

# LES ONDES GRAVITATIONNELLES ET L'EXPÉRIENCE VIRGO

Jérôme Novak

Jerome.Novak(at)obspm.fr

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

*en collaboration avec*  
Silvano Bonazzola, Philippe Grandclément,  
Éric Gourgoulhon & Lap-Ming Lin

Conférence à l'Association des Anciens de la Radio et de  
l'Électronique, 24 mai 2005

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production

VIRGO

Sources

astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –

Perspectives

## 1 ONDES GRAVITATIONNELLES – GÉNÉRALITÉS

- Définition
- Effets et existence

## 2 DÉTECTIONS, LE PROJET FRANCO-ITALIEN VIRGO

- Production d'ondes gravitationnelles
- Détecteurs d'ondes gravitationnelles

## 3 SOURCES ASTROPHYSIQUES

- Binaires
- Étoiles
- Simulations numériques

# COMMENT A-T-ON DES INFORMATIONS SUR L'UNIVERS ?

Les ondes gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et existence

Observations

Production VIRGO

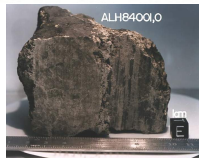
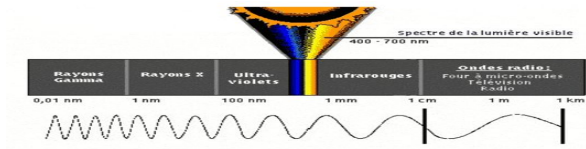
Sources astrophysiques

Binaires

Étoiles  
Simulations numériques

Conclusions – Perspectives

- en regardant la lumière  $\Rightarrow$  ondes électromagnétiques



- en examinant ce qui tombe du ciel ...

- en allant chercher des indices sur place (Apollo, Mars Explorer, Genesis(?!)...) Ces deux dernières méthodes sont limitées au système solaire.
- dernier canal en date : les neutrinos
- et, à l'avenir les ondes gravitationnelles

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

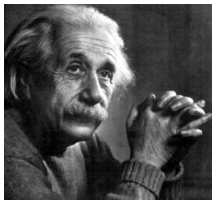
Production  
VIRGOSources  
astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériquesConclusions –  
Perspectives

Dans la théorie de Newton, la force de gravité se déplace **instantanément**



Dans le cadre de la *Relativité Générale*, cette force se propage, au maximum à la vitesse de la lumière

⇒ c'est cette théorie (Einstein, 1915) qui prédit l'existence d'ondes gravitationnelles.

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production  
VIRGO

Sources  
astrophysiques

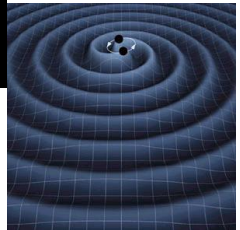
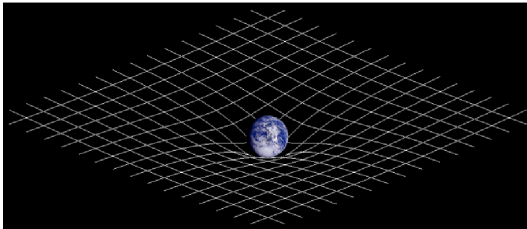
Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives

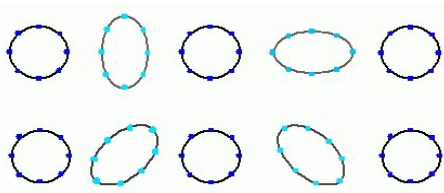
D'après la Relativité Générale d'Einstein (et aussi des tests et des observations), les masses courbent l'espace-temps.



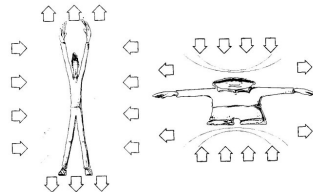
Quand les masses bougent, cette courbure se propage, comme des vagues à la surface de l'eau ⇒ **ondes gravitationnelles**

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

L'espace-temps est légèrement modifié  $\Rightarrow$  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...

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production

VIRGO

Sources

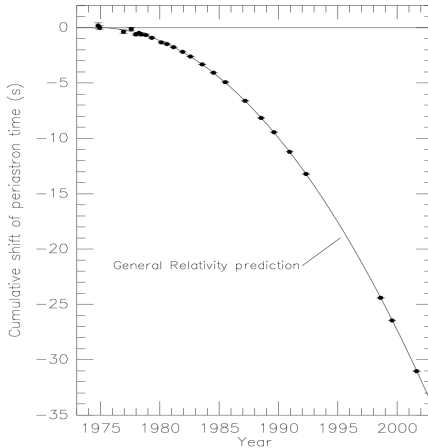
astrophysiques

Binaires

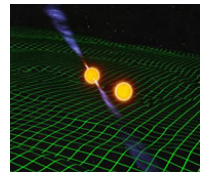
Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives



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

En utilisant les équations d'Einstein

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

- 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

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

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

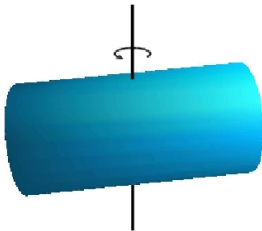
$$L \sim \frac{G}{c^5} s^2 \omega^6 M^2 R^4$$



Au XIX<sup>e</sup> 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),

⇒ **aucun** espoir de détection (émission trop faible).

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 :

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

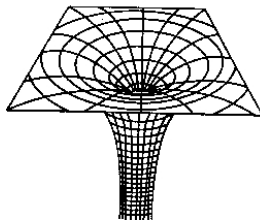
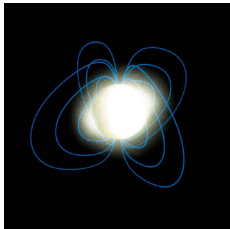
⇒ Objets **compacts** en mouvement relativiste et non sphériques

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...

- 1 Barres résonnantes : Masses résonnantes d'alliages à base d'aluminium, refroidies par cryogénie à 1 K. Cinq sont actuellement en fonctionnement : EXPLORER, AURIGA, NAUTILUS (Italie); ALLEGRO (États-Unis) et NIOBE (Australie). La bande passante est très étroite ( $\sim 1Hz$ ) autour de ( $\sim 1kHz$ ). Le réseau de ces barres cherche surtout à détecter des signaux de type "sursauts" en coïncidence.
- 2 Interféromètres LASER : Interféromètres de type Michelson mesurant la variation de distance relative des deux bras. TAMA (Japon) et LIGO (2 aux États-Unis) sont en fonctionnement et 2 autres sont en callibrage : GEO600 (Allemagne) et VIRGO (Italie). Ils ont une large bande passante ( $10 \rightarrow 6000$  Hz pour VIRGO) permettant la recherche de sources quasi-périodiques.

L'amplitude des ondes gravitationnelles arrivant sur Terre est très faible et la variation de distance à mesurer correspond à :

la taille d'un atome par rapport à la distance Terre-Soleil !!

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production

VIRGO

Sources

astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives

VIRGO



France/Italie, à  
Pise



LIGO États-Unis, à  
Livingston  
(Louisiane) et  
Hanford  
(Washington)



Les bras où passe le LASER font 3 km (VIRGO) et 4 km (LIGO) de long ... avec un vide quasi-parfait !

⇒viennent d'être construits et commencent à peine à acquérir des données

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production

VIRGO

Sources

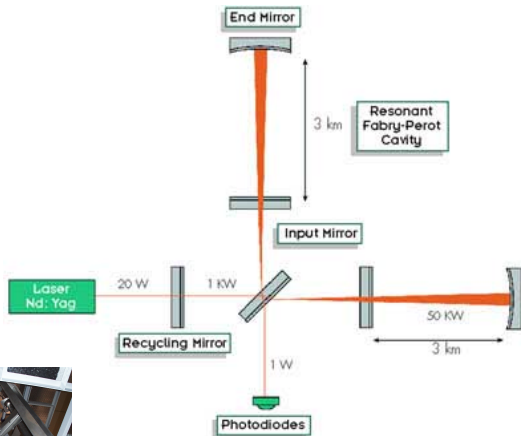
astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives



Près de Pise, en Italie.

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition  
Effets et  
existence

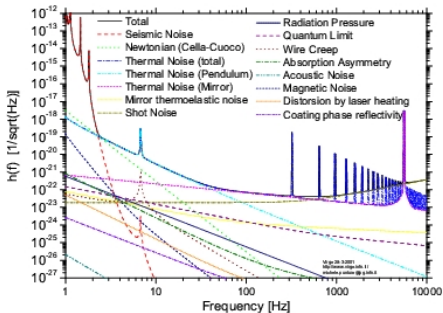
Observations  
Production  
VIRGO

Sources  
astrophysiques

Binaires  
Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives



Signal de sortie du  
détecteur :

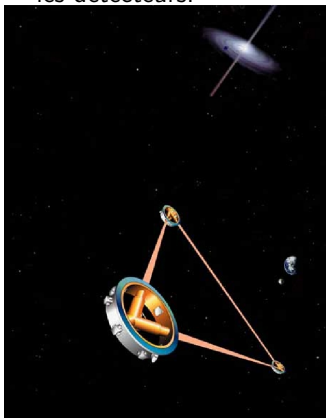
$$\sigma(t) = h(t) + n(t), \text{ avec}$$

$$h(t) < n(t) \text{ (rapport signal / bruit attendu très faible)}$$

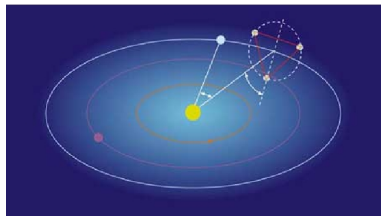
- Nécessité de **filtrer**, en utilisant (par exemple) des filtres optimaux
- Connaître le signal à l'avance en fonction de paramètres physiques
- atténuation si le signal ne vient pas du zénith

⇒ détection en coïncidence (VIRGO + 2 × LIGO)

Sur Terre, les vibrations du sol (routes, activité sismique, ...) limitent les détecteurs.



⇒ projet LISA (ESA / NASA) prévu pour être lancé en 2012 : 3 satellites à 5 millions de kilomètres les uns des autres, tournants autour du Soleil...



Beaucoup plus de sources visibles (plus basses fréquences : 0.0001 à 1 Hz).



Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production  
VIRGO

Sources  
astrophysiques

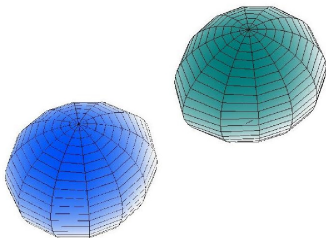
**Binaires**

Étoiles

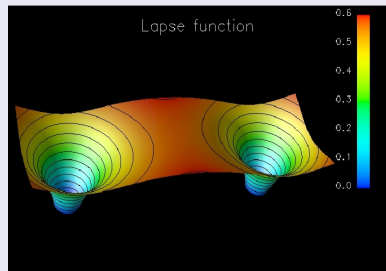
Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives

### 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 nombre de tels “couples” et ainsi sur la vie des étoiles.

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production

VIRGO

Sources

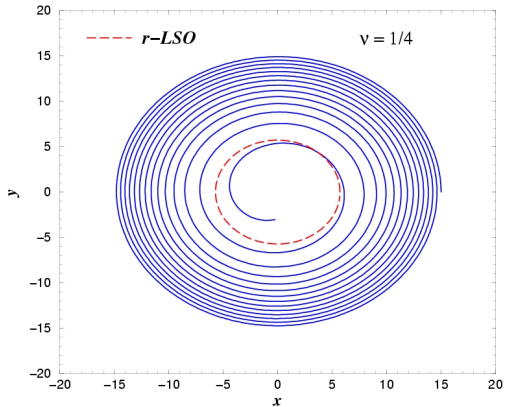
astrophysiques

**Binaires**

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives



La phase *spirillante* s'arrête quand :

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

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production  
VIRGO

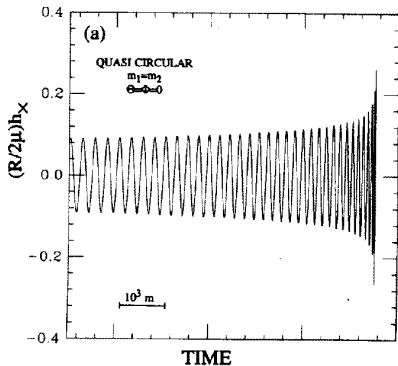
Sources  
astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives



⇒ intérêt des détecteurs à basses fréquences

Signaux très puissants, mais combien de sources possibles ?

## CALCUL ANALYTIQUE

⇒ masses ponctuelles

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

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

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production  
VIRGO

Sources  
astrophysiques

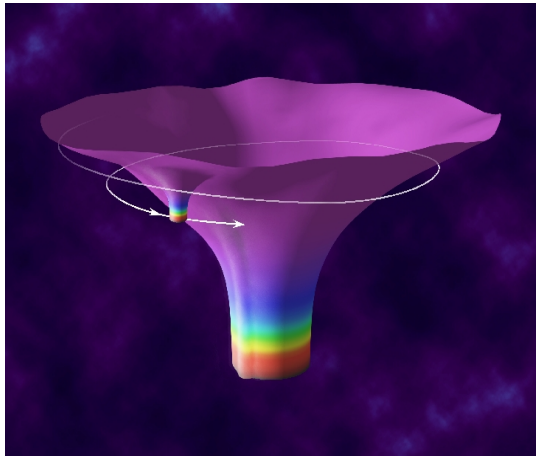
Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives

Détections assurées  
pour LISA !  
à quoi ressemble le  
voisinage d'un trou  
noir galactique ( $10^6$   
à  $10^9$  masses  
solaires) ?



⇒ preuve que les trous noirs sont comme nous nous les représentons...

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

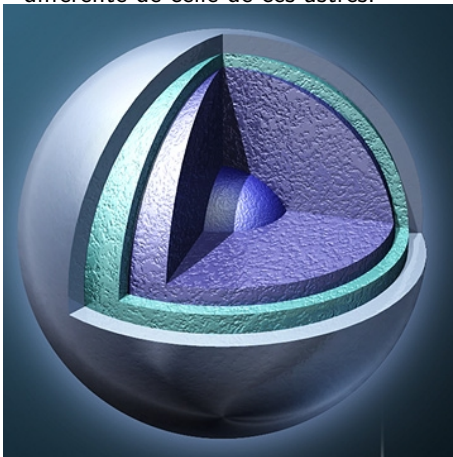
Production  
VIRGOSources  
astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériquesConclusions –  
Perspectives

Les densités incroyables de ces astres 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 ?

## 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* ⇒ déformation / axe

## SOURCES DE DÉFORMATION

- Le champ magnétique (qqz 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 ?

Les ondes  
gravitationnelles

Jérôme Novak

Généralités

Définition

Effets et  
existence

Observations

Production  
VIRGO

Sources  
astrophysiques

Binaires

Étoiles

Simulations  
numériques

Conclusions –  
Perspectives

## SUPERNOVÆ

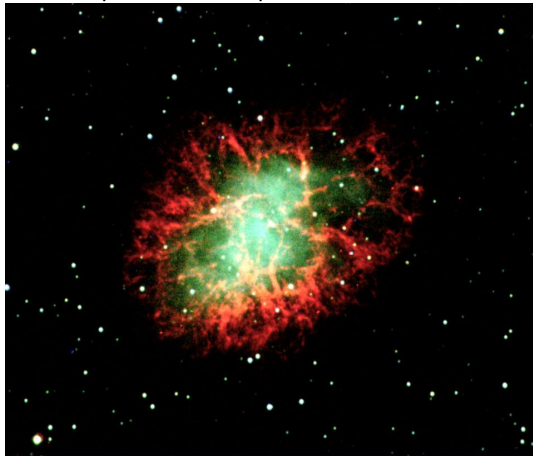
- étape ultime de la vie d'une étoile massive ( $\gtrsim 12M_{\odot}$ ), elle donne naissance à une étoile à neutrons ou un trou noir
- phénomène relativiste impliquant un astre compact
- les ondes gravitationnelles ne sont pas absorbées par la matière, elles peuvent donc arriver depuis le cœur dense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

Première source étudiée car l'énergie libérée  $\sim 0.1M_{\odot}c^2$   
(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 ?

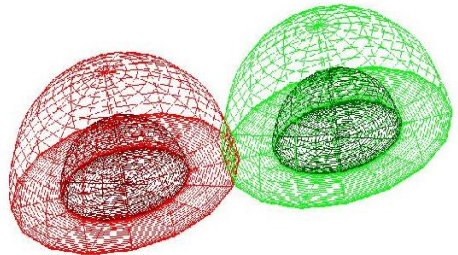


⇒ éléments de réponse grâce aux ondes gravitationnelles.



## MODÈLE

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



⇒ utilisation des **méthodes spectrales** en coordonnées sphériques.

- nouveaux messagers provenant des objets les moins bien connus de l'Univers
- des détecteurs qui viennent d'être construits avec la nécessité d'accomplir des prouesses technologiques ("un atome sur la distance Terre-Soleil")
- La simulation de signaux fiables est une absolue nécessité pour la détection des ondes gravitationnelles
- à l'avenir : détecteur spatial LISA pour une véritable **astrophysique gravitationnelle**

... et peut-être des surprises ...

