Généralités
Gravitation et courbure
Effets et existence
Production
Sources astrophysiques
Binaires
Étoiles à neutrons et supernovae
Calculs analytiques et numériques
Conclusions – Perspectives

Sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles

Jérôme Novak

Jerome.Novak(at)obspm.fr

Laboratoire de l'Univers et de ses Théories (LUTH)
CNRS / Observatoire de Paris

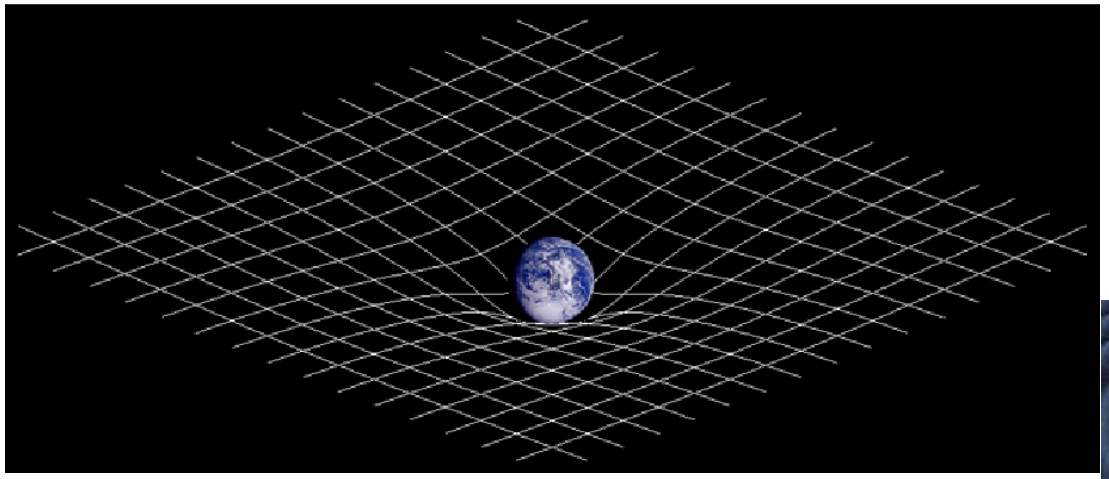
Séminaire à deux voix au CEA,
21 juin 2005

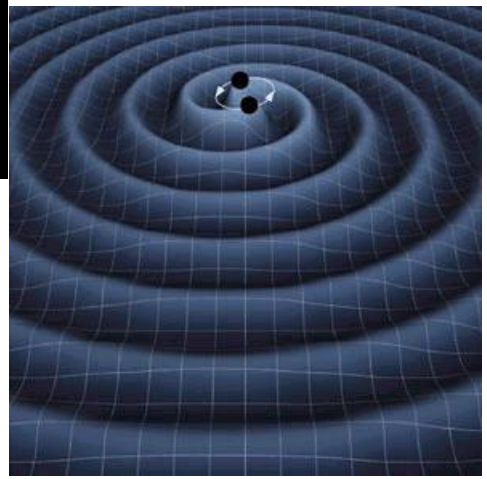
Outline

1. Ondes gravitationnelles – Généralités
   - Gravitation et courbure
   - Effets et existence
   - Production d'ondes gravitationnelles
2. Sources astrophysiques
   - Binaires
   - Étoiles à neutrons et supernovae
   - Approximations analytiques et simulations numériques

Gravitation et courbure

D'après la Relativité Générale d'Einstein (et aussi des tests et des observations), les masses courbent l'espace-temps.



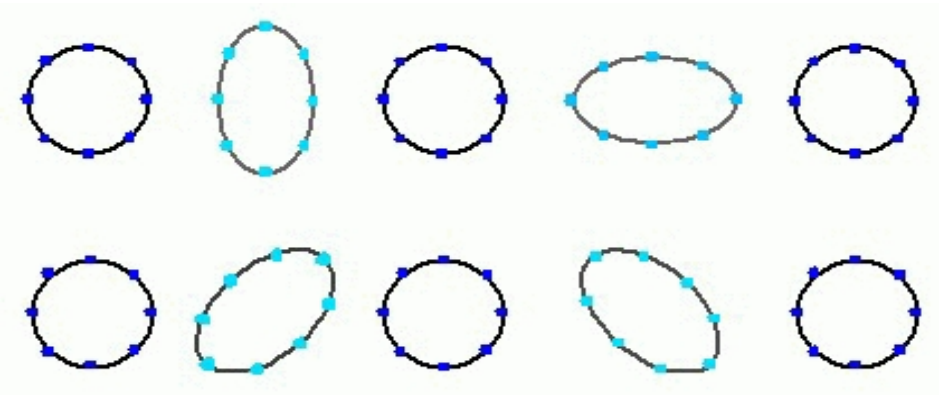


Quand les masses bougent, cette courbure se propage, comme des vagues à la surface de l'eau ⇒ondes gravitationnelles

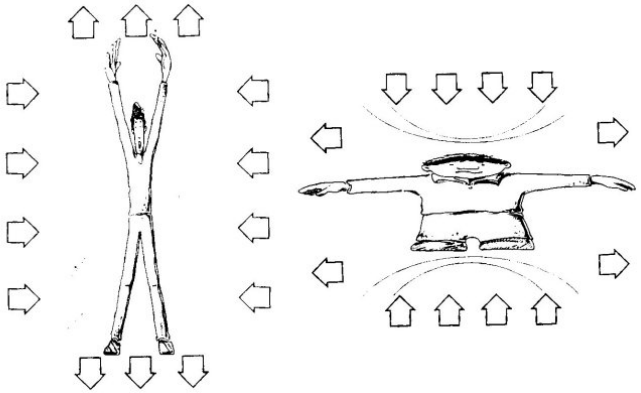
Loin des masses, ces plis d'espace-temps se déplacent à la vitesse de la lumière.

Effets des ondes gravitationnelles

L'espace-temps est légèrement modifié ⇒les distances changent pendant un bref moment.

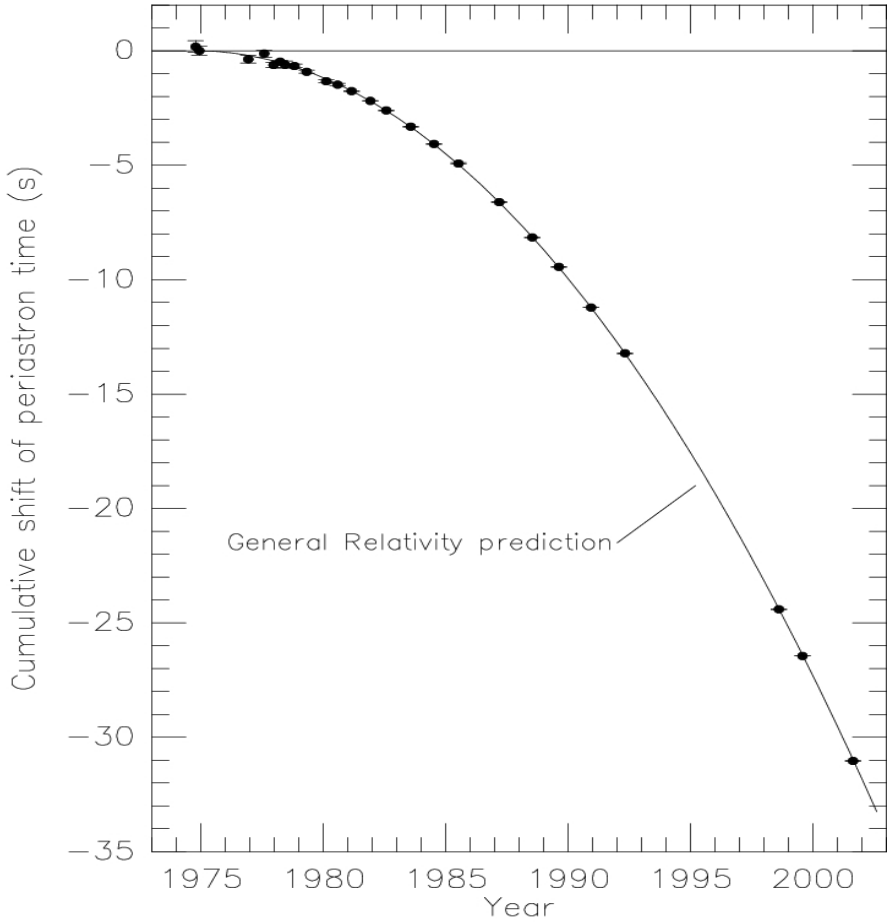


Après le passage de l'onde, tout redevient "comme avant", comme au passage d'une vague unique au milieu de l'eau.

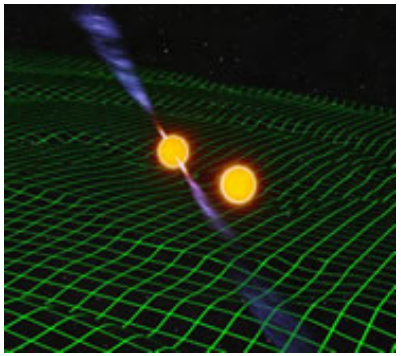


Les amplitudes sont **énormément** grossies...

Preuve observationnelle d'existence



Le rapprochement des deux étoiles à neutrons (pulsars) de PSR1913+16 correspond, avec une précision extrême, à ce qui est prédit si ces deux étoiles émettent des ondes gravitationnelles.



⇒Prix Nobel de Physique pour Hulse et Taylor en 1993

Estimation de l'émission

En utilisant les équations d'Einstein

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g^{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\mu\nu}$$

- au premier ordre linéaire, on trouve une équation d'onde pour $h \sim \ddot{Q}$ (moment quadrupolaire de la source) ;
- l'effet d'une onde gravitationnelle sur deux particules de masses négligeables est la variation de leur distance au cours du temps $\Delta l / l \simeq h$;
- le flux émis à une fréquence f (fréquence mécanique) est

$$F = 0.3 \left(\frac{f}{1 \text{ kHz}} \right)^2 \left(\frac{h}{10^{-21}} \right)^2 \quad \text{Wm}^{-2}$$

- la puissance (ou luminosité) gravitationnelle rayonnée par une source est

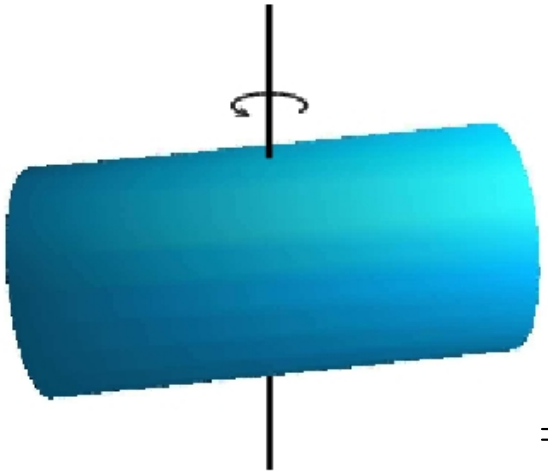
$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

Ondes gravitationnelles en laboratoire

Au XIXe siècle, le physicien allemand Hertz prouve l'existence des ondes électromagnétiques en les produisant dans son laboratoire. Peut-on faire la même chose pour les ondes gravitationnelles ?

- les ondes électromagnétiques sont produites par la variation du moment dipolaire des charges électriques,
- les ondes gravitationnelles sont produites par la variation du moment quadrupolaire des masses.

Le plus efficace pour accélérer un objet, c'est de le faire tourner :



Soit un cylindre d'acier

- d'un mètre de diamètre et de **vingt** mètres de long,
- qui pèse **490 tonnes**,
- qui peut tourner à plus de 260 tours/mn (limite de rupture de l'acier),

$\Rightarrow$**aucun** espoir de détection (émission trop faible).

Quelles sources alors ?

Problème : le facteur constant dans

$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$

En introduisant le rayon de Schwarzschild (rayon du trou noir de même masse)

$$R_S = \frac{2GM}{c^2},$$

on obtient :

$$L \sim \frac{c^5}{G} s^2 \left(\frac{R_S}{R}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^6$$

$\Rightarrow$Objets compacts en mouvement relativiste et non sphériques

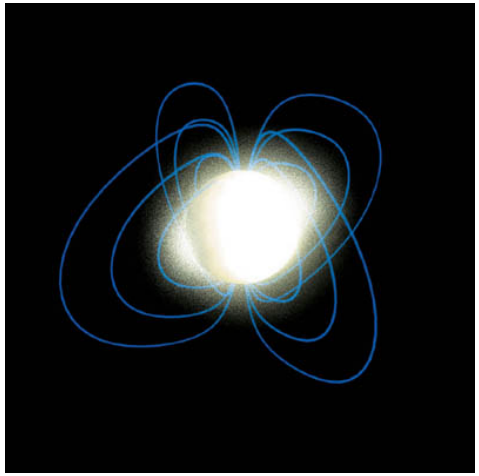
Sources astrophysiques

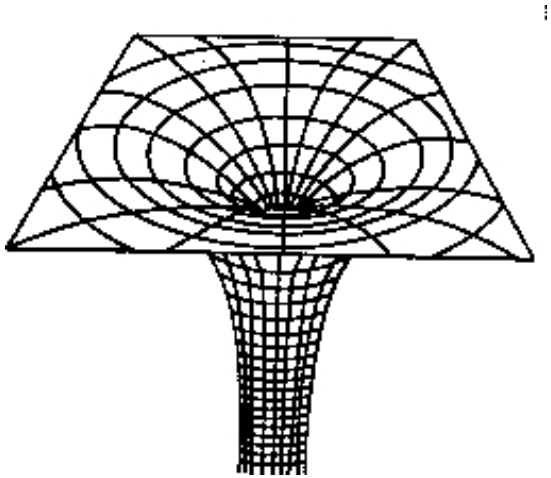
On peut donc estimer que les ondes gravitationnelles les plus fortes peuvent être émises par des masses accélérées :

- qui possèdent un très fort champ gravitationnel,
- qui vont à une vitesse proche de celle de la lumière,
- qui n'ont pas une forme sphérique.

Dans les objets astrophysiques connus, les plus efficaces semblent être :

les étoiles à neutrons,



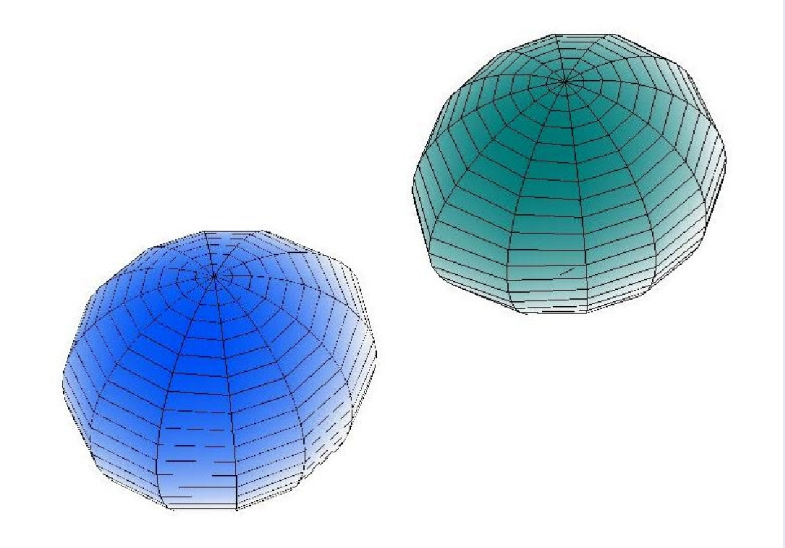


et les trous noirs.

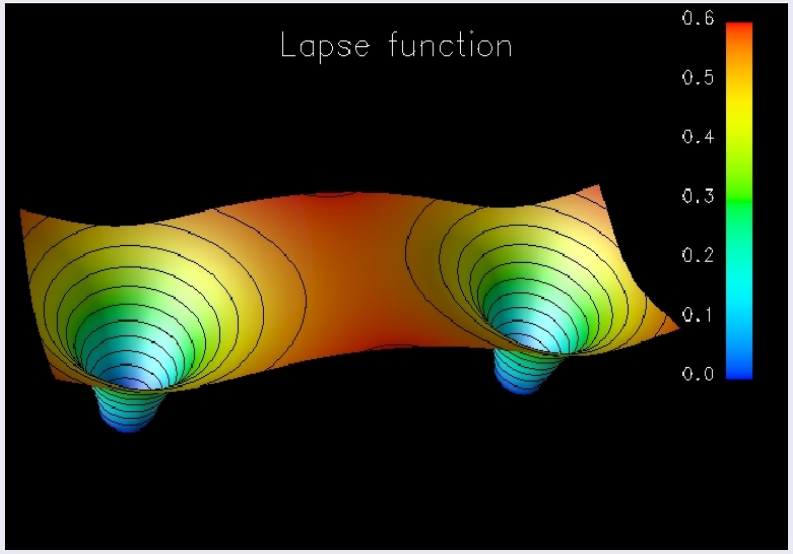
... surtout s'ils sont à deux, tournant l'un autour de l'autre...

Sources attendues
Les binaires

deux étoiles à neutrons ...



... ou deux trous noirs

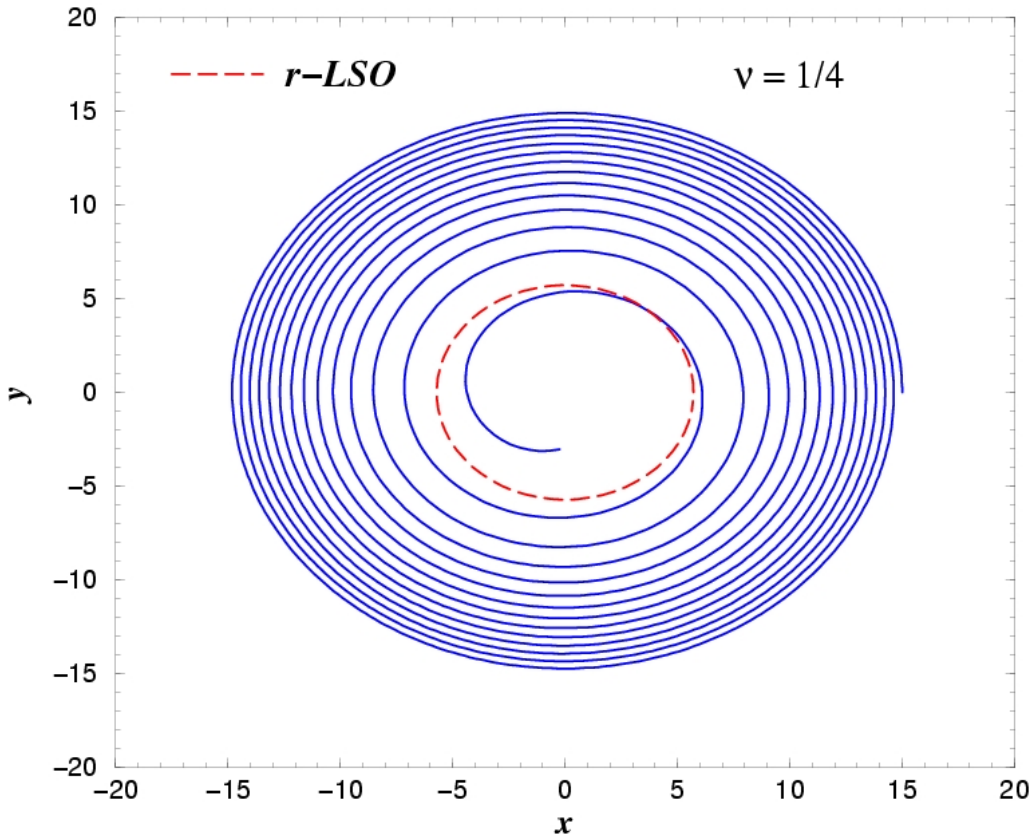


tournant l'un autour de l'autre, se rapprochant jusqu'à fusionner...

- événements catastrophiques rares, mais très riches en ondes gravitationnelles,
- informations sur le nombres de tels "couples" et ainsi sur la vie des étoiles.

Sources attendues

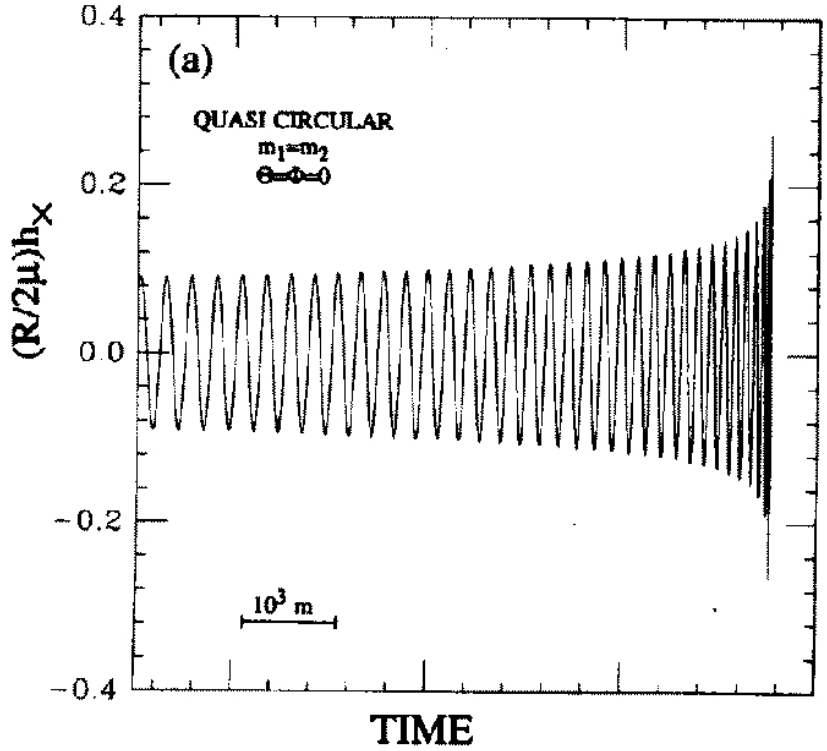
Les binaires d'astres compacts



La phase *spirallante* s'arrête quand :

- il y a contact pour les étoiles à neutrons ,
- on arrive à la dernière orbite stable pour les trous noirs.

Signal attendu des binaires



Calcul analytique

⇒masses ponctuelles

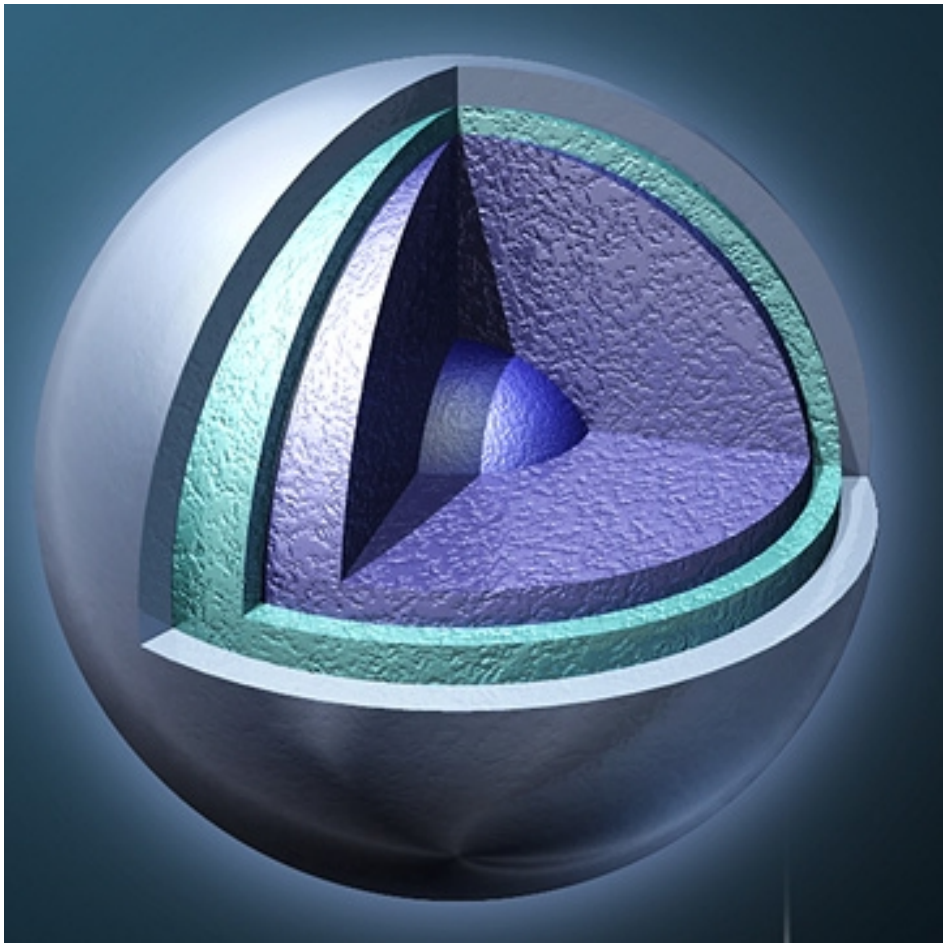
$$h \sim 10^{-21} \frac{1\text{Mpc}}{r} \left[\frac{M}{M_\odot}\right]^{5/3} \times \left[\frac{f}{1\,kHz}\right]^{2/3}.$$

En intégrant sur n cycles, le rapport signal/bruit croît comme $\sqrt{n}$.

⇒intérêt des détecteurs à basses fréquences
Signaux très puissants, mais combien de sources possibles ?

Sources attendues
Étoiles à neutrons

Les densités (supra-)nucléaires de ces astres et leur faible température rendent leur composition incertaine : la physique nucléaire terrestre (ou solaire) est très différente de celle de ces astres.



- comment vibre une étoile à neutrons ?
- comment se comporte la matière ultra-dense ?

Sources attendues

Étoiles à neutrons en rotation rapide

- un certains nombres de ces astres sont observés en tant que pulsars en radio ou en X
- on connaît ainsi leur fréquence de rotation : du mHz au kHz
- il faut pourtant avoir une variation temporelle du *quadrupole* $\Rightarrow$déformation / axe

Sources de déformation

- Le champ magnétique (qqs GT) : dans les modèles de pulsars, le moment magnétique n'est pas aligné avec l'axe de rotation.
- Instabilités du cœur : la perte de moment cinétique par émission d'ondes gravitationnelles induit la croissance de certains modes oscillatoires pour les étoiles en rotation (modes r).
- Ré-arrangements de l'écorce (phénomènes de glitch).

Sources nombreuses, mais quelle efficacité ?

Sources attendues

SUPERNOVÆ

- étape ultime de la vie d'une étoile massive ($\gtrsim 12 M_\odot$), elle donne naissance à une étoile à neutrons ou un trou noir
- phénomène relativiste impliquant un astre compact
- les ondes gravitationnelles ne sont pas absorbées par la matière, elles peuvent donc arriver depuis le cœur dense des *supernovæ*

Première source étudiée car l'énergie libérée $\sim 0.1 M_\odot c^2$ (essentiellement sous forme de neutrinos).
Sources très nombreuses, mais quelle efficacité ?

On ne sait toujours pas "faire exploser" une *supernova* sur ordinateur.

- que se passe-t-il au cœur d'une *supernova* ?
- comment naissent les étoiles à neutrons ou les trous noirs ?

⇒éléments de réponse grâce aux ondes gravitationnelles.

Approximations analytiques

Pour (par exemple) le calcul de l'évolution orbitale des systèmes binaires d'astres compacts :

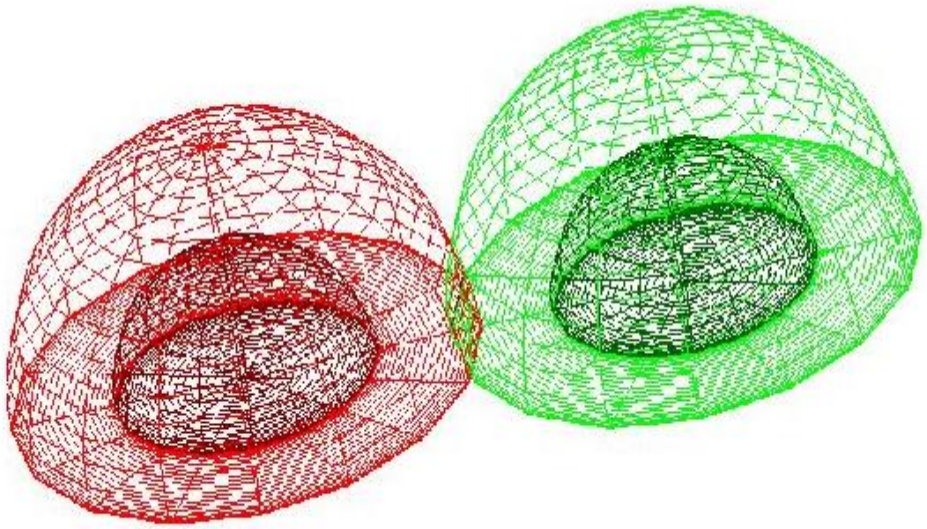
- les astres sont modélisés par des masses ponctuelles
- développement en puissances de v/c (post-Newtonien) près de la source
- raccord avec un développement en puissances de G (post-Minkowskien) dans la zone d'onde
- itérations en utilisant les équations d'Einstein

$\Rightarrow$non valide pour des sources à des vitesses proches de c et pour des distances entre les astres comparables à leur rayon

Simulations numériques à l'Observatoire de Paris

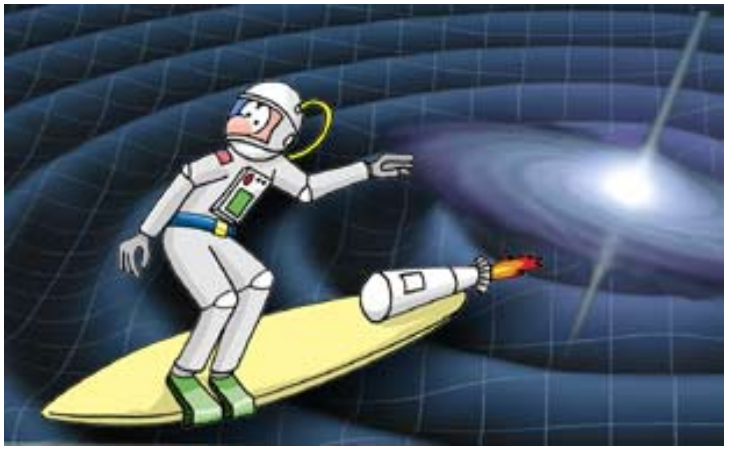
Modèle

- système de 10 équations (couplées) aux dérivées partielles du second ordre, non-linéaires et dépendant de (t, r, θ, φ) ;
- système hydrodynamique + conservation des particules (5 EDP) ;
- une équation d'état.



$\Rightarrow$utilisation des méthodes spectrales en coordonnées sphériques.

Bilan – Perspectives

- nouveaux messagers provenant des objets les moins bien connus de l'Univers
- La modélisation, analytique ou numérique, de signaux fiables est une absolue nécessité pour la détection des ondes gravitationnelles
- à l'avenir : détecteur spatial LISA (prévu pour 2013) à basses fréquences
- début d'une véritable astrophysique gravitationnelle

... et peut-être des surprises ...