



DÉTECTION DES ONDES GRAVITATIONNELLES

Tania Regimbau

Collège de France, 1^{er} Février 2016

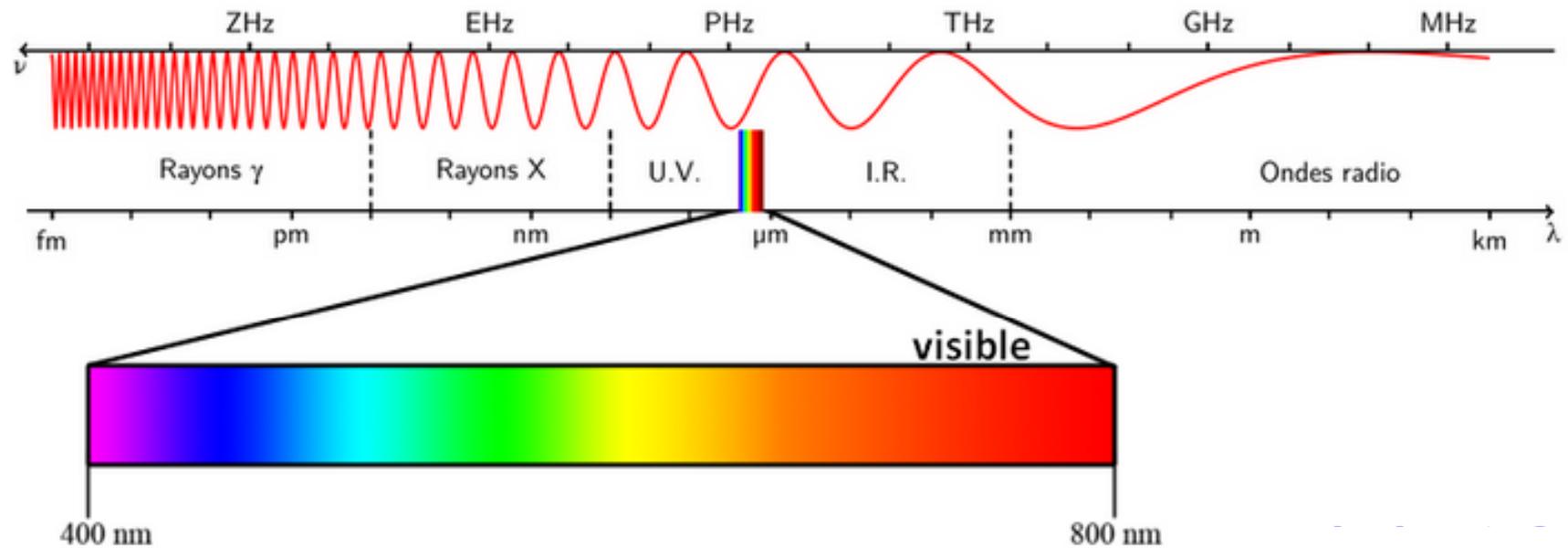
La lunette de Galilée a complètement changé notre vision de l'Univers



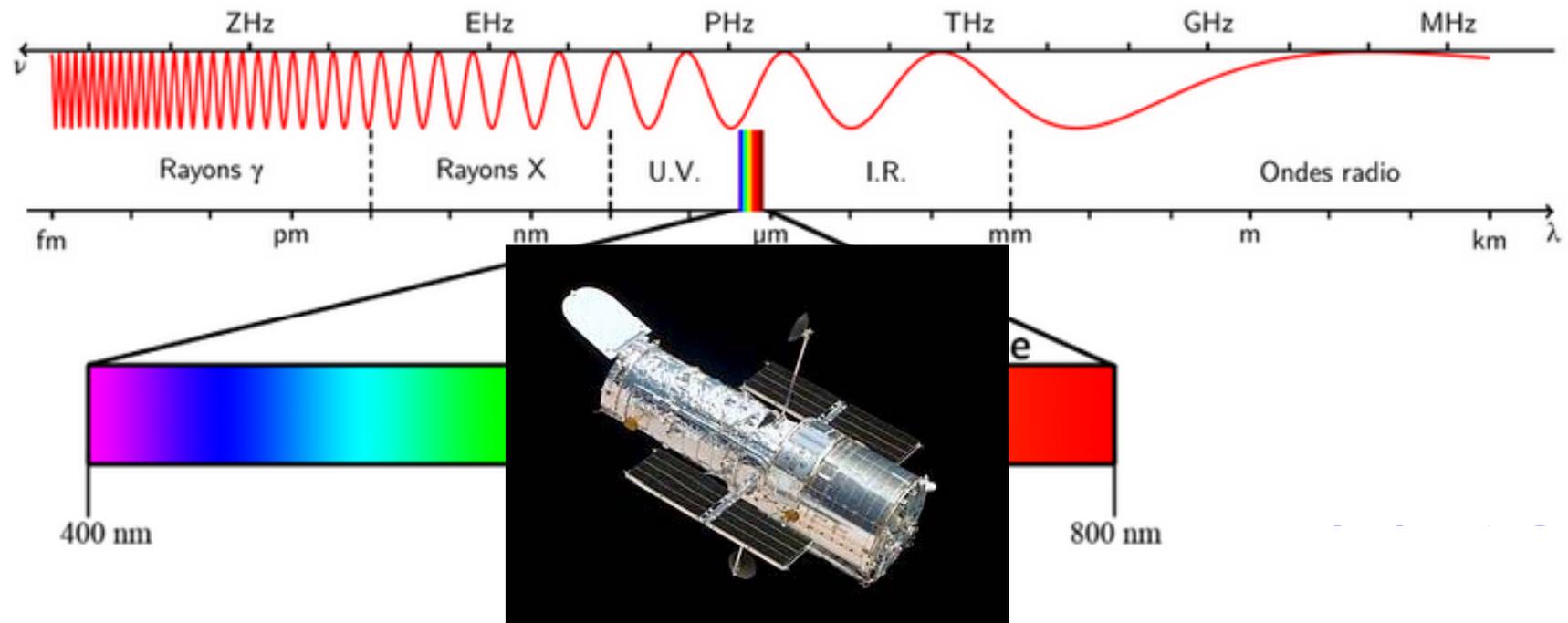
« Mais le 10 les étoiles apparurent dans cette position par rapport à Jupiter [...] je changeai ma perplexité en admiration et je découvris que la permutation apparente des étoiles dépendait non de Jupiter mais des étoiles elles-mêmes, et je pensai qu'il fallait continuer à les observer, avec encore plus d'attention et de précision. »

Le Messenger Céleste, 1610

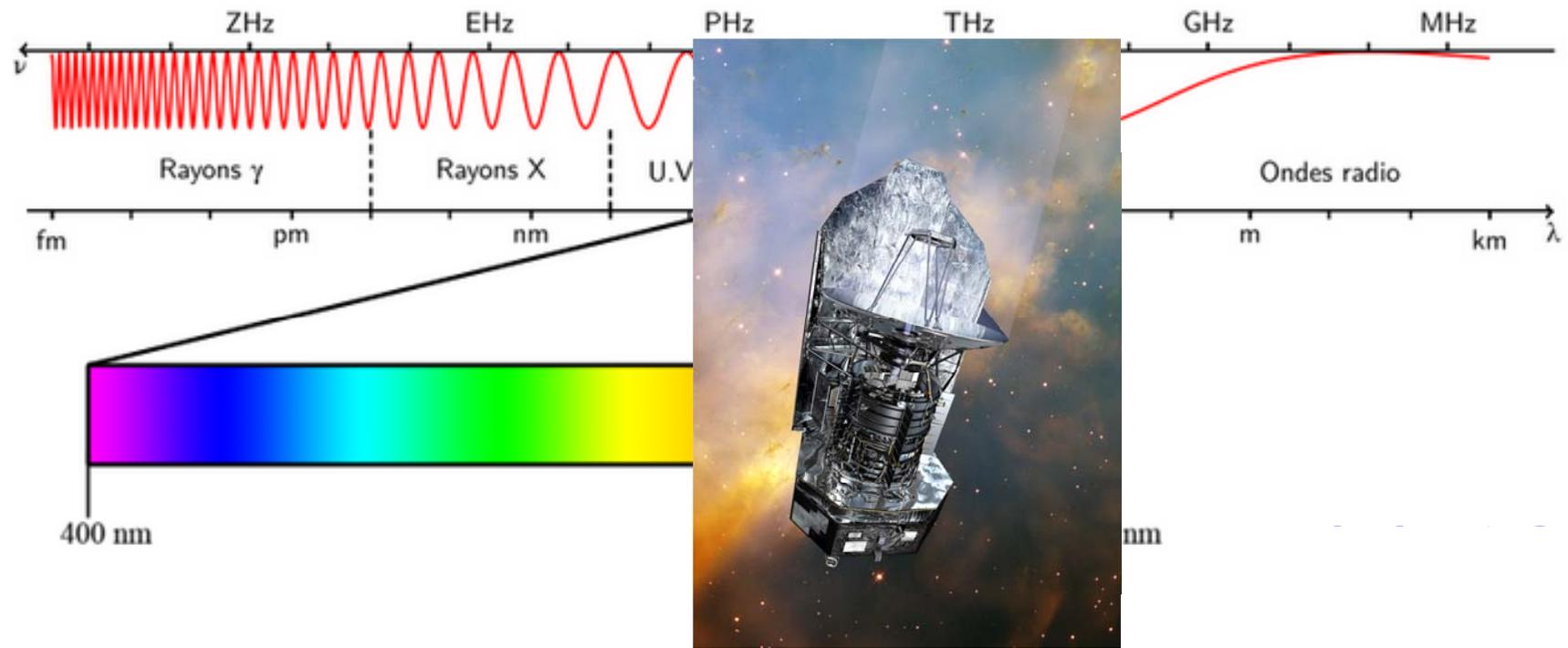
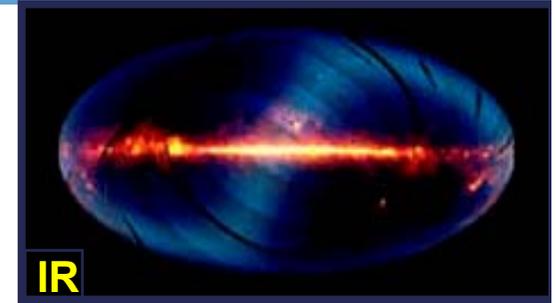
Evolution de l'Astronomie...



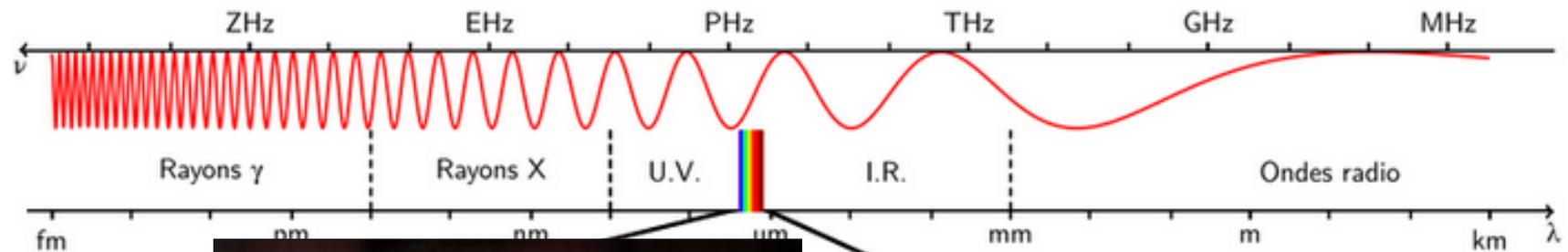
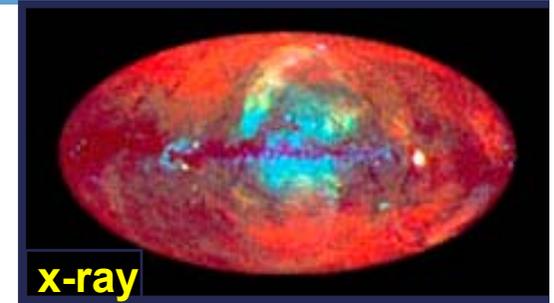
Evolution de l'Astronomie...



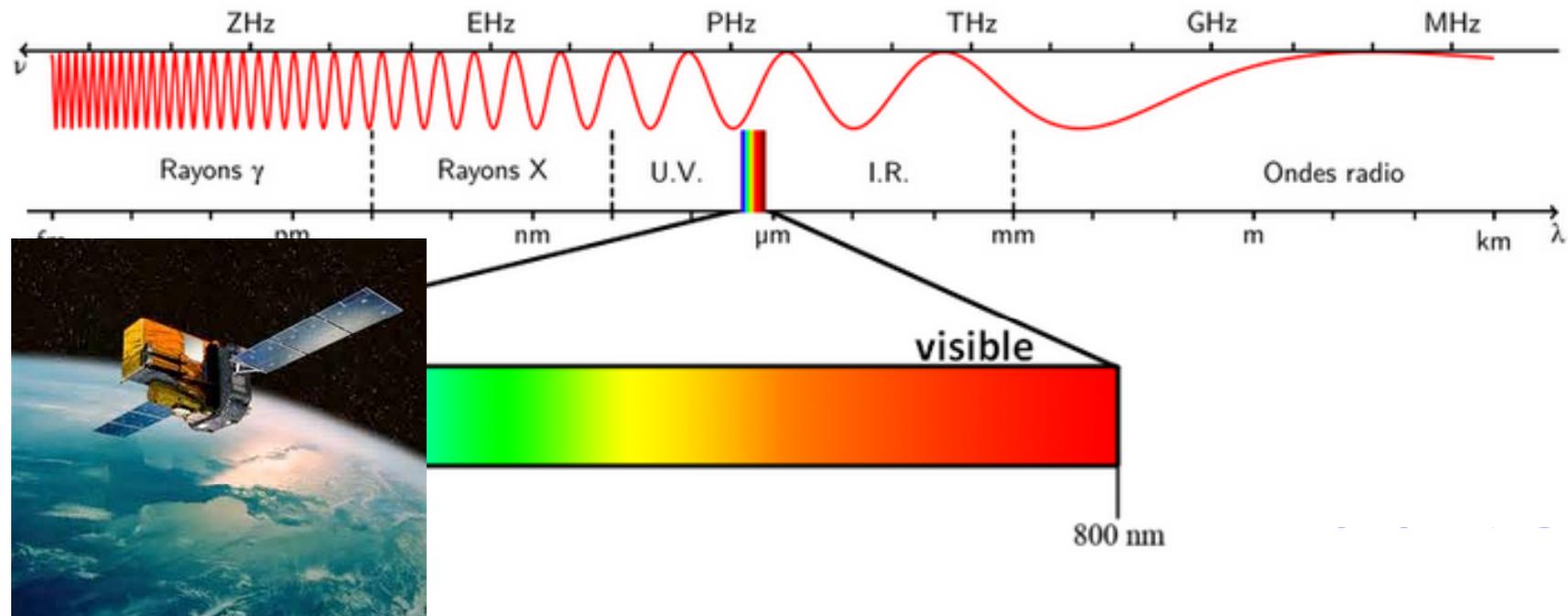
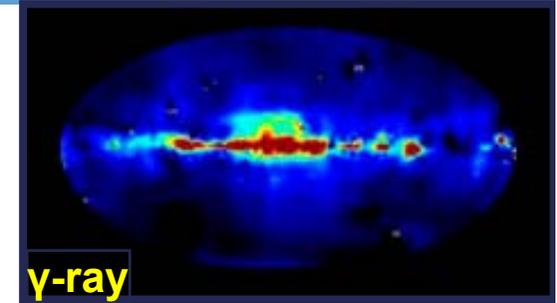
Evolution de l'Astronomie...



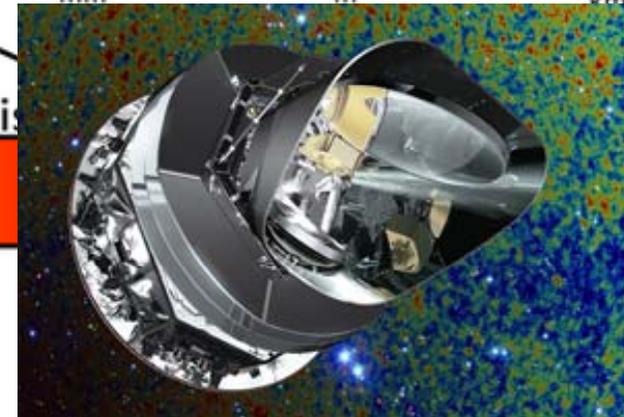
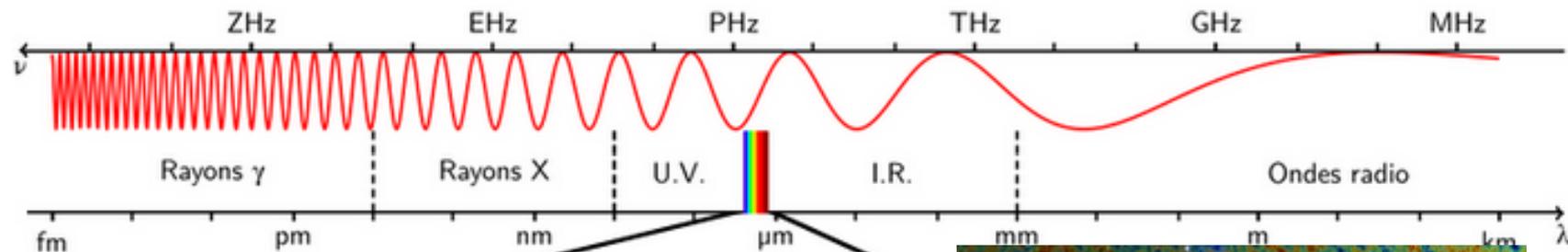
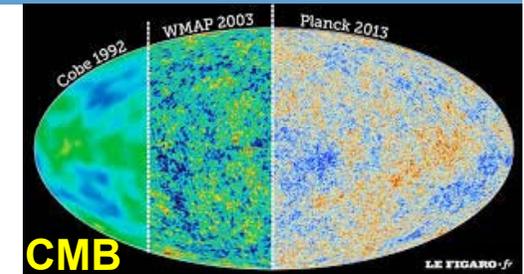
Evolution de l'Astronomie...



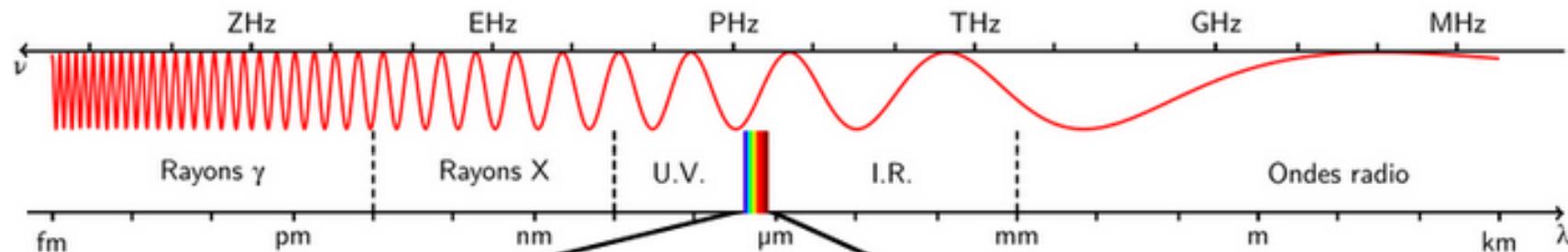
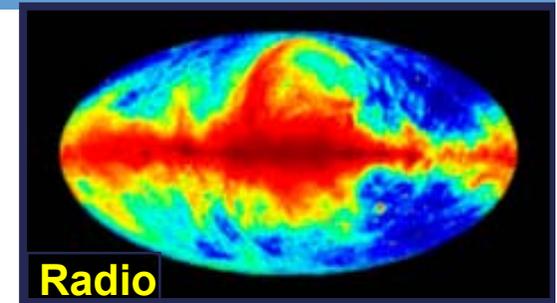
Evolution de l'Astronomie...



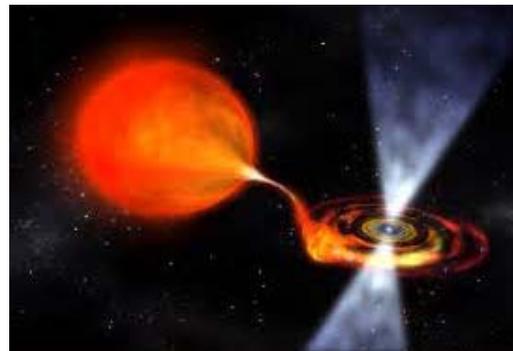
Evolution de l'Astronomie...



Evolution de l'Astronomie...

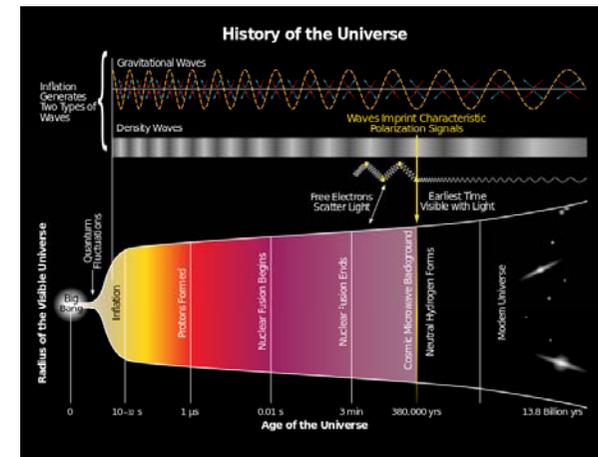
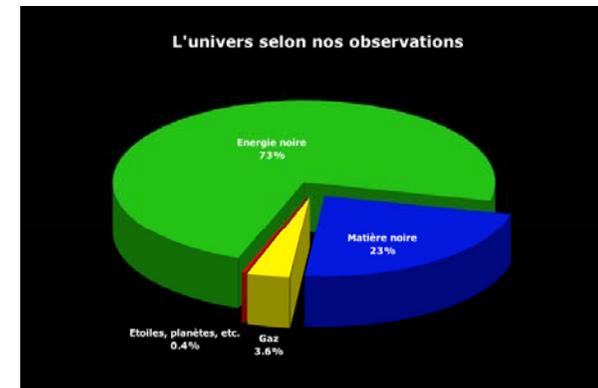


Découverte d'un Univers en perpétuelle évolution...



L'Univers aujourd'hui

- Tout ce que nous connaissons de l'Univers vient des ondes électromagnétiques.
- L'Univers observé représente une faible fraction de son contenu (matière noire, énergie noire)
- Le fond diffus cosmologique 300,000 ans après le Big Bang marque la frontière de l'Univers observable
- Aujourd'hui, une nouvelle fenêtre est en train de s'ouvrir, la fenêtre des ondes gravitationnelles.



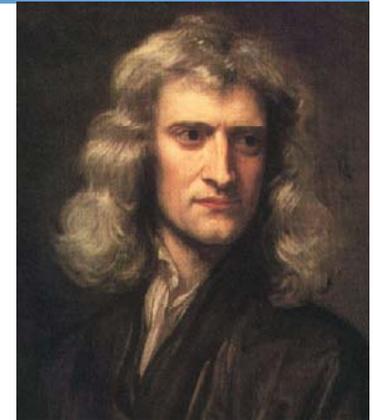
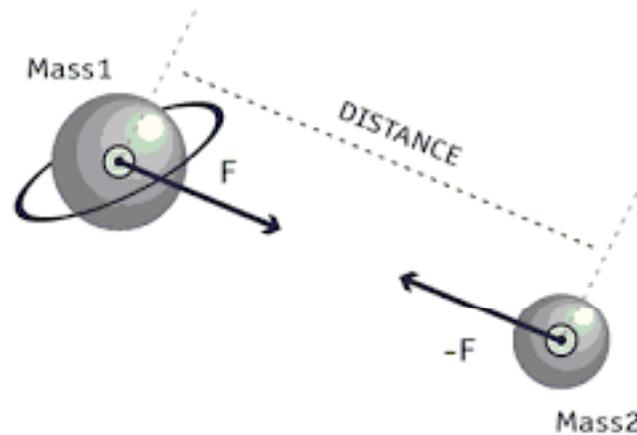
Astronomie des Ondes Gravitationnelles

**ONDES
GRAVITATIONNELLES
??**

Gravitation de Newton (1686)

- Force d'attraction

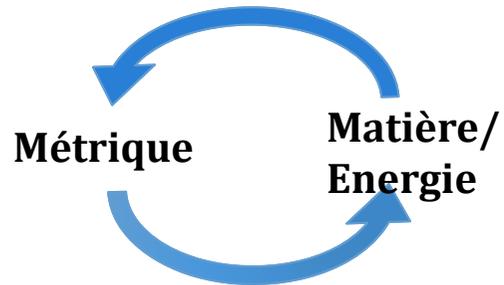
$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$



- Force instantanée à distance
- Explique pourquoi les pommes tombent des arbres
- Explique pourquoi les planètes tournent autour du Soleil

Gravitation d'Einstein (1916)

- Propriété géométrique de l'espace-temps

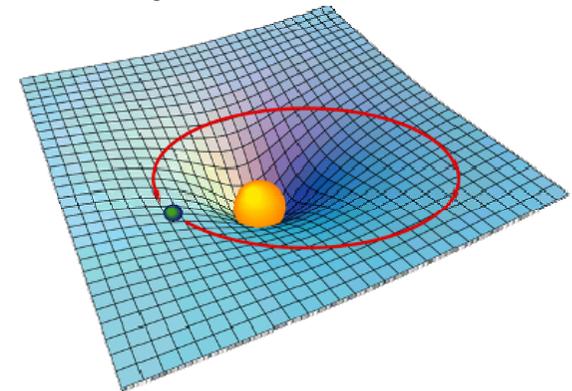


$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ij}$$



- Les planètes ne sont pas attirées par le Soleil par une force mystérieuse mais se déplacent dans l'espace courbé par la masse du Soleil.

“Les masses indiquent à l'espace-temps comment il doit se courber, L'espace-temps indique aux masses comment elles doivent se déplacer.”, John Archibald Wheeler

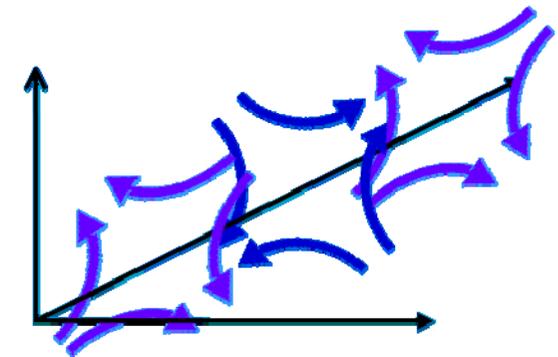
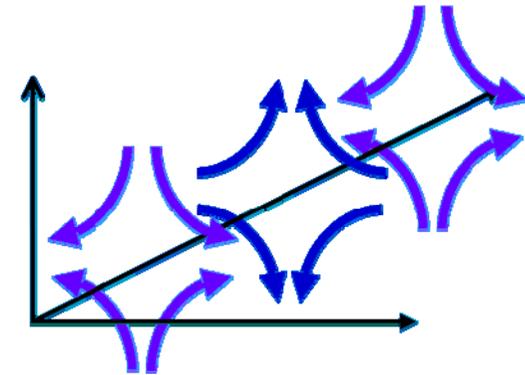


Ondes Gravitationnelles

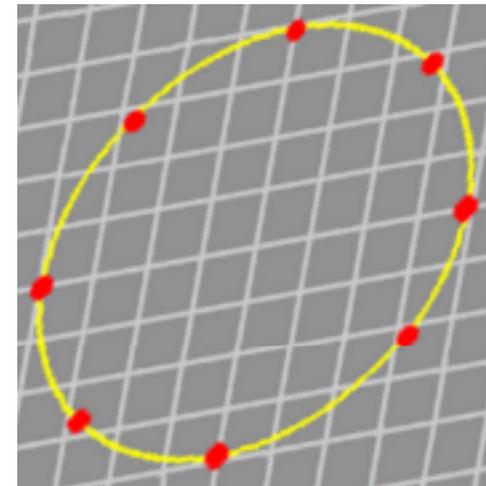
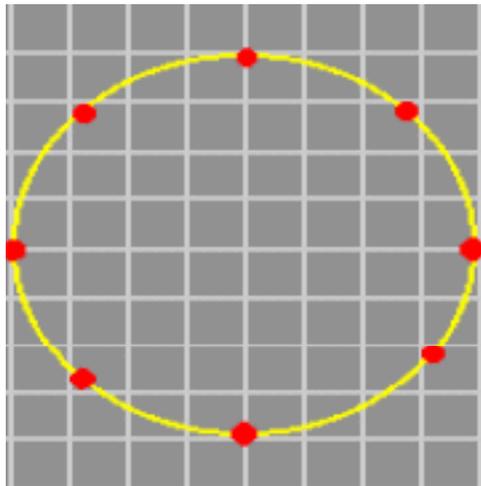
- Les ondes gravitationnelles sont des perturbations de l'espace-temps.
- Quand une masse est accélérée ou change sa configuration, son champ gravitationnel change et l'information se propage vers l'extérieur à la vitesse de la lumière.
- Produites dans des champs gravitationnels forts (étoiles à neutrons, trous noirs)
- Ne sont ni stoppées ni déviées par la matière.
- Elles permettent de sonder l'intérieur des étoiles à neutrons et des trous noirs, et potentiellement de remonter aux premiers instants de l'Univers (ère de Planck)
- Apportent des informations complémentaires aux ondes électromagnétiques. "On entend au lieu de voir"

Effets des ondes gravitationnelles

- Les ondes gravitationnelles modifient la structure de l'espace temps, selon deux polarisations
- Une élongation dans une direction s'accompagne d'une contraction dans la direction perpendiculaire
- Une onde gravitationnelle passant entre deux masses modifie la distance qui les séparent.
- Effets extrêmement faible sur Terre

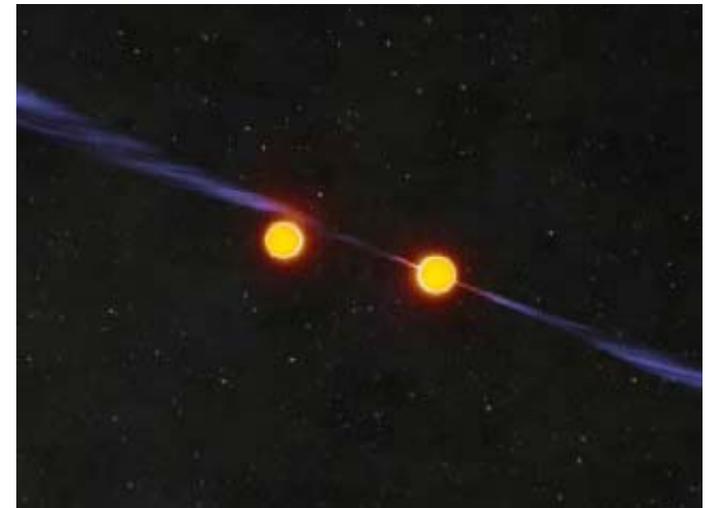


Effets sur un cercle de masses



Preuve observationnelle

- Le système double d'étoile à neutrons PSR B1913+16 découvert par Hulse et Taylor en 1974 avec le radiotélescope d'Arecibo est la première preuve de l'existence d'ondes gravitationnelles (Prix Nobel 1993).
- Le rétrécissement de l'orbite due à l'émission d'ondes gravitationnelles correspond très précisément aux prédictions de la Relativité Générale.
- Le système va fusionner dans environ 300 millions d'années.





Détection des ondes gravitationnelles

- Einstein pensait que ces ondes ne seraient jamais détectées
- barres de Weber (1960-1975)
- barres cryogéniques (1975-2010).
- Interféromètres laser de Michelson (1990-...)
- Antenne spatiale eLISA (ESA): LPF (2015), L2 (2028), L3 (2034)
- Réseaux de pulsars millisecondes
- Cosmic Microwave Background

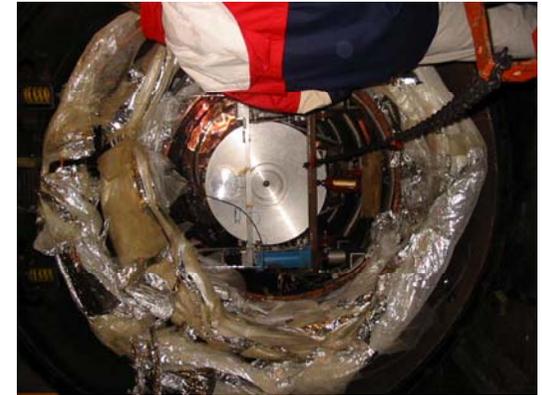
Barres résonnantes de Weber (1960-1975)

- lourd cylindre d'aluminium d'environ 1.5 tonne et 1m de longueur, suspendu par un câble pour isoler des perturbations sismiques
- Le passage d'une onde gravitationnelle induit une différence de longueur de la barre ce qui excite les modes d'oscillation. Le mode fondamental est celui d'un oscillateur harmonique.
- Les oscillations sont transmises à l'aide d'un transducteur, un système qui permet de convertir les déformations mécaniques en signaux électriques et sont ensuite amplifiées.

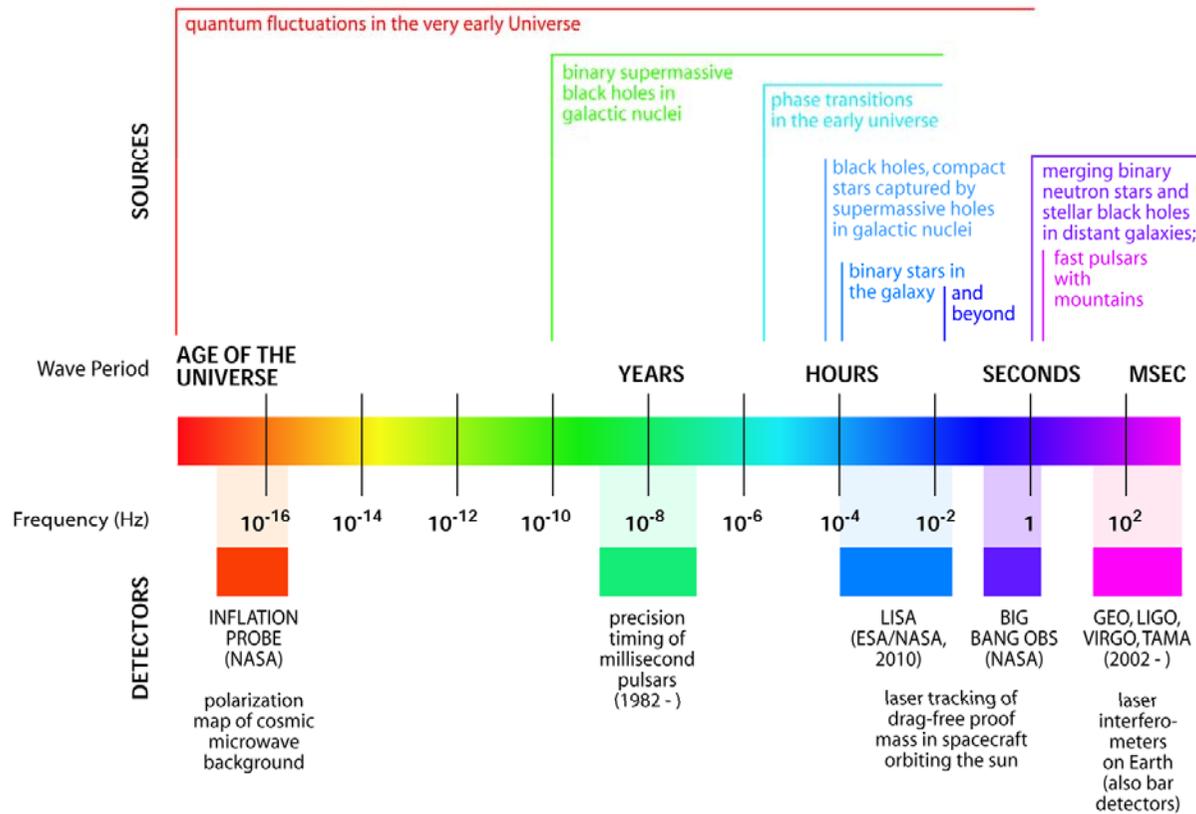


Antennes résonnantes cryogéniques

- 1975-1990 importantes améliorations technologiques
- Cryogéniques = système isolé dans une enceinte refroidie à très basse température, proche de la température de l'hélium liquide $T=4^{\circ}\text{K}$ (jusqu'à 0.1°K pour Nautilus)
- 3ième génération (1990-2010): Allegro (USA), Auriga et Nautilus (Italie), Explorer (Suisse), Niobe (Australie)
- Sphères : Mini-Grail (Pays-Bas) et Schenberg (Brésil)



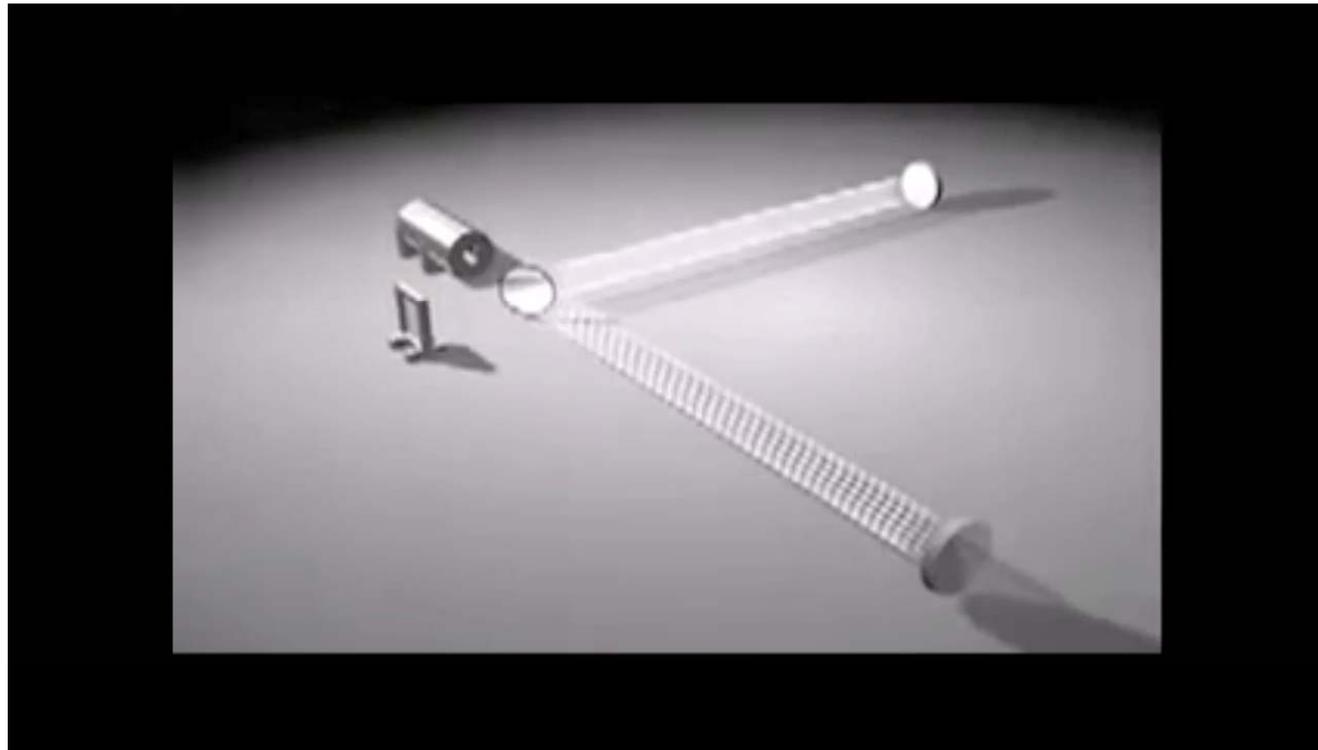
THE GRAVITATIONAL WAVE SPECTRUM



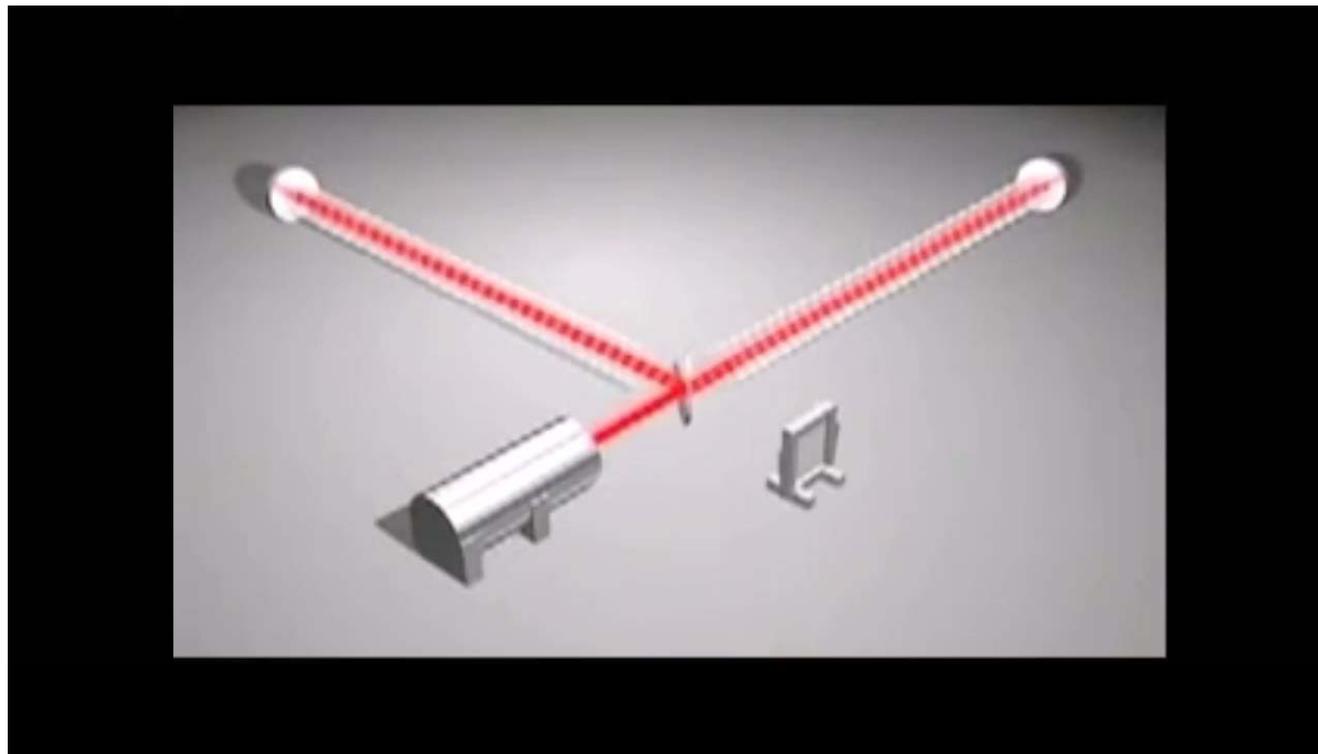
Interférométrie laser

- Un interféromètre mesure de très petites différences de longueur (ou de trajet optique de la lumière) grâce à des lasers et des miroirs.
- L'interférométrie de Michelson a déjà été utilisée en physique, notamment pour l'expérience Michelson/Morley en 1887, qui cherchait à mettre en évidence l'éther et qui a montré la constance de la vitesse de la lumière.
- Dans le cas de la détection des ondes gravitationnelles, il s'agit de mesurer des différences de longueur qui sont causées par leur passage.
- 1962: Gertsenshtein and Pustovoit publient le premier article sur le principe de l'interférométrie laser; 1965: Braginsky publie des travaux sur les sources et leur possible détection avec l'interférométrie laser; 1970: Rainer Weiss commence les premières études expérimentales et montre que le projet est réalisable; 1983: Alain Brillet démarre l'étude de Virgo à Orsay.

Interférométrie laser - Principe



Interférométrie laser - Principe



Malgré quelques accidents de parcours...



1ère Génération (2001-2012)

GEO600

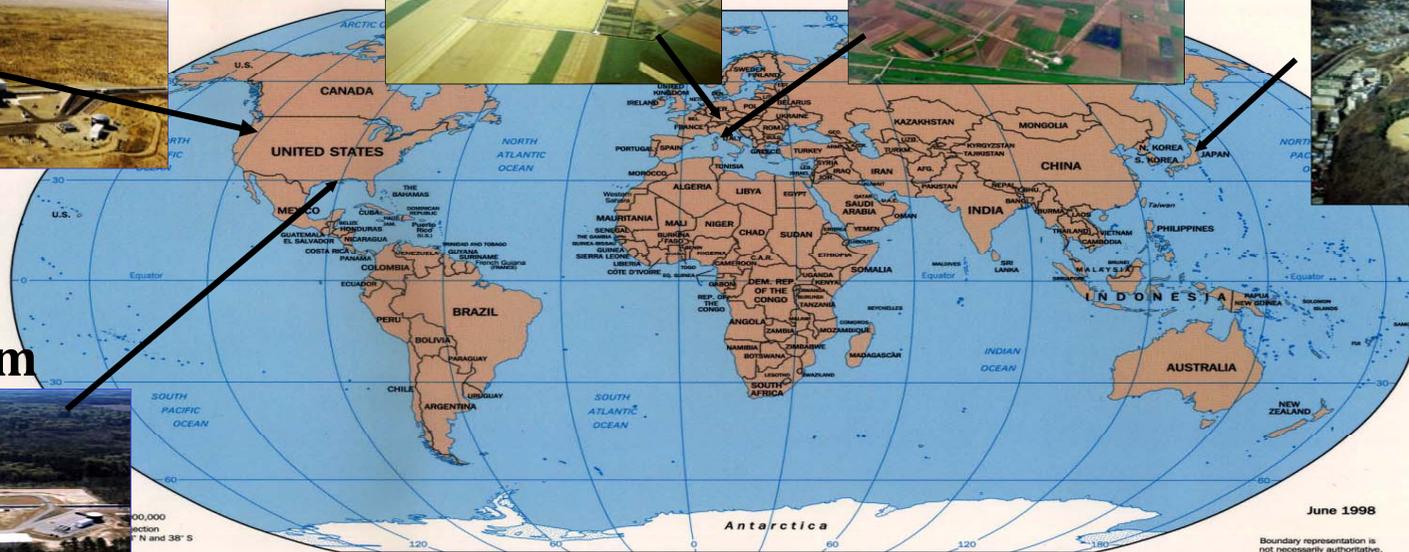
VIRGO 3 km

LIGO 4 & 2 km

TAMA300



LIGO 4 km

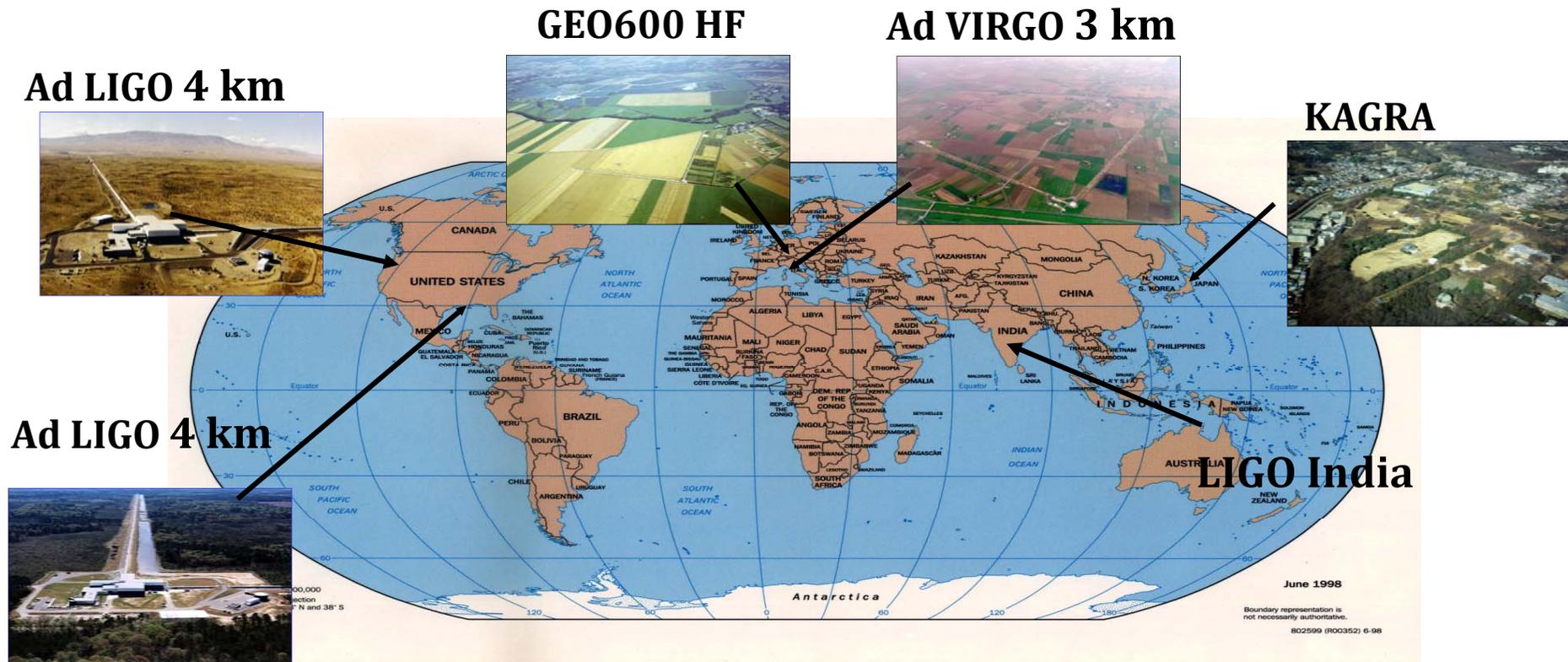


June 1998

Boundary representation is not necessarily authoritative.

802599 (R0352) 6-98

2ième Génération (2015-...)

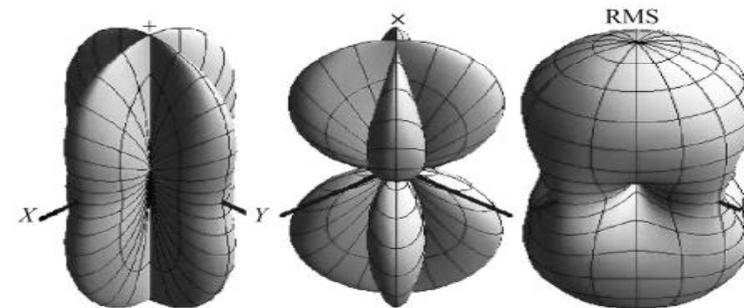
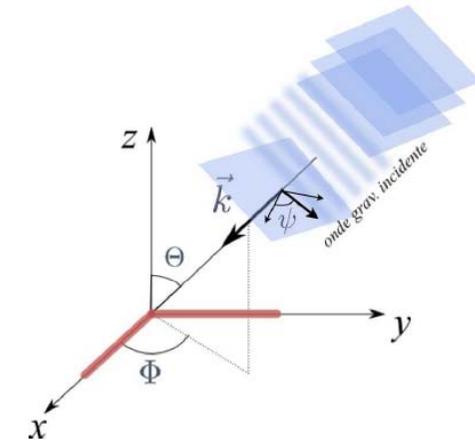


Réponse du détecteur

- Signal gravitationnel en sortie du détecteur

$$h(t; \theta, \varphi, \psi) = h_+(t) F_+(t; \theta, \varphi, \psi) + h_\times(t) F_\times(t; \theta, \varphi, \psi)$$

- Les facteurs d'antenne dépendent de la position de la source
- Optimale pour une source au zénith
- Nulle dans le plan du détecteur à 45° des bras



Sensibilité

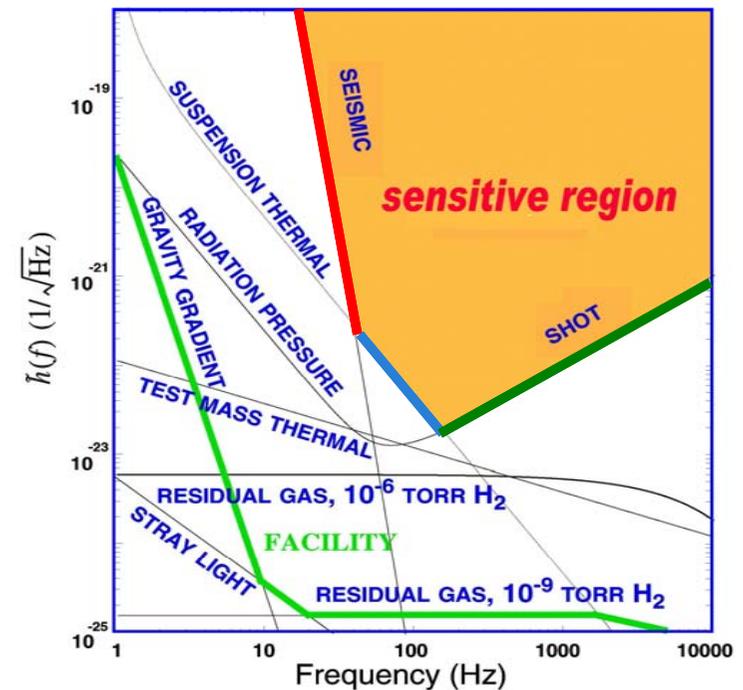
La sensibilité est donnée par l'amplitude équivalente du bruit dans la bande de fréquence

Les principaux bruits qui limitent la sensibilité sont :

Bruit sismique : il est réduit par les suspensions anti-vibration des miroirs.

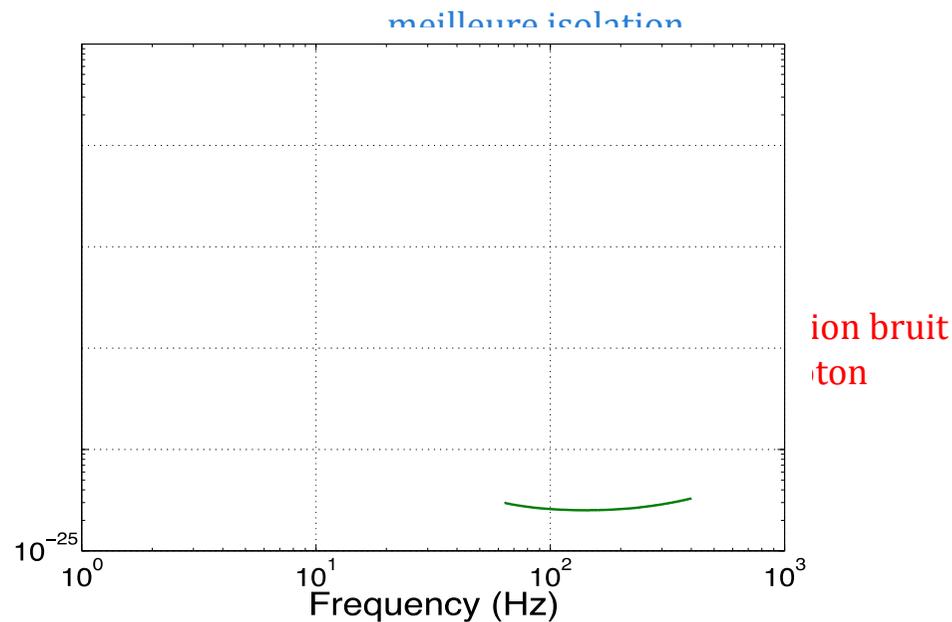
Bruit thermique des suspensions

Bruit de photons : il est dû à la puissance finie du laser.



Evolution de la sensibilité

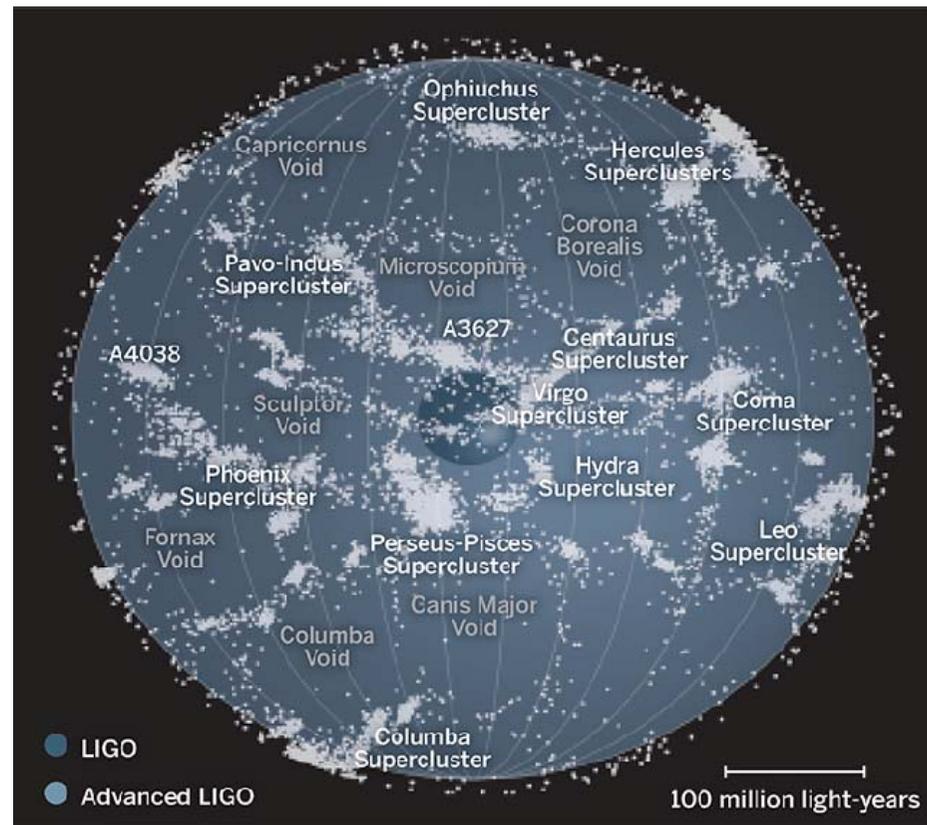
La sensibilité va gagner un facteur 10 d'ici 2018 par rapport à la première génération, correspondant à un volume de détection 1000 fois plus grand.



Subsystem	Virgo	ADV Virgo
Laser Power	20 W	200 W
Input ITF power	7 W	125 W (TBC)
Power on BS	~300 W	~2.9 kW (TBC)
Input mirror transm.	0.12	0.007 (TBC)
End mirror transm.	40 ppm	5 ppm (TBC)
Arm cavity finesse	50	885 (TBD)
SR mirror transm.	none	0.04 (TBD)
Mirror mass	21 kg	42 kg
Mirror diameter	35 cm	35 cm

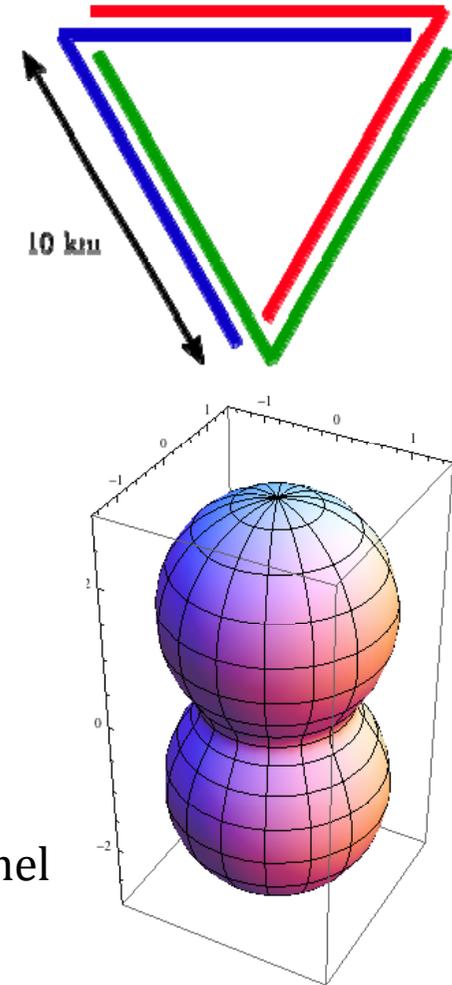
Table 1: The main parameters of the baseline Adv.

Horizon de détection



3ième Génération: Einstein Telescope (~2025)

- Détecteur européen encore à l'étude
- Bras de 10 km (fréquences plus basses)
- Sous terre pour isoler du bruit sismique
- Cryogénique
- Trois détecteurs indépendants en triangle:
 - redondance
 - mesure les deux polarisations
 - sensibilité sur tout le ciel
 - somme des signaux des 3 détecteurs annule le signal gravitationnel



Sources et Méthodes de détection

Sources impulsionnelles (burst) : évènements courts (0.001-1000s), en général assez mal modélisés. On recherche un excès de puissance simultanément dans plusieurs détecteurs.
Supernova, collapse, fusion de systèmes binaires, cordes cosmiques.

Sources périodiques : signal faible mais qui varie très peu pendant la période d'observation. Intégration du signal sur de longues périodes de temps. Recherche aveugle ou dirigée.
Pulsars.

Fond gravitationnel stochastique : superposition de toutes les sources non résolues, d'origine astrophysique ou cosmologique. Corrélation de plusieurs détecteurs pour éliminer le bruit et retrouver le signal gravitationnel commun.

Coalescences de systèmes binaires

Sources périodiques

- Les étoiles à neutrons peuvent émettre des ondes gravitationnelles à différents stades de leurs évolutions soit parce qu'elles tournent, soit parce qu'elles oscillent.
- la rotation triaxiale peut être due à une dissymétrie initiale, des irrégularités de la croûte, un champ magnétique intense, une accréation de matière
- L'amplitude dépend du carré de la période de rotation, de l'inverse de la distance et du carré de la déformation équatoriale

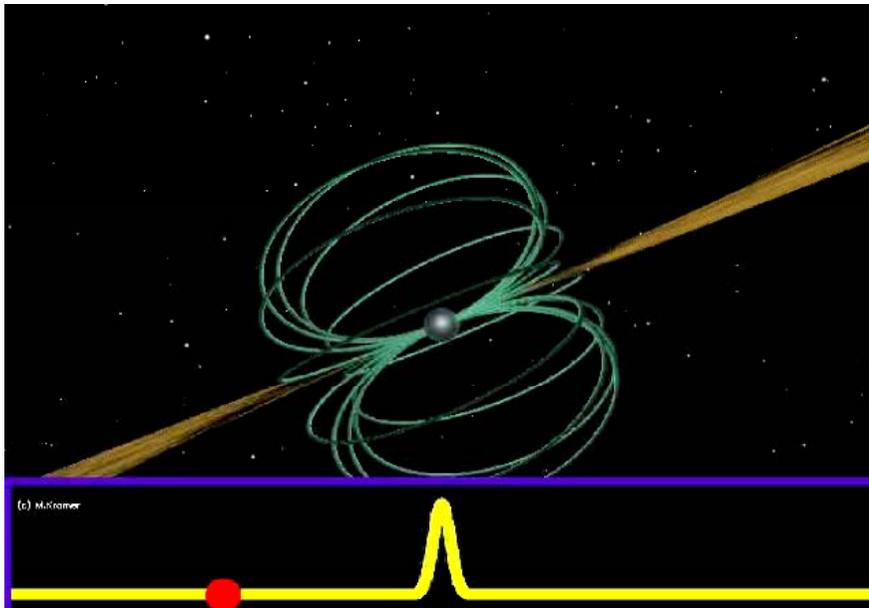
$$h \sim \frac{16\pi^2 G}{c^4} \frac{I_{zz} \varepsilon f_{rot}^2}{d}$$

- La source idéale est proche, tourne vite, est très déformée!

Pulsars

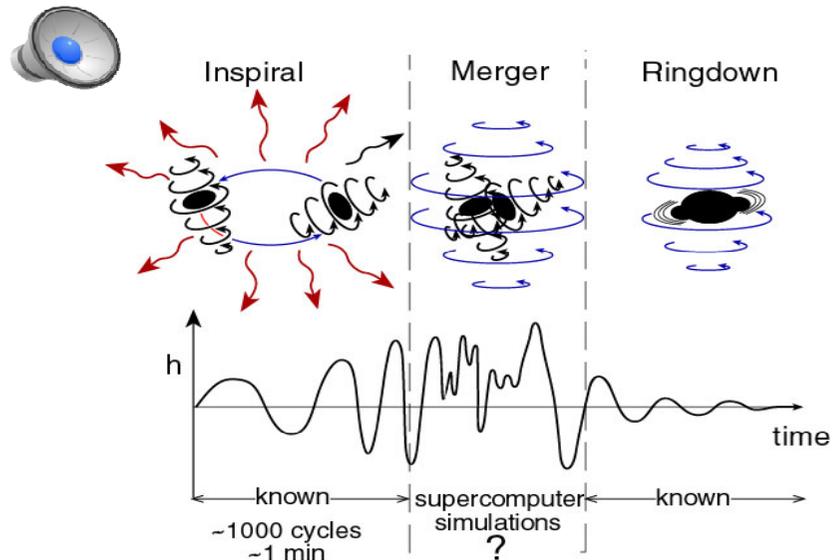
- Pulsars radio normaux:
- Pulsars radio millisecondes:
réaccélérés par accrétion de masse dans un système binaire
- Magnétars
champs magnétique $B > 10^{14}$ G. Observés en X (AXP) et Gamma (SGR). Peuvent avoir été formés par un processus de dynamo dans une proto étoile à neutrons en rotation très rapide (de l'ordre de la ms).

Pulsars

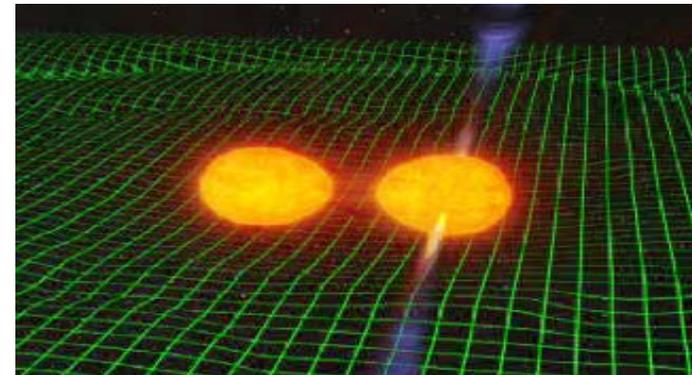
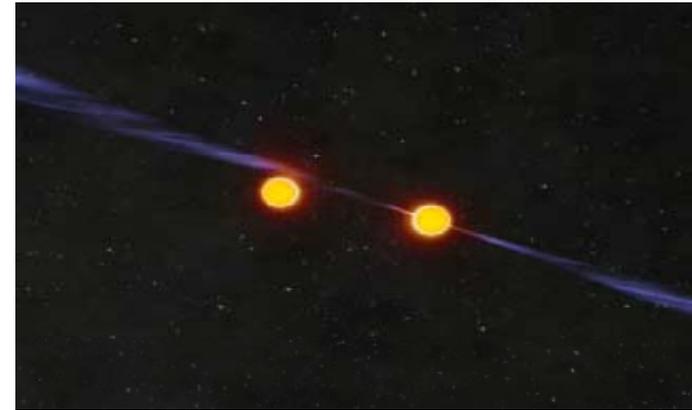


Coalescences de binaires compactes

Les premières sources que l'on s'attend à détecter sont les coalescences de binaires d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Eventuellement en coïncidence avec un sursaut gamma.

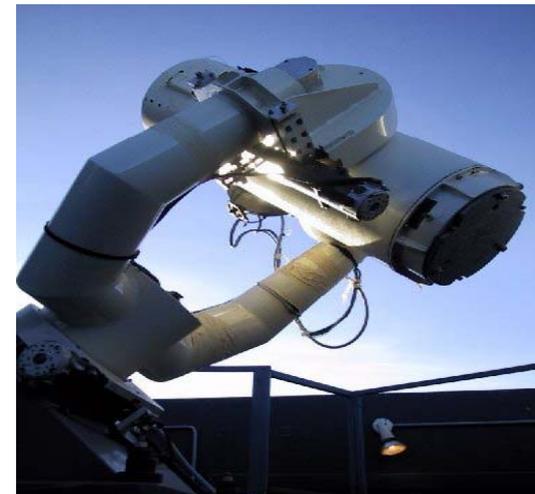
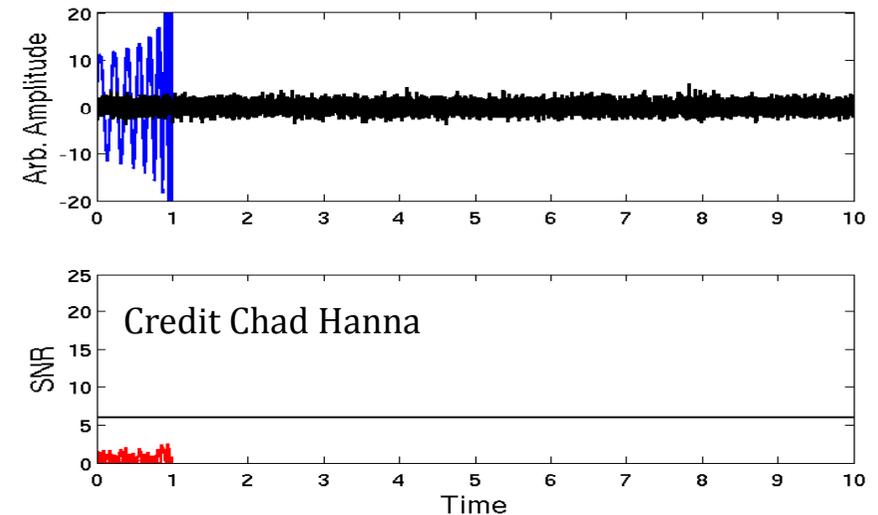


Credit Kipp Thorne

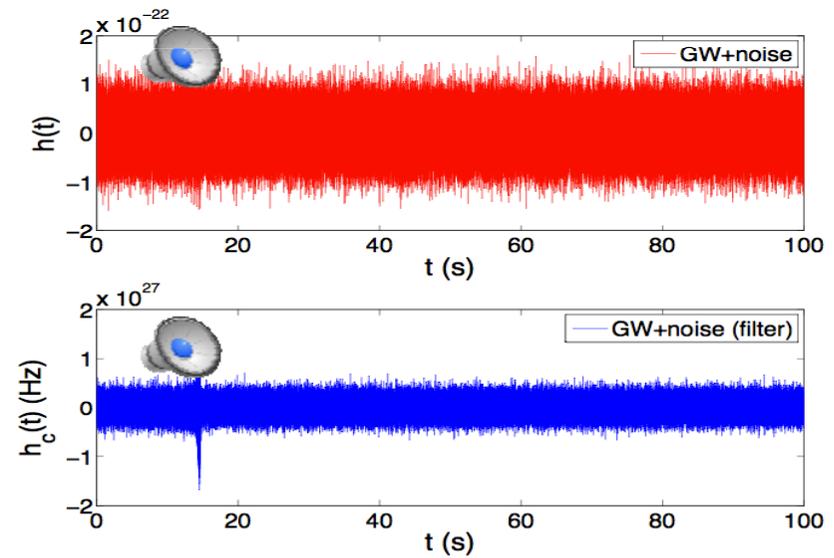
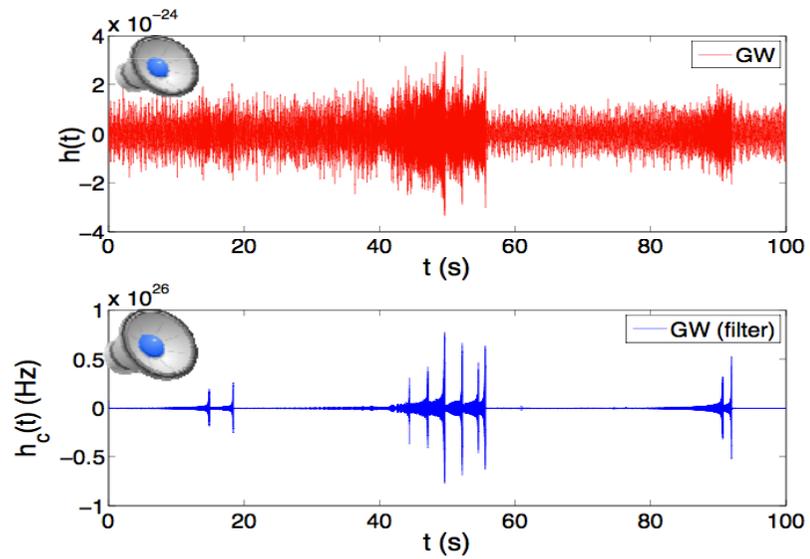


Analyse des données

- Le signal gravitationnel des coalescences de binaires est très bien modélisé pour la phase spiralante et pour les oscillations du trous noir final.
- La méthode de détection optimale est celle du filtre adapté.
- Un signal est retenu comme “candidat” s’il est au moins huit fois au dessus du bruit simultanément dans au moins 2 détecteurs.
- Une “détection” demande beaucoup de vérifications supplémentaires.
- Le cas idéal, une détection en coïncidence avec un sursaut gamma.



Simulations



Potentiel scientifique

La détection de coalescences de binaires aura une incidence considérable en physique fondamentale, en astrophysique et en cosmologie.

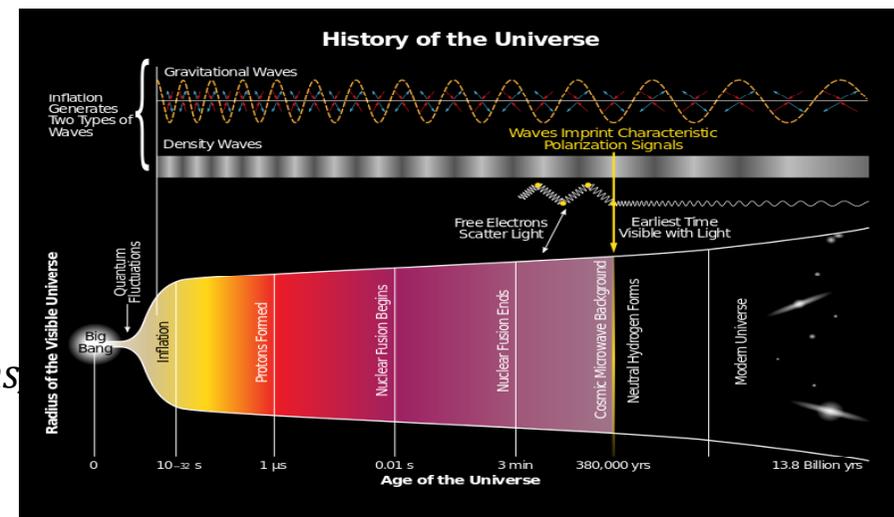
- Tester de la Relativité Générale
- Sonder l'intérieur des étoiles à neutrons (effets de marée)
- Résoudre le mystère des sursauts gamma
- Déterminer la distribution de masse des étoiles à neutrons et des trous noirs et leur évolution.
- Tracer l'histoire de l'Univers
- Contraindre les modèles d'énergie sombre.

Fond stochastique

Le fond gravitationnel stochastique est formé par la superposition d'un grand nombre de sources **non résolues** à différentes époques de l'évolution de l'Univers.

- Cosmologique:
signature de l'Univers primordial
Inflation, cordes cosmiques, transitions de phase
- Astrophysique:
Dépuis le début de l'activité stellaire
Binaires compactes, supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs supermassifs

Complémentaire des détections individuelles proches



Analyse des données

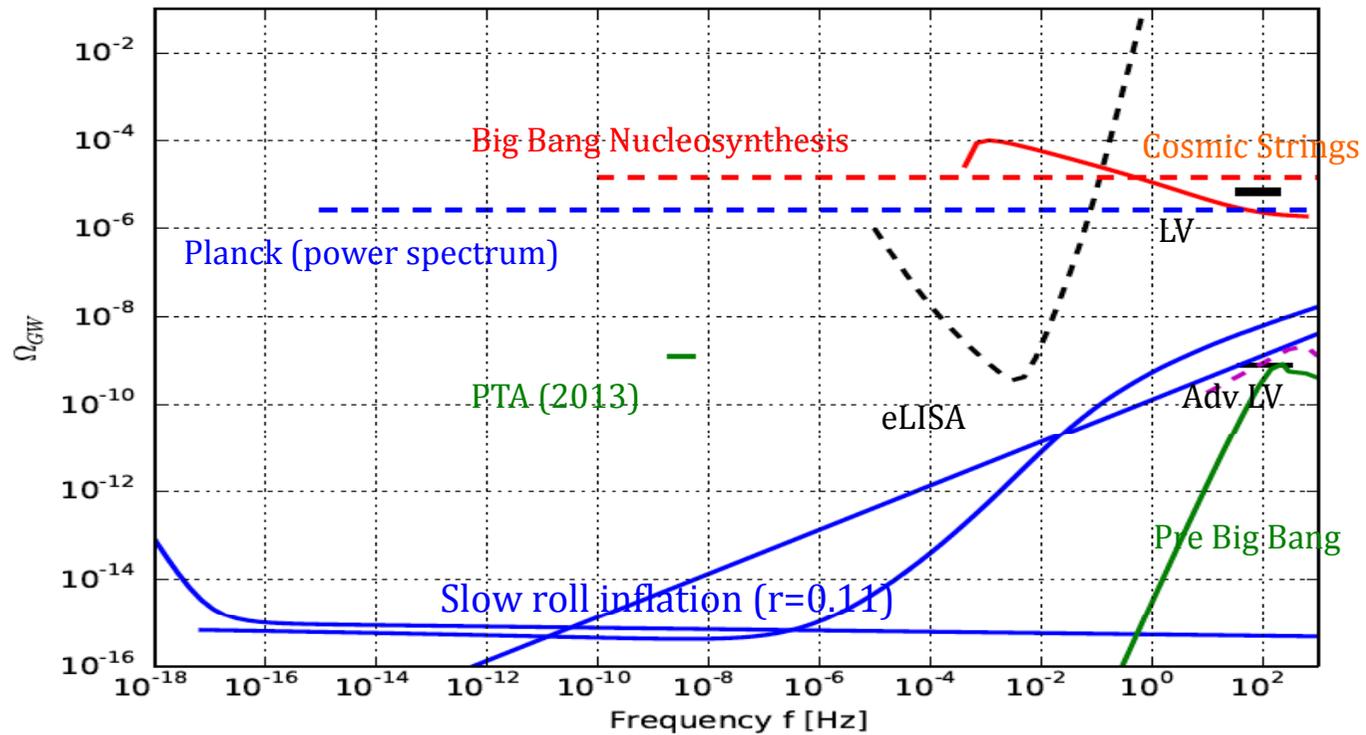
- Paramètre d'énergie gravitationnelle: $\Omega_{gw}(f) = \frac{d\rho_{gw}(f)}{\rho_c d(\ln f)}$
- Le fond stochastique n'est pas différentiable du bruit intrinsèque d'un détecteur
- La méthode optimale consiste à corrélérer entre eux un ou plusieurs détecteurs

$$h_i = s_i + n_i$$

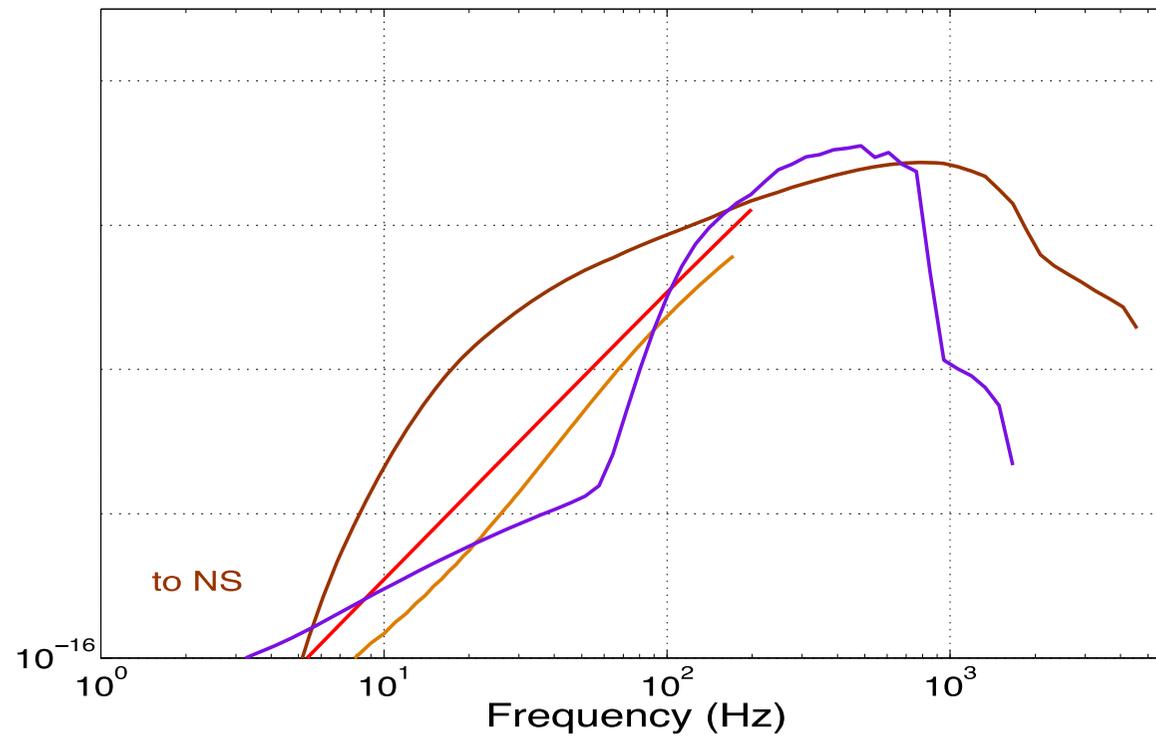
$$\langle h_1 h_2 \rangle = \langle s_1 s_2 \rangle + \underbrace{\langle n_1 n_2 \rangle}_0 + \underbrace{\langle s_1 n_2 \rangle}_0 + \underbrace{\langle n_1 s_2 \rangle}_0$$

- Limites supérieures et futures sensibilités:
 - LIGO/Virgo: $\Omega_{gw} = 5.6 \times 10^{-6}$ in [40-170] Hz
 - Advanced LIGO/Virgo: $\Omega_{gw} \approx 10^{-9}$
 - 3rd generation Einstein Telescope: $\Omega_{gw} \approx 10^{-12}$

Prédictions cosmologiques

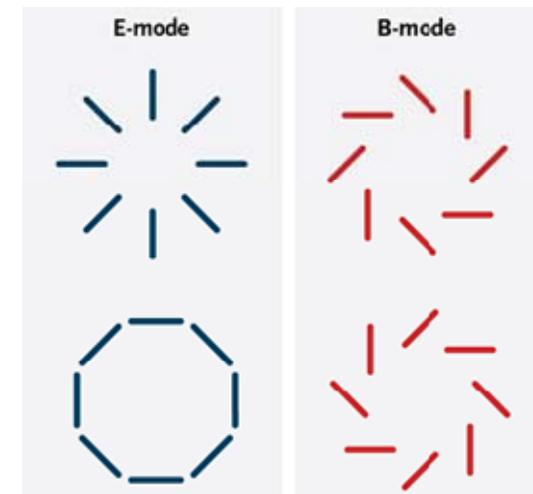
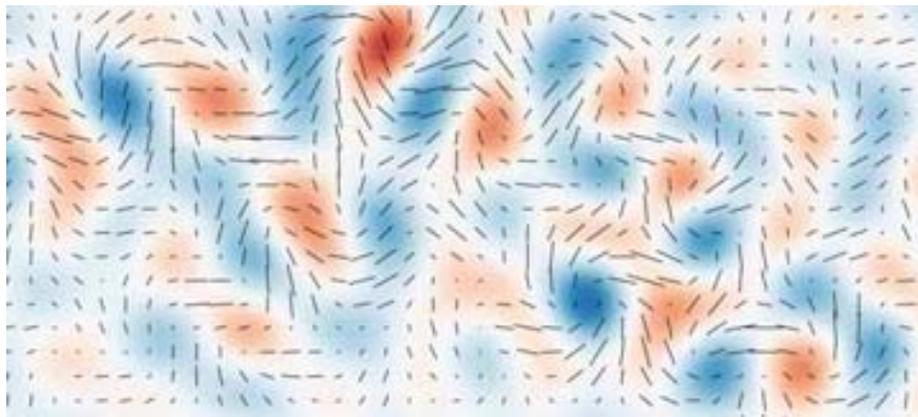


Prédictions astrophysiques



Fond cosmologique et CMB

- Le fond cosmologique laisse une empreinte dans les cartes de polarisation du CMB
- En Mars 2013, Bicep2 annonce leur détection
- Mais ces modes B étaient dus à de la poussière galactique
- Nouvelles expériences capables de gagner rapidement en sensibilité, notamment les projets spatiaux.



Ondes Gravitationnelles: une nouvelle fenêtre sur l'Univers

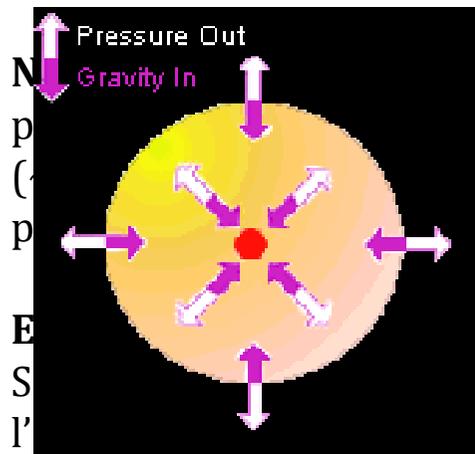




EXTRA

Les Objets Compacts

Les objets compacts sont le stade ultime de l'évolution stellaire, lorsque l'étoile a épuisé tout son combustible nucléaire et que la pression de radiation ne compense plus la gravitation.

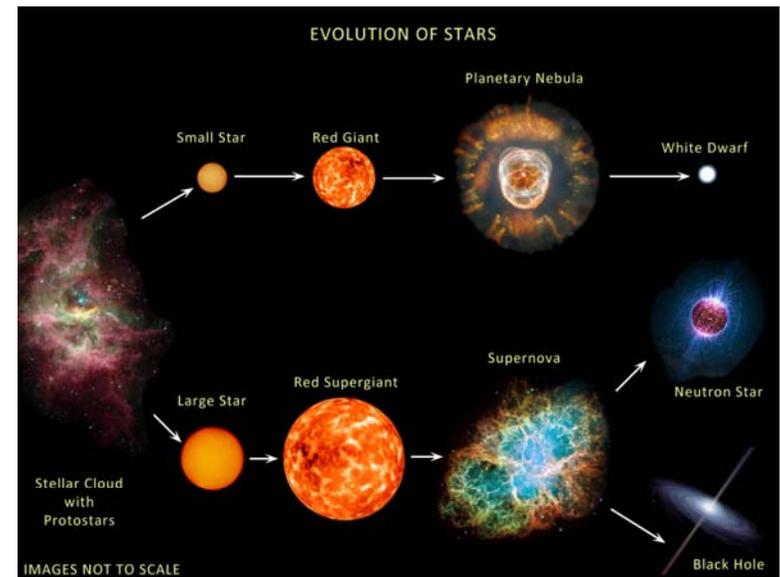


Une étoile de masse intermédiaire comme le Soleil est maintenue en équilibre hydrostatique par la pression de radiation et la pression des électrons.

Une étoile plus massive que la limite de Chandrasekhar, son équilibre est assuré par la pression de dégénérescence des neutrons.

Trou Noirs :

Pour les étoiles les plus massive $M > 25-40$, rien ne peut compenser le collapse.



Compacité

Objet	Masse M (M_{\odot})	Rayon R (km)	Densité (kg/m ³)	Compacité X
Proton	1.66e-27 kg	1e-18	5e17	1e-39
Terre	3e-6	6e3	5e3	1e-10
Soleil	1	7e5	1e3	1e-6
Naine Blanche	0.1-1.4	~1e4	~1e10	1e-4-1e-3
Etoile aNeutrons	~1-3	~10	~1e18	~0.2
Trous noirs	>3	9	0	0.5