

**BULLETIN N° 188**  
**ACADÉMIE EUROPEENNE**  
**INTERDISCIPLINAIRE**  
**DES SCIENCES**



**lundi 6 octobre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**I) Conférence: "*Le Rayonnement gravitationnel*"**

par Luc BLANCHET Directeur de Recherche au CNRS

Gravitation et Cosmologie (GR&CO),

UMR 7095 du CNRS, Université Pierre & Marie Curie

Institut d'Astrophysique de Paris, 98 bis boulevard Arago 75014 PARIS

**II) Présentation par notre Collègue Michel GONDRAN de son dernier ouvrage:**

***"Mécanique quantique: Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison?"***

**Prochaine séance :**

**lundi 3 novembre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**ASSEMBLEE GENERALE AEIS**

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

Siège Social : Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme 54, bd Raspail 75006 Paris

Nouveau Site Web : <http://www.science-inter.com>

# ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

## FONDATION DE LA MAISON DES SCIENCES DE L'HOMME

**PRESIDENT** : Pr Victor MASTRANGELO  
**VICE PRESIDENT** : Pr Jean-Pierre FRANÇOISE  
**SECRETAIRE GENERAL** : Irène HERPE-LITWIN  
**TRESORIER GENERAL** : Claude ELBAZ

**MEMBRE S CONSULTATIFS DU CA :**

Gilbert BELAUBRE  
 François BEGON  
 Bruno BLONDEL  
 Patrice CROSSA-REYNAUD  
 Michel GONDRAN

**COMMISSION FINANCES**: Claude ELBAZ,  
**COMMISSION MULTIMÉDIA**: Pr. Alain CORDIER

**COMMISSION CANDIDATURES**: Pr. Jean-Pierre FRANCOISE

**PRESIDENT FONDATEUR** : Dr. Lucien LEVY (†)  
**PRESIDENT D'HONNEUR** : Gilbert BELAUBRE  
**SECRETAIRE GENERAL D'HONNEUR** : Pr. P. LIACOPOULOS (†)

**CONSEILLERS SCIENTIFIQUES :**

**SCIENCES DE LA MATIERE** : Pr. Gilles COHEN-TANNOUDJI  
**SCIENCES DE LA VIE ET BIOTECHNIQUES** : Pr Brigitte DEBUIRE

**CONSEILLERS SPECIAUX:**

**EDITION**: Pr Robert FRANCK  
**AFFAIRES EUROPEENNES** :Pr Jean SCHMETS  
**RELATIONS VILLE DE PARIS et IDF**: Michel GONDRAN ex-Président  
**RELATIONS UNIVERSITES et MOYENS MULTIMEDIA**: Pr Alain CORDIER  
**RELATIONS AX et MÉCENAT** : Gilbert BELAUBRE

**SECTION DE NICE :**

**PRESIDENT** : Doyen René DARS

**SECTION DE NANCY :**

**PRESIDENT** : Pr Pierre NABET

octobre 2014

**N°188**

**TABLE DES MATIERES**

- p. 03 Compte-rendu de la séance du lundi 2 juin 2014
- p. 11 Compte-rendu de la commission publication du 15 septembre 2014-14h
- p. 14 Compte-rendu de la commission des finances du 6 octobre 2014-16h
- p. 15 Annonces
- p. 17 Documents

**Prochaine séance :**

**lundi 3 novembre à 17h Maison de l'AX 5 rue Descartes 75005 Paris**

**17 h: ASSEMBLEE GENERALE AEIS**

# **ACADEMIE EUROPEENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES**

**Fondation de la Maison des Sciences de l'Homme, Paris.**

**Séance du**

**Lundi 6 octobre 2014**

**Maison de l'AX 16h30**

La séance est ouverte à 17h sous la Présidence de Victor MASTRANGELO et en la présence de nos Collègues Gilbert BELAUBRE, Jean-Pierre BESSIS, Jean-Louis BOBIN, Alain CARDON, Juan-Carlos CHACHQUES, Gilles COHEN-TANNOUDI, Françoise DUTHEIL, Claude ELBAZ, Jean -Pierre FRANCOISE , Michel GONDRAN, Irène HERPE-LITWIN, Gérard LEVY, Pierre MARCHAIS , Claude MAURY, Jean SCHMETS, Alain STAHL, Jean-Pierre TREUIL.

Etaient excusés François BEGON, Bruno BLONDEL, Michel CABANAC, Alain CORDIER, Daniel COURGEAU, Ernesto DI MAURO, Vincent FLEURY, Robert FRANCK, Walter GONZALEZ, Jacques LEVY , Valérie LEFEVRE-SEGUIN , Antoine LONG, Edith PERRIER, Pierre PESQUIES, Jean VERDETTI.

## **I. Présentation de notre conférencier Luc BLANCHET par notre Président Victor MASTRANGELO**

Le CV ci-dessous résume bien la carrière de notre conférencier Directeur de Recherche au CNRS à l'Institut d'Astrophysique de Paris :

### **Études et diplômes**

1980 : Ingénieur de l'École Polytechnique, Paris

1984 : Thèse de Doctorat de 3ème cycle (Paris VI): *Étude de la structure des champs gravitationnels radiatifs et de leurs couplages avec les sources matérielles* (jury de thèse: A. Ashtekhar, B. Carter, Y. Choquet-Bruhat, T. Damour, R. Pellat)

1990 : Thèse d'Habilitation à Diriger des Recherches (Paris VI): *Contribution à l'étude du rayonnement gravitationnel émis par un système isolé*(jury de thèse: J. Audouze, S. Bonazzola, B. Carter, Y. Choquet-Bruhat, T. Damour, R. Kerner)

---

### **Carrière professionnelle**

1984-1985 : Research Fellow in Theoretical Astrophysics, California Institute of Technology, États-Unis

**Activités d'enseignement**

1993-1999 : Cours d'Introduction à la Relativité Générale, D.E.A. d'Astrophysique, Paris VII

2000-2003 : Cours de Gravitation Newtonienne, École Doctorale d'Astrophysique, Paris VI et Paris VII

2003-2005 : Cours d'Électromagnétisme, D.E.U.G. 2ème année, Paris VII

2006-2007 : Cours de Relativité Générale, Magistère de Physique, Orsay

Depuis 2003 : Cours de Relativité Générale, Magistère de Physique, École Normale Supérieure, Paris

---

**Distinction**

2002 : Prix Langevin de Physique, Académie des Sciences

---

**Publications:**

Revue à comité de lecture: 81 articles

Contributions à des ouvrages: 7

Comptes-rendus de conférences: 37

**II. Conférence: "*Le Rayonnement gravitationnel*"****résumé de notre conférencier:**

La détection prochaine du rayonnement gravitationnel en provenance de sources cosmiques par le réseau de détecteurs interférométriques LIGO & VIRGO au sol (et, plus tard, LISA dans l'espace) devrait ouvrir une nouvelle fenêtre d'observations en Astronomie, radicalement différente de celle basée sur l'observation du rayonnement électromagnétique, et donc avec un très fort potentiel de surprises et de découvertes. Particulièrement intéressantes sont les observations du rayonnement gravitationnel produit lors de la phase de spiralement puis de la fusion de systèmes binaires d'étoiles à neutrons et de trous noirs. Pour être détecté et ensuite analysé avec succès le rayonnement gravitationnel de tels systèmes binaires compacts doit avoir été auparavant prédit (c'est-à-dire calculé) avec grande précision. Dans cet exposé nous décrirons comment grâce à une combinaison de méthodes d'approximation analytiques en relativité générale et de méthodes numériques on parvient à établir la forme d'onde gravitationnelle émise par les systèmes binaires, qui est actuellement utilisée dans les codes de recherche et d'analyse du signal des détecteurs. Nous décrirons la physique nouvelle qui sera possible avec l'analyse du signal gravitationnel: mesures des masses et spins d'étoiles à neutrons et de trous noirs, équation d'état de la matière dense, mécanismes de formation des trous noirs géants, etc., ainsi que les tests de la relativité générale que l'on pourra effectuer dans un régime de champ gravitationnel fort:

- effets non-linéaires,
- théorème de la calvitie des trous noirs, etc.

*Nous remercions ensuite très chaleureusement nos collègues Michel GONDTRAN et Jean Pierre TREUIL de nous avoir communiqué le compte-rendu ci-dessous.*

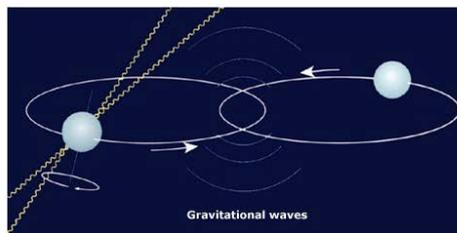
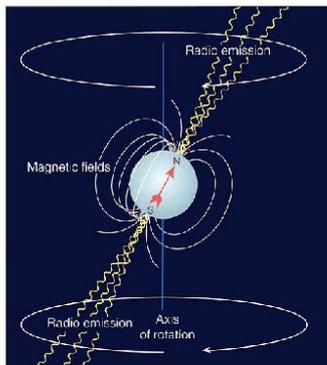
## Le rayonnement gravitationnel

En introduction, Luc BLANCHET nous rappelle que les ondes gravitationnelles ont été prédites par Einstein en 1915. Elles correspondent à des oscillations de la courbure de l'espace-temps produites par des masses accélérées. Une production efficace d'OG demande de très grandes masses et de très grandes accélérations. Ainsi, les sources d'ondes gravitationnelles sont principalement des systèmes astrophysiques impliquant des objets massifs et très denses comme les étoiles à neutrons ou les [trous noirs](#)<sup>1</sup> pouvant supporter de telles accélérations. En 1916, Einstein prédit que les OG se propagent à la vitesse de la lumière. Cependant aucune *détection directe* de ces ondes n'a été encore réalisée; la première devrait se faire en 2016. LB commence par passer en revue les mesures indirectes de ces ondes gravitationnelles.

### *Le pulsar PSR B 1913+16*

Ce rayonnement gravitationnel a été mis en évidence pour la première fois par Russell Hulse et Joseph Taylor (prix Nobel 1993) au moyen de *mesures indirectes* en 1974 en observant le pulsar binaire PSR B 1913+16 (un système binaire constitué d'un pulsar et d'un compagnon). L'indice d'une émission d'onde gravitationnelle est l'observation d'une décroissance de la période orbitale. Cette dernière décroît en effet précisément comme le prédit la théorie de la relativité générale si l'on considère que le système perd son énergie par émission gravitationnelle.

#### The binary pulsar PSR 1913+16 [Hulse & Taylor 1974]



- The pulsar PSR 1913+16 is a rapidly rotating neutron star emitting radio waves like a lighthouse toward the Earth.

#### Non-orbital parameters

- ①  $P_{\text{pulsar}} = 59 \text{ ms}$  pulsar period
- ②  $\dot{P}_{\text{pulsar}} < 10^{-12}$  pulsar spin-down
- This pulsar moves on a (quasi-)Keplerian close orbit around an unseen companion, probably another neutron star

Un pulsar est une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même et qui émet des signaux radio suivant le champ magnétique. L'axe magnétique d'une telle étoile ne coïncidant pas en général avec l'axe de rotation (contrairement à la Terre) il en résulte un effet de phare, des flashes réguliers observables si la Terre se trouve dans le cône du passage du faisceau.

Dans le cas du système binaire PSR B 1913 + 16 , le pulsar tourne sur une orbite (quasi-) képlérienne (excentricité  $e=0,6$ ; période orbitale  $P=7$ heures, vitesse  $v= 300\text{km/s}$ ) autour d'un compagnon invisible, probablement une autre étoile à neutrons.

<sup>1</sup> site accessible en cliquant sur la zone surlignée en bleu.

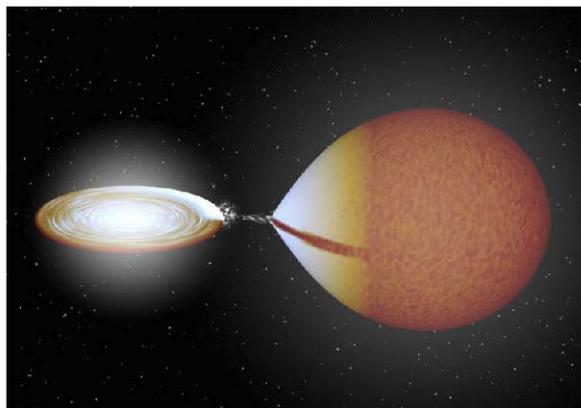
Parfois, les pulses radio peuvent ne pas être réguliers, la fréquence reçue sur la Terre étant légèrement modifiée par effet Doppler lors du mouvement de l'étoile à neutrons sur son orbite. Si sa vitesse est très rapide, il se produit en outre des effets relativistes ; dans le cas présent : variation relativiste ( $\pm 2$ ms) de la période du pulsar (59ms) ; avance du périhélie (la précession relativiste de l'orbite du pulsar ( $4.2^\circ/\text{an}$ ) est nettement plus forte que celle détectée pour Mercure, soit  $43''/\text{siècle}$ ) ; mais l'effet principal de la relativité générale, celui qui nous intéresse ici, est bien la décroissance de la période orbitale au cours du temps. Ainsi de 1975 à 2005, la période orbitale (plus exactement le temps de passage entre deux périhélies) s'est elle raccourcie de quelques quarante secondes

### *Les systèmes binaires cataclysmiques*

Luc BLANCHET aborde ensuite un autre cas d'émission éventuelle d'ondes gravitationnelles celui des systèmes binaires cataclysmiques.

Un système binaire cataclysmique correspond à une étoile massive volumineuse qui se fait happer par son compagnon encore plus massif mais très petit, comme une naine blanche ; il y a transfert de matière de l'une vers l'autre.

#### Cataclysmic variables



- An evolved normal star — the **Secondary, with mass  $M_2$**  — fills its Roche lobe and transfers mass to a more massive companion — the **Primary, with mass  $M_1 > M_2$**  — which is a white dwarf
- An accretion disk of heated matter forms around the Primary and UV and X rays are emitted because of the high temperature

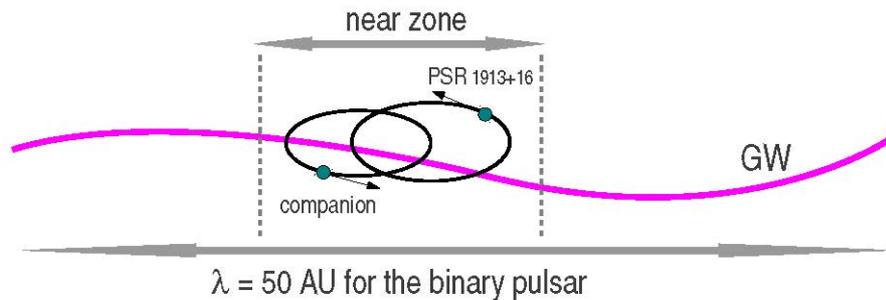
Un tel transfert de matière de l'étoile la moins massive (étoile "normale") vers l'étoile la plus massive (ici l'étoile compacte, la naine blanche), devrait faire augmenter la distance entre les deux étoiles. Comme, l'observation le montre, cette distance reste constante pendant très longtemps, il doit y avoir un mécanisme de perte de moment cinétique qui tend à faire diminuer la distance et qui peut donc compenser exactement l'effet du transfert.

Dans le cas des systèmes binaires pas très relativistes avec des périodes longues très supérieures à 2h il y a un mécanisme d'origine purement astrophysique connu qui "enlève" le moment cinétique. Mais ce mécanisme n'est pas assez efficace dans le cas des binaires plus relativistes avec périodes inférieures à 2h et dans ce cas il n'y a que le rayonnement gravitationnel qui peut expliquer la perte de moment cinétique.

## Qu'est ce qu'une onde gravitationnelle et comment la mesure-t-on ?

### What is a gravitational wave?

- A gravitational wave (GW) is a ripple in the curvature of space-time propagating at the speed of light
- GWs are generated by the dynamics and orbital motion of the source
- They are more like **sound waves** rather than light waves



Luc BLANCHET nous rappelle ensuite la définition d'une onde gravitationnelle (OG). C'est une déformation de la courbure de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. Elles sont engendrées par la dynamique et le mouvement de la source et elles sont plus analogues à des ondes sonores qu'à des ondes lumineuses.

La longueur d'onde de telles ondes est très grande ; pour le pulsar binaire elle est de l'ordre de 50 UA!! (Unité Astronomique = distance moyenne Terre-Soleil = 149 000 000km).

Les OG se manifestant par des fluctuations de longueurs entre objets distants lors de leur passage, ce sont ces infimes différences que l'on doit mesurer. Une première approche a consisté à tenter de détecter les vibrations introduites par l'OG dans une barre métallique (barre de Weber), jouant en quelque sorte le rôle d'une antenne. L'amplitude de la vibration pouvant être mesurable lorsque la fréquence de l'onde est suffisamment proche (résonance) de la fréquence fondamentale de vibration de la barre. Mais en pratique actuellement ces mesures s'effectuent par interférométrie. Le détecteur le plus adapté est l'interféromètre de Fabry-Pérot, similaire à l'interféromètre de Michelson . L'amplitude du signal est extrêmement faible, dans le cas de VIRGO où les bras de l'interféromètre font 3km, la variation de longueur à mesurer est de l'ordre de  $10^{-19}$  m. Pour détecter un déplacement aussi faible, on mesure le déplacement collectif de N atomes d'une couche atomique sur la surface d'un miroir. Cela permet de détecter des distances de l'ordre de l'Angström, c'est à dire de l'ordre de grandeur des distances inter-atomiques. Il existe actuellement quelques détecteurs d'OG sur Terre notamment les projets suivants :

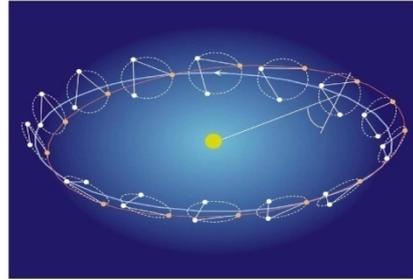
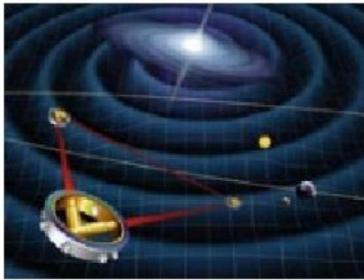
- VIRGO franco-italien en Italie (Pise)
- LIGO américain à Hanford dans l'état de Washington
- GEO germano-britannique près de Hanovre en RFA.

Il existe aussi un projet très ambitieux dans l'espace, c'est LISA qui est un ensemble de trois engins spatiaux très éloignés les uns des autres devant permettre la détection d'OG. Ce projet européen est en phase expérimentale et le prototype de faisabilité (LISA Pathfinder) est en construction à l'ESA.

Si les projets comme VIRGO étudient le domaine des fréquences entre 10Hz et 10.000Hz, LISA se penche elle sur le domaine des très basses fréquences : un dix millième à un dixième de Hz. Ces projets ne correspondent pas aux mêmes sources astronomiques: les évènements d'étoiles à neutrons et les trous noirs de taille stellaire vont être détectés par les détecteurs au sol LIGO/VIRGO; les trous noirs supermassifs par le détecteur dans l'espace LISA.

## Space-based laser interferometric detector

LISA



LISA will observe the GWs in the low-frequency band

$$10^{-4} \text{ Hz} \lesssim f \lesssim 10^{-1} \text{ Hz}$$

## Supermassive black-hole coalescences as detected by LISA



When two galaxies collide their central supermassive black holes may form a bound binary system which will spiral and coalesce. LISA will be able to detect the gravitational waves emitted by such enormous events anywhere in the Universe

### *La diversité des sources*

Les sources d'ondes gravitationnelles évoquées par Luc BLANCHET se conforment toutes à un même schéma : deux corps massifs formant un système binaire compact. Les paramètres caractérisant le système à un instant donné sont les masses et les moments cinétiques (axe et vitesses de rotation) respectifs des deux corps, leur distance mutuelle, et donc le moment cinétique total du système. La perte d'énergie, due au rayonnement gravitationnel, provoque à la fois un raccourcissement progressif de la

période orbitale, un rapprochement des deux corps (perte de moment cinétique total) et, in fine, leur « coalescence » en un seul corps, évènement marquant également la fin de l'émission gravitationnelle.

Ce schéma général couvre dans la réalité une diversité de cas : des systèmes d'étoiles à neutrons tels PSR B 1913+16 (masses relativement faibles, un peu plus d'une masse solaire), des systèmes impliquant un trou noir stellaire (entre 5 et 20 masses solaires), des systèmes impliquant un trou noir supermassif (de l'ordre du million de masses solaires ou davantage). Les calculs montrent que la fréquence de l'onde est inversement proportionnelle aux masses en jeu, si bien que les différents cas ressortent de détecteurs de type distincts : détecteurs au sol « hautes fréquences » tel Virgo pour les masses stellaires, détecteurs spatiaux basses fréquences pour les trous noirs supermassifs.

### *Les calculs de la forme des signaux*

La détection d'un signal dans un bruit de fond est facilitée lorsque l'on connaît la forme exacte et l'intensité du signal recherché. L'arrière fond pour ces calculs est la théorie de la Relativité Générale : à savoir, les équations couplant la dynamique de la métrique de l'espace temps et les mouvements de la matière. Si la dynamique d'une onde gravitationnelle plane a pu être décrite de façon exacte en résolvant les équations d'Einstein, les choses sont dans le cas présent plus complexes : il faut pouvoir coupler la dynamique de l'onde (fréquence, amplitudes en un point et un instant donné dans les différentes directions spatiales, énergie extraite, force réactive exercée sur le système) et la dynamique des paramètres du système binaire (les équations du mouvement des deux corps, leur décélération, etc).

Le problème de base est donc le problème à deux corps en Relativité Générale avec ou sans spin; de gros progrès ont été réalisés ces dernières années. Il a fallu faire cohabiter ensemble trois types de méthodes de calcul dont les domaines de validité dépendent 1) du rapport entre les masses des deux corps et 2) du rapport entre la distance des deux corps et la masse totale, c.a.d. l'inverse de son degré de compacité. Ce dernier paramètre est en lien avec le stade dans lequel se trouve le système au cours de son évolution : loin ou proche de la coalescence, ou enfin en pleine fusion en un seul corps. Pour les pulsars, on utilise principalement l'approximation post-Newtonienne et le terme quadripolaire suffit. Pour les binaires spiralantes, l'onde est obtenue par un raccordement de haute précision entre une théorie post-Newtonienne décrivant la phase spiralante et une théorie relativiste numérique pour les phases de fusion, et une théorie des perturbation pour la phase de vibration finale.

Enfin, Luc BLANCHET répond aux questions de Gilles COHEN-TANNOUDJI, d'Alain STAHL, Victor MASTRANGELO, Claude ELBAZ et Michel GONDRAN. Luc BLANCHET nous confirme que le projet Planck a montré que Bicept2 n'a détecté finalement que la polarisation des poussières de notre galaxie!

### III. Présentation par notre Collègue Michel GONDRAN de son dernier ouvrage: “*Mécanique quantique: Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison?*”

Notre Collègue est avec son fils Alexandre l'auteur d'un livre "Mécanique quantique; Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison" paru en août 2014 chez "Editions Matériologiques" dans la collection science et philosophie. (Site : <http://www.materiologiques.com>)

Il nous a communiqué un résumé détaillé paru dans le bulletin n° 187 de l'AEIS en page 35.

Voici ci-dessous une brève introduction à son ouvrage dont il a détaillé les aspects principaux lors de son exposé:

Depuis le congrès Solvay de 1927, le point de vue de Bohr, Born, Pauli et d'Heisenberg s'est imposé à toute la science contemporaine contre celui d'Einstein, de Broglie et de Schrödinger : il faudrait dorénavant renoncer au déterminisme et à l'existence d'une réalité objective, mais aussi à la possibilité d'une compréhension du monde physique.

L'objectif principal de ce livre est de faire connaître l'*onde pilote de Broglie-Bohm*, une interprétation alternative qui conserve *déterminisme et réalisme* et qui faisait dire à John Bell : « Pourquoi l'image de l'onde pilote est-elle ignorée dans les cours ? Ne devrait-elle pas être enseignée, non pas comme l'unique solution, mais comme un antidote à l'autosatisfaction dominante ? Pour montrer que le flou, la subjectivité, et l'indéterminisme, ne nous sont pas imposés de force par les faits expérimentaux, mais proviennent d'un choix théorique délibéré ? »

Ce livre étudie les limites de l'onde pilote de Broglie-Bohm et en cherche un dépassement. La « théorie de la double préparation » proposée par Michel et Alexandre Gondran dépend des conditions de préparation du système quantique et correspond à une réponse à la « théorie de la double solution » que de Broglie a recherchée toute sa vie. Elle permet de mieux comprendre les points de vue d'Einstein, de Broglie et de Schrödinger.

Enfin, les auteurs montrent qu'il existe des interprétations de la relativité générale compatibles avec la théorie de la double préparation. Elles permettent une vision commune entre mécanique classique, mécanique quantique et relativité générale dans un espace à quatre dimensions.

L'exposé de notre Collègue a été suivi d'un débat suite aux questions posées par notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUDJI qui partageait plutôt le point de vue de BOHR, PAULI et HEISENBERG.

Après cette très riche séance, nos travaux prennent fin.

Irène HERPE-LITWIN

**COMPTE-RENDU DE LA COMMISSION PUBLICATIONS**  
**du 15 septembre 2014**  
**14h Maison de l'AX**

Le président de la commission, Pierre NABET, nous a communiqué le Compte-rendu ci-dessous:

**Compte rendu de la commission des publications du 15 septembre 2014.**

Etaient présents : Victor MASTRANGELO , Irène HERPE , Gilbert BÉLAUBRE , Robert FRANCK , Pierre NABET.

Il est d'emblée précisé que Robert FRANCK s'étant occupé de créer une ligne de publication pour l'AEIS auprès de « EDP sciences » avec succès, il revient à la commission et à son président Pierre NABET de s'occuper de la publication de ce volume. Un accord est obtenu à ce sujet.

1°) La première question est la suivante : avons-nous tous les articles à notre disposition et les membres de la commission les ont-ils lus.? Que fait-on pour ceux qui manquent ? Que fait-on de ceux qui sont en anglais ?

**1°) Listing des articles selon l'ordre de présentation au colloque « Formation des systèmes stellaires et planétaires, conditions d'apparition de la vie » PARIS 5/6 février 2014**

a) *Nucléosynthèse stellaire* par Nicolas PRANTZOS (IAP Paris)

- texte volumineux , le texte reçu a été publié en français il y a 10 ans aux Presses universitaires de Bordeaux. Il doit être corrigé et la bibliographie être mise à jour. Nous le ferons par nous-mêmes sans retour à l'auteur pour gagner du temps et, peut-être, ne pas avoir à payer de copyright.

b) *La formation des étoiles dans l'univers* par Patrick HENNEBELLE ( LERMA/ENS Paris ):

- à ce jour nous ne possédons pas cet article; un texte en anglais adapté pourrait être reçu, mais il faudrait le traduire. Gilbert doit reprendre le contact.

c) *L'étonnante diversité des systèmes planétaires* par Alessandro MORBIDELLI (CNRS/Observatoire de Nice)

- texte reçu en anglais, déjà publié apparemment, pas de copyright.

d) *Galactic planetary science* par Giovanna TINETTI ( départ. Physic. and Astronomy, Univ. College London )

- nous n'avons pas de texte , Victor lui a écrit en juillet et elle s'est engagée à nous en donner un. Qu'en est-il à ce jour ?

Pierre pose la question de savoir jusque quand nous attendons ces textes ? la limite du 31 octobre est décidée.

e) *De l'Astrochimie à l'Astrobiologie: une approche méthodologique* ? par Louis LE SERGEANT D'HENDECOURT (IAS ORSAY )

- nous avons bien le texte et nous l'avons lu. En fait nous avons un texte intitulé « Astrochimie galactique et l'apparition de la complexité moléculaire organique dans le milieu interstellaire » ce texte semble bon, il faut revoir certains passages et agrandir certaines figures . Pierre propose de s'en charger .

f) *La matière organique insoluble dans les météorites carbonés* par Sylvie DERENNE (BioEMCo/ENS/Univ.PMC-Paris )

- Nous avons reçu un texte en anglais intitulé « Model of molecular structure in the insoluble organic : matter isolated from MURCHISON météorite », qui n'est pas le texte présenté lors du colloque. Elle n'a pas le temps d'en faire un autre. On se propose de faire traduire ce texte nous-mêmes et peut-être n'aurions-nous rien à payer à la revue?. Robert pense qu'il y aura tout de même un copyright. Qu'en est-il? c'est à la commission à régler ce problème.

A ce sujet Victor pense que nous sommes trop peu nombreux dans cette commission et qu'il faut la renforcer. il proposera un peu plus tard la participation de Jean SCHMET , accord unanime de la commission.

g) *The Chemistry of life in terrestrial and non-terrestrial materials* par Raffaele SALADINO (Univ. of Tuscia, Viterbo- Italie )

- Texte en français malgré le titre en anglais ( que nous aurons à traduire ). Robert a corrigé le français de ce texte. Revoir la qualité de la bibliographie.

h) *Origine de l'eau dans le système terre-lune* par Francis ALBARÈDE ( LGL/ENS/\_Lyon-)

- Texte non reçu à ce jour . Même date limite du 31 octobre. Aurait donné un accord de principe pour fournir un texte. Qu'en est-il?

i) *H<sub>2</sub>O: première molécule de la vie* par Giuseppe ZACCAI ( INSB\_CNRS,-Grenoble )

- Texte sur l'eau, en fait on a reçu du même auteur un texte intitulé « H<sub>2</sub>O: première molécule de la vie », bon texte. Beaucoup de figures bien faites.

j) *Premières traces et diversification de la vie* par Emmanuelle JAVAUX (UPPM/ Liège)

- À ce jour nous n'avons reçu aucun texte . Qu'en est-il? un échange a eu lieu avec Victor.

k) *L'adaptation microbienne aux environnements extrêmes* par Bruno FRANZETTI ( ELMA/IBS-Grenoble)

- Cet auteur ne peut pas nous fournir de texte . Pierre propose de demander au Professeur Arnaud GRUEZ ( Univ H. Poincaré Fac. Sciences- Nancy ) de faire un texte sur ce sujet. Un accord a été obtenu pour un texte avant la fin de l'année.

l) *A propos de génération moléculaire spontanée* par Ernesto DI MAURO (départ. BBCD/Univ. La Sapienza Roma Italie )

- bon article, Robert en a revu le français. Bon équilibre entre figures et texte. Des citations en italien devront être traduites. Seul article à aborder les problèmes philosophiques , il pourrait être placé au début du livre.

m) *Du système solaire aux systèmes planétaires : recherche de la vie dans l'univers* par Thérèse ENCRENAZ (Observatoire de Meudon- France )

- Bon article en français bien reçu. Revoir la bibliographie .

n) *Modélisation chimique du milieu interstellaire* par Valentine WAKELAM ( CNRS/ lab.Astrophysique- Bordeaux )

- En fait Mme Wakelam nous a envoyé un texte en anglais, assez volumineux extrait d'un livre paru chez Springer. L'éditeur Springer nous demande une contribution financière. Nous avons l'autorisation de faire la traduction en français.

o) *Morphogénèse et embryogénèse* par Martine BEN AMAR ( LPS/ENS-Paris )

- D'après Pierre ce texte est excellent mais le sujet traité n'a que très peu à voir avec le thème du colloque. Gilbert dit que c'est un très bon texte qui explique comment on peut concevoir un schéma général de morphogénèse. Robert pense que la commission d'édition a le droit de demander à un auteur une refonte de l'article. Gilbert se propose de le lui demander. Ce ne sera

pas nécessaire nous pourront introduire cet article, qui est très bon ,en expliquant par un lien pourquoi il est là.

## **II°) La deuxième question posée concerne la traduction des articles en anglais et le coût de la publication**

En effet, nous devons assurer la publication du livre au moindre coût. Pierre NABET a prit contact avec l'INIST du CNRS à Nancy (Monsieur Jean François NOMINÉ, ingénieur) et lui a communiqué deux articles, celui de MORBIDELLI (5073 mots) et celui de DERENNE (7186 mots ) en demandant d'évaluer le coût de la traduction par les moyens du CNRS. Nous avons eu depuis une réponse, compte tenu du prix de 0,15 euros par mot et d'une remise de 60 % pour les universitaires, le coût de la traduction de ces deux articles serait de l'ordre de 739 euros. Si nous donnons à traduire le troisième texte, celui de WAKELAM, texte de 32 pages représentant à peu près le même nombre de mots que les deux textes précédents, le coût total serait de l'ordre de 1500 € Il faut , bien sûr , ajouter les 638 euros de copyright à Springer pour l'article de WAKELAM.

Un échange s'établit alors entre les membres de la commission et le président Victor MASTRANGELO sur la nécessité impérieuse d'obtenir des subventions auprès d'organismes publics et fondations .

De même pour augmenter les possibilités de l'Académie il est étudié la possibilité pour celle-ci d'installer des sections dans quelques grandes capitales comme par exemple à Athènes et à Rome.

## **III°) Problème du format du tapuscrit**

Il est apparu lors de la commission que Pierre NABET n'avait pas bien saisi la nomenclature utilisée par certains de ces textes et il pensait qu'il fallait tout reprendre. Robert FRANCK le détrompe et lui dit qu'il avait lui-même demandé aux auteurs d'utiliser cette nomenclature standard de façon, justement, à pouvoir répondre aux critères demandés par EDP sciences.

Note est donc prise de cela, mais évidemment dans ces conditions, en dehors des deux articles qui sont sous cette forme, tous les autres ne le sont pas. Il sera donc nécessaire de remettre ses autres articles dans ces mêmes formes pour avoir une d'uniformité. Cependant, cela semble assez difficile, surtout pour les textes issus d'une publication préalable . Pierre NABET propose d'étudier la possibilité d'une certaine inhomogénéité.

Lors de cette réunion la commission n'avait pas les éléments nécessaires pour aborder le problème du tapuscrit à présenter à l'éditeur. Depuis des notions nouvelles sont apparues et il semble que nous puissions, par nos propres moyens, grâce a un programme fourni par le professeur Jean GUGLIELMI, mettre en forme ce tapuscrit, ce qui nécessiterait très peu de modifications par l'éditeur. Pierre NABET prend l'engagement de réaliser cela à coût très faible (quelques prestations d'une secrétaire dactylo pour taper facilement une introduction et les liens nécessaires entre les différents articles afin de donner à l'ensemble une homogénéité d'idées et un but scientifique..)

Il va s'essayer sur quelques pages et présentera cet essai aux membres de la commission.

La séance est levée aux environs de 18 heures.

P.S.Robert FRANCK explore avec EDP Sciences , la possibilité de faire une publication en commun avec l'INIST/CNRS (éditions du CNRS). Ceci afin d'avoir une audience accrue et le label CNRS.

N.B. Dans les conditions exigées par Springer pour l'utilisation de l'article de WAKELAM , on peut lire: « ...Springer material....may not be republished in electronic open access »???

## **COMPTE-RENDU DE LA COMMISSION FINANCE** **du 6 octobre 2014 16heures**

Compte-rendu rédigé par Claude ELBAZ Président de la commission finance

### **Compte-rendu de la commission finance.**

La commission finance s'est réunie le 6/10/2014. Etaient présents :

F. DUTHEIL ; I. HERPE ; J.L.BOBIN ; G. BELAUBRE ; C. ELBAZ; M. GONDRAN; J. SCHMETS ; V. MASTRANGELO.

1-/ Le dossier de demande de subvention auprès de la Fondation du Roi Baudouin, présenté par J. SCHMETS a été complété par les éléments fournis par les membres présents. Un budget de 10 500€a été retenu, pour une subvention demandée de 5 000€

J. SCHMETS a proposé de nous envoyer la version définitive, pour finalisation et approbation, avant sa soumission en novembre.

2-/ J.L. BOBIN a signalé l'existence de la Fondation Daniel Iagolnitzer, Ancien ingénieur au CEA, et susceptible de contribuer à notre financement. Il a été chargé de voir dans quelle mesure nous pourrions soumettre une demande. G. BELAUBRE et V. MASTRANGELO sont associés à cette démarche

3-/ M. GONDRAN et C. ELBAZ ont été chargés de veiller à la demande de subvention auprès du Conseil Général d'Ile de France, à déposer seulement au minimum six mois avant la date du prochain colloque.

4-/ Des problèmes pour l'édition des C.R des colloques ont été soulevés :

- La mise en forme , et la traduction des articles en anglais, doivent être assurées par la section de Nancy.
- Le montant de l'édition papier (plus de 6 000€) et le stockage des 300 exemplaires requis par EDP, nécessitent d'examiner davantage le problème avec R. FRANCK

## Annances

1. Notre Collègue Gilles COHEN-TANNOUJJI nous fait part de l'information ci-dessous relative à la 14ème rencontre "Physique et interrogations fondamentales" sur *La science et l'impossible* qui se tiendra le 22 novembre à La BnF: pour toute information il suffit de cliquer sur:

[trouver en suivant ce lien, l'argumentaire, le programme et le formulaire d'inscription](#)

2. Marie-Christine MAUREL qui nous a apporté une contribution majeure lors de notre précédent colloque "*Formation des systèmes stellaires et planétaires-Conditions d'apparition de la vie*" nous informe de la publication dès le 1o octobre 2014 de son dernier ouvrage auprès des éditions du Pommier :

– "*d'où vient la vie ?*"

### L'OUVRAGE

Où la vie a-t-elle pris naissance ? Était-ce sur une Terre agitée à l'atmosphère brûlante, presque irrespirable ? Dans un océan bouillonnant ? Dans l'espace interstellaire ?... Comment expliquer la première étincelle de vie et tout ce qui en a découlé ? ADN, ARN, protéines... : comment la double hélice, caractéristique du vivant, s'est-elle mise en place ? Comment la première cellule s'est-elle formée ? De quels moyens les chercheurs disposent-ils pour observer ce grand inventeur qu'est le vivant ? En quoi les recherches actuelles bousculent-elles les anciennes frontières entre vivant et non vivant? Pourra-t-on un jour recréer la vie ? Est-ce souhaitable ?

3. Notre collègue Jean SCHMETS nous a communiqué l'annonce de notre dernière conférence sur le site CORDIS:



## Community Research and Development

### Information Service - CORDIS

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences

### Gravitational radiation Conference in French by Luc BLANCHET [\[Print to PDF\]](#)

From 2014-10-06 to 2014-10-06, France

#### *Astrophysics*

Luc BLANCHET is directeur de recherche at CNRS (GRECO), France.

The talk will take place at Maison de l'AX, 5 rue Descartes à 75005 Paris, on october 6 at 17:00.

It is organized by the Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences (AEIS) :

<http://www.science-inter.com> with its 2016 Colloquium "Ondes et Matière" in mind. Luc

BLANCHET is author and co-author of numerous publications :

<http://www2.iap.fr/users/blanchet>

For the astrophysicist, black matter appears under two different aspects. On one hand in cosmology (i.e. on large scale), it seems to be constituted as a set of particles. On the other hand, at the scale of galaxies, it is described by several phenomena which appear incompatible with its description in terms of particles. This leads some to say that we face a modification of the law of gravity.

4. **L'Institut de Paléontologie Humaine, Fondation Albert Ier, Prince de Monaco**, vous invite le **jeudi 6 novembre 2014 à 19h00** à la présentation des deux ouvrages consacrés à **la Caune de l'Arago**:

-La Caune de l'Arago, Tautavel-en-Roussillon, Pyrénées-Orientales. Tome I. "*Cadre géographique - Historique - Contexte géologique - Formations quaternaires de la plaine de Tautavel - Cavités karstiques - Formation et évolution de la grotte - Méthodes de fouille et d'étude*", publié par CNRS Editions, 2014.

-*L'Homme de Tautavel. 600 000 années dans la Caune de de l'Arago. L'ouvrage du Cinquantenaire*, publié par CNRS Editions, 2014.

Ces deux ouvrages ont été édités dans le cadre de la célébration du cinquantième anniversaire de l'ouverture du grand chantier de fouilles préhistoriques de la Caune de l'Arago, 1964-2014, qui a été organisé par **l'Institut de Paléontologie Humaine**, avec le concours du **Ministère de la Culture**.

La cérémonie aura lieu dans l'amphithéâtre de l'Institut de Paléontologie Humaine et sera présidée par **Son Excellence Madame Sophie Thévenoux, Ambassadeur de Monaco en France et Monsieur Jacques Baudouin, Directeur Général de CNRS Editions**.

## Documents

Pour préparer illustrer la conférence de Luc BLANCHET, nous vous proposons les articles ci-dessous :

p 18 : "Ondes gravitationnelles et Coalescence d'objets compacts", par Luc BLANCHET, publié dans rencontres pulsars à l'IAP, le 16 janvier 2006- site : <http://lpce.cnrs-orleans.fr/~pulsar/PSRworkshop/Talks/L.Blanchet.pdf>

p 31 : "MOND avec ou sans matière noire" publié par Luc BLANCHET et Françoise COMBES paru dans La Recherche n°435 , novembre 2009.

p 37 : "La Relativité générale et la spirale infernale des étoiles binaires compactes" , une rubrique publiée par Luc BLANCHET accessible sur le site <http://www2.iap.fr/users/blanchet/images/ImagesPhys.pdf>

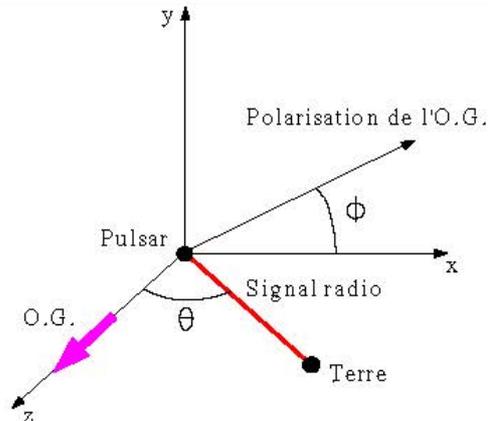
# ONDES GRAVITATIONNELLES ET COALESCENCES D'OBJETS COMPACTS

Luc BLANCHET

**Gravitation et Cosmologie (GRεCO)  
CNRS / Institut d'Astrophysique de Paris**

16 janvier 2006

# Ondes gravitationnelles et pulsars millisecondes



- Le décalage en fréquence induit par le passage de l'onde gravitationnelle sur les temps d'arrivée des pulses radio est donné par

$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{1}{2}(1 + \cos\theta) \cos(2\phi) \left[ \underbrace{h(t_{\text{rec}} - \ell \cos\theta)}_{\text{amplitude de l'OG à la réception}} - \underbrace{h(t_{\text{em}})}_{\text{amplitude à l'émission}} \right]$$

- Le chronométrage des pulsars millisecondes donne une limite supérieure à l'amplitude du fond d'ondes gravitationnelles qui se traduit par

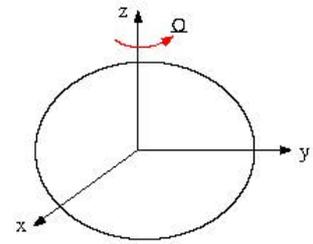
$$\Omega_{\text{OG}}(f \approx 10^{-8} \text{ Hz}) \lesssim 10^{-8}$$

# Ondes gravitationnelles des étoiles à neutrons isolées

Paramètre d'oblativité

$$\varepsilon = \frac{I_{xx} - I_{yy}}{I_{zz}} \quad (\text{irrégularité de la croûte solide})$$

ou  $\varepsilon \propto \theta$  (angle de precession  $\ll 1$ )



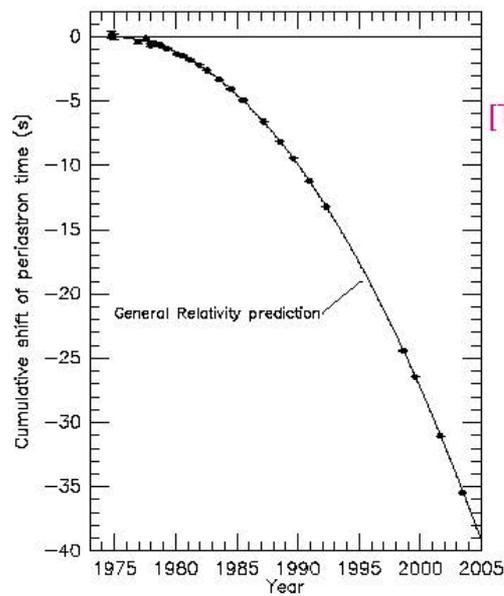
- Energie émise sous forme d'ondes gravitationnelles

$$\left(\frac{dE}{dt}\right)^{\text{OG}} = \frac{32G}{5c^5} I^2 \varepsilon^2 \Omega^6$$

- Par bilan d'énergie avec  $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} I \Omega^2$  on en déduit une relation entre  $\varepsilon$  et  $(\dot{P})^{\text{OG}}$ . La contrainte  $(\dot{P})^{\text{OG}} < \dot{P}$  conduit à une valeur maximale pour le paramètre d'oblativité

$$\varepsilon < \varepsilon_{\text{max}} = 3 \cdot 10^{-9} \left(\frac{P}{1\text{ms}}\right)^{3/2} \left(\frac{\dot{P}}{10^{-9}}\right)^{1/2}$$

# Décroissance de la période orbitale du pulsar binaire



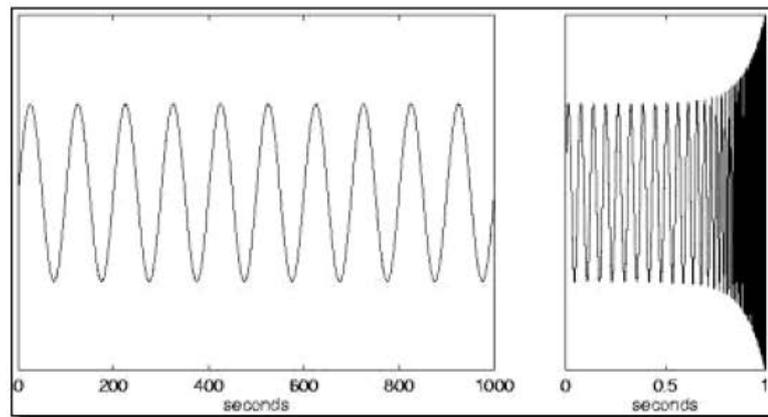
[Taylor et al. 1979, Taylor & Weisberg 1982]

$$\dot{P} = -\frac{192\pi}{5c^5} \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{5/3} \frac{m_p m_c}{(m_p + m_c)^{1/3}} \frac{1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4}{(1 - e^2)^{7/2}}$$

- Application de la formule du quadrupole d'Einstein [Peters & Mathews 1964]
- Réaction au rayonnement gravitationnel en relativité générale [Damour & Deruelle 1982, Damour 1983]

## Le “gazouillement” du signal gravitationnel des binaires

- Dans la phase de spiralement la fréquence et l'amplitude du signal augmentent adiabatiquement au cours du temps. L'onde gravitationnelle est décrite par la **théorie post-newtonienne**
- Des formes d'ondes très précises en termes post-newtonien [à l'ordre  $(v/c)^7$ ] sont nécessaires pour extraire de façon optimale toute la physique contenue dans le signal [Cutler *et al.* 1993, Blanchet & Sathyaprakash 1994]
- Après la dernière orbite circulaire le signal doit être calculé par des méthodes de **relativité numérique**



## Existence des systèmes binaires compacts spiralants

- Huit systèmes binaires d'étoiles à neutrons sont connus dans notre Galaxie (parmi lesquels le pulsar binaire [Hulse & Taylor 1974], et le "double pulsar"). Connaissant la fraction de la Galaxie qui a été explorée par toutes les recherches de pulsars, on en déduit un taux de fusion d'étoiles à neutrons de  $\mathcal{R} \sim 5 \times 10^{-5} \text{ yr}^{-1}$  dans la Galaxie, que l'on extrapole à

$$\mathcal{R} \sim 5 \times 10^{-7} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}; \quad 3 \text{ yr}^{-1} @ 100 \text{ Mpc}$$

[Phinney 1991; Kalogera *et al.* 2004]

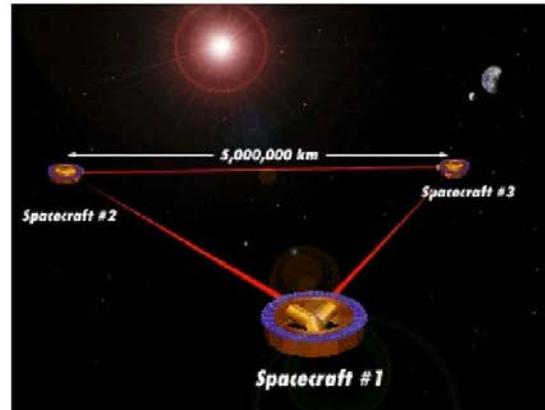
- Les systèmes binaires de trous noirs massifs sont probablement peu détruits par l'explosion des supernovas (à cause de l'énergie orbitale gravitationnelle élevée), et donc il pourrait y avoir autant de fusions de trous noirs que d'étoiles à neutrons [Narayan *et al.* 1991]
- Les simulations numériques de l'évolution de systèmes d'étoiles doubles jusqu'à la formation d'une binaire compacte produisent des systèmes binaires de trous noirs avec des masses  $M \sim 5 - 20 M_{\odot}$  [Bulik *et al.* 2004]

# Les détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles

- Les détecteurs au sol **LIGO & VIRGO** prennent actuellement des données (bande de fréquence  $10 \text{ Hz} \lesssim f \lesssim 10^3 \text{ Hz}$ )
- Le détecteur dans l'espace **LISA** (tel que  $10^{-4} \text{ Hz} \lesssim f \lesssim 10^{-1} \text{ Hz}$ ) pourrait être lancé en 2015 par une collaboration NASA/ESA

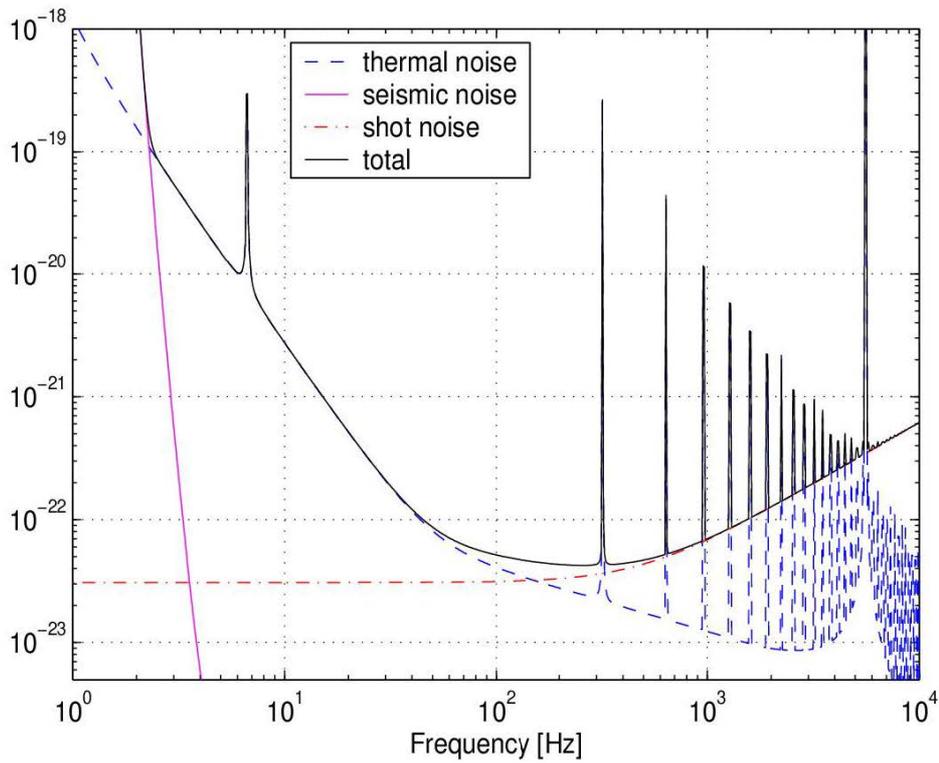


**VIRGO**



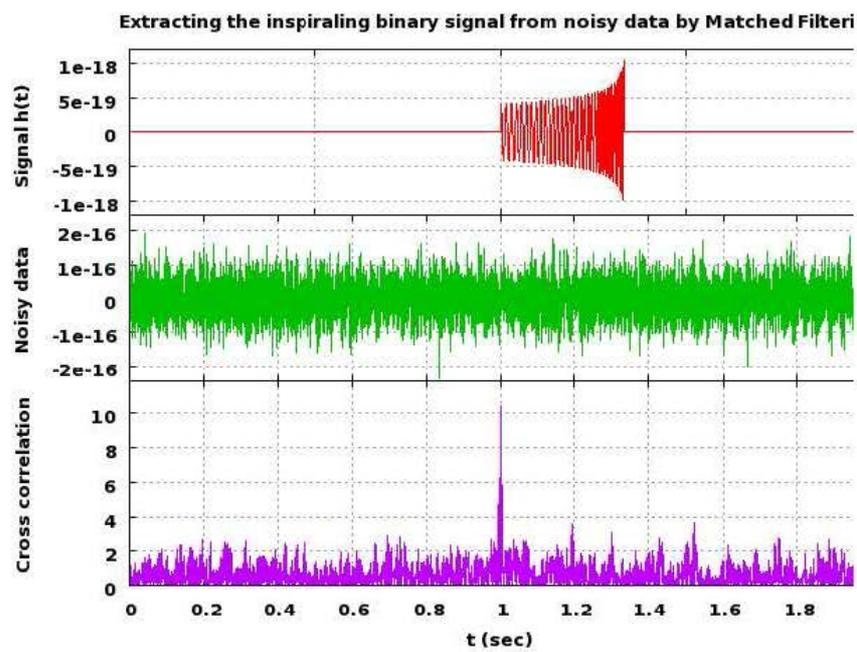
**LISA**

# La courbe de sensibilité de VIRGO

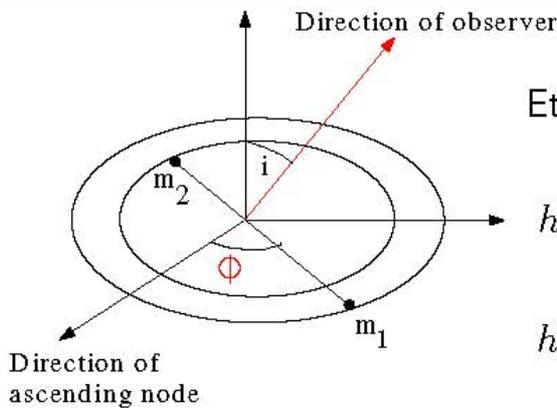


VIRGO a une bonne sensibilité à basse fréquence  $\sim 10$  Hz grâce à son système d'isolation sismique

# Filtrage du signal des binaires compactes spiralantes



# Précision post-newtonienne pour la phase orbitale



Etats de polarisation

$$h_+ = \frac{2G\mu}{c^2 R} \left( \frac{GM\omega}{c^3} \right)^{2/3} (1 + \cos^2 i) \cos(2\phi)$$

$$h_\times = \frac{2G\mu}{c^2 R} \left( \frac{GM\omega}{c^3} \right)^{2/3} (2 \cos i) \sin(2\phi)$$

La phase orbitale est

$$\phi(\omega) = \underbrace{\frac{M}{8\mu} \left( \frac{GM\omega}{c^3} \right)^{-5/3}}_{\text{Approximation newtonienne (formule du quadrupole d'Einstein)}} \left[ 1 + \underbrace{\sum_{n \geq 1} a_n \left( \frac{GM\omega}{c^3} \right)^{2n/3}}_{\text{corrections PN}} \right]$$

La précision sur la mesure de la phase orbitale sera  $\delta\phi \sim 1 \text{ rd}$  donc la prédiction théorique sur la phase doit être développée jusqu'à l'ordre  $3\text{PN} \sim 1/c^6$  au delà de la formule du quadrupole d'Einstein

## Deux problèmes théoriques en relativité générale

- Obtenir les **équations du mouvement** de la binaire compacte à l'ordre 3PN order au dela de l'accélération newtonienne. On en déduit

$E$  = l'énergie de la binaire dans le centre de masse

- Calculer le **champ d'ondes gravitationnelles** de la binaire compacte à l'ordre 3PN order au dela de la formule du quadrupole d'Einstein. D'où

$\mathcal{F}$  = le flux total d'ondes gravitationnelles de la binaire émises

La phase orbitale  $\phi$  (qui est l'observable cruciale pour les détecteurs LIGO/VIRGO et LISA) est déduite de

$$\frac{dE}{dt} = -\mathcal{F} \implies \phi \equiv \int \omega dt = - \int \frac{\omega dE}{\mathcal{F}}$$

- C'est la première fois dans l'histoire de la relativité générale que le développement d'expériences suscite des résultats théoriques nouveaux

# Amplitude du signal des coalescences d'objets compacts

La forme d'onde admet un développement PN

$$h_{+, \times} = \frac{2GM\eta}{c^2 D} x \left\{ H_{+, \times}^{\text{N}} + x^{1/2} H_{+, \times}^{0.5\text{PN}} + x H_{+, \times}^{1\text{PN}} + x^{3/2} H_{+, \times}^{1.5\text{PN}} + \dots \right\}$$

où  $x \equiv \left(\frac{Gm\omega}{c^3}\right)^{2/3}$  est le paramètre PN

$$\left. \begin{aligned} H_+^{\text{N}} &= (1 + \cos^2 i) \underbrace{\cos 2\phi}_{\text{harmonique fondamentale}} \\ H_+^{0.5\text{PN}} &= (\dots) \cos \phi + (\dots) \cos 3\phi \\ H_+^{1\text{PN}} &= 2\phi, 4\phi \\ &\vdots \\ H_+^{2.5\text{PN}} &= \phi, 2\phi, \dots, 7\phi \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{Les corrections PN dans} \\ \text{l'amplitude correspondent} \\ \text{\`a des harmoniques du signal} \\ \text{plus \u00e9lev\u00e9es} \end{array}$$

L'amplitude de l'onde est connue jusqu'à l'ordre 2.5PN [Blanchet, Iyer, Will & Wiseman 1996, Arun *et al.* 2004]. Les corrections d'amplitude devraient jouer un role important dans l'analyse du signal de LISA.

# Phase du signal des coalescences d'objets compacts

La phase est calculée jusqu'à l'ordre 3.5PN [Blanchet, Faye, Iyer & Joguet 2001; Blanchet, Damour, Esposito-Farèse & Iyer 2004]

$$\phi(\omega) = -\frac{x^{-5/2}}{\eta} \left\{ \begin{array}{ll} 1 & \text{Terme newtonien} \\ + \left( \frac{3715}{1008} + \frac{55}{12}\eta \right) x & \text{1PN} \\ + (-10\pi + \beta) x^{3/2} & \text{1.5PN (sillage d'onde) + spin-orbite} \\ + (\dots + \sigma) x^2 & \text{2PN + spin-spin} \\ \vdots & \text{2.5PN, 3PN} \\ + (\dots) x^{7/2} & \left. \vphantom{\dots} \right\} \text{3.5PN} \end{array} \right.$$

Les contributions des spins sont connues jusqu'à l'ordre 2.5PN [Kidder, Will & Wiseman 1993; Blanchet, Buonanno & Faye 2006]

$$\beta \simeq \sum_{A_1} \left( \frac{1}{M^2} + \frac{\eta}{m_A^2} \right) \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}_A$$

$$\sigma \simeq \frac{1}{\eta M^4} (\mathbf{S}_1 \cdot \mathbf{S}_2 + \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}_1 \mathbf{L} \cdot \mathbf{S}_2)$$

# MOND avec ou sans matière noire \*

Luc BLANCHET

*Institut d'Astrophysique de Paris, GRECO, 98<sup>bis</sup> boulevard Arago, 75014 Paris, France*

Françoise COMBES

*Observatoire de Paris, LERMA, 61 avenue de l'Observatoire, 75014 Paris, France*

Dans le modèle cosmologique, l'Univers est constitué principalement de matière noire et d'énergie noire dont nous ne connaissons pas la nature, et pour lesquelles il n'y a pas d'explication dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Comment incorporer matière et énergie noires dans l'ensemble des lois fondamentales? Toutes les observations peuvent aussi bien être expliquées soit par l'addition de composants de l'Univers inconnus, avec la relativité générale comme théorie de la gravitation, soit par une modification fondamentale de cette théorie. Ne serait-il pas plus simple de la modifier? C'est le cas de l'hypothèse MOND (pour MODified Newtonian Dynamics) proposée par Milgrom en 1983, qui est pleine de succès pour décrire la cinématique et la dynamique des galaxies. Il serait cependant possible d'obtenir le même succès grâce à une nouvelle forme de matière, la matière noire dipolaire, tout en gardant la relativité générale comme loi de la gravitation.

Durant la dernière décennie, la cosmologie observationnelle a fait d'énormes progrès : à l'aube de l'an 2000, nous ne connaissions ni l'âge de l'univers, ni sa géométrie, ni son contenu avec la moindre précision. La constante de Hubble, qui mesure l'expansion de l'Univers à partir du Big-Bang, était encore incertaine, pouvant varier d'un facteur 2. Aujourd'hui, tous les scientifiques reconnaissent que la cosmologie est devenue une science de précision. Grâce à l'étude détaillée du fond de rayonnement cosmologique, vestige du Big-Bang, et de ses irrégularités, grâce à l'observation précise de supernovæ comme indicateurs de distance, et grâce à l'observation de la déviation des rayons lumineux par la matière, nous avons pu déterminer au moins à 10% près tous les paramètres de l'Univers, âge, courbure, et composition, cf. la Figure 1. Une conclusion fascinante est que la matière ordinaire ne compte que 4% dans ce recensement, et même une grande partie de la matière ordinaire sous forme d'atomes qui ne rayonnent pas n'a pas été identifiée.

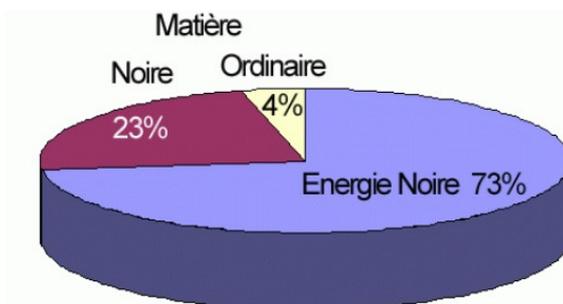


FIG. 1: Contenu de l'Univers à grande échelle.

## DEUX NUAGES SOMBRES À L'HORIZON

Les avancées considérables de ces dernières années mettent donc en évidence une grande tension dans notre vision de l'Univers : celui-ci est constitué essentiellement de matière noire et d'énergie noire dont nous ne connaissons pas la nature, et pour lesquelles il n'y a pas d'explication dans le cadre actuel de la physique des particules. La matière noire, de nature exotique, pourrait être formée de particules prédites par certaines extensions du modèle standard comme

---

\* Version plus détaillée d'un article paru dans : *La Recherche*, no. 435, p. 44 (novembre 2009).

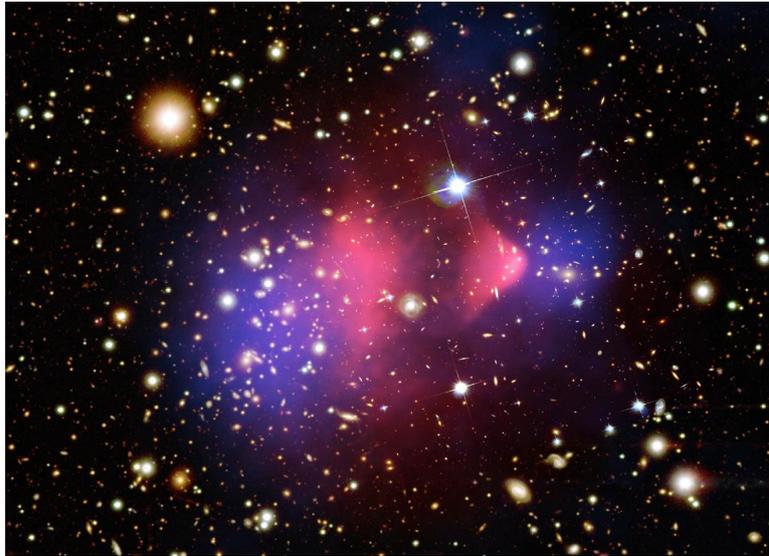


FIG. 2: L'amas de galaxies dit "du boulet". Il s'agit en fait de deux amas de galaxies en collision. À la photo optique du système (qui montre les deux amas de galaxies comme une concentration de tâches blanches) est superposée en rouge l'émission X du gaz chaud, et en bleu la masse totale projetée. La distribution de masse projetée sur le ciel correspond à la masse des amas reconstruite par lentilles gravitationnelles. Le plus petit amas de galaxies à droite semble avoir traversé comme un boulet le gros amas à gauche. La pointe de couleur rouge à droite montre clairement une onde de choc en forme de cône, qui permet de mesurer la vitesse supersonique de cette collision (ici 4700 km/s, ou Mach 3). Tous les composants de l'amas ne réagissent pas de la même façon dans la collision : les galaxies et la matière noire peuvent s'interpénétrer sans presque se voir. En revanche, le gaz chaud est freiné, si bien que les deux composants gazeux des deux amas sont plus rapprochés que les deux masses totales. Le comportement différent dans la collision du gaz chaud, des galaxies et de la matière noire permet de les séparer, et de tester les modèles. D'après Clowe et al. (2006).

dans les théories supersymétriques. Mais ces particules n'ont toujours pas été mises en évidence de manière directe, malgré de nombreuses expériences ayant tenté de les détecter (peut-être que le LHC va bientôt nous en dire plus). Quant à l'énergie noire, c'est un nouveau composant mystérieux qui accélère l'expansion de l'Univers, et qui pourrait être la fameuse constante cosmologique  $\Lambda$  qu'Einstein avait introduite dans les équations de la relativité générale, pour des raisons maintenant disparues. Le problème est que toutes les tentatives pour interpréter  $\Lambda$  en termes de physique fondamentale ont pour l'instant échoué.

Matière noire et énergie noire sont comme deux nuages qui se profilent à l'horizon du ciel radieux de la physique. Sommes-nous à l'aube d'une révolution fondamentale ? Plusieurs satellites, comme Euclid en Europe, ou JDEM aux États-Unis, vont mesurer plus précisément les caractéristiques des composantes noires, mais on peut argumenter que le problème est plutôt d'ordre théorique : comment incorporer matière et énergie noires dans un ensemble de lois fondamentales ?

Toutes les observations peuvent aussi bien être expliquées soit par l'addition de composants inconnus, en restant dans le cadre de la relativité générale comme théorie de la gravitation, soit par une modification fondamentale de cette théorie. Ne serait-ce pas plus simple de la modifier ? Au XIX<sup>ème</sup> siècle l'astronome français Le Verrier avait découvert une rotation anormale (dite précession) de l'orbite de la planète Mercure. On pouvait l'expliquer soit par de la "matière noire", en l'occurrence une nouvelle planète intérieure à l'orbite de Mercure (dénommée Vulcain par Le Verrier), soit par une modification des lois de Newton. C'est cette deuxième option qui s'est finalement avérée correcte, lorsque la gravitation newtonienne a été remplacée par celle d'Einstein, et que l'excès de précession de Mercure a été expliqué par un effet relativiste.

## PROBLÈME DE LA MASSE MANQUANTE

La matière noire est un composant connu depuis les années 1930, quand l'astronome suisse F. Zwicky avait besoin de 100 fois plus de masse que la matière visible, pour expliquer la dynamique des amas de galaxies. Depuis, nous avons découvert le gaz très chaud, émetteur de rayons X, qui représente l'essentiel de la matière visible dans les amas, mais la matière noire est encore dominante, et égale à environ 6 fois la matière visible dans ces environnements.

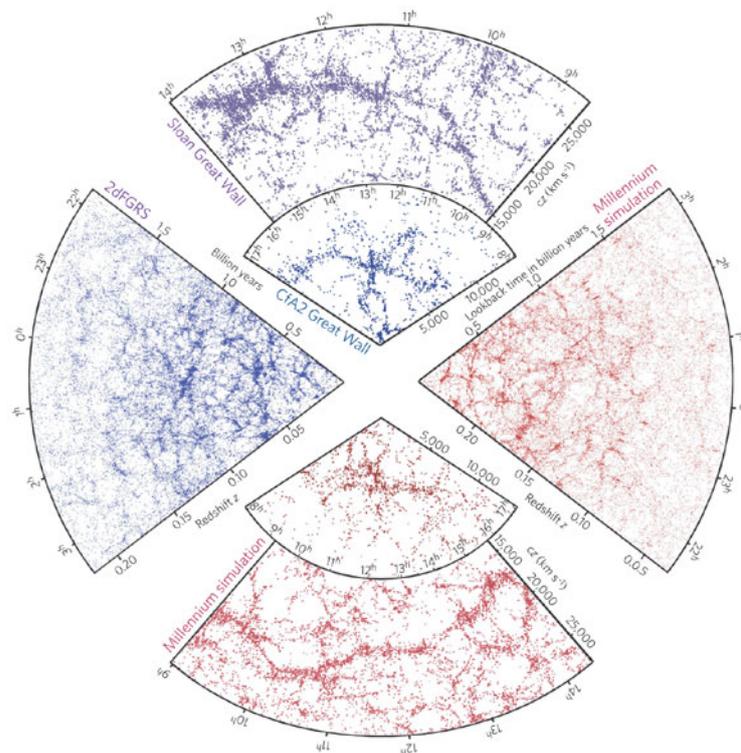


FIG. 3: Comparaison entre les cartographies de galaxies à grande échelle (en bleu), et les simulations numériques (en rouge). En haut et à gauche sont montrées des tranches d’univers, où chaque point est une galaxie, dont la distance est obtenue par le décalage vers le rouge, mesuré sur son spectre (catalogues SDSS et 2dF). En bas et à droite, présentées de la même façon, les prédictions des simulations de matière noire Millenium. D’après Springel et al. (2006).

Dans les années 1980, les courbes de rotation des galaxies spirales, très bien établies par les observations, ont aussi mis en évidence la matière manquante au niveau des galaxies, et depuis une dizaine d’années, l’outil des lentilles gravitationnelles permet de cartographier la matière noire, au voisinage des grandes structures : les galaxies de fond envoient des rayons lumineux qui sont déviés par la matière sur la ligne de visée avant d’arriver à l’observateur. La déformation des images, due à ces “lentilles”, est mesurée et traitée statistiquement pour reproduire la distribution de matière totale, comme par exemple sur la Figure 2.

La matière noire est aussi corroborée par les pics de fluctuations du fond de rayonnement cosmologique, ou rayonnement de corps noir à 2,7 degrés Kelvin, émis peu de temps après le Big-Bang. La position et la hauteur des pics indiquent la présence de matière noire sous forme d’un fluide de particules froides (“Cold Dark Matter” ou CDM) sans interactions.

Le modèle cosmologique actuel  $\Lambda$ -CDM rencontre beaucoup de succès à grande échelle, comme le montrent les simulations numériques de la formation des grandes structures (cf. Figure 3). Dans ce modèle la matière noire joue un rôle crucial car c’est elle qui entraîne la matière ordinaire dans un effondrement gravitationnel et permet d’expliquer la formation des structures.

### PROBLÈMES DE CDM À L’ÉCHELLE DES GALAXIES

Si le modèle CDM est correct il doit pouvoir aussi expliquer les halos observés de matière noire autour des galaxies. Malheureusement, les prédictions des simulations à l’échelle des galaxies posent de nombreux problèmes.

La matière noire CDM se concentre beaucoup trop dans les galaxies, et une spirale comme la Voie Lactée par exemple devrait être dominée par la matière noire, même dans sa partie centrale, ce qui n’est pas observé. D’autre part, les simulations suggèrent un profil de densité de matière noire autour des galaxies où la distribution radiale de matière noire doit monter très vite vers le centre, et y former un pic de densité, alors que les courbes de rotation indiquent plutôt la présence de plateaux de densité constante au centre.

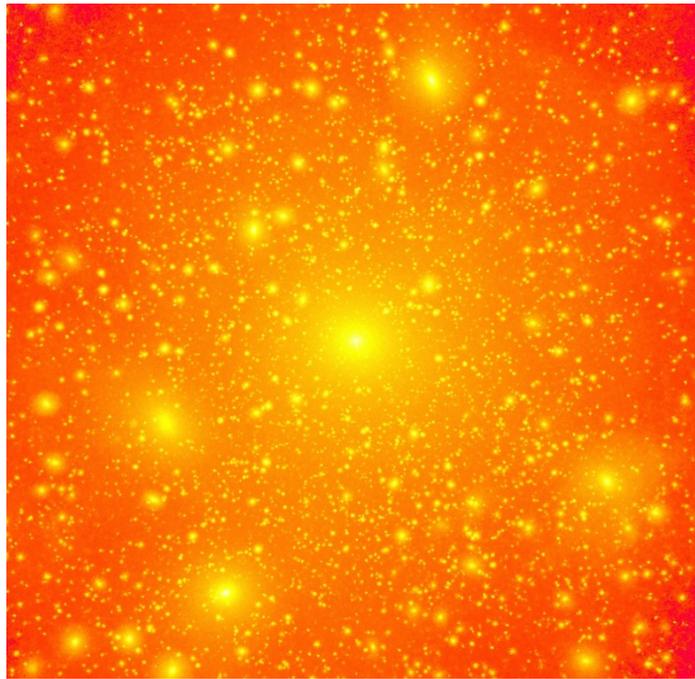


FIG. 4: Simulation de la formation de la Voie Lactée, dans le modèle standard de matière noire CDM : plus d’un millier de satellites devrait orbiter autour du centre, alors que nous en observons une douzaine. D’après Diemand et al. (2007).

La formation de galaxies s’effectue en grande partie par fusions de galaxies plus petites, dans le scénario dit “hiérarchique”. Les fusions entre galaxies sont accélérées par la perte d’énergie orbitale au profit des halos de matière noire. La matière ordinaire spirale très vite vers le centre des halos, en perdant une grande partie de sa rotation. Ainsi, dans le modèle standard, la taille des disques simulés est près de dix fois plus petite par rapport à la taille des galaxies spirales observées. De plus, comme le montre la Figure 4, le scénario prédit un grand nombre de satellites autour d’une galaxie géante typique, comme la Voie Lactée. Ces compagnons ne sont pas observés, et devraient donc avoir perdu toutes leurs étoiles et leur gaz.

Un autre problème, qui semble de plus en plus fondamental, est l’évidence observationnelle de l’existence d’une nouvelle constante “universelle” d’accélération  $a_0$  mesurée à la valeur  $a_0 = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$ . Selon la loi de l’israélien Moti Milgrom, la matière noire ne se manifeste que dans les régions où le champ de gravitation est plus faible que  $a_0$ . Cette loi étrange mais très bien vérifiée est inexplicable dans le cadre CDM.

Plus généralement, on observe une surprenante et mystérieuse régularité dans la distribution de matière noire autour des galaxies, qui se traduit par une sorte de “conspiration” entre la matière noire et la matière visible pour rendre compte des observations. Dans le modèle CDM, il faut ajuster finement la proportion et la distribution de matière noire dans chaque galaxie, alors que l’on s’attendrait à une dispersion plus grande des propriétés des halos de matière noire, à cause du hasard de l’histoire de chaque galaxie et de son environnement.

Ne sommes-nous pas en train de faire une erreur en extrapolant le modèle standard de l’échelle cosmologique à l’échelle galactique ?

### LA GRAVITÉ NEWTONIENNE MODIFIÉE (MOND)

Cette “régularité” des halos galactiques s’exprime par une formule purement empirique qui permet d’ajuster avec grande précision les courbes de rotation des galaxies, et de reproduire la célèbre relation des astronomes américains Brent Tully et Richard Fisher, qui relie la vitesse de rotation des galaxies et leur luminosité (celle-ci varie comme la puissance 4<sup>ème</sup> de la vitesse), et qui est mal comprise dans le modèle CDM.

Dans une région où le champ de gravitation est plus faible que la constante  $a_0$ , tout se passe comme si le champ

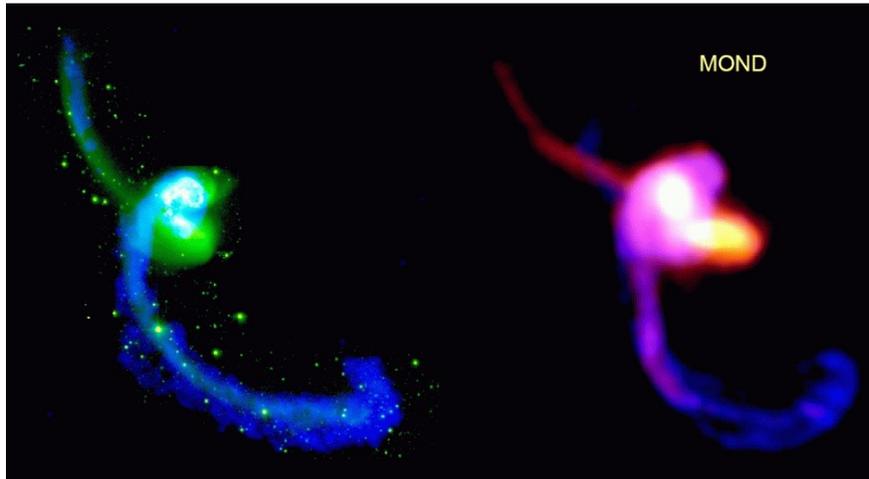


FIG. 5: Comparaison entre l’observation des “Antennes” à gauche, galaxies de masses semblables en interaction, et développant deux queues de marée, et les simulations dans le cadre de MOND, de deux galaxies de masse égale. D’après Tiret & Combes (2008).

changeait de régime, passant de la valeur newtonienne  $g_N$ , qui décroît comme  $1/r^2$  loin de la galaxie, à la valeur  $g = \sqrt{g_N a_0}$ . Donc, selon cette formule,  $g$  va décroître loin de la galaxie en  $1/r$ , soit moins rapidement que le champ newtonien, et on “explique” pourquoi les étoiles tournent plus vite autour de la galaxie sans avoir recours à la matière noire. Celle-ci ne serait donc qu’une apparence, et c’est la loi de la gravitation qui serait modifiée. C’est l’hypothèse MOND (pour MODified Newtonian Dynamics) proposée par M. Milgrom en 1983.

Dans le scénario MOND, les courbes de rotation sont remarquablement reproduites pour tous les types de galaxies, des géantes peu concernées par le problème de la masse manquante, jusqu’aux galaxies naines, entièrement dominées par la matière noire.

Des simulations numériques de la dynamique des galaxies dans le cadre du formalisme de MOND ont été effectuées par O. Tiret et F. Combes dans les trois dernières années, pour essayer de discriminer les deux modèles. Est-ce que les galaxies présentent le même taux d’instabilités? Forment-elles également des barres, des spirales, qui sont le moteur de l’évolution et de la concentration de la masse? Les disques sous MOND sont plus instables, et forment des barres plus vite, mais lorsque les barres sont détruites il est plus difficile de les former. Globalement, on peut obtenir la fréquence des barres observées dans les deux modèles. Toutes les simulations démontrent qu’il est possible de reproduire les observations avec MOND, même dans le cas d’interactions entre galaxies, comme le montre la Figure 5, illustrant la fusion entre deux galaxies, les “Antennes”.

Si le formalisme MOND parvient à résoudre les problèmes du modèle CDM à l’échelle des galaxies, il rencontre en revanche ses propres problèmes à l’échelle des amas de galaxies. Dans cet environnement, l’accélération n’est pas toujours très faible par rapport à l’accélération critique  $a_0$ , et l’amplification de la gravité n’est pas aussi forte qu’au niveau des galaxies. MOND rend compte d’une partie de la masse manquante, mais il en reste encore! Ce problème pourrait être résolu par la présence soit de neutrinos, particules très nombreuses dans l’Univers, et dont la masse a été longtemps supposée nulle, mais serait de l’ordre de un électron-Volt en équivalent énergie, soit de baryons noirs, ou matière ordinaire, faite d’atomes qui ne rayonnent pas, dans les amas. Ceci est encore possible, car la majeure partie des baryons n’ont pas encore été identifiés. Nous savons, par les expériences rappelées au début, que les baryons constituent 4% du contenu de l’Univers, et pourtant la matière visible (étoiles et gaz) ne recense que environ 10% de ces baryons, soit 0,4% du total. Les amas ne représentent qu’une très faible partie de la masse de l’Univers, et aucune contrainte n’existe alors sur la quantité de baryons sombres qu’ils peuvent contenir.

### GRAVITÉ MODIFIÉE OU MATIÈRE MODIFIÉE ?

La formule MOND a montré une performance étonnante pour les halos de galaxies, mais a clairement un domaine d’application limité. D’autre part ce n’est qu’une “recette” qui ne rentre pas dans le cadre théorique actuel. Et

pourtant, elle semble dire quelque chose d'important sur le problème de la matière noire, et peut-être même de l'énergie noire car la constante  $a_0$  se trouve être du même ordre de grandeur que la valeur associée à la constante cosmologique  $\Lambda$ .

Une possibilité est qu'un jour la formule MOND soit expliquée par une série de phénomènes physiques qui n'ont pas encore été pris en compte dans les simulations de CDM, tels que l'effet des supernovæ sur la distribution de matière noire ou l'interaction de la matière noire avec les baryons. Cela semble néanmoins improbable car on imagine difficilement pouvoir résoudre ainsi le problème de la conspiration entre la matière noire et la matière visible. D'autre part, aucun mécanisme convainquant n'a été trouvé pour incorporer l'accélération  $a_0$  dans le modèle CDM.

La seconde solution est la gravité modifiée MOND sans matière noire, décrite plus haut. On cherche une modification de la relativité générale d'Einstein de façon à reproduire MOND dans la limite non-relativiste. Il n'est pas facile de modifier les équations de la relativité générale à cause de leur parfaite cohérence mathématique! On suppose donc que la relativité générale est valable, mais on rajoute des nouveaux champs associés à la gravitation, qui vont obéir à de nouvelles équations, et vont aussi se coupler à la métrique de l'espace-temps de la relativité générale. Jacob Bekenstein (2004) a montré qu'il est possible de construire une telle théorie, basée sur des champs vectoriel et scalaires en plus du champ tensoriel habituel. Cette théorie TeVeS (pour Tenseur-Vecteur-Scalaire) est le premier exemple de théorie relativiste reproduisant MOND.

Une troisième alternative est proposée par L. Blanchet et A. Le Tiec depuis deux ans: la matière modifiée. On suppose que la matière noire est munie d'une propriété qui la fait se comporter différemment de CDM, et permet d'expliquer la phénoménologie de MOND, sans modifier la théorie de la gravitation qui reste la relativité générale. Cette approche a donc la couleur de MOND, mais ce n'est pas du MOND!

## LA MATIÈRE NOIRE DIPOLAIRE

L'approche de matière modifiée est basée sur une analogie remarquable avec la physique des dipôles électrostatiques. Dans un milieu diélectrique, les atomes sont modélisés par des dipôles électriques qui se polarisent en présence d'un champ électrique extérieur. Le champ total est alors la somme du champ extérieur et du champ dipolaire induit par la polarisation. Or MOND apparaît exactement comme l'analogue gravitationnel d'un effet de polarisation (Blanchet 2007). Dans le cas gravitationnel la polarisation tend à augmenter l'intensité du champ (au contraire du cas électrique où le champ est "écranté" par les charges de polarisation), et c'est bien ce qu'il nous faut pour expliquer la matière noire.

Se pourrait-il que la matière noire soit constituée d'un milieu de dipôles gravitationnels? Si l'on poursuit l'analogie avec l'électrostatique, le dipôle gravitationnel devrait être constitué d'une masse négative associée à une masse positive. La présence de masses négatives conduit à une violation du principe d'équivalence, difficilement réconciliable avec le formalisme de la relativité générale. Néanmoins, il est possible de décrire le dipôle gravitationnel de manière "effective", sans lui donner une interprétation microscopique fondamentale. On peut alors construire un modèle de matière noire dipolaire en relativité générale (Blanchet & Le Tiec 2008, 2009). Ce modèle reproduit naturellement la phénoménologie de MOND grâce au mécanisme de polarisation gravitationnelle, et d'autre part on trouve que la matière noire dipolaire se comporte comme CDM aux grandes échelles cosmologiques, et est donc en accord avec les fluctuations du fond cosmologique. Le modèle est viable! Il permet d'unifier les deux facettes antagonistes de la matière noire, son aspect "particulaire" en cosmologie, et son aspect "modification des lois" dans les galaxies.

On le voit, les modèles alternatifs ne manquent pas, et la question est ouverte: les expériences menées par les télescopes au sol et les satellites dans le futur, ainsi que peut-être des développements théoriques nouveaux, permettront de trancher.

- 
- [1] Bekenstein, J. 2004, *Phys. Rev. D* **70**, 083509.
  - [2] Blanchet, L. 2007, *Class. Quant. Grav.* **24**, 3529.
  - [3] Blanchet, L. & Le Tiec, A. 2008, *Phys. Rev. D* **78**, 024031; *ibid.* 2009, *Phys. Rev. D* **80**, 023524.
  - [4] Clowe, D., et al., *Astrophys. J.* **648**, L109 (2006).
  - [5] Diemand, J., Kuhlen, M. & Madau, P. 2007, *Astrophys. J.* **667**, 859.
  - [6] Milgrom, M. 1983, *Astrophys. J.* **270**, 365.
  - [7] Tiret, O. & Combes, F. 2008, *Astron. Soc. Pac. Conf.* **396**, 259.
  - [8] Springel, V., Frenk, C. & White, S. 2006, *Nature* **440**, 1137.

# La relativité générale et la spirale infernale des étoiles binaires compactes

---

GRÉCO, Institut d'Astrophysique de Paris – C.N.R.S., 98<sup>bis</sup> boulevard Arago, 75014 Paris

*La théorie relativiste de la gravitation, très bien vérifiée par les tests classiques dans le système solaire et par le rayonnement gravitationnel du pulsar binaire, est un des outils fondamentaux de l'astrophysique. Elle permet le calcul de la forme de l'onde gravitationnelle émise lors de la phase spirale des binaires d'étoiles à neutrons et de trous noirs. À partir d'une approximation dite post newtonienne développée à un ordre élevé, la prédiction de cette théorie est utilisée comme "patron d'onde" pour la recherche et l'analyse du signal dans le réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles VIRGO/LIGO.*

La relativité générale est quelquefois considérée comme la plus importante création intellectuelle jamais réalisée par un seul homme : Albert Einstein. Elle a révolutionné notre vision de la nature de l'espace et du temps, et de notre perception familière de la force de la gravitation. Les physiciens "relativistes" admirent l'extraordinaire cohérence mathématique – et donc la beauté – de ses équations. La relativité générale est maintenant une vieille dame, qui est née en 1915 après des années de gestation laborieuse remontant à la découverte de la relativité restreinte en 1905, l'année miraculeuse d'Einstein dont nous fêtons le centenaire. Nous allons voir que cette vieille dame est très en forme, car plus que jamais la relativité générale est considérée comme *la* théorie de la gravitation.

Le phénomène familier de la gravitation possède en relativité générale l'interprétation extraordinaire d'être la manifestation de la cour-

bure de l'espace et du temps produite par la présence des corps massifs. Cette description est une conséquence d'un principe fondamental, appelé de nos jours le principe d'équivalence d'Einstein, qui est la traduction en physique moderne du fait que tous les corps sont accélérés de la même façon dans un champ gravitationnel. On dit parfois que la masse inerte  $m_i$  des corps, qui n'est rien d'autre que leur énergie  $E = m_i c^2$  en utilisant l'équivalence masse-énergie de la relativité restreinte, est toujours égale à leur masse gravitationnelle  $m_g$ , qui est l'analogie de la charge électrique pour le champ gravitationnel. C'est bien sûr Galilée qui a fait remarquer l'importance de cette "universalité" du mouvement de chute libre des corps (bien que son expérience fameuse du haut de la tour de Pise soit probablement apocryphe), mais c'est Einstein qui a donné à ce fait expérimental son statut définitif.

## LE TRIPTYQUE DES TESTS CLASSIQUES DANS LE SYSTÈME SOLAIRE

Dès 1845, Le Verrier à l'observatoire de Paris (un an avant sa découverte de Neptune par le calcul à partir des perturbations engendrées sur Uranus), avait remarqué que le demi grand-axe de l'orbite de Mercure précède à chaque rotation avec un angle qui est légèrement en avance par rapport à la prédiction théorique  $\Delta_N$ . Son calcul de  $\Delta_N$ , en théorie de Newton, était fondé sur les perturbations induites par les autres planètes, principalement Vénus qui est la plus proche de Mercure, et Jupiter qui est la plus massive du système solaire. L'avance anormale du périhélie était restée inexplicquée et avait alimenté de nombreuses spéculations, parmi lesquelles l'existence d'une nouvelle planète intérieure à l'orbite de Mercure (dénommée Vulcain par Le Verrier), la présence possible d'un anneau de matière

zodiacale dans le plan de l'écliptique, et même une modification de la loi newtonienne en  $1/r^2$ . Dès l'obtention des équations du champ gravitationnel en novembre 1915, Einstein prouva que les corrections purement relativistes au mouvement d'une planète sur une ellipse keplerienne impliquent une rotation supplémentaire du grand axe de l'ellipse donnée par

$$\Delta_R = \frac{6\pi GM_\odot}{c^2 a(1-e^2)},$$

où  $a$  et  $e$  sont le demi grand-axe et l'excentricité de l'orbite,  $M_\odot$  est la masse du Soleil, et  $G$  et  $c$  sont la constante de la gravitation et la vitesse de la lumière. Numériquement on trouve 43" d'arc par siècle, qui s'ajoutent donc à la précession newtonienne  $\Delta_N$  pour être en parfait accord avec l'observation! C'est certainement ce succès remarquable qui a convaincu Einstein de la justesse de la théorie naissante (c'était d'ailleurs à l'époque la seule confrontation possible de la théorie à des observations réelles).

Le deuxième "test classique", encore plus célèbre, est celui de l'angle de déviation de la lumière en provenance d'une source lointaine (un quasar dans les mesures récentes), par le champ de gravitation du Soleil. Il est donné en relativité générale, dans le cas d'un rayon rasant la surface du Soleil (rayon  $R_\odot$ ), par

$$\alpha_\odot = \frac{4GM_\odot}{c^2 R_\odot}.$$

Cet angle vaut *deux* fois la valeur estimée en théorie de Newton, car en effet si on considère la lumière comme faite de corpuscules de vitesse  $c$  (et de masse arbitraire, car la masse n'intervient pas), il y a bien une déviation de la lumière chez Newton! En fait on peut montrer que le facteur 4 dans l'expression de  $\alpha_\odot$  se décompose en "2+2", avec le premier 2 qui provient du principe d'équivalence,  $m_i = m_g$ , qui est vrai en relativité générale comme en théorie de Newton, et le

second 2 qui est un effet supplémentaire dû à la courbure de l'espace en relativité générale. L'angle  $\alpha_\odot$  vaut 1.75" d'arc, et fut mesuré lors d'une éclipse du Soleil par Eddington en 1919, qui put d'ores et déjà conclure que la théorie de Newton était exclue expérimentalement. (En cette année du traité de Versailles un anglais mettait à mal la théorie d'un autre anglais, et confirmait expérimentalement celle d'un allemand.)

L'effet Shapiro complète notre triptyque des tests classiques de la relativité générale dans le système solaire. C'est un retard dû au champ de gravitation dans les temps d'arrivée de photons ayant rasé la surface du Soleil. Non seulement la trajectoire de la lumière est déviée de l'angle  $\alpha_\odot$ , mais les photons sur leur trajectoire sont *ralentis* par le champ du Soleil. L'effet n'est pas du tout négligeable, et il a été calculé et observé pour la première fois par Shapiro en 1964. Son expérience a consisté à mesurer le temps d'aller-retour de photons radio émis sur Terre vers Mercure, réfléchis sur le sol de Mercure et renvoyés vers la Terre, lorsque la trajectoire des photons passe à proximité de la surface du Soleil. L'effet principal du ralentissement de la lumière est donné par

$$\Delta T = \frac{4GM_\odot}{c^3} \log \left( \frac{4r_\oplus r_\otimes}{R_\odot^2} \right),$$

où  $r_\oplus$  et  $r_\otimes$  sont les distances de la Terre et de Mercure au Soleil. Contrairement aux autres tests, l'effet Shapiro ne date pas de l'enfance de la relativité générale. Curieusement, Einstein n'a jamais pensé à calculer cet effet. Ayant obtenu la trajectoire des photons au voisinage du Soleil et leur angle de déviation  $\alpha_\odot$ , il n'a apparemment jamais cherché à connaître le mouvement "horaire" des photons sur leur trajectoire, ce qui lui aurait donné leur retard gravitationnel  $\Delta T$  – un nouvel effet tout à fait intéressant.

La relativité générale est maintenant vérifiée dans le système solaire à mieux que  $1/1000^{\text{ème}}$  près.

Des mesures très précises d'astrométrie, telles que celles du futur satellite GAIA qui sera lancé par l'agence spatiale européenne, devraient encore améliorer la précision sur la déviation de la lumière. Des théories alternatives de la gravitation, comme par exemple la théorie de Brans et Dicke où l'on rajoute un champ scalaire au champ gravitationnel de la relativité générale, et qui fut une théorie fameuse en son temps (1961), ont été éliminées par ces observations. Cependant, dans le système solaire, les vitesses des corps sont très petites par rapport à la vitesse de la lumière,  $v \lesssim 10^{-4} c$ , et le champ de gravitation est faible, car le potentiel newtonien  $U$  est tout petit en unités relativistes,  $U \lesssim 10^{-6} c^2$ . Les tests classiques n'ont donc vérifié qu'un régime assez restreint de la théorie, celui de sa limite "quasi-newtonienne".

### LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE, UN OUTIL POUR L'ASTROPHYSIQUE

Après son enfance brillante, la vieille dame a connu une adolescence difficile. Elle fut longtemps considérée comme un "paradis pour le théoricien", mais un "désert pour l'expérimentateur". En fait, elle est restée à l'écart du courant principal de la physique, dominé par la mécanique quantique et la théorie quantique des champs, jusqu'au début des années 1960 (notre théorie est alors quadragénaire), époque à laquelle elle a subi un renouveau et un essor remarquables.

Du point de vue théorique, cette époque a vu l'élucidation du concept de trou noir, et la magnifique découverte par Kerr du trou noir en rotation (1963). Le trou noir de Schwarzschild, sans rotation, date des premiers mois de la relativité générale, mais à l'époque on considérait cette solution comme valable uniquement à l'extérieur d'une étoile, et ce n'est que dans les années 60 que l'on analysera les propriétés du trou noir au voisinage

de l'horizon, pour comprendre que ces objets peuvent réellement exister dans la nature. De même pour le rayonnement gravitationnel, dont on a vraiment compris les caractéristiques pendant cette période; auparavant une controverse faisait rage sur l'existence réelle des ondes gravitationnelles!

On peut dire que les expériences modernes de gravitation ont commencé avec la vérification précise en

laboratoire du décalage gravitationnel vers le rouge ou effet Einstein, par Pound et Rebka en 1960. Souvent considérée comme le 4<sup>ème</sup> test classique de la théorie, cette vérification est en fait un test du principe d'équivalence qui est donc plus général. À la même époque on tentait la détection du rayonnement gravitationnel à l'aide d'un cylindre métallique résonnant appelé maintenant barre de Weber.

La relativité générale émerge alors enfin en tant que théorie *physique*, qui fait des prédictions et voit ses prédictions réalisées. La découverte en 1974 du pulsar binaire PSR 1913+16, et la preuve expérimentale de l'existence du rayonnement gravitationnel tel qu'il est prévu par la relativité générale, illustre merveilleusement la capacité de prédiction de notre théorie (voir l'encadré 1).

### Encadré 1

## LE PULSAR BINAIRE PSR 1913+16

L'année 1974 fut faste pour les "relativistes" avec la découverte par Hulse et Taylor d'un système extrêmement intéressant : le pulsar binaire PSR 1913+16, qui valut à ses découvreurs le prix Nobel en 1993. C'est un pulsar, c'est-à-dire une étoile à neutrons en rotation rapide sur elle-même (avec une période de 56 ms), qui envoie à chaque rotation, tel un phare, du rayonnement électromagnétique radio en direction de la Terre. L'analyse des instants d'arrivée des pulses radio montre (grâce à leur décalage Doppler) que PSR 1913+16 est en orbite autour d'une étoile compagne, probablement une autre étoile à neutrons. L'orbite est une ellipse quasi-keplerienne de période orbitale  $P \simeq 7^{\text{h}}40^{\text{mn}}$ , d'excentricité  $e \simeq 0.617$  et de demi-grand-axe  $a \simeq 10^6$  km. Les masses du pulsar et de son compagne ( $m_p$  et  $m_c$ ) sont toutes deux environ égales à  $1.4 M_{\odot}$  (qui est la masse des étoiles à neutrons). PSR 1913+16 est un système passionnant car les effets relativistes jouent un rôle important dans sa dynamique. Par exemple, la précession relativiste  $\Delta_R$  du périastre de l'orbite est de l'ordre de 4 degrés par an, à comparer avec les 43" arc par siècle du périhélie de Mercure.

Le système double formé par le pulsar et son compagne émet du rayonnement gravitationnel, ce qui se traduit par une perte d'énergie orbitale, et donc par le rapprochement des deux étoiles l'une de l'autre,

et une lente dérive de la période orbitale du mouvement ( $\dot{P} < 0$ ). On sait qu'en première approximation le rayonnement gravitationnel est quadrupolaire et le flux du rayonnement est donné par la formule dite du quadrupole d'Einstein. Si l'on applique cette formule à un système de deux masses ponctuelles en mouvement sur une ellipse keplerienne on trouve un résultat dû à Peters et Mathews (1963),

$$\dot{P} = -\frac{192\pi}{5c^5} \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{5/3} \frac{m_p m_c}{(m_p + m_c)^{1/3}} \frac{1 + \frac{73}{24}e^2 + \frac{37}{96}e^4}{(1 - e^2)^{7/2}}.$$

Dans le cas du pulsar binaire cette formule donne  $\dot{P} = -2.4 \cdot 10^{-12}$  s/s, qui représente donc la décroissance de la période orbitale mesurée en secondes à chaque seconde. Cette prédiction purement théorique est en excellent accord (à mieux que 0.5% près) avec les observations effectuées par Taylor et ses collaborateurs. C'est une vérification remarquable, l'une des confirmations les plus importantes de la relativité générale, et l'une des mesures les plus précises effectuées en astronomie. Mais pour nous elle représente une validation observationnelle de l'ordre newtonien sur lequel est fondé nos investigations post newtoniennes pour les binaires compactes spirantes (voir l'encadré 2)!

Aujourd'hui la relativité générale est un "outil" permettant d'explorer l'existence et de comprendre les observations de nouveaux objets ou de nouveaux phénomènes en astrophysique. Par exemple les propriétés particulières du trou noir de Kerr sont utilisées par les astrophysiciens travaillant sur les objets compacts et les disques d'accré-

tion autour de trous noirs. La relativité générale va probablement permettre d'ouvrir une nouvelle "fenêtre" en astronomie, celle des ondes gravitationnelles, car ce rayonnement a des propriétés spécifiques très différentes des ondes électromagnétiques.

Il faut pourtant garder à l'esprit que le domaine où s'exerce

la relativité générale est le *macrocosme*. Cette théorie n'incorpore pas les lois de la mécanique quantique, et il est probable qu'elle doit être considérée comme une théorie "effective" valable uniquement à grande échelle. Assez étrangement, la force gravitationnelle n'a pu être testée en laboratoire que jusqu'à une échelle de l'ordre du millimètre.

À une échelle microscopique, inférieure ou très inférieure au millimètre, on ne connaît expérimentalement rien de la loi gravitationnelle et il est vraisemblable que la relativité générale *stricto sensu* ne s'applique plus.

### LA DÉTECTION INTERFÉROMÉTRIQUE DU RAYONNEMENT GRAVITATIONNEL

Une onde gravitationnelle est engendrée par le mouvement accéléré des corps massifs. Dans notre théorie, le champ de gravitation est représenté par la métrique de l'espace-temps, et l'on peut montrer que les composantes de la métrique obéissent en première approximation, dans un système de coordonnées particulier, à une équation de d'Alembert ou équation des ondes. On a donc affaire à une onde gravi-

tationnelle, qui doit être vue comme une perturbation de la surface de l'espace-temps se propageant à la vitesse de la lumière. L'action de l'onde gravitationnelle sur la matière se traduit par des déformations analogues à celles produites par un champ de marée. La variation relative de la taille  $L$  d'un détecteur au passage de l'onde est donnée par

$$\frac{\delta L}{L} \simeq \frac{h}{2},$$

où  $h$  représente l'amplitude de l'onde gravitationnelle, c'est-à-dire la modification de la métrique de l'espace-temps par rapport à la métrique "plate" de Minkowski en l'absence du champ gravitationnel.

De nouvelles expériences vont tenter pour la première fois de détecter le rayonnement gravitationnel produit par des sources cosmiques. Ces expériences sont fondées sur l'interférométrie à laser,

et sont constituées de gigantesques interféromètres de Michelson avec cavités Fabry-Perot. Elles ambitionnent de former un réseau international, comprenant des interféromètres de grande taille, LIGO aux États-Unis dont les bras ont une longueur de 4 km, et VIRGO qui est construit près de Pise avec des bras de 3 km dans le cadre d'une collaboration franco-italienne (voir la figure 1). Le réseau comprend aussi des détecteurs de taille plus modeste, GEO à Hanovre et TAMA au Japon.

Le grand intérêt de l'interférométrie à laser pour la détection des ondes gravitationnelles, est la bande de fréquence très large du détecteur, typiquement de  $\sim 10$  Hz à 1000 Hz pour VIRGO. Les barres de Weber en revanche ne peuvent détecter qu'au voisinage de la fréquence de résonance de la barre.



Figure 1 – Vue du détecteur d'ondes gravitationnelles VIRGO à Cascina, près de Pise.

L'amplitude attendue pour une onde gravitationnelle en provenance de systèmes binaires à une distance de 100 Mpc est  $h \sim 10^{-23}$ , ce qui, d'après l'estimation précédente sur la variation de longueur du détecteur, donne  $\delta L \sim 10^{-20}$  m dans le cas de VIRGO soit  $10^{-5}$  fermi! Comment est-il possible de mesurer un tel déplacement? La réponse est qu'en réalité on mesure le déplacement *collectif* de  $N$  atomes des miroirs en entrée et en bout de bras de l'interféromètre. La mesure contient donc un effet de moyenne sur les atomes ce qui permet de gagner un

facteur  $\sqrt{N}$ . Avec  $N \sim 10^{18}$  ce qui correspond à une couche atomique en surface du miroir on constate que la mesure effective à réaliser est beaucoup plus raisonnable,  $\delta L_{\text{eff}} = \sqrt{N} \delta L \sim 10^{-11}$  m.

Il existe de nombreuses sources astrophysiques potentielles dont le rayonnement gravitationnel pourrait être détecté par VIRGO et LIGO. Les supernovæ, qui sont des explosions d'étoiles massives en fin de vie lorsqu'elles ont épuisé tout leur "combustible" nucléaire, ont longtemps été considérées comme des sources d'ondes gravitation-

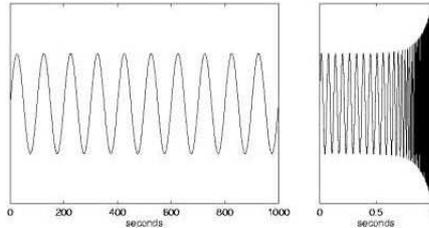
nelles intéressantes, mais on sait maintenant qu'elles engendrent en fait peu de rayonnement. En effet l'effondrement des couches internes de la supernova, qui devrait être responsable de la production du rayonnement gravitationnel, est essentiellement sphérique, et d'après un théorème fameux de relativité générale, le champ extérieur à une distribution sphérique de matière est donné par la solution de Schwarzschild qui est *statique* – il n'y a donc pas de rayonnement émis. Beaucoup plus intéressants pour VIRGO et LIGO sont les systèmes binaires,

car leur dynamique est fortement asymétrique et ils engendrent beaucoup de rayonnement gravitationnel.

### SPIRALES ET MORT DES SYSTÈMES BINAIRES D'ÉTOILES COMPACTES

Une binaire compacte spiralante est ce que deviendra le pulsar binaire PSR 1913+16 (encadré 1) dans quelques centaines de millions d'années, lorsqu'il finira par fusionner avec son compagnon. Pendant toute sa vie il aura émis son énergie de liaison gravitationnelle sous forme de rayonnement gravitationnel, jusqu'à ce que les deux étoiles à neutrons tombent l'une sur l'autre. (Rappelons qu'une étoile à neutrons est un astre compact, formé essentiellement de neutrons avec une densité comparable à celle de la matière nucléaire, et dont la taille est à peu près celle de l'agglomération parisienne pour une masse de  $\sim 1.4 M_{\odot}$ .)

Dans les derniers instants avant la fusion finale, les deux objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) décrivent une orbite rapprochée qui a la forme d'une spirale circulaire rentrante à cause de la perte d'énergie liée à l'émission du rayonnement gravitationnel. C'est ce rayonnement que l'on observera sur Terre où il déformera l'espace-temps avec une amplitude relative de l'ordre de  $10^{-23}$  (voir la figure 2). Au cours de la phase spiralante, la distance entre les deux étoiles diminue au cours du temps, et la fréquence orbitale du mouvement,  $\omega = 2\pi/P$  où  $P$  est la période, augmente. On peut montrer que l'évolution de l'orbite est adiabatique, dans le sens où le changement relatif de fréquence pendant une période correspondante reste faible,  $\dot{\omega}/\omega^2 \lesssim 0.1$ . Nous allons voir comment cette propriété d'adiabaticité permet de définir un schéma d'approximation très puissant en relativité générale, capable de décrire la spirale avec grande précision.



**Figure 1** – Onde gravitationnelle  $h(t)$  émise par une binaire compacte spiralante. La fréquence et l'amplitude de l'onde augmentent adiabatiquement au cours du temps.

À la fin de la phase spiralante, le système binaire atteint ce qu'on appelle la dernière orbite circulaire (dite aussi "innermost circular orbit" ou ICO), à partir de laquelle l'évolution de l'orbite cesse d'être adiabatique. Les deux corps plongent alors l'un sur l'autre et fusionnent très rapidement pour former un trou noir unique. À cause de la dynamique violente qui conduit à la formation de ce trou noir, celui-ci est initialement très déformé et soumis à d'importantes vibrations, mais il finira par atteindre, avec l'émission de ses modes de vibration intrinsèques en ondes gravitationnelles, un régime stationnaire décrit par la solution de Kerr pour le trou noir en rotation.

Les binaires compactes spiralantes sont des systèmes parmi les plus relativistes que l'on puisse imaginer, à la fois du point de vue de la relativité restreinte, car la vitesse orbitale atteint  $\sim 0.5c$  au moment du passage à la dernière orbite circulaire, et de la relativité générale, car les masses en jeu sont importantes,  $1.4 M_{\odot}$  pour les étoiles à neutrons et peut-être jusqu'à  $20 M_{\odot}$  pour des trous noirs, donc les champs gravitationnels sont intenses. Des milliers de cycles orbitaux sont parcourus en quelques secondes avant la fusion finale, dans ce qu'on peut décrire de façon imagée comme une "spirale infernale", constituant les derniers spasmes de l'agonie du système binaire. La spirale et la mort des binaires compacts représente donc un événement tout à fait impressionnant du point de vue de l'astrophysique. C'est principalement pendant la phase spiralée précédant immé-

diatement la fusion que l'onde gravitationnelle qui sera détectée par VIRGO et LIGO est produite.

De tels événements cataclysmiques de fusion d'objets compacts se produisent dans l'univers. À partir des systèmes binaires d'étoiles à neutrons connus dans notre Galaxie (le pulsar binaire PSR 1913+16 en est l'exemple le plus célèbre), on peut en déduire que quelques fusions d'étoiles à neutrons devraient survenir par an dans un volume de environ 100 Mpc de rayon centré sur notre Galaxie. Un tel volume contient des milliers de galaxies, dont toutes celles de l'amas de la Vierge (qui a donné son nom à VIRGO) situé au centre du superamas de galaxies dans lequel nous vivons. À cette distance le signal gravitationnel sera assez puissant pour être observé par le réseau actuel des détecteurs ou par une génération de détecteurs de sensibilité améliorée. Il rentrera dans leur bande de fréquence quelques minutes avant la fusion, lorsque la fréquence du signal gravitationnel atteindra  $f \sim 10$  Hz (d'après les propriétés des ondes gravitationnelles la fréquence de l'harmonique principale du signal est double de la fréquence orbitale du mouvement,  $f = \omega/\pi = 2/P$ ). VIRGO, qui a de très bonnes performances à basse fréquence grâce à ses tours d'isolation du bruit sismique terrestre, pourra notamment capter très tôt le signal des binaires spiralantes d'étoiles à neutrons, et augmenter ainsi le rapport signal-sur-bruit par une longue intégration du signal à partir de la basse fréquence.

L'existence des binaires spiralantes de trous noirs est plus incertaine, car malheureusement on ne connaît pas de systèmes de deux trous noirs dans notre Galaxie. Néanmoins, grâce à la simulation numérique des phases successives d'évolution des systèmes binaires, on peut estimer que le taux de fusion de deux trous noirs pourrait être comparable ou supérieur à celui des étoiles à neutrons. Les astrophysiciens pensent souvent que

la première détection du rayonnement gravitationnel par VIRGO et LIGO sera celle d'une binaire spirale de trous noirs.

### LE PROBLÈME DES DEUX CORPS EN RELATIVITÉ GÉNÉRALE

Pour le théoricien "relativiste" l'intérêt principal des binaires compactes spirales réside dans le fait que l'onde gravitationnelle qu'elles émettent est *calculable* avec grande précision, indépendamment des détails de la structure interne des étoiles compactes, et de la présence possible d'un environnement astrophysique "sale". Par exemple les effets non gravitationnels, qui compliquent habituellement l'astrophysique des systèmes binaires (champs magnétiques, présence d'un milieu interstellaire, etc.), sont négligeables. La dynamique des binaires spirales est dominée par les effets gravitationnels orbitaux (les effets de marées jouent très peu de rôle dans le cas de corps compacts). On peut donc modéliser le système par deux particules ponctuelles, sans structure interne, caractérisées uniquement par leurs masses  $m_1$  et  $m_2$ , et aussi éventuellement par leurs spins.

Ainsi le problème théorique des binaires spirales est un pur problème de mécanique céleste : le problème des deux corps (considérés comme ponctuels) en relativité générale. On sait qu'en théorie de Newton le problème des 2 corps est "intégrable", mais qu'à partir de 3 corps les équations du mouvement ne peuvent pas être résolues dans le cas général. En relativité générale même pour 2 corps on ne peut pas écrire de façon exacte les équations du mouvement et encore moins les résoudre ! Le problème à un corps en revanche admet une solution exacte qui est donnée par la métrique du trou noir de Schwarzschild.

N'admettant pas de solution exacte le problème relativiste des deux corps doit être traité par des méthodes d'approximations. Ce n'est pas un drame car pratique-

ment tous les grands succès de la relativité générale dans sa confrontation avec l'expérience et l'observation ont été obtenus grâce à de telles méthodes.

Notre schéma d'approximation fait intervenir ce que nous avons dit à propos du spiralement adiabatique des binaires compactes. Il se trouve en effet que le petit paramètre adiabatique est en fait petit dans le sens *post newtonien*, car on a  $\dot{\omega}/\omega^2 = \mathcal{O}[(v/c)^5]$ , où  $v$  est la vitesse orbitale des corps et  $c$  la vitesse de la lumière. L'approximation post newtonienne consiste à développer la relativité générale autour de la théorie de Newton, sous la forme d'un développement en puissances de  $v/c$  lorsque  $v/c \rightarrow 0$ , ce qui peut être vu plus formellement comme un développement quand  $c \rightarrow +\infty$ . L'ordre d'approximation  $(v/c)^5$  correspond au premier effet de ce qu'on appelle la *réaction de rayonnement*, c'est-à-dire l'influence de l'émission du rayonnement gravitationnel sur le mouvement du système binaire, qui se traduit par un petit effet de "freinage" des corps sur leur orbite, et donc par une décroissance de la période orbitale  $P$ .

L'approximation post newtonienne est la seule technique connue qui permet de décrire la phase spirale des binaires compactes (pendant laquelle on a  $v/c \lesssim 0.5$ ), et elle est valable jusqu'à la dernière orbite circulaire. Passée cette orbite le développement post newtonien devrait en principe être remplacé par un calcul d'intégration *numérique* des équations d'Einstein. Un tel calcul est indispensable pour décrire en détail le mécanisme de fusion des deux horizons des trous noirs, et obtenir la forme d'onde gravitationnelle produite lors de cette phase. Malheureusement la relativité numérique n'a pas encore réussi à résoudre ce problème extrêmement difficile, bien qu'il ait été l'objet de ce qu'on a appelé le "binary black hole Grand challenge", qui a mobilisé de nombreux instituts américains mais n'a pas ap-

porté les résultats escomptés. Il se trouve que vouloir calculer numériquement la fusion de deux trous noirs en utilisant la "force brute" d'un ordinateur n'est pas réalisable actuellement, malgré certaines percées remarquables ces dernières années. Heureusement, dans le cas d'étoiles à neutrons ou de trous noirs peu massifs, la plus grande partie du rapport signal-sur-bruit dans VIRGO et LIGO proviendra de la phase spirale précédant la fusion, qui est très bien décrite par la théorie post newtonienne.

### PATRONS D'ONDES GRAVITATIONNELLES POUR VIRGO ET LIGO

Le développement post newtonien va s'avérer l'outil idéal pour le calcul de la radiation gravitationnelle d'une binaire compacte spirale. Et comme l'approximation post newtonienne va devoir être développée jusqu'à un ordre très élevé ce problème va devenir un vrai paradis pour le théoricien ! Des études d'analyse du signal dans les détecteurs VIRGO et LIGO ont en effet montré qu'une prédiction très précise de la relativité générale est nécessaire pour tirer parti de toute l'information potentielle contenue dans le signal des binaires spirales. Pour détecter le signal gravitationnel (et l'analyser ultérieurement) on utilise la prédiction théorique, que l'on appelle pour l'occasion le "patron" d'onde gravitationnelle, et on effectue sa corrélation avec le signal de sortie du détecteur. Si le patron est une copie fidèle du signal réel (c'est-à-dire si la prédiction de la relativité générale est correcte), alors la corrélation est importante, et l'on aura détecté une onde gravitationnelle.

Il a été montré que les patrons d'ondes doivent prendre en compte toutes les corrections relativistes dans le champ d'ondes gravitationnelles jusqu'à la troisième approximation post newtonienne, qui correspond à une précision relative incluant tous les termes jus-

qu'à l'ordre  $(v/c)^6$  par rapport à la formule du quadrupole d'Einstein pour le rayonnement gravitation-

nel. Dans le jargon cette approximation s'appelle 3PN, et plus géné-

ralement les termes post newtoniens  $\sim (v/c)^{2n}$  sont dits d'ordre  $n$ PN.

## Encadré 2

### LA FASCINANTE APPROXIMATION 3PN

Lors du calcul des patrons d'ondes de binaires compactes spiralantes, l'approximation 3PN, i.e. à l'ordre  $\sim (v/c)^6$  au-delà de la formule du quadrupole, s'est avérée "fascinante" par la complexité des calculs en jeu et la richesse de la théorie à cet ordre. En effet à l'ordre 3PN interviennent à la fois les corrections relativistes dans les équations du mouvement et les moments multipolaires de la source, et des effets non-linéaires associés aux sillages d'ondes gravitationnelles – une partie de l'onde se propage à une vitesse inférieure à  $c$  (en moyenne) à cause des diffusions sur la courbure de l'espace-temps induite par la source. La difficulté technique principale est de mettre correctement en œuvre le concept de masse ponctuelle modélisant les corps compacts. On a recours à des méthodes de régularisation du champ propre de particules ponctuelles.

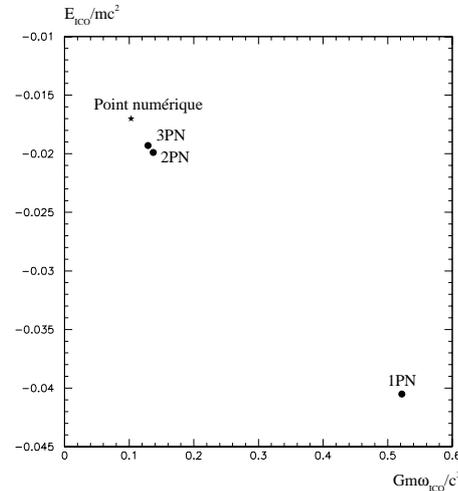
Le patron d'onde gravitationnelle fournit essentiellement l'évolution temporelle de la phase orbitale  $\phi$  de la binaire, par effet de réaction de rayonnement. La phase est écrite sous la forme d'une série post newtonienne,  $\phi = \phi_N [1 + \sum_n a_{(nPN)} x^n]$ , où le paramètre post newtonien  $x \equiv (Gm\omega/c^3)^{2/3}$  est fonction de la masse totale  $m = m_1 + m_2$  et de la fréquence orbitale  $\omega = \dot{\phi}$ . L'approximation newtonienne  $\phi_N$  correspond au  $\dot{P}$  du pulsar binaire (encadré 1), à ceci près que pour les binaires spiralantes l'excentricité de l'orbite est négligeable ( $e \simeq 0$ ). Tous les coefficients post newtoniens jusqu'à l'ordre 3.5PN inclus sont maintenant connus. À titre d'exemple, le coefficient à 3PN, qui a été le plus difficile à calculer, est donné en fonction du rapport de masse  $\nu \equiv m_1 m_2 / (m_1 + m_2)^2$  par l'expression impressionnante

$$a_{(3PN)} = \frac{12348611926451}{18776862720} - \frac{856}{21} \log(16x) - \frac{160}{3} \pi^2 - \frac{1712}{21} C + \left( -\frac{15737765635}{12192768} + \frac{2255}{48} \pi^2 \right) \nu + \frac{76055}{6912} \nu^2 - \frac{127825}{5184} \nu^3.$$

Toutes les fractions rationnelles qui apparaissent dans cette formule, de même que les nombres irrationnels  $\pi$  et la constante d'Euler  $C = \lim_{K \rightarrow \infty} [\sum_{k=1}^{K-1} \frac{1}{k} - \log K]$  (numériquement  $C \simeq 0.577$ ), sont déduites de la

relativité générale et de sa structure non-linéaire. Les expressions comme celles de  $a_{(3PN)}$  sont utilisées pour calculer la corrélation entre le patron d'onde des binaires spiralantes et le signal de sortie des détecteurs LIGO et VIRGO.

Bien sûr il faudrait (idéalement) s'assurer que l'approximation 3PN est proche de la valeur "exacte". Cela ne peut pas se prouver, mais néanmoins on peut avoir une idée de la "convergence" de la série post newtonienne en étudiant le cas de l'énergie du système binaire au passage à la dernière orbite circulaire dite ICO. La figure qui suit montre que les ordres post newtoniens successifs semblent en effet converger vers une valeur "exacte". En effet 3PN est très proche de 2PN; par contre 1PN est clairement insuffisant car l'ICO est une orbite très relativiste ( $v/c \sim 0.5$ ). De plus, la figure montre un très bon accord entre 3PN et la valeur calculée par la relativité numérique dans le cadre d'un modèle approché dit de "symétrie hélicoïdale" (Gourgoulhon, Grandclément et Bonazzola, 2001).



**Figure 2** – Énergie d'un système binaire de masses égales à la dernière orbite circulaire (ICO) en fonction de la fréquence orbitale. On montre les approximations post newtoniennes et le point calculé par la relativité numérique.

En outre, on peut faire une estimation de la précision du patron d'onde en comptant le nombre de cycles orbitaux, dans la bande de fréquence de VIRGO, dû à chacun des ordres post newtoniens. On trouve qu'à l'approximation 3.5PN l'erreur relative sur le nombre de cycles dans le cas de deux étoiles à neutrons est (probablement) inférieure à un  $1/10\,000^{\text{ème}}$ .

Pour mieux comprendre ce que signifie la précision 3PN, rappelons-nous que la formule du quadrupole d'Einstein décrit l'émission des ondes gravitationnelles à l'ordre dominant (quadrupolaire en relativité générale), qui est newtonien dans le sens où à cet ordre d'approximation le quadrupole peut être calculé avec la loi newtonienne de la gravitation. C'est la formule "newtonienne" du quadrupole qui permet d'expliquer le phénomène de réaction de rayonnement dans le pulsar binaire PSR 1913+16 (voir l'encadré 1), dont on a déjà vu qu'il correspond lui-même à une correction dans l'équation du mouvement à l'ordre  $(v/c)^5$  soit 2.5PN. La précision demandée pour les binaires spirales correspond donc en fait à une contribution d'ordre 3PN+2.5PN c'est-à-dire  $\sim (v/c)^{11}$  dans les équations du mouvement de la binaire!

C'est la première fois dans l'histoire de la relativité générale que la réalisation d'expériences nouvelles suscite des développements théoriques nouveaux. Même pendant la période de son renouveau, notre vieille dame, confrontée à des observations et des tests jamais effectués auparavant, s'était dédaigneusement contentée de voir ses prédictions déjà "sur étagère" confirmées. Avant le démarrage de la construction de LIGO et VIRGO on pensait que les corrections relativistes à la formule du quadrupole d'Einstein n'avaient qu'un intérêt purement académique (par exemple ces corrections sont complètement négligeables dans le cas du pulsar binaire). La prédiction théorique adéquate pour les binaires spira-

lantes n'existait pas, et il a fallu la développer spécialement dans le but de fournir les patrons d'ondes nécessaires à l'analyse du signal dans LIGO/VIRGO. Nous avons employé des méthodes perturbatives analytiques, permettant d'itérer les équations d'Einstein sous la forme d'une série post newtonienne, d'abord pour des systèmes isolés généraux, puis dans l'application à des systèmes binaires compacts. La prédiction théorique de la relativité générale, à la précision 3PN et même à 3.5PN, est maintenant sur étagère (voir l'encadré 2). La vieille dame est heureuse.

Un aspect intéressant de l'analyse du signal dans VIRGO et LIGO, qui résulte directement de l'application du développement post newtonien, est la possibilité d'effectuer des tests nouveaux de la relativité générale. Dans les patrons d'ondes des binaires compactes spirales, développés à 3.5PN, existent en effet plusieurs signatures caractéristiques de ce qu'on appelle les "sillages" (ou "tails") d'ondes gravitationnelles, produits par la diffusion du rayonnement gravitationnel se propageant dans un espace-temps distordu par la présence de la source elle-même. Cet effet purement non-linéaire dans la propagation du rayonnement gravitationnel de sa source vers le détecteur pourra être observé pour la première fois par comparaison des patrons d'ondes avec le signal réel dans VIRGO/LIGO. On ne connaît pas d'autres systèmes que la spirale des binaires compactes, pour lesquels la détection d'un effet aussi fin que le sillage d'onde gravitationnelle soit possible.

## POUR EN SAVOIR PLUS

**Weinberg (S.)**, « Gravitation and Cosmology – Principles and Applications of the General Theory of Relativity », *John Wiley & sons*, 1972.

**Will (C.M.)**, « Theory and Experiment in Gravitational Physics », *Cambridge University Press*, 1981.

**Damour (T.)**, « An introduction to the Theory of Gravitational Radiation », in *Gravitation in Astrophysics*, edited by B. Carter and J. Hartle, Plenum Press, 1986.

**Thorne (K.S.)**, « Gravitational Radiation », in *300 Years of Gravitation*, edited by S. Hawking and W. Israel, Cambridge University Press, 1987.

**Damour (T.)**, « The Problem of Motion in Newtonian and Einsteinian Gravity », in *300 Years of Gravitation*, edited by S. Hawking and W. Israel, Cambridge University Press, 1987.

**Blanchet (L.)**, « Gravitational Radiation from Post-Newtonian Sources and Inspiralling Compact Binaries », *Living Rev. in Relativity* **5**, 2002, 3.

**Blanchet (L.)**, **Faye (G.)**, **Iyer (B.R.)**, **Joguet (B.)**, « Gravitational-Wave Inspiral of Compact Binary Systems to 7/2 Post-Newtonian Order », *Phys. Rev. D* **65**, 2002, 061501(R).

**Blanchet (L.)**, **Damour (T.)**, **Esposito-Farèse (G.)**, **Iyer (B.R.)**, « Gravitational Radiation from Inspiralling Compact Binaries completed at the Third Post-Newtonian Order », *Phys. Rev. Letters* **93**, 2004, 091101.

Article proposé par :

Luc Blanchet, tél. : 01 44 32 81 77, courriel : blanchet@iap.fr.

L'auteur remercie Thibault Damour, Gilles Esposito-Farèse, Guillaume Faye, Éricourgoulhon et Bala Iyer pour les nombreuses interactions et/ou collaborations.