



INSPIRAL

# La Première Détection Directe Des Ondes Gravitationnelles

MERGER

RINGDOWN



Cavalier Fabien  
16/10/2016

Fête de la Science

**11 février 2016, 16:30 heure de Paris**



**Conférences de presse simultanées à**

- **Washington**
- **Cascina (site de Virgo, Italie)**
- **Paris**
- **Amsterdam**
- **...**

**Ladies and gentlemen, we have detected gravitational waves, we did it.**



# Les Ondes Gravitationnelles

## Astronomie :

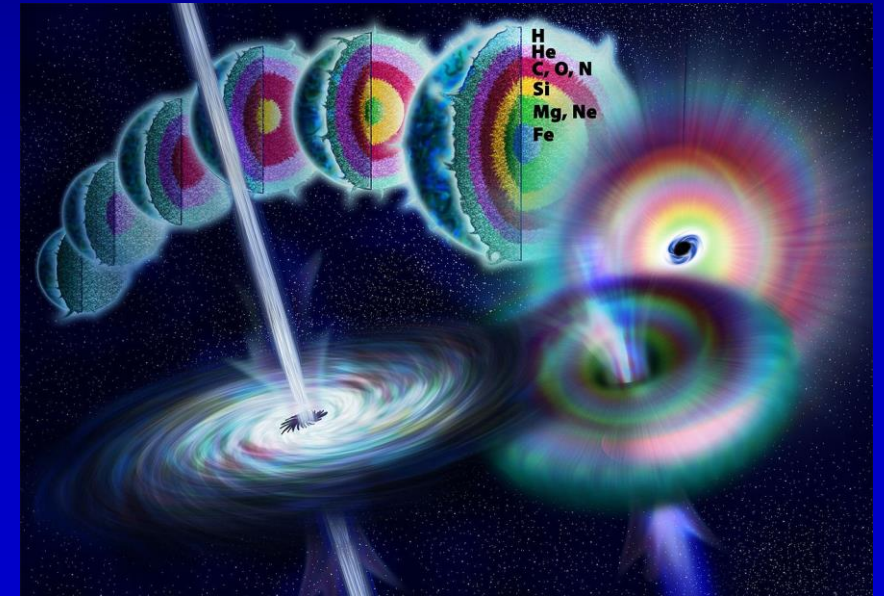
- Ondes Radio
- Infrarouge
- Visible
- Ultraviolet
- Rayons X
- Rayons  $\gamma$

**Ondes électromagnétiques**  
émises par des  
**charges électriques**  
en **mouvement**  
ou des réactions nucléaires

Les **Ondes Gravitationnelles**  
sont émises par des **masses en mouvement**

# Pourquoi détecter les ondes gravitationnelles ?

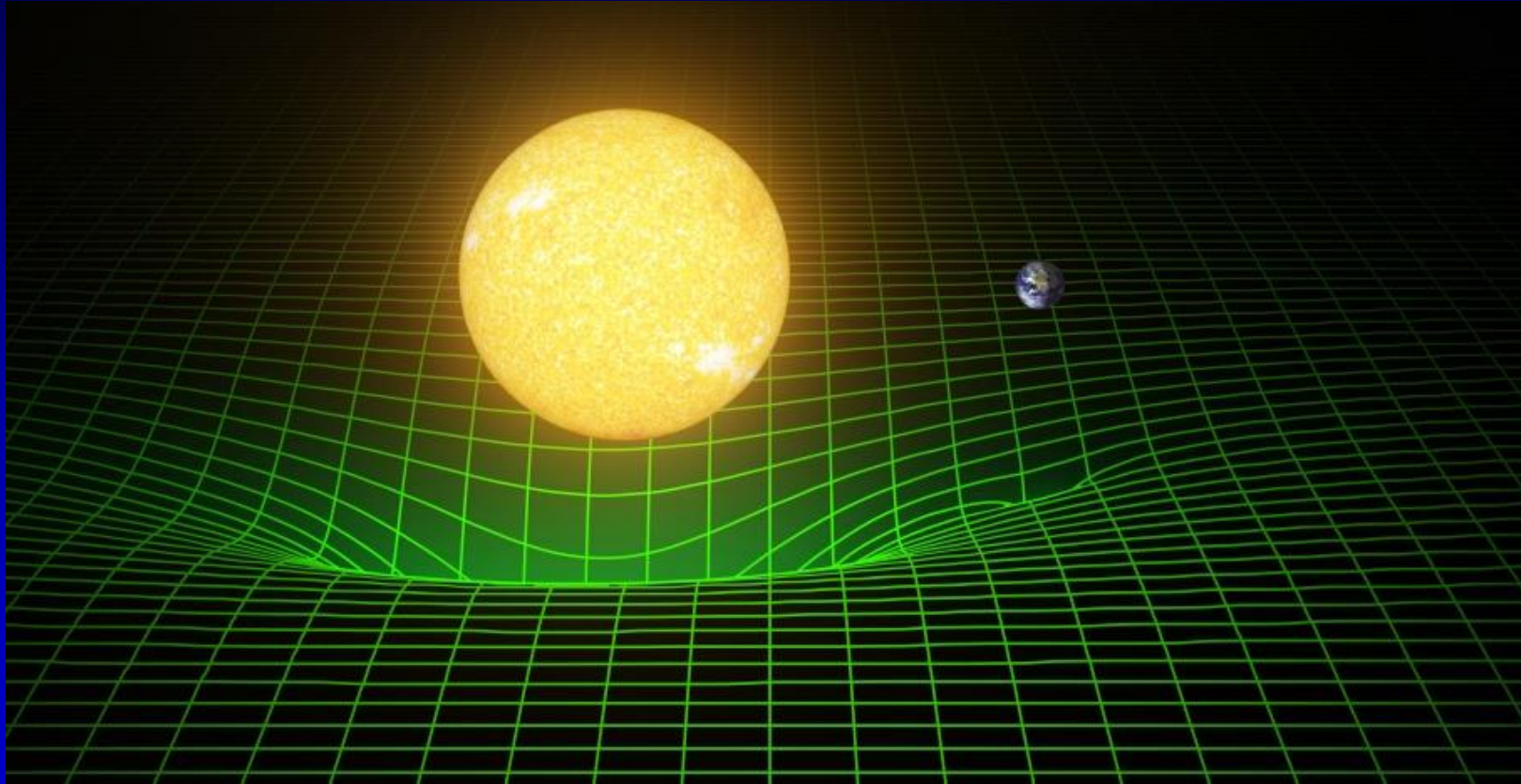
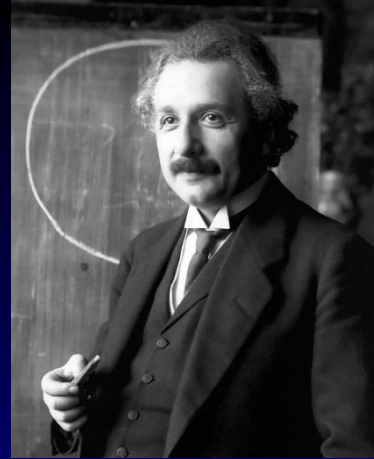
- **Tester** la **Relativité Générale** dans un nouveau domaine
- Ouvrir une **nouvelle fenêtre** sur l'Univers
  - **Mesurer** directement les **masses** des objets
  - **Voir** directement des **trous noirs**
  - Accéder au cœur d'événements violents : **supernova, sursauts gamma ...**
  - Mesurer la **géométrie** de **l'Univers** avec de nouvelles sondes



## Relativité Générale d'Einstein

*« La matière indique à l'espace-temps comment se courber,  
l'espace-temps indique à la matière comment se déplacer »*

J.A. Wheeler



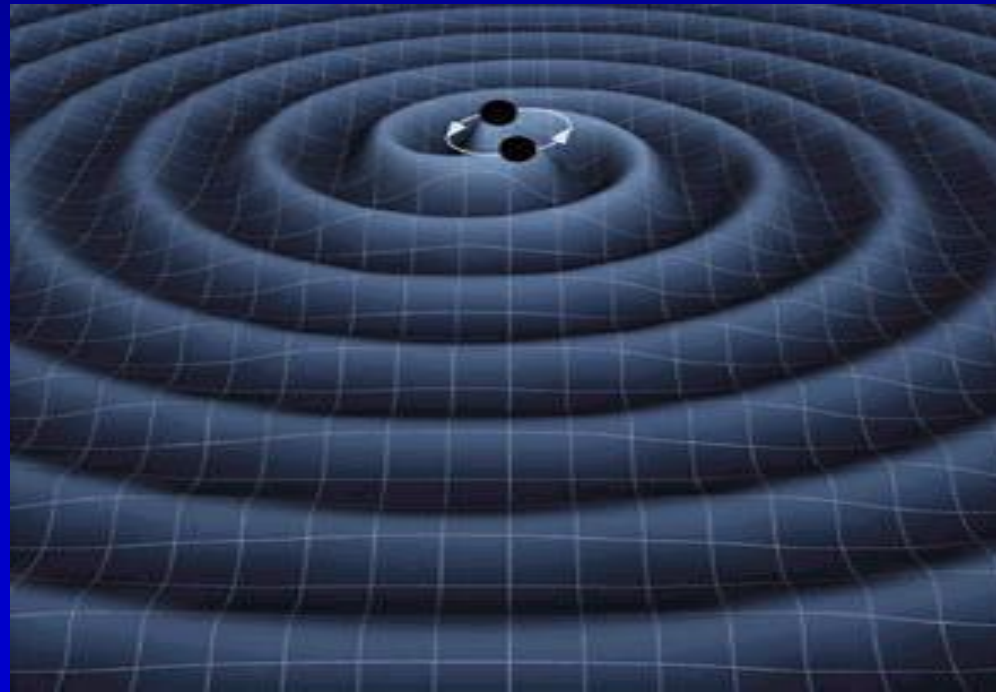
Un objet massif courbe l'espace-temps

Un objet se déplace dans l'espace-temps  
courbé par les autres objets

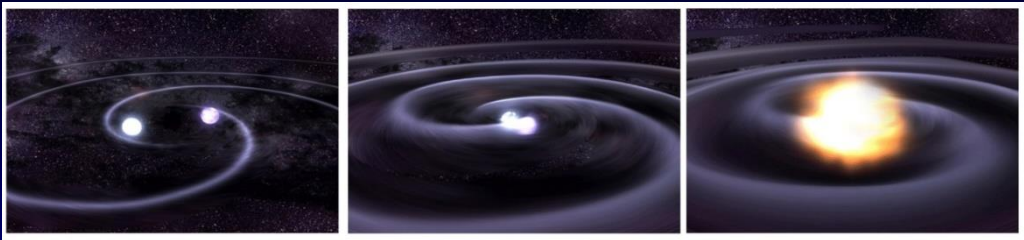


# Les Ondes Gravitationnelles dans la Relativité Générale

- Les ondes gravitationnelles sont **prédites** par la **Relativité Générale** d'Einstein (1916)
- Ce sont des **perturbations** de l '**espace-temps** (analogues aux vagues de la mer)
- Elles voyagent à la **vitesse** de la **lumière**
- Elles peuvent **traverser** des millions d'années-lumière **sans être absorbées** par la matière



# Coalescence d'étoiles à neutrons



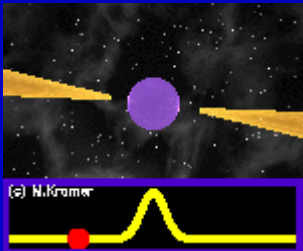
# Les Sources d'Ondes Gravitationnelles

source	Distance	$h$	$P$ (W)
Supernova $10 M_{\odot}$ asymétrie $10^{-5}$	10 ka-l	$10^{-21}$	$10^{44}$
Coalescence de 2 trous noirs de $1 M_{\odot}$	10 Ma-l	$10^{-20}$	$10^{50}$

[illegible]

- **Coalescence de trous noirs**
- **Désexcitation d'un trou noir**
- **Reliques du Big-Bang**
- ...

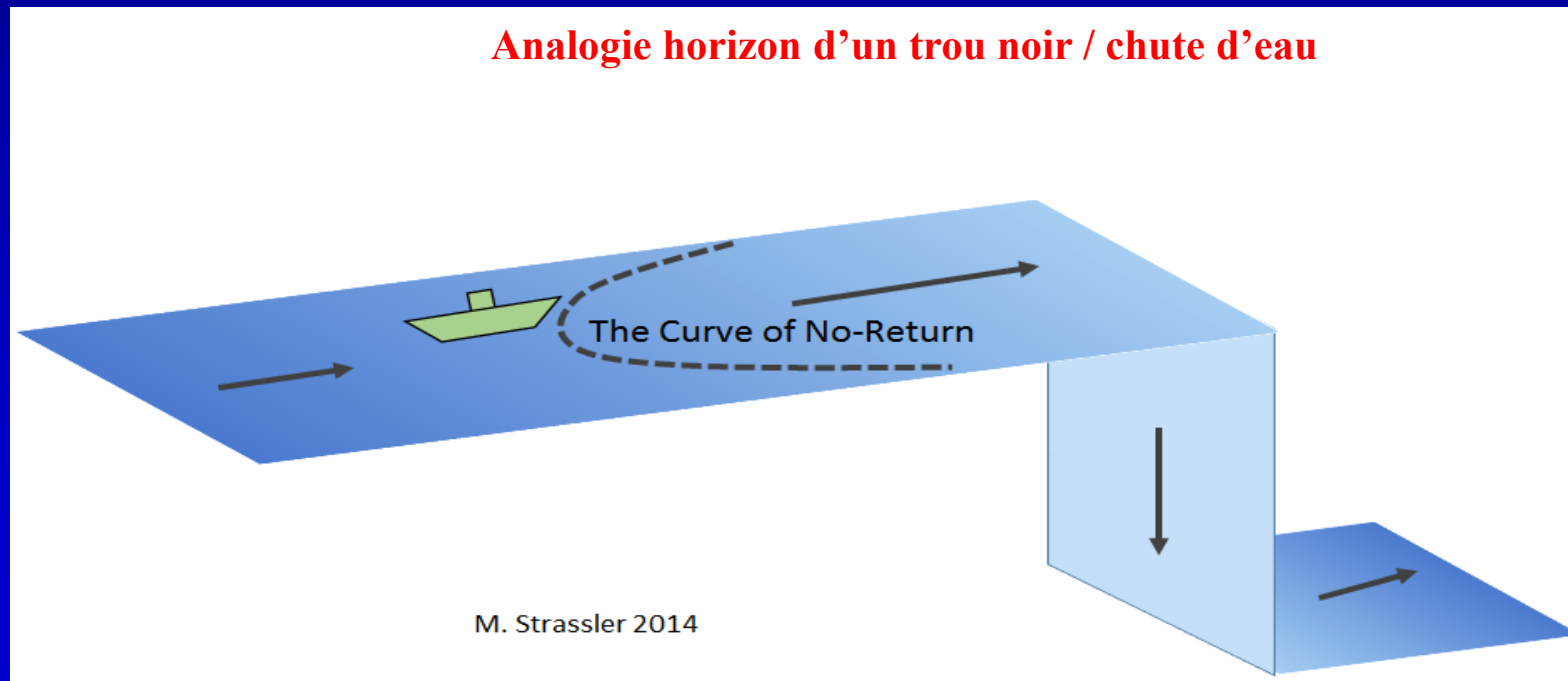
# Pulsars



# Supernovæ

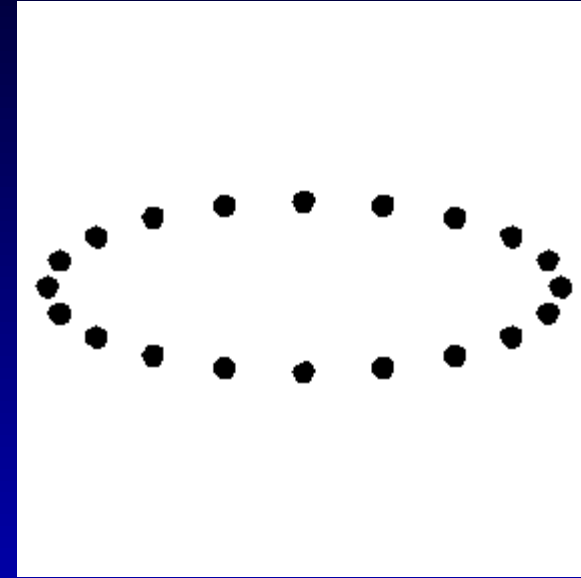
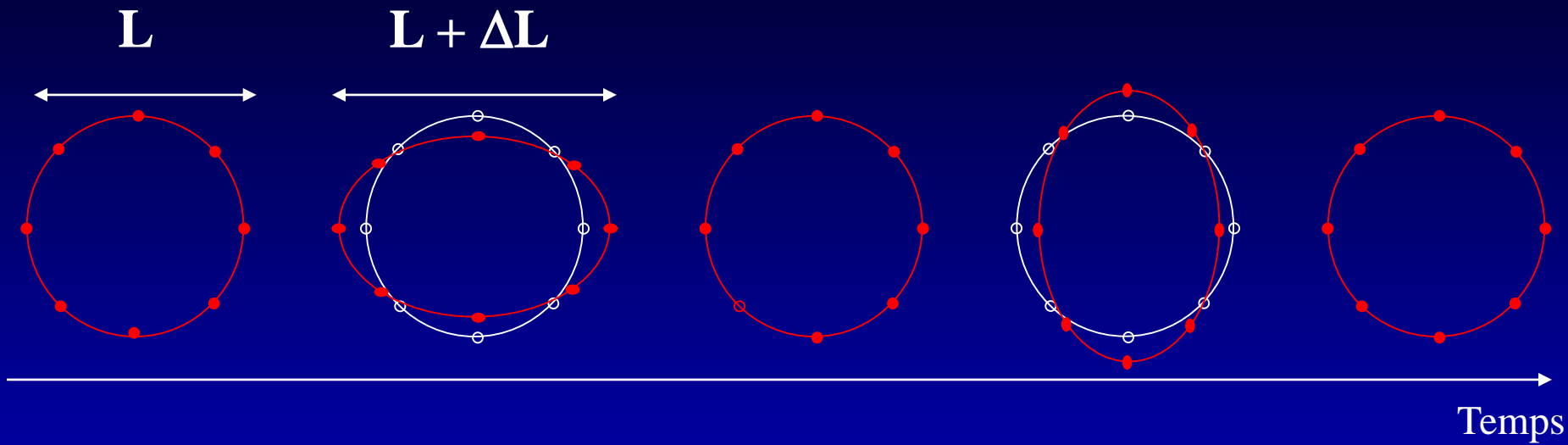
# Les Trous Noirs

- Région de l'espace-temps dans laquelle la **gravitation** est si **forte** que **rien** ne peut **s'échapper**, même la lumière
- Formés par l'effondrement d'étoiles massives qui ont épuisé leur combustible
- **Horizon** d'un trou noir : **Pas de retour** en arrière une fois franchi



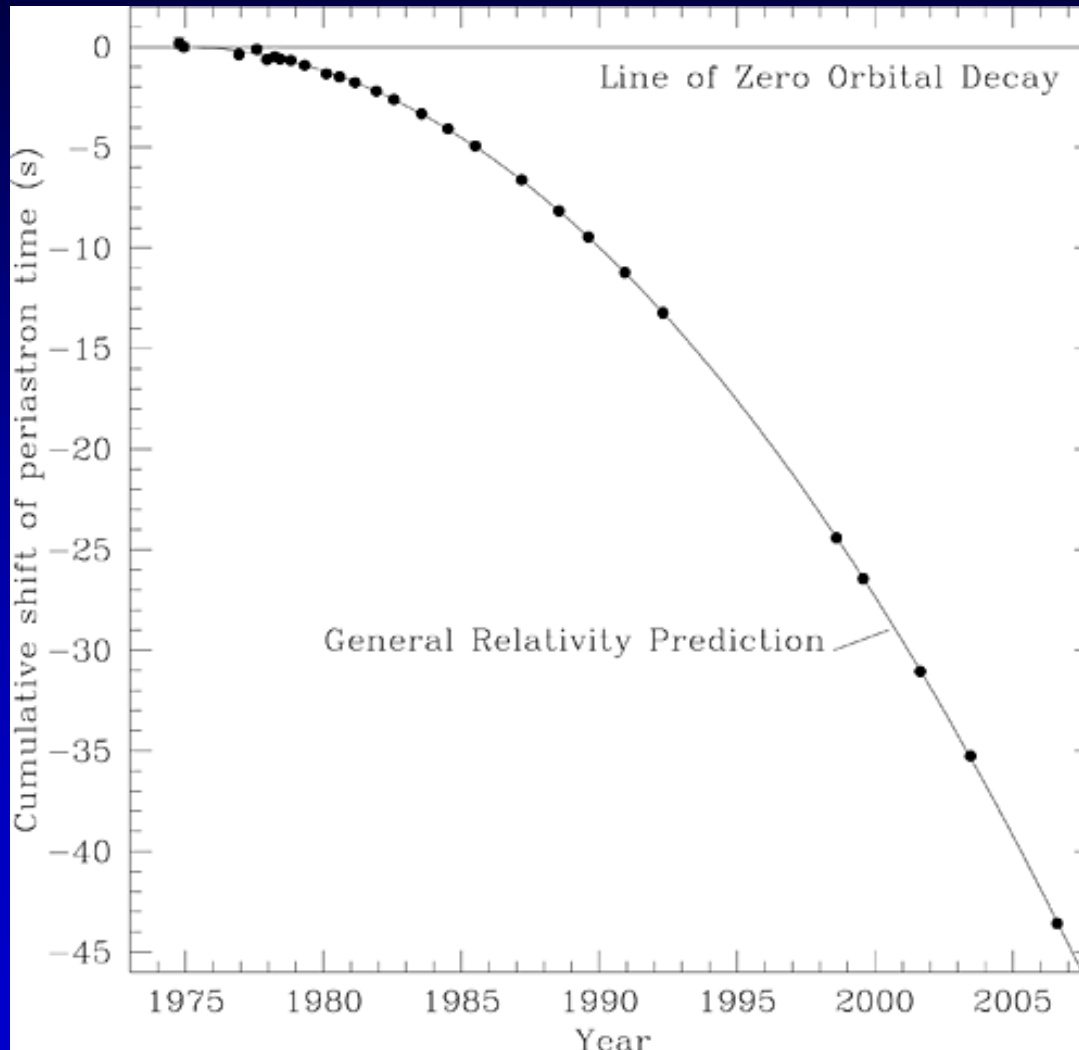


## Effet du passage d'une onde gravitationnelle

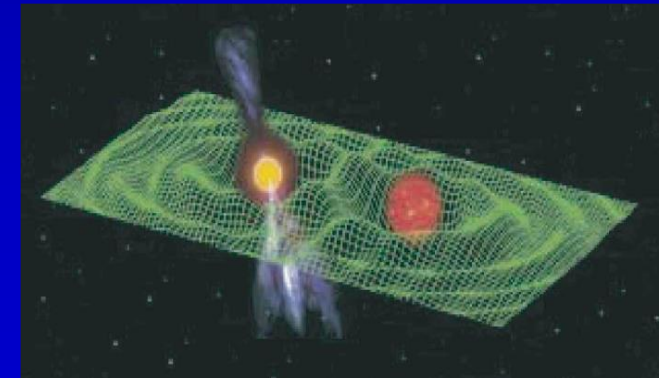


La **déformation** relative  $\Delta L/L$  est **égale** à leur **amplitude**  $h$

# L'existence des ondes gravitationnelles a été prouvée indirectement

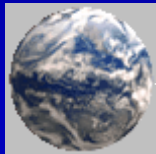


- **Pulsar 1913+16**: système binaire d'étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre
- Diminution de la période orbitale
- **Diminution** en accord avec la **prédiction** de la Relativité Générale (perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles)
- **Taylor & Hulse, Prix Nobel 1993**



## Comment Les Détecter ?

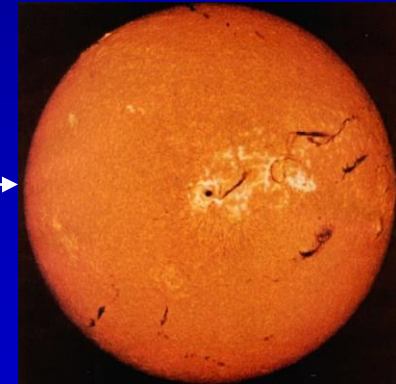
Il faut **mesurer** des longueurs avec une **précision relative** de  $10^{-21}$ - $10^{-22}$



Terre

une distance de l'ordre de  
150 millions de kilomètres

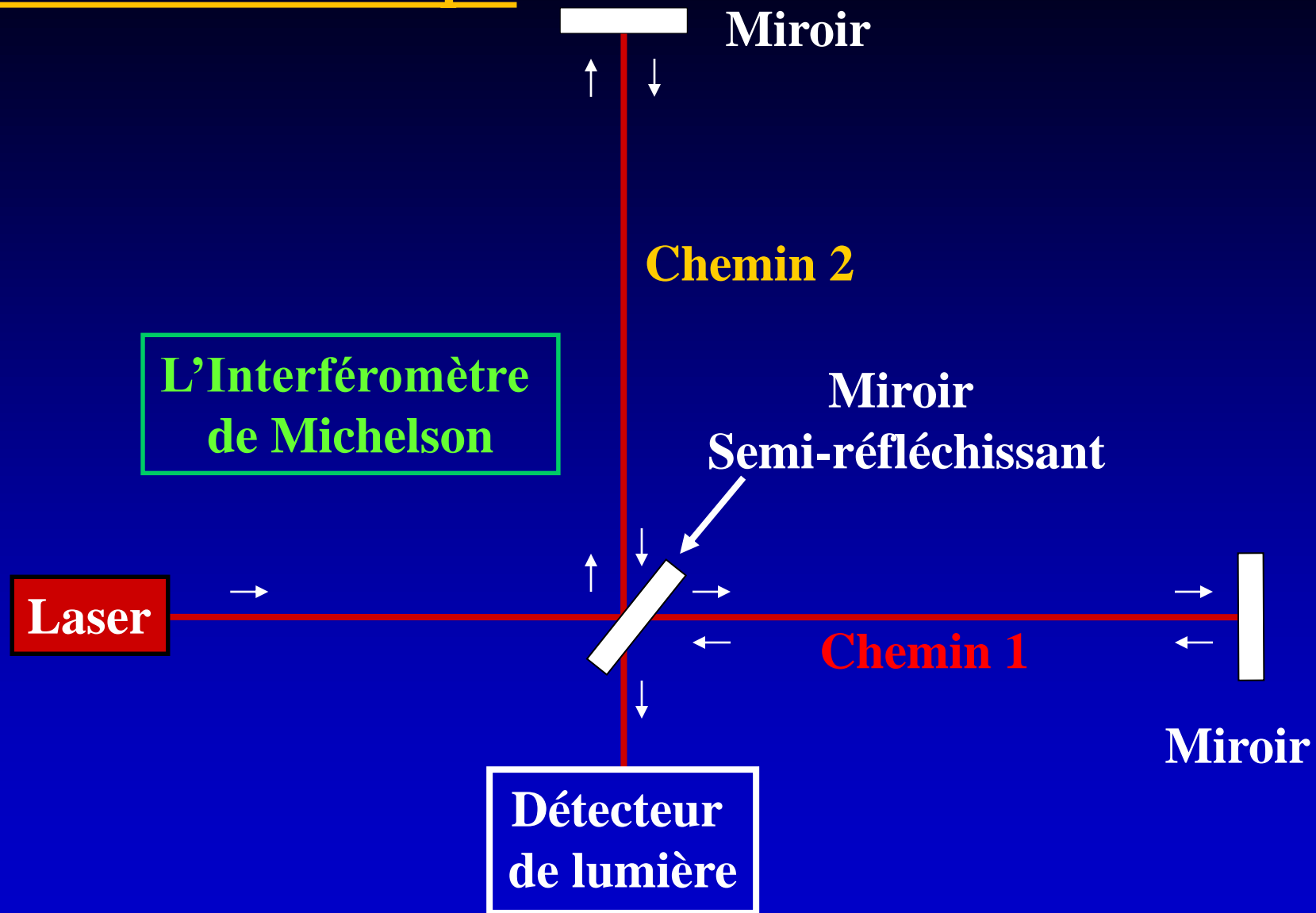
mesurée à mieux qu'un atome

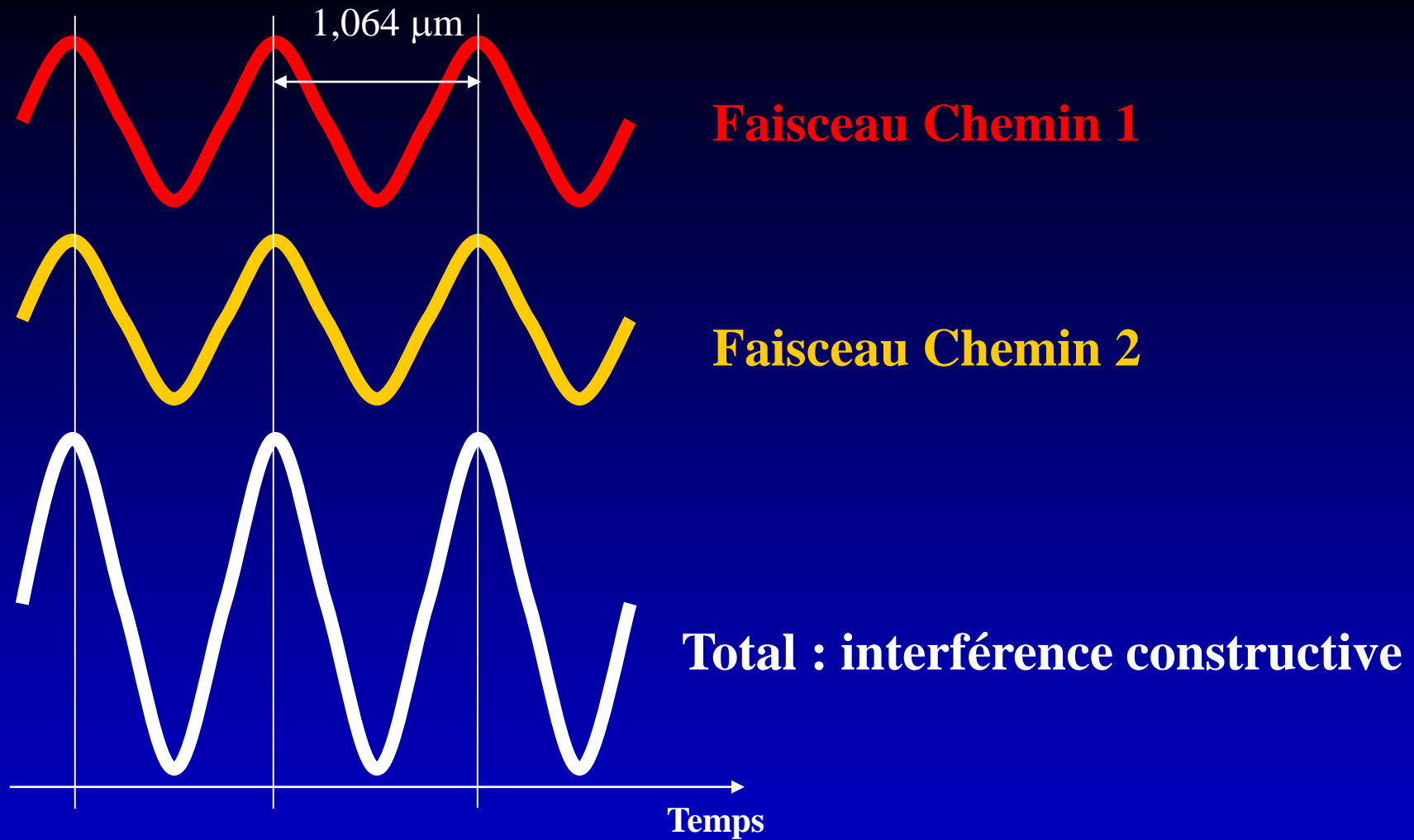


Soleil

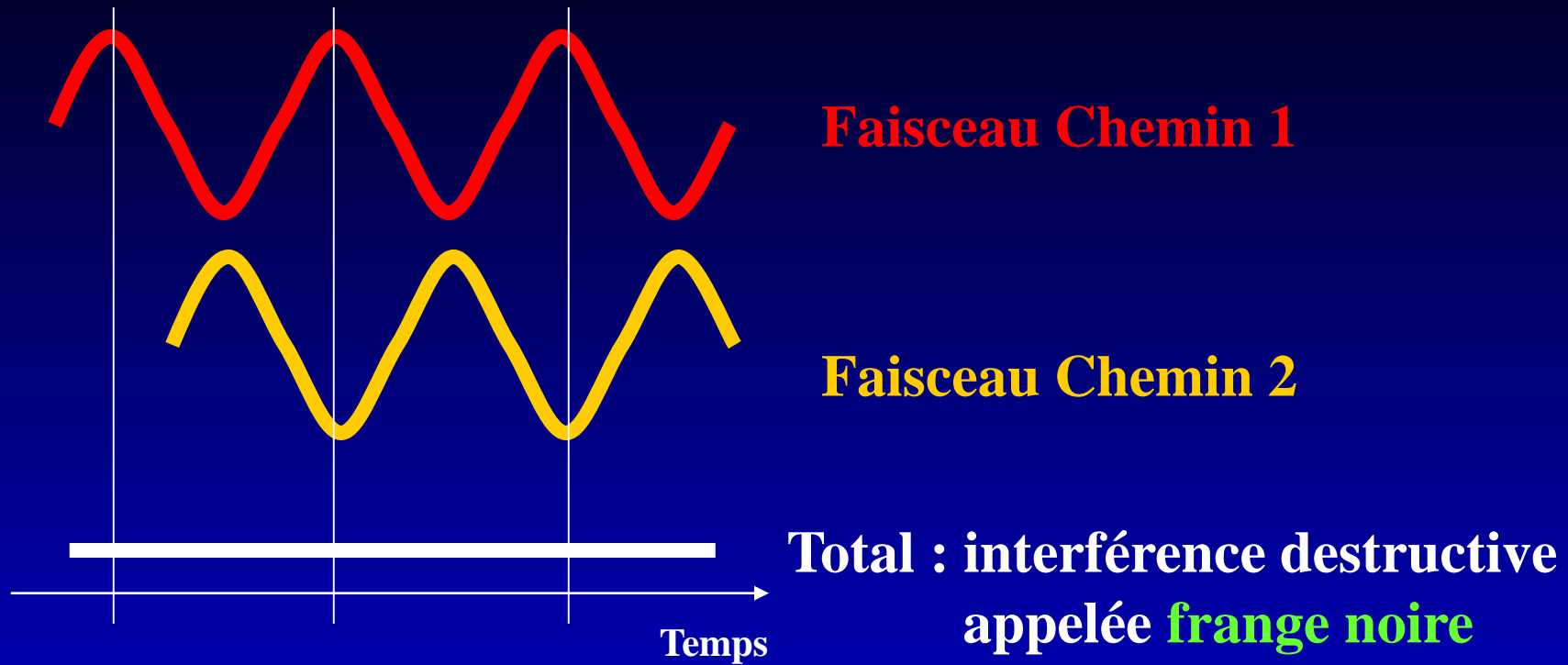


# La Détection interférométrique





Le détecteur de lumière « voit » la **somme** des **deux faisceaux**



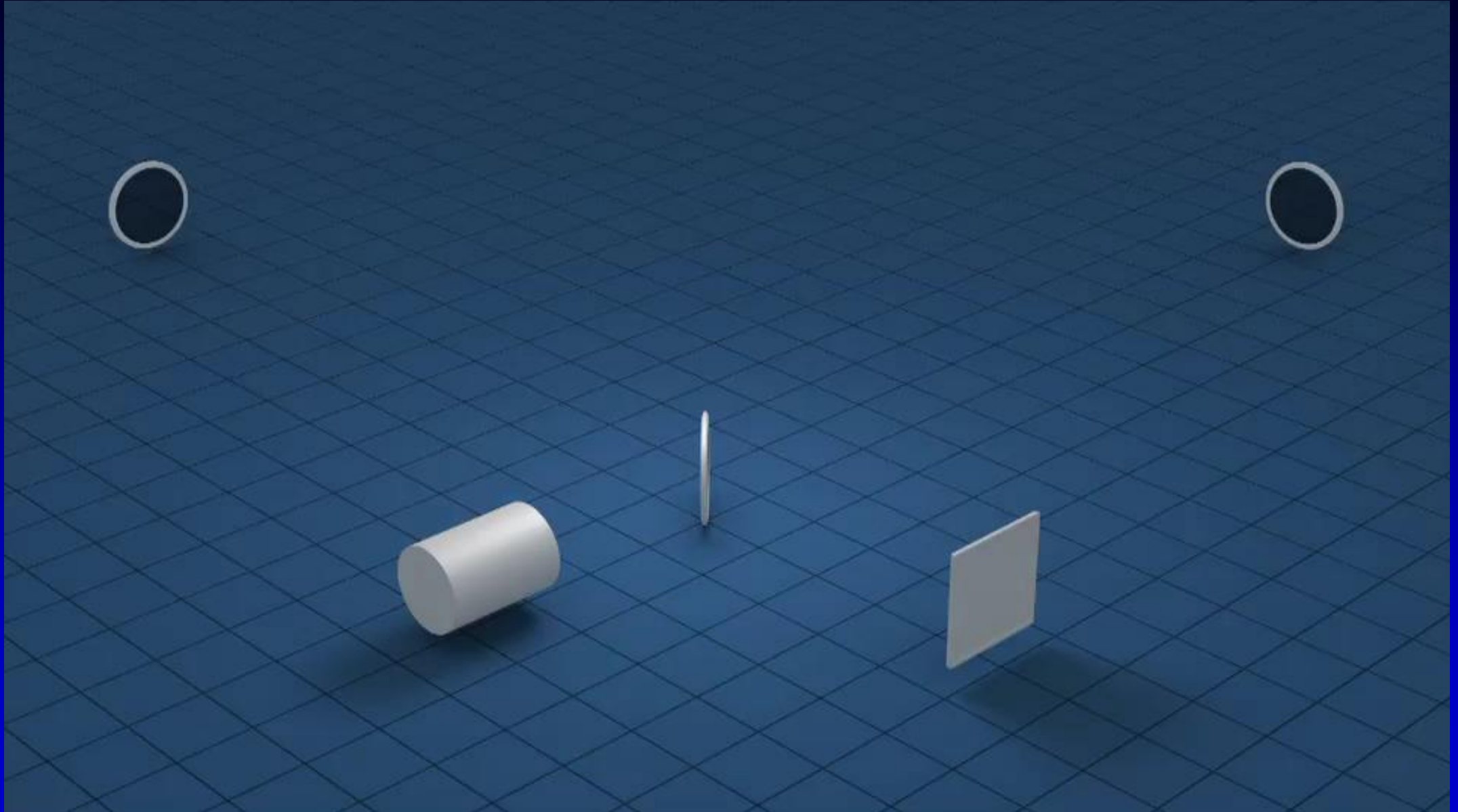
L'état d '**interférence** dépend  
de la **différence de longueur** entre les **deux chemins**



# La Détection interférométrique

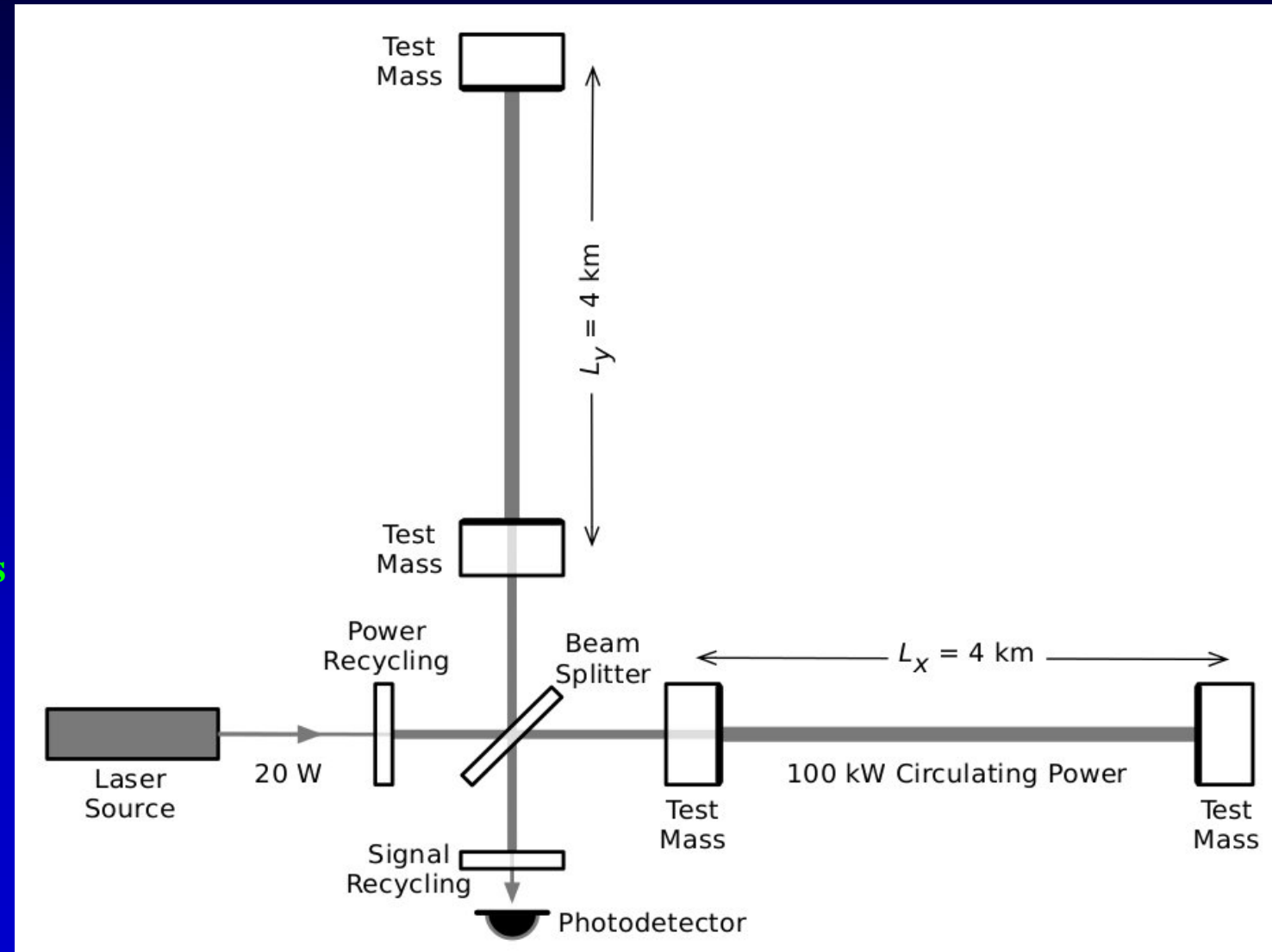
- Réglons l'**interféromètre** sur une **frange noire**
- Une **onde gravitationnelle** va **changer** la **longueur** des chemins
- Le **détecteur** va recevoir de la **lumière**
- La **quantité** de lumière est **proportionnelle** à l'**amplitude  $h$**

# La Détection Interférométrique



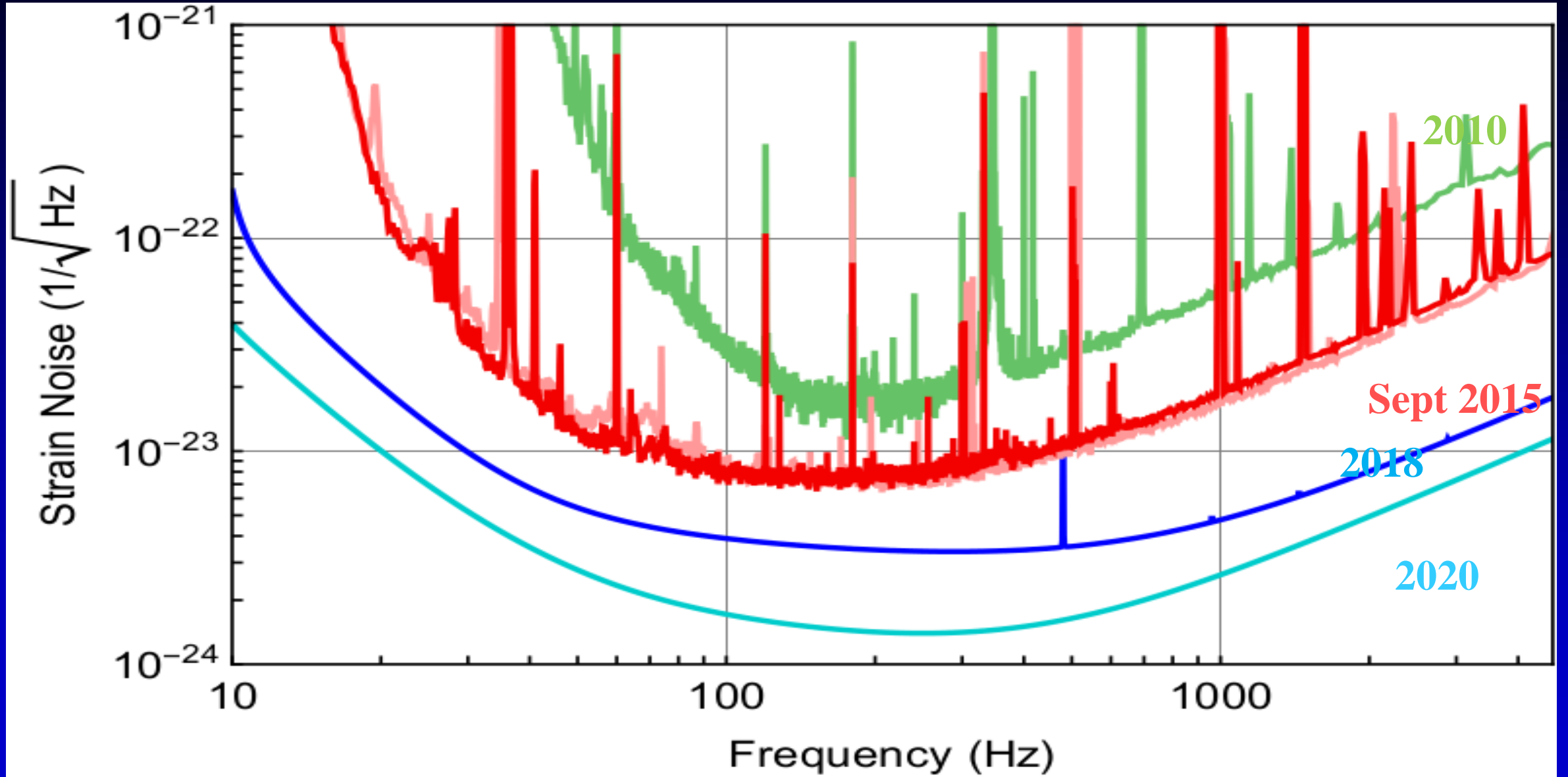
# Les Détecteurs LIGO et Virgo

- 90s : Projets LIGO (USA) et Virgo (Fr-It) lancés
- 00s : Prises de données pour LIGO et Virgo : **Pas de détection**
- 10s : Construction de Advanced LIGO et Advanced Virgo
- 15 : Prises de données Advanced LIGO (**3 fois plus sensibles**)
- 20 : Advanced LIGO et Advanced Virgo **10 fois plus sensibles** que LIGO et Virgo





# La Sensibilité de LIGO



# Le Défi Technologique

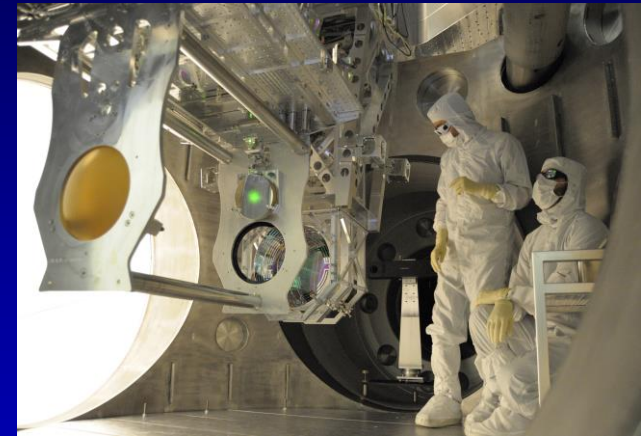


Mettre tout l'**interféromètre**  
(**plusieurs milliers de m<sup>3</sup>**)  
sous **vide** ( $P = 10^{-9}$  mbar)

Avoir des **miroirs** dont  
la **qualité** est à la **limite**  
des techniques actuelles

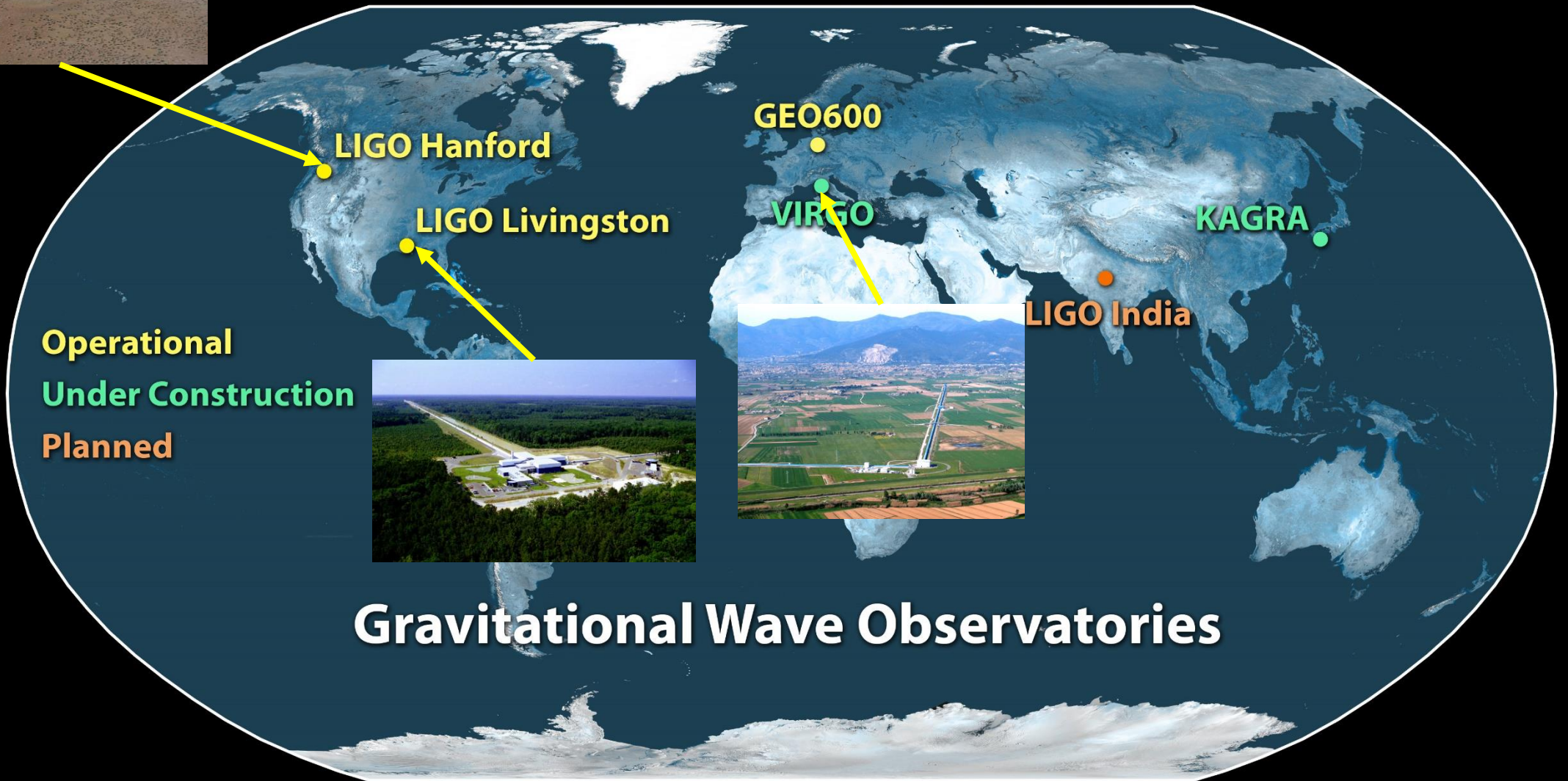


S'**isoler** des **vibrations** du sol



**Contrôler** la **position** relative  
des miroirs à mieux que  
**1 millionième de micron**

# Les interféromètres dans le monde

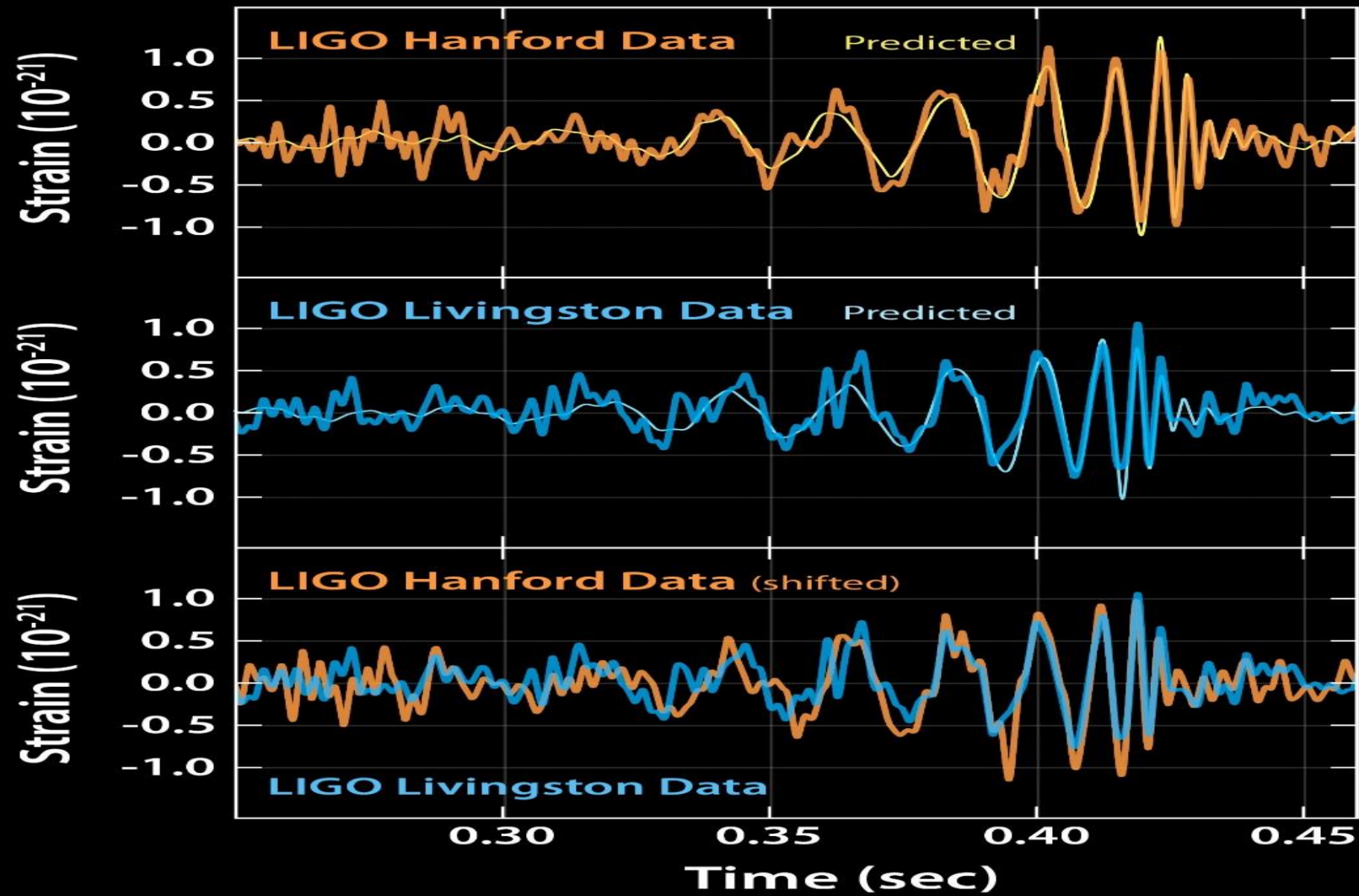




# Que s'est-il passé le lundi 14 Septembre ?

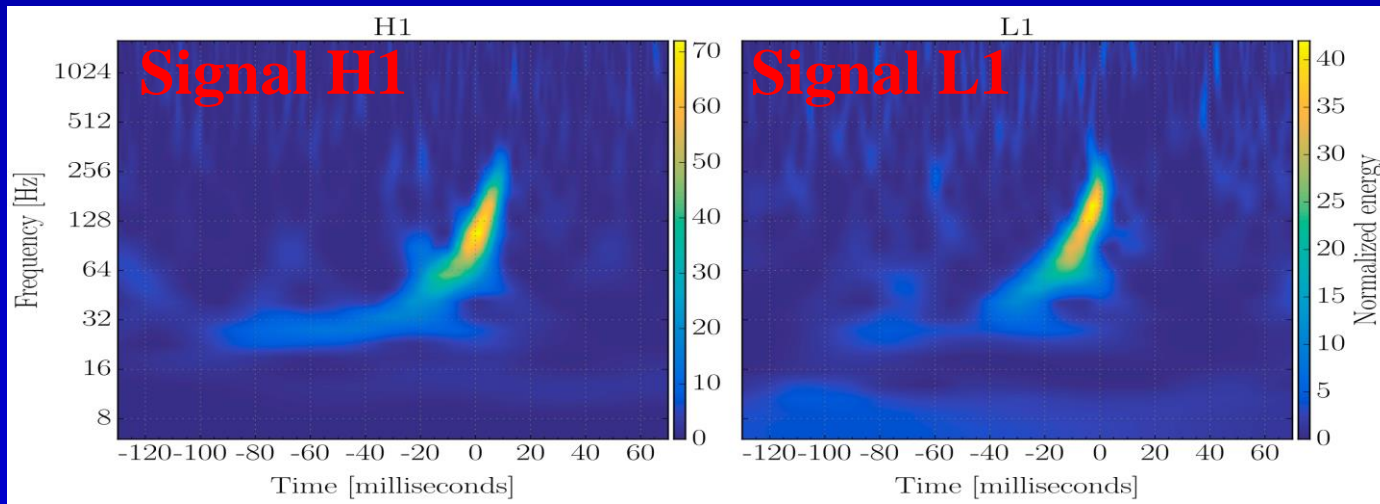
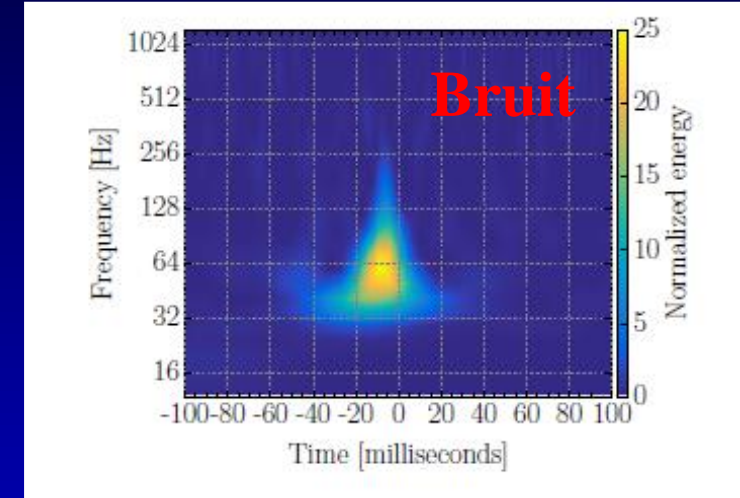
- 09h50m45s (GMT) : **Passage** d'une **onde gravitationnelle** à **Livingston** puis à **Hanford 7ms** plus tard
- 09h54m : **Détection** en ligne de l'événement par **l'analyse** dédiée aux « **signaux impulsionnels** »
- 10h50 : Premier courriel
- 11h10 : **Pas de signal artificiel** injecté ( Confirmation officielle à 17h59 le même jour)
- 11h20 : Evénement identifié comme **binaire de trous noirs**
- 11h45 : **Qualité** des données **OK**

# Les signaux détectés



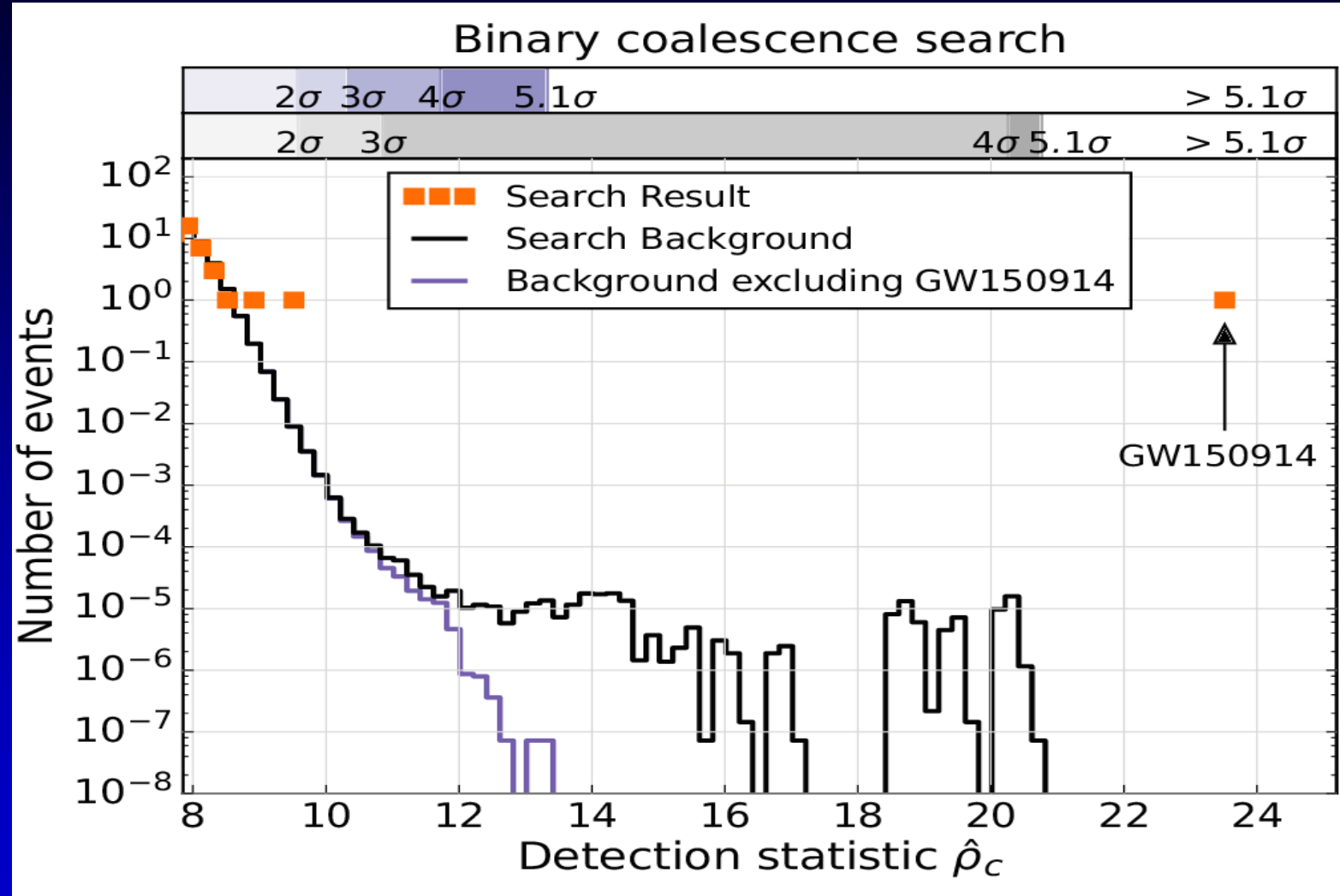
# Est on sur que ce n'est pas un artefact dû aux bruits ?

- Plus de **200 000 canaux auxiliaires** ont été étudiés
  - Bruits non-corrélés : activité humaine, tremblement de terre, bruit radio-fréquence ...
  - Bruits corrélés : éclairs, vent solaire ...
- Tous les systèmes de contrôle et d'acquisition ont été **vérifiés** pour exclure une **action malveillante**
- La **qualité** des données autour de GW150914 est **bonne et stable** pendant **plusieurs semaines**



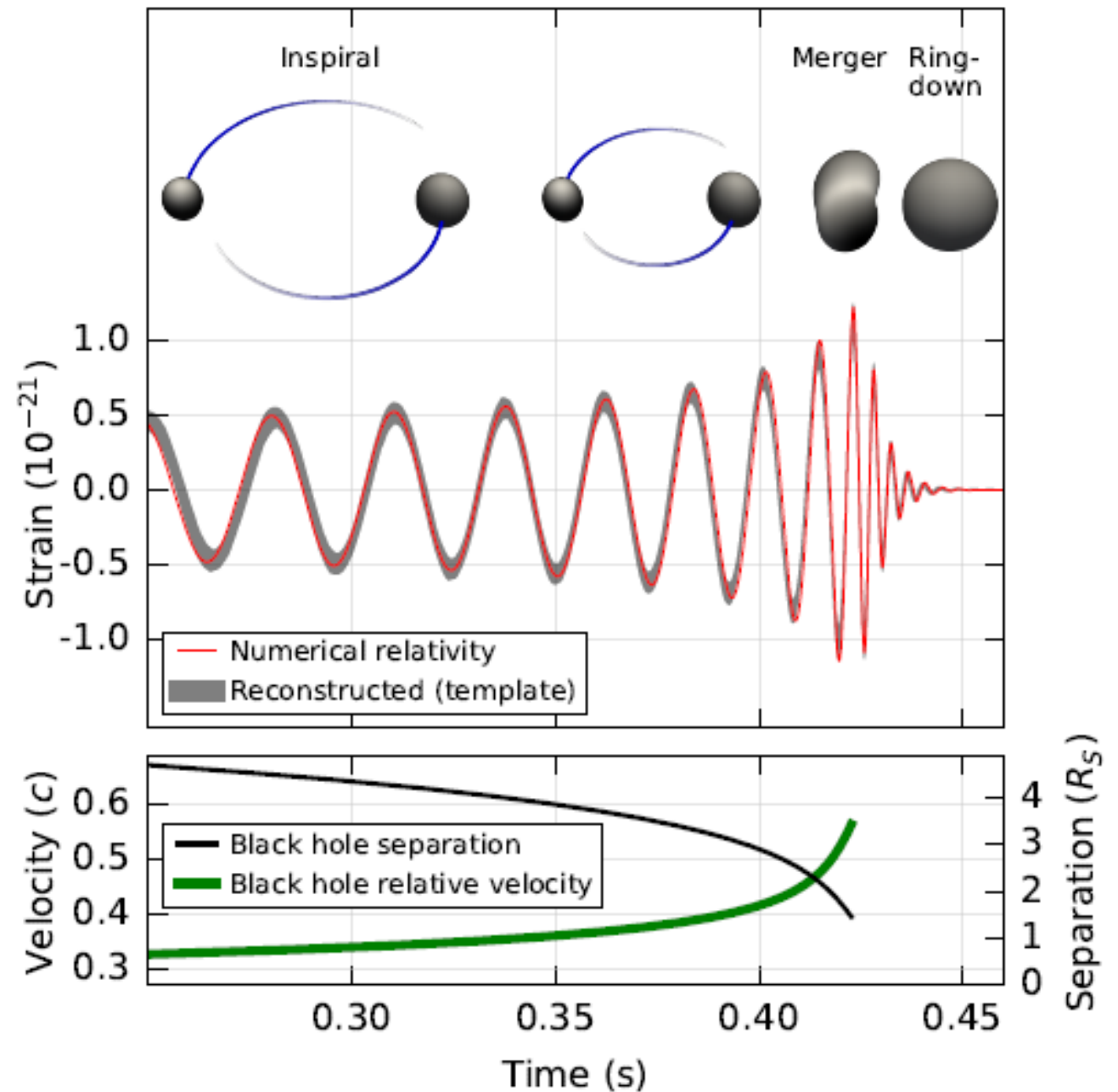
# La Confiance dans le résultat

- Analyse plus fine en utilisant des **calques** issus des **calculs théoriques**
- **Probabilité** que cela soit un faux signal **< 1 sur 5 millions**



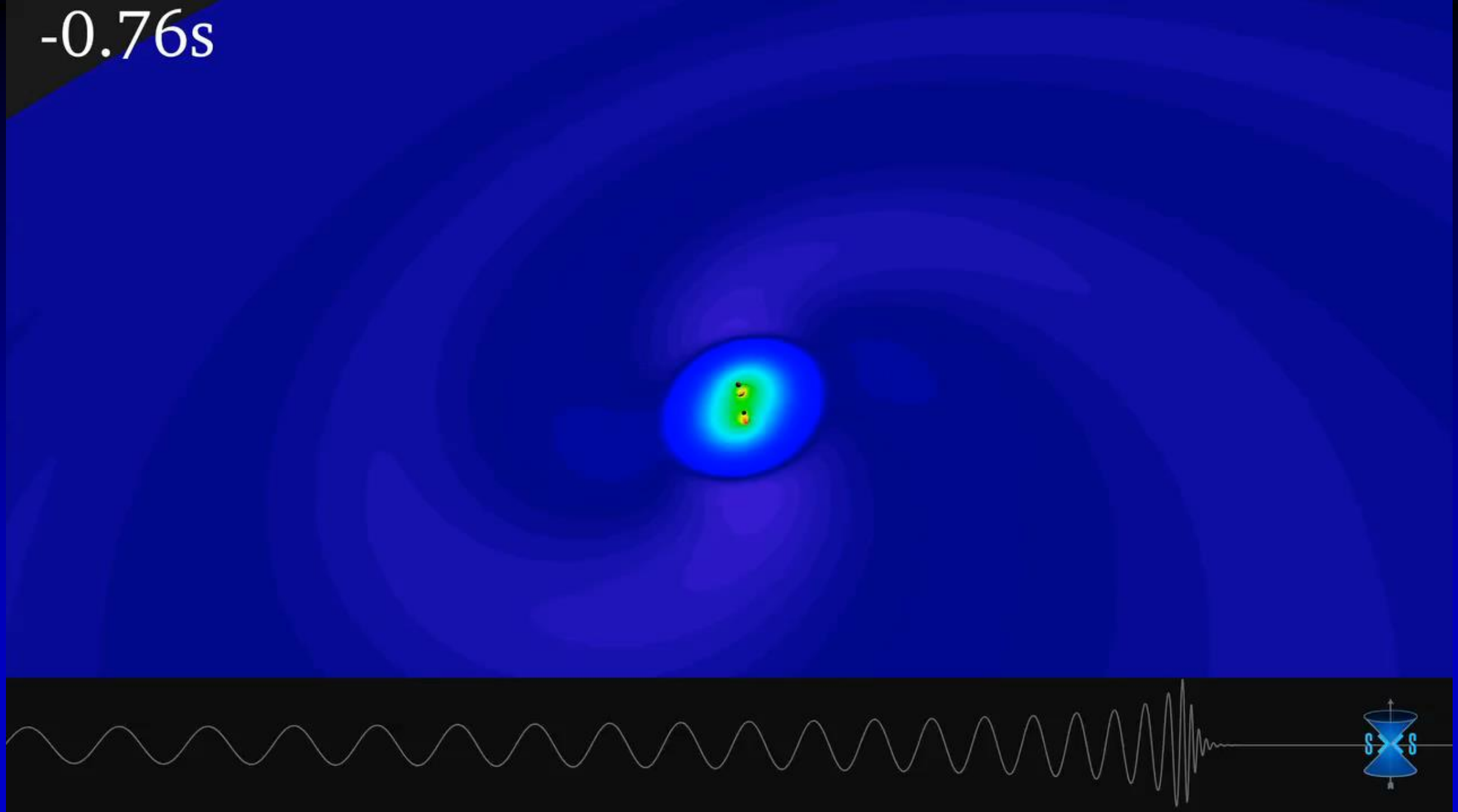
# La coalescence de 2 trous noirs

- **Masses initiales :**
  - Trou Noir 1 : entre 32 et 41  $M_{\text{Sol}}$
  - Trou Noir 2 : entre 25 et 33  $M_{\text{Sol}}$
- **Masse Finale :** entre 58 et 67  $M_{\text{Sol}}$
- **Energie Emise :** entre 2,5 et 3,5  $M_{\text{sol}}$
- **Luminosité Maximale :**  $3.6 \cdot 10^{56}$  erg/s



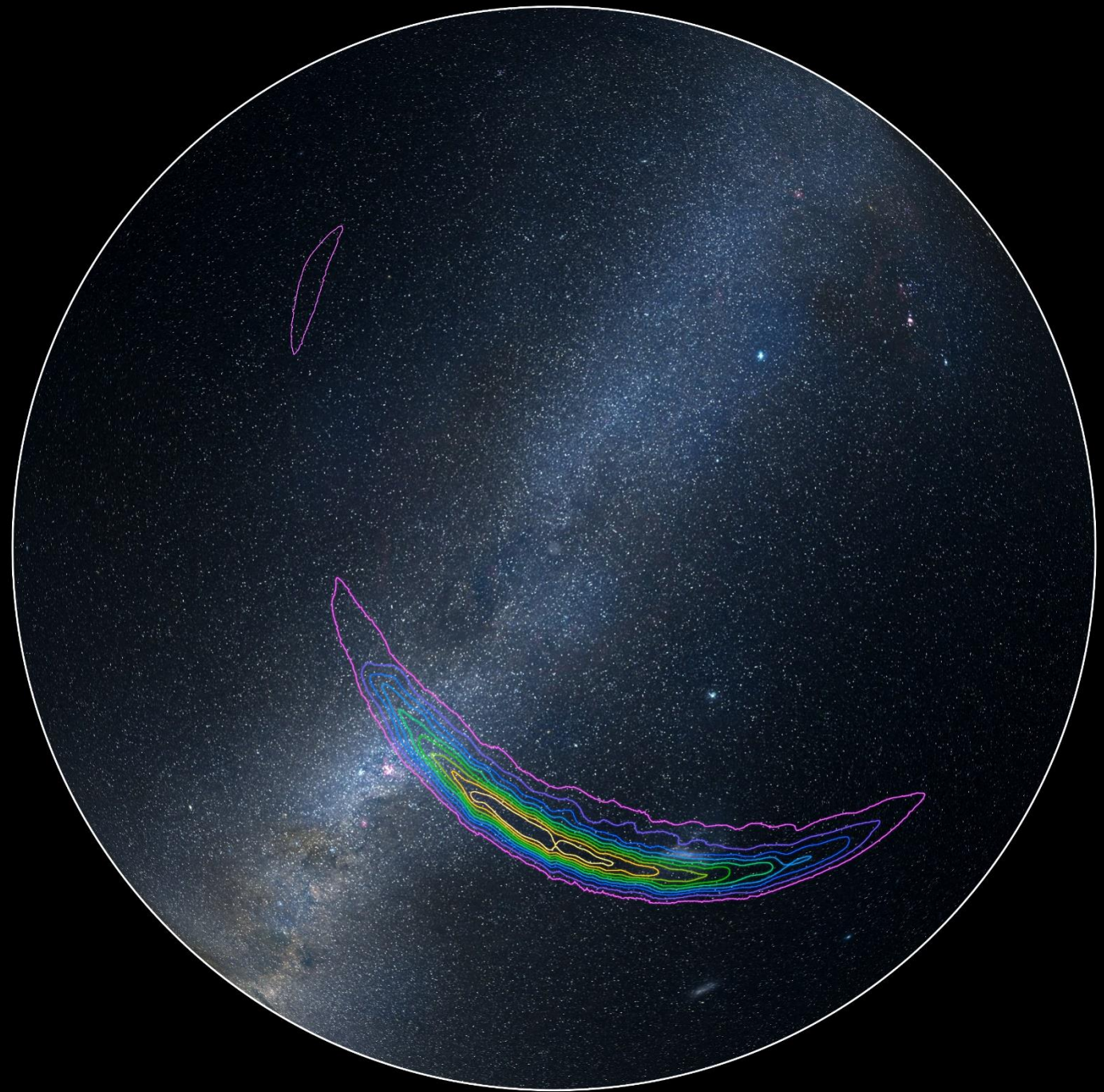


-0.76s



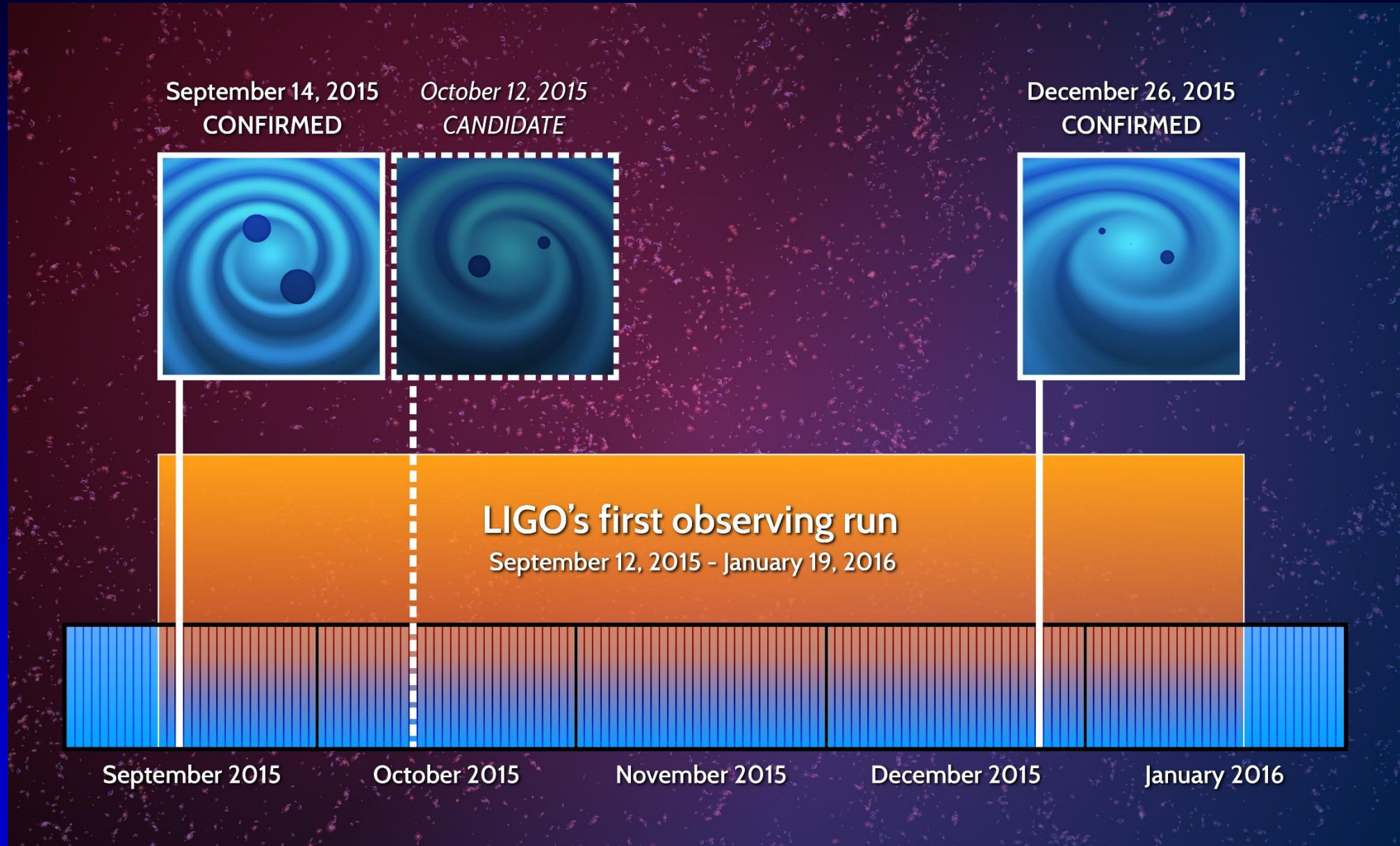
# La Position dans le ciel

- **Distance** : entre **0,75 et 1,9** milliards d'années-lumière
- Boite d'erreur de **600 degrés carrés** (3000 fois la taille de la lune)
- Besoin d'au moins **trois détecteurs** pour localiser la source

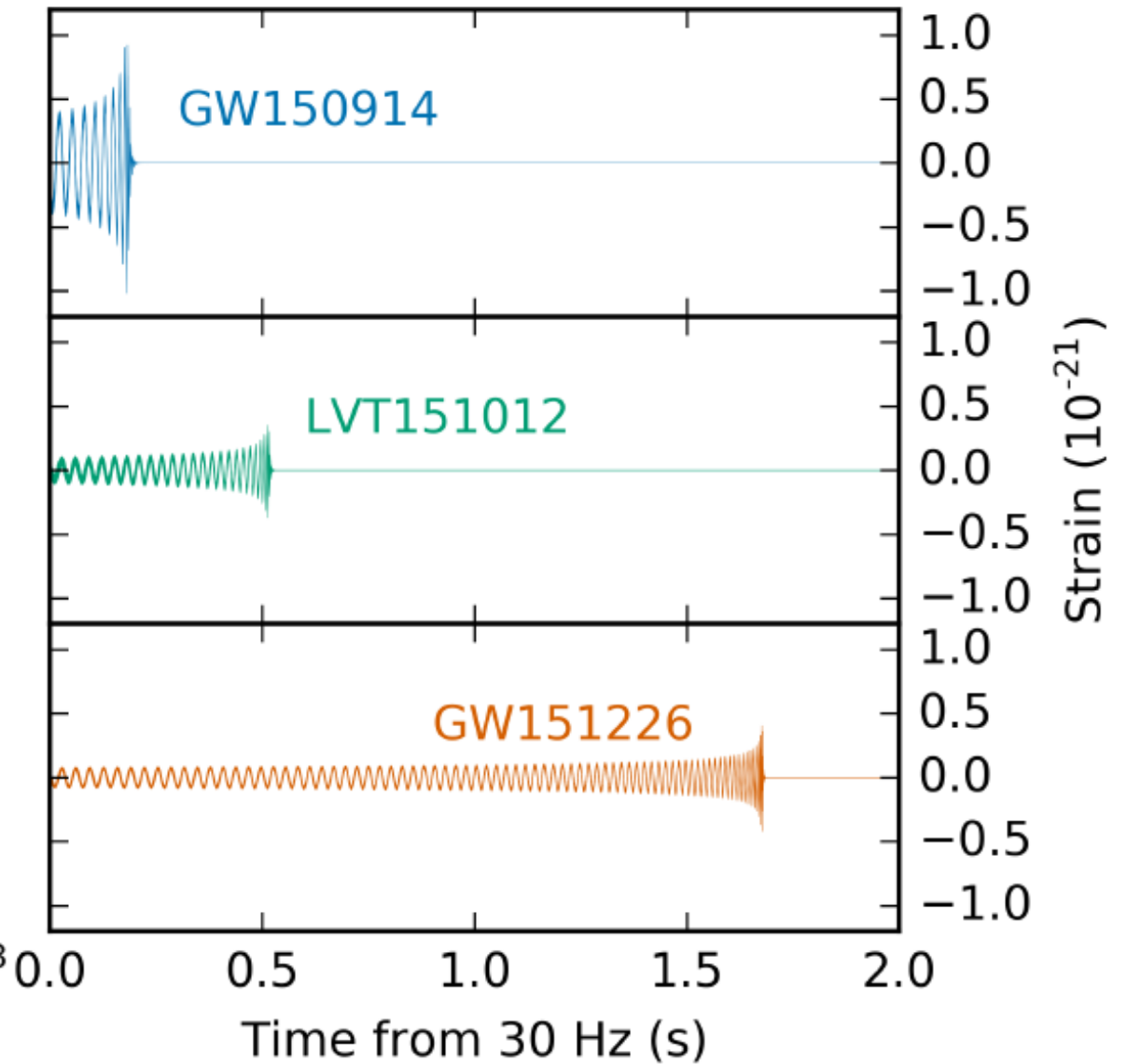
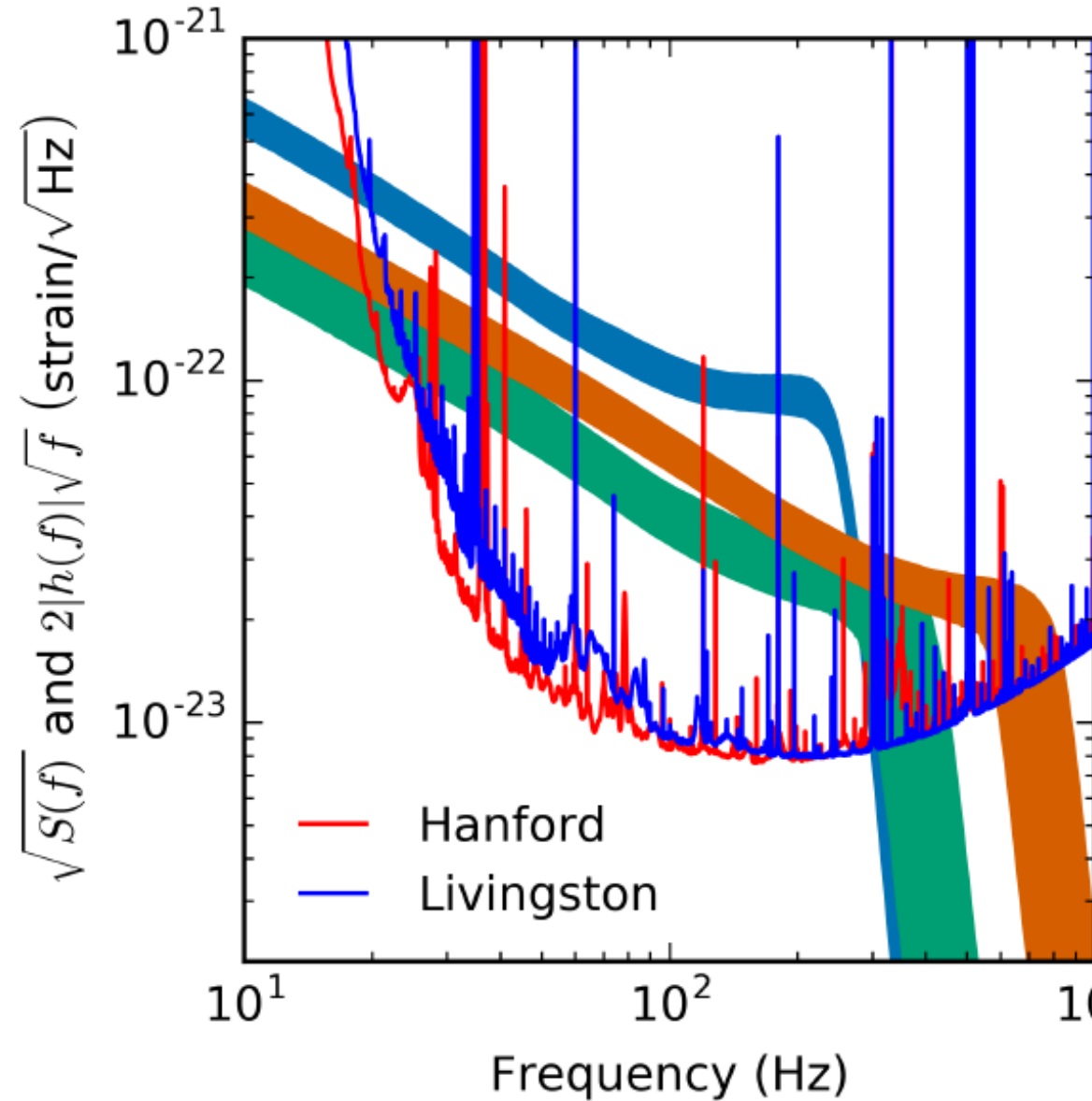




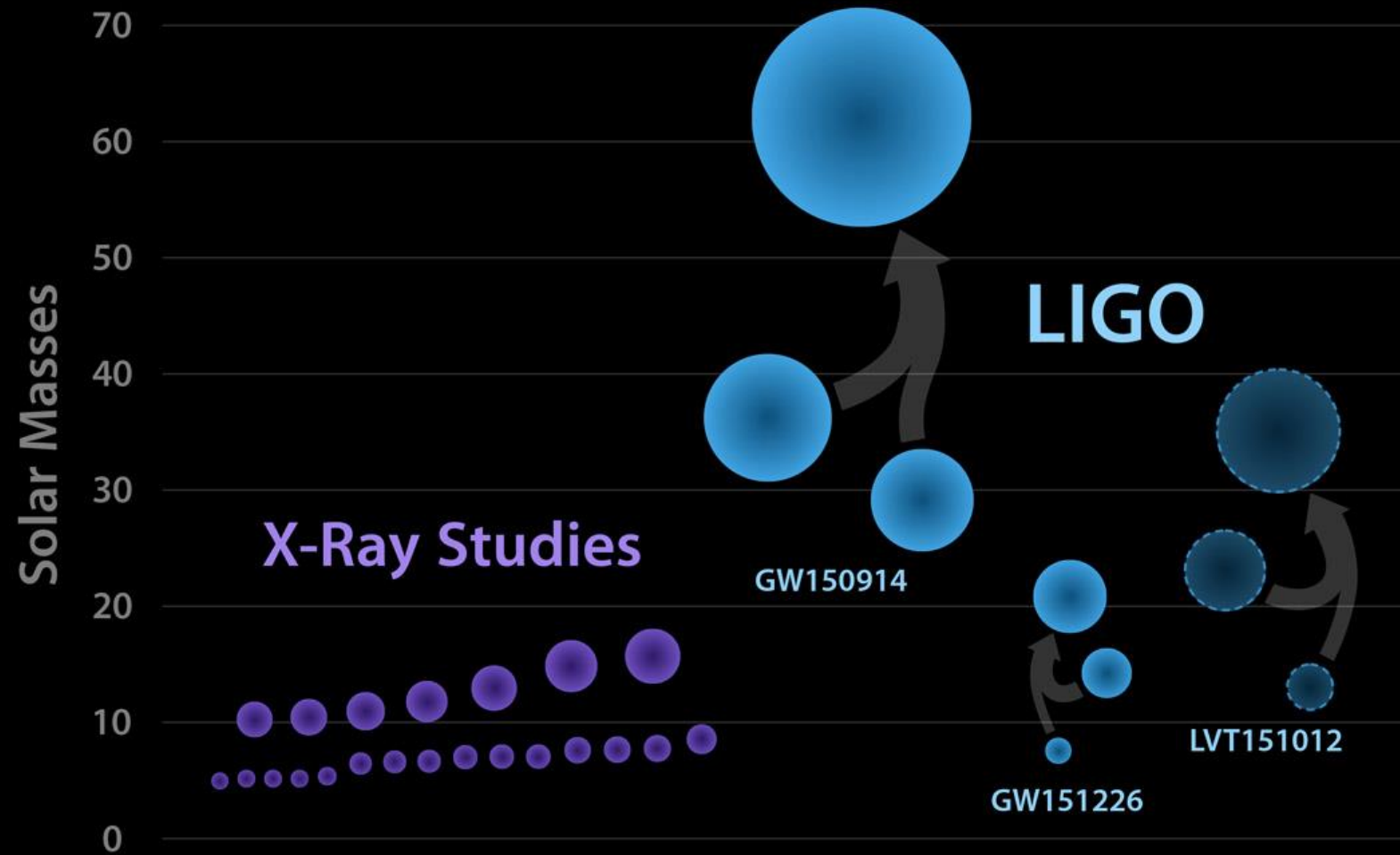
# Et depuis le 14 Septembre ?



## Les « 3 événements »

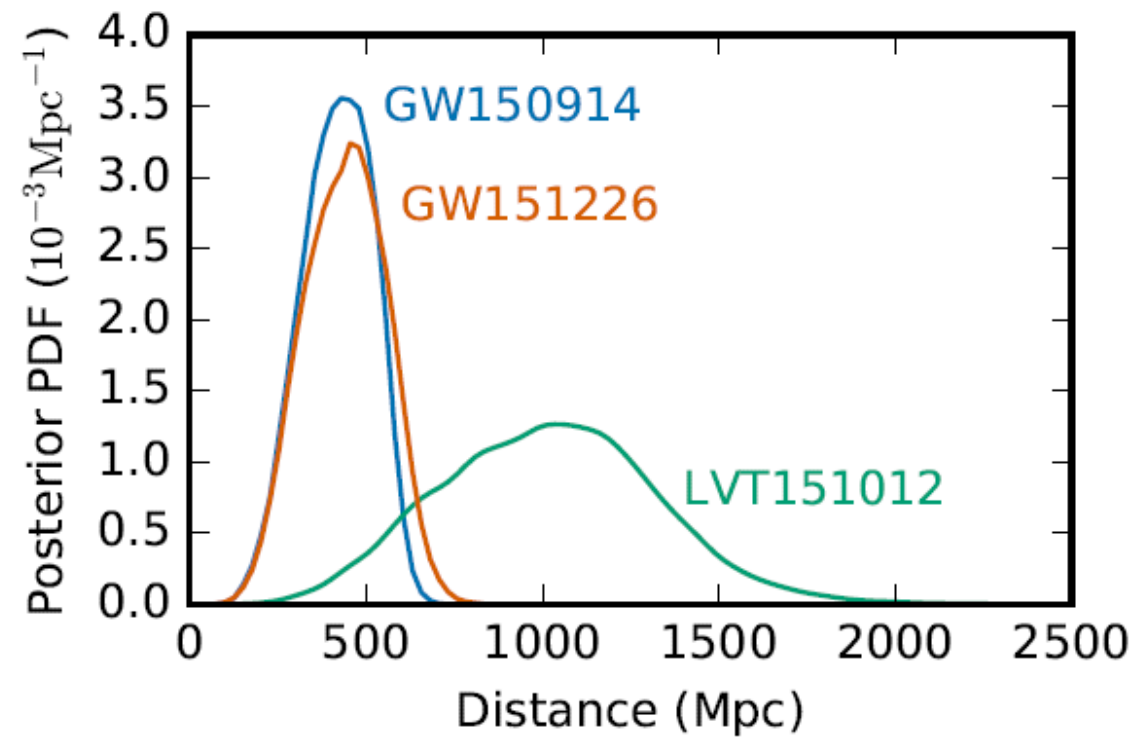
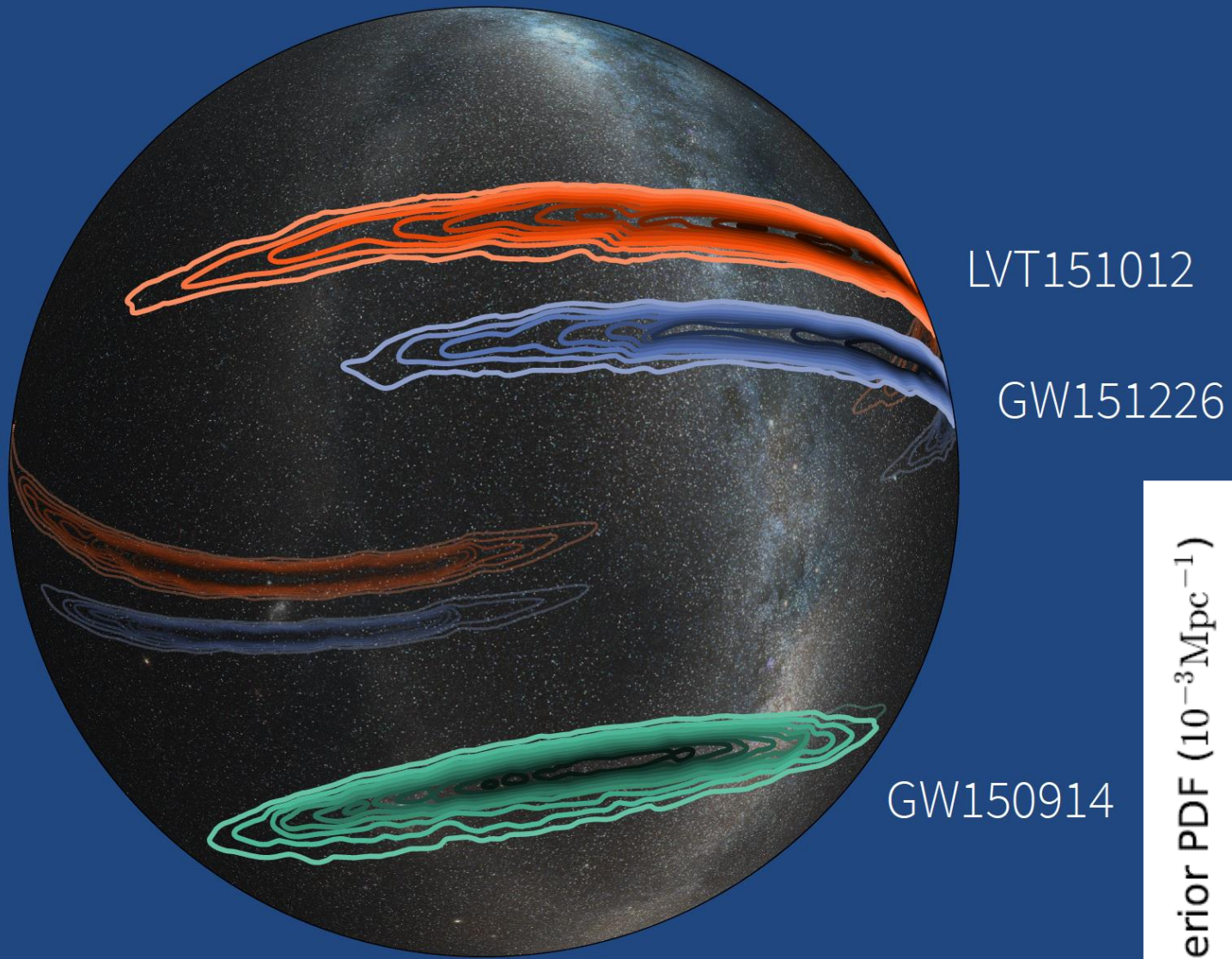


# Black Holes of Known Mass





## La Position dans le ciel



# Pourquoi c'est une découverte fondamentale ?

- Première **détection directe** d'**ondes gravitationnelles** émises par une source astrophysique
- Premières **observations** d'un système **binaire de deux trous noirs**
- Premières **découverte** de la **coalescence de deux trous noirs**
- Premières **évidence** que des **trous noirs stellaires** peuvent avoir des masses **supérieures à  $15 M_{\text{sol}}$**
- Premiers **tests** de la **Relativité Générale** dans le régime où la **déformation** de l'espace-temps est **forte** et **rapidement variable** dans le temps

**LIGO/Virgo ouvre une nouvelle fenêtre sur l'Univers  
quatre siècles après l'invention de la lunette par Galilée**

# Pour aller plus loin

- Article scientifique de la découverte signé par les deux collaborations LIGO et Virgo  
<http://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.116.061102>
- Articles compagnons : <https://www.ligo.caltech.edu/page/detection-companion-papers>
- Film CNRS Images : <https://lejournel.cnrs.fr/videos/ondes-gravitationnelles-les-detecteurs-de-lextreme>
- Communiqué de presse et Ressources supplémentaires : <http://www2.cnrs.fr/presse/communiquel/4409.htm>
- Me contacter : [cavalier@lal.in2p3.fr](mailto:cavalier@lal.in2p3.fr)