

Les vibrations de l'espace-temps

À la poursuite des ondes gravitationnelles

Éricourgoulhon

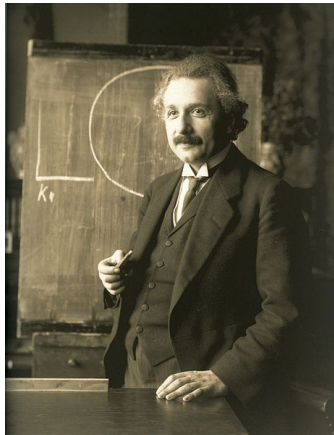
Laboratoire Univers et Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris / Université Paris Diderot
92190 Meudon, France

eric.gourgoulhon@obspm.fr

<http://luth.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/>

Les Fondamentales
Le forum du CNRS
Grenoble, 11 octobre 2014

Qu'est-ce qu'une onde gravitationnelle ?



Les **ondes gravitationnelles** sont des **vibrations de l'espace-temps**.

Elles ont été prédites par Albert Einstein en 1918, dans le cadre de la **relativité générale**.

Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps*?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps*?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

Le temps ne possède qu'**une seule dimension** : passé / futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

Mais au fait, qu'est-ce que *l'espace-temps*?

Nous vivons dans un espace à **trois dimensions** :

- devant / derrière,
- gauche / droite,
- haut / bas

⇒ 3 nombres (x, y, z) (*coordonnées*) pour décrire la position d'un point dans l'espace.

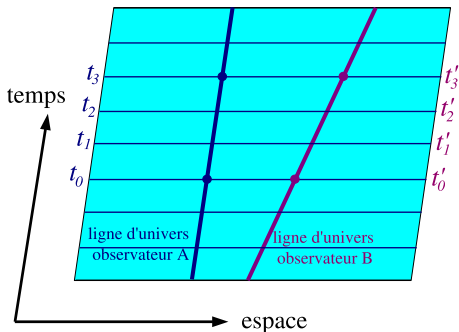
Le temps ne possède qu'**une seule dimension** : passé / futur

⇒ 1 seul nombre t (*date*) pour localiser un événement dans le temps.

On peut unifier l'espace et le temps dans un continuum mathématique à *quatre dimensions* : ***l'espace-temps***.

Concept dû à Albert Einstein, Henri Poincaré et Herman Minkowski au début du XX^{ème} siècle.

L'espace-temps



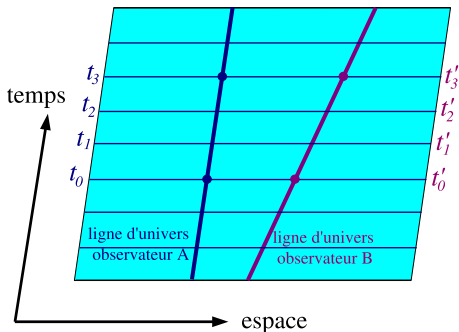
Espace-temps newtonien :

description math. : espace affine \mathbb{R}^4

structure absolue : temps universel

Tous les observateurs mesurent le même temps

L'espace-temps

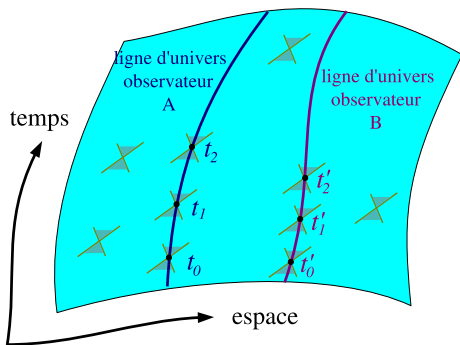


Espace-temps newtonien :

description math. : espace affine \mathbb{R}^4

structure absolue : **temps universel**

Tous les observateurs mesurent le même temps



Espace-temps relativiste :

description math. : espace courbe

(variété) de dimension 4

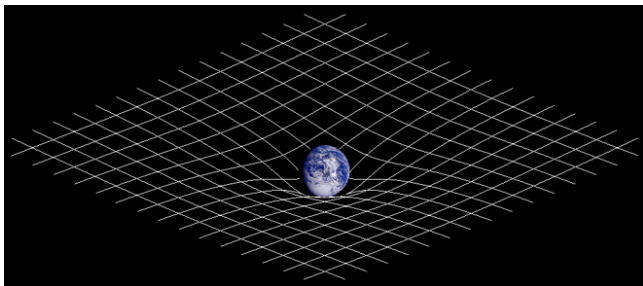
structure absolue : **cônes de lumière**

Pas de temps universel

\implies *dilatation des temps*

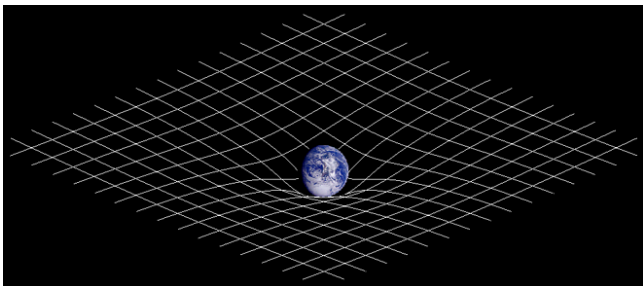
La relativité générale

La relativité générale décrit la gravitation comme la **courbure de l'espace-temps**



La relativité générale

La relativité générale décrit la gravitation comme la **courbure de l'espace-temps**



La gravitation **dévie les rayons lumineux** et a un effet sur **l'écoulement du temps**

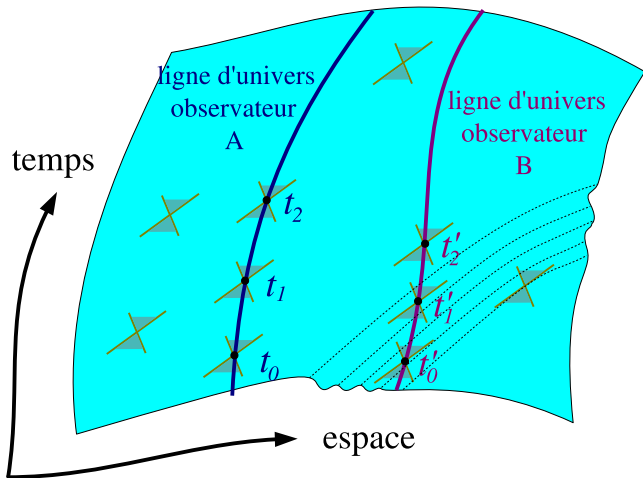
Les déviations par rapport à la théorie newtonienne se mesurent par

le **paramètre de compacité** $C = (V_{\text{lib}}/c)^2 \sim GM/(c^2 R)$

	proton	Terre	Soleil	naine blanche	étoile à neutrons	trou noir
C	10^{-39}	10^{-10}	10^{-6}	10^{-3}	2×10^{-1}	1

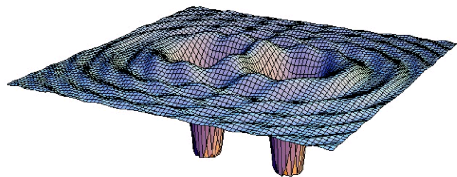
Les ondes gravitationnelles

Des petites oscillations dans la courbure...



Les **ondes gravitationnelles**

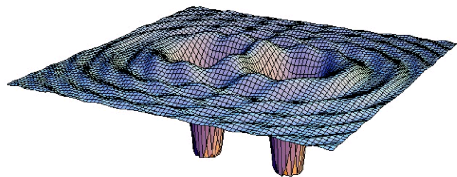
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps



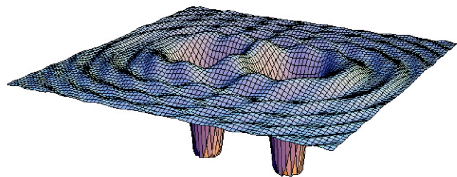
Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière



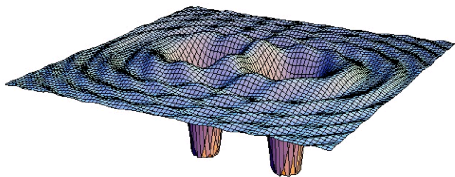
Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs



Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière



Section spatiale à deux dimensions d'un espace-temps engendré par un système binaire de trous noirs

Les **ondes gravitationnelles**

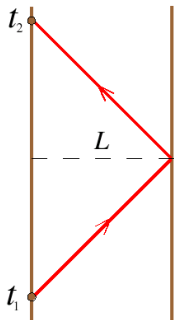
- traduisent la **dynamique** de l'espace-temps
- sont engendrées par l'accélération de la matière
- loin des sources, se propagent à la vitesse de la lumière
- se distinguent des **ondes électromagnétiques** (ondes radio, IR, optique, UV, X et gamma), qui sont des perturbations du champ électromagnétique se propageant *dans* l'espace-temps : les **ondes gravitationnelles** sont des ondes de l'espace-temps *lui-même*

Effets du passage d'une onde gravitationnelle (1)



Mesure la distance L entre deux masses libres par la méthode "radar" :

$$L = \frac{1}{2} c(t_2 - t_1)$$



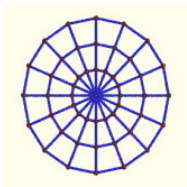
Variation de la longueur L au passage d'une onde gravitationnelle :

$$\delta L \simeq h L$$

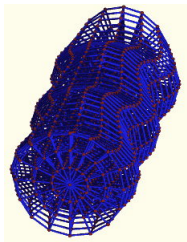
h = amplitude de l'onde gravitationnelle

En pratique h est si petit que nos sens n'y sont pas sensibles :
pour les principales **sources astrophysiques** : $h \sim 10^{-21}$!!!

Effets du passage d'une onde gravitationnelle (2)



← déplacement de particules tests dans un plan perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde



← propagation de l'onde

[<http://www.einstein-online.info/>]

Génération d'ondes gravitationnelles en laboratoire

Au XIX^{ème} siècle, Hertz a démontré l'existence des ondes électromagnétiques en les produisant dans son laboratoire.

Peut-on faire la même chose pour les ondes gravitationnelles ?

- ondes électromagnétiques : produites par l'accélération des *charges électriques*
- ondes gravitationnelles : produites par l'accélération des *masses*

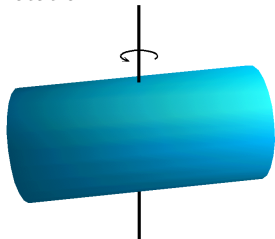
Génération d'ondes gravitationnelles en laboratoire

Au XIX^{ème} siècle, Hertz a démontré l'existence des ondes électromagnétiques en les produisant dans son laboratoire.

Peut-on faire la même chose pour les ondes gravitationnelles ?

- ondes électromagnétiques : produites par l'accélération des *charges électriques*
- ondes gravitationnelles : produites par l'accélération des *masses*

Un moyen simple d'accélérer une masse de manière constante : la mettre *en rotation* :



Cylindre d'acier : diamètre = 1 m, longueur = 20 m, masse = 490 t, tournant à 28 rad/s (limite de rupture)

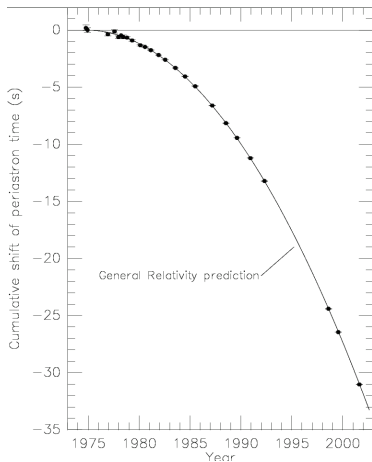
⇒ énergie émise sous forme d'ondes gravitationnelles par unité de temps :

2×10^{-29} W !

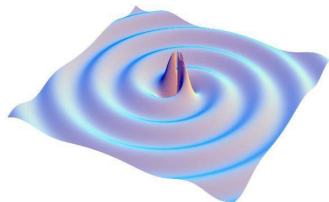
⇒ **Aucun espoir de détection !**

Les ondes gravitationnelles existent !

Émission d'ondes gravitationnelles par le système binaire d'étoiles à neutrons PSR B1913+16 (*pulsar binaire*)



[Weisber & Taylor (2002)]

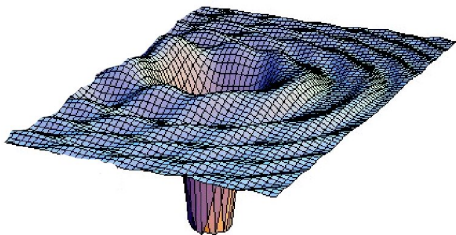


← Décroissance observée de la période orbitale $P = 7 \text{ h } 45 \text{ min}$ du pulsar binaire PSR B1913+16 sous l'effet de la *réaction au rayonnement gravitationnel*

⇒ coalescence dans 140 millions d'années.

Prix Nobel de Physique 1993
à R. Hulse & J. Taylor

Les ondes gravitationnelles pour “voir” les trous noirs



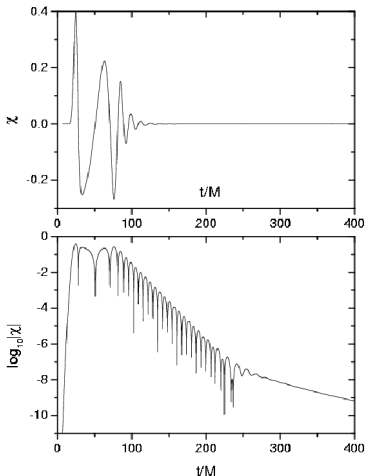
Lien intime entre les trous noirs et les ondes gravitationnelles :

Les trous noirs et les ondes gravitationnelles sont tous deux des **distorsions de l'espace-temps** :

- distorsions extrêmes (trous noirs)
- distorsions minimales (ondes gravitationnelles)

En particulier, trous noirs et ondes gravitationnelles sont tous deux des **solutions du vide** des équations de la Relativité Générale (équations d'Einstein)

Oscillations des trous noirs



[Kokkotas & Schmidt, Liv. Rev. Relat. 2, 2 (1999)]

Trous noirs hors d'équilibre :

- trou noir nouvellement formé : *cœur de supernova, coalescence d'un système binaire d'objets compacts*
- trou noir excité par la *chute de matière* (étoile ou accréation de plasma (*microquasars*))

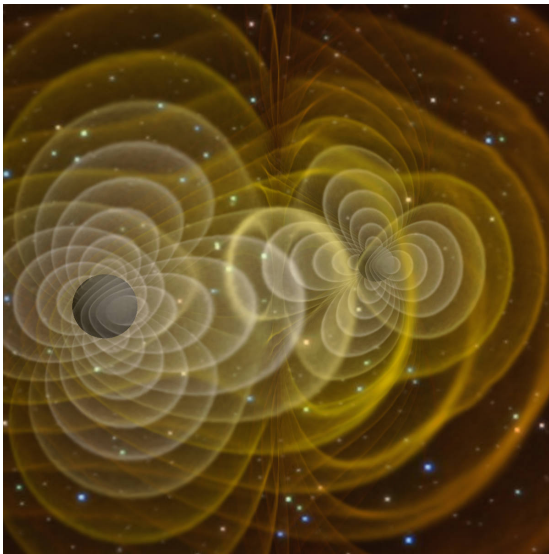
Désexcitation par émission d'ondes gravitationnelles sous forme de **modes quasi-normaux**.

La détection de ces ondes gravitationnelles permet la mesure directe de la masse M et du moment cinétique J du trou noir.

$$M = 10 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 1.2 \text{ kHz} & (\text{VIRGO}) \\ \tau = 0.55 \text{ ms} \end{cases}$$

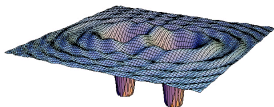
$$M = 10^6 M_{\odot} \Rightarrow \begin{cases} f = 12 \text{ mHz} & (\text{LISA}) \\ \tau = 55 \text{ s} \end{cases}$$

Coalescence d'un système binaire de trous noirs



Baker et al., 2006

Coalescence d'un système binaire de trous noirs



Intérêt pour la détection : la source principale attendue pour VIRGO et LIGO

Intérêt théorique :

- trou noir binaire : le problème à deux corps par excellence de la Relativité Générale
- test de la Relativité Générale dans un régime dynamique et en champ fort

Intérêt astrophysique :

- taux de coalescences \implies évolution des étoiles massives
- signal gravitationnel de la phase spirale \implies mesure de la constante de Hubble H_0
- observations des trous noirs supermassifs à grand $z \implies$ formation des galaxies