

100 ans après Einstein, les ondes gravitationnelles

La Gravitation: La plus mystérieuse des interactions fondamentales

A. PAVLIN, Août 2016

La gravitation

Interaction	Particule d'échange	Type	Physique
Nucléaire forte	Gluons	Champ quantique	Quantique
Nucléaire faible	Bosons intermédiaires W^+, W^- et Z^0	Champ quantique	Quantique
Electromagnétique	Photons	Champ quantique	Quantique
Gravitationnelle	(Graviton)?	Courbure locale d'espace-temps	Relativité générale

La gravitation

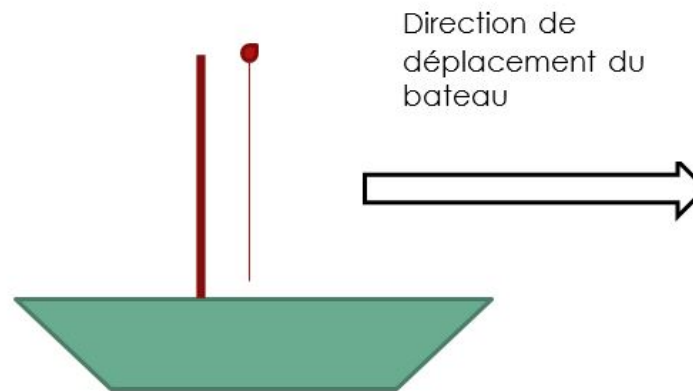
- La gravitation est la plus faible et la moins bien connue de toutes les interactions fondamentales (L'attraction gravitationnelle entre un proton et un électron est 2.3×10^{-39} fois plus faible que l'attraction électrostatique)
- Elle est modélisée dans le cadre d'une théorie différente et incompatible avec la théorie quantique des champs régissant les trois autres interactions fondamentales
- Elle est l'interaction fondamentale dominante à grande échelle et fait partie de notre expérience quotidienne
- Elle joue un rôle prépondérant dans l'histoire et l'évolution de l'Univers

L'évolution des concepts de l'interaction gravitationnelle

Galilée et la chute des corps



- Principe de relativité galiléen « Le mouvement uniforme est comme rien »
 - Fin de l'argument d'Aristote pour une Terre immobile
 - Principe d'inertie: Un corps soumis à aucune force se déplace indéfiniment en ligne droite à vitesse constante



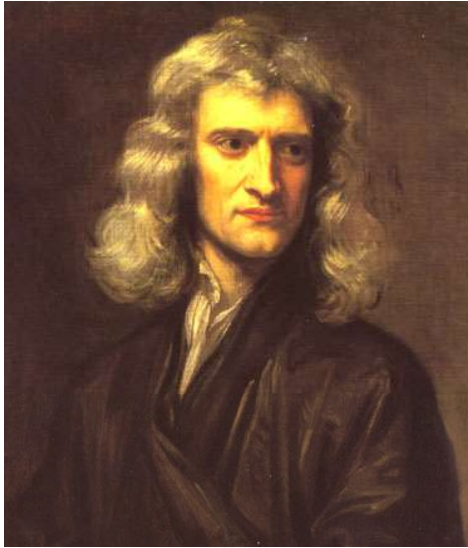
Galilée et la chute des corps



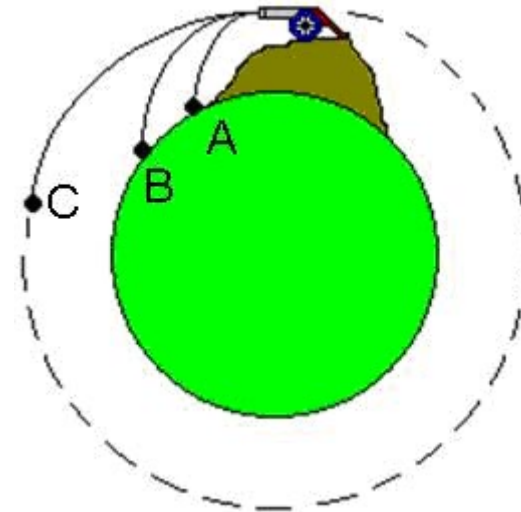
- L'inertie est représentée par la masse=quantité de matière
- Expériences de chute sur plans inclinés:
 - Universalité de la chute des corps
 - Mouvement uniformément accéléré



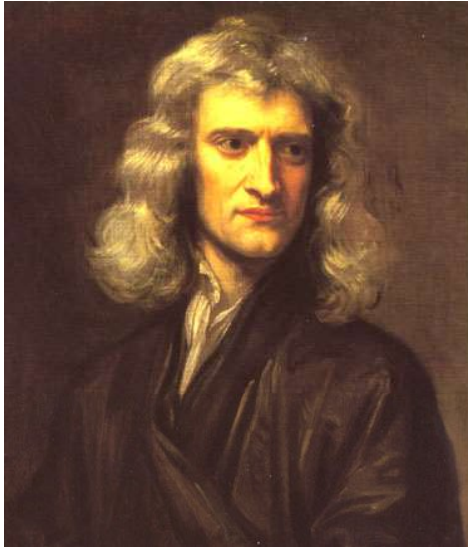
Newton et la chute de la Lune



- Le canon de Newton:
 - Une pierre lancée à 1m/s d'une hauteur de 5m \Rightarrow Durée de chute 1s , tombe 1m devant le lanceur
 - Un boulet lancé horizontalement à 7.9km/s se satellise

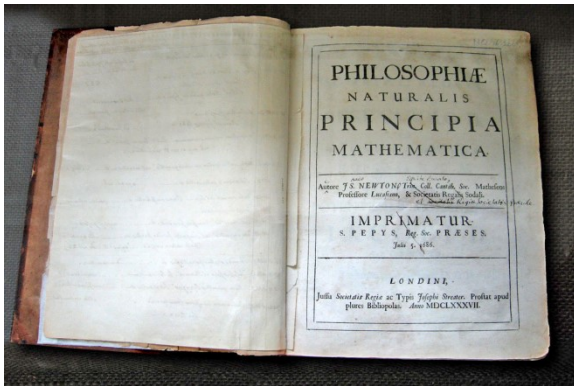
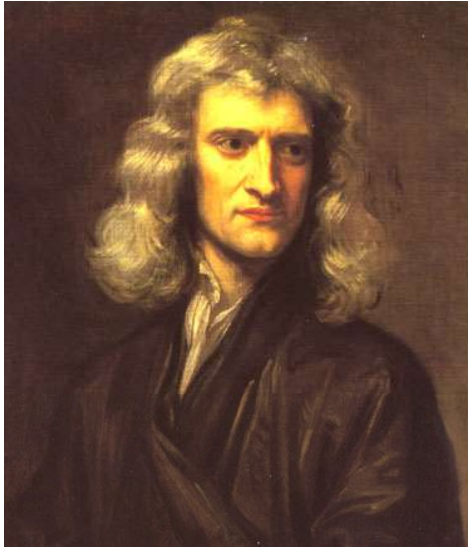


Newton et la chute de la Lune



- Extension aux corps célestes:
 - La Lune tombe sur la Terre comme la pomme ou le boulet de canon
 - De même la Terre tombe sur le Soleil
 - La force de « pesanteur » est en fait une force universelle, la force de gravitation qui s'exerce partout dans l'Univers

Newton et la chute de la Lune



- Formulation mathématique:
 - Newton démontre la forme mathématique de cette interaction : $F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / d^2$ (*Principia mathematica philosophiæ naturalis* en 1687)
 - A l'aide de cette loi, il redémontre les 3 lois empiriques de Kepler
 - La prédiction du retour de la comète de Halley vient consacrer la théorie
- Newton souligne l'absurdité d'une interaction à distance instantanée dans le vide sans lien physique entre les objets

Einstein, l'espace et le temps



- Ole Rømer (1676):
 - La vitesse de la lumière est finie
- James Clerk Maxwell (1864):
 - Théorie de l'électromagnétisme. La vitesse c des ondes électromagnétiques ne dépend que du milieu



$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \cdot \mu_0}}$$

Einstein, l'espace et le temps



- Albert Einstein (1905):
 - Relativité Restreinte: Extension de la relativité galiléenne
 - La mesure de c est constante dans tout repère galiléen
 - Aucun objet, information ou interaction ne peut se propager plus vite que la lumière
 - Espace et temps sont relatifs à l'observateur, seule la distance d'évènement $c^2*t^2 - d^2$ est constante
 - Concept d'espace-temps

Einstein, l'espace et le temps

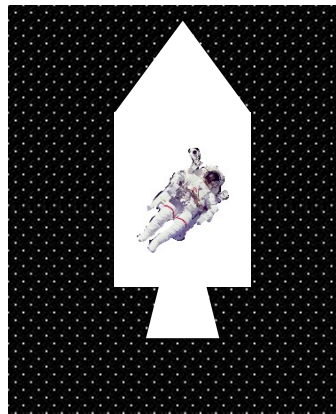


- Albert Einstein (1905):
 - Equivalence masse/énergie : $E=m*c^2$
 - Une masse d'1kg = $9*10^{16}$ J
 - Une quantité d'énergie de $9*10^{16}$ J pèse 1kg
 - Un corps en mouvement a une masse supérieure à sa masse au repos
 - Un corps chaud a une masse supérieure à sa masse au repos
 - La masse totale n'est pas conservée dans une réaction. Elle peut être transformée en énergie.
 - Une quantité d'énergie suffisante peut permettre la création de particules

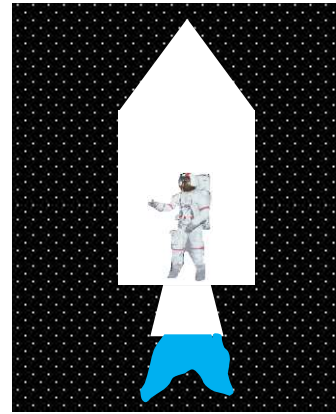
Einstein, l'espace et le temps



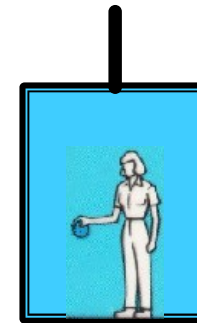
- Albert Einstein (1915):
 - Principe d'équivalence:
 - Les situations a. et d. sont équivalentes
 - Les situations b. et c. sont équivalentes
 - Aucune expérience ne permet de distinguer un repère accéléré d'un repère immobile dans un champs de gravitation
 - Conséquence: Courbure des rayons lumineux dans un champs de gravitation



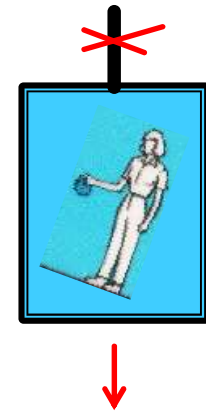
a. Fusée dans l'espace sans accélération



b. Fusée dans l'espace accélérant



c. Ascenseur sur Terre immobile



d. Ascenseur sur Terre en chute libre

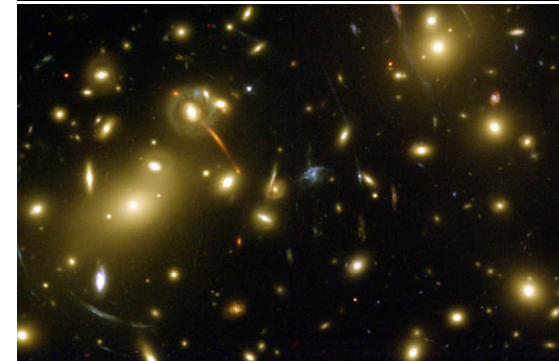
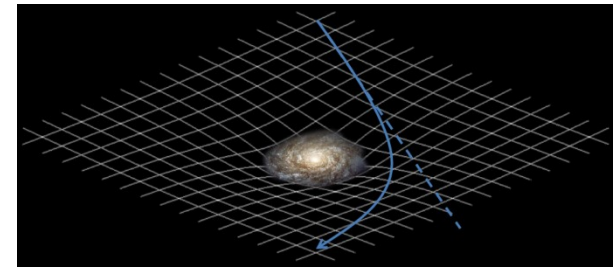
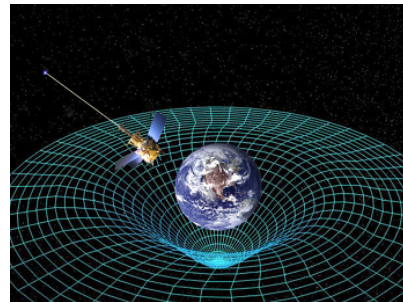
L'espace temps mollusque ...



- Albert Einstein (1915):
 - La densité locale d'énergie/masse courbe l'espace-temps
 - La courbure locale d'espace-temps est le champ de gravitation
 - Une masse en chute libre se meut suivant une géodésique de l'espace-temps
 - Aucune « action à distance » ou « lien » entre deux corps n'est nécessaire pour expliquer l'interaction gravitationnelle



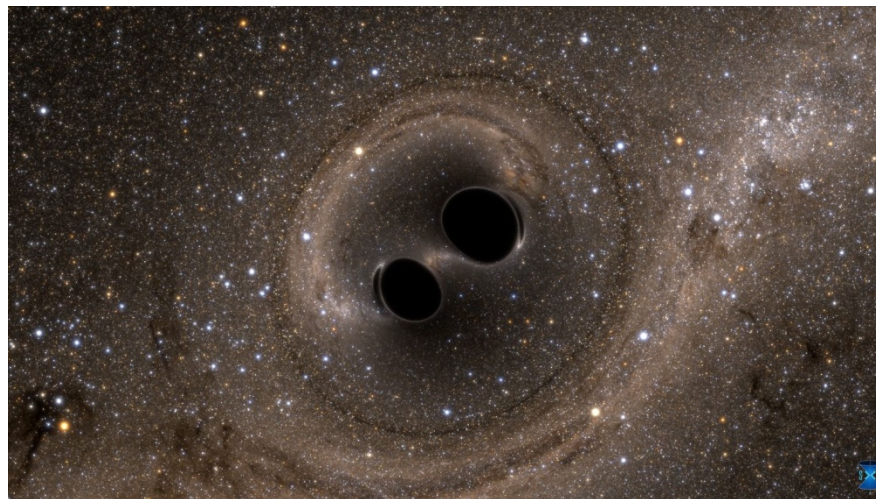
- Un espace courbe à 2 dimensions: Circonférence du cercle $< 2 * \pi * r$
- Un espace courbe à 3 dimensions: Surface sphère $< 4 * \pi * r^2$



L'espace temps mollusque ...

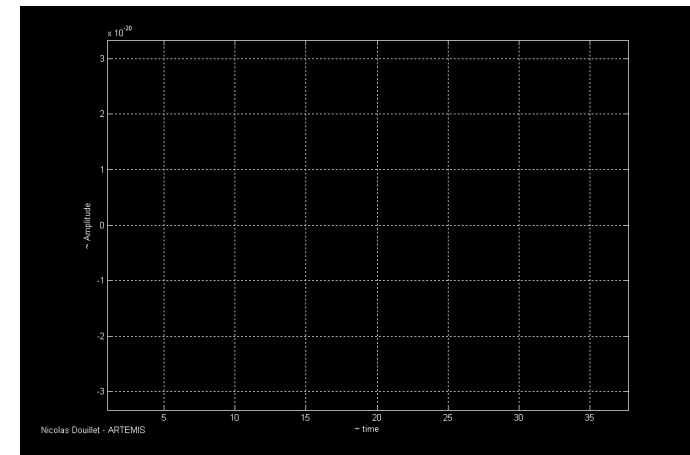
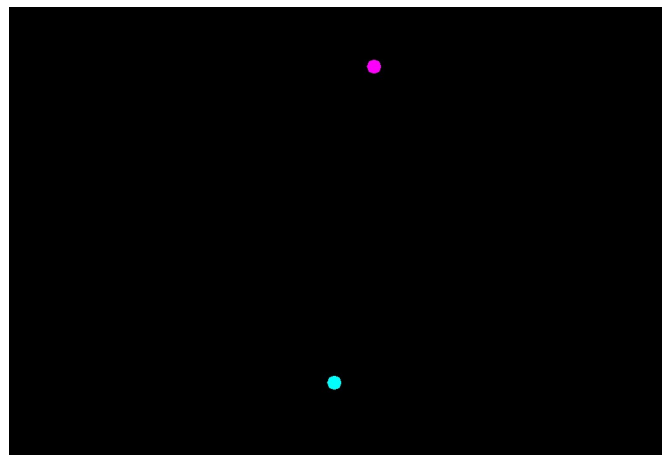
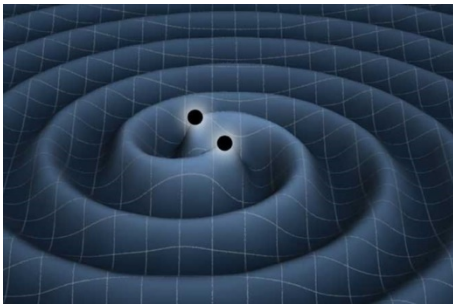


- Albert Einstein (1915):
 - Application de la Relativité Générale à l'Univers entier: Naissance de la cosmologie moderne
 - Prédiction de l'existence de trous noirs
 - Les variations de la courbure locale d'espace-temps doivent se propager à la vitesse c dans toutes les directions sous forme **d'ondes gravitationnelles**
 - Plus tard: modèles cosmologiques, matière noire, énergie sombre et inflation cosmologique



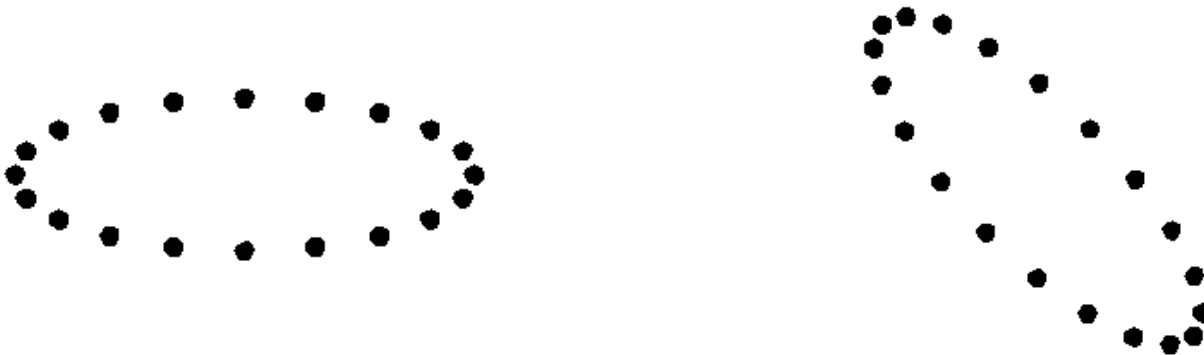
Les ondes gravitationnelles

- Champs électromagnétique en déplacement= onde électromagnétique
- Champ gravitationnel en mouvement=onde gravitationnelle
- Onde gravitationnelle émise chaque fois qu'une masse se déplace. Observable uniquement pour des masses importantes.
- Perte d'énergie=> trajectoire en spirale avant fusion des deux corps



Les ondes gravitationnelles

- Due à la variation du moment quadrupolaire Q : Un système à symétrie sphérique ou cylindrique n'émet pas d'onde gravitationnelle. Meilleur émetteur: Système d'haltères
- Amplitude dL/L : 10^{-21} à 10^{-24}
 - $h(t,r)=2G/(c^4*r)*d^2Q(t-r/c)/dt^2$
 - Déplacement de la taille d'un proton pour 1000km à 1 million de km
 - Très faible couplage avec la matière => Très peu affectées par les masses « traversées »
- Deux polarisations d'onde: Déformation du cercle perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde suivant diamètre vertical/horizontal (onde +) ou suivant diagonales à 45° (onde x)



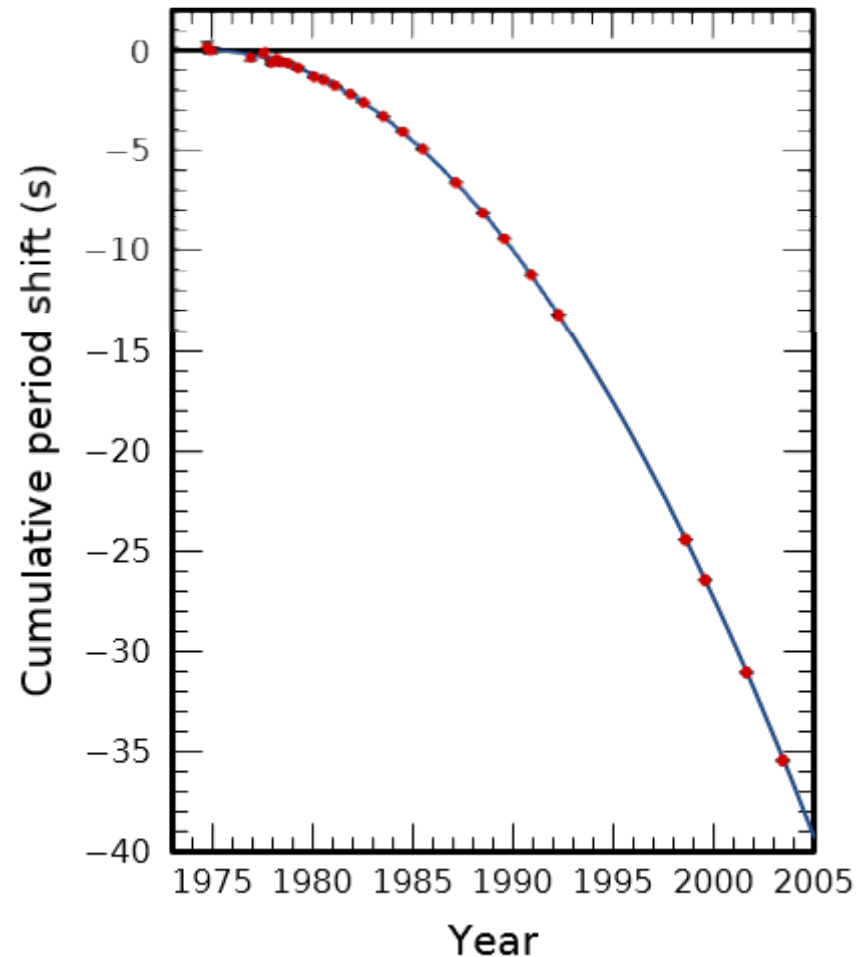
Détection des ondes gravitationnelles

- Premier détecteur: Barre de Weber ((Joseph Weber 1969 Université du Maryland)
- Cylindre en aluminium entouré de détecteurs piézoélectriques, devrait résonner lors du passage d'une onde gravitationnelle
- Détection de plusieurs évènements en provenance du centre galactique, aucune confirmée
- Difficultés: Elimination des bruits sismiques ou parasites
- Plusieurs installations améliorées (isolation, cryogénie) encore en service
- Pas de détection



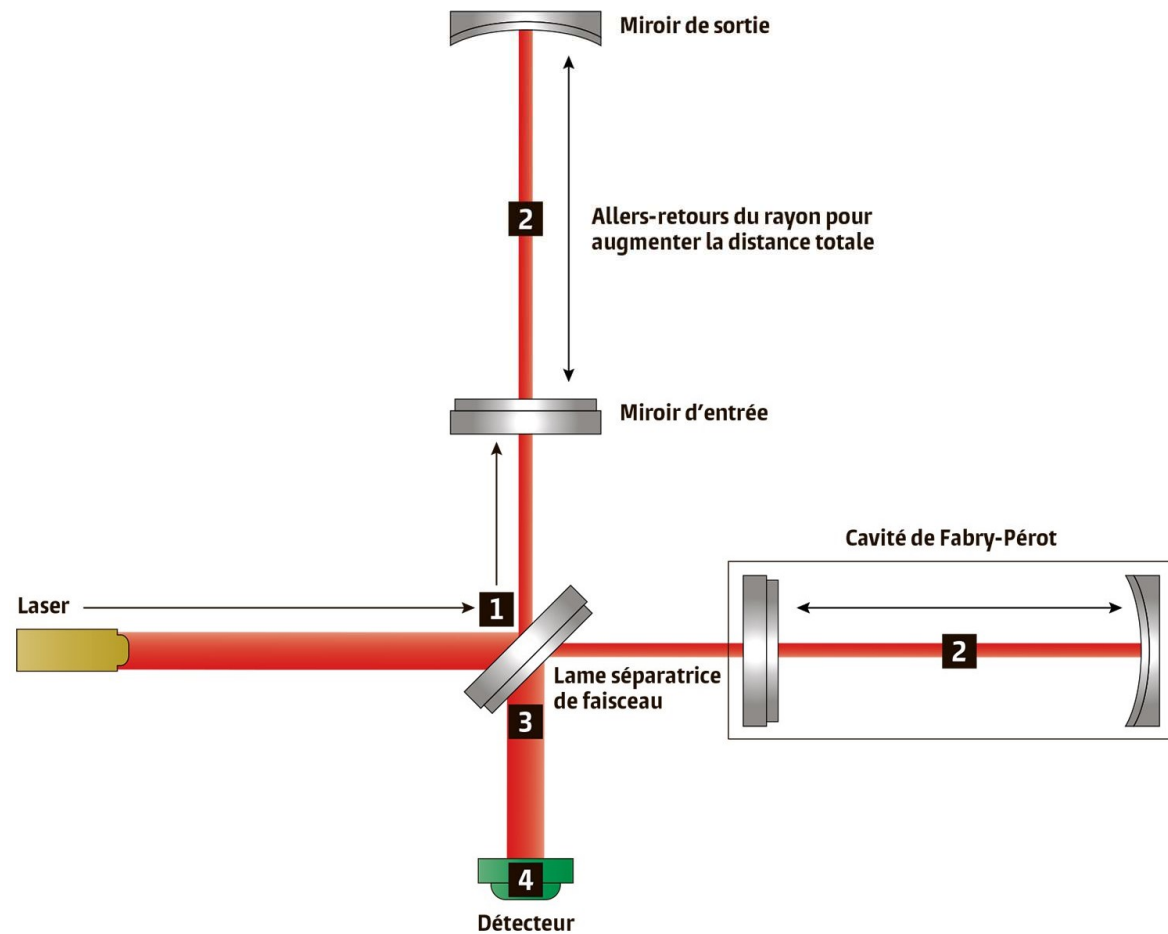
Détection des ondes gravitationnelles

- Etude de la période du pulsar binaire PSR B1913+16, découvert en 1974 (7,75h), par Russell Hulse et Joseph Taylor sur 8 ans
- Décroissance de la période orbitale exactement conforme aux prédictions de la Relativité Générale
- Prix Nobel de physique en 1993
- Le pulsar et l'étoile à neutrons devraient entrer en collision dans 300ans.



Détection des ondes gravitationnelles

- Détecteurs interférométriques
- Utilise le déplacement des franges d'interférence entre deux faisceaux laser



Détection des ondes gravitationnelles

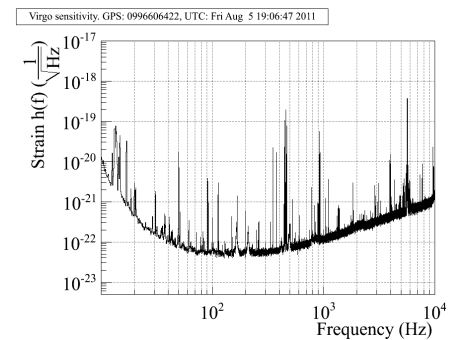
- Interféromètres LIGO (Hanford, USA et Livingston USA)
- Interféromètre VIRGO (Italie)



LIGO Hanford

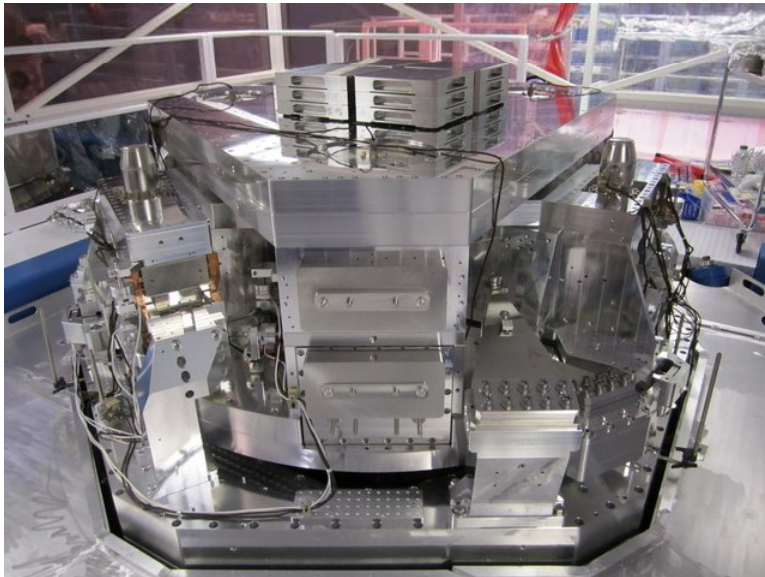


VIRGO (Italie)

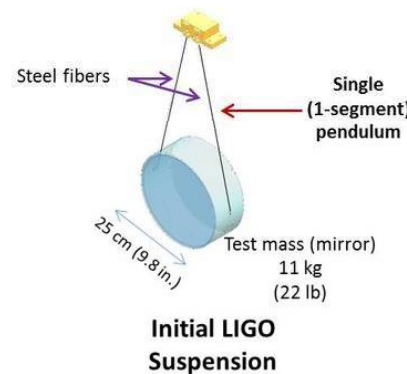


Détection des ondes gravitationnelles

- Difficulté: Elimination des bruits parasites pour améliorer le rapport signal/bruit (bruits sismiques, circulation routière,...)



Système de filtrage actif des bruits sismiques

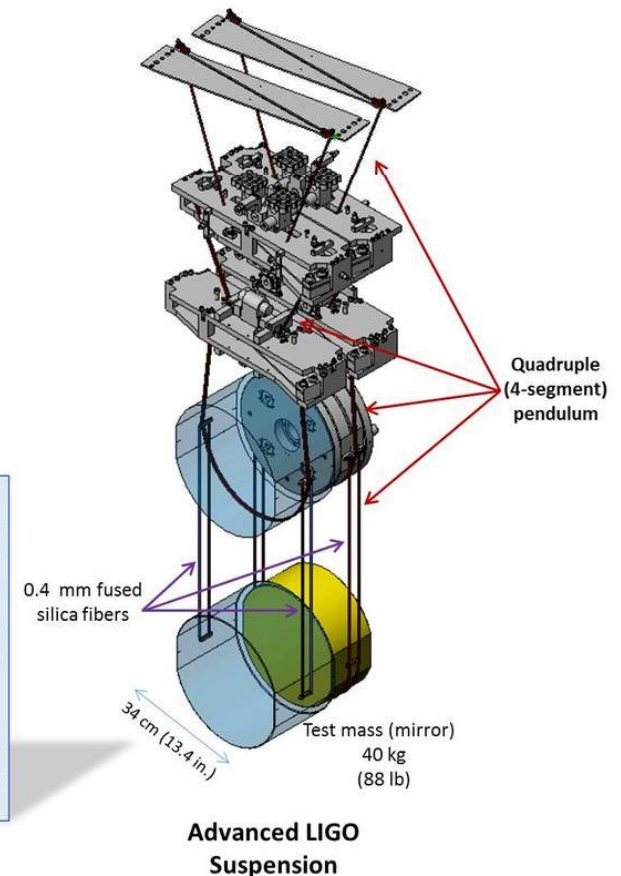


iLIGO vs aLIGO suspension systems

These engineering drawings illustrate the striking differences between Initial- and Advanced LIGO's suspensions. The suspensions are shown to scale.

Initial LIGO's suspension was a single pendulum design with an 11 kg (22 lb) 'test mass' (mirror) hung by steel fibers.

Advanced LIGO's suspension system is a much heavier quadruple ("quad") pendulum with a 40 kg (88 lb) 'test mass' (mirror) hung by fused silica fibers.

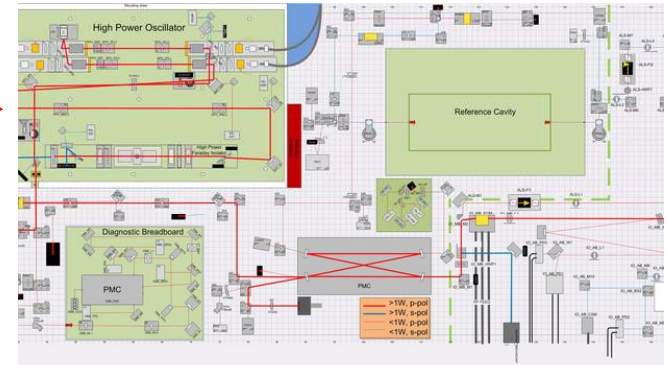


Détection des ondes gravitationnelles

- Difficulté: Elimination des sources de dispersion des chemins optiques de 1120km



Ultra stable: Le laser de 200W avec ses trois étages amplificateurs/tuners est le plus monochromatique jamais conçu



Ultra vide: 4km de tube métallique soudés sous 10^{-12} atmosphères dans une enceinte de béton

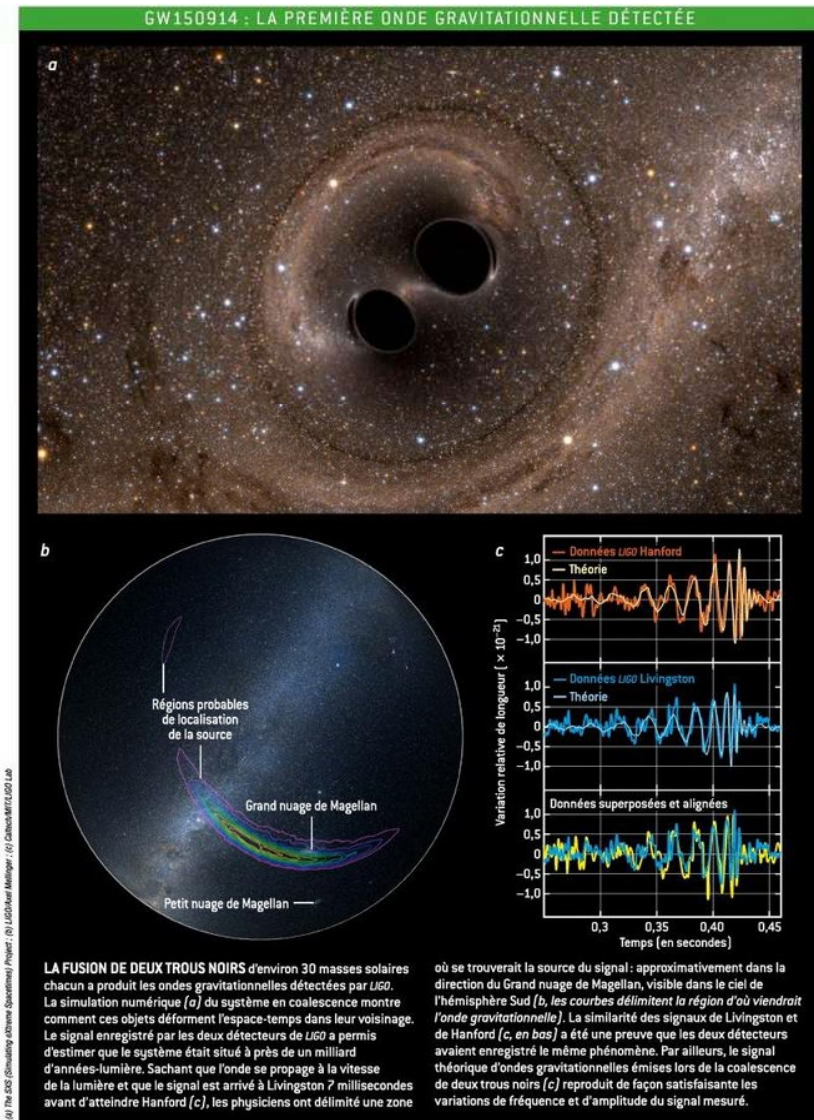


Ultra précis: Les miroirs en silice de 40kg absorbent un photon sur 3Millions reçus, ils sont polis avec une précision de quelques atomes ($\lambda/1000$)

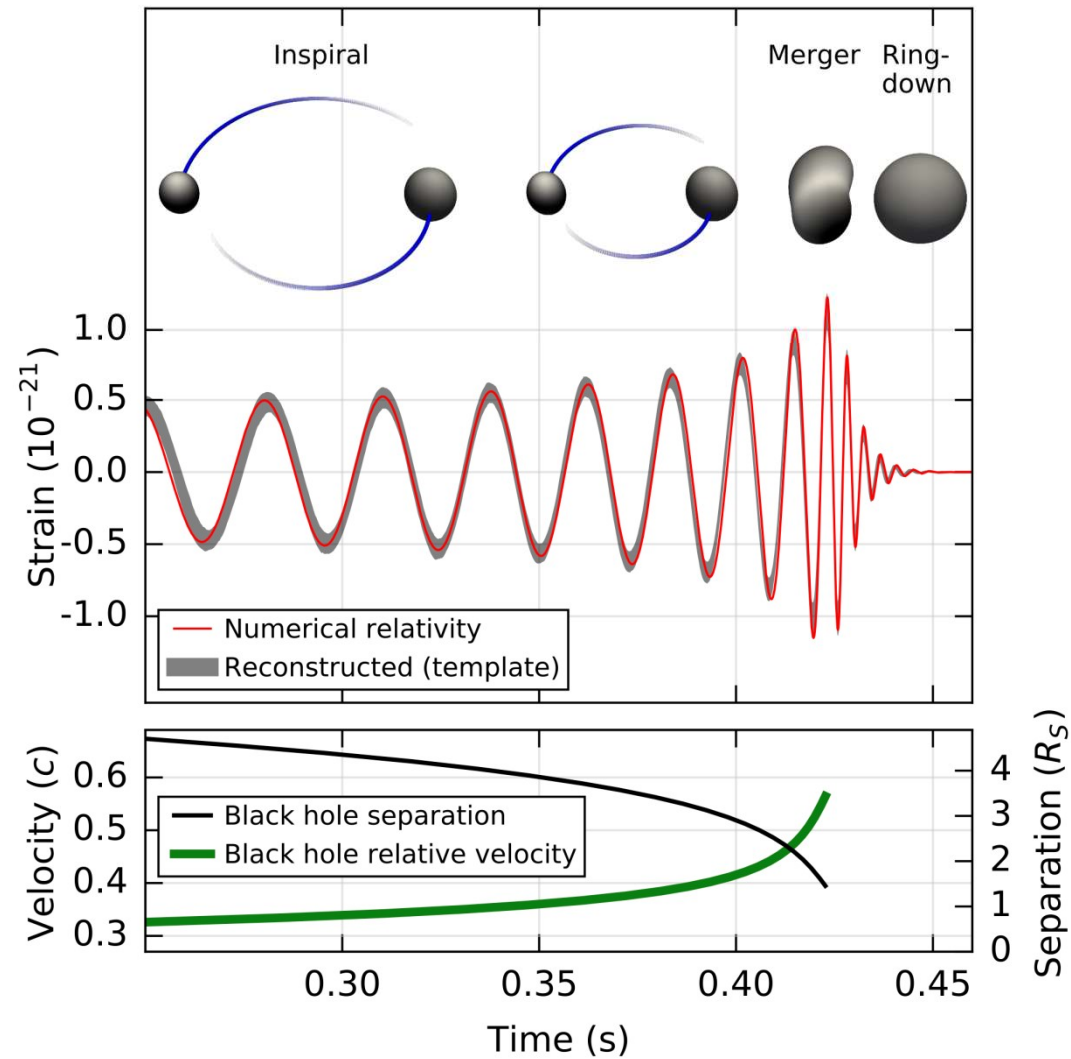


Détection des ondes gravitationnelles: GW150914

- Première détection directe le 14/09/2015: Evènement GW150914
- Variation des longueur des bras de LIGO de 1/1000 de la taille d'un proton
- Coalescence de deux trous noirs d'environ 29 et 36 masses solaires situés à une distance comprise entre 0,750 et 1,9 milliard d'années-lumière.
- Lors de la coalescence, l'équivalent de trois masses solaires a été convertie en ondes gravitationnelles

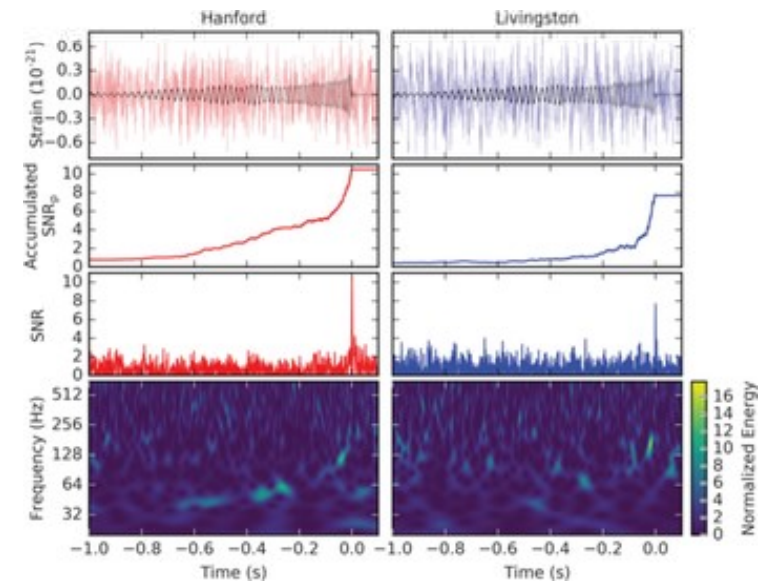
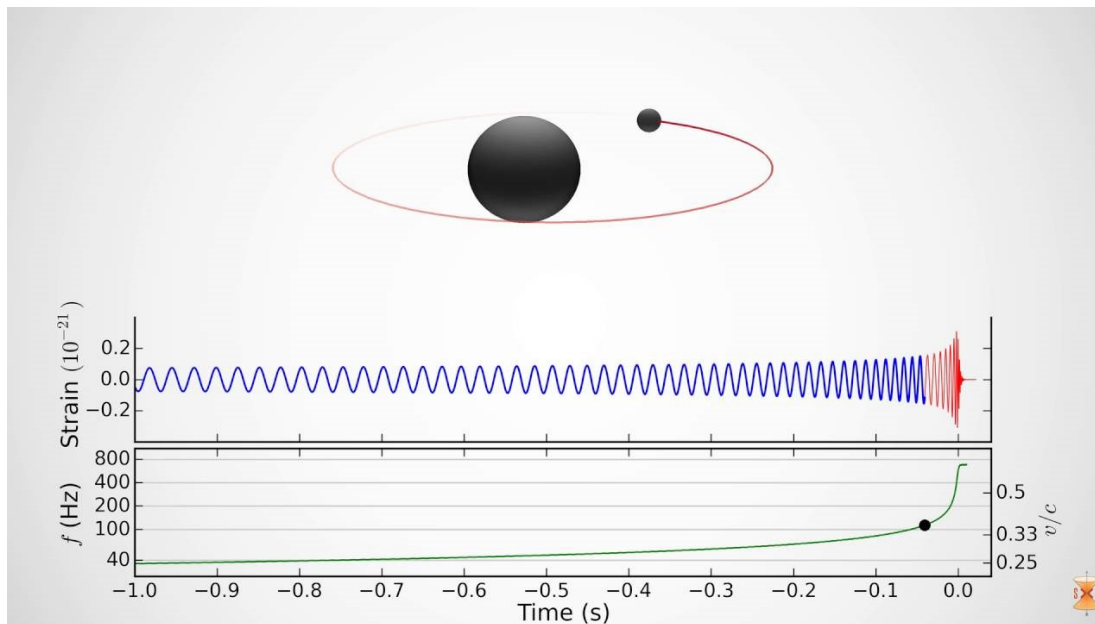


Détection des ondes gravitationnelles : GW150914



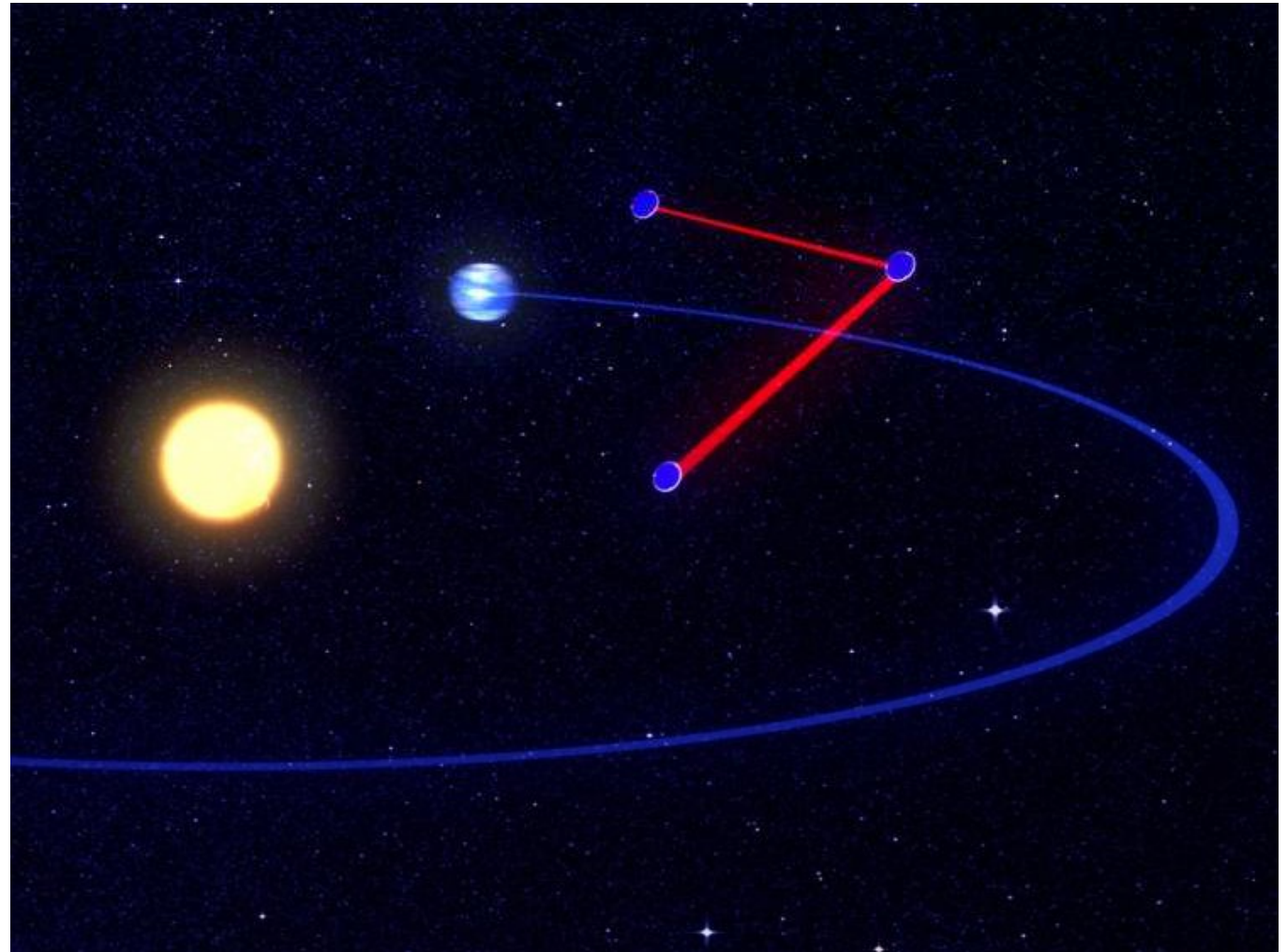
Détection des ondes gravitationnelles: GW151226

- Deuxième détection directe le 26/12/2015: Evènement GW151226
- Coalescence de deux trous noirs d'environ 14,2 et 7,5 masses solaires
- Lors de la coalescence, l'équivalent d'une masse solaire a été convertie en ondes gravitationnelles



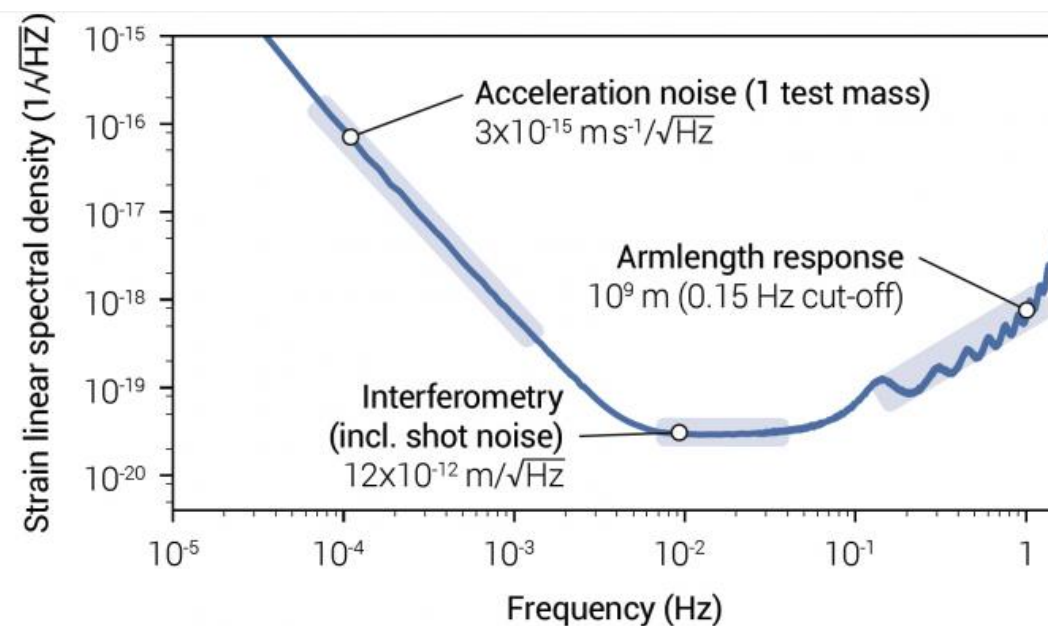
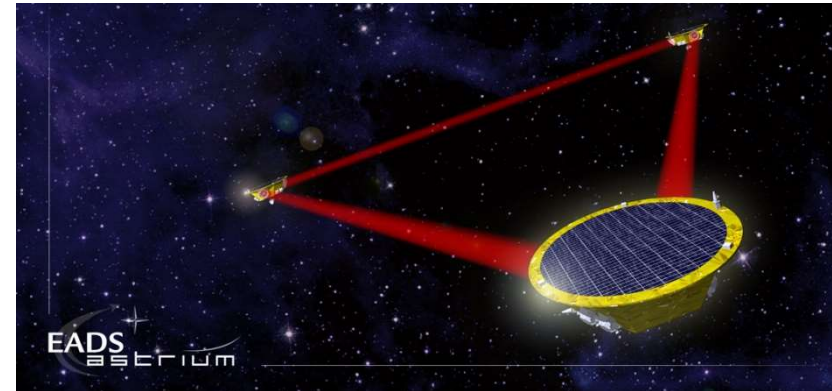
Détection des ondes gravitationnelles

- **Projet eLiSA (ESA):**
 - Interféromètre spatial géant (bras de 1M de km)
 - Placé en orbite 20° derrière la Terre sur la même orbite
 - 3 satellites disposés suivant un triangle équilatéral géant incliné de 60° sur l'écliptique
 - Chaque satellite isole activement une masse de test en chute libre
 - L'interféromètre laser mesure la variation de distance entre les trois masses test
 - Lancement prévu en 2034



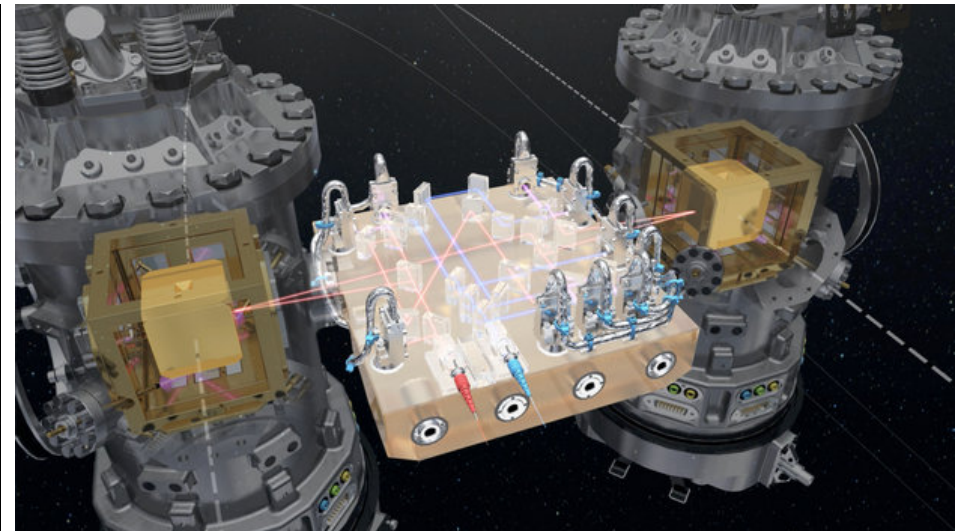
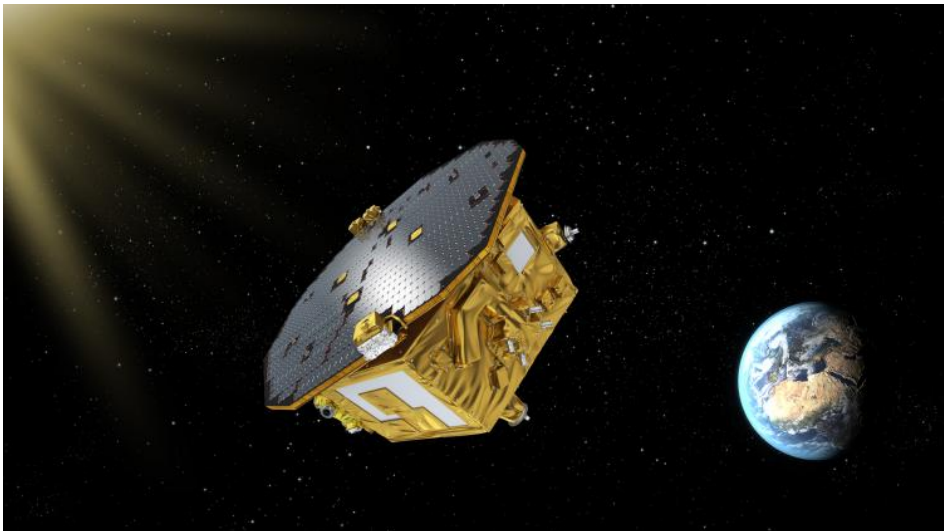
Détection des ondes gravitationnelles

- Projet eLiSA (ESA) ou NGO:
 - Excellente sensibilité dans la bande 0.1mHz .. 1Hz
 - Nouvelles technologies: Masses de test Or-Platine en chute libre, protégées des effets non gravitationnels
 - Interférométrie longue distance



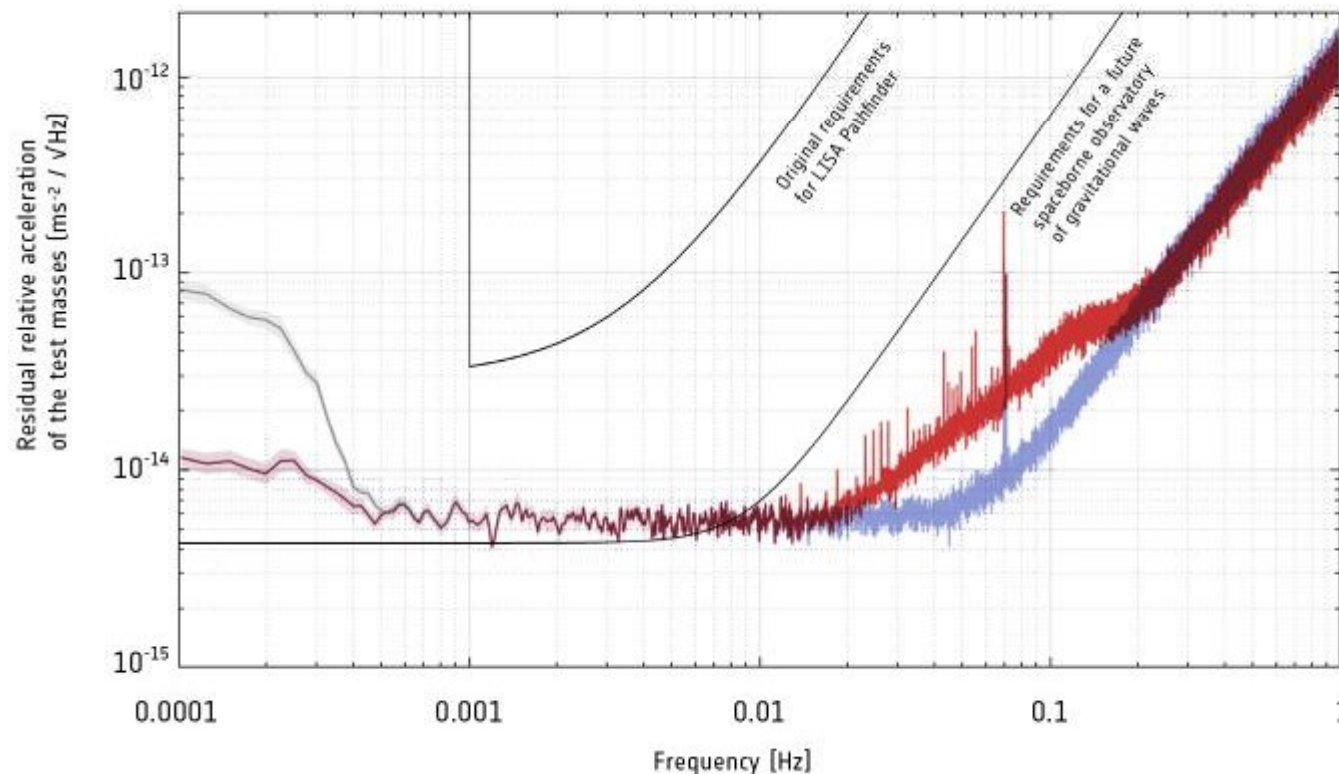
Détection des ondes gravitationnelles

- LISA Pathfinder:
 - Lancé le 03/12/2015 de Kourou
 - Contient deux masses de test Or-Platine
 - Destiné à démontrer les technologies de mise en chute libre de masses de test pour les futurs observatoires gravitationnels spatiaux
 - Orbite au point de Lagrange L1 à 1,5M de km de la Terre
 - A relâché ses masses de test le 16/02/2016 et commencé les mesures



Détection des ondes gravitationnelles

- LISA PathFinder:
 - Résultats 5 fois meilleurs que demandés concernant le critère de chute libre des masses de test



Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

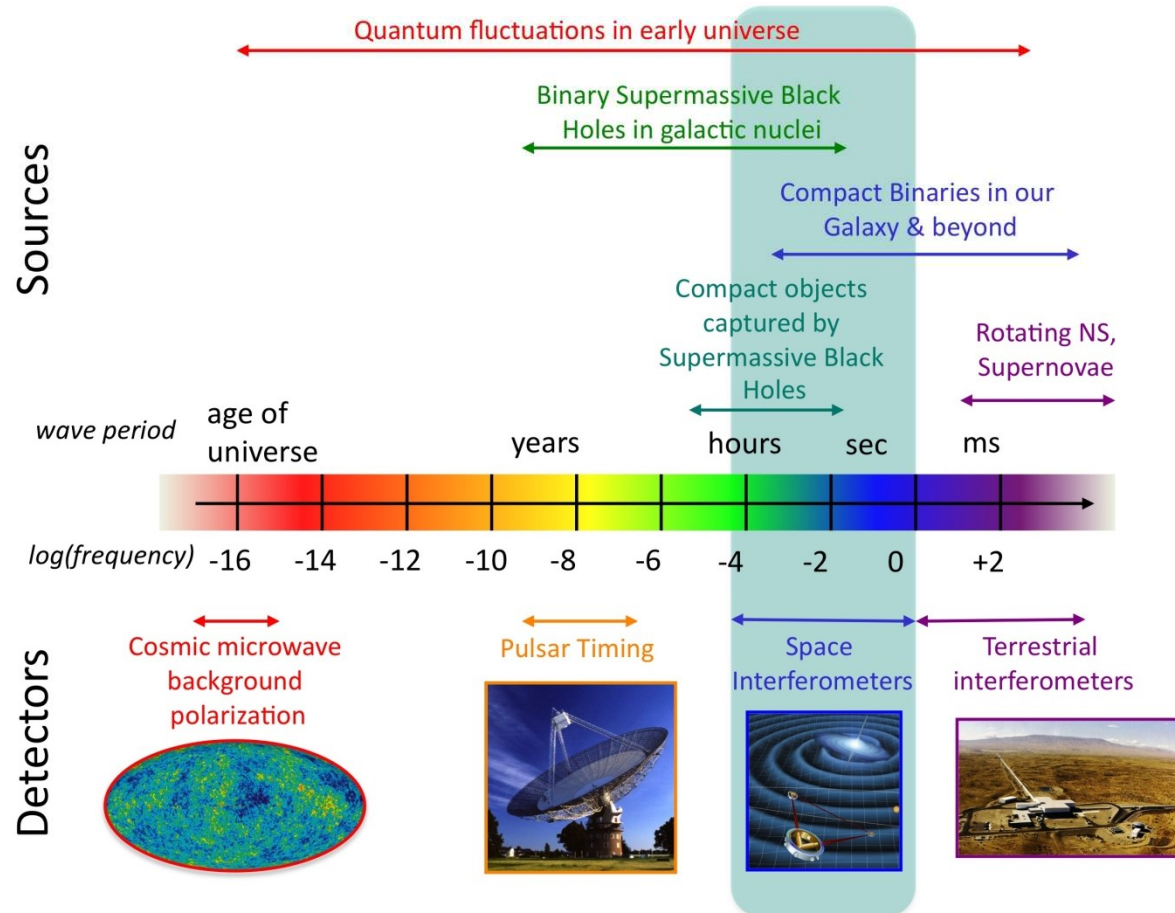
- Ondes électromagnétiques:
 - Etude de l'Univers lumineux
 - Ondes radio:
 - Rayonnement synchrotron (Noyaux de galaxies actifs, Supernovae, trous noirs)
 - Collisions de galaxies
 - Ondes millimétriques:
 - Excitation moléculaire des nuages de gaz froids
 - Fonds diffus cosmologique
 - IR lointain:
 - Émission thermique des nuages en cours d'effondrement, proto-étoiles
 - IR proche:
 - Étoiles naissantes, planètes extra solaires
 - Visible:
 - Étoiles, nébuleuses à émission, nébuleuses planétaires
 - UV:
 - Étoiles géantes, collisions de galaxies
 - Nuages de gaz chauds
 - X:
 - Binaires X, supernovae, trous noirs, noyaux actifs de galaxies, étoiles à neutron
 - γ :
 - Trous noirs, étoiles à neutrons, sursauts gamma (GRB), disques d'accrétion
 - Arrêtées par les poussières et les régions denses

Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Ondes gravitationnelles, une nouvelle fenêtre sur l'Univers:
 - Etude de l'Univers gravitationnel
 - Tous objets massifs et asymétriques
 - Peu couplées avec les masses, traversent même les régions denses
 - Capable de détecter le mouvement de masses/énergie non lumineuses (matière noire?)
 - Donne potentiellement accès à l'Univers primordial opaque aux ondes électromagnétiques
 - Nécessite des détecteurs très sensibles, de taille similaire à la longueur d'onde à observer

Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

The Gravitational Wave Spectrum

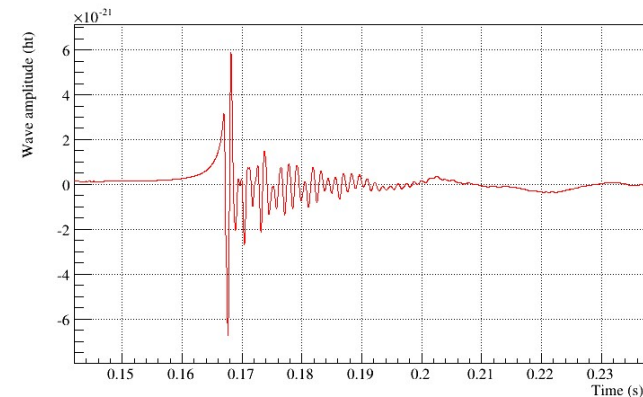
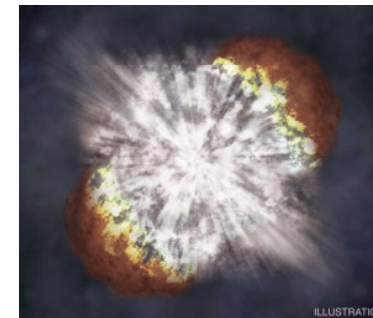
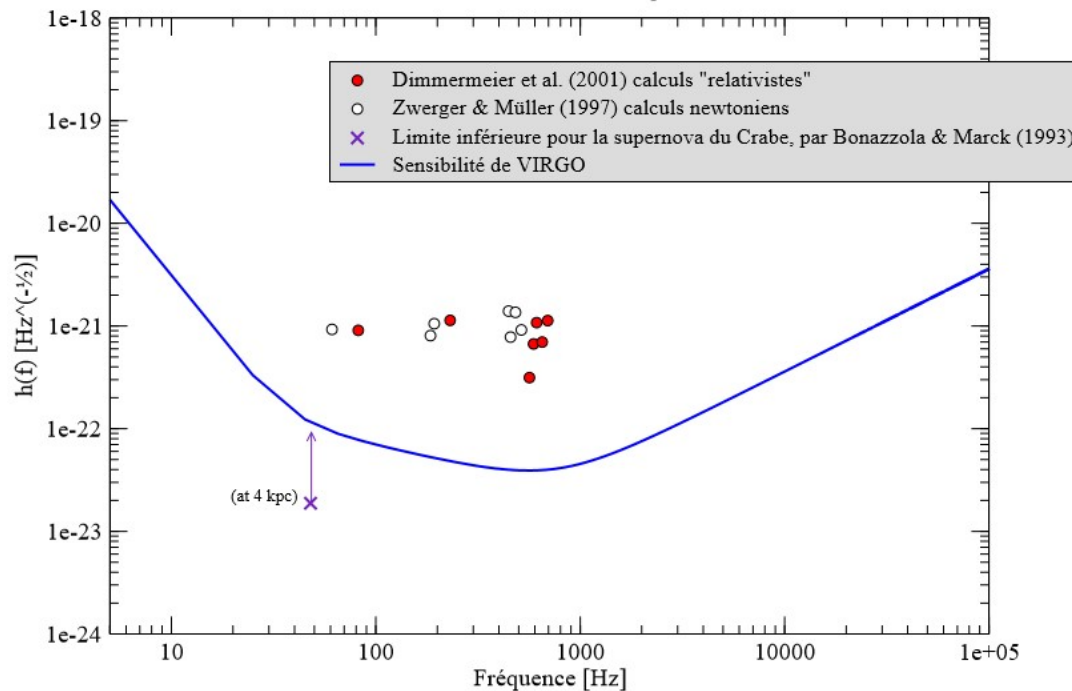


Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Supernova: Effondrement cataclysmique d'une étoile massive en un cœur dense (étoile à neutrons ou trou noir).
 - Emetteur de neutrinos, ondes électromagnétiques et ondes gravitationnelles
 - Seules ces dernières peuvent sonder les régions proches du cœur dense

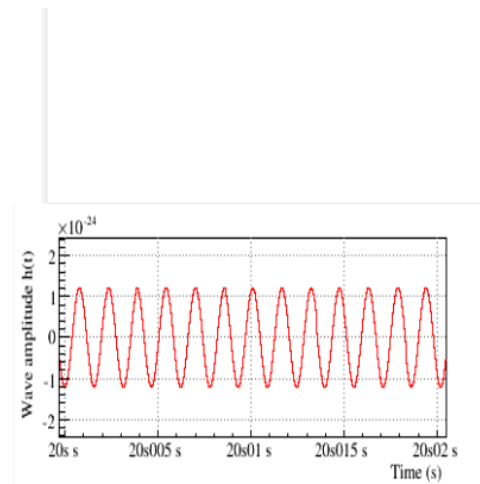
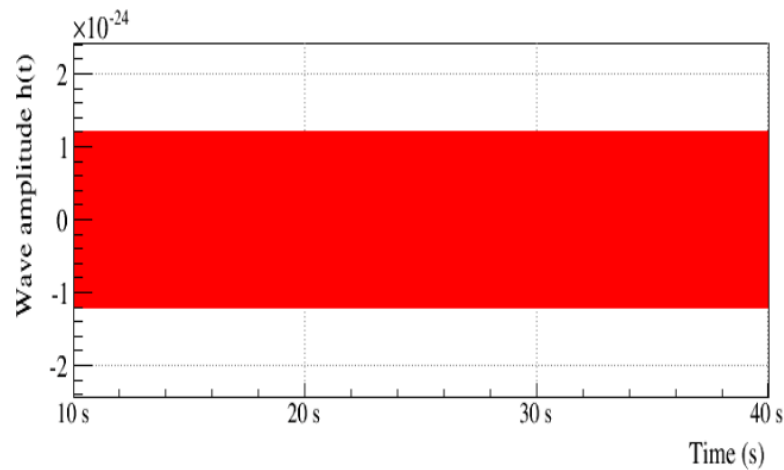
Simulations numériques d'effondrements stellaires

Pour une source à 10 kpc



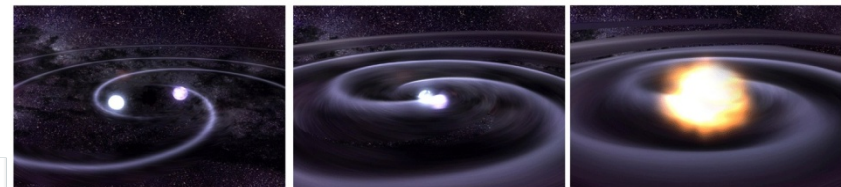
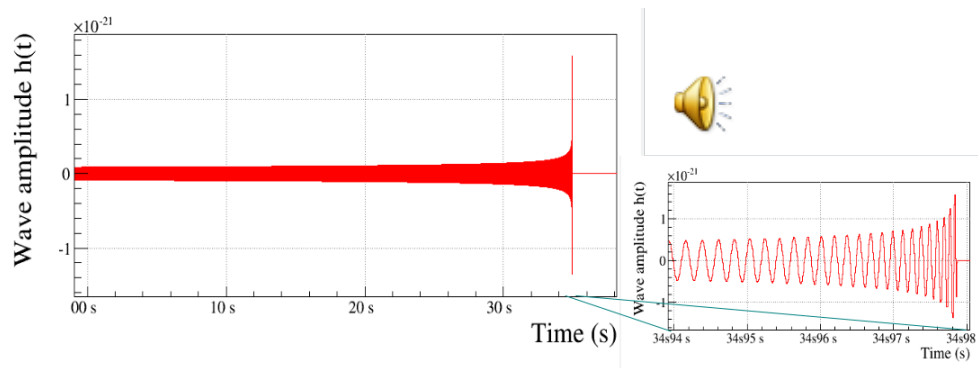
Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Etoiles à neutron en rotation rapide
 - Emetteur permanent d'ondes gravitationnelles si le corps est asymétrique
 - Information sur la structure de ces astres étranges



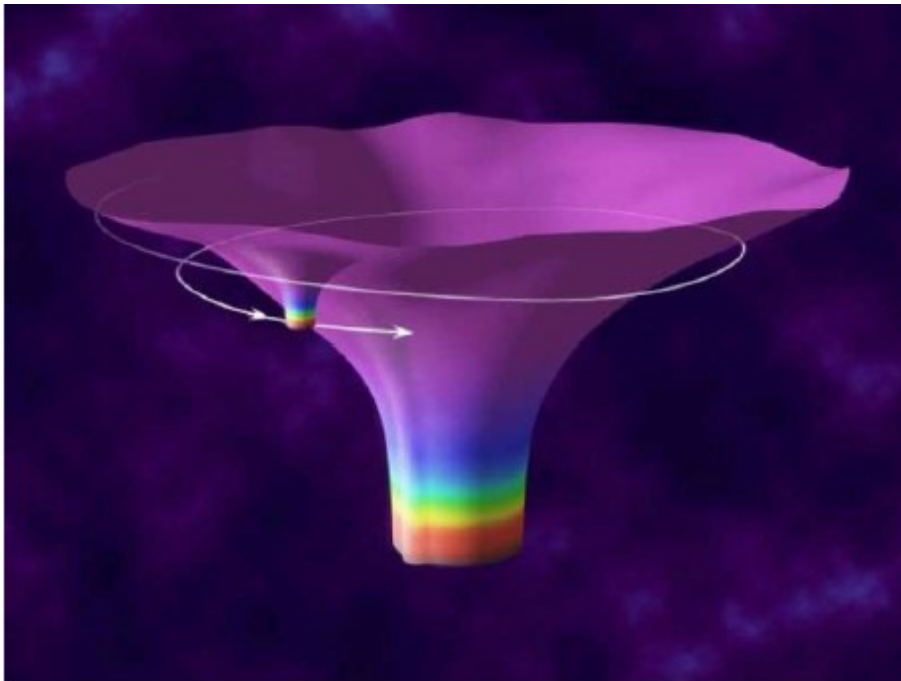
Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Systèmes binaires compacts
 - Couple d'étoiles à neutrons ou de trous noirs
 - Emission caractéristique de phase spiralante, coalescence et stabilisation
 - Physique de ces systèmes compacts
 - Caractérisation des masses: 1^{ère} surprise avec GW150914, couple de trous noirs stellaires beaucoup plus massifs que prévu par les modèles
 - Lien avec d'autres signaux mystérieux (GRB)?



Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Objets compacts capturés par des trous noirs supermassifs
 - Emission depuis l'objet compact sert de sonde de l'environnement gravitationnel du TN supermassif



Déformation de l'espace-temps au voisinage d'un objet compact (naine blanche, étoile à neutrons ou trou noir stellaire) orbitant près de l'horizon d'un trou noir supermassif

Et demain, l'astronomie gravitationnelle?

- Couple de trous noir supermassifs
 - Issu de la fusion de deux galaxies à noyau actif
 - Permet de caractériser les dernières étapes de la fusion des noyaux des deux galaxies

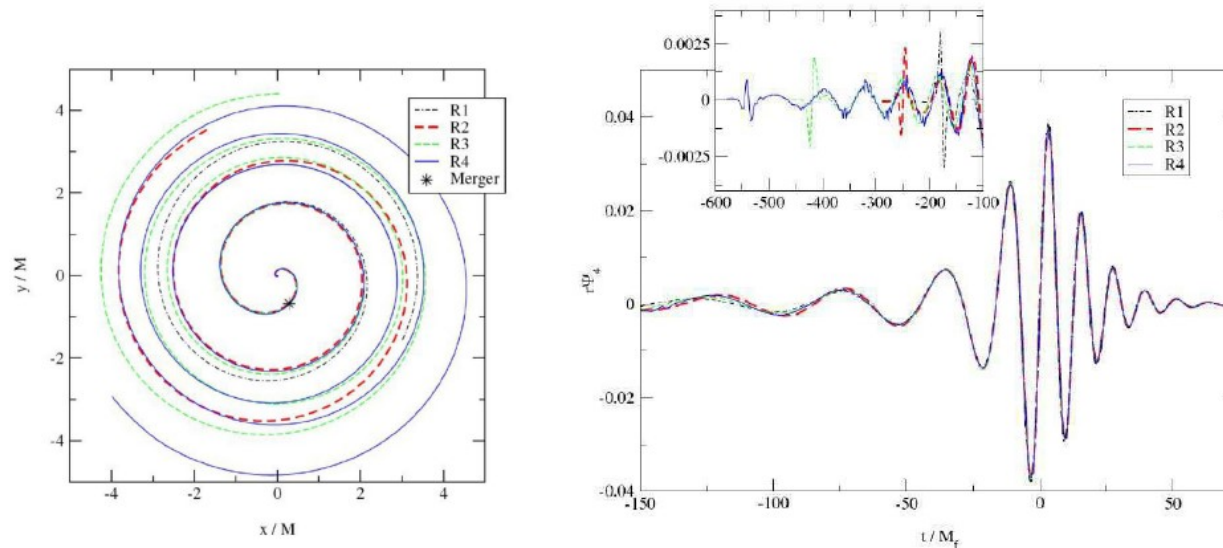
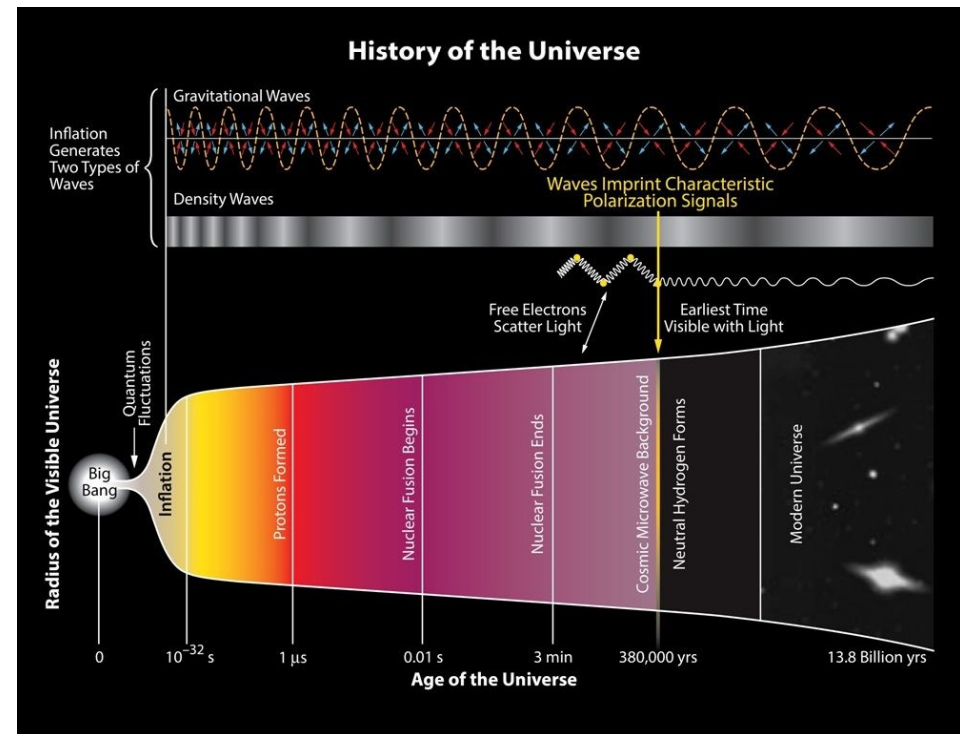


FIG. 1.12: Trajectoires (à gauche) et forme d'onde (à droite) obtenues par des simulations numériques présentées dans l'article [9] pour la coalescence de deux trous noirs super-massifs. ©NASA

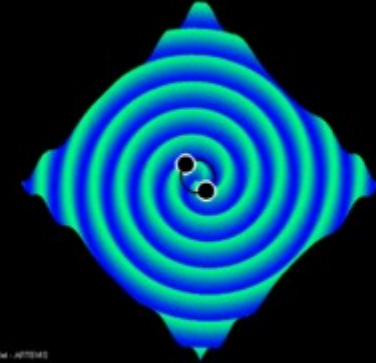
Et demain, l'astronomie gravitationnelle?: Au-delà de l'horizon, les origines

- Le Saint Graal des cosmologistes: Ecouter l'Univers primordial
 - Fluctuations quantiques
 - Transitions de phase
 - Inflation cosmique



Et demain, l'astronomie gravitationnelle ...

- La détection des ondes gravitationnelles marque le début d'une nouvelle astronomie
- L'amélioration des détecteurs promet des découvertes étonnantes dans des régions de l'Univers inaccessibles par d'autres moyens d'observation
- Elles donnent potentiellement accès à l'histoire de l'Univers primordial, bien avant qu'il ne devienne transparent à la lumière
- Comme chaque fois qu'un nouveau moyen d'observation a été mis à disposition, des surprises nous attendent



100 ans après Einstein, les ondes gravitationnelles

La Gravitation: La plus mystérieuse des interactions fondamentales

En espérant que vous avez passé un bon moment, merci de votre attention