

A L'ÉCOUTE DE L'UNIVERS : SOURCES ET DÉTECTEURS D'ONDES GRAVITATIONNELLES ...

Hubert Halloin - APC / Univ. Paris Diderot
hubert.halloin@apc.univ-paris-diderot.fr

Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

- Un peu d'histoire

- Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

- Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

- Petit détour électromagnétique

- Au commencement était l'onde ...

- Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

- David (perd) contre Goliath

- Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

- L'Univers émet en radio

- Des diapasons bien accordés

- Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

- Quitter la Terre

Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

Un peu d'histoire

Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

Petit détour électromagnétique

Au commencement était l'onde ...

Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

David (perd) contre Goliath

Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

L'Univers émet en radio

Des diapasons bien accordés

Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

Quitter la Terre

Newton, Einstein et les autres



Isaac Newton (1687) : la gravité est une force centrale, instantanée, variant comme l'inverse du carré de la distance.
L'orbite d'un corps autour d'un autre est une ellipse, indéfiniment répétée...
théorie simple et remarquablement précise dans 99,9999% des cas...

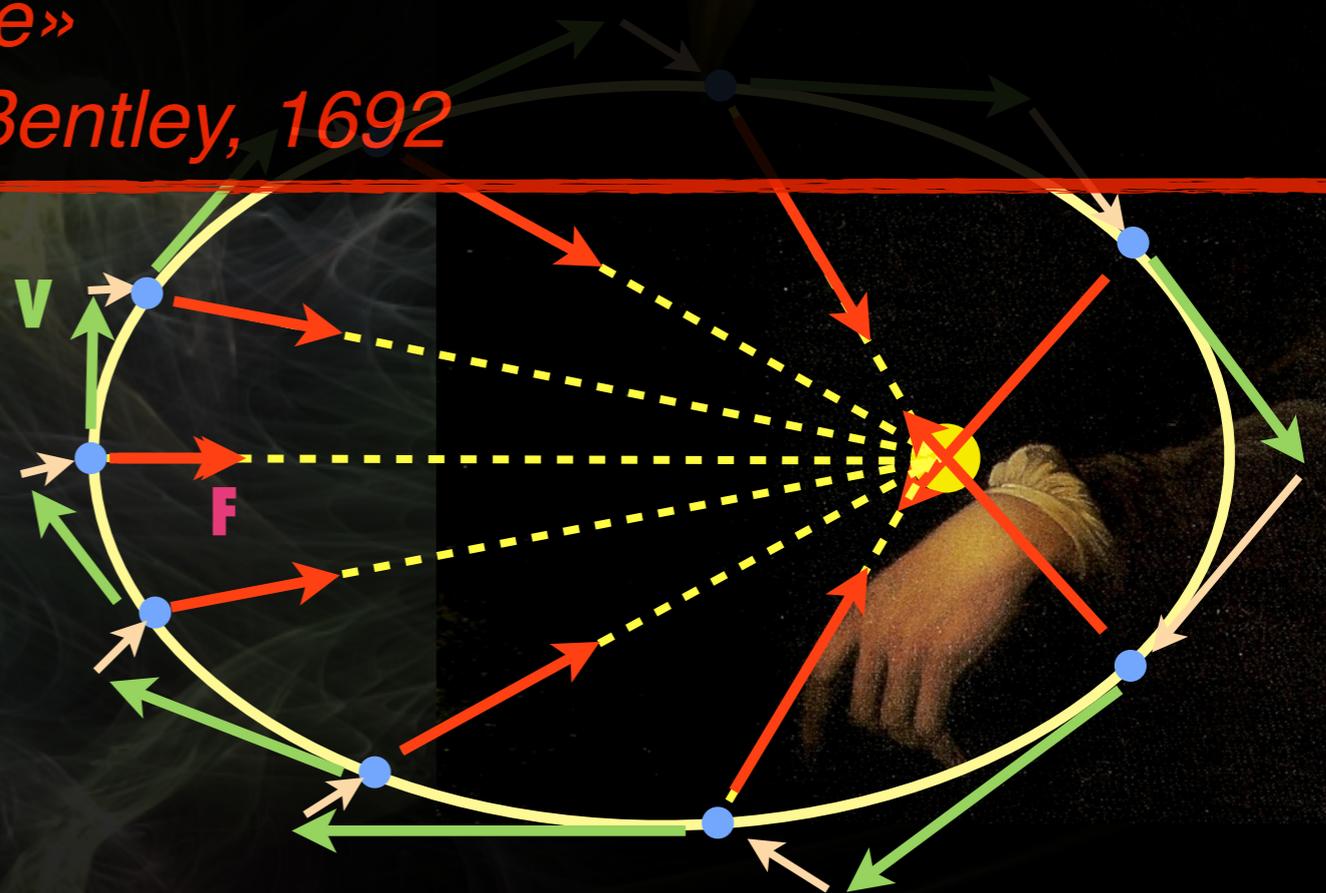
«Que la gravité soit innée, inhérente et essentielle à la matière, en sorte qu'un corps puisse agir sur un autre à distance au travers du vide, sans médiation d'autre chose, par quoi et à travers quoi leur action et force puissent être communiquées de l'un à l'autre est pour moi une absurdité dont je crois qu'aucun homme, ayant la faculté de raisonner de façon compétente dans les matières philosophiques, puisse jamais se rendre coupable»

Isaac Newton, Lettre à Richard Bentley, 1692

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

Variations spatiales
du potentiel

Distribution de
masse



Newton, Einstein et les autres



Pierre Simon de Laplace (1805) : et si la force de gravité se propageait à vitesse finie ?
 « Si la gravitation était produite par l'impulsion d'un fluide vers le centre du corps attirant, l'analyse précédente [...] donnerait l'équation séculaire due à la transmission successive de la force attractive. [...] En appliquant les nombres à cette expression [...], on trouve la vitesse du fluide gravifique environ sept millions de fois plus grande que celle de la lumière. »

Pierre Simon de Laplace, *Traité de Mécanique Céleste, Volume IV, Livre X, Paragraphe 22, 1805*

peut s'en échapper ... c.a.d des trous noirs ...

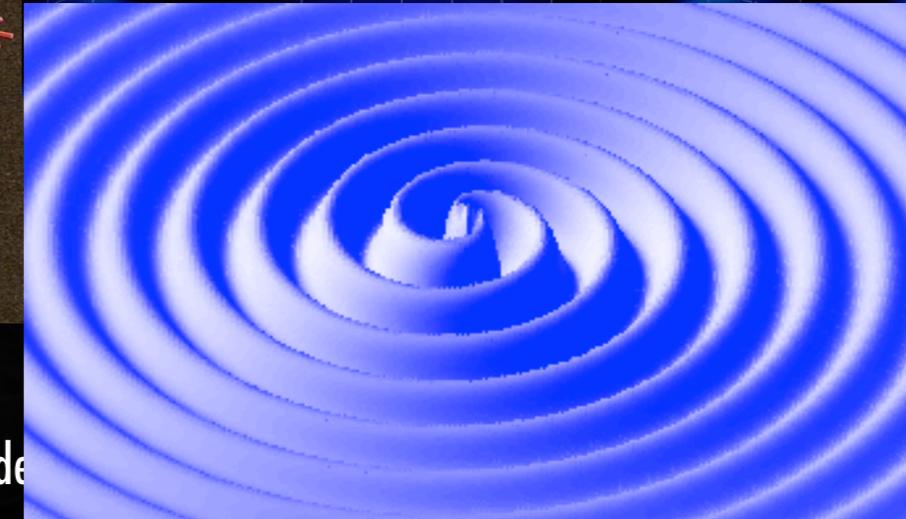
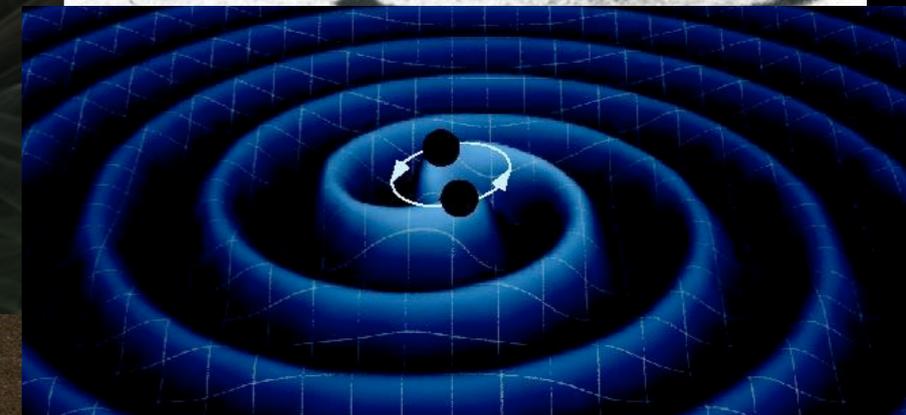
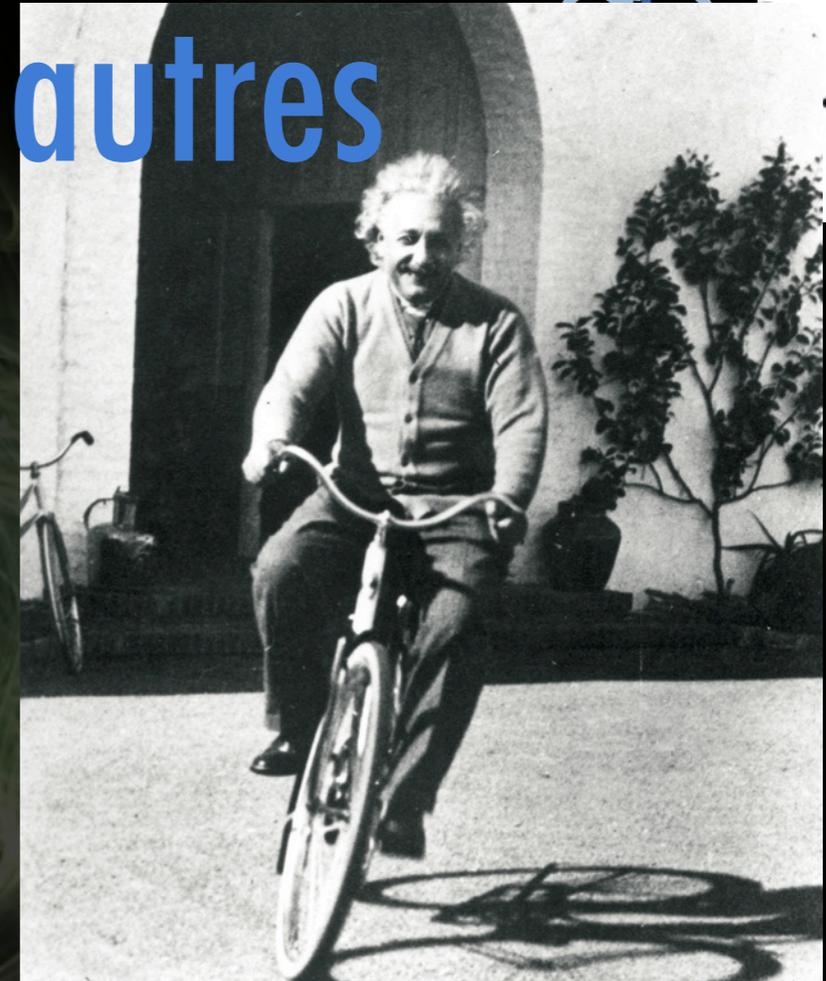
$\nabla^2 \phi$	-	$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}$	=	$4\pi G \rho$
Variations spatiales du potentiel		Variations temporelles du potentiel (onde)		Distribution de masse



Newton, Einstein et les autres

Albert Einstein (1905/1916) : la force de gravité n'existe pas ...

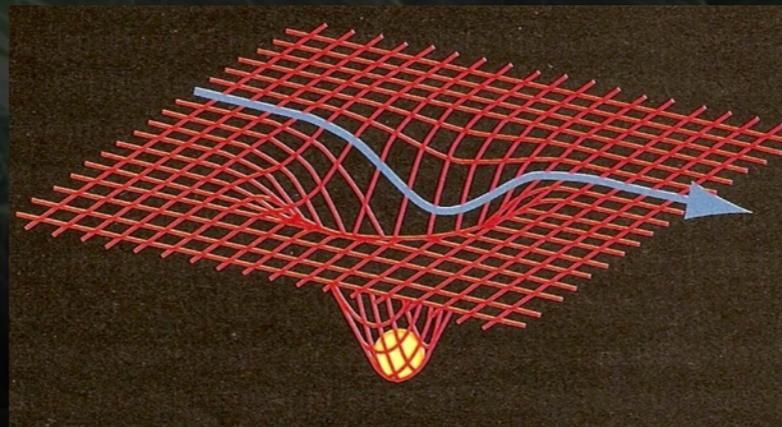
- Une masse déforme la géométrie de l'espace-temps
- Les corps se déplacent en ligne droite ... dans un espace courbe
- L'information gravitationnelle se propage à la vitesse de la lumière
- La dissipation d'énergie se fait par déformation de l'espace-temps : production d'une onde gravitationnelle



$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Déformations géométriques

Distribution d'énergie (dont les masses ...)



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— **Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?**

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— Quitter la Terre

Pourquoi les mesurer ?



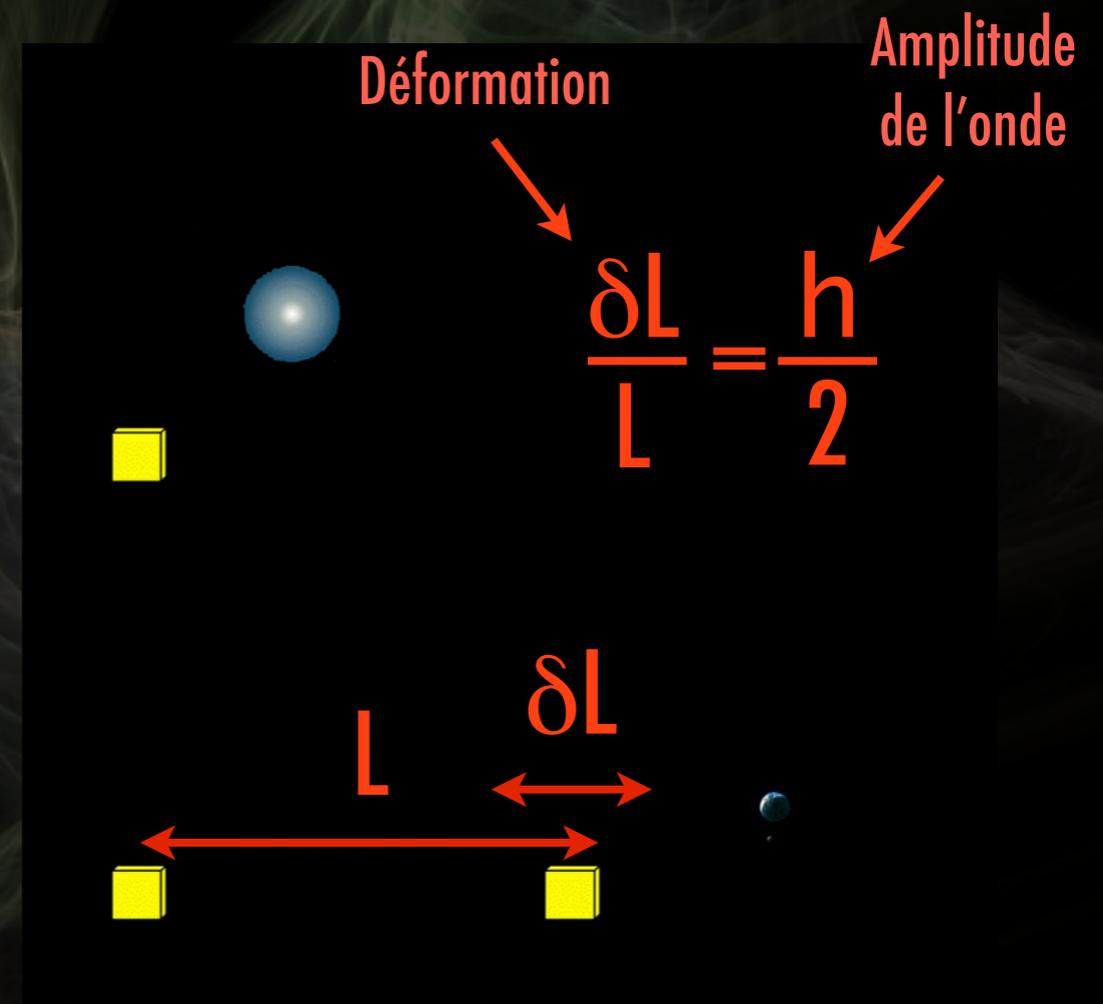
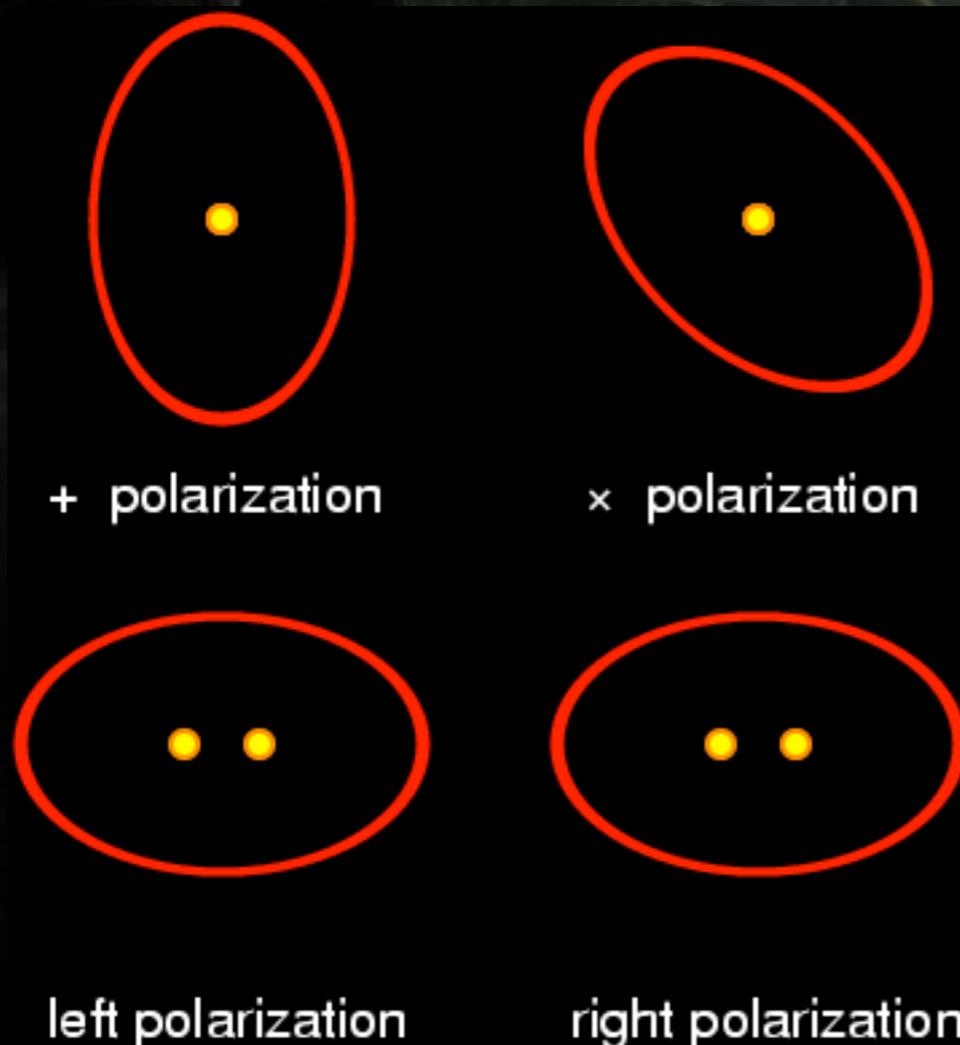
- [**Tester les fondements de théorie de la relativité générale**
 - Les trous noirs existent-ils (tels que prédits par la RG) ?
 - Si oui, un trou noir a-t-il des cheveux ?
- [**Notre compréhension des stades ultimes des étoiles massives est-elle correcte ?**
 - Avec quelle fréquence se forment les astres compacts (trous noirs, étoiles à neutrons, naines blanches, etc.) ?
 - Comment et quand dans l'histoire de l'Univers sont-ils apparus ?
- [**Contraindre les modèles cosmologiques et de la physique fondamentale**
- [**Ouvrir une nouvelle fenêtre d'observation sur l'Univers (avec toutes ses inconnues...)**

Effet d'une onde gravitationnelle

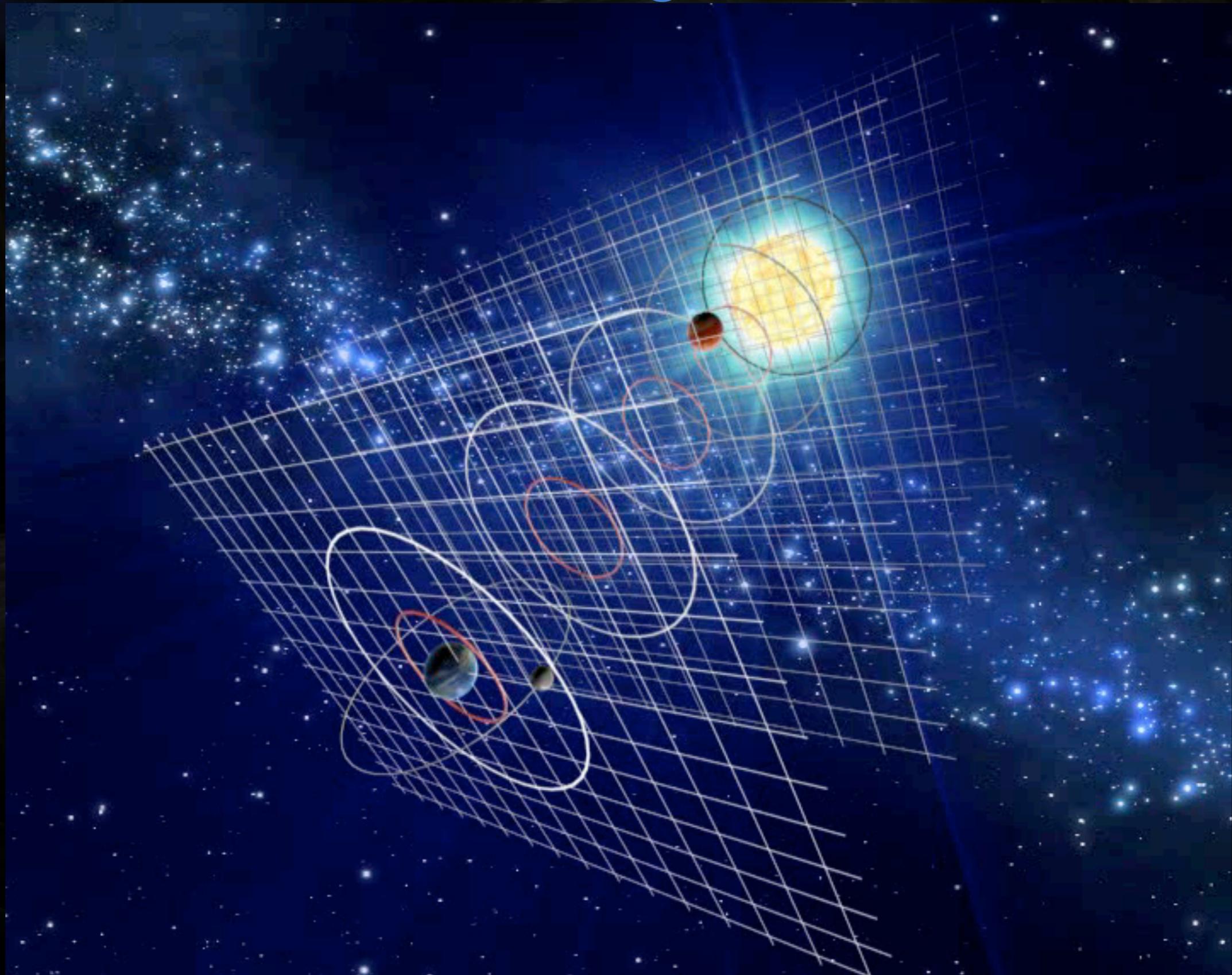


[Modification de la distance lumière mesurée entre 2 objets

- déformation élastique c.à.d proportionnelle à la distance entre les objets
- déformation transverse c.à.d dans le plan perpendiculaire à la propagation (différent des rides sur l'eau !)



Effet d'une onde gravitationnelle



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— Quitter la Terre

Pour fixer les idées ...



— [Considérons une source de masse M , soumise à une vitesse v (composante non sphérique), observée à une distance r

— amplitude de la déformation observée :

G : constante de gravitation ($\approx 6,7 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$)

c : vitesse de la lumière ($\approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

$$h \approx \frac{2GMv^2}{rc^4}$$

3x distance
Terre-Lune

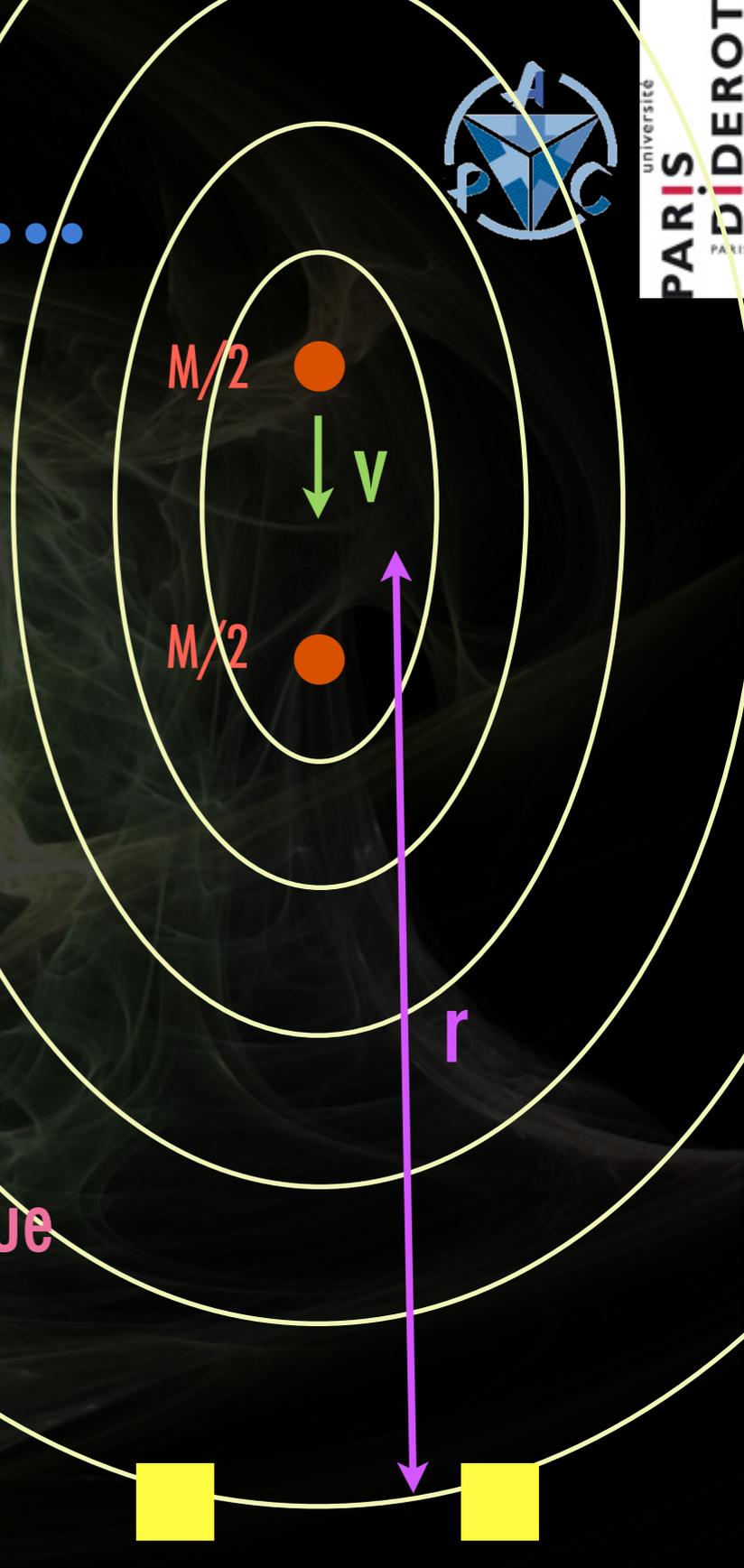
Distance au
centre galactique

$$\approx 1 \text{ pm} / \text{Mkm} \frac{M}{M_{\text{Soleil}}} \left(\frac{v}{0,01c} \right)^2 \frac{30 \text{ kal}}{r}$$

Diamètre

d'un atome / 100

Vitesse de la lumière / 100



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

- Un peu d'histoire

- Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

- Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

- **Petit détour électromagnétique**

- Au commencement était l'onde ...

- Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

- David (perd) contre Goliath

- Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

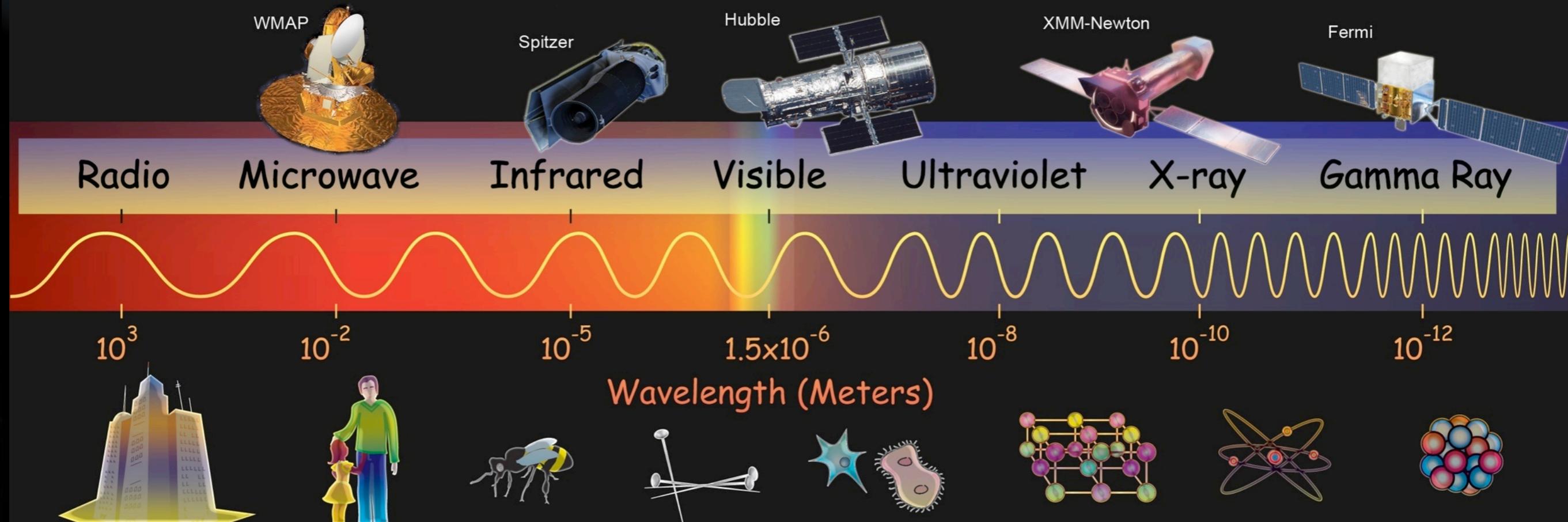
- L'Univers émet en radio

- Des diapasons bien accordés

- Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

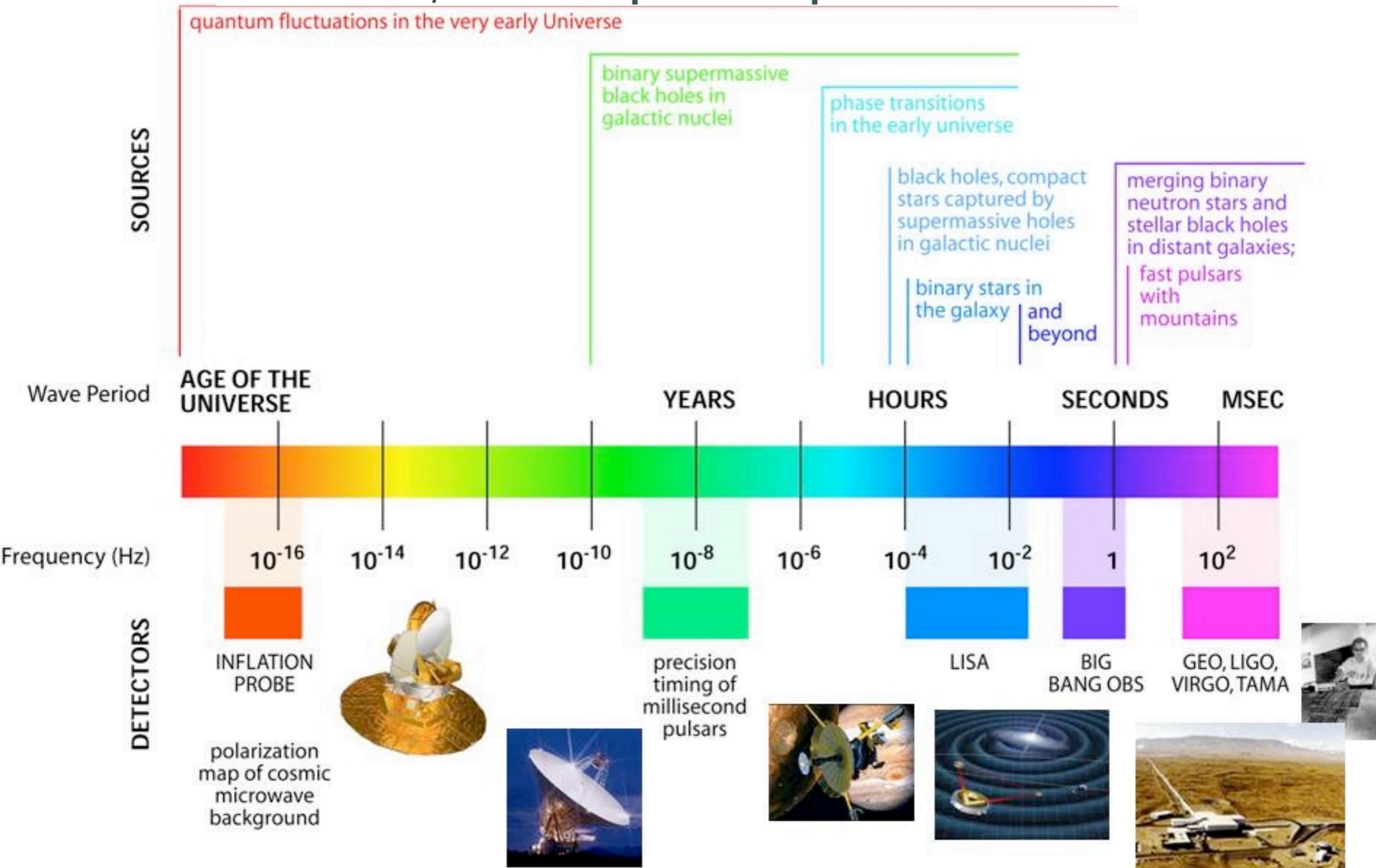
- Quitter la Terre

Le spectre électromagnétique



Il existe des instruments pour observer l'Univers des ondes kilométriques jusqu'à l'attomètre (10^{-18} m) : 21 ordres de grandeur ...

L'étendue spectrale des ondes gravitationnelles est comparable aux ondes EM, mais inexploitée aujourd'hui ...



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— **Au commencement était l'onde ...**

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— Quitter la Terre

L'univers primordial



Le modèle standard de la cosmologie :

L'Univers est né d'une singularité, il y a 13,8 milliards d'années

L'Univers est en expansion

les Galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse proportionnelle à la distance les séparant (comme des points à la surface d'un ballon)

cette vitesse augmente (accélération de l'expansion), vitesse actuelle (constante de Hubble) : 22 km/s/Mal

L'Univers est géométriquement plat

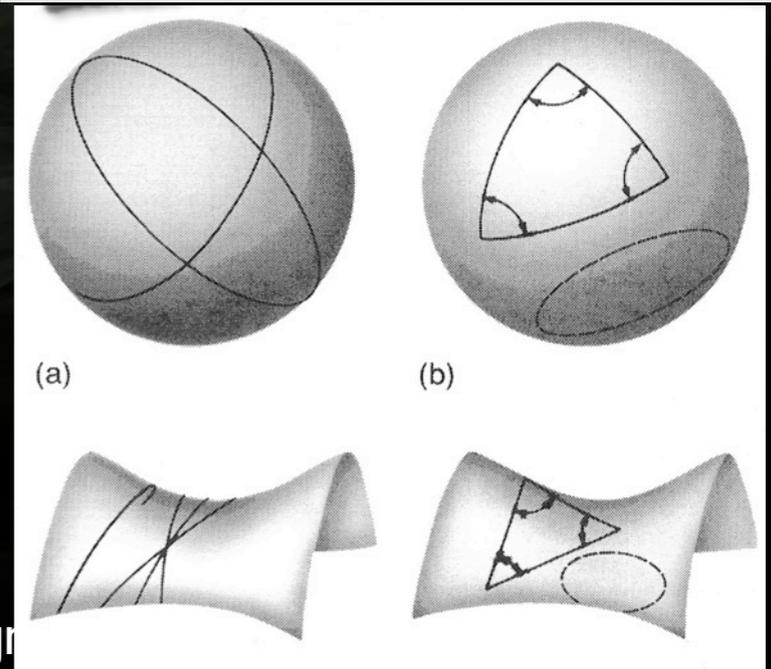
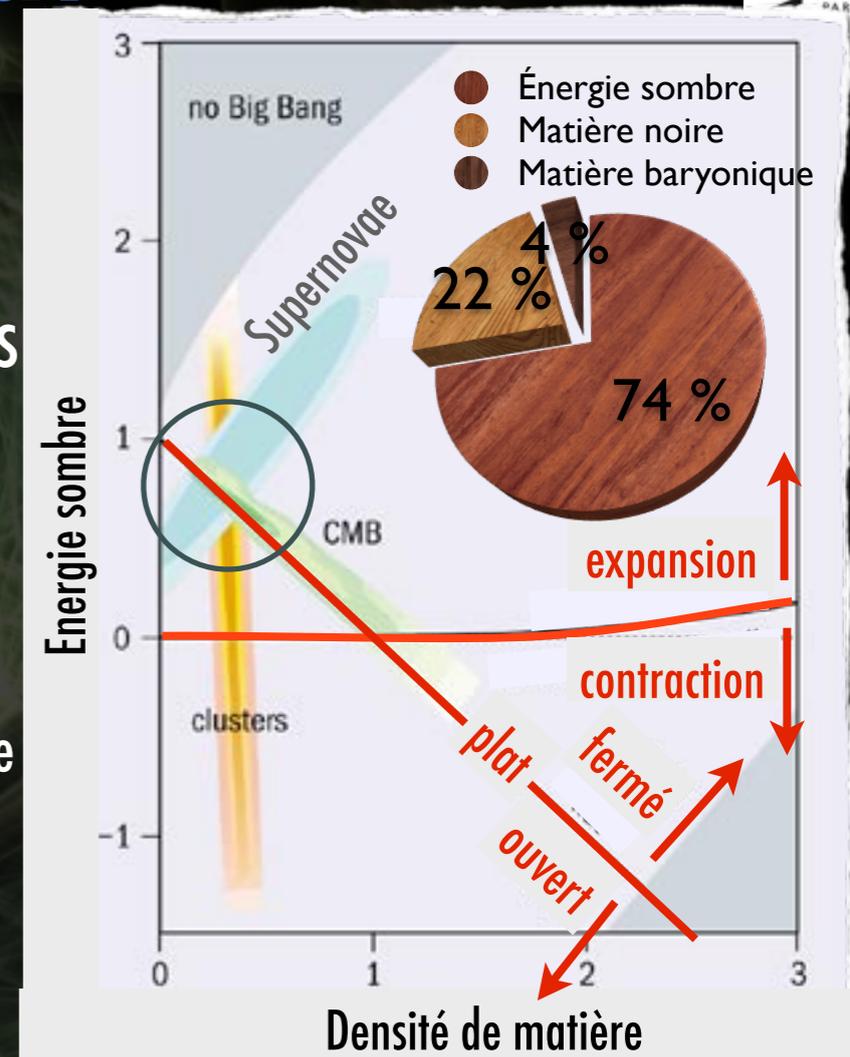
Soit une droite et un point distinct, il passe une, et une seule, droite parallèle à cette droite en ce point (postulat d'Euclide)...

Ni une sphère (aucune parallèle), ni une 'selle de cheval' (plusieurs parallèles) ...

96 % de la nature de l'Univers nous est inconnue

74% énergie sombre (constante cosmologique)

22% matière noire



L'univers primordial



- [Le modèle de big-bang «standard» pose 2 problèmes :
- problème de l'horizon : Pourquoi l'Univers est-il si homogène ?
- problème de platitude : Pourquoi l'Univers est-il géométriquement plat ?

L'univers primordial



Problème de l'Horizon

Le rayonnement de fond «cosmologique» :

Entre $t=0$ et $t \approx 300\,000$ ans, la température est très élevée, les électrons et les protons sont libres : les photons sont sans cesse absorbés et réémis, l'Univers est opaque.

A $t \approx 380\,000$ ans, la température chute à $\sim 3\,000$ K, les électrons s'associent aux protons (formation des premiers atomes) : les photons se déplacent librement, l'Univers est subitement transparent.

Ce «flash» est la plus ancienne lumière détectée par les astrophysiciens : il est remarquablement uniforme sur tout le ciel (variations de l'ordre de 1 pour 100 000 !)

Problème de causalité ... :

Aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière. Le fond cosmologique ne devrait donc pas être homogène sur une taille supérieure à 1 degré (taille de l'«horizon» au moment du découplage) !

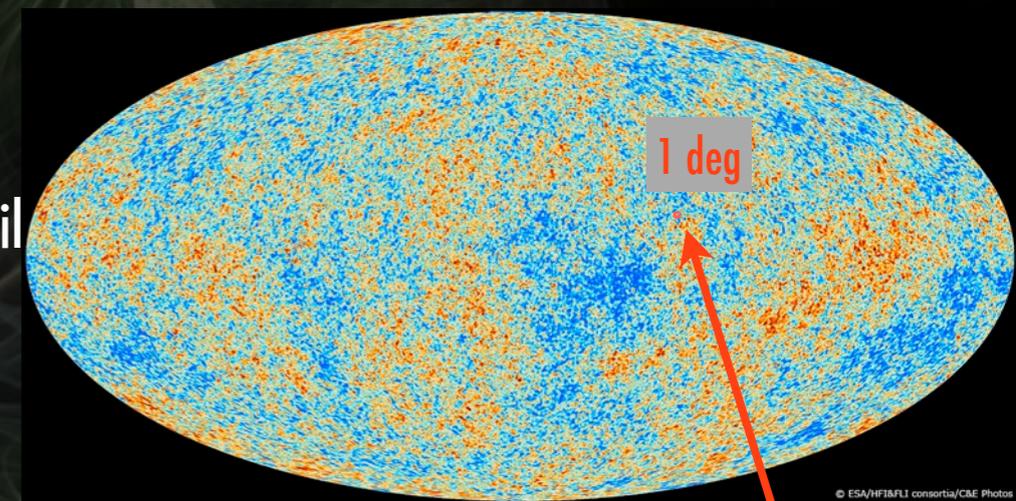
Comment des zones déconnectées se sont-elles thermalisées ?

Solution : l'Inflation !

photon

noyaux

électrons



L'univers primordial



Problème de «platitude»

Pourquoi un univers plat ($\Omega=1$) plutôt que toute autre valeur ?

L'état $\Omega=1$ est «instable»

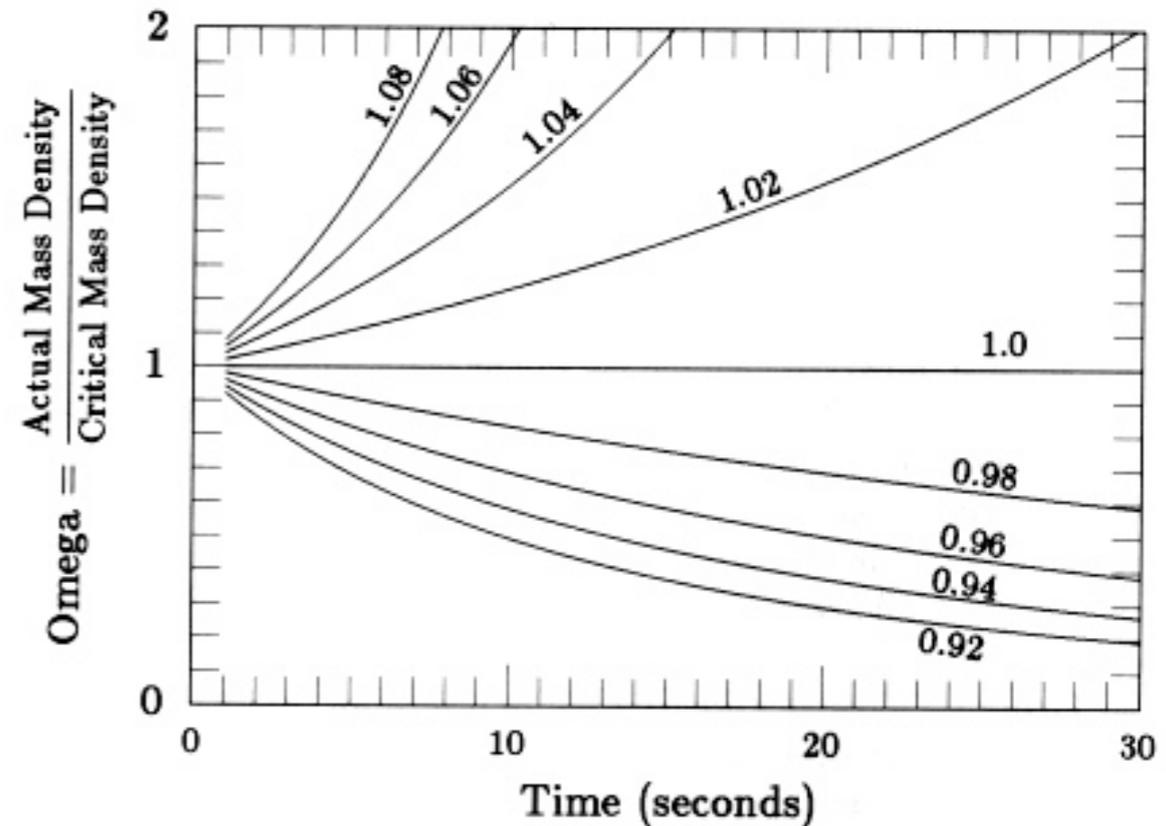
Tout écart à la platitude s'amplifie exponentiellement avec le temps

Aujourd'hui on mesure $\Omega=1$ à 1% près

A $t=10^{-43}$ s (origine des temps) : $|\Omega-1| < 10^{-60}$!

Comment garantir $\Omega=1$ à l'origine ?

Solution : l'Inflation !



L'univers primordial

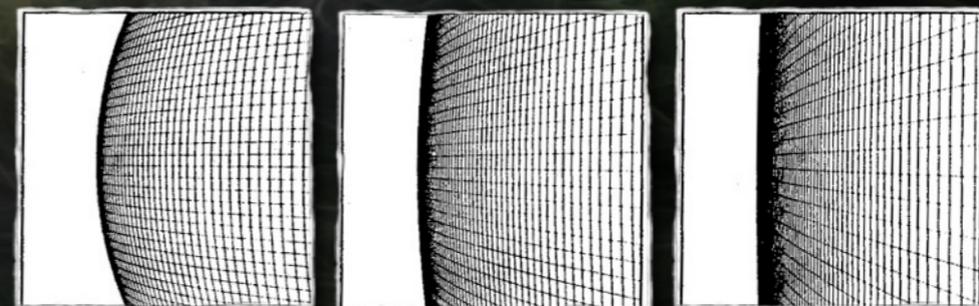
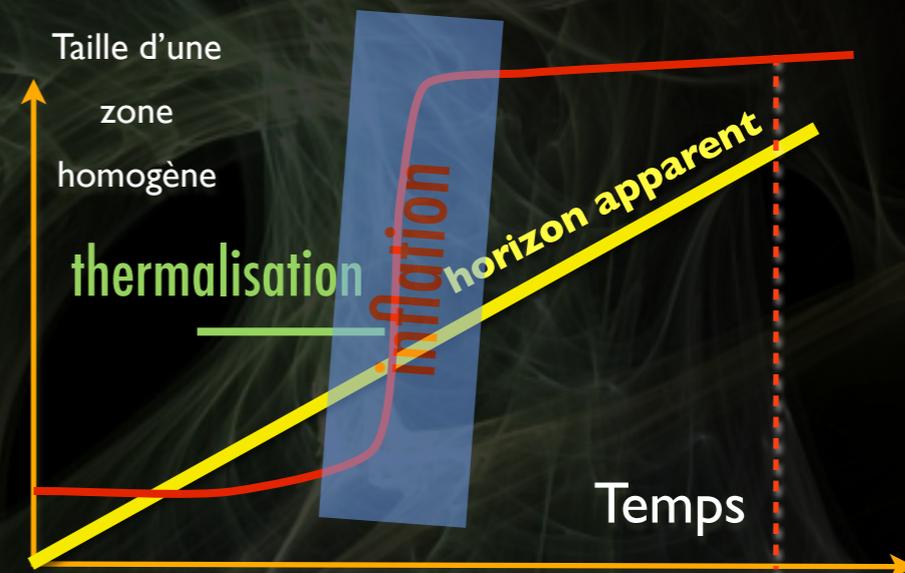


L'inflation :

entre $t=10^{-35}$ s et $t=10^{-33}$ s, l'Univers aurait subi une dilatation d'un facteur 10^{30} (1 000 000 000 000 000 000 000 000 000 000) !

2 zones éloignées furent donc suffisamment proches pour s'équilibrer

la dilatation a «annulé» toute courbure initiale pour donner un Univers plat



L'univers primordial



Observations

Quelques conséquences (heureuses) de l'inflation

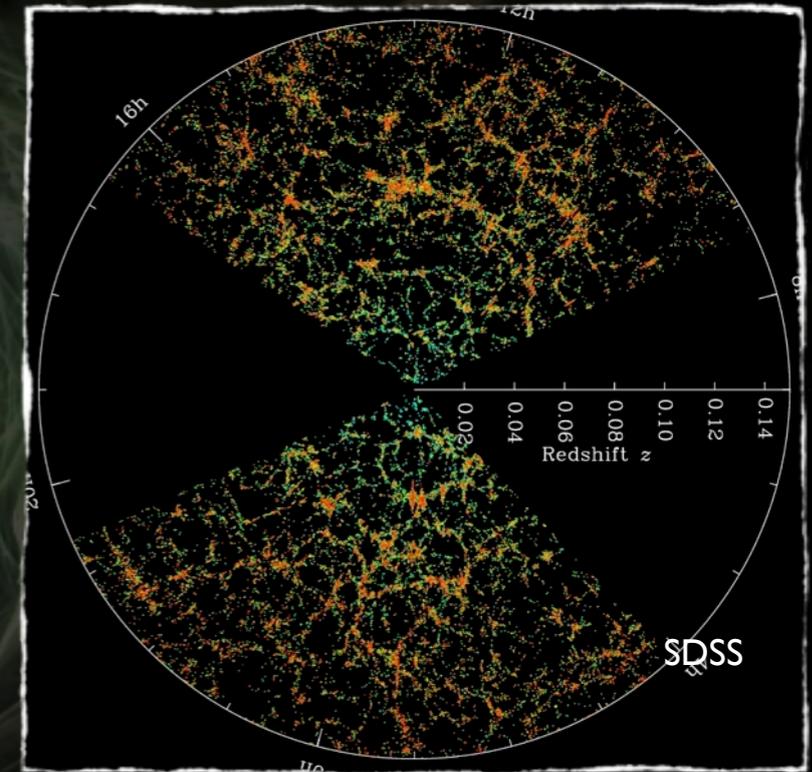
— l'inflation serait due à un «champ» associé à une «particule» : l'inflaton (comme le champ de gravitation est associé au graviton).

— Les fluctuations quantiques du potentiel de l'inflaton sont «grossies» par l'inflation : «grumeaux» à l'origine des structures astrophysiques (galaxies, amas, filaments) actuelles.

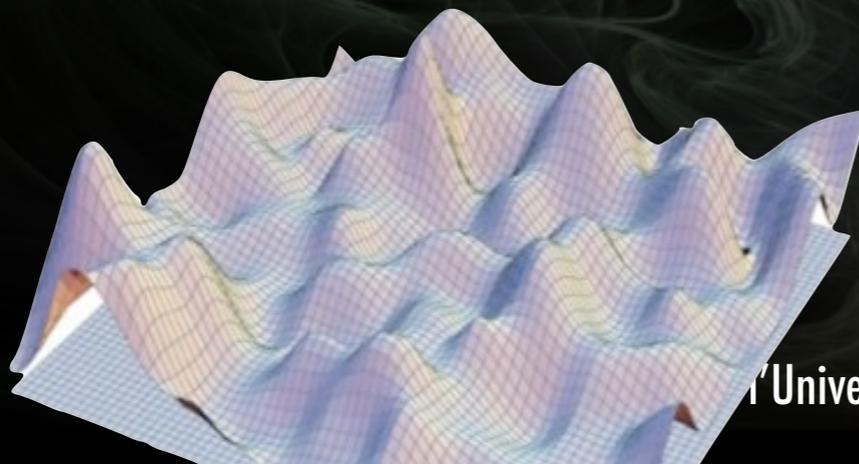
— Ces fluctuations, comme la décroissance explosive, de l'inflaton ont produit des ondes gravitationnelles «primordiales»

— ondes de fréquences (périodes) entre 10^{-10} Hz (320 ans) et 10^{10} Hz (0,1 ns) !

— sur leur parcours jusqu'à nous, ces OG induisent (indirectement) une polarisation spécifique du fond cosmologique (modes 'B').



Simulations



S. Colombi (IAP)

Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— **Quand un trou noir rencontre un autre trou noir**

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— Quitter la Terre

Coalescence de trous noirs supermassifs



On pense qu'il existe un trou noir supermassif au centre de chaque galaxie

Exemple : au centre de la Voie Lactée (notre galaxie...), un TN de 5 millions de masses solaires, à 27 mille a.l.

100 milliards de galaxies dans l'univers...

Lors de la collisions de 2 galaxies (assez fréquent...), les TN s'attirent et coalescent

Il y a production d'ondes gravitationnelles intenses

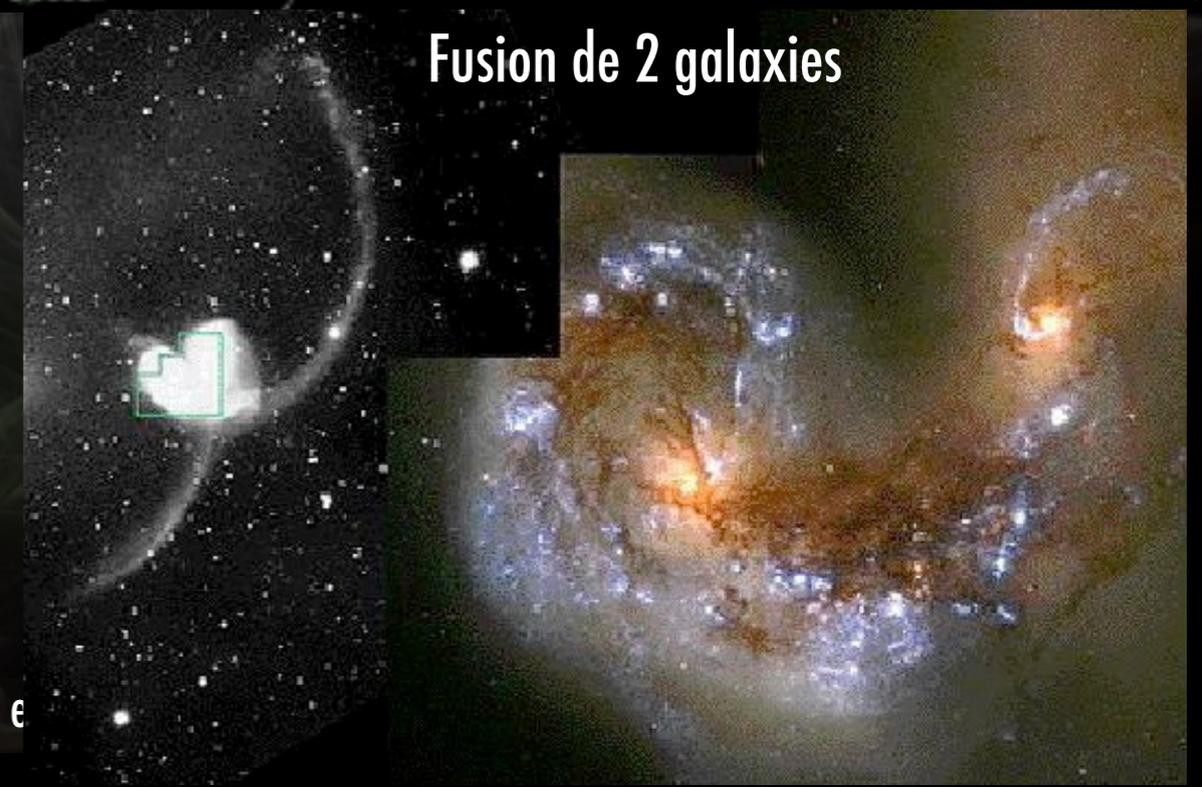
Observations d'étoiles orbitant autour du TN galactique

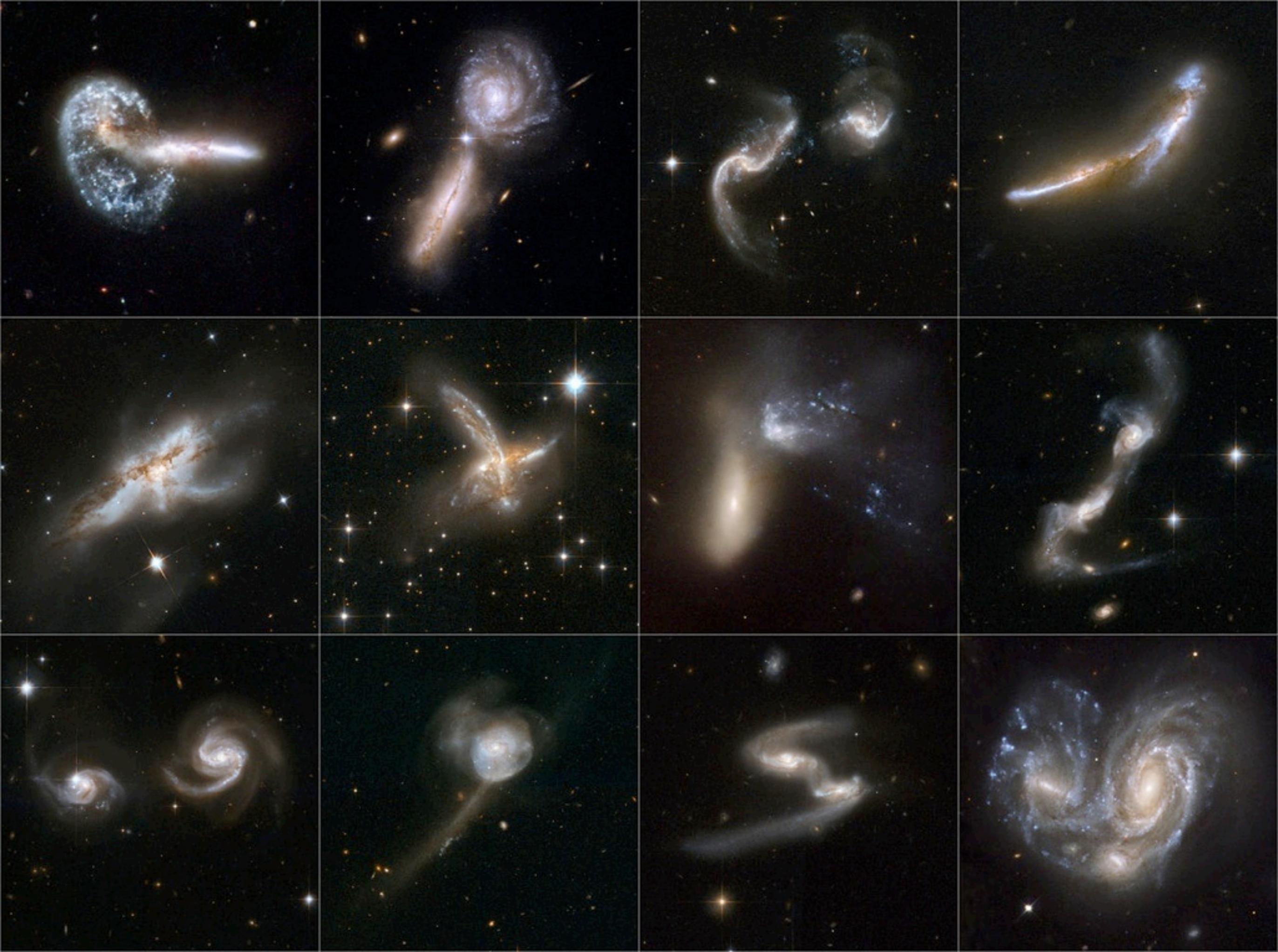


CORTELIS

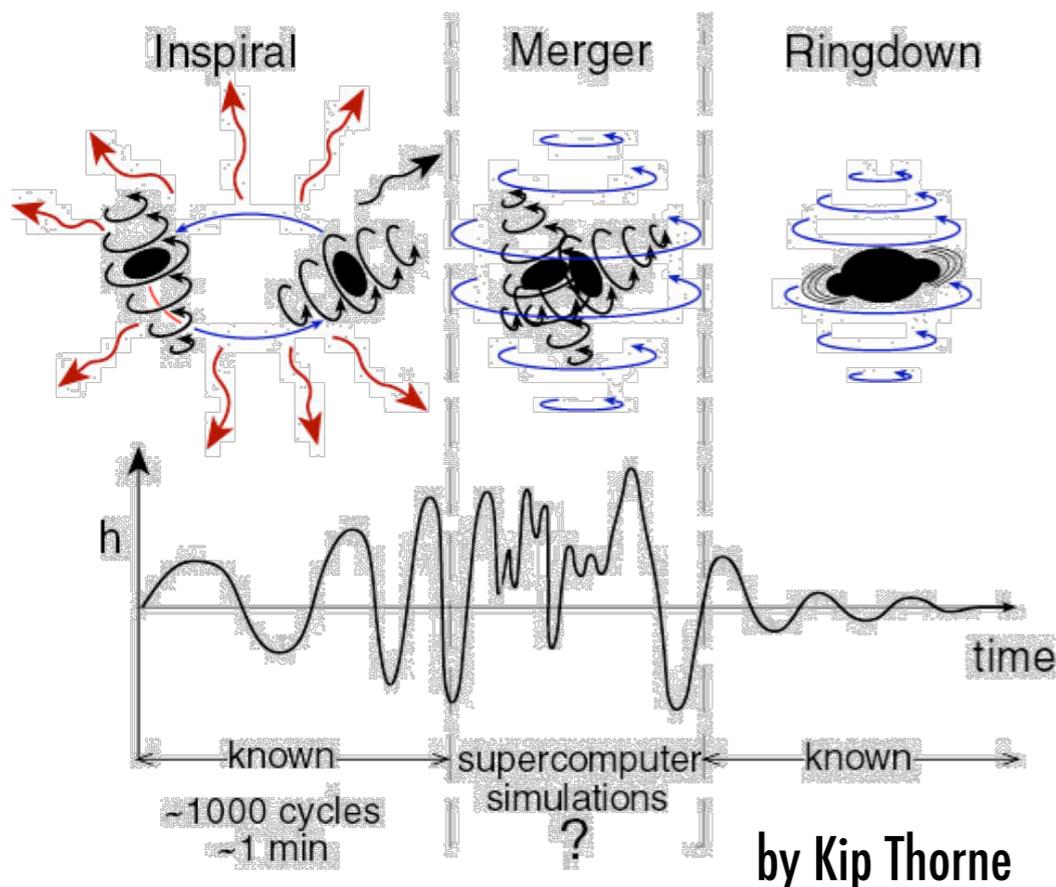
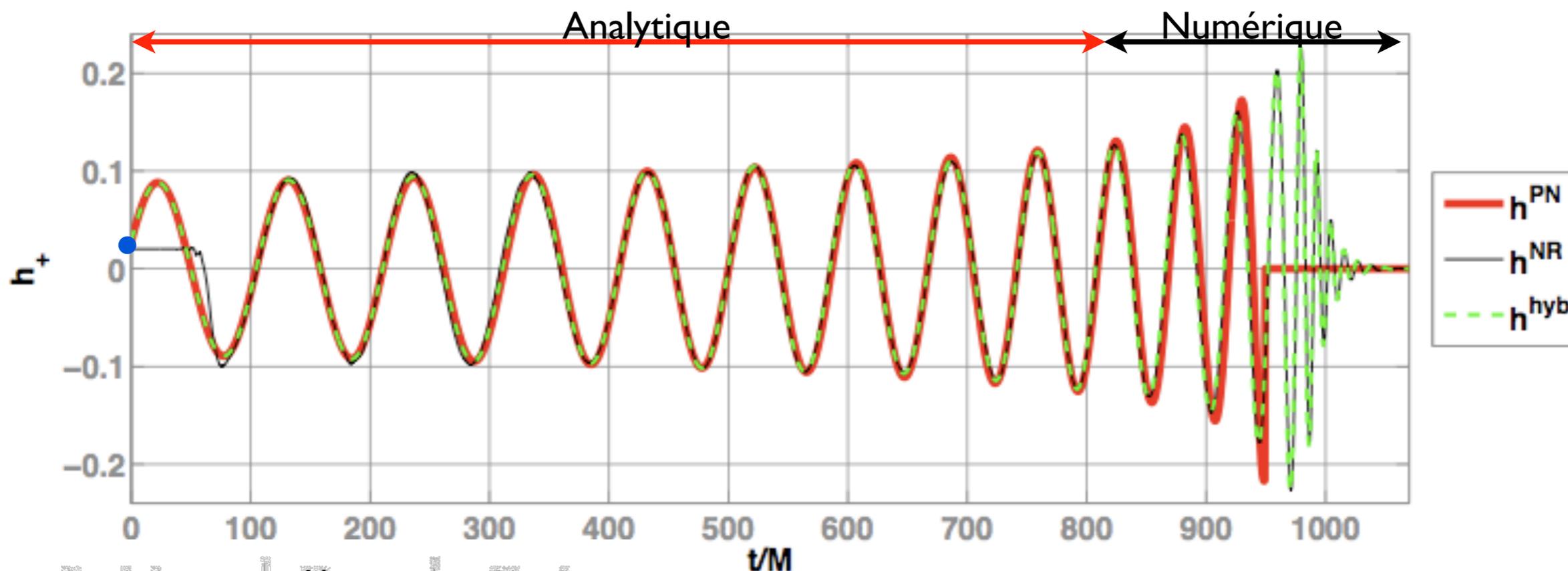
UCLA Galactic Center Group

Fusion de 2 galaxies





Coalescence de trous noirs



Au final, seulement 3 paramètres pour le TN !
Masse, spin, charge
«un trou noir n'a pas de cheveux» (c.à.d indépendant de son histoire)

Fréquence : 0,1 mHz à 1 kHz
Les plus massifs s'entendent dans tout l'Univers !

Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— **David (perd) contre Goliath**

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

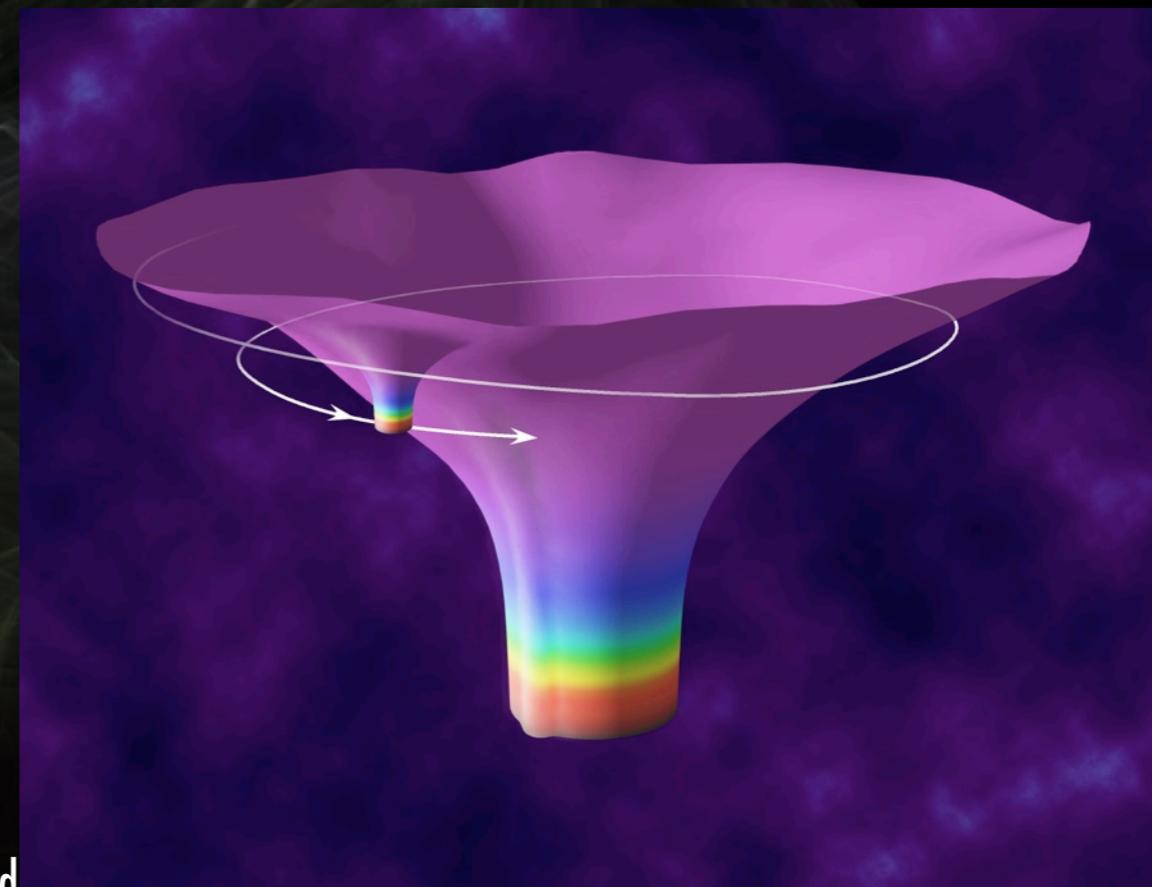
— Quitter la Terre

Capture par un trou noir massif



— [Capture d'un 'petit' astre compact
par un trou noir massif
(~ 100 à $1\,000\,000 M_{\text{soleil}}$)

- rapport de masse >200
- l'onde gravitationnelle renseigne sur la géométrie de l'espace à proximité du trou noir
- test précis de la RG en champ fort
- fréquence de l'onde : 1 mHz à 100 Hz.
- plusieurs sources observables en même temps avec les prochains détecteurs ?



Capture par un trou noir



Effets relativistes très importants

trajectoire du compagnon et signal gravitationnel complexe (!)

simulation (analytique ou numérique) difficile (seulement des approximations)

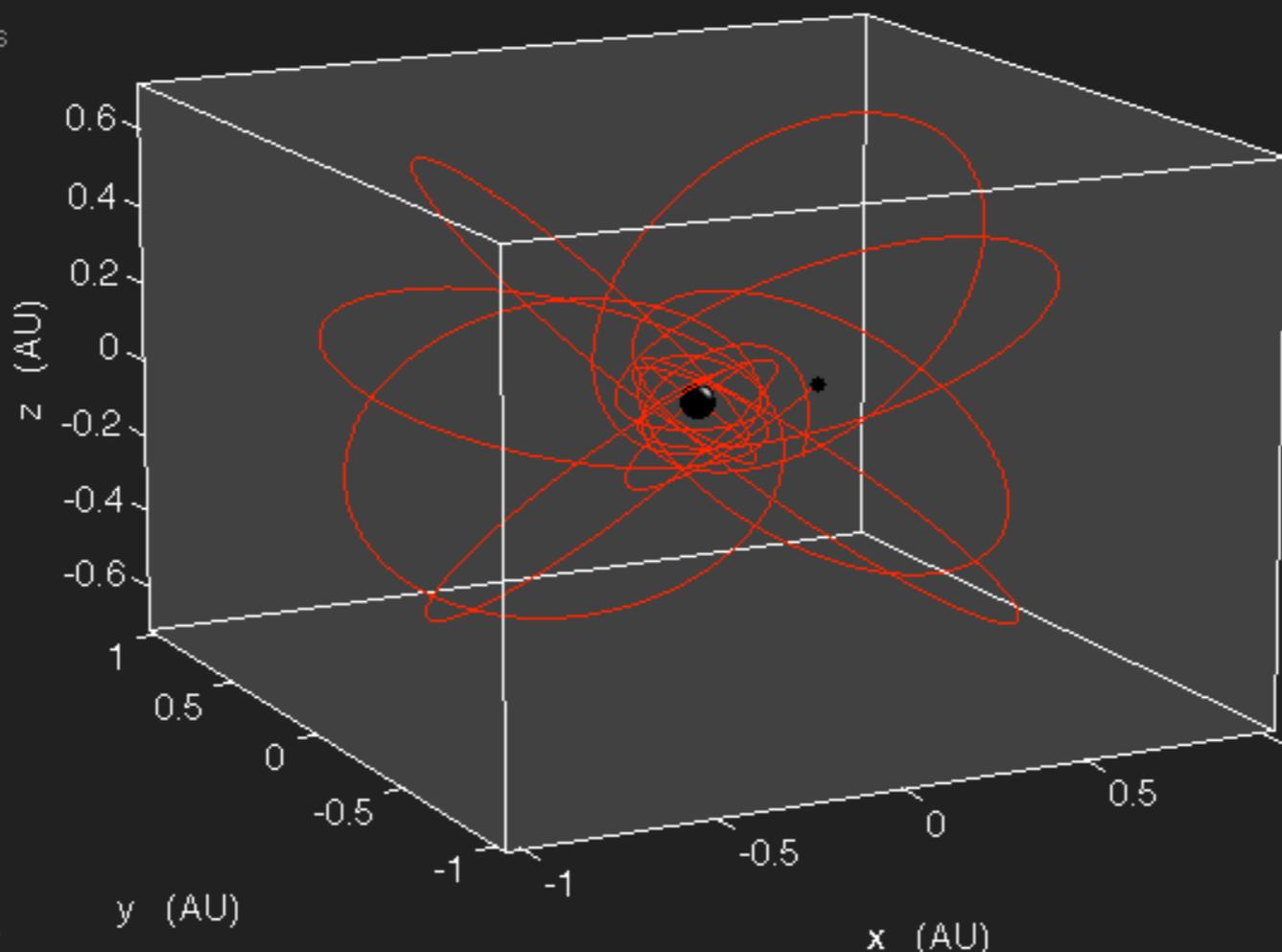
3 000 000 M_{soleil} + 270 M_{soleil}

253 days before merger, current average speed 0.21 c

Large black hole:
shown to scale
3,000,000 solar masses
90% maximal spin

Small black hole:
shown enlarged
270 solar masses
negligible spin

Trace duration:
1 day



Steve Drasco
Max Planck Institute
for Gravitational Physics
(Albert Einstein Institute)
sdrasco@aei.mpg.de

"plus" waveform viewed
from 45 degrees latitude



Effondrement gravitationnel

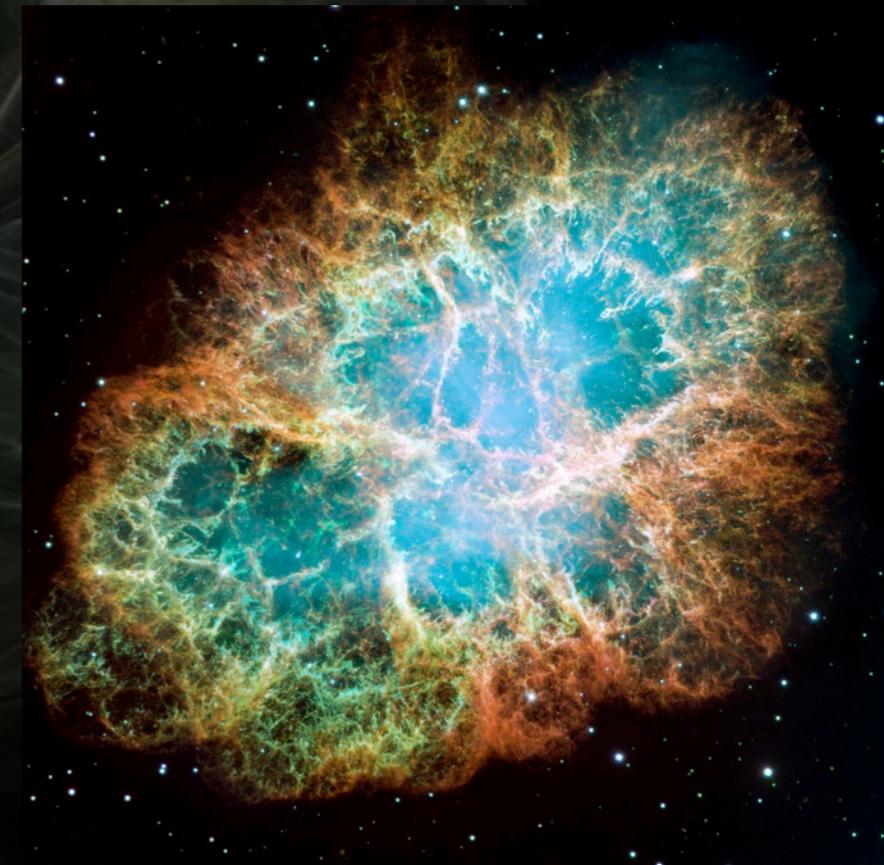
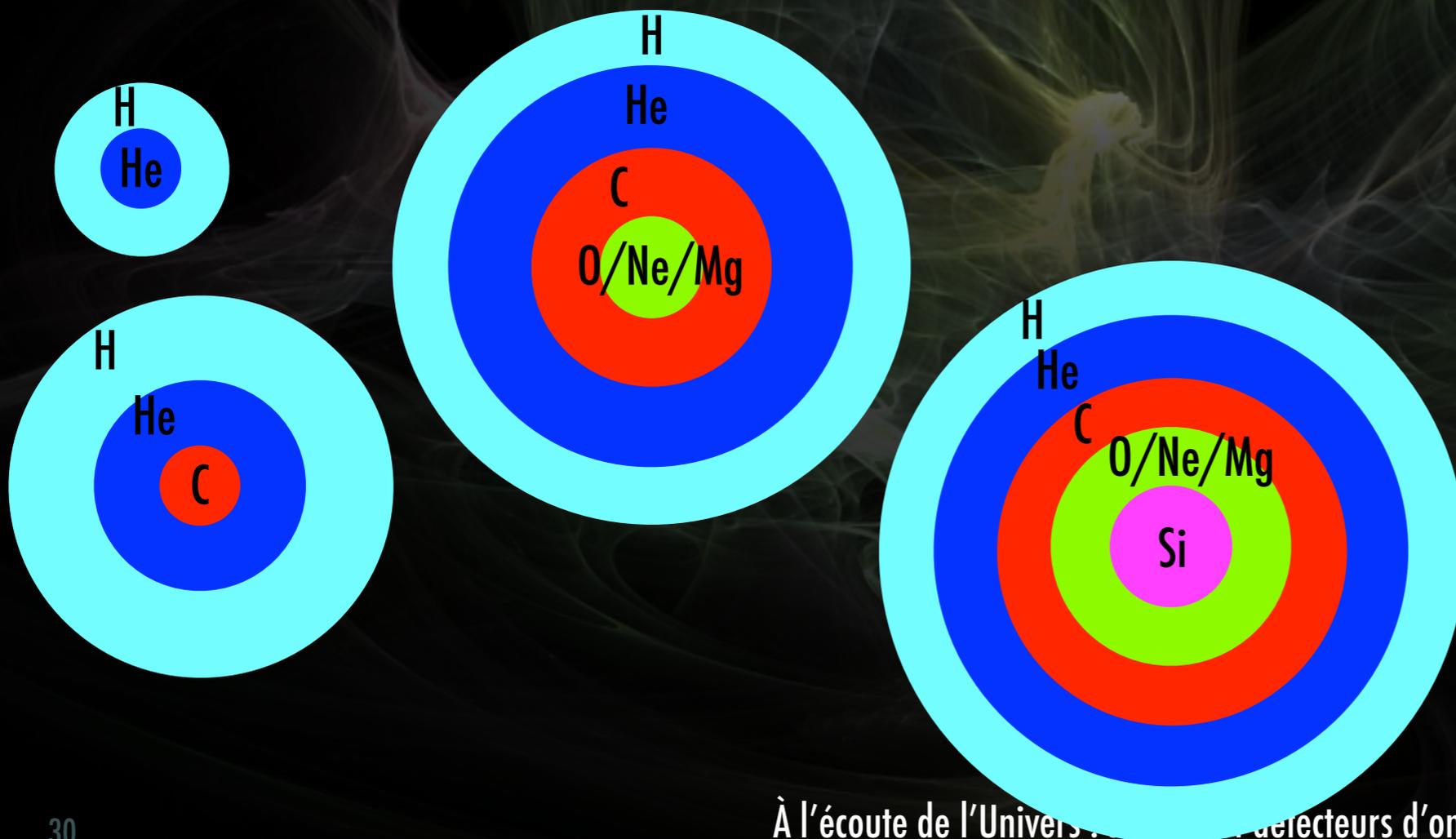


Une étoile brûle habituellement de l'Hydrogène en Hélium (fusion)

En fin de vie, les température et pression au centre de l'étoile sont suffisantes pour convertir le carbone en oxygène, néon, silicium puis fer.

Le fer étant stable, l'augmentation de pression finit par fusionner protons et électrons pour former un coeur de neutrons extrêmement dense

Les couches externes s'effondrent sur le coeur neutronique et rebondissent \Rightarrow Supernova



Effondrement gravitationnel



Une étoile brûle habituellement de l'Hydrogène en Hélium (fusion)

En fin de vie, les température et pression au centre de l'étoile sont suffisantes pour convertir le carbone en oxygène, néon, silicium puis fer.

Le fer étant stable, l'augmentation de pression finit par fusionner protons et électrons pour former un coeur de neutrons extrêmement dense

Les couches externes s'effondrent sur le coeur neutronique et rebondissent \Rightarrow Supernova

Animations in the Movie:

Density and velocity evolution in the meridional plane

Color coding: Density $\log \rho$
(scaled to ρ_{nuc})

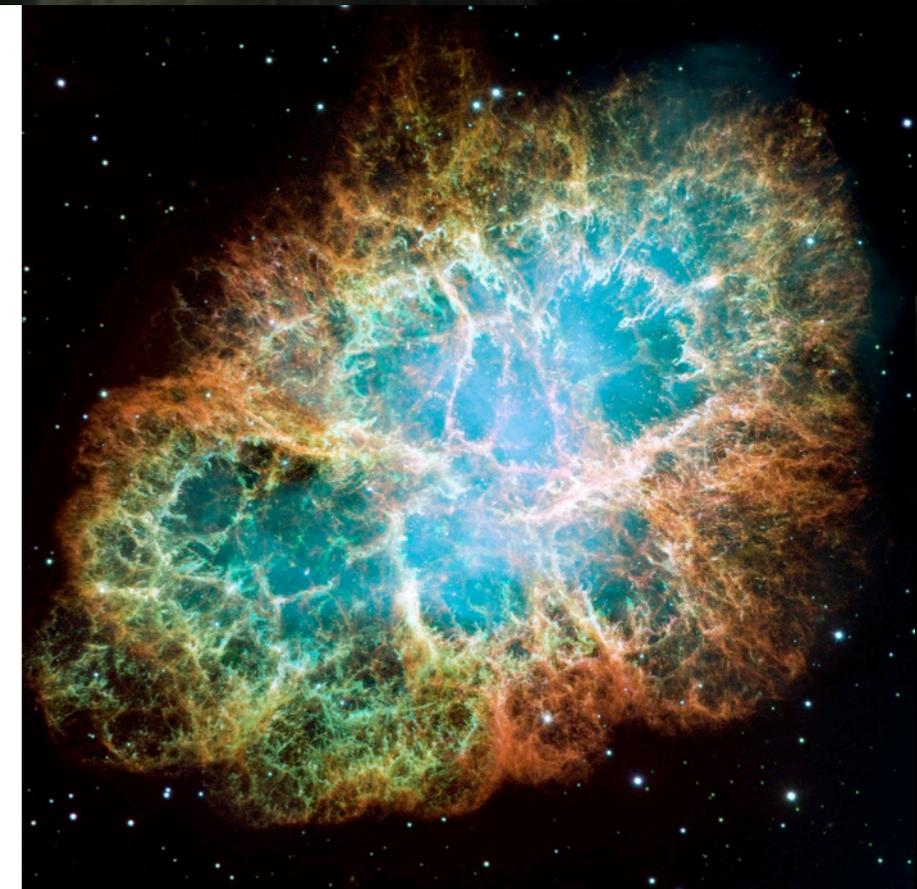
Vectors: Meridional velocity $\vec{v}_r + \vec{v}_\theta$
(scaled to the maximum per frame)

Gravitational wave signal

Wave amplitude A_{20}^{E2}
$$\left(h_{\theta\theta}^{TT} = \frac{1}{8} \sqrt{\frac{15}{\pi}} \sin^2 \theta \frac{A_{20}^{E2}}{r} \right)$$

Maximum density evolution

Density ρ_{max}
($\rho_{max} = \rho_{center}$ for nontoroidal models)



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— Quitter la Terre

Ecouter les pulsars binaires



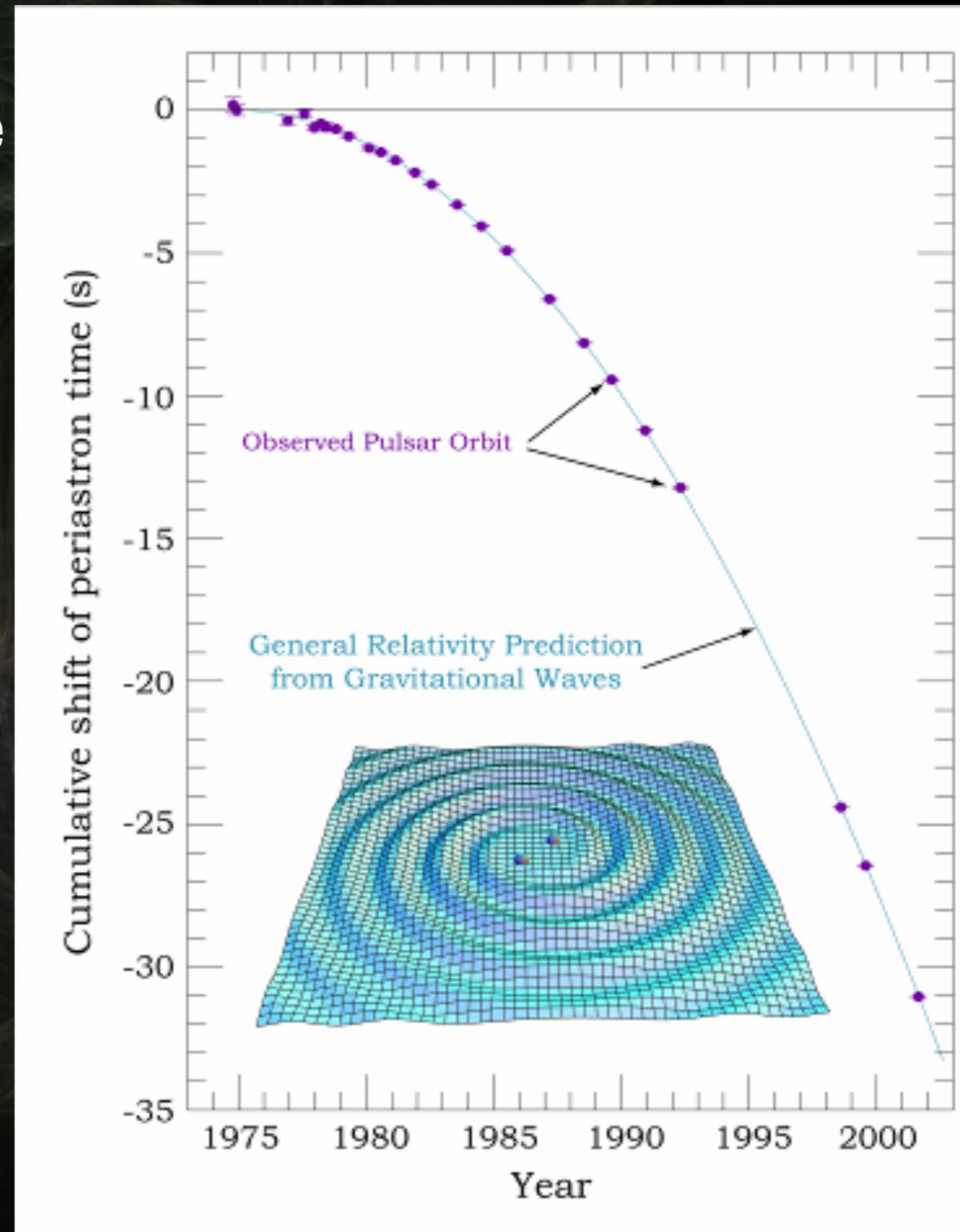
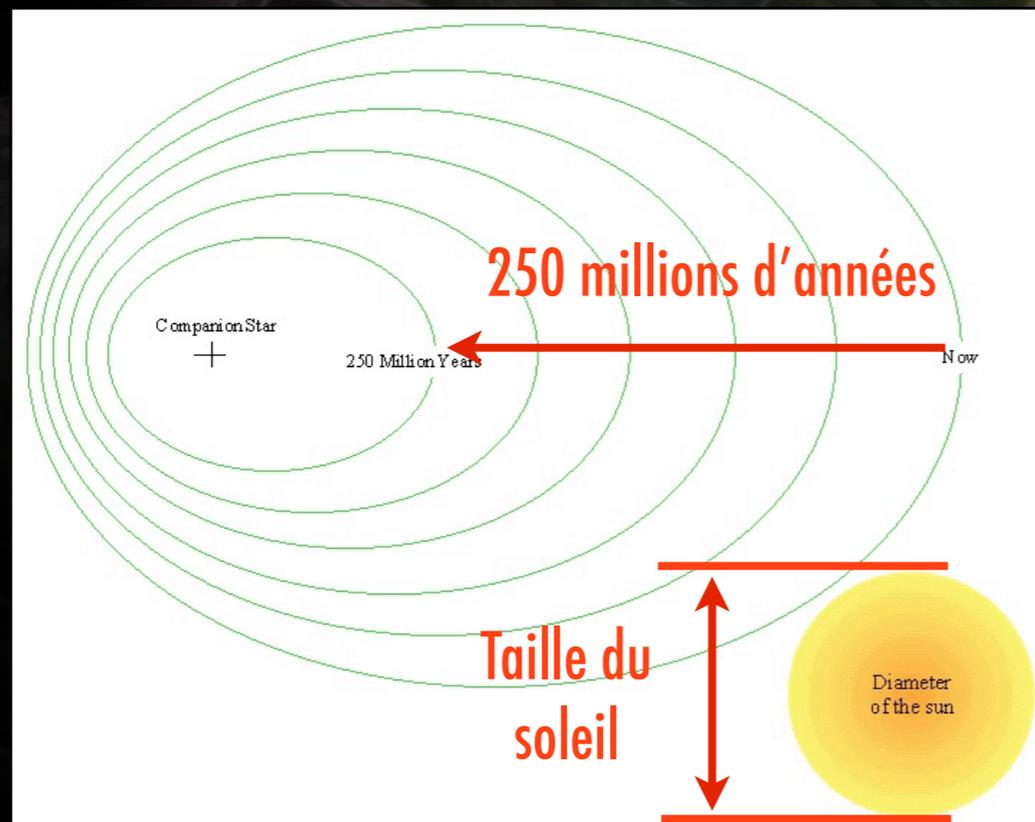
PSR 1913+16 détecté par Hulse et Taylor

l'avancée du périastre est conforme aux prédictions de la RG à mieux que 2% près !

première (et unique...) preuve (indirecte) de l'existence d'ondes gravitationnelles

prix Nobel en 1993

la taille de l'orbite diminue au cours du temps...



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— **Des diapasons bien accordés**

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

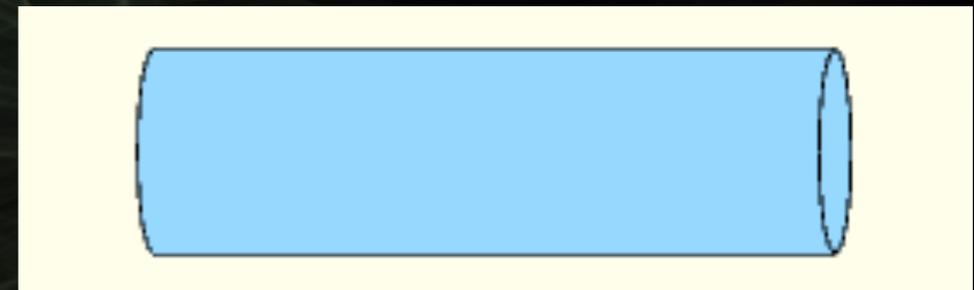
— Quitter la Terre

Les barres résonnantes



[Faire vibrer un solide ...

- tout solide possède une fréquence propre (comme un diapason)
- le passage d'une onde gravitationnelle à cette fréquence fait 'vibrer' (donc déformer) ce solide
- petite bande passante : 100 Hz @ 1kHz
- les amplitudes de déformation sont très (!) petites : $< 1 \text{ pm}$
- il faut s'affranchir des vibrations ambiantes et refroidir les barres (bruit thermique)



Les barres résonnantes



Les premières expériences de Weber

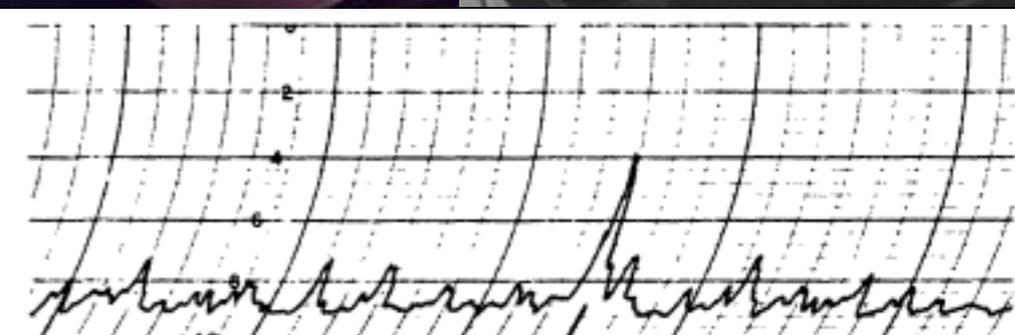
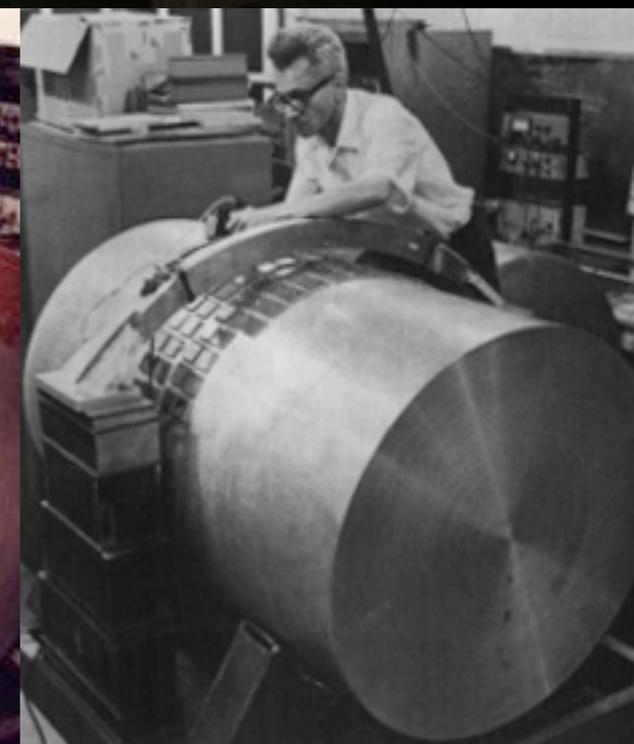
— premières expériences par Joseph Weber dans les années 1960

— première barre résonnante : cylindre d'aluminium de 2 m en longueur et 50 cm de diamètre.

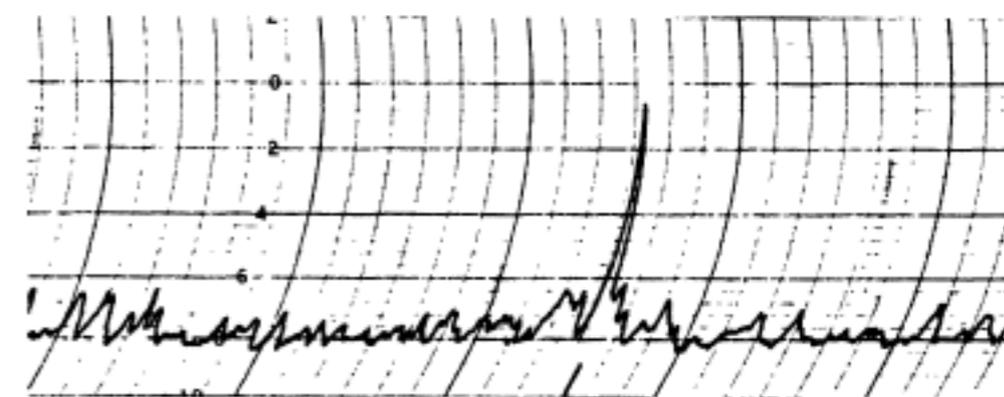
— publication en 1969 de la détection d'une onde gravitationnelle à 1660 Hz (événement coïncidant entre 2 détecteurs distants de 1000 km)

— D'autres détecteurs, plus sensibles, ont alors été développés, mais aucune confirmation

— La sensibilité des barres de Weber étaient de $\sim 10^{-16}$ (0,1 $\mu\text{m}/\text{Mkm}$) : la détection de tels événements implique l'évaporation de l'Univers par OG en ~ 1 million d'années ...



COINCIDENCE TIME MARK — ARGONNE DETECTOR



COINCIDENCE TIME MARK — MARYLAND DETECTOR

EVIDENCE FOR DISCOVERY OF GRAVITATIONAL RADIATION*

J. Weber

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland 20742

(Received 29 April 1969)

Coincidences have been observed on gravitational-radiation detectors over a base line of about 1000 km at Argonne National Laboratory and at the University of Maryland. The probability that all of these coincidences were accidental is incredibly small. Experiments imply that electromagnetic and seismic effects can be ruled out with a high level of confidence. These data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation.

Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

- Un peu d'histoire

- Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

- Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

- Petit détour électromagnétique

- Au commencement était l'onde ...

- Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

- David (perd) contre Goliath

- Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

- L'Univers émet en radio

- Des diapasons bien accordés

- **Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles**

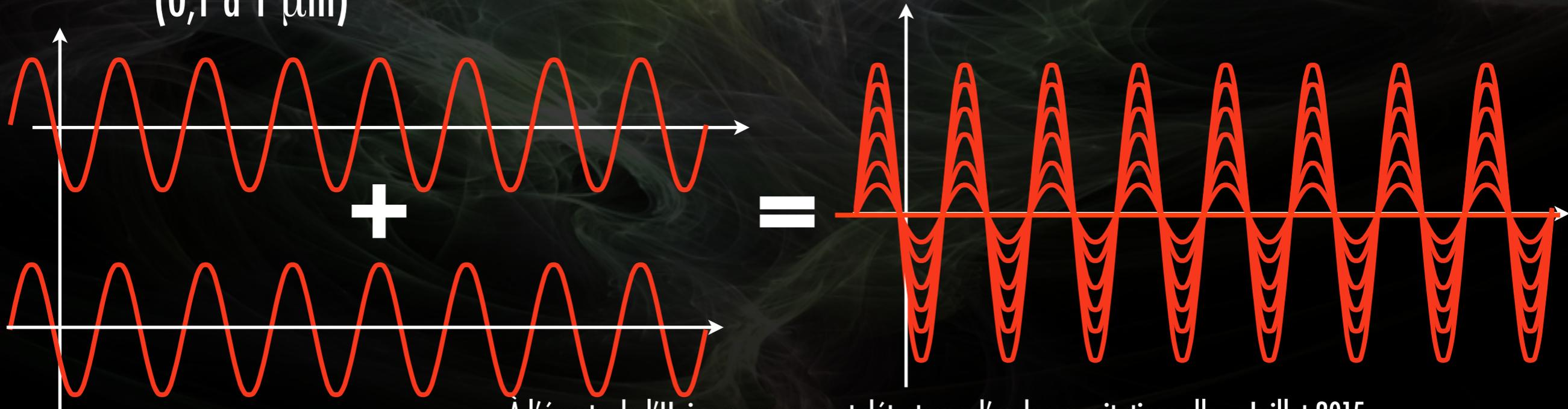
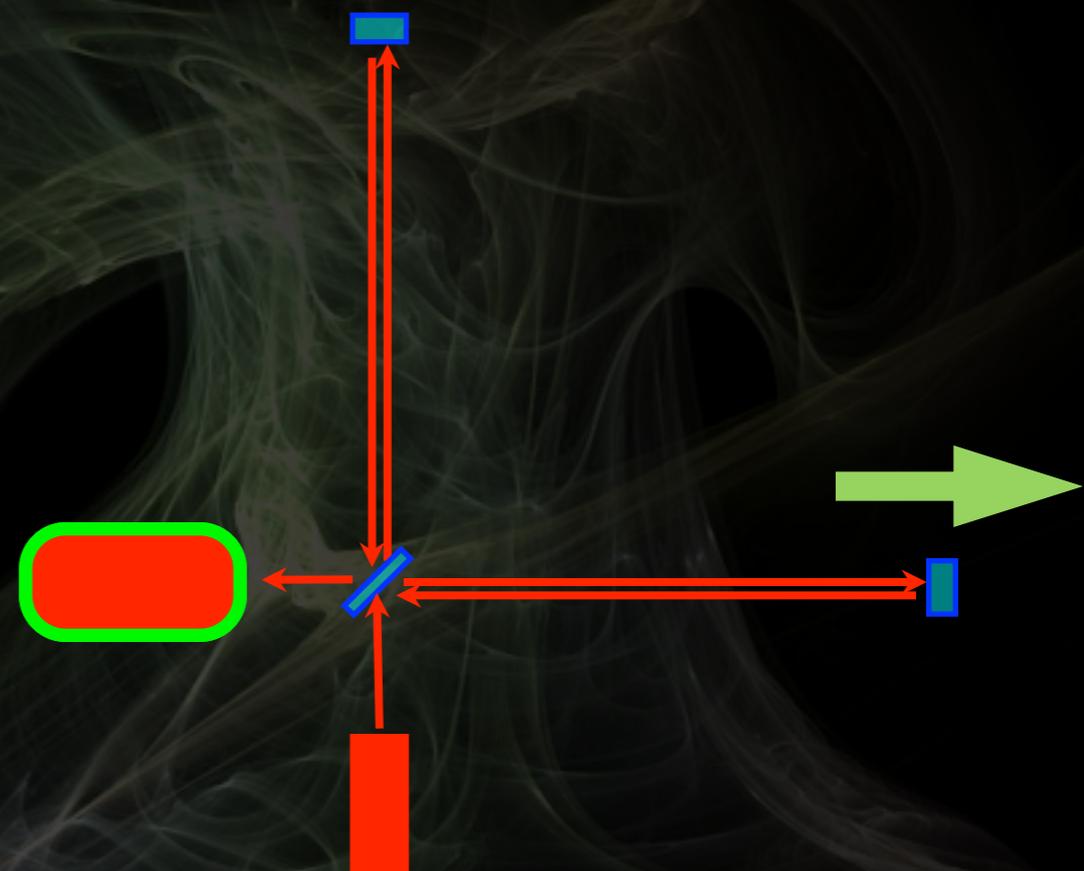
- Quitter la Terre

Les détecteurs interférométriques



Qu'est-ce qu'un interféromètre ?

- une source lumineuse est séparée en 2 faisceaux puis recombinaison
- si les 2 trajets sont identiques : ondes lumineuses en phase et amplification
- sinon, l'amplitude du signal dépend de l'écart de longueur entre les 2 trajets
- permet de mesurer des distances très petites, fraction de la longueur d'onde de la lumière (0,1 à 1 μm)

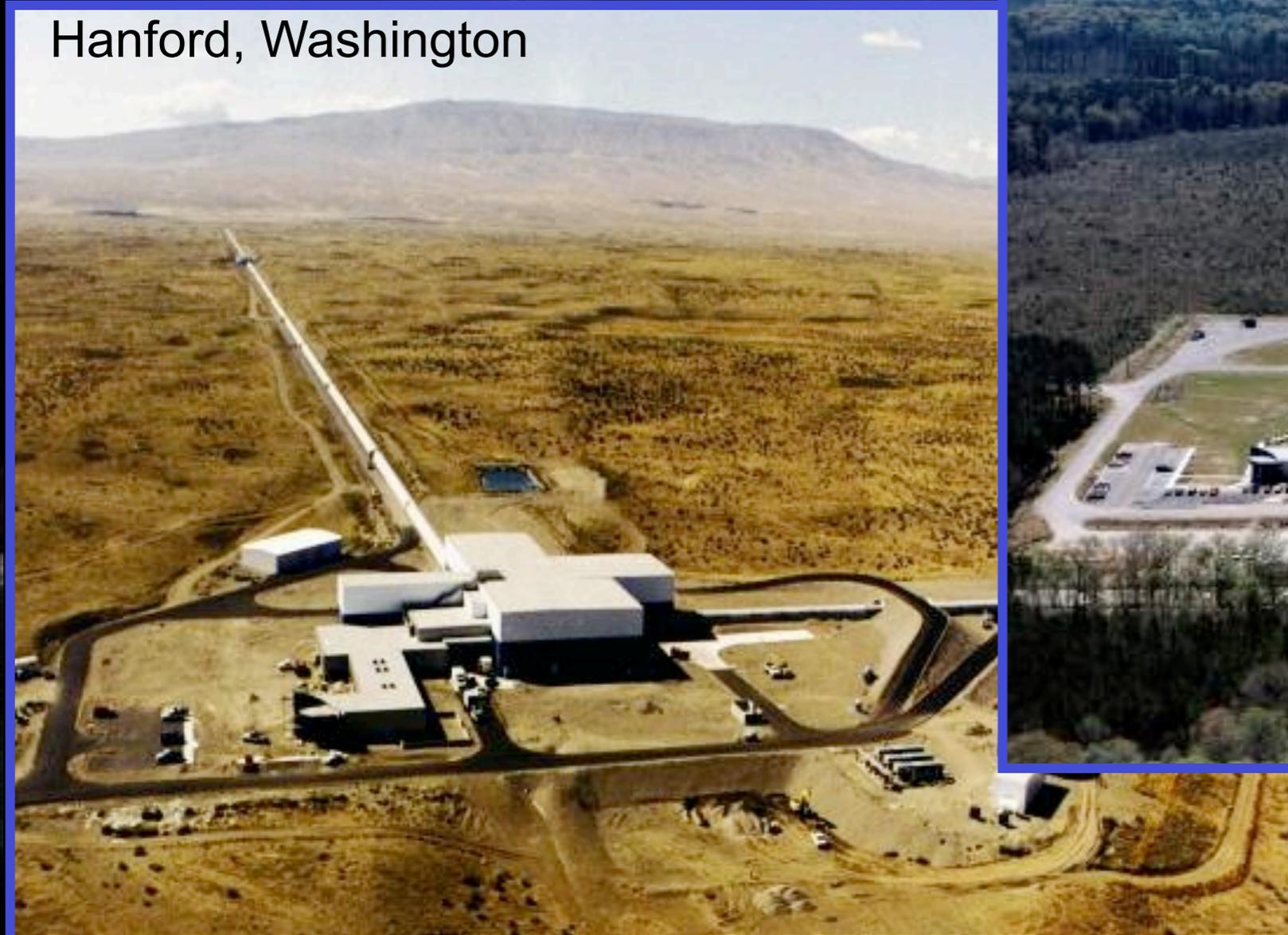


LIGO : 2 sites séparés par 3 000 km



— [Longueurs des bras : 3 & 4 km

Hanford, Washington



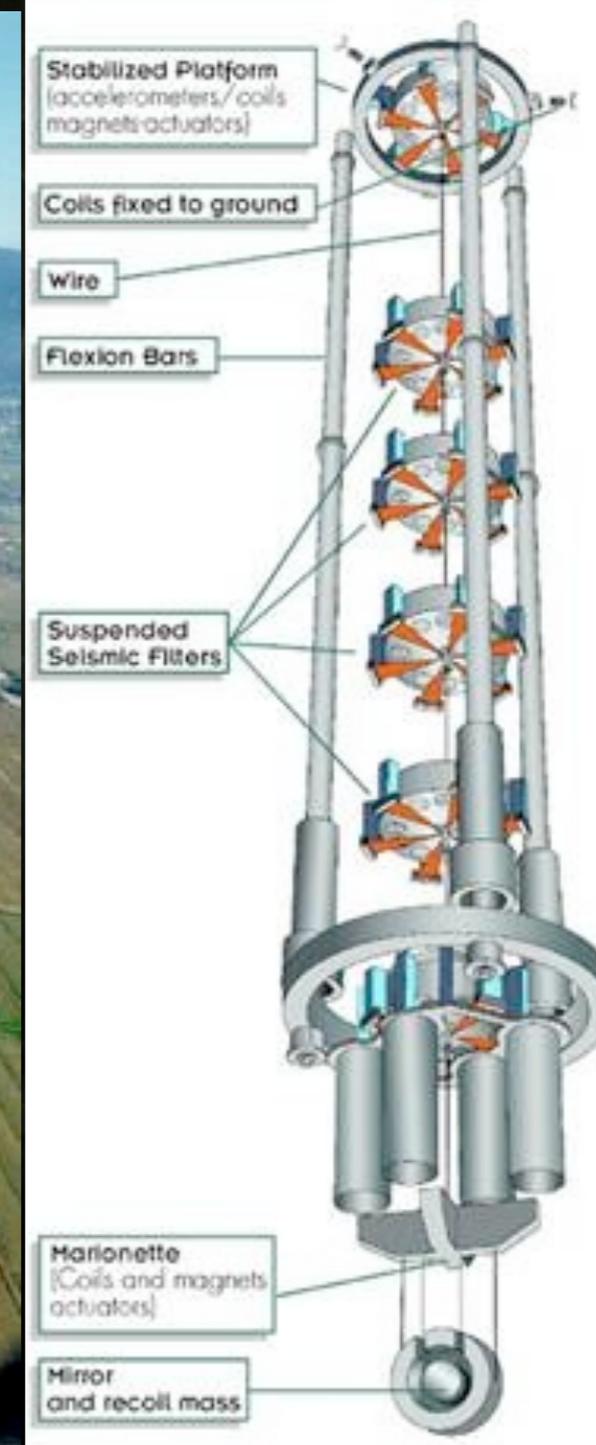
Livingston,
Louisiane



VIRGO



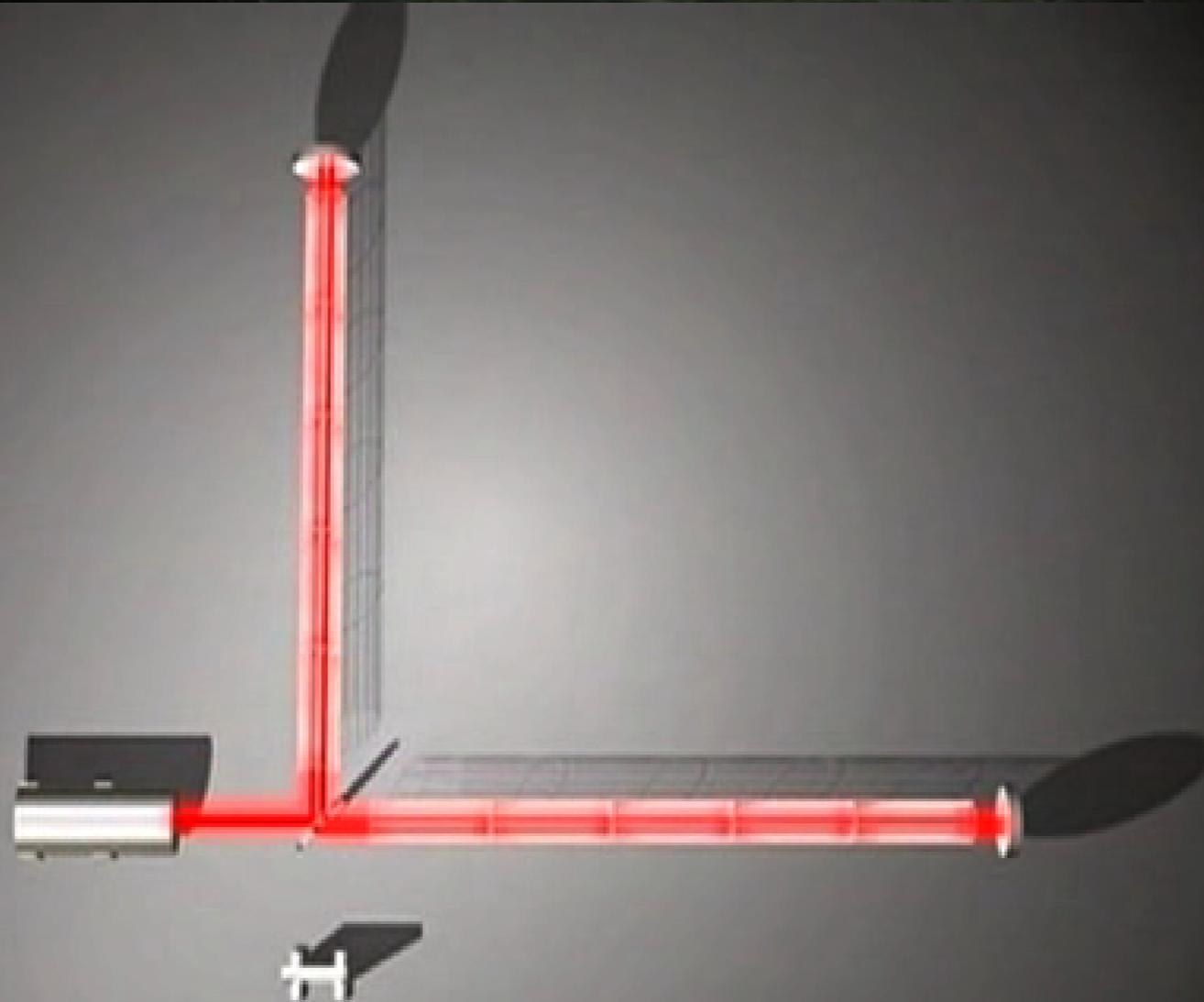
Longueur des bras : 3 km



Un peu plus qu'un simple interféromètre ...



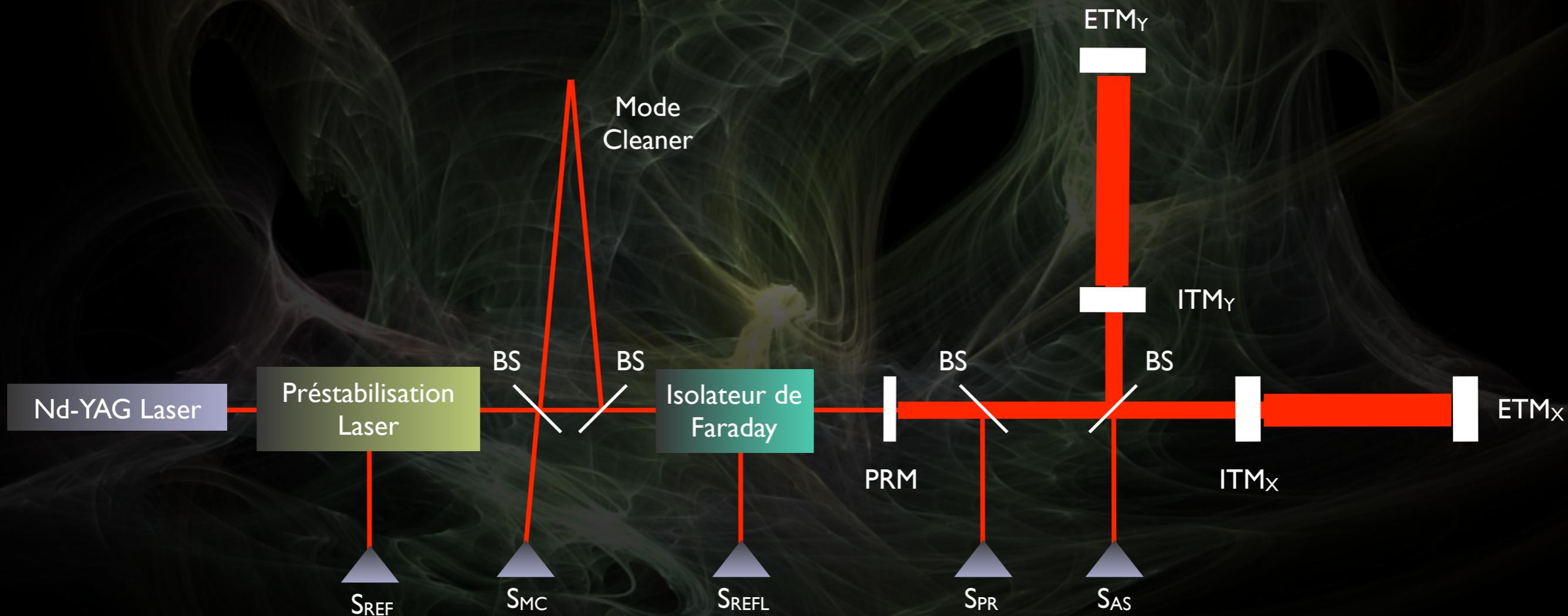
Le principe ...



Un peu plus qu'un simple interféromètre ...



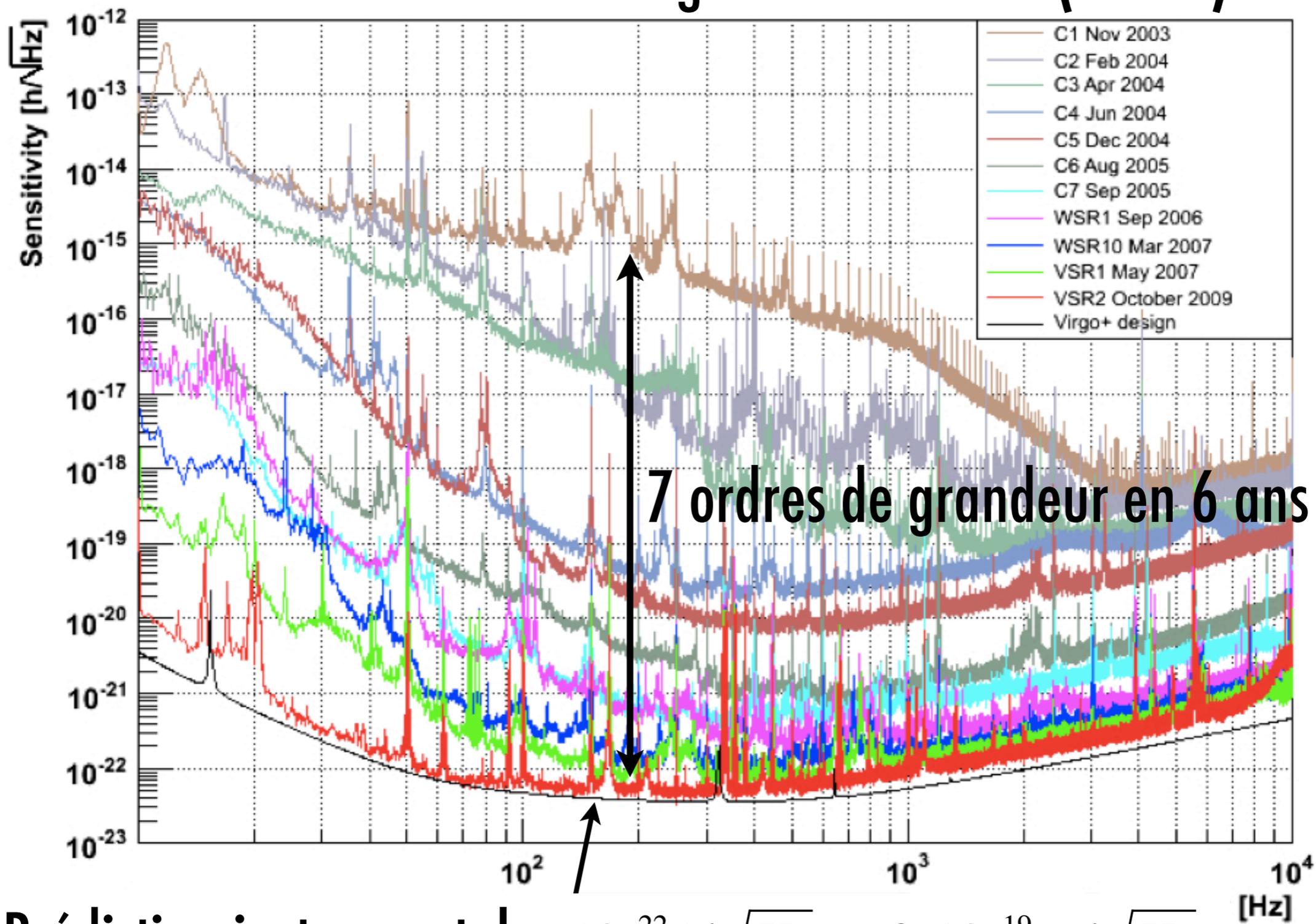
La réalité ...



Les détecteurs interférométriques

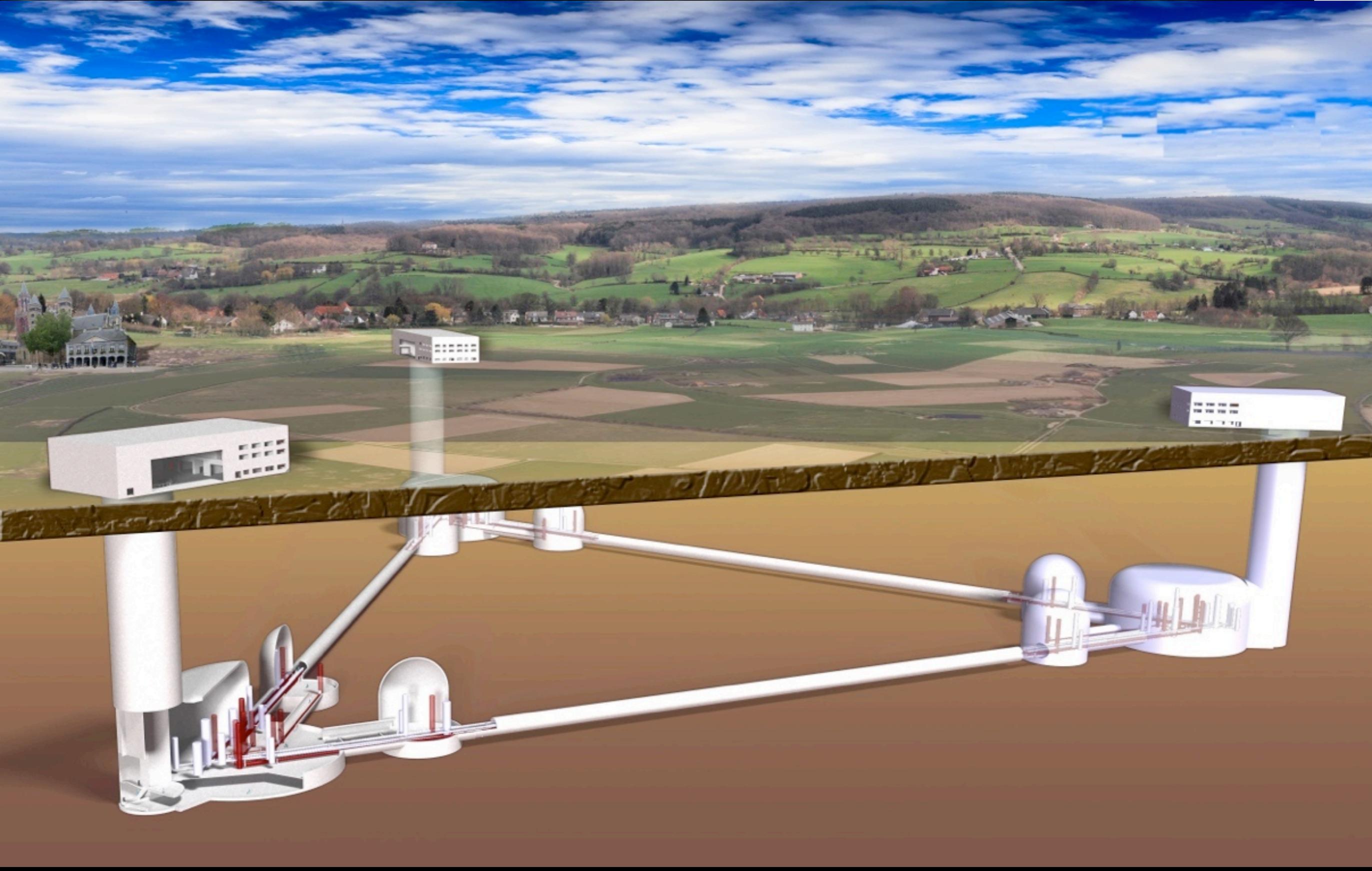


Sensibilité aux ondes gravitationnelles (VIRGO)



Prédiction instrumentale : $10^{-22} \text{ } 1/\sqrt{\text{Hz}} \Rightarrow 3 \cdot 10^{-19} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}}$

Le futur des interféromètres sol : ET



Plan de l'exposé



Les ondulations de l'Univers

— Un peu d'histoire

— Dis, c'est quoi une onde gravitationnelle ?

— Quelques ordres de grandeur

Quelques sources astrophysiques

— Petit détour électromagnétique

— Au commencement était l'onde ...

— Quand un trou noir rencontre un autre trou noir

— David (perd) contre Goliath

— Résumons...

Des détecteurs pour écouter l'Univers

— L'Univers émet en radio

— Des diapasons bien accordés

— Des ondes de lumières pour mesurer des ondes gravitationnelles

— **Quitter la Terre**



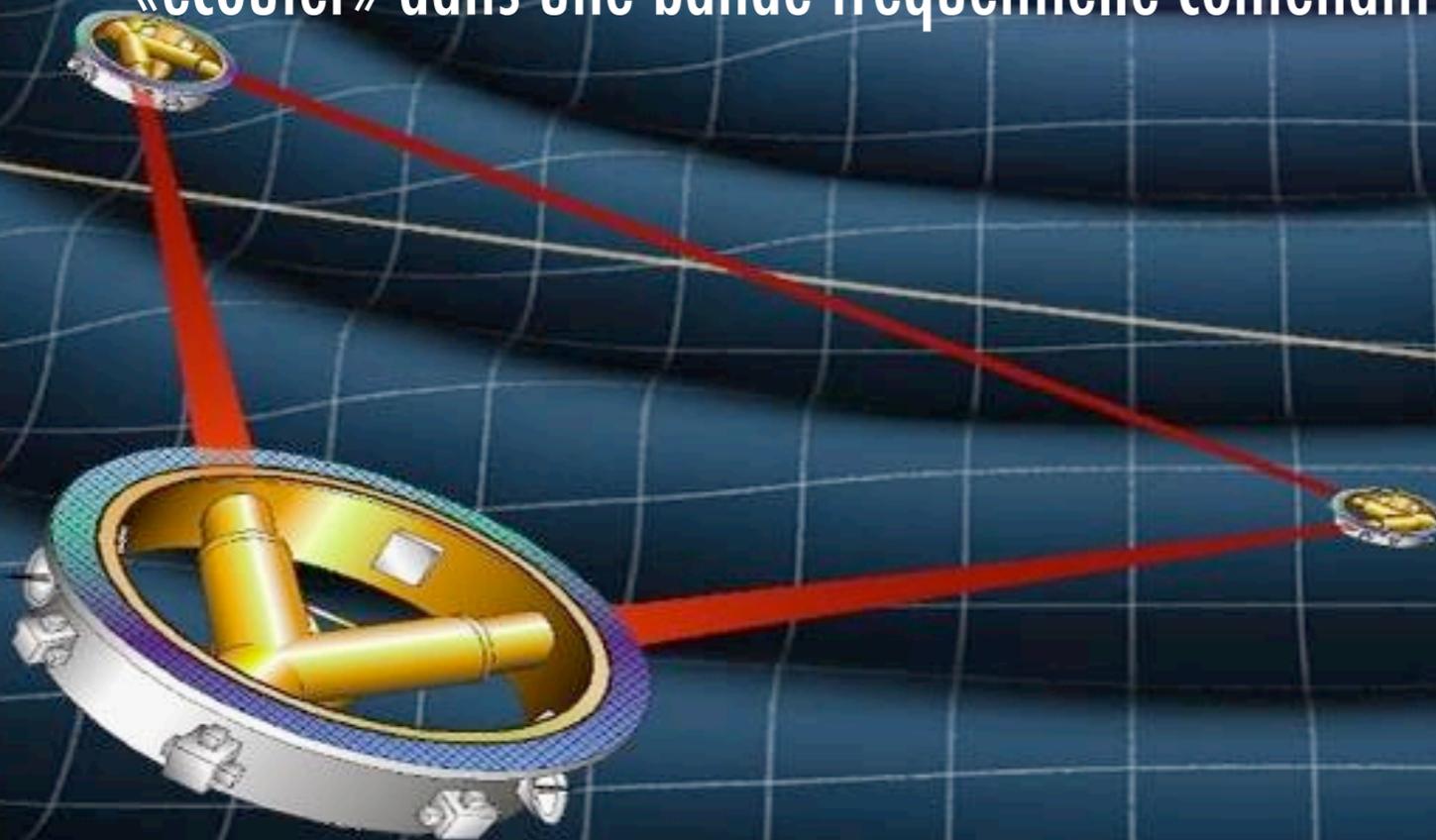
(evolved) Laser Interferometer Space Antenna - (e)LISA

interféromètre spatial

s'affranchir des perturbations terrestres (vibrations)

augmenter la distance entre les miroirs (donc la sensibilité)

«écouter» dans une bande fréquentielle contenant (a priori...) beaucoup de sources

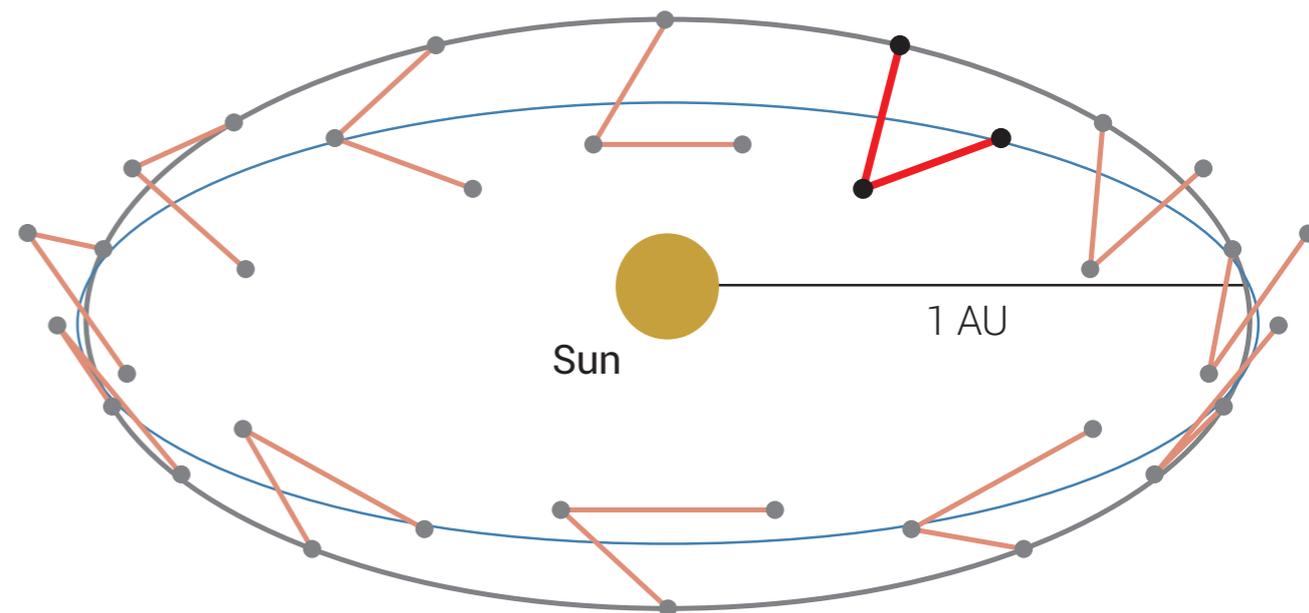
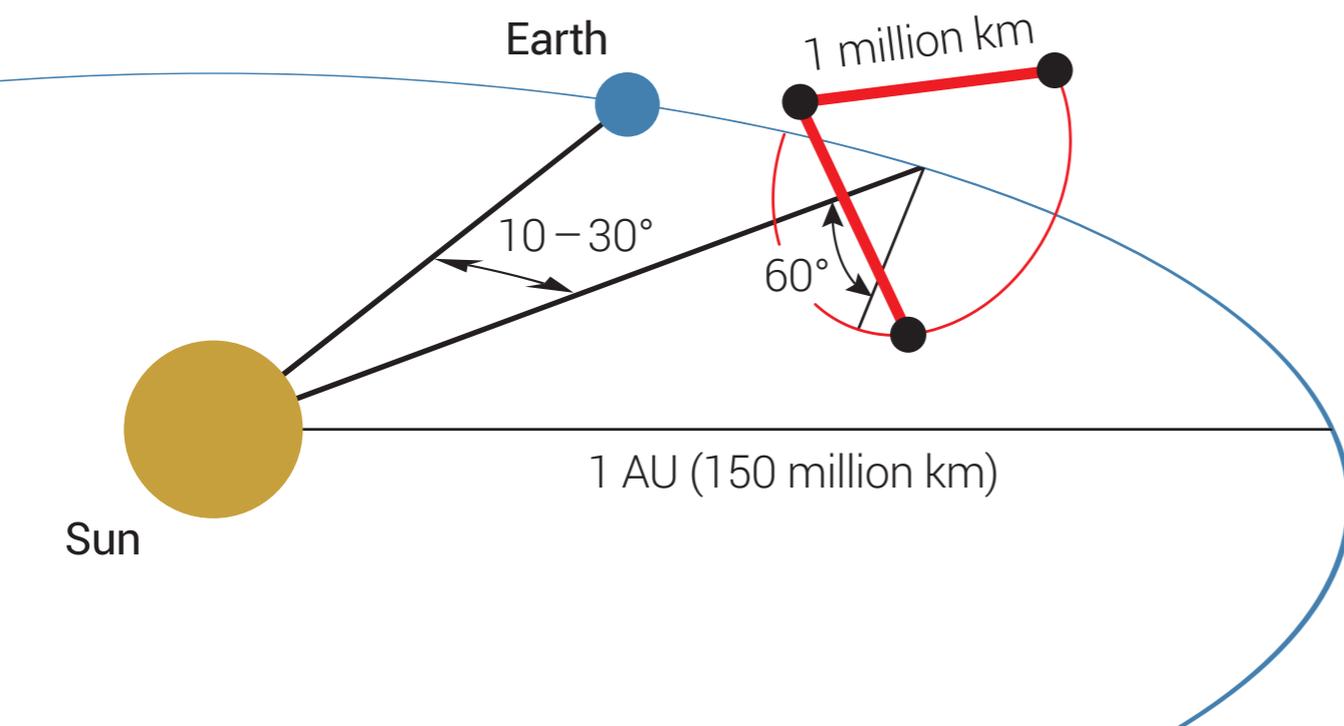
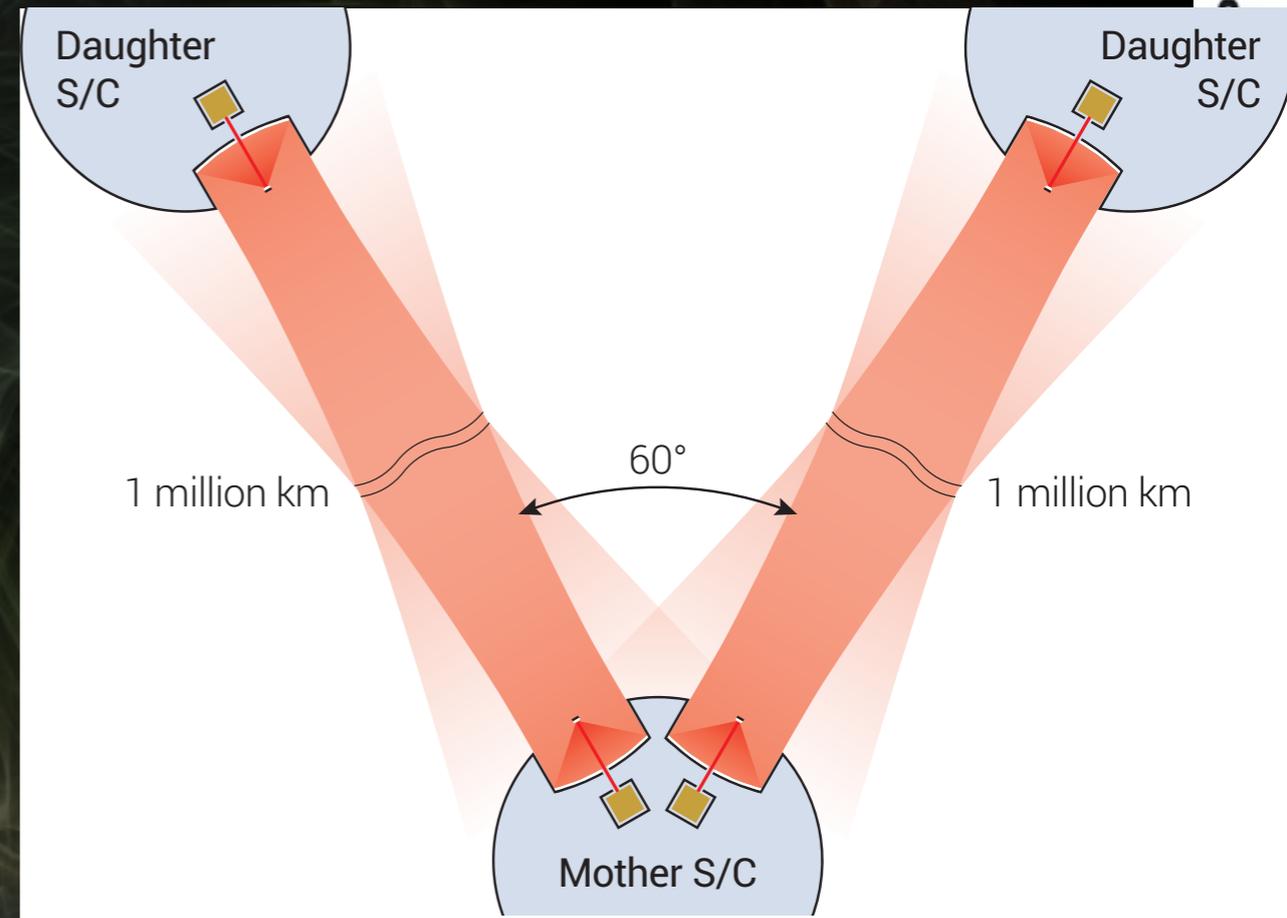


eLISA



Principe de fonctionnement :

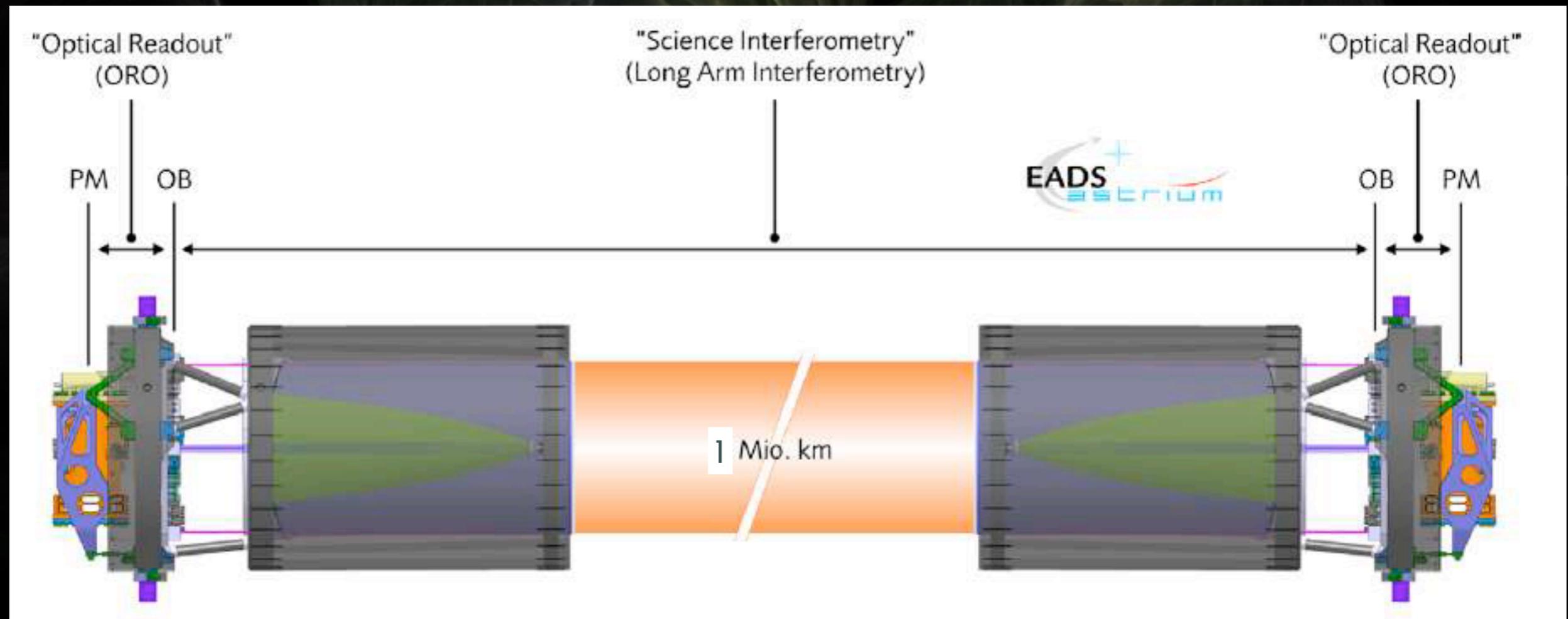
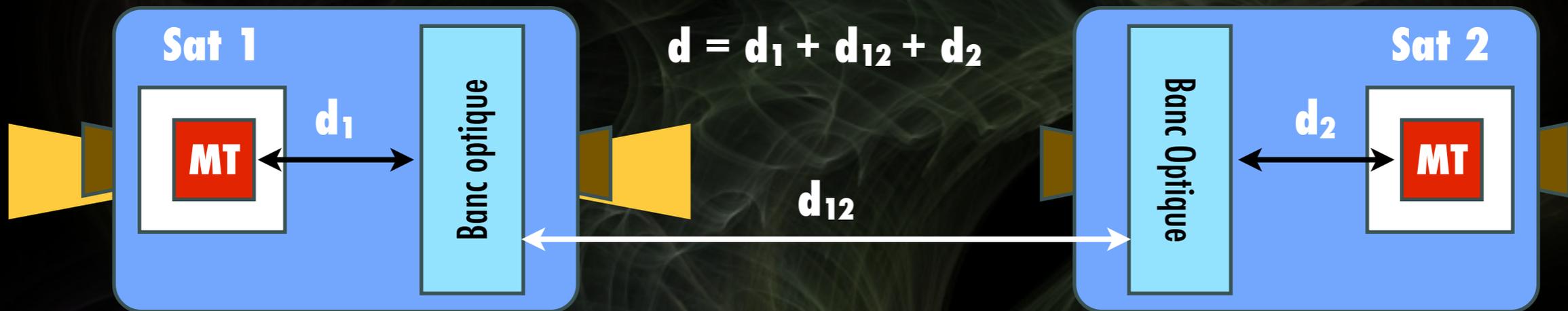
- 3 «miroirs» (1 par satellite) en chute libre (c.à.d. soumises uniquement à la gravité) suivant 2 côtés d'un triangle équilatéral
- distance entre satellites : 1 000 000 km !
- 1 faisceau laser d'un satellite vers les 2 autres
- mesure de distance par interférométrie
- détection d'ondes gravitationnelles entre 0,1 mHz et 1 Hz



eLISA : principe de la mesure



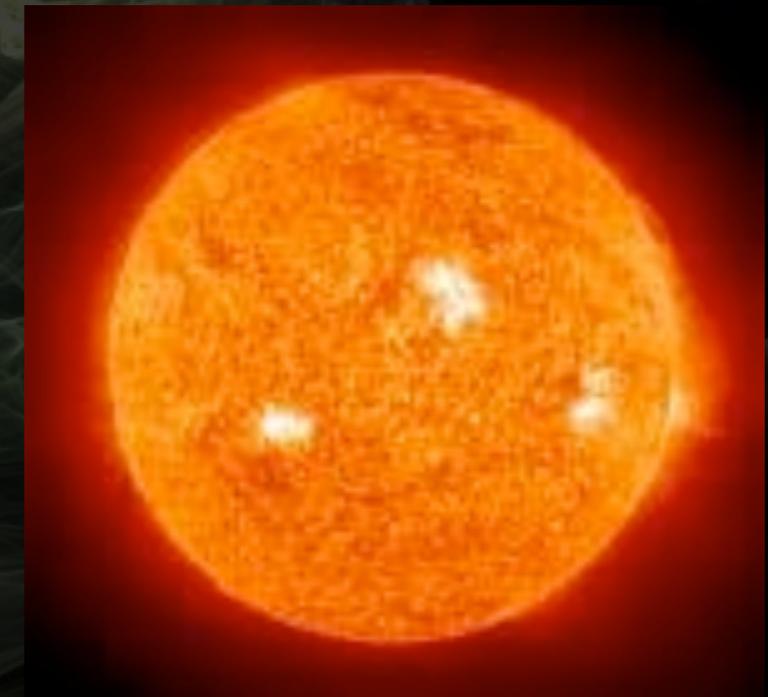
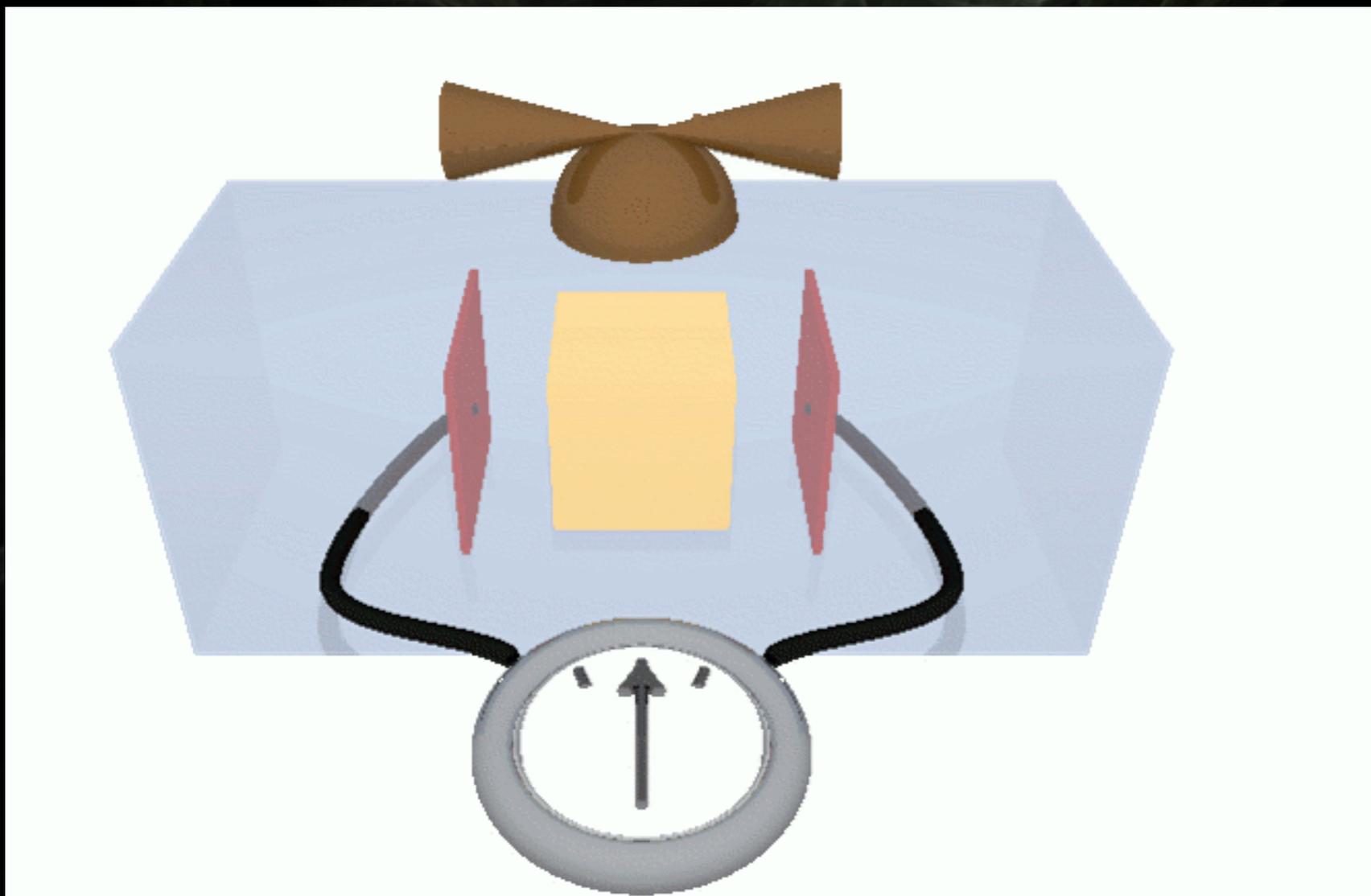
3 separate measurements (heterodyne interferometry)

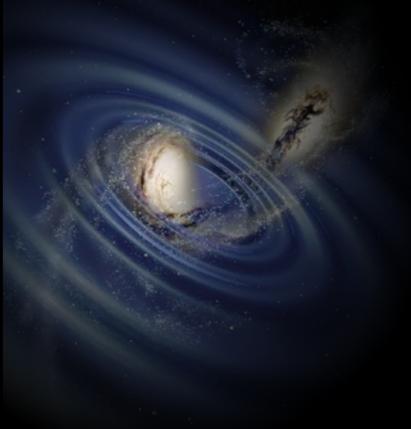


Vol inertiel ?

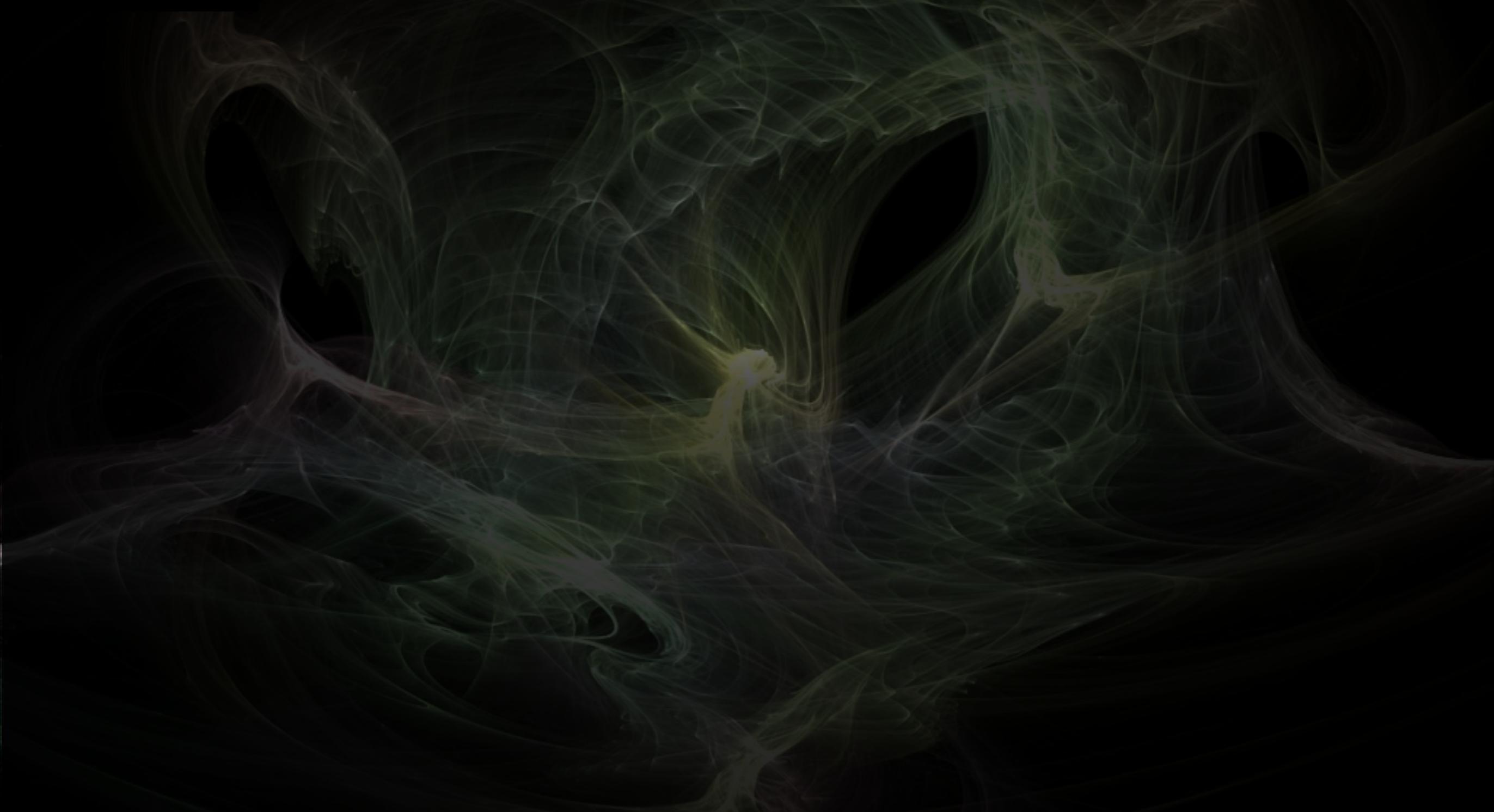


- Dans l'espace, la principale perturbation à un mouvement purement gravitationnel est le vent solaire
- Le satellite sert de 'bouclier' contre le vent solaire et doit suivre en permanence la masse de référence.





eLISA



Pour conclure



— [Les ondes gravitationnelles sont essentielles pour comprendre l'interaction des objets les plus massifs de l'Univers

— Sonde directe de la gravité en champ fort

— Souvent pas de contrepartie optique

— Détection indirecte en observant des pulsars binaires

— [Elles se manifestent par une déformation de l'espace-temps

— Elles transportent beaucoup d'énergie

— Les effets sont cependant très faibles...

— [La détection directe des ondes gravitationnelles est à portée de main

— Interféromètres sol : première détection en 2016 ?

— Interféromètre spatial en 2034 : astrophysique à grande échelle grâce aux ondes gravitationnelles

Merci

