

# Recherche d'ondes gravitationnelles associées aux sursauts gamma

Michał Wąs

Laboratoire de l'accélérateur linéaire  
Collaboration Virgo

Journées Jeunes Chercheurs 2010, Angers

# Plan

- 1 Physique des ondes gravitationnelles
  - Relativité Générale
  - Détecteurs d'ondes gravitationnelles
- 2 Sursauts Gamma
  - Astrophysique
  - Analyse de données

# Relativité Générale → Ondes gravitationnelles

- Relativité Générale : l'espace-temps est courbé, courbure décrite par la métrique

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu,$$

la métrique est générée par la matière/énergie (équations d'Einstein)

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Ondes gravitationnelles (OG) linéarisation de la RG en champ faible

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \quad h_{\mu\nu} \ll 1 \quad \eta_{\mu\nu} \text{-- métrique plate de Minkowski}$$

Réécriture des équations d'Einstein dans le vide

$$\Rightarrow \partial^\sigma \partial_\sigma h_{\mu\nu} = 0$$

**Les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière**

- A priori 10 degrés de liberté pour  $h_{\mu\nu}$  (symétrique)

En réalité, contraintes de jauge → **2 polarisations**

$$h_{\mu\nu} = h_+ A_{\mu\nu} + h_\times B_{\mu\nu}$$

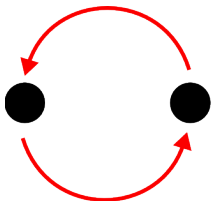
# Source d'ondes gravitationnelles

Luminosité (puissance émise) en OG

$$\mathcal{L}_{OG} = \frac{G}{5c^5} \langle \ddot{Q}_{\mu\nu} \ddot{Q}^{\mu\nu} \rangle \simeq \frac{c^5}{G} \underbrace{\epsilon^2}_{\text{asymétrique}} \underbrace{\left(\frac{R_s}{R}\right)^2}_{\text{compact}} \underbrace{\left(\frac{v}{c}\right)^6}_{\text{relativiste}}$$

- Une bonne source est :
  - ▶ asymétrique  $\rightarrow \epsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \sim 1$
  - ▶ compacte  $\rightarrow$  taille  $R$  proche du rayon de Schwartzschild  $R_s$
  - ▶ mouvement relativiste  $v \sim c$
- Source terrestre
  - ▶ barre de 1 tonne  $\rightarrow$  pas compact
  - ▶ 50 tour par seconde, distance 1 m  $\rightarrow$  pas relativiste
  - $\Rightarrow$  amplitude  $h \sim 10^{-35}$ , flux  $\sim 10^{-31} \text{ Wm}^{-2} \dots$
- $\Rightarrow$  Source astrophysique
  - ▶ Coalescence de 2 étoiles à neutron à 10 Mpc (quelques dizaines de galaxies)
  - ▶ amplitude  $h \sim 10^{-21}$ , flux  $\sim 10^{-3} \text{ Wm}^{-2} \rightarrow$  envisageable
- NB : rayon terrestre  $\times 10^{-21} \sim$  noyau atomique

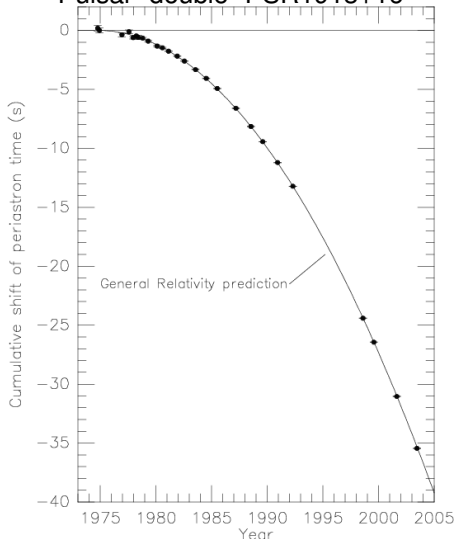
# Observation indirecte



Observation indirecte de rayonnement gravitationnelle

- Binaire d'étoile à neutron,  $\mathcal{L}_{OG}$
- ⇒ Perte d'énergie d'un système binaire d'étoiles à neutrons
- Mesure de la période de rotation par effet doppler sur ondes radios du pulsar

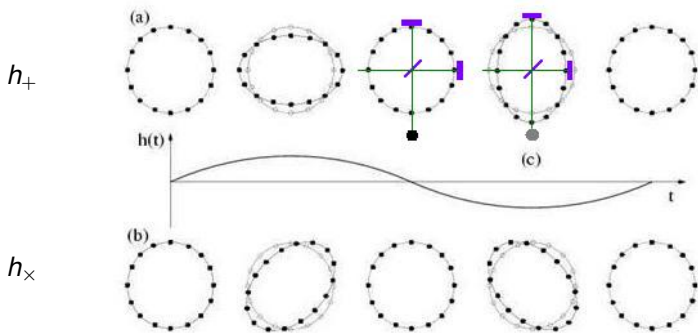
## Pulsar "double" PSR1913+16



Hulse-Taylor Prix Nobel 1993

# Propriété des ondes gravitationnelles

- $h_{\mu\nu} = h_+ A_{\mu\nu} + h_\times B_{\mu\nu}$
- Les ondes gravitationnelles sont transverses
- Déforment un cercle de masses libres en une ellipse



⇒ observation OG ↔ mesurer la longueur différentielle entre deux bras orthogonaux

# Principe de détection

Observer la variation relative de longueur de deux bras orthogonaux  $\Rightarrow$   
interféromètre de Michelson

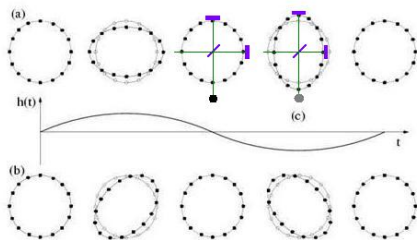
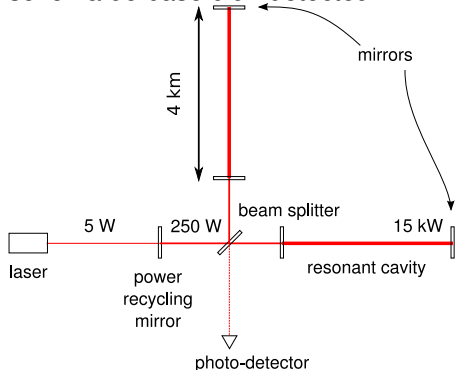


schéma de base d'un détecteur

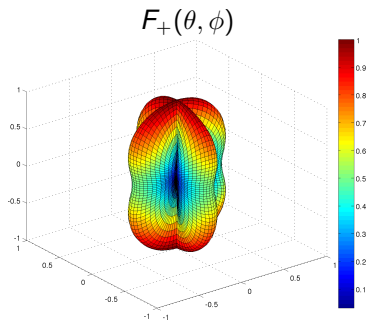


- miroirs suspendus (masses libres)
- **Observe une seule polarisation**

## Signal observé

$$d(t) = \frac{\Delta L}{L} = F_+(\theta, \phi)h_+(t) + F_\times(\theta, \phi)h_\times(t) + n(t),$$

- $d(t)$  – signal mesuré par photo-diode
- $\Delta L$  – différence de longueur des bras  
sensibilité  $\Delta L \lesssim 10^{-18} \text{ m}/\sqrt{\text{Hz}}$
- $L$  – longueur des bras
- $\theta, \phi$  – direction dans le ciel de la source
- $h_+(t), h_\times(t)$  – amplitude de l'onde gravitationnelle
- $F_+, F_\times$  – facteur d'antenne (géométrie),  
↔ détecteur sensible à une seule polarisation
- $n(t)$  – bruit du détecteur



détecteur pas directionnel !



# Réseau de détecteurs

## Virgo



- OG partout pareil modulo temps de vol
- 3 détecteur → localisation dans le ciel par triangulation

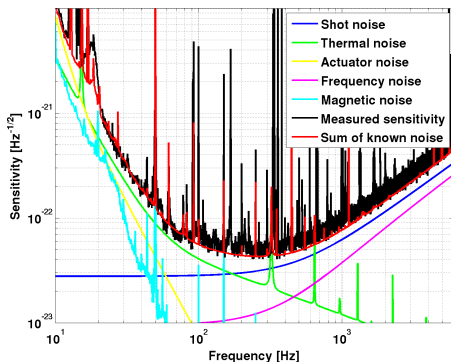
⇒ Groupe de physique / données en commun entre tous les détecteurs

## Réseau mondial de détecteurs d'OG



# Difficulté principale → le bruit

## • Bruit coloré



Sensibilité de Virgo

## Sources fondamentales de bruits

- Basse fréquence – bruit sismique
- Fréquence intermédiaire – bruit thermique
- Haute fréquence – bruit de comptage de photons

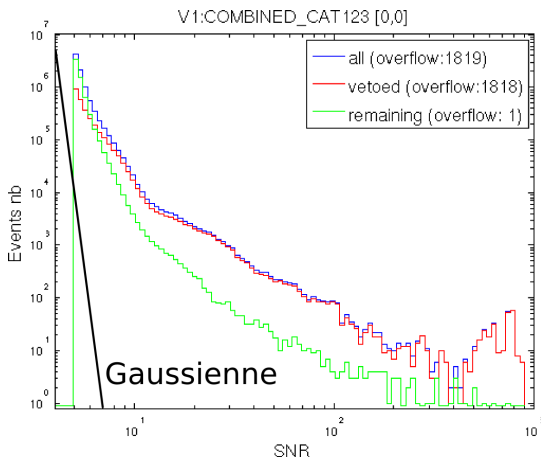
## Autres sources

- bruit de contrôle de l'instrument
- ...

⇒ Source visible jusqu'à ~ 10 Mpc

# Difficulté principale → le bruit

## Distribution non gaussienne du bruit – “glitch”



SNR - “nombre de sigma”  
Avant-après avoir enlevé les problèmes  
compris

### Exemples :

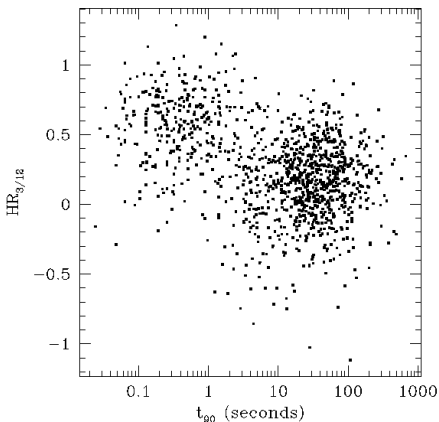
- saturations de photo-diode
- défauts d'alignement (lumière diffusée sur des montures)
- bruits acoustiques
- stabilité de l'alimentation
- météo (orage, ...)
- ...

⇒ Très loin d'une distribution Gaussienne

# Plan

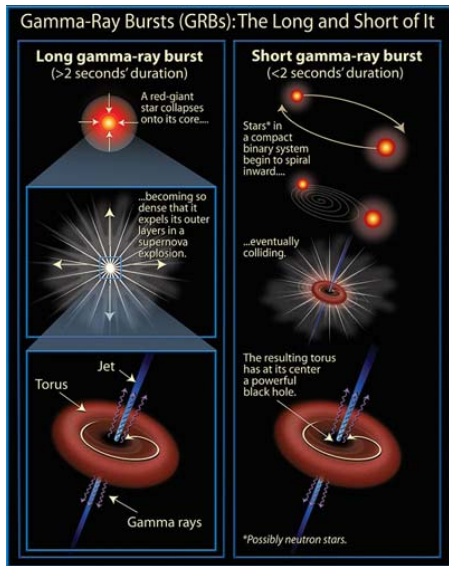
- 1 Physique des ondes gravitationnelles
  - Relativité Générale
  - DéTECTEURS d'ondes gravitationnelles
  
- 2 Sursauts Gamma
  - Astrophysique
  - Analyse de données

# Sursauts gamma



- Définition observationnelle → flash de rayon gamma
- Découverts par les satellites de surveillance pour les tests de bombes atomiques (70's)
- Deux populations
  - ▶ sursauts court  $\lesssim 2$  sec  
gammas à plus haute énergie
  - ▶ sursauts long  $\gtrsim 2$  sec  
gammas à plus basse énergie

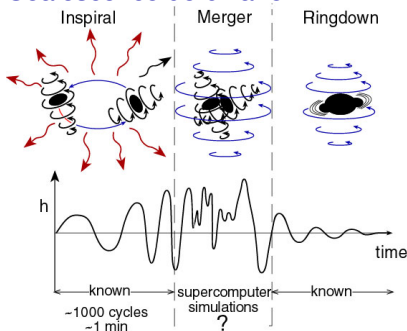
# Modèles de sursauts gamma



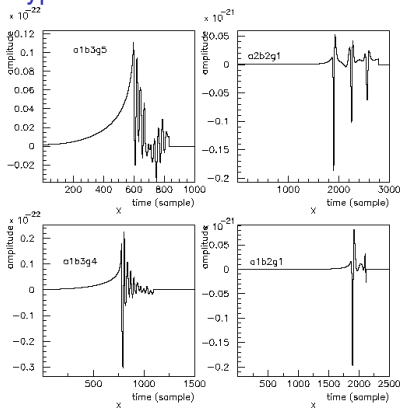
- Sursauts long
- ⇒ explosion d'étoile massive en rotation rapide (hypernova)
- Sursauts courts
- ⇒ Coalescence d'une étoile à neutrons et d'un astre compact
- Remplissent le cahier de charge : asymétrique, compact, relativiste
- Émission en gamma :  $\sim 10^{53}$  erg =  $0.1 M_{\odot} c^2$  en  $\sim 1$  sec
- Problème : la plupart des sursauts sont à  $\sim 1$  Gpc

# Ondes gravitationnelles associées

## Coalescence de binaire



## Hypernova



- Forme d'onde en grande partie connue

⇒ Recherche par calque

- Forme d'onde, amplitude incertaines
- Nombreux mécanismes d'émission

⇒ Recherche cohérente

# Méthode d'analyse cohérente

- “Chercher le même signal dans plusieurs détecteur”
- ⇒ Combinaison linéaire des données de plusieurs détecteurs

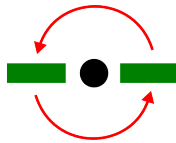
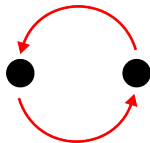
$$d_1(t) = h(t) + n_1(t)$$

$$d_2(t) = h(t) + n_2(t)$$

$$d_1(t) - d_2(t) = n_1(t) - n_2(t)$$

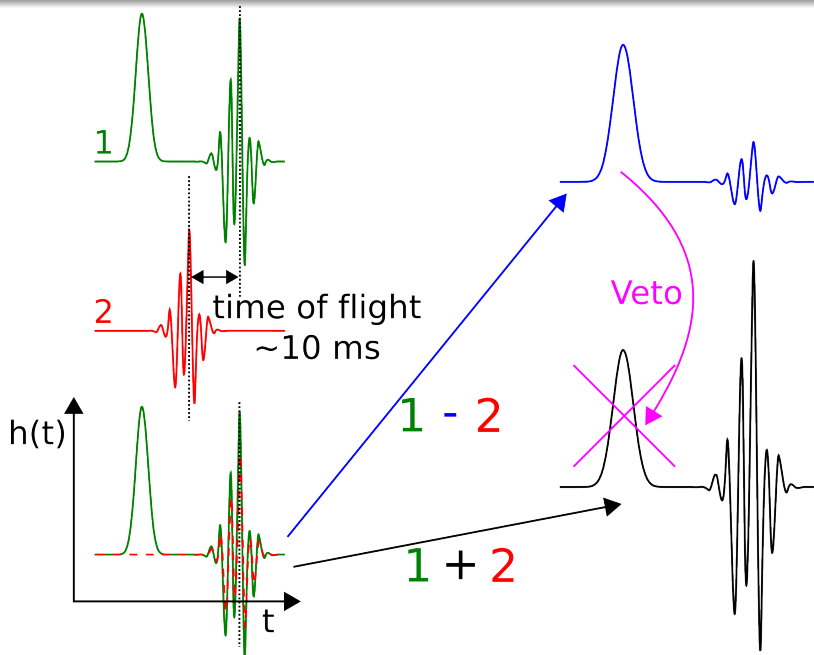
$$d_1(t) + d_2(t) = 2h(t) + n_1(t) + n_2(t)$$

- Peu de a priori sur la forme d'onde
  - ▶ court  $\lesssim 1$  sec
  - ▶ polarisation circulaire ( $h_+$  et  $h_\times$  déphasé de  $\pm\pi/2$ )

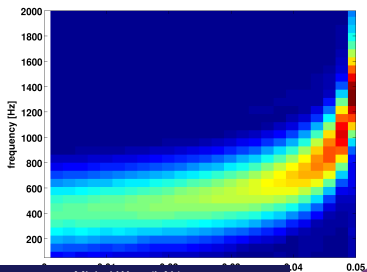
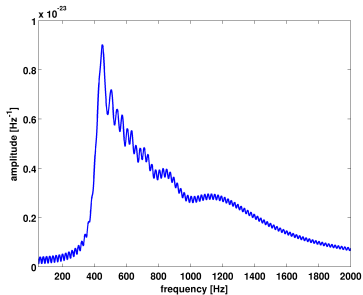
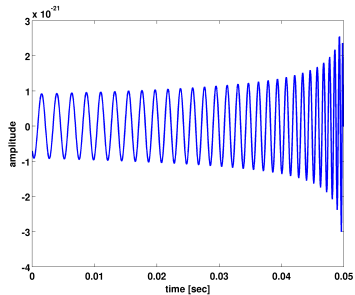


- ⇒ Méthode simple et robuste : décomposition temps-fréquence



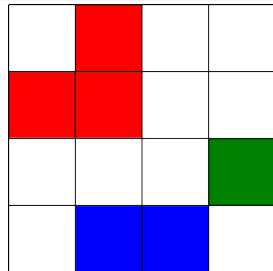


# Décomposition temps-fréquence

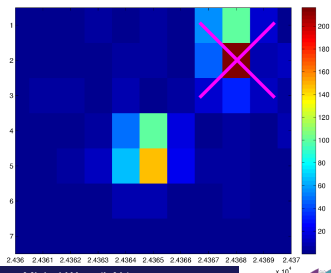


# Agglomérats de pixels en temps-fréquence

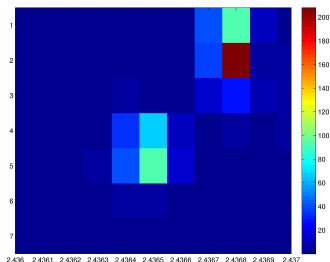
- Regrouper les 1% de pixel avec la plus grande amplitude en agglomérat
  - Sommer l'énergie (carré de l'amplitude) sur les pixels de l'agglomérats
    - statistique de détection
- ⇒ candidats d'évènements ondes gravitationnelles



### Somme

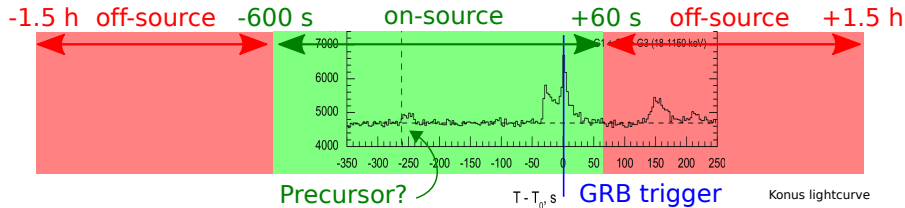


### Différence



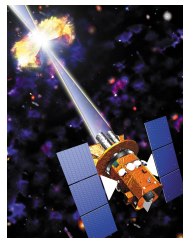
# Recherche associée aux sursauts gamma

- Sursaut gamma observé par satellite (Swift, Fermi, ...)  
distribué à travers GCN : Gamma-ray bursts Coordinates Network
- Coïncidence entre sursaut gamma et événement OG  
fenêtre  $[-10, +1]$  min



Sursauts gamma → temps et position dans le ciel connue

- Position → analyse cohérente plus simple  
(temps de vol et facteurs d'antennes connus)
  - Temps connu → moins de bruit de fond
- ⇒ Plus sensible d'un facteur  $\sim 2$  qu'une recherche en aveugle



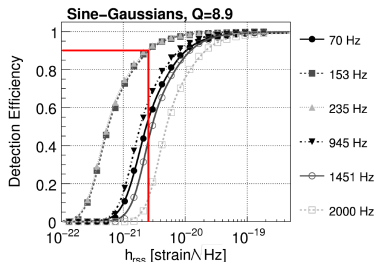
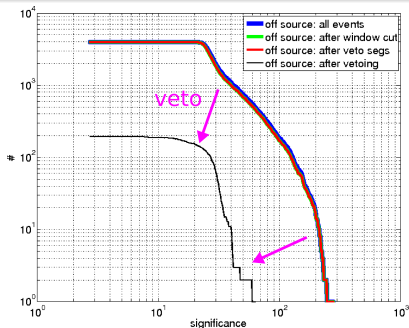
# Recherche associée aux sursauts gamma

## Bruit de fond

- Analyse de données hors source donne l'estimation du bruit de fond
- Décaler en temps par des pas de 5 sec les données entre deux détecteurs  
⇒ plus de réalisations de bruit de fond cohérent
  - ▶ Habituel : estimation de bruit avec proba  $\sim 10^{-3}$  "3 sigma"
  - ▶ Faisable : estimation de bruit avec proba  $\sim 10^{-6}$  "5 sigma"

## Limite supérieure

- Rajouter du signal simulé dans les données :  
Quelle amplitude donne une statistique plus grande que celle observée dans 90% des cas ?



# Résultats 2005–2007

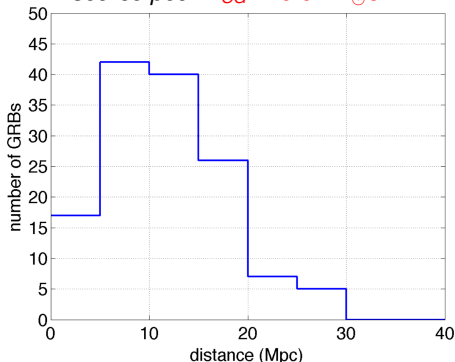
- Conversion amplitude  $\leftrightarrow$  énergie OG

$$h_{rSS} = \sqrt{\int (h_+^2(t) + h_\times^2(t)) dt}$$

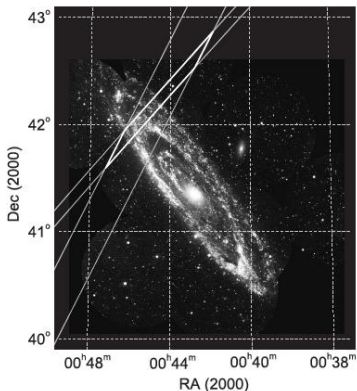
$$\frac{1}{D^2} \simeq \frac{\pi^2 c^3 f_0^2 h_{rSS}^2}{G E_{OG}}$$

- Distance d'exclusion  $\sim 15$  Mpc
- Taux de sursauts gamma à l'intérieur de l'horizon
  - ▶ Sursauts long :  $10^{-6}$  evts/yr
  - ▶ Sursauts sous-lumineux :  $10^{-3}$  evts/yr

Limite inférieure sur la distance à la source pour  $E_{OG} = 0.01 M_\odot c^2$



## GRB070201



GRB070201 error box  
Mazelts et al, arXiv :0712.1502

- Sursaut court, position reconstruite par les satellites, recouvre un bras de M31 (Andromède 770 kpc)
  - pas de OG observée
- ⇒ Exclut coalescence de binaire dans M31, seuil de confiance > 99%
- Compatible avec
    - ▶ Tremblement d'étoile à neutron dans M31
    - ▶ Coalescence de binaire derrière M31

*ApJ 681(2) :1419–1430 (2008)*

# Conclusions

- Sursauts gamma
  - ▶ recherches plus sensibles aux OG
  - ▶ interprétations astrophysiques des résultats
- Sensibilité des détecteurs actuels commence à être astrophysiquement pertinente
- Nouvelles données (2009–2010) en cours d'analyse
- Observation régulière d'ondes gravitationnelles en 2016  
advanced Virgo & advanced LIGO  
×10 en sensibilité, ×1000 en volume  
1 evt par siècle → 1 evt par mois



# Carte du ciel en ondes gravitationnelles

