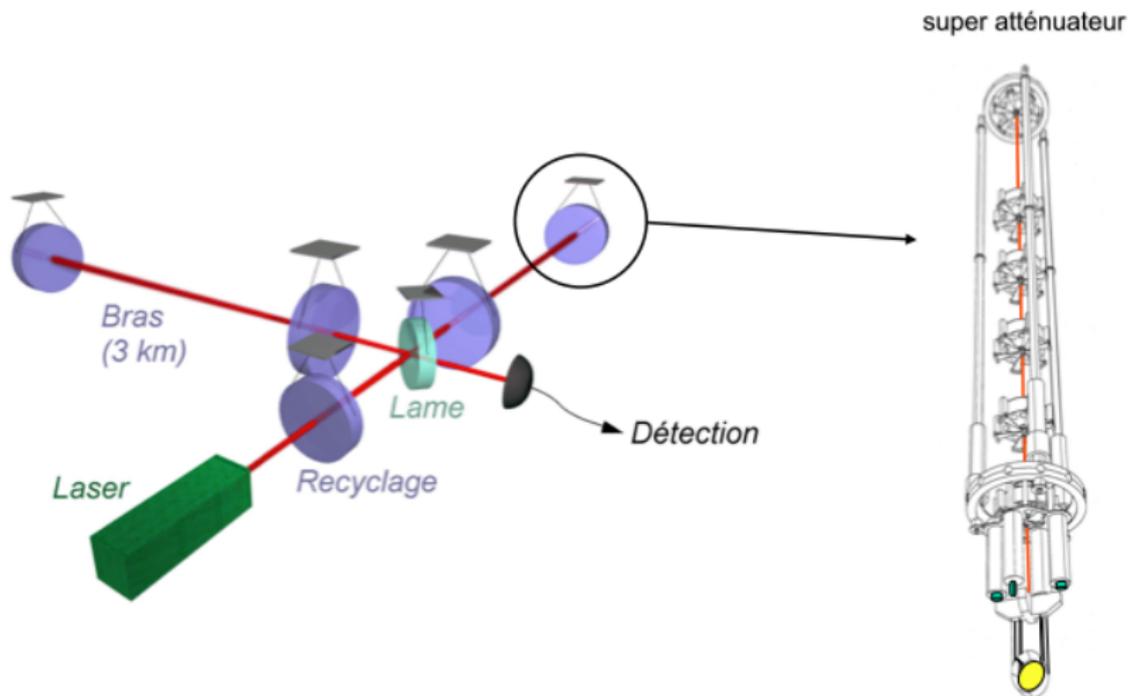
- Problème : sensible autour d'un nombre restreint de fréquence.



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Détecteur interférométrique

- Une grande taille permet de multiplier l'effet ($\Delta L = h \times L$).



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Détecteur interférométrique

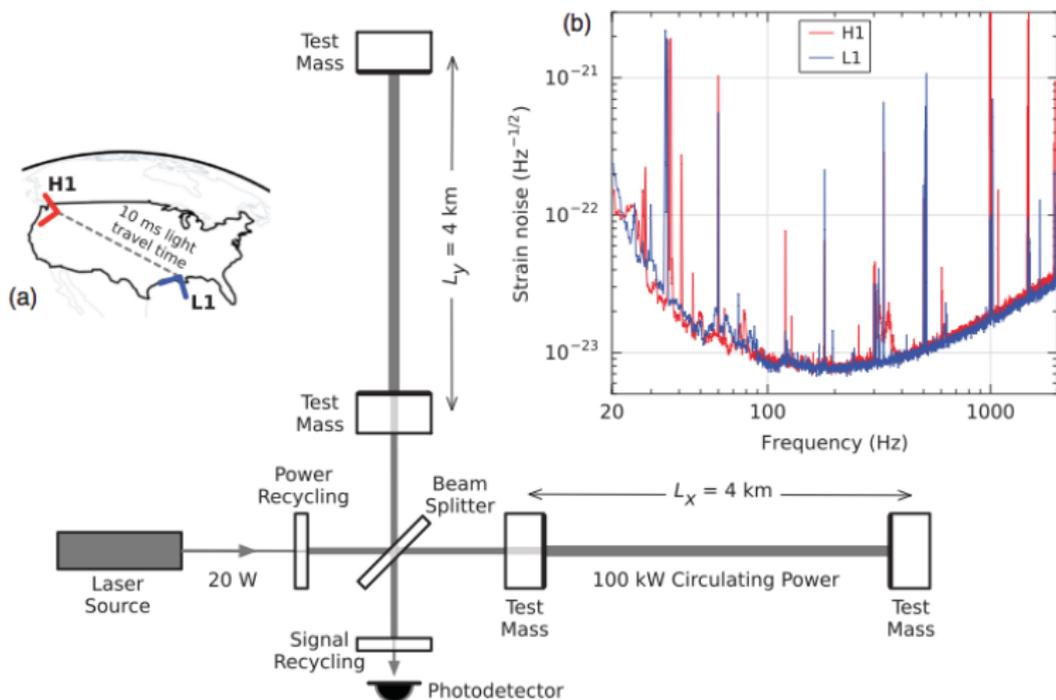
- Une grande taille permet de multiplier l'effet ($\Delta L = h \times L$).



Comment détecter les ondes gravitationnelles (OG)

Détecteur interférométrique

- Une grande taille permet de multiplier l'effet ($\Delta L = h \times L$).

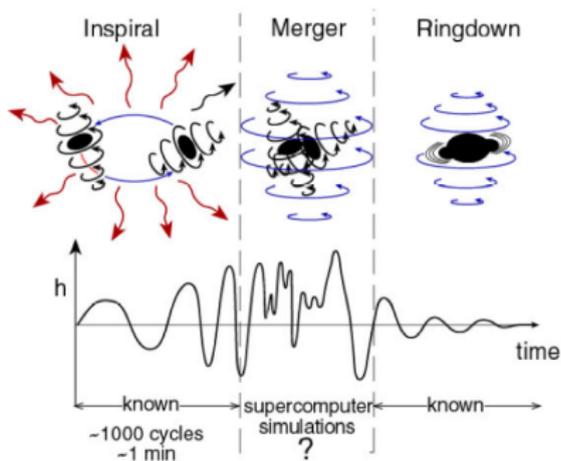


L'apport des ondes gravitationnelles

L'intuition de Kip Thorne (1994)

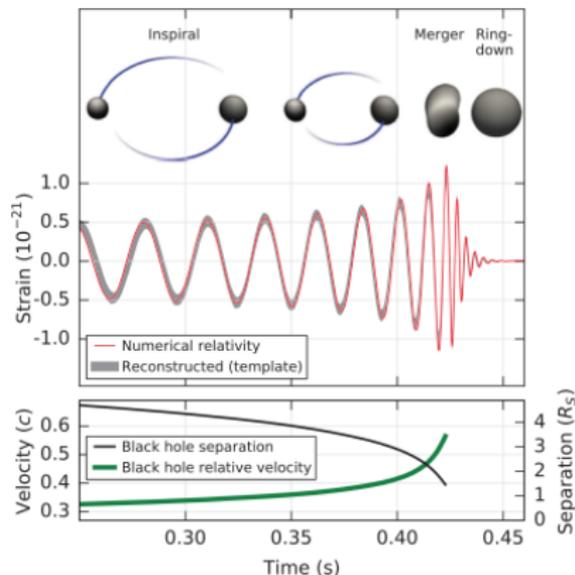
"... Gravitational-wave detectors will soon bring us observational maps of black holes colliding <...> Supercomputer simulations will attempt to replicate the symphonies and tell us what they mean, and black holes thereby will become the objects of detailed scrutiny. What will that scrutiny teach us? There will be surprises."

Kip S. Thorne, in *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*

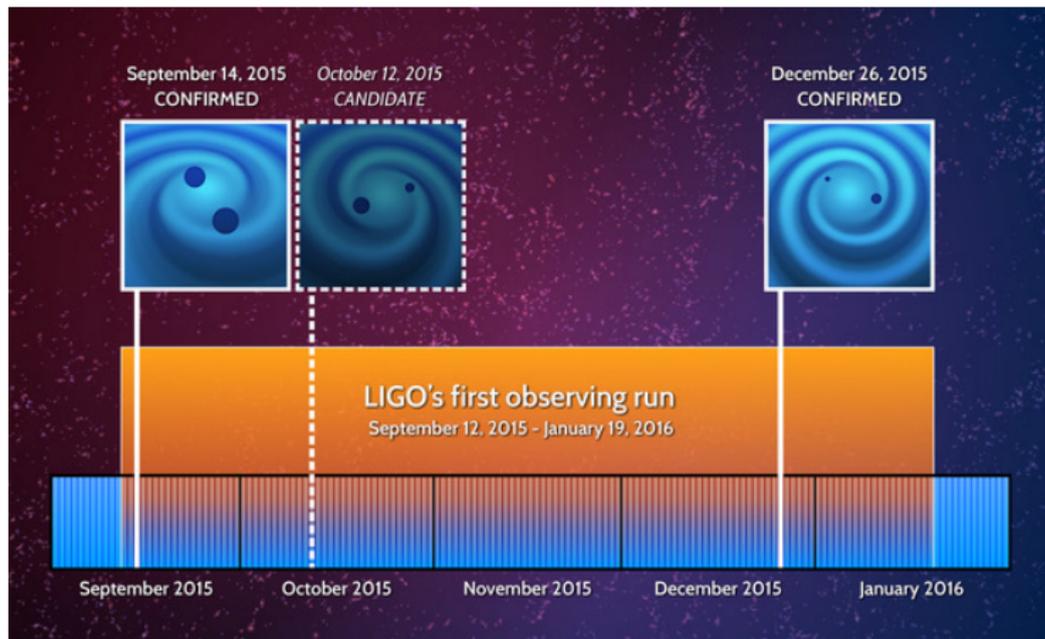


Caractéristiques

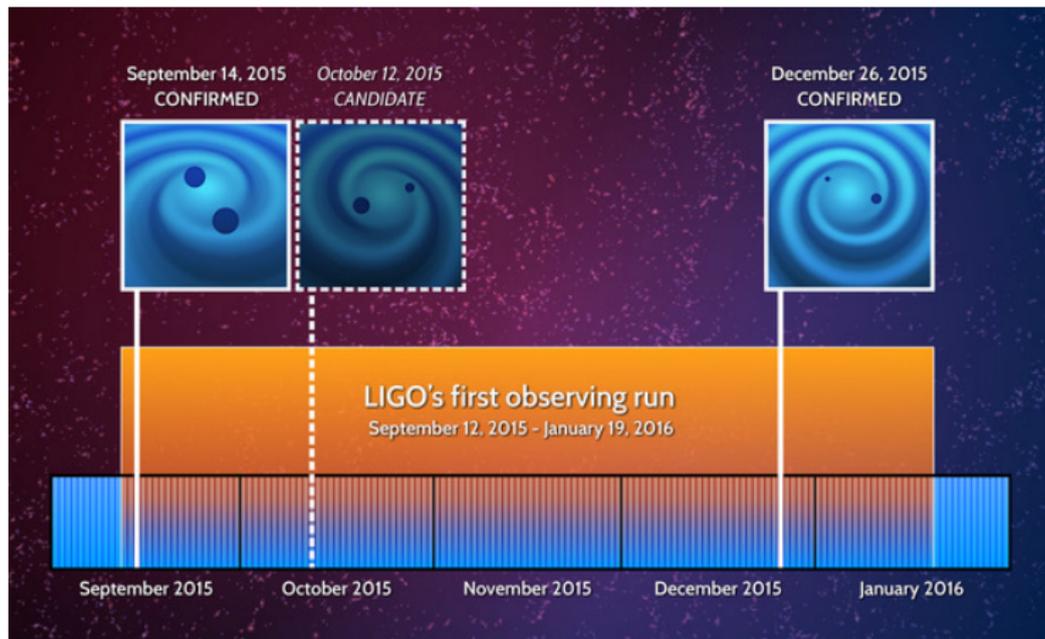
- Fusion de deux trous noirs de 29 et 36 masse solaire.
- La fréquence de l'onde passe de 30Hz à 250Hz en 0,1 s (durée de vie du système binaire : 100 millions d'années...).
- Vitesse de rotation proche de la vitesse de la lumière !
- Masse du trou noir final : 62 masse solaire.
- $h_{\max} = 10^{-21}$
- distance $\simeq 450$ Mpc (il y a 1,5 milliard d'année!).



Autres détections

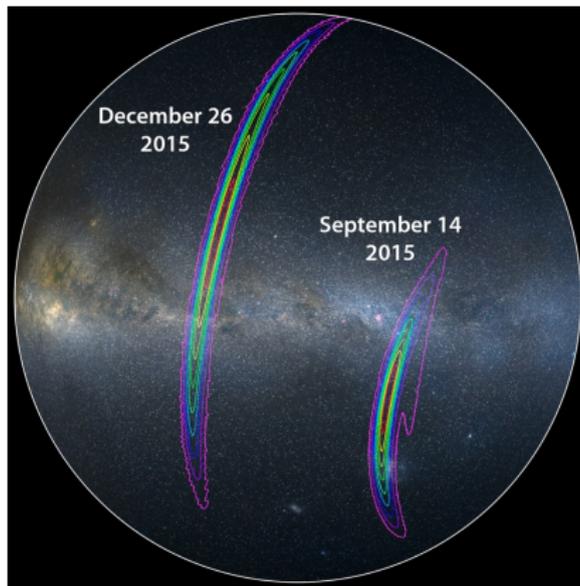


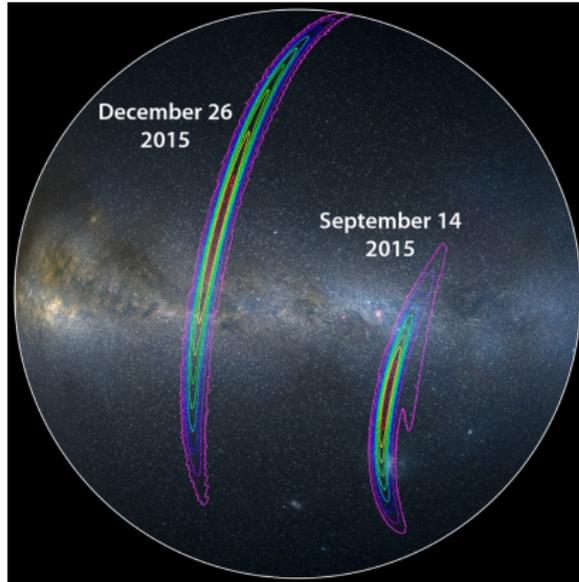
Autres détections



Depuis cet événements, 2 autres événements ont été annoncés par LIGO.

Localisation des événements





- Besoin de davantage de détecteurs opérationnels pour mieux localiser.
- Suivi sol pour une « confirmation » multi-messager.

Quelles conséquences de ces découvertes ?

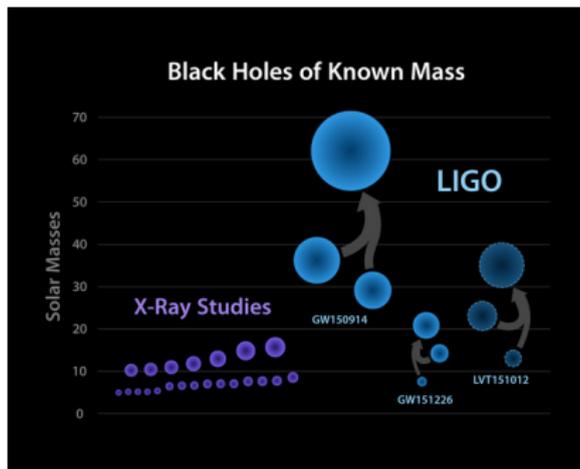
Des confirmations théoriques

- Premier test de la RG en champ (vraiment) fort.
 - Les résidus des fits sont blancs (pas de traces d'une quelconque anomalie).
 - Le signal mesuré est auto-consistant.
 - Meilleure mesure de la vitesse des ondes gravitationnelles.
- Confirmation d'une prédiction qui date de ... 100 ans !

Quelles conséquences de ces découvertes ?

Des confirmations observationnelles

- Confirmation définitive de l'existence de trous noirs.



Des avancées conjointes avec l'astronomie « traditionnelle »

- Exemple sur l'étude des GRBs.

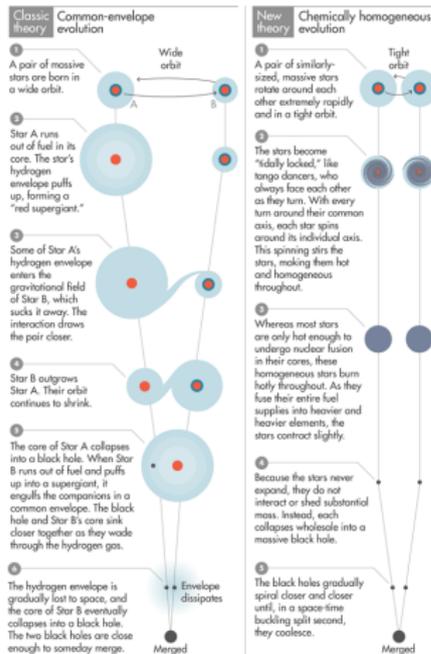
Quelles conséquences de ces découvertes?

Des interrogations

- La découverte de trous noirs aussi massif et aussi proche est une énorme surprise, qui bouleverse les modèles d'évolution stellaire d'étoiles massives.

WHY BLACK HOLES COLLIDE

Gravitational waves have been detected coming from the distant, long-ago mergers of black holes — the collapsed remnants of dead stars — some of which are much heavier than astrophysicists expected. The question is, what circumstances lead two black holes to collide? In particular, astrophysicists must figure out how black holes end up so massive and so close together — a combination that would normally cause a pair of stars to merge during their lifetimes, before ever forming black holes. A rivalry has heated up between two theories to explain black-hole mergers.



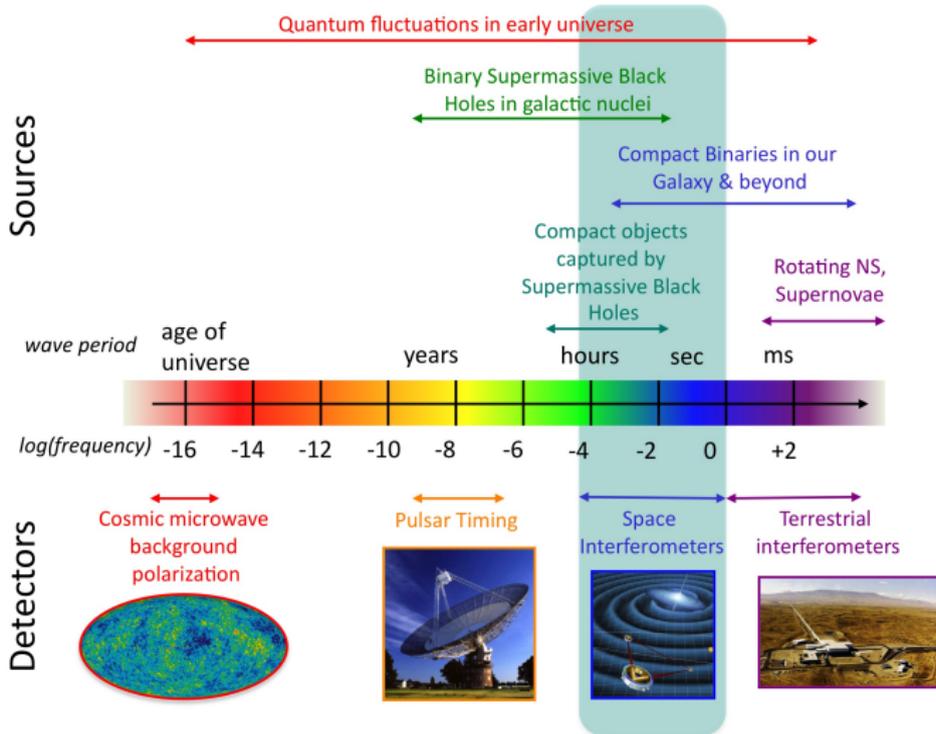
Quelles conséquences de ces découvertes ?

Des développements technologiques

Technology Category	Technology Advanced or Invented by LIGO
Impact of Gravitational Waves Science on Other Fields	<ul style="list-style-type: none">❑ The science of classical and quantum measurements and high-precision metrology at large❑ Optics, quantum mechanics and laser systems❑ Space science and technology❑ Geology and geodesy❑ Material science and technology❑ Cryogenics and cryogenic technology❑ Methods in theoretical physics

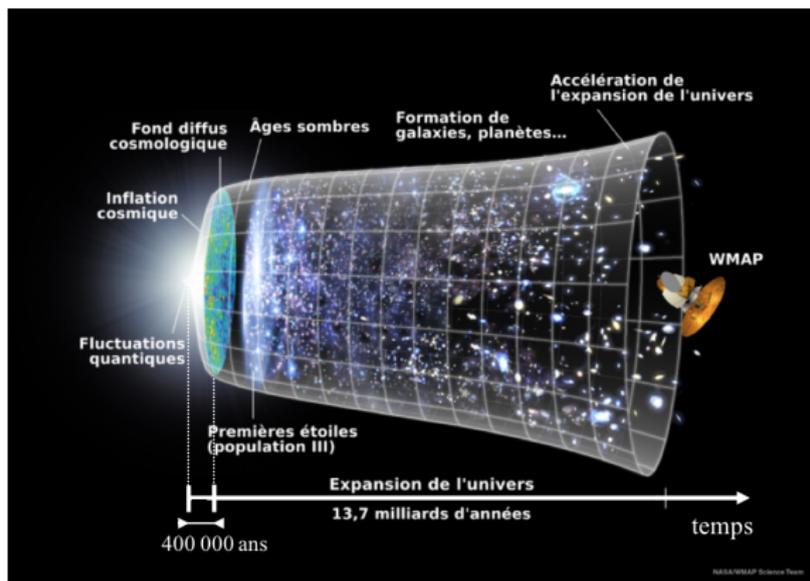
Quelles ondes peut-on espérer découvrir ?

The Gravitational Wave Spectrum



Quelles ondes peut-on espérer découvrir ?

- Des OG ont été créées dès les tous premiers instants de l'Univers.
- Leur détection permettrait de « voir » l'univers à une époque inatteignable par les messagers lumineux (photons).



- Une nouvelle astronomie gravitationnelle s'ouvre à l'humanité.
- Ce qui nous attend est probablement l'inattendu!
- Certaines données de LIGO sont public sur un site d'open data
<https://losc.ligo.org/about/>
- N'hésitez pas à participer à différents concours liés à la « nuit des ondes gravitationnelles » (CNRS, SFP)
<http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles/>
- Pour aller plus loin dans la science : « The basic physics of the binary black hole merger GW150914 », arXiv :1608.01940

- Une nouvelle astronomie gravitationnelle s'ouvre à l'humanité.
- Ce qui nous attend est probablement l'inattendu !
- Certaines données de LIGO sont public sur un site d'open data
<https://losc.ligo.org/about/>
- N'hésitez pas à participer à différents concours liés à la « nuit des ondes gravitationnelles » (CNRS, SFP)
<http://www.cnrs.fr/nuit-des-ondes-gravitationnelles/>
- Pour aller plus loin dans la science : « The basic physics of the binary black hole merger GW150914 », arXiv :1608.01940

Merci pour votre attention !

- La RG a bouleversé notre façon de penser l'espace(-temps).
- Une théorie très bien testée jusqu'aux échelles du système solaire (là où l'Homme a envoyé des expériences).
- Découverte récente des ondes gravitationnelles :
 - Premier test de la relativité générale en champ (vraiment) fort.
 - Potentiellement une nouvelle astronomie gravitationnelle s'ouvrira alors.
- Les tests de la RG à plus grande échelle (Galaxies, cosmologie) sont un enjeu essentiel (matière noire, énergie noire).