



# PHYSIQUE FONDAMENTALE

avec le principe d'équivalence et les ondes gravitationnelles

Luc Blanchet

Gravitation et Cosmologie ( $\text{GR}\epsilon\text{CO}$ )  
Institut d'Astrophysique de Paris

29 novembre 2010

## PROBLÈME DE L'UNIFICATION DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE AVEC LES AUTRES INTERACTIONS CONNUES

- 1 La loi de la gravitation n'a été vérifiée expérimentalement qu'à des échelles supérieures au millimètre
- 2 La quantification canonique de la RG conduit à une théorie non-renormalisable (perturbativement)
- 3 Toutes les tentatives d'unification de la gravitation produisent des champs nouveaux (dilaton, champs de spin 0, 1,  $\frac{3}{2}$ , etc.)
- 4 Des champs nouveaux (de type 5<sup>ème</sup> force) devraient modifier les paramètres PPN par rapport à leur valeur en RG
- 5 Une des meilleures fenêtres d'observation de champs nouveaux consiste à tester les différentes facettes du principe d'équivalence

# Principe d'équivalence faible

[Philiponus V<sup>th</sup> century, Galileo 1610, Newton 1687, Laplace 1780, Bessel 1850, Eötvös 1898]

Tous les corps tests acquièrent la même accélération dans un champ gravitationnel, indépendamment de leur composition et des détails de leur structure interne

Pour tous les corps tests  $m_i = m_g$  avec

$$\mathbf{F} = m_i \mathbf{a} \quad (m_i = \text{masse inertielle})$$

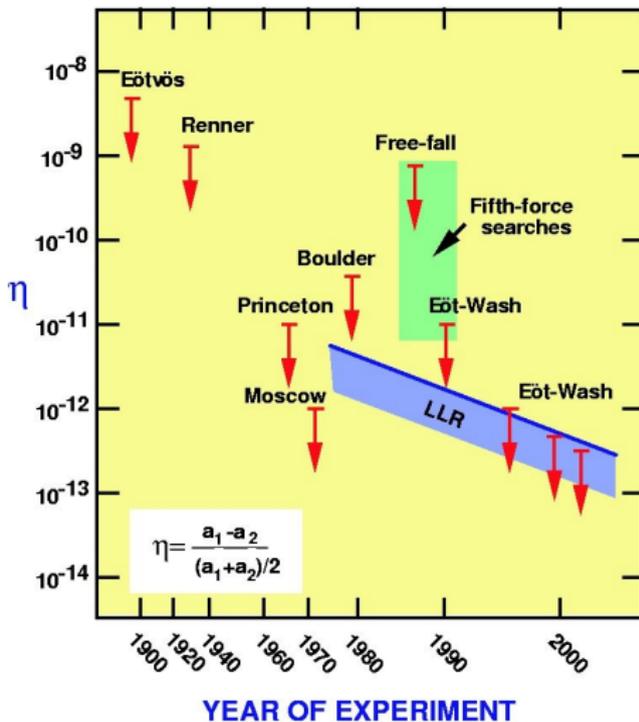
$$\mathbf{F}_g = m_g \mathbf{g} \quad (m_g = \text{masse passive gravitationnelle})$$

La précision du test est mesurée en terme du paramètre d'Eötvös

$$\eta_{AB} = \left| \left( \frac{m_g}{m_i} \right)_A - \left( \frac{m_g}{m_i} \right)_B \right|$$

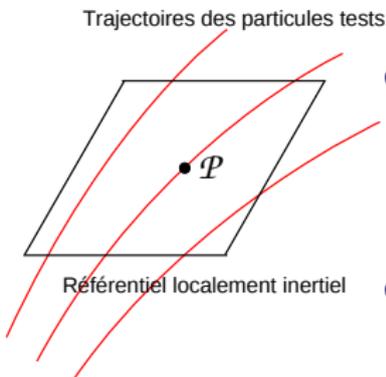
# Limites expérimentales sur le principe d'équivalence faible

## TESTS OF THE WEAK EQUIVALENCE PRINCIPLE



2013  
 $\mu$ -SCOPE  $10^{-15}$

# Principe d'équivalence d'Einstein



- 1 **Principe d'équivalence faible.** Existence d'une famille de trajectoires suivies par tous les corps tests
- 2 **Invariance locale de Lorentz.** Existence de champs  $\Phi^{(A)}$  s'écrivant dans les référentiels locaux

$$\Phi_{\alpha\beta}^{(A)}(\mathcal{P}) = \Phi^{(A)}(\mathcal{P}) \eta_{\alpha\beta}$$

- 3 **Invariance locale de position.** Dépendance universelle des résultats d'expériences sur la position

$$\Phi^{(A)}(\mathcal{P}) = \Phi(\mathcal{P})$$

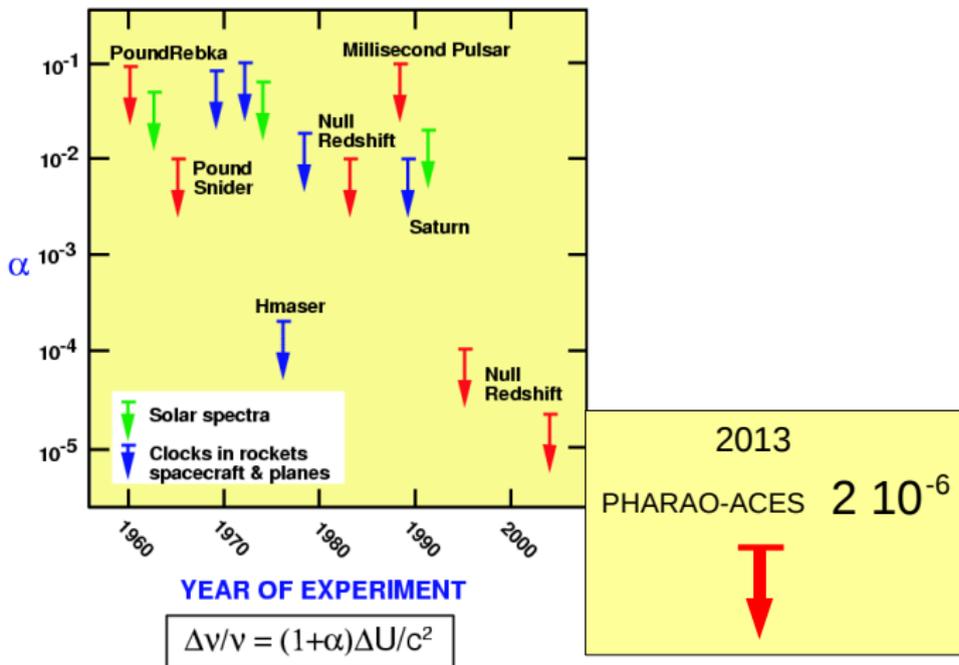
PEE est équivalent à un couplage de tous les champs à un tenseur de rang deux

$$g_{\mu\nu} = \Phi^{-1} \Phi_{\mu\nu}$$

se réduisant à la métrique de Minkowski  $\eta_{\alpha\beta}$  dans les référentiels locaux

# Limites expérimentales sur l'invariance locale de position

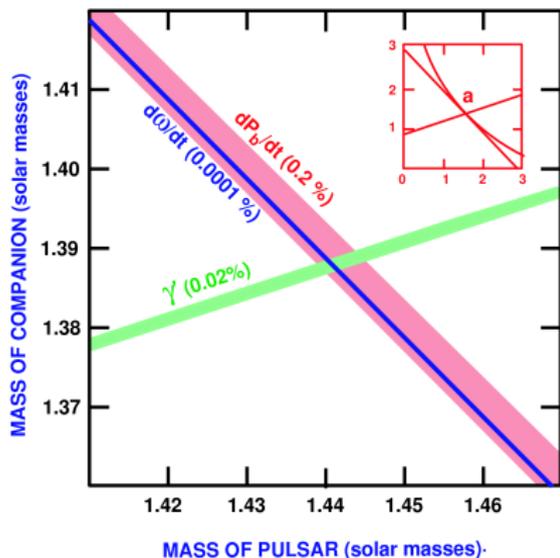
## TESTS OF LOCAL POSITION INVARIANCE



## TESTER LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE EN CHAMPS GRAVITATIONNELS INTENSES ET RAPIDEMENT VARIABLES

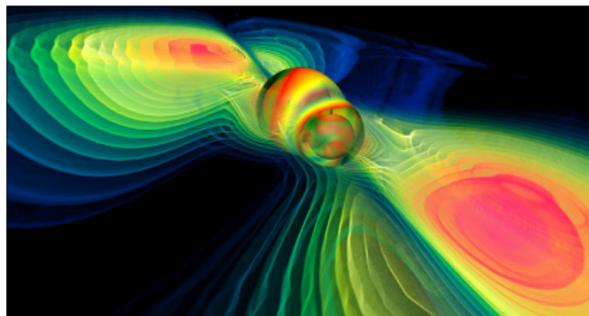
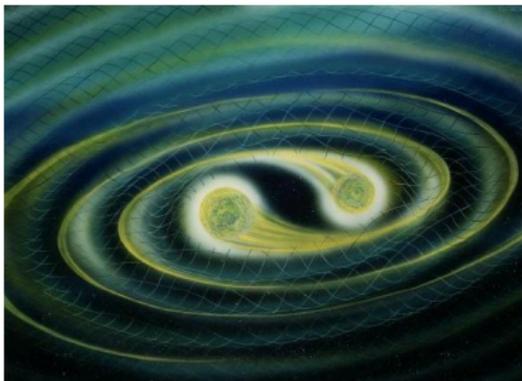
- 1 Tester la version forte du principe d'équivalence pour des corps auto-gravitants (effet Nordtvedt)
- 2 Tester l'effacement de la structure interne des étoiles à neutrons dans les pulsars binaires
- 3 Vérifier la structure non-linéaire de la RG avec les ondes gravitationnelles
- 4 Vérifier le théorème de la calvitie pour les trous noirs

# Effets relativistes dans le pulsar binaire PSR 1913+16



- $\dot{\omega} = 4.2^\circ/\text{yr}$  précession relativiste du périastre
- $\gamma = 4.3 \text{ ms}$  décalage vers le rouge gravitationnel et effet Doppler du 2<sup>d</sup> ordre
- $\dot{P} = -2.4 \cdot 10^{-12} \text{ s/s}$  décroissance séculaire de la période orbitale

# Spiralement et fusion d'étoiles compactes



Des étoiles à neutrons et des trous noirs spiralent et fusionnent

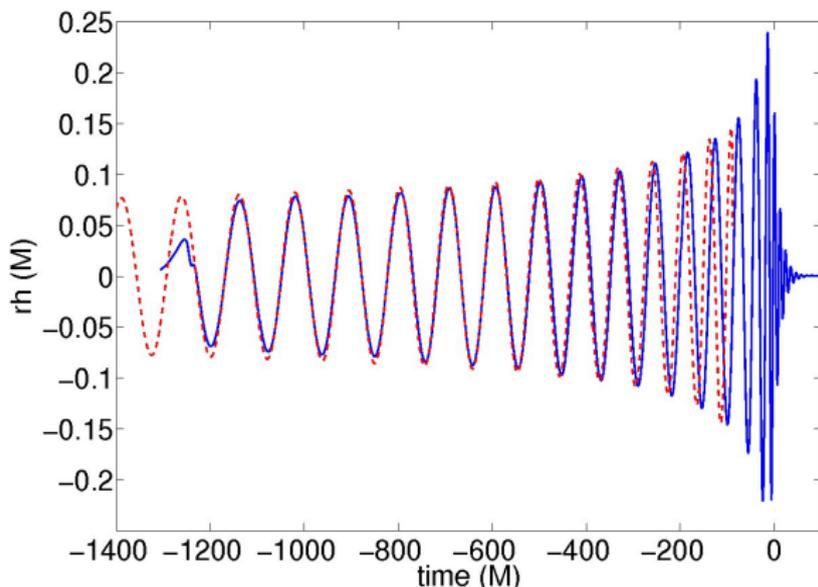
- 1 Les évènements d'étoiles à neutrons ( $M = 1.4 M_{\odot}$ ) vont être détectés par les détecteurs au sol LIGO/VIRGO/GEO
- 2 Les trous noirs de taille stellaire ( $5 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 20 M_{\odot}$ ) vont aussi être détectés par les détecteurs au sol
- 3 Les trous noirs supermassifs ( $10^5 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10^8 M_{\odot}$ ) vont être détectés par le détecteur dans l'espace LISA

# Fusion de trous noirs supermassifs pour LISA



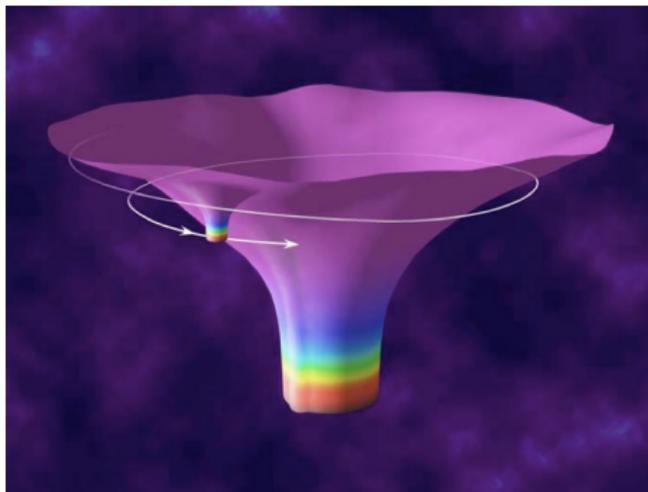
Quand deux galaxies entrent en collision les trous noirs supermassifs devraient former un système binaire gravitationnellement lié et qui va spiraler et fusionner. LISA sera capable de détecter les ondes gravitationnelles émises par de tels évènements à n'importe quelle distance cosmologique

# Le gazouillement gravitationnel des binaires spiralantes



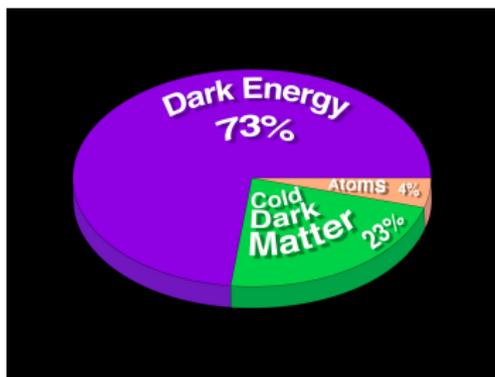
L'onde est obtenue par raccordement de haute précision entre une forme d'onde **post-newtonienne** décrivant la phase spiralante et une forme d'onde **numérique** pour les phases de fusion et de vibration finale

# Binaire à rapport extrême de masse (BREM) pour LISA



Une étoile à neutrons ou un trou noir stellaire suit une orbite très relativiste autour d'un trou noir supermassif. Les ondes gravitationnelles émises vont permettre de tester le **théorème de la calvitie** pour les trous noirs, c'est-à-dire vérifier si le trou noir central est décrit par la géométrie de Kerr

# Trous noirs supermassifs pour mesurer l'énergie noire



Les binaires de trous noirs supermassifs sont des **sirènes standard**. Dans le modèle cosmologique la distance  $D_L$  est liée à l'indice spectral  $z$  par

$$D_L(z) = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_{MN}(1+z')^3 + \Omega_{EN}(1+z')^{3(1+w)}}$$

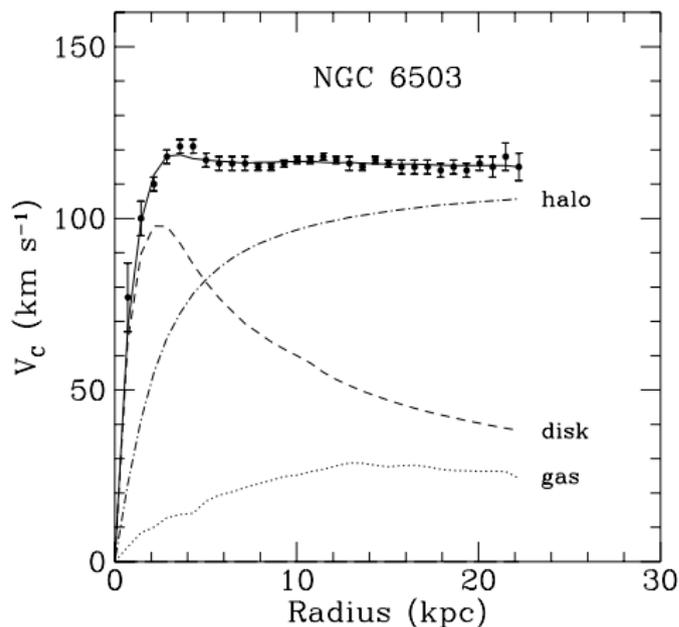
LISA devrait contraindre l'équation d'état de l'énergie noire

$$w = \frac{p_{EN}}{\rho_{EN}}$$

## PROBLÈME DES CONSTITUENTS FONDAMENTAUX DE L'UNIVERS: MATIÈRE NOIRE ET ÉNERGIE NOIRE

- 1 Aucune particule connue dans le cadre du modèle standard de la physique des particules ne peut constituer la matière noire
- 2 Le modèle cosmologique actuel extrapolé à l'échelle galactique est incompatible avec les observations de la matière noire dans les halos
- 3 La constante cosmologique  $\Lambda$  interprétée comme une énergie du vide associée aux fluctuations du champ gravitationnel [Zel'dovich 1967] n'a pas la bonne valeur observationnelle

# Courbe de rotation plate des galaxies



← ajustement MOND en trait plein

Les galaxies sont ajustées avec grande précision par la formule MOND

## POUR

- 1 Motivation fondamentale en physique des particules
- 2 Candidats pour la particule de matière noire
- 3 Ajustement du fond diffus cosmologique
- 4 Formation et croissance des grandes structures
- 5 Diagramme de Hubble des supernovas

## CONTRE

- 1 Pics de matière noire au centre des galaxies
- 2 Taille et satellites des grandes galaxies
- 3 Galaxies naines de marée
- 4 Impossibilité d'expliquer la loi de Milgrom
- 5 Problèmes avec la relation de Tully-Fisher

## POUR

- 1 Ajustement des courbes de rotation des galaxies
- 2 Explication de la relation de Tully-Fisher
- 3 Brilliance de surface des galaxies spirales
- 4 Vitesse d'échappement des galaxies
- 5 Dispersion de vitesse des galaxies elliptiques

## CONTRE

- 1 Pas de théorie fondamentale
- 2 Extensions relativistes compliquées (TeVeS)
- 3 N'explique pas toute la matière noire dans les amas de galaxies
- 4 Problèmes pour ajuster le fond diffus cosmologique
- 5 Pas d'explication pour la coincidence  $\Lambda \sim a_0^2$