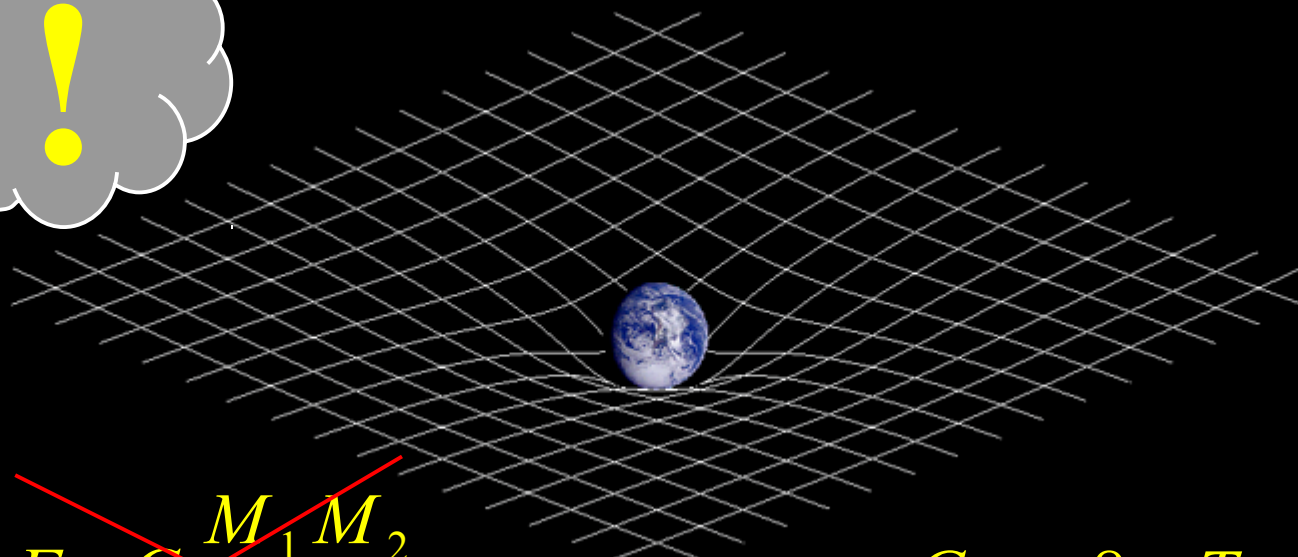
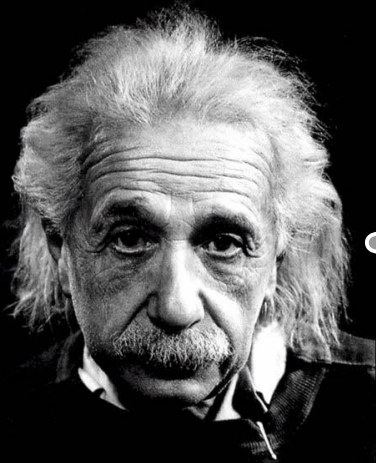


Virgo en quête des ondes gravitationnelles

Florent Robinet

Einstein & la Relativité Générale



$$\cancel{F = G \frac{M_1 M_2}{R^2}}$$

Newton (1687)

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

Einstein (1915)

La gravité n'est pas une force instantanée mais résulte d'une déformation de l'espace-temps

MASSE

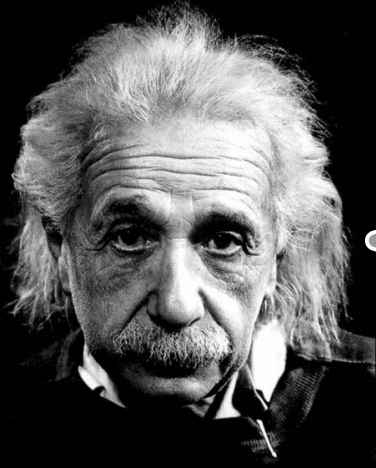


GEOMETRIE
ESPACE-TEMPS

La masse déforme l'espace-temps

L'espace-temps dicte le mouvement des masses

Les Succès



Succès de la théorie de la relativité générale

Déviations de la lumière à proximité de grandes masses (Eddington 1919)

Orbites planétaires (précession de Mercure)

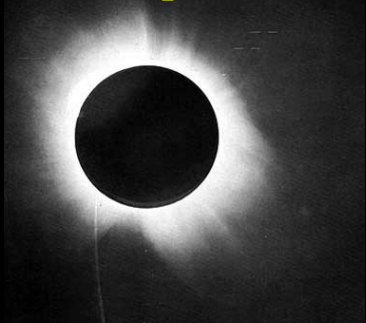
GPS (dilatation du temps)

Singularités gravitationnelles (trous noirs)

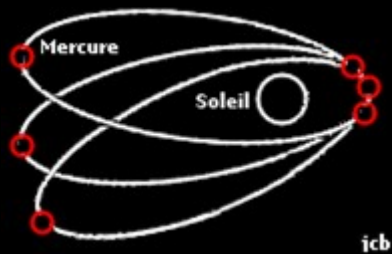
Expansion de l'univers (constante cosmologique)

Beaucoup d'autres choses...

Éclipse 1919



GPS



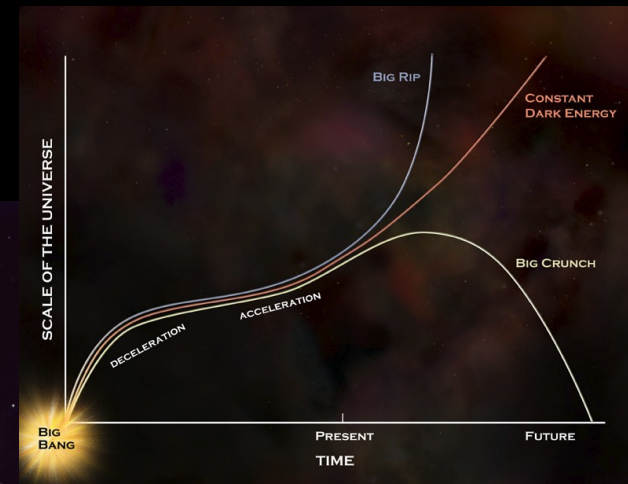
Précession de Mercure

Science Académie

Trou noir en rayons X

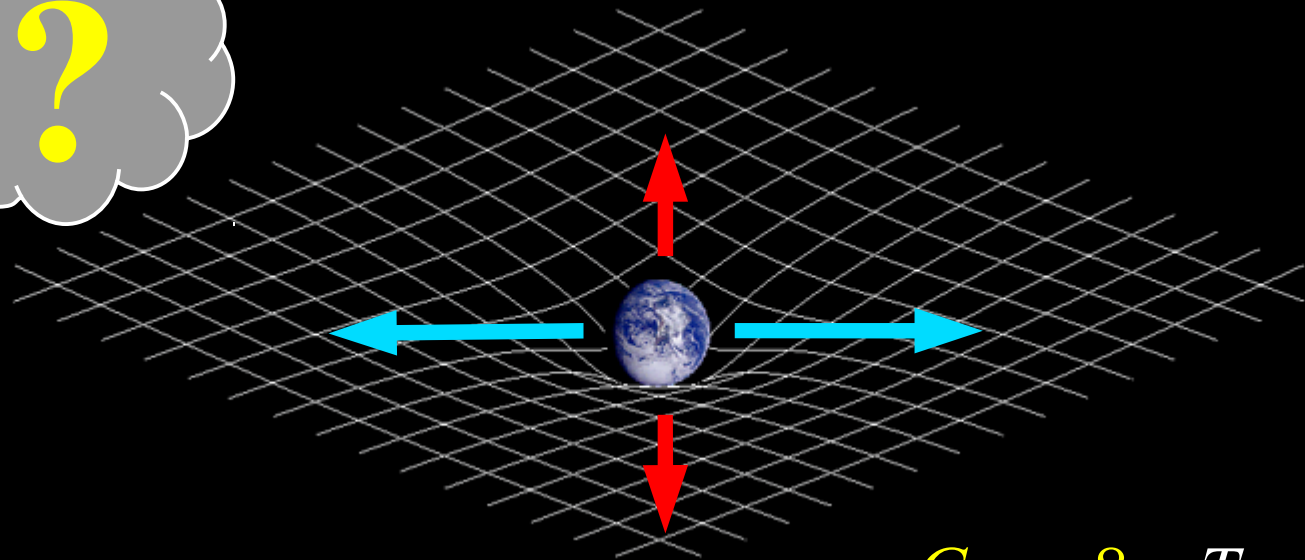
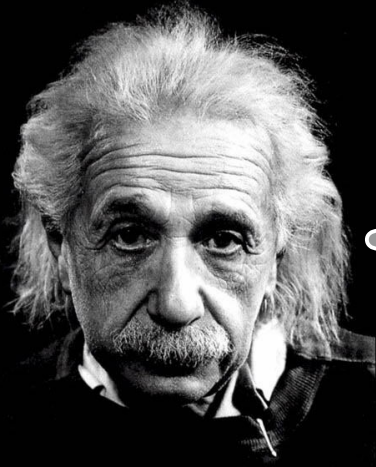


Florent Robinet



2 Mars 2010

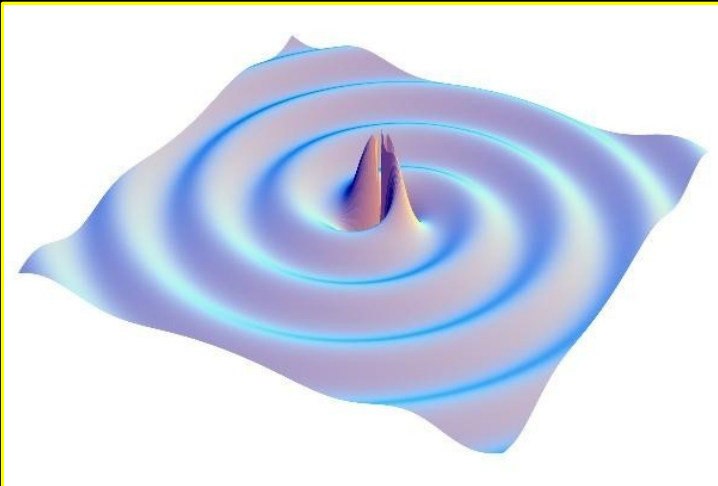
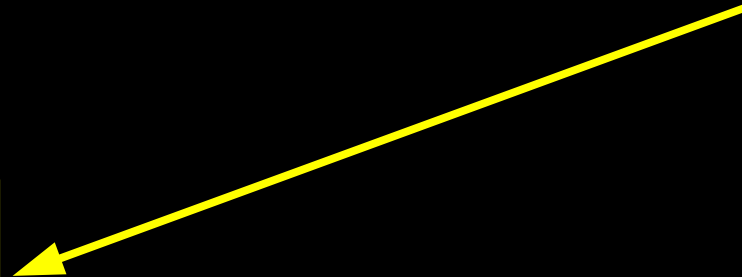
La Relativité Générale & les Ondes Gravitationnelles



$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

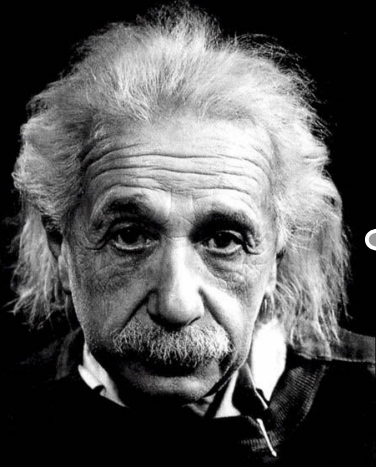


Source en mouvement
(oscillation, rotation
asymétrique...)



Propagation d'ondes gravitationnelles
(perturbations locales de l'espace-temps)
Propagation dans le vide et à la vitesse de la lumière

Les Ondes Gravitationnelles



?#%*!

Succès de la théorie de la relativité générale

Déviations de la lumière à proximité de grandes masses
(Eddington 1919)

Orbites planétaires (précession de Mercure)

GPS (dilatation du temps)

Singularités gravitationnelles (trous noirs)

Expansion de l'univers (constante cosmologique)

Beaucoup d'autres choses...

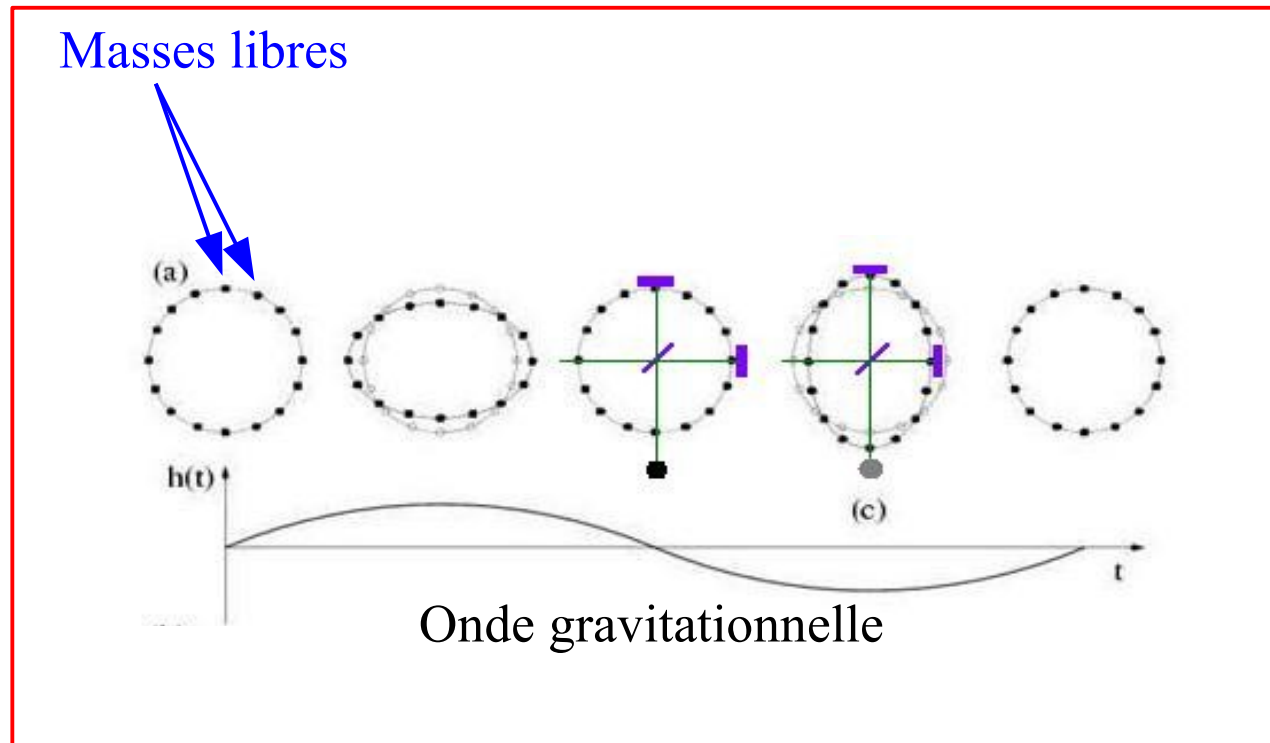
(Presque) rien du tout sur les ondes gravitationnelles !

Pourquoi ?

Détecter des Ondes Gravitationnelles

Comment "voir" des ondes gravitationnelles ?

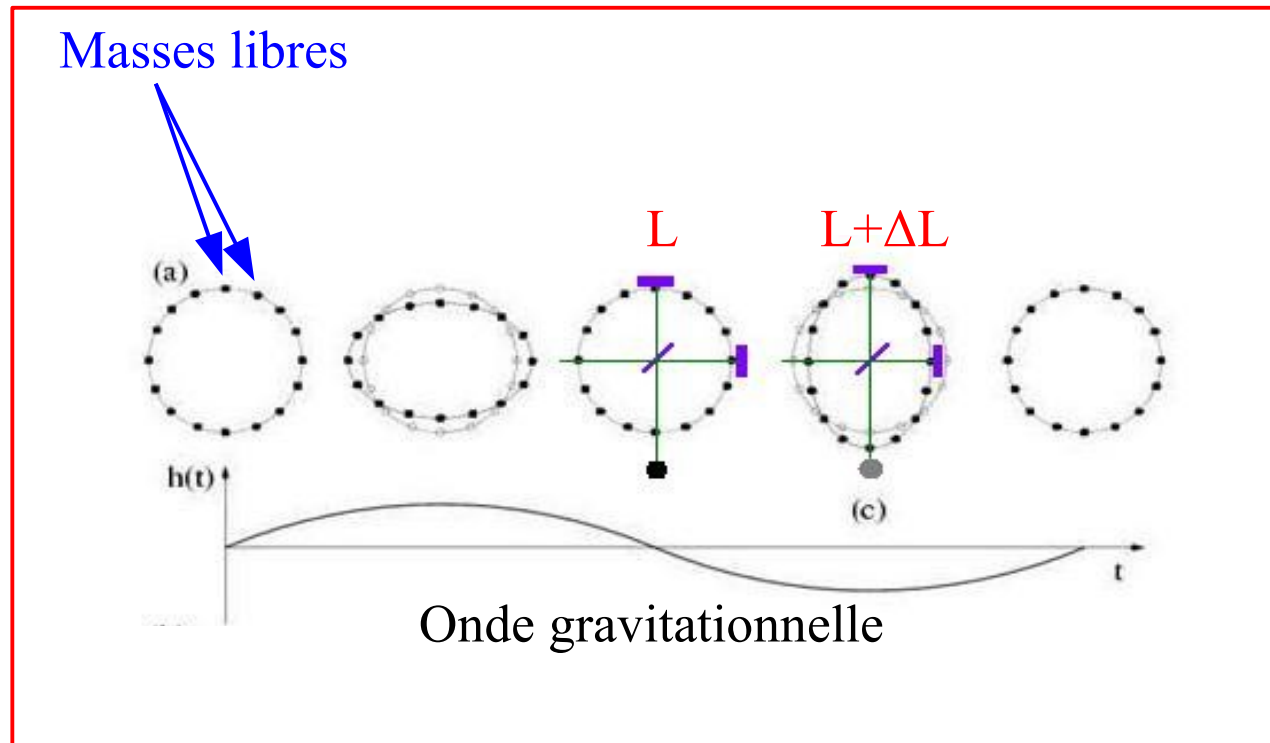
Onde gravitationnelle = déformation de l'espace-temps



Détecter des Ondes Gravitationnelles

Comment "voir" des ondes gravitationnelles ?

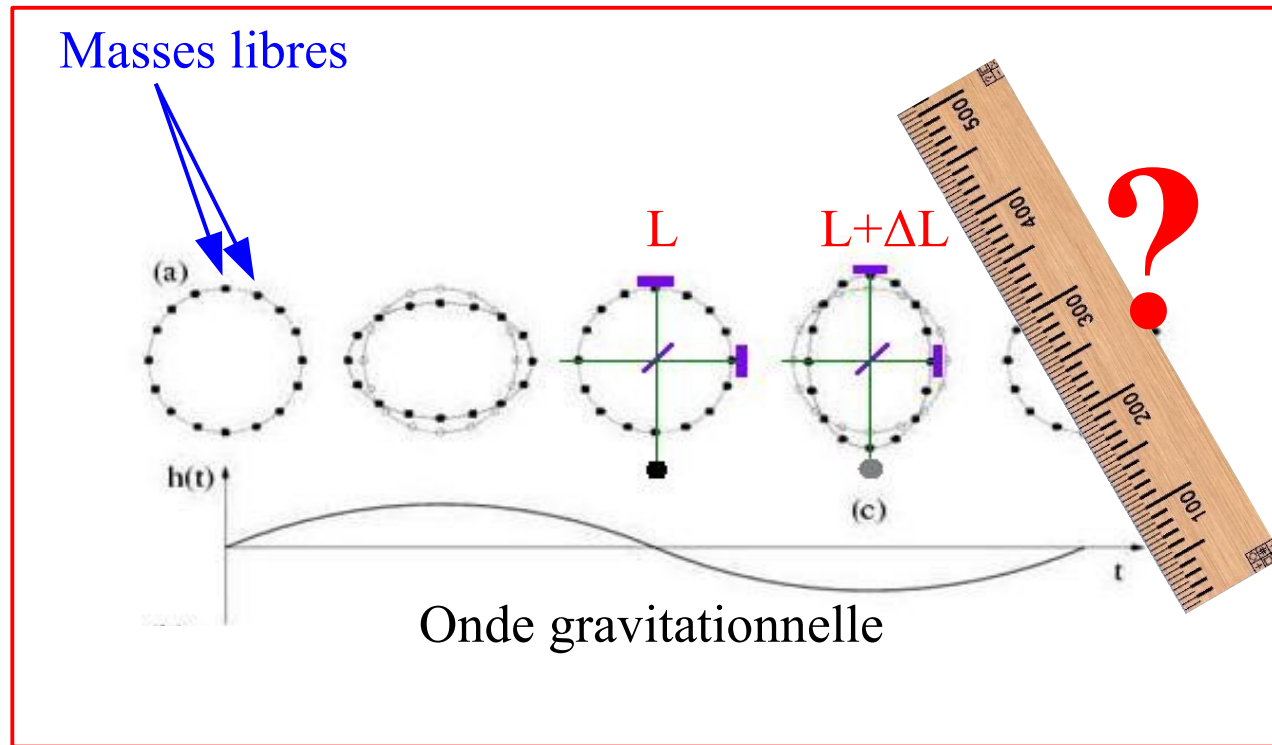
Onde gravitationnelle = déformation de l'espace-temps



Détecter des Ondes Gravitationnelles

Comment "voir" des ondes gravitationnelles ?

Onde gravitationnelle = déformation de l'espace-temps



"Voir" une onde gravitationnelle = Mesurer une longueur relative $\Delta L/L$

Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

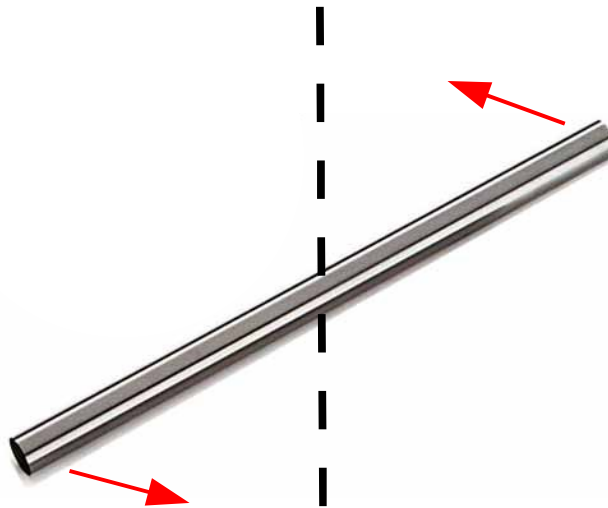
Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Barre d'acier en rotation

5 tonnes
2 m de long
1000 tours / seconde
(limite de rupture)
Distance ~ 1 m

$$\Delta L/L \sim 10^{-39} !$$



Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Explosion nucléaire

1 Mégatonne
Asymétrie 10%
Distance ~ 10 km

$$\Delta L/L \sim 10^{-39} !$$



Produire des Ondes Gravitationnelles

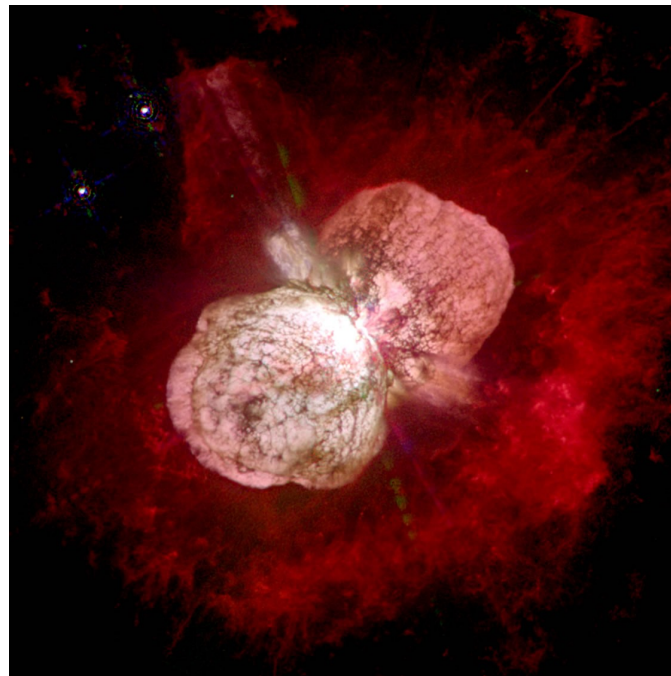
Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Supernova

10 fois la masse du soleil
Asymétrie 3%
Distance $\sim 3 \cdot 10^7$ a.l.

$$\Delta L/L \sim 10^{-21}$$



Supernova

Étoile massive en fin de vie s'effondrant sur elle-même formant une étoile à neutron ou un trou noir

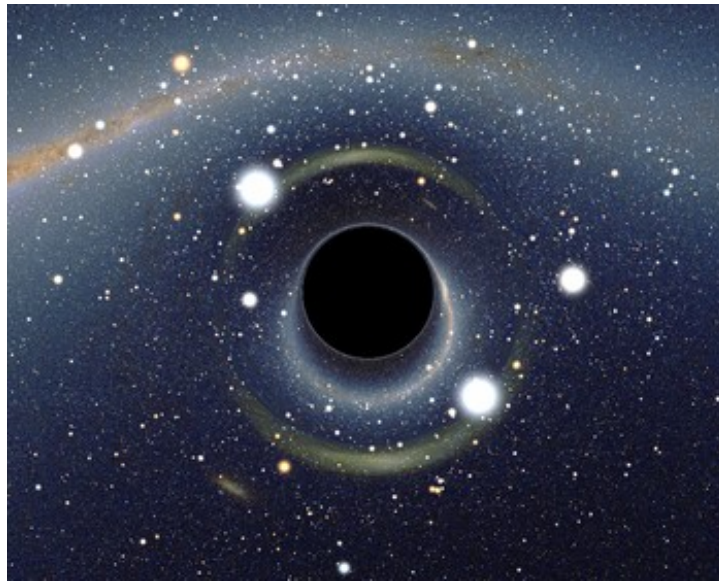
Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Desexcitation d'un trou noir

Juste après sa formation un trou noir devrait émettre des ondes gravitationnelles
Distance $\sim 3 \cdot 10^7$ a.l.

$$\Delta L/L \sim 10^{-21}$$



Produire des Ondes Gravitationnelles

Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Coalescence binaire

- 2 trous noirs
- 2 étoiles à neutrons
- système mixte
- distance $3 \cdot 10^7$ a.l.

$$\Delta L/L \sim 10^{-20}$$



Système binaire

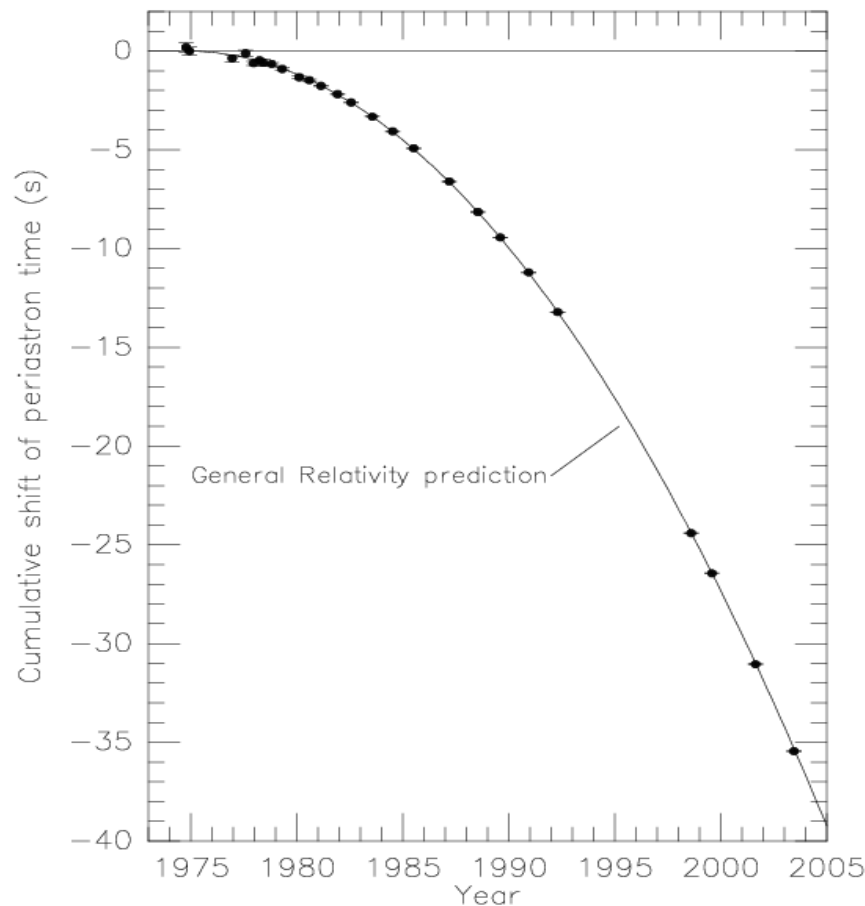
Les deux objets spiralent l'un vers l'autre jusqu'à fusionner et former un trou noir

Petite Parenthèse Capitale !

Systeme de 2 étoiles à neutron (PSR1913+16). Prix Nobel 1993

Le système perd de l'énergie car les deux objets spiralent l'un vers l'autre de plus en plus vite

Explication probable : la perte d'énergie est due à l'émission d'ondes gravitationnelles



Preuve indirecte de l'existence des ondes gravitationnelles !

Produire des Ondes Gravitationnelles

Conditions à remplir pour produire des ondes gravitationnelles :

- Être massif et compact
- Être asymétrique
- Être animé d'une vitesse proche de celle de la lumière

Coalescence binaire

- 2 trous noirs
- 2 étoiles à neutrons
- système mixte
- distance $3 \cdot 10^7$ a.l.

$$\Delta L/L \sim 10^{-20}$$

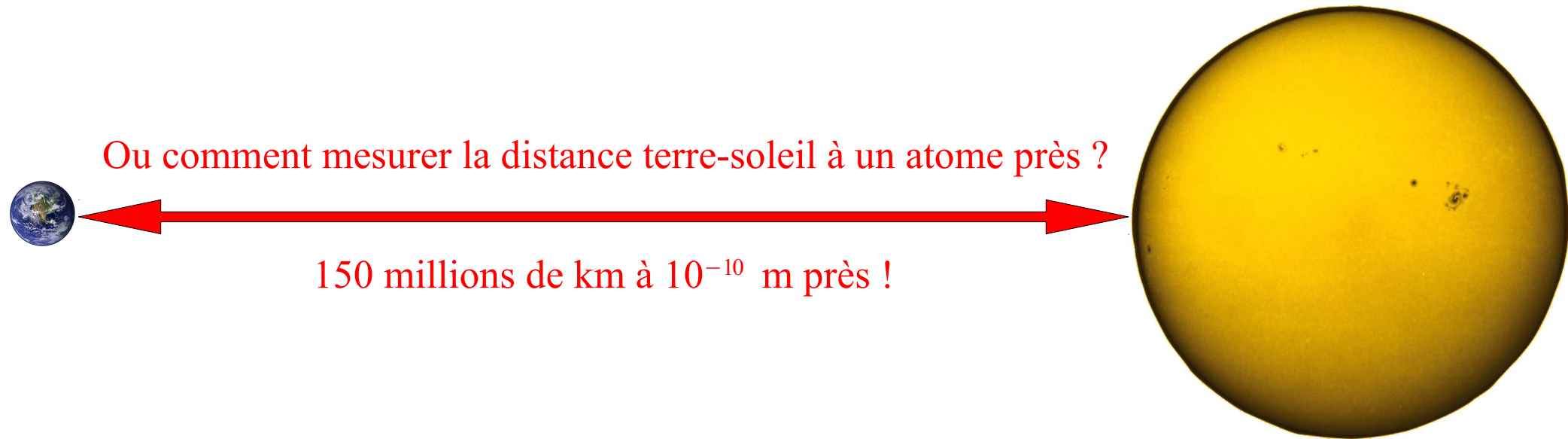


Système binaire

Les deux objets spiralent l'un vers l'autre jusqu'à fusionner et former un trou noir

Comment mesurer des longueurs si précisément?

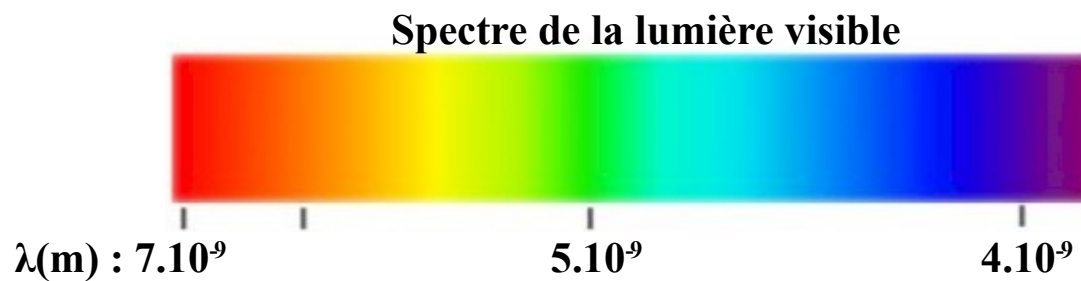
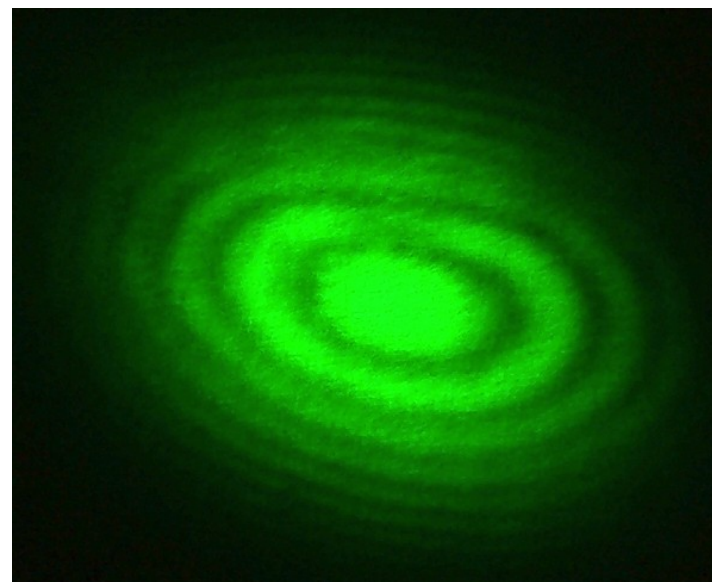
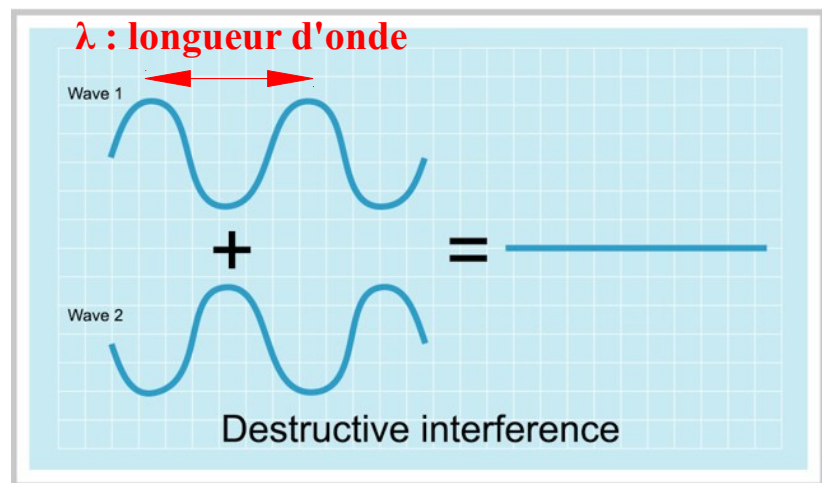
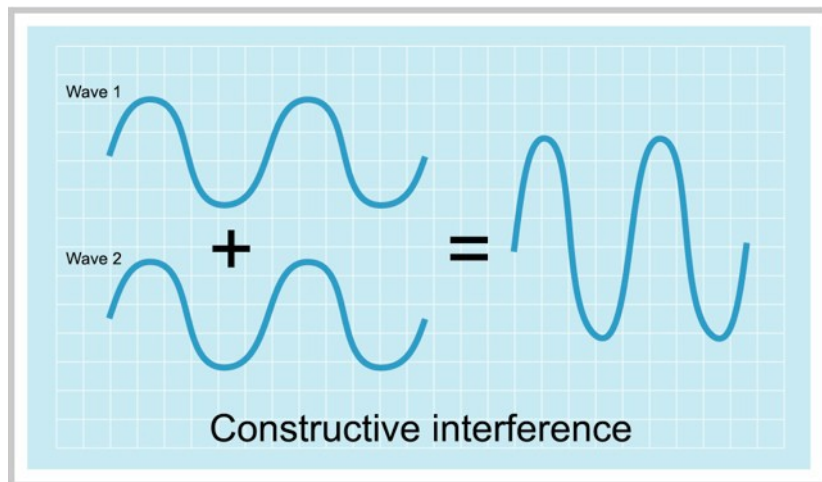
Comment mesurer des longueurs si précisément ?



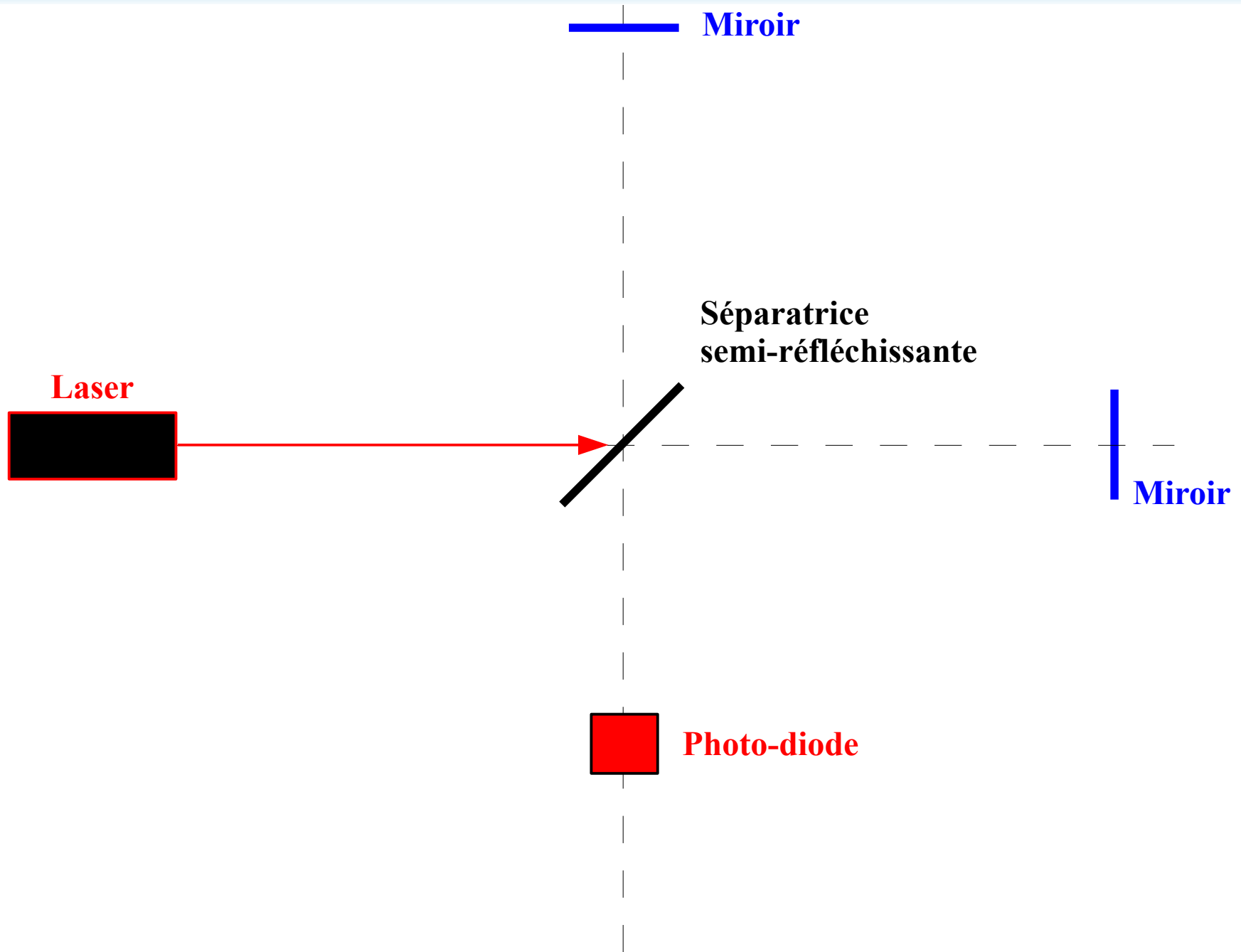
Comment mesurer des longueurs si précisément ?

En utilisant la lumière !

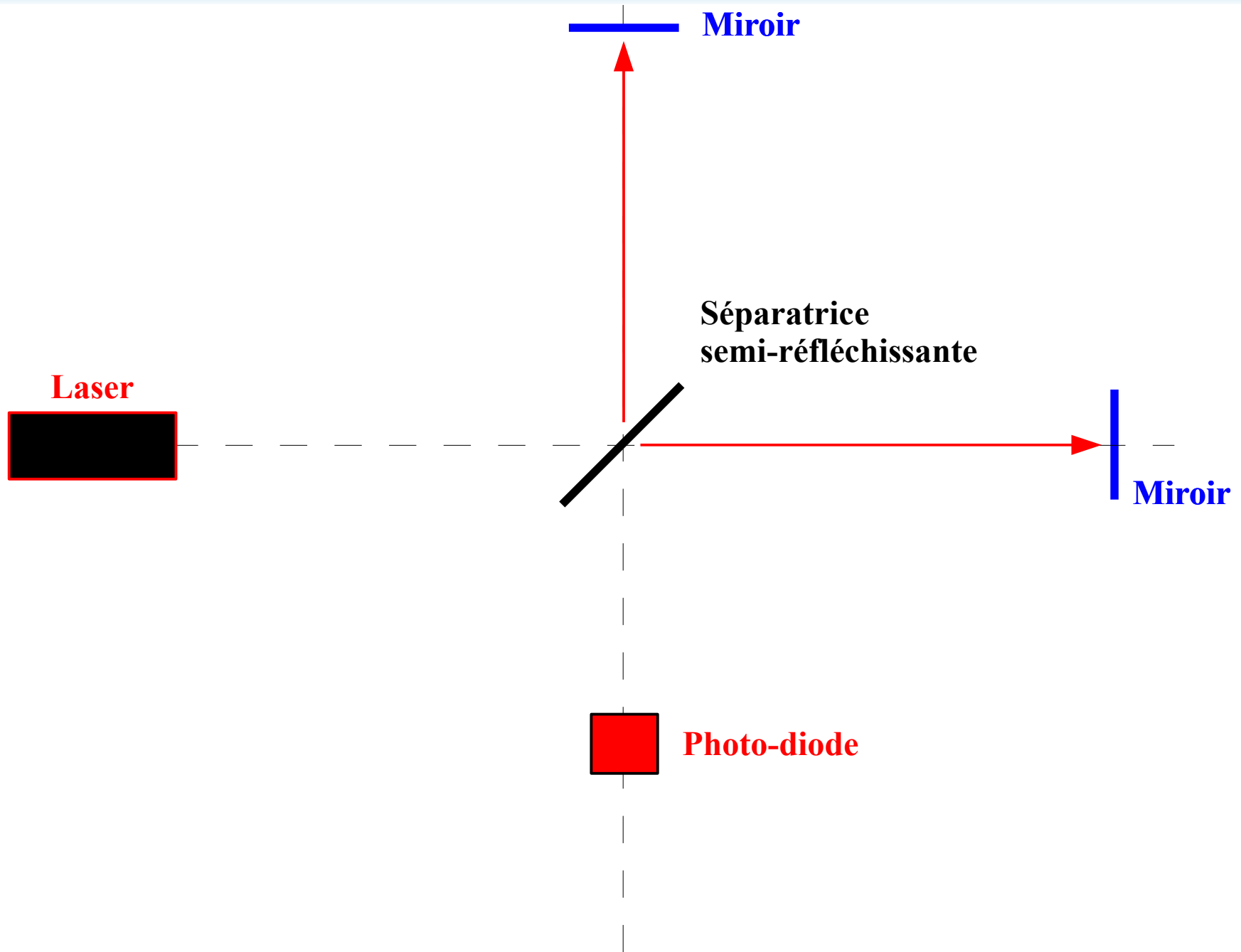
Franges d'interférence



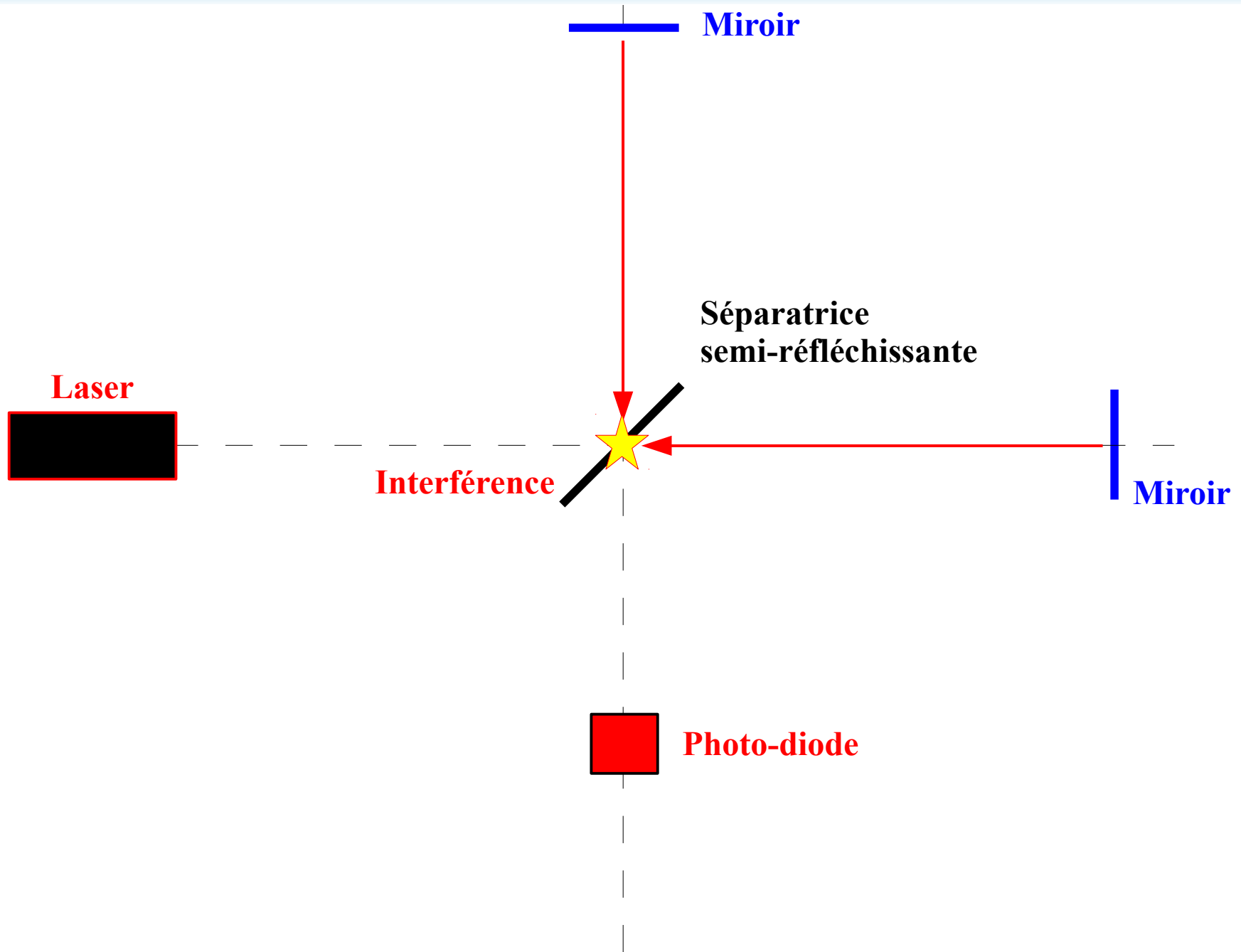
Interféromètre de Michelson



Interféromètre de Michelson



Interféromètre de Michelson



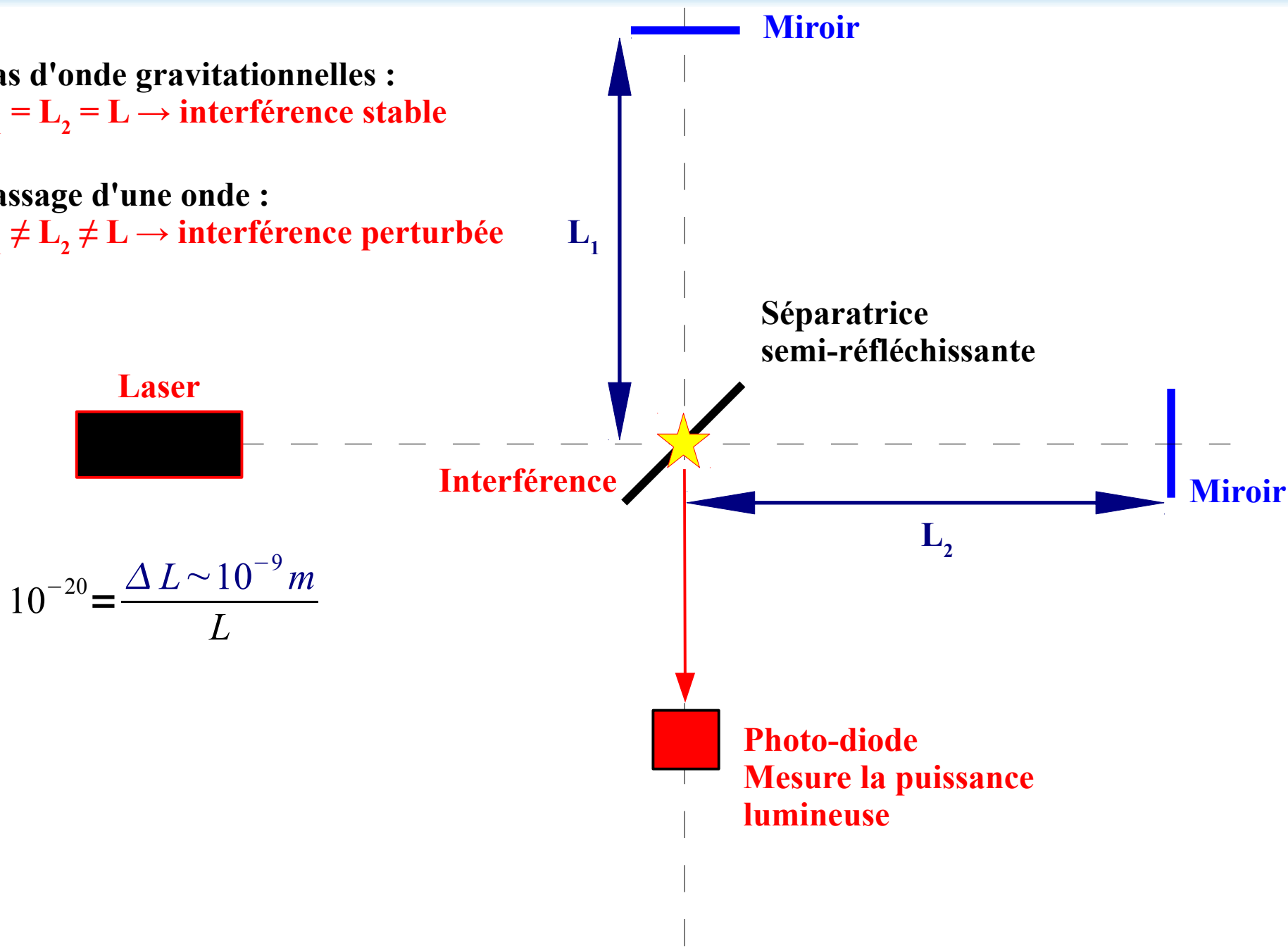
Interféromètre de Michelson

Pas d'onde gravitationnelles :

$L_1 = L_2 = L \rightarrow$ interférence stable

Passage d'une onde :

$L_1 \neq L_2 \neq L \rightarrow$ interférence perturbée



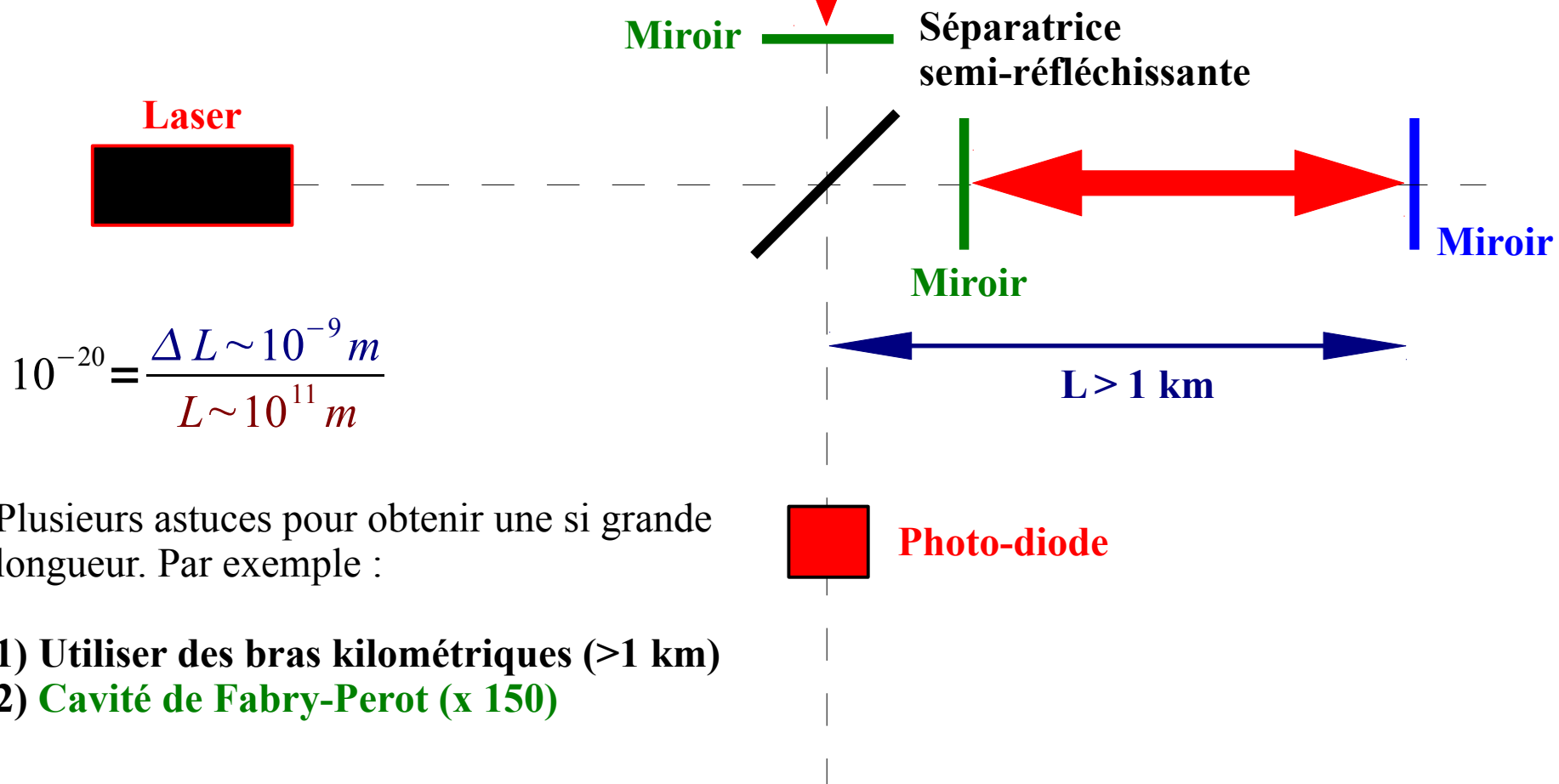
Interféromètre de Michelson

Pas d'onde gravitationnelles :

$L_1 = L_2 = L \rightarrow$ interférence stable

Passage d'une onde :

$L_1 \neq L_2 \neq L \rightarrow$ interférence perturbée

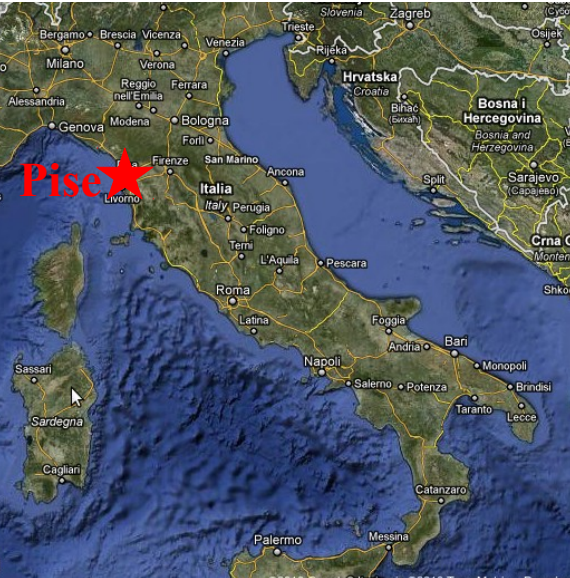


$$10^{-20} = \frac{\Delta L \sim 10^{-9} m}{L \sim 10^{11} m}$$

Plusieurs astuces pour obtenir une si grande longueur. Par exemple :

- 1) Utiliser des bras kilométriques (>1 km)
- 2) Cavité de Fabry-Perot (x 150)

L'interféromètre Virgo

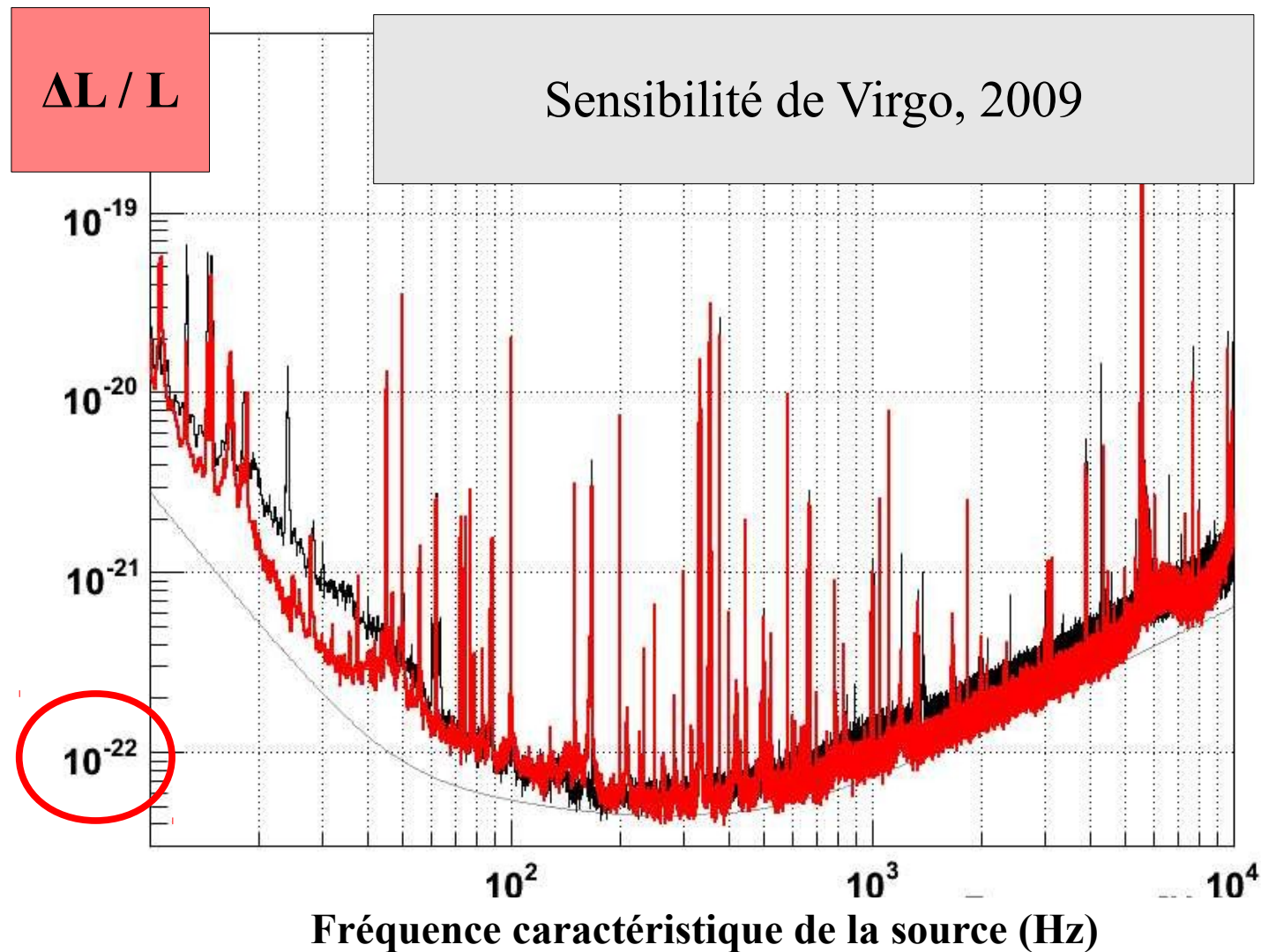


La Collaboration Virgo :

Collaboration France – Italie – Hollande – Pologne
~ 200 Physiciens / Ingénieurs
8 ans de développement
4 ans de construction
2 prises de données (2007 & 2009)



Sensibilité de Virgo



Que d'efforts pour parvenir à de telles performances !

Combattre le Bruit

Des super suspensions pour isoler les miroirs des bruits sismiques

L'objectif est de pouvoir isoler les bruits tels que :

- Les tremblements de terre
- Le ressac de la méditerranée
- Les avions survolant le site
- La mauvaise météo (vent, orage...)
- L'activité humaine
(heures de pointe : 8h, 12h, 14h et 18h. Calme le week-end)
- La voiture du gardien se garait près des tours

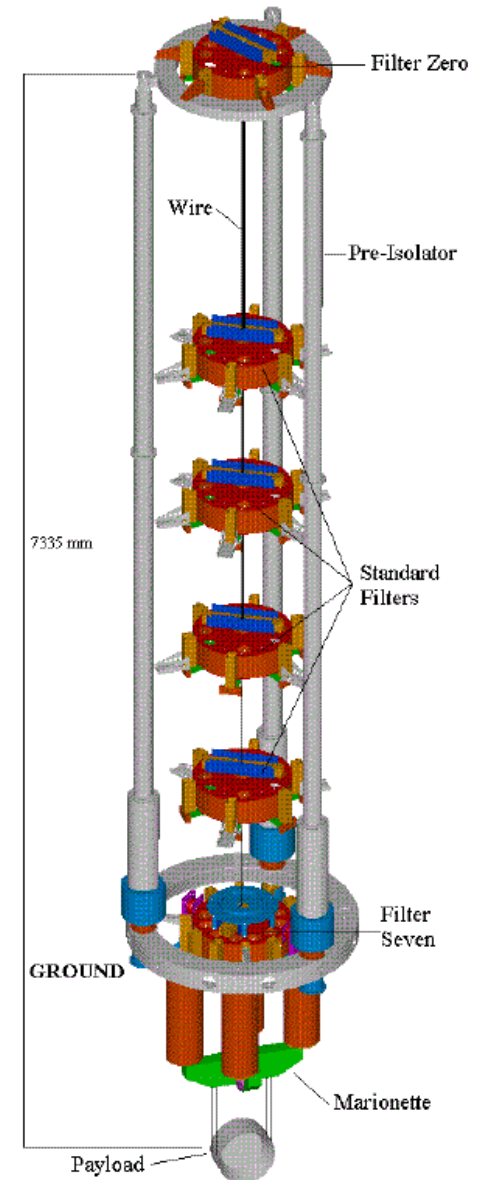
Les **super-atténuateurs** sont composés de 5 étages permettant d'atténuer le bruit sismique d'un facteur 10^{14} !



Science Académie



Florent Robinet



2 Mars 2010

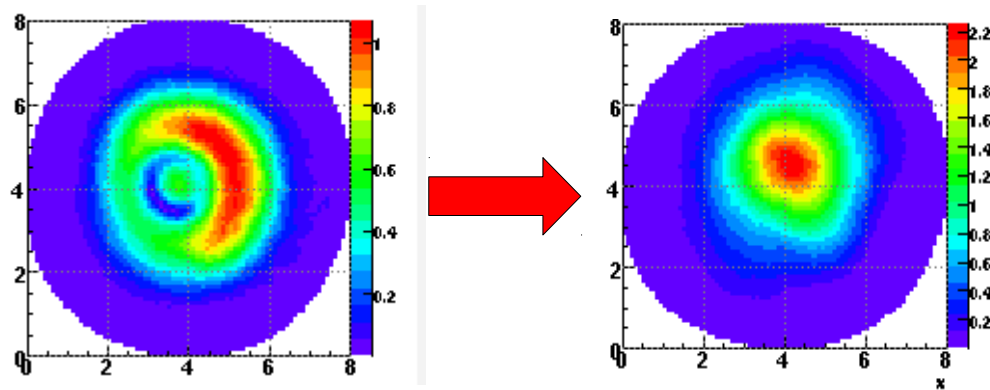
Combattre le Bruit

Combattre le bruit thermique

Les miroirs et les suspensions sont à température ambiante → agitation thermique

Assurer la stabilité mécanique des miroirs

Le laser chauffe les miroirs et peut les déformer → compensation

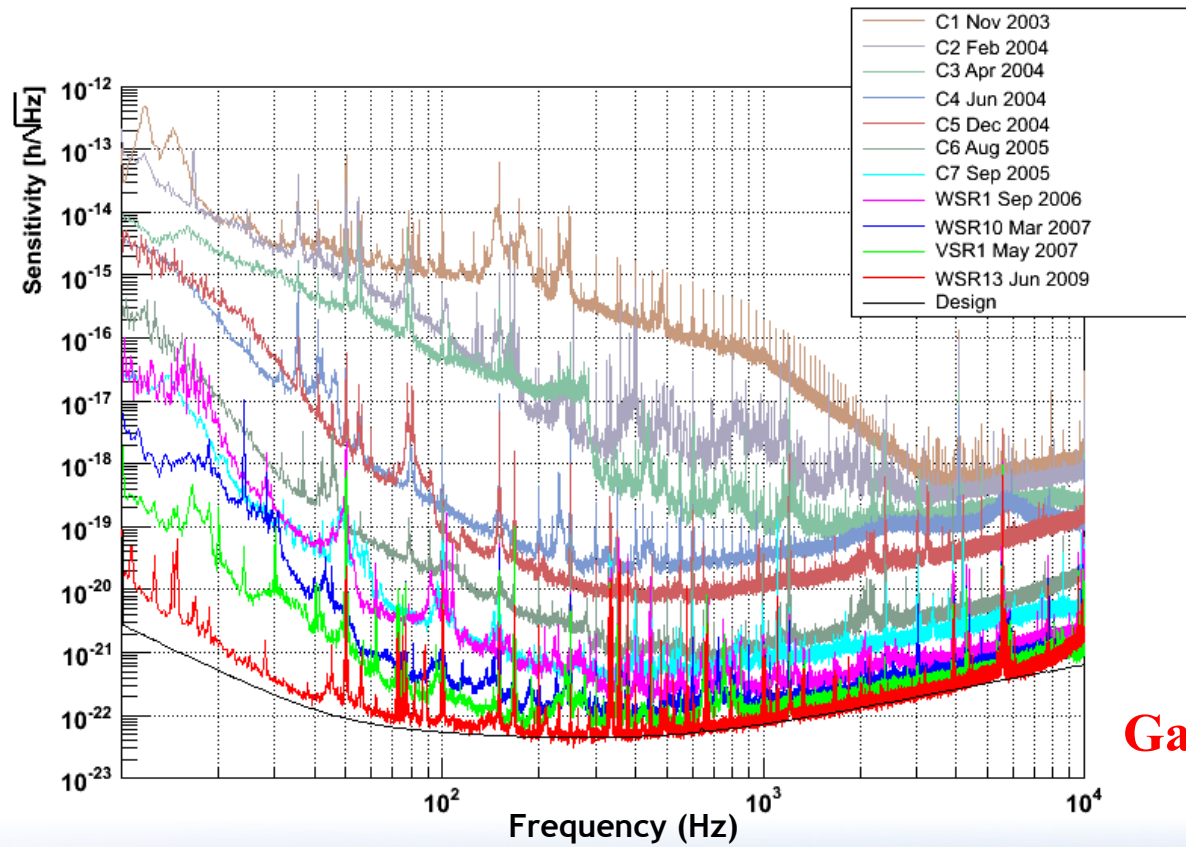


Maintenir l'ultra-vide dans tous les tubes (7000m³ !)

- Maintenir l'ultra-propreté des miroirs
- Ne pas perturber le trajet du laser (fluctuation de phase)



Combattre le Bruit



Gain d'un facteur 10 000 000 en 6 ans !



Virgo n'est pas seul au monde

Virgo (3 km)



Geo (600 m)



Livingston (4 km)



Hanford (4&2 km)

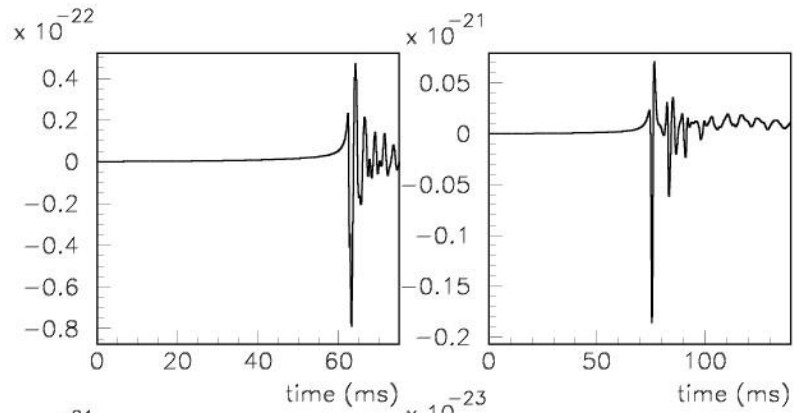
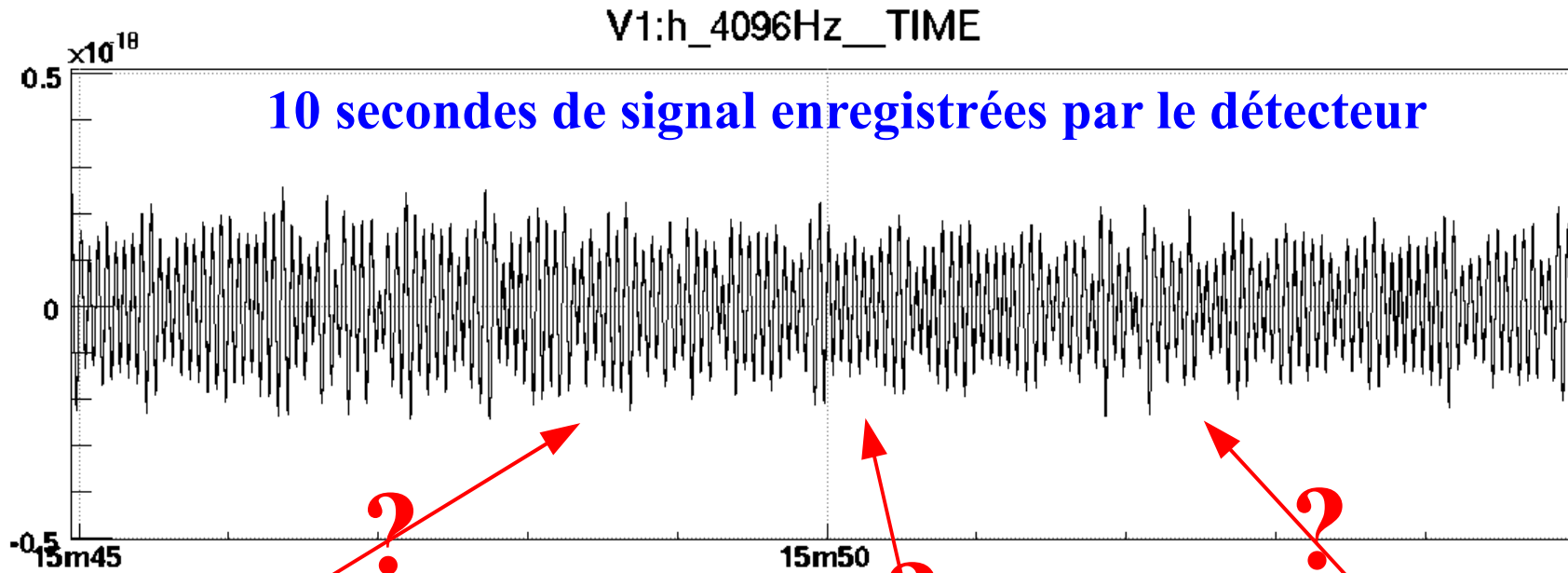


Virgo n'est pas seul au monde

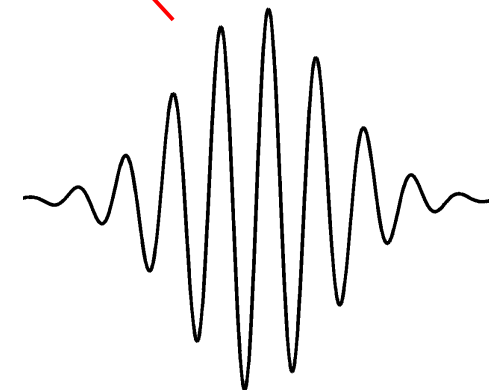
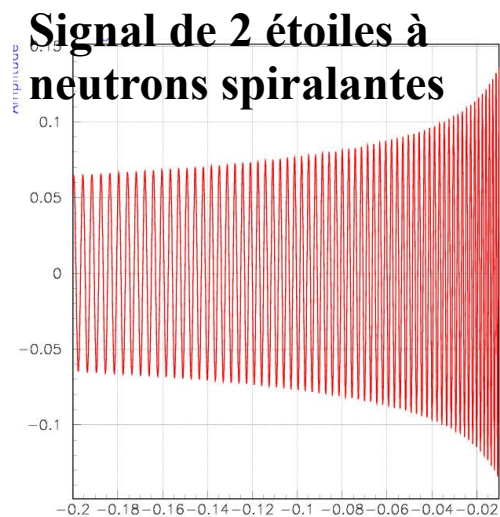
Avec 3 détecteurs le pointage par triangulation de la source est possible



Recherche d'un signal en "aveugle"



Signaux de supernova modélisés



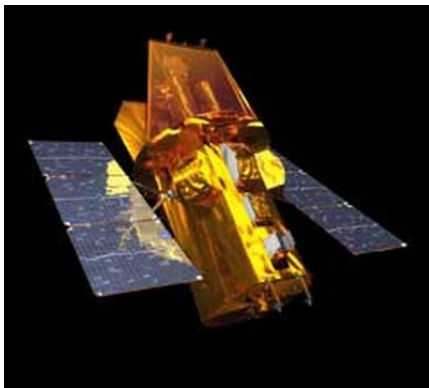
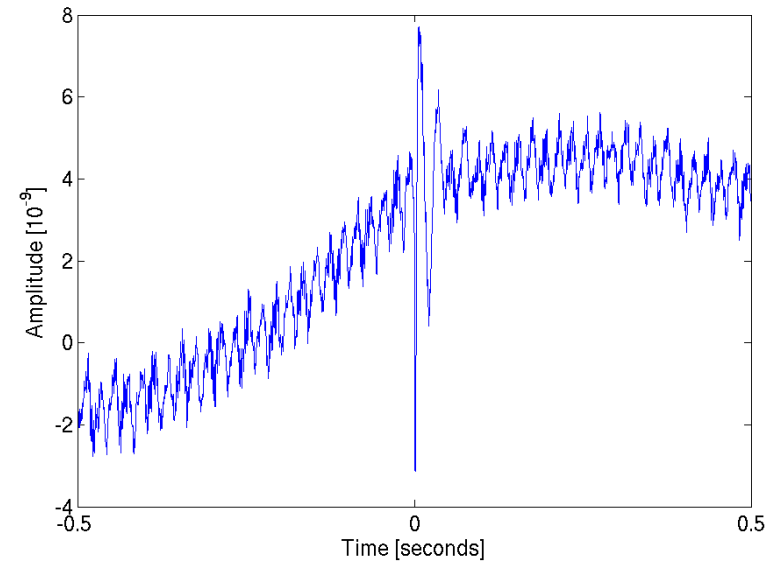
Signaux de forme générique

Les Fausses Alertes

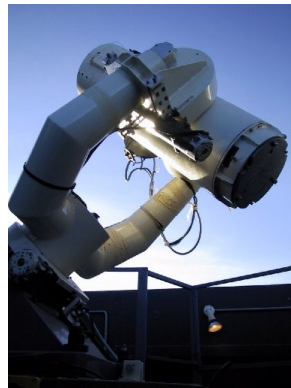
Les "signaux" détectés ne sont, **pour le moment**, que de fausses alertes (un gros bruit dans le détecteur)

Quelques astuces pour réduire le nombre de fausses alertes :

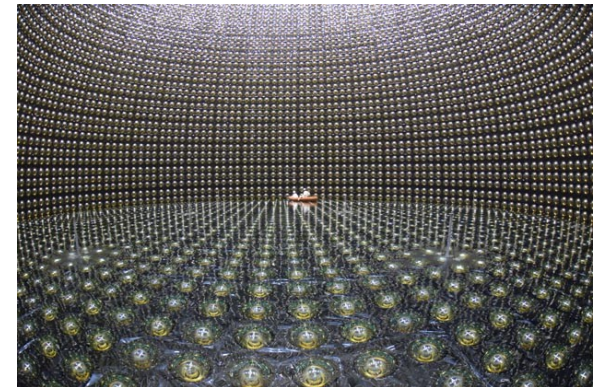
- Pour chaque détecteur des équipes de chercheurs sont chargées de **comprendre les bruits** dans les données et de **les isoler**
- Avec **plusieurs détecteurs**, il est possible de demander que le signal soit détecté par tous les détecteurs (*coïncidence*)
- Les recherches peuvent être menées en pointant directement sur un **objet dont la position et les caractéristiques sont connues** (pulsar, trou noir etc...)
- Les phénomènes astrophysiques à l'origine de l'émission d'ondes gravitationnelles sont souvent aussi **visibles par d'autres moyens** (télescopes, satellites, détecteurs de neutrinos...)



Science Académie



Florent Robinet

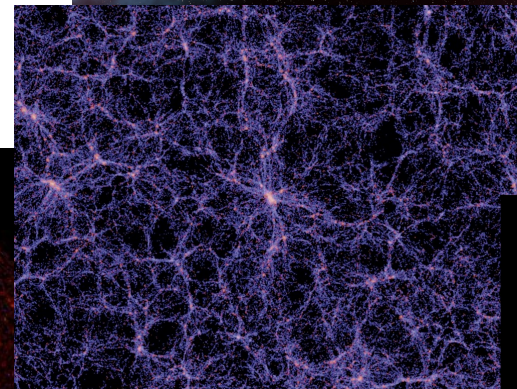
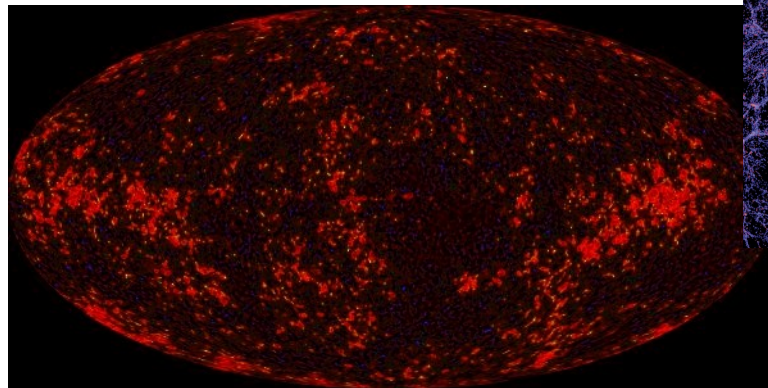
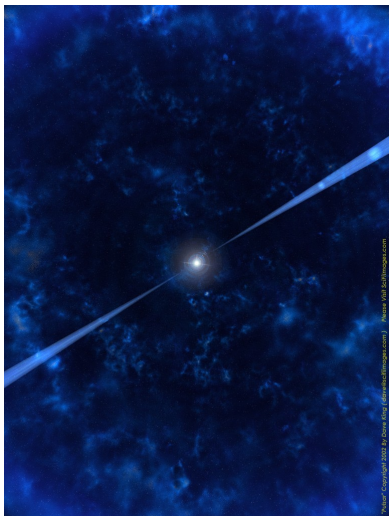
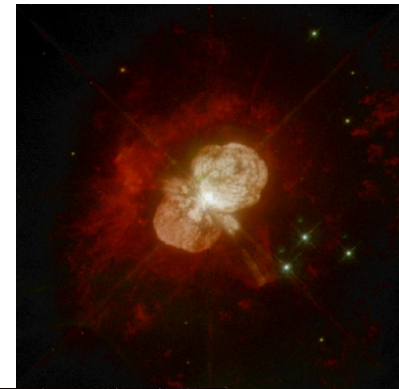


2 Mars 2010

Recherche d'un signal

Les signaux recherchés à LIGO-Virgo pourraient provenir de :

- Supernovæ (mais il faut qu'elle soit proche, ce qui est rare)
- Systèmes binaires (trou noir, étoile à neutrons)
- Pulsars (10^5 pulsars dans notre galaxie)
- Cordes cosmiques
- Fond stochastique (sources non résolues)
- Tout ce à quoi nous n'avons pas pensé...



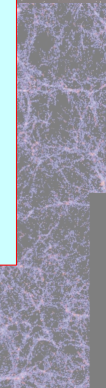
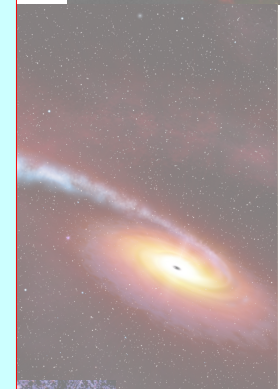
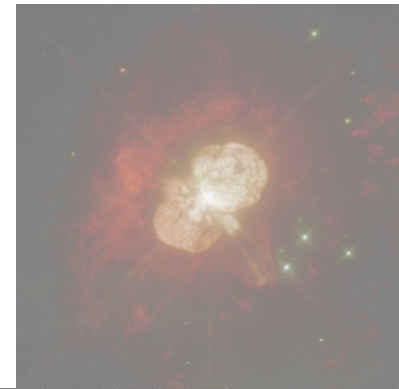
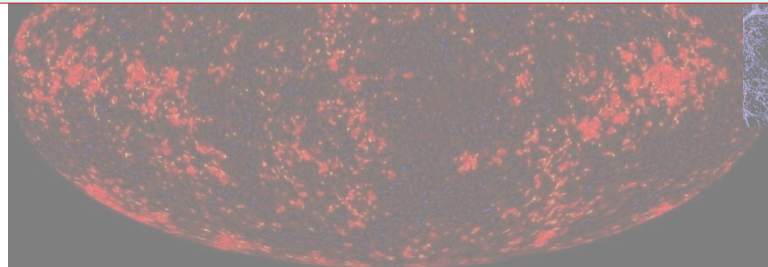
Recherche d'un signal

Les signaux recherchés à LIGO-Virgo pourraient provenir :

- Supernova (mais il faut qu'elle soit proche, ce qui est rare)
- Systèmes binaires
- Pulsars (10^{15} pu)
- Cordes cosmiques
- Fond stochastique
- Tout ce à quoi n

A l'heure actuelle aucune onde gravitationnelle n'a encore été détectée

Mais un résultat nul est un résultat intéressant en soit !

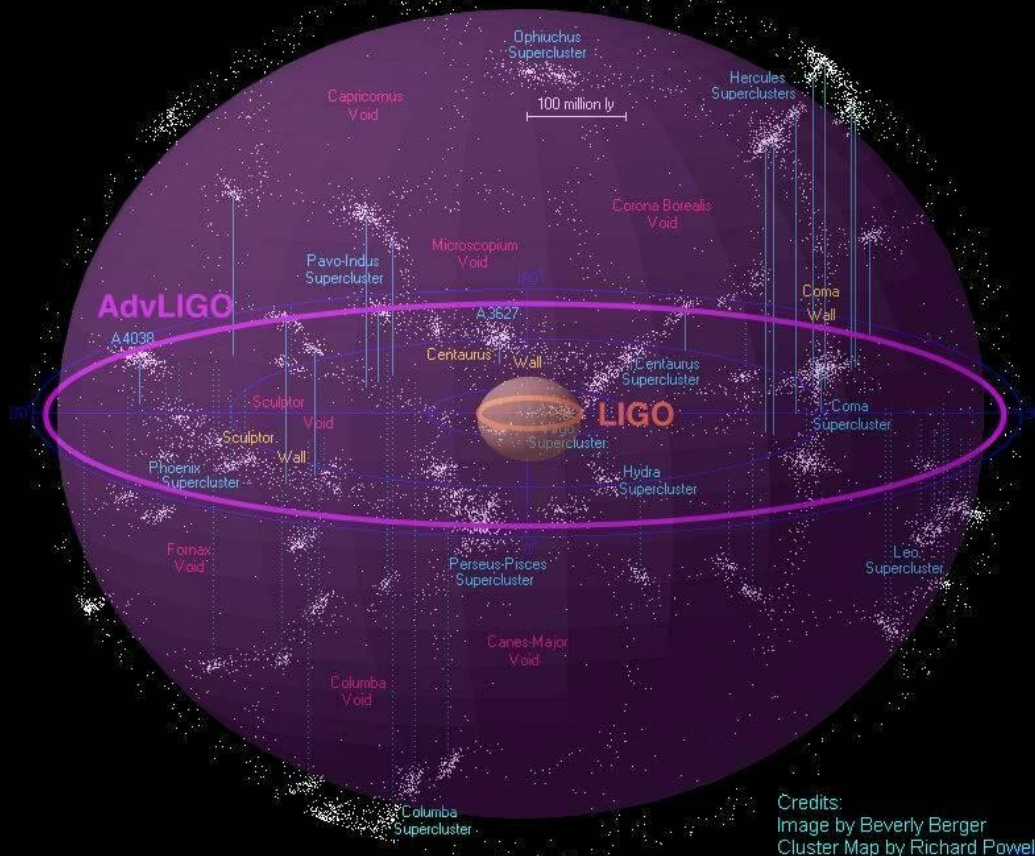


Le chemin vers une Détection

Les détecteurs actuels (1^{ère} génération) ont été conçus avec une chance de détection non nulle mais faible

Les détecteurs de 2^{ème} génération sont déjà en préparation. Le principe reste le même mais les technologies employées sont beaucoup plus performantes : La sensibilité sera 10 fois meilleure, les instruments porteront donc **10 fois plus loin**

Advanced Virgo et Advanced LIGO (2014)



Probabilité de détection :

Système de 2 étoiles à neutron

Virgo : ~1 en 100 ans

Adv Virgo : ~10 en 1 an

Système de 2 trous noirs

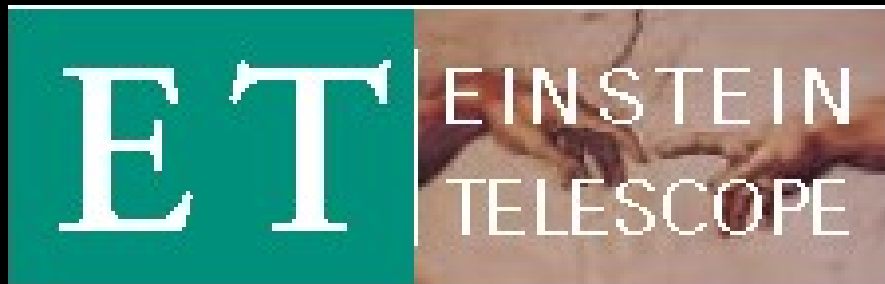
Adv Virgo : 1-50 en 1 an

Advanced Virgo & LIGO devraient détecter la première onde gravitationnelle !

Les Ondes Gravitationnelles dans le Futur

Astronomie en ondes gravitationnelles pour étudier la physique des sources d'une manière inédite

> 2020



LISA : Laser Interferometer Space Antenna

