

# Prospectives

# Ondes gravitationnelles

Matteo Barsuglia<sup>1</sup>, Fabien Cavalier<sup>2</sup>,  
**Éric Chassande-Mottin**<sup>1</sup>, Raffaele Flaminio<sup>3</sup>,  
Hubert Halloin<sup>1</sup>, Patrice Hello<sup>2</sup>, Frédérique Marion<sup>4</sup>,  
Benoit Mours<sup>4</sup>

<sup>1</sup> APC, Paris

<sup>3</sup> LMA, Lyon

<sup>2</sup> LAL, Orsay

<sup>4</sup> LAPP, Annecy

Journées de prospective IN2P3–IRFU, Giens 2012

# Plan de la présentation

- Enjeux scientifiques
- Spectre en onde gravitationnelle
- Détecteurs terrestres
  - Virgo [1G]: bilan et résultats
  - Perspectives avec advanced Virgo [2G] et Einstein telescope [3G]
  - Astrophysique multimessager avec les ondes gravitationnelles
- Détecteurs spatiaux
  - Programme scientifique de eLISA/NGO
  - Concept de la mission
  - Démonstrateur LISA pathfinder

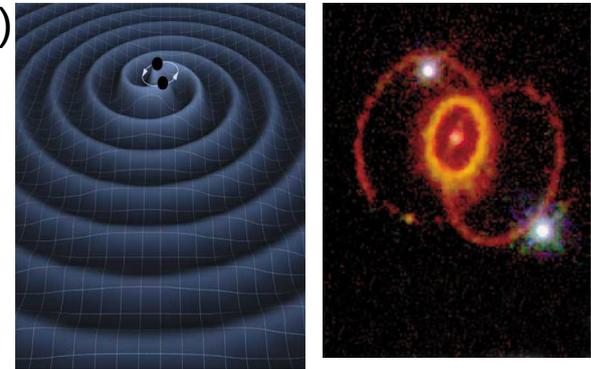
# Enjeux scientifiques

- **Tester la Relativité Générale**

- Vérification expérimentale **directe** de l'existence des ondes gravitationnelles et de leurs propriétés (polarisation, vitesse de propagation)

- **Astrophysique avec les ondes gravitationnelles**

- Physique des objets compacts (étoiles à neutrons et trous noirs)
  - Équation d'état de la matière dense
- Dynamique des systèmes binaires compacts
  - Test de la gravitation en champ fort,  $v/c \sim 1$
- Effondrement de coeur, supernova
  - Formation des trous noirs



- **Des perspectives à plus long terme**

- Cosmologie
  - Sirènes standard, fonds diffus
- Formation des grandes structures
  - Test des modèles hiérarchiques
- Physique fondamentale
  - Cordes cosmiques

# Spectre onde gravitationnelle

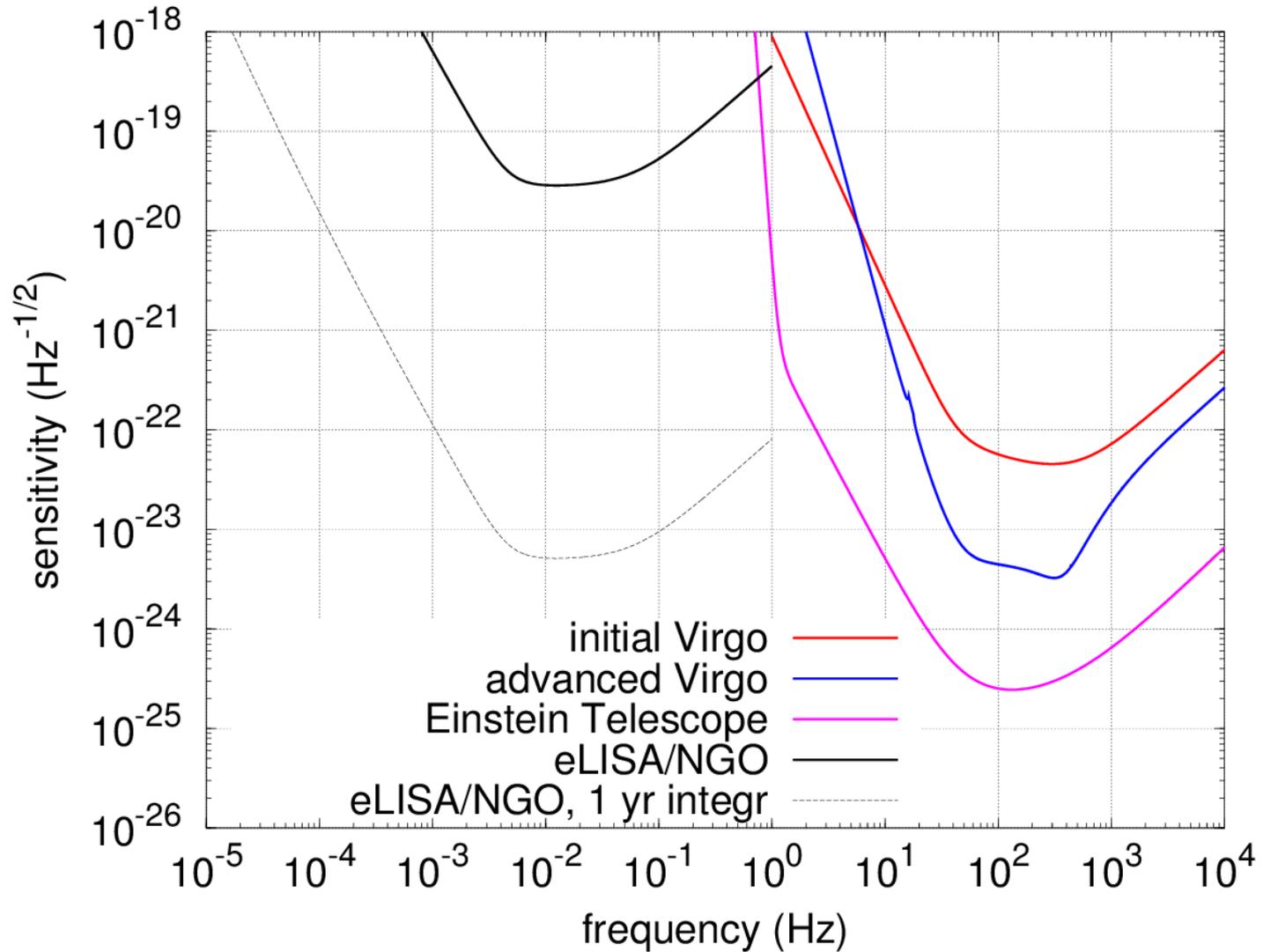
$10^4$ – $10^6$  masses solaires

$1$ – $10^3$  masses solaires

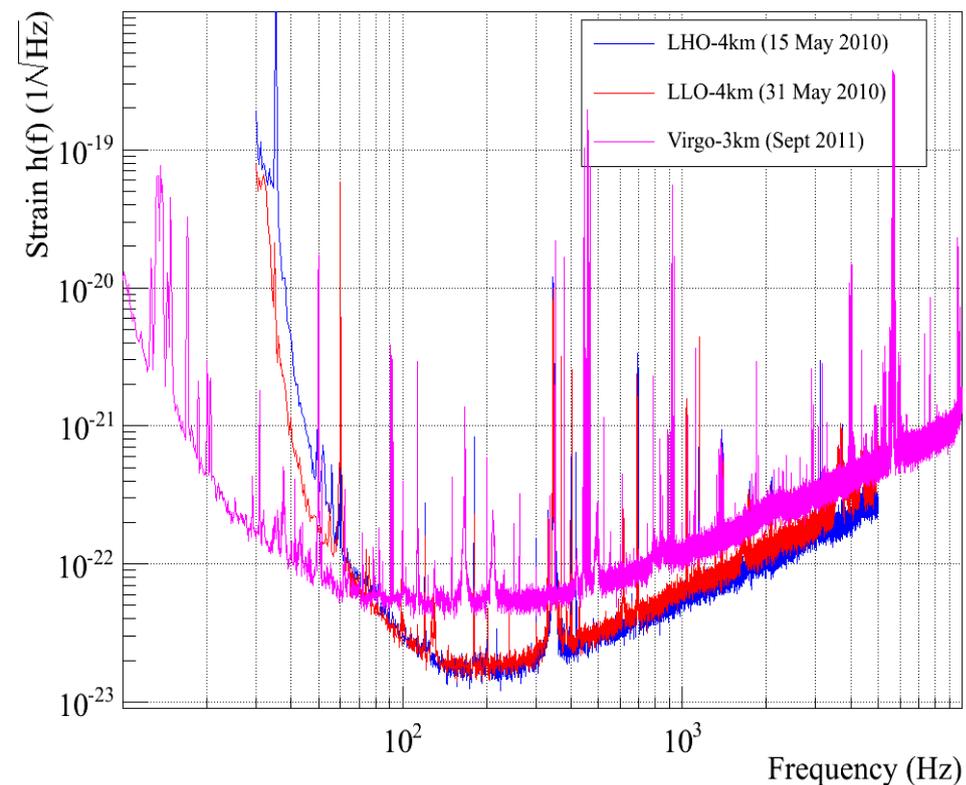
$$f_{typ} \propto 1/M$$

trou noir super-massif

étoile à neutrons  
trou noir de masse stellaire



# Virgo : bilan



- **Aucun signal grav. observé**

- Limites astrophysiques publiées pour un éventail de sources
- ~20aine de publications

- **Objectif en sensibilité atteint**

- $\sim 4 \times 10^{-23}/\text{Hz}^{1/2}$  @100 Hz
- Cycle utile > 80 %
- Binaire d'étoiles à neutrons  $\sim 8$  Mpc
- Binaire de trous noirs  $\sim 50$  Mpc

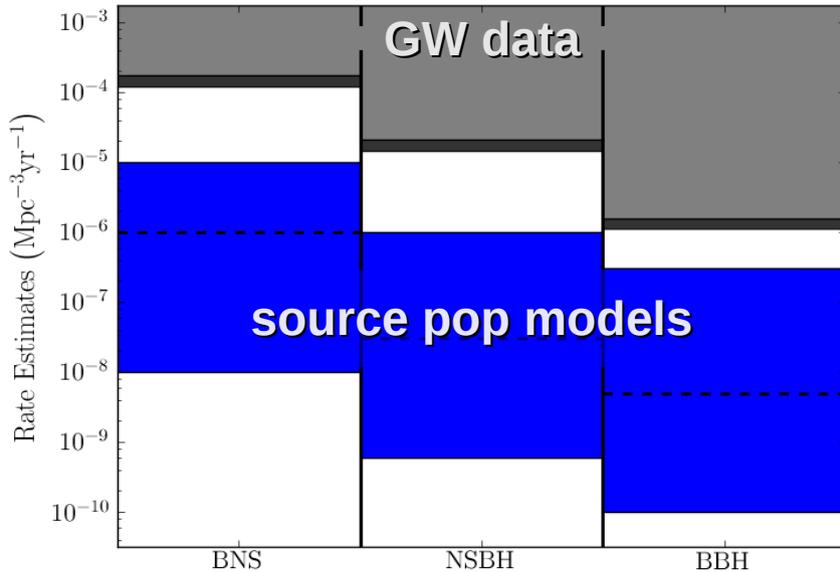
- **Données scientifiques**

- 3 campagnes, durée totale =  $\sim 1$  an
- Analyse conjointe avec LIGO (US)

- **Chaines d'analyse opérationnelles**

- Incluent des analyses en ligne ( $\sim 10$  mins)
- Reconstruction de la position de la source
- “stress tests” aveugle, validation capacité de détection

# Virgo & LIGO : sélection de résultats



- **Binaires coalescentes**

- Limites sur les populations

$$\log_{10} R_{\text{BNS}} [\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}] \lesssim -4$$

- Pas encore contraignantes

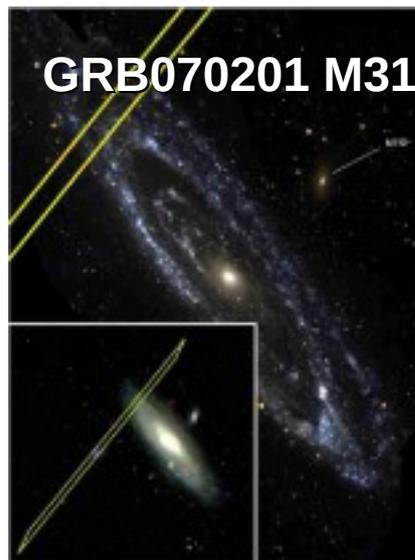
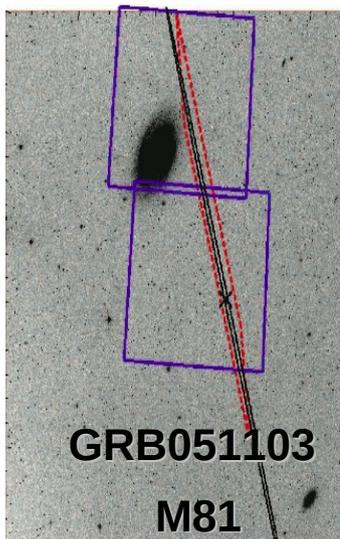
$$\log_{10} R_{\text{BNS}}^{\text{theory}} [\text{Mpc}^{-3} \text{yr}^{-1}] \sim -6_{-2}^{+1}$$

- **Sursauts gamma**

- Sursauts gamma courts = coalescences binaires ?
- 2 sursauts courts associés à une galaxie proche
- Pas de détection → Exclusion des binaires coalescentes avec un grand niveau de confiance

- **Pulsar Vela**

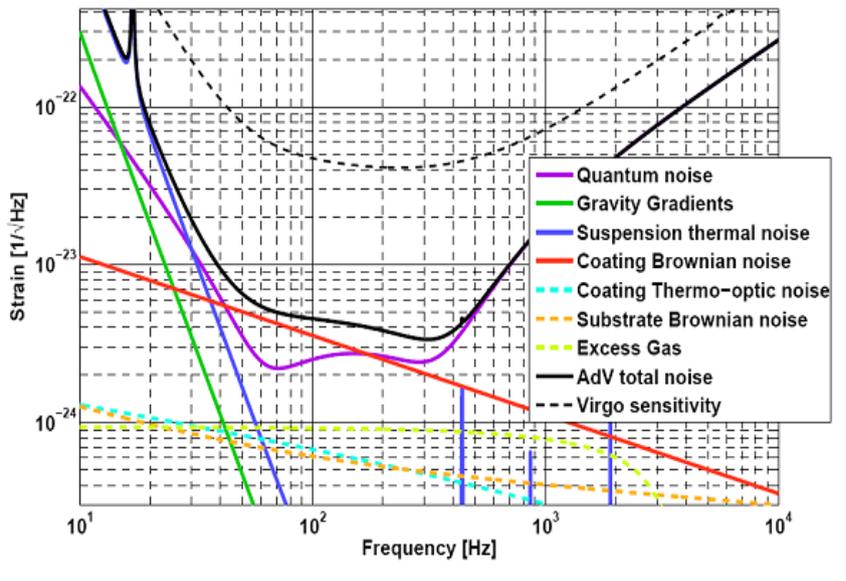
- $f_{\text{GW}} \approx 22$  Hz observable uniquement par Virgo
- Pas de détection,  $h < 2 \times 10^{-24}$
- 2 x inférieure à la *spin-down limit*



ArXiv:1111.7314, to appear in Phys. Rev. D  
 Astrophys. J. 681 (2008) 1419  
 Astrophys. J. 737 (2011) 93

# Advanced Virgo

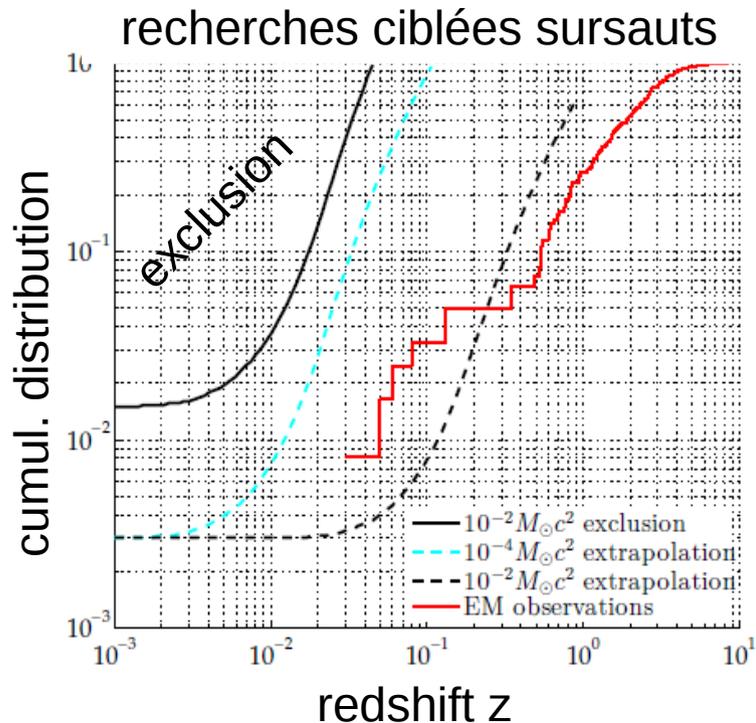
AdV Noise Curve:  $P_{in} = 125.0$  W



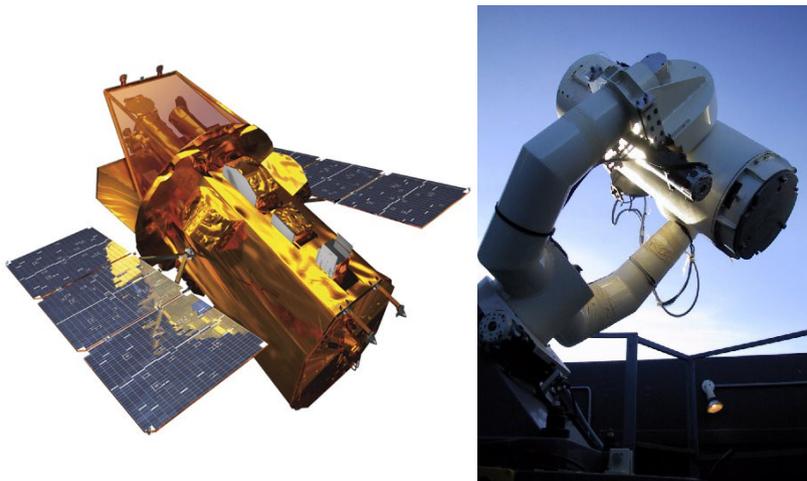
Laser (200W)  
Faisceaux larges (10 cm)  
Miroirs (40 kg)  
Recyclage du signal  
 $10^{-9}$  mBar

- **x 10 plus sensible (en amplitude)**
  - nb de sources observables x 1000
  - Binaire d'étoiles à neutrons ~ 140 Mpc  
typ. qq 10aines de binaires détectables par an
  - Binaire de trous noirs ~ 1 Gpc
- **Situation actuelle**
  - Projet approuvé fin 2009
  - Infrastructure conservée, remplacement d'une partie de l'instrumentation (en cours)
  - Technical design report, fin avril 2012
- **1<sup>ères</sup> données scientifiques en 2016**
  - Réseau mondial en partenariat avec LIGO
  - KAGRA (Japon), LIGO India
  - Début de l'astronomie gravitationnelle

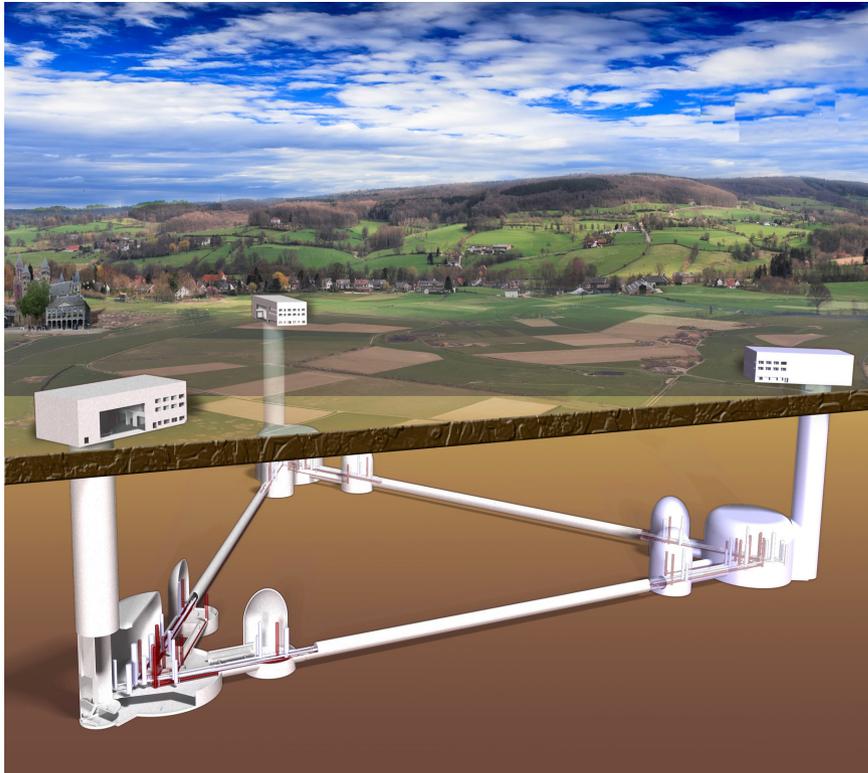
# Astrophysique multimessager avec les ondes gravitationnelles



- **Sources OG = événements astro très énergétiques**
  - Contreparties EM et/ou neutrino
- **Corrélation données OG avec autres observations**
  - Alertes, EM/ $\nu$   $\rightarrow$  OG [ex: GRB]
  - OG  $\rightarrow$  EM: suivi rapide télescope, ToO
- **Partenariats en préparation pour les détecteurs avancés**
  - Synergie avec l'astrophysique HE et l'astronomie "temps-réel"
  - Élément clé pour la 1ère détection?



# Einstein telescope



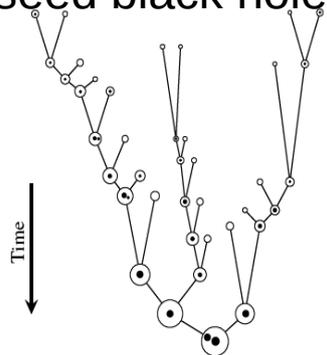
- **3<sup>ème</sup> génération de détecteurs**
  - Feuille de route ASPERA
  - Etude conceptuelle FP7
- **x 10 encore plus sensible**
  - Binaires d'étoiles à neutrons  $z \sim 4$
  - Binaires de trous noirs  $z \sim 10$
  - $10^3 - 10^7$  événements par an
  - Astrophysique gravitationnelle de précision
- **Concept**
  - Géométrie triangulaire, 3 détecteurs
  - Sous-terrain, bras 10 km, optiques cryogéniques, grande puissance laser (MW), squeezing, faisceaux non-Gaussiens

# eLISA/NGO

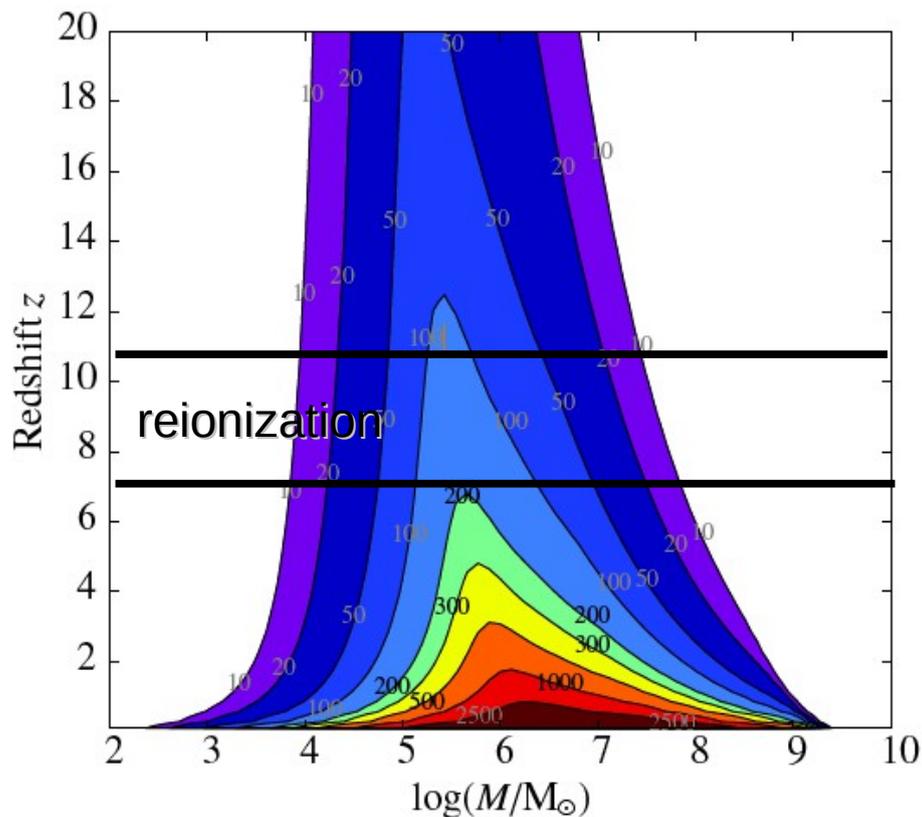
## programme scientifique



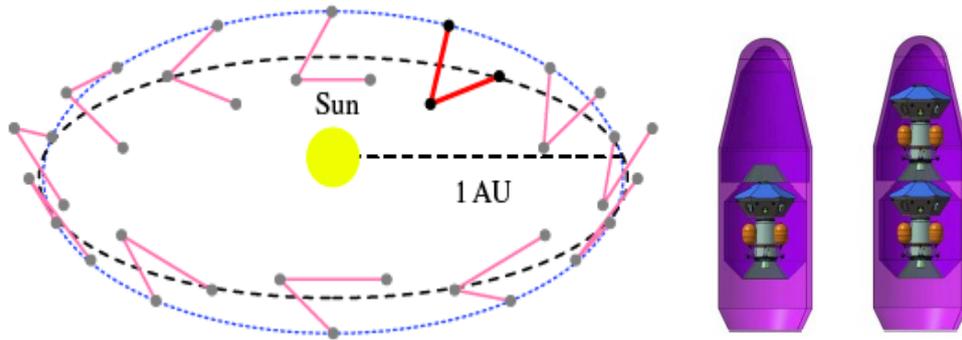
seed black holes?



- **Mission L Cosmic Vision ESA**
  - Sélection imminente
- **Basses fréq. : 0.1 mHz– 1 Hz**
- **Objectifs principaux**
  - Population galactique de binaires de naines blanches et leur distribution  
 $3 \times 10^7$  binaires, 3000 résolubles, < 10 vérification
  - Binaires de trous noirs super-massifs  
 10 à 100 événements/an  
 Modèle hiérarchique de **formation des grandes structures**
  - Cosmologie, fond diffus  
 transitions de phase cosmo. au TeV, corde cosmique



# eLISA/NGO: concept

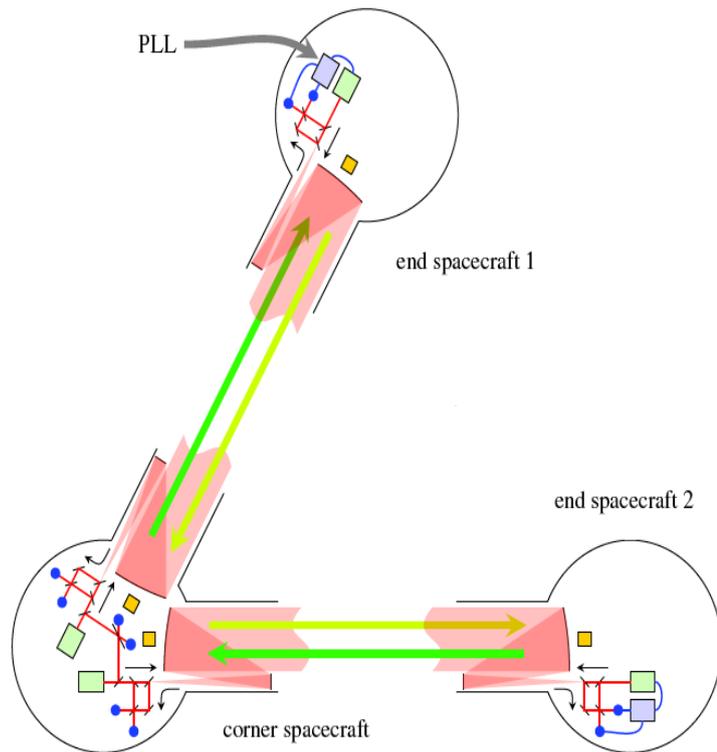


- **Constellation 3 satellites**

- Orbite héliocentrique
- 2 ans (4 ans avec transfert, 2 Soyuz)
- Interféromètre Michelson
- Précision  $10 \text{ pm/Hz}^{1/2}$  sur  $10^6 \text{ km}$
- Masse test maintenue en chute libre par compensation de traînée

- **LISA pathfinder**

- Démonstrateur techno
- Test micropropulseurs (FEEP, Cold gaz, RIT) et interferométrie



# Planning

## Advanced Virgo

- 2009-14** Construction & intégration
- 2014-15** Commissioning
- 2016** 1ère prise de données scientifiques avec LIGO

## Responsabilités à l'IN2P3

- APC** mode matching telescopes, optical design
- LMA** mirror prod and metrology, optical design
- LAL** locking acquisition system, vacuum ctrl
- LAPP** detection system, digital electronics, new vacuum chambers, calibration

## Einstein Telescope

- 2020** Décision ?

## LISA pathfinder

- 2014** Lancement
- 2015** Analyse des données

## eLISA/NGO

- 2015** Décision finale
- 2022** Lancement

## Responsabilités en France

- FACe** centre complémentaire de réception et d'analyse des données LPF

*La France en charge de l'interface mécanique entre banc optique et masses inertielles, l'architecture mécanique et thermique, l'intégration et des tests de performances de l'instrument ainsi que du centre de traitement de données.*

**Répartition entre laboratoire encore à définir**

# Conclusions

- Les détecteurs de 1<sup>ère</sup> génération ont rempli leur mission (sensibilité cible atteinte, limites astro publiées)
- Avec la 2<sup>nde</sup> génération, la prochaine décennie verra probablement la **1<sup>ère</sup> détection directe** des ondes gravitationnelles. Objectif : y participer !
- Début de l'astronomie des ondes gravitationnelles
- A plus long terme, arrivée de nouveaux acteurs (Japon, Inde) et 3<sup>ème</sup> génération
- Programme spatial ambitieux avec eLISA/NGO

Bonus

# Estimate of horizon distance for black-hole binaries

