

# Sources astrophysiques d'ondes gravitationnelles pour VIRGO et LISA

Jérôme Novak

Journée astroparticules de l'Observatoire de Paris

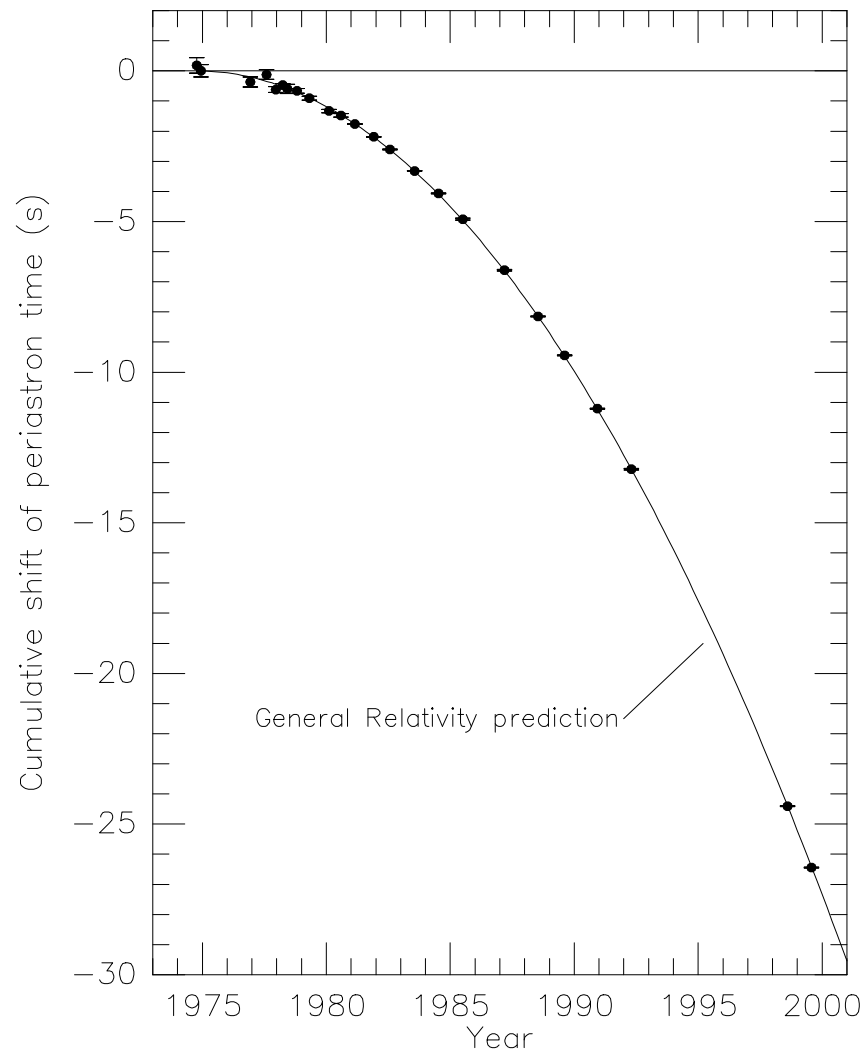
## Composition de l'équipe

- Silvano Bonazzola (chercheur)
- Dorota Gondek-Rosińska (post-doc)
- Éric Gourgoulhon (chercheur)
- Philippe Grandclément (associé, Université de Tours)
- Pawel Haensel (associé, Institut Copernic, Pologne)
- José-Luis Jaramillo (post-doc)
- François Limousin (thésitif)
- Jérôme Novak (chercheur)
- Loïc Villain (associé, Université de Valence, Espagne)

## Contexte scientifique

Intérêt des ondes gravitationnelles :

1. test de la théorie de la gravitation (Relativité Générale), mais déjà fait de manière indirecte (pulsars binaires)
2. nouveau vecteur d'informations pour l'astrophysique, orthogonal aux photons  $\Rightarrow$  *astrophysique gravitationnelle*



## Détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles au sol

VIRGO



(CNRS/INFN, à  
Pise)

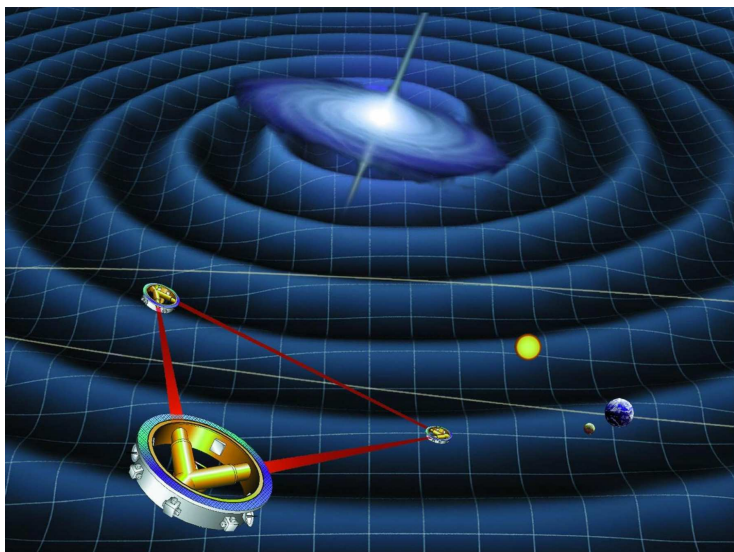


LIGO (NSF, à Livingston  
et Hanford)



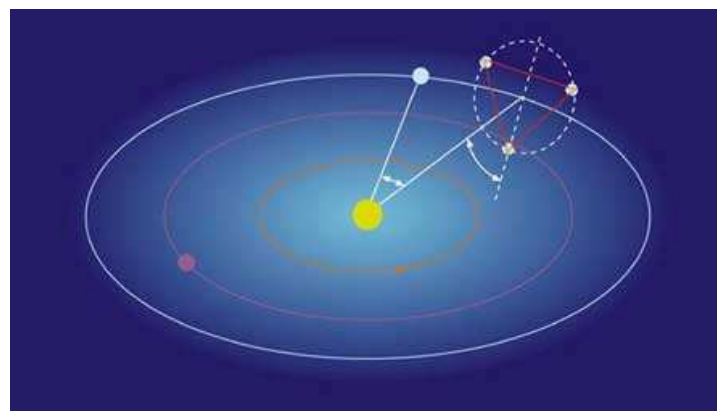
Sensibilité entre 10 Hz (100 Hz pour LIGO) et 10 kHz  $\Rightarrow$  hautes fréquences  
(correspondent à la fréquence *mécanique* du système émetteur).

## Projet de détecteur interférométrique dans l'espace : LISA



3 satellites en triangle de 5 millions de km, orbite héliocentrique, 20 jours derrière la Terre

ESA/NASA, prévu pour un lancement en septembre 2012



Sensibilité entre  $10^{-4}$  Hz et 1 Hz  $\Rightarrow$  basses fréquences.

## Nécessité des calculs des formes d'onde

- nette amélioration de la probabilité de détection (filtrage “optimal”),
- exploitation des données : comparaison du signal avec le modèle physique.

Les principales sources astrophysiques mettent en jeu des astres compacts asymétriques (ondes quadrupolaires) :

**systemes binaires** composés de deux astres compacts (étoiles à neutrons, trous noirs, naines blanches), le système perd du moment cinétique par l'émission d'ondes gravitationnelles (Cf. PSR1913+16) et finit par fusionner ;

**pulsars déformés/instables** les étoiles à neutrons en rotation rapide peuvent être déformées (champ magnétique, écorce) ou sujettes à des modes d'oscillation instables (*r*-modes)

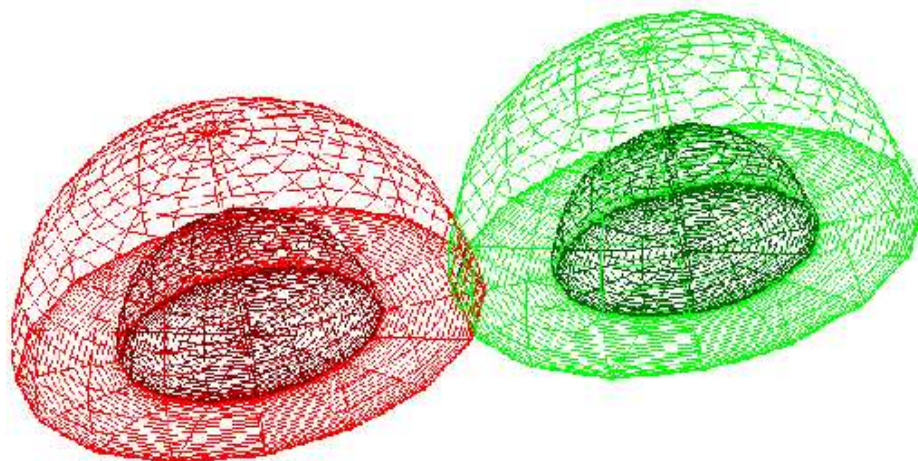
**supernovæ** formation d'une étoile à neutrons, beaucoup d'énergie disponible mais incertitudes sur l'efficacité d'émission des ondes gravitationnelles.



## Approche numérique

Bibliothèque numérique LORENE mise à disposition de la communauté sous licence publique GNU : <http://www.lorene.obspm.fr>.

Méthodes spectrales multigrille + coordonnées sphériques

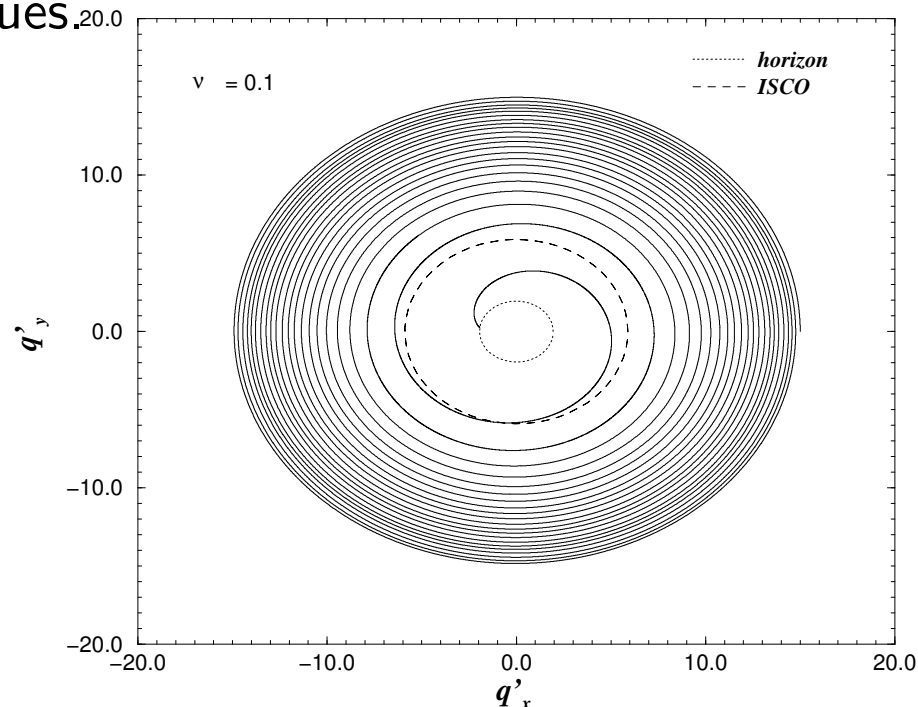


Conditions aux bords bien imposées,  
Grande précision, peu de mémoire utilisée.

Collaborations et contacts avec chercheurs en mathématiques appliquées : Centre de Mathématiques Appliquées de l'École Polytechnique et Laboratoire Jacques-Louis Lions (Paris 6).

## Systèmes binaires d'astres compacts

Ce sont des systèmes relativistes, avec un champ gravitationnel intense et fortement asymétriques.



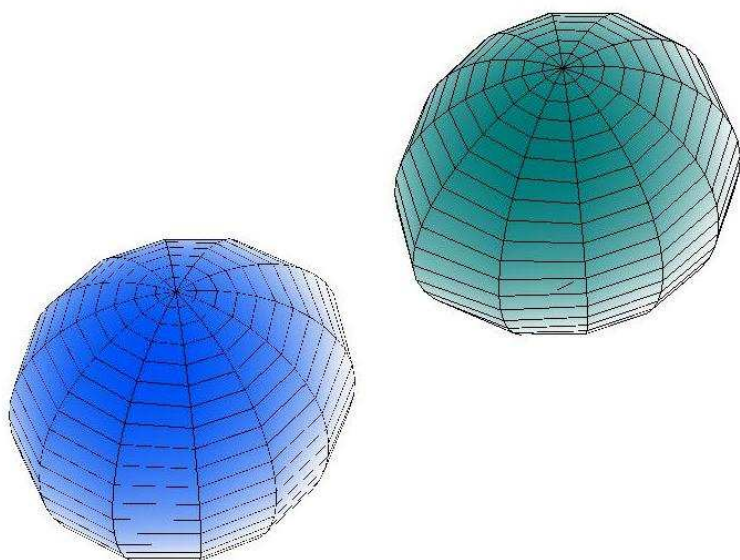
Calculs post-newtoniens supposent des masses ponctuelles.

La dernière étape (fortement dynamique) devrait émettre le plus d'ondes détectables.

⇒ données initiales (quasi-stationnaires) pour l'évolution dynamique.



## Étoiles à neutrons binaires



- Hypothèses d'irrotationalité et de quasi-stationnarité
- 5 équations d'Einstein résolues / 10
- Pas d'ondes gravitationnelles, mais informations sur l'évolution du système.

⇒ Pas d'effondrement des étoiles avant la fusion...

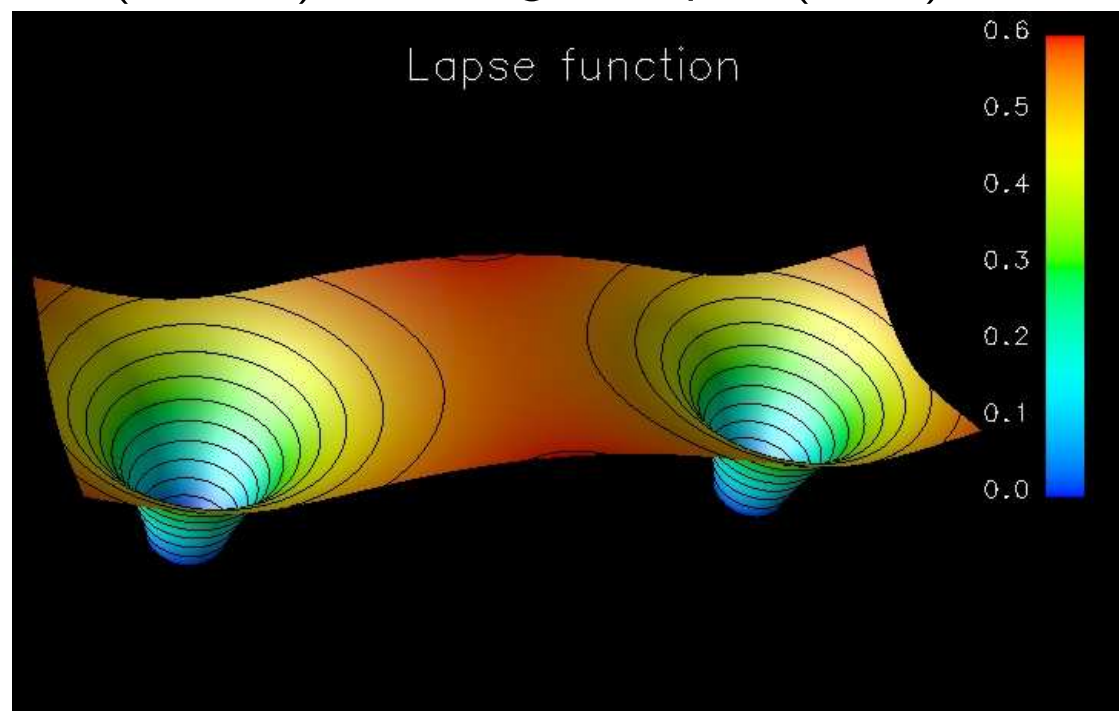
*S.Bonazzola, E.Gourgoulhon et J.A.Marck, Phys. Rev. Lett. 82 (1999).*

*K.Taniguchi et E.Gourgoulhon, Phys. Rev. D 66 (2002).*

Actuellement, collaboration avec l'Institut N.Copernic de Varsovie pour l'incorporation d'équations d'état plus réalistes.

## Trous noirs binaires

Trous noirs stellaires (VIRGO) comme galactiques (LISA) sont intéressants.



- Première simulation “réaliste”
- Bon accord avec les calculs post-newtoniens
- Localisation de la dernière orbite stable primordiale pour le traitement du signal.

*P.Grandclément, E.Gourgoulhon et S.Bonazzola, Phys. Rev. D 65 (2002).*

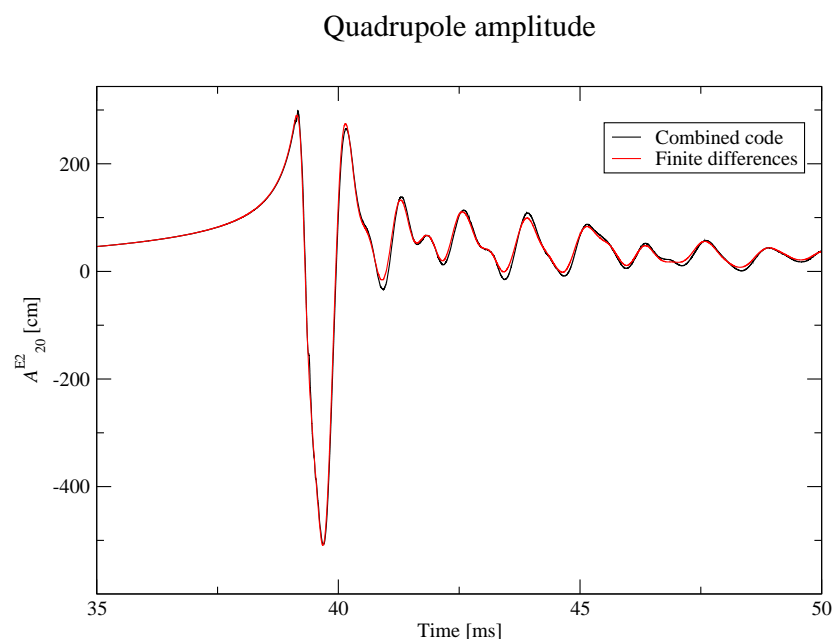
*T.Damour, E.Gourgoulhon et P.Grandclément, Phys. Rev. D 66 (2002).*

## Effondrements stellaires

Modèle physique très riche et trop complexe...

Commence par modélisation hydro + champ gravitationnel relativiste (Einstein) :

- méthodes spectrales pour modéliser la gravité (faibles besoins informatiques),
- méthodes de type Godunov (capture de chocs) pour traiter les discontinuités hydrodynamiques.



Comparaison des formes d'ondes gravitationnelles émises dans le cas axisymétrique (code mixte / code différences finies). Le code 3D est actuellement opérationnel...

Collaboration avec le Max-Planck-Institut für Astrophysik (Garching) et le Departamento d'Astronomia y Astrofísica (Valencia) : H.Dimmelmeier, J.N., J.A. Font, E.Müler et J.M.Ibañez *en préparation*.

## Conclusions/perspectives

Les détecteurs **LIGO** et **VIRGO** sont presque prêts :

- priorité à l'étude numérique des sources hautes fréquences,
- utilisation de méthodes spectrales : très puissantes et précises, elles demandent néanmoins plus de temps de développement/implémentation,
- compétences / besoins en modélisation numérique, mathématiques appliquées, informatique...
- modèles (quasi-)stationnaires → instationnaires
- actuellement contacts avec la communauté VIRGO, à l'avenir plus de collaborations : LAL (Orsay) et ILGA (Observatoire de Nice).

Personne en France n'étudie *spécifiquement* les sources basses fréquences, pour **LISA** :

- obtention de “patrons” d'ondes moins vitale : on est sûr de voir des signaux,
- certains résultats des hautes fréquences peuvent être transposés aux basses,
- sources plus lentes, plus nombreuses : binaires naines blanches, trous noirs supermassifs, variables cataclysmiques, binaires serrées, LMXB, HMXB, ...