

5.4 LIGO

Note historique. Rainer Weiss propose dès les années 1970 un interféromètre de Michelson à grands bras pour détecter les ondes gravitationnelles prévues par Einstein en 1916. Les deux détecteurs LIGO sont construits à Hanford (État de Washington) et à Livingston (Louisiane). Le 14 septembre 2015, ils enregistrent GW150914, la fusion de deux trous noirs de 36 et 29 masses solaires situés à environ 1,3 milliard d'années-lumière : c'est la première détection directe d'une onde gravitationnelle. Weiss, Barish et Thorne reçoivent le prix Nobel de physique en 2017.

5.4.1 Principe

LIGO est un **interféromètre de Michelson** dont les deux bras, perpendiculaires, mesurent environ 4 km. Une onde gravitationnelle de passage déforme l'espace transversalement à sa direction de propagation : elle allonge un bras et raccourcit l'autre. Si h est la déformation relative (sans dimension), les deux bras varient de $\pm hL/2$ et la différence de longueur vaut $\Delta L = hL$. On règle le Michelson sur la **frange sombre** : le signal est lu sur le port de sortie, sombre au repos, où l'éclairement varie comme $\sin^2(\Delta\varphi/2)$ avec

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(L_1 - L_2) = \frac{4\pi hL}{\lambda}. \quad (61)$$

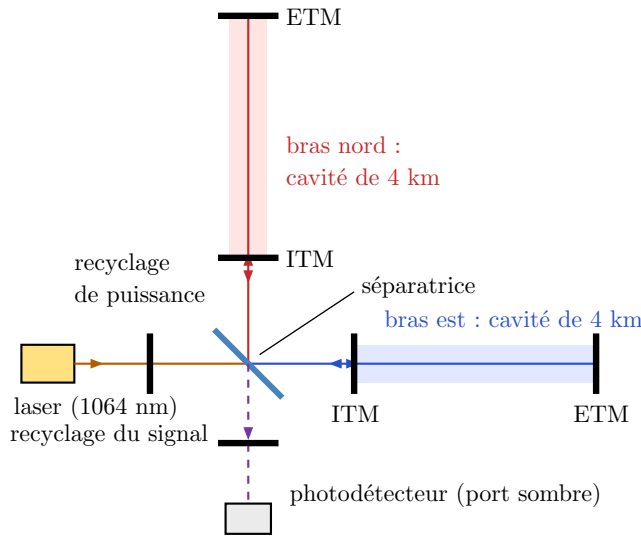


Fig. 48. – Configuration optique d'Advanced LIGO (bras non à l'échelle). Chaque bras est une cavité Fabry-Perot entre un miroir d'entrée (ITM) et un miroir de fond (ETM) ; les miroirs de recyclage renvoient vers l'interféromètre la lumière qui retournerait vers le laser et celle du signal.

Signal attendu

$$h \sim 10^{-21} \implies \Delta L = hL \sim 4 \cdot 10^{-18} \text{ m} \quad (62)$$

soit une variation de longueur bien plus petite qu'un proton. Avec $\lambda = 1064 \text{ nm}$ et $L = 4 \text{ km}$, un Michelson simple donnerait $\Delta\varphi \sim 5 \cdot 10^{-11} \text{ rad}$.

5.4.2 Gagner en sensibilité

Cavités Fabry-Perot dans les bras. Chaque bras est une cavité résonnante de finesse $\mathcal{F} = 450$: la lumière y fait en moyenne $2\mathcal{F}/\pi \sim 290$ allers-retours, ce qui multiplie le déphasage par le même facteur :

$$\Delta\varphi = \frac{2\mathcal{F}}{\pi} \cdot \frac{4\pi hL}{\lambda} = \frac{8\mathcal{F}hL}{\lambda} \sim 10^{-8} \text{ rad}. \quad (63)$$

Recyclage de puissance. À la frange sombre, presque toute la lumière retourne vers le laser. Un miroir de recyclage placé devant la séparatrice la renvoie dans l'interféromètre, ce qui multiplie la puissance utile : quelques dizaines de watts en entrée donnent environ 100 kW dans les cavités des bras.

Recyclage du signal. Un miroir placé sur la sortie élargit la bande de fréquence du détecteur.

Masses d'épreuve isolées. Les miroirs, en silice, pèsent 40 kg et sont suspendus à des pendules à quatre étages, dans un ultravide, pour isoler l'interféromètre des vibrations du sol.

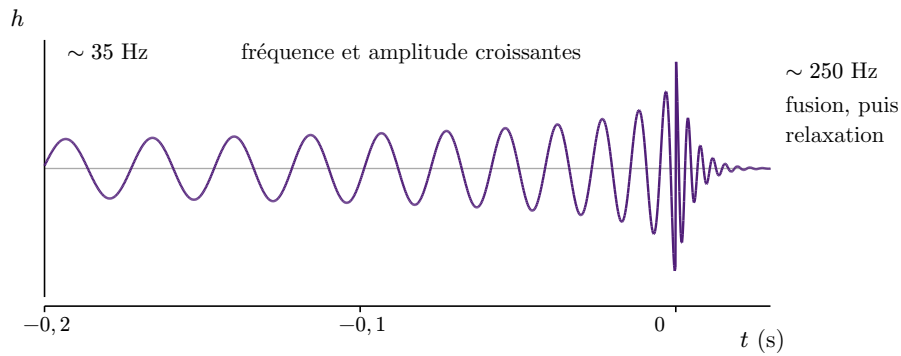


Fig. 49. – Allure du signal d’une fusion de deux objets compacts (schématisé, type GW150914) : de 35 à 250 Hz en un cinquième de seconde environ.

5.4.3 Bruits et réseau de détecteurs

La sensibilité est limitée par le **bruit sismique** en dessous de 10 Hz, par le **bruit thermique** des miroirs et de leurs suspensions aux fréquences moyennes, et par le **bruit quantique** : bruit de photon à haute fréquence (le déphasage minimal détectable varie comme $1/\sqrt{P}$) et pression de radiation à basse fréquence. Le détecteur est le plus sensible vers 100 à 300 Hz.

LIGO fonctionne en réseau avec Virgo (Cascina, en Italie, bras de 3 km) et KAGRA (au Japon) : la comparaison des instants d’arrivée localise la source sur le ciel. En 2017, l’onde GW170817, produite par la fusion de deux étoiles à neutrons, a été suivie d’un signal électromagnétique observé par de nombreux télescopes.

En résumé : LIGO est un Michelson de 4 km réglé sur la frange sombre, qui mesure $\Delta L = hL \sim 10^{-18}$ m grâce à des cavités Fabry-Perot de finesse 450, au recyclage de puissance et à l’isolation des miroirs : le déphasage vaut $\Delta\varphi = 8\mathcal{F}hL/\lambda \sim 10^{-8}$ rad.

Pour aller plus loin. B. P. Abbott et al., *Physical Review Letters* 116, 061102 (2016) ; J. Aasi et al. (LIGO Scientific Collaboration), *Classical and Quantum Gravity* 32, 074001 (2015).