

La relativité générale

Tests astrophysiques

L' espace et le temps

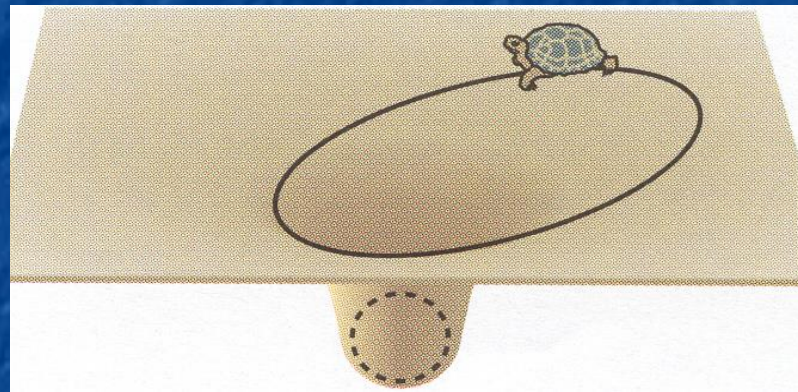
- Dans notre intuition
(et dans la physique
classique)
est la “scène” où tout se
passe, un décor fixe et
immuable

(Newton, 1687)



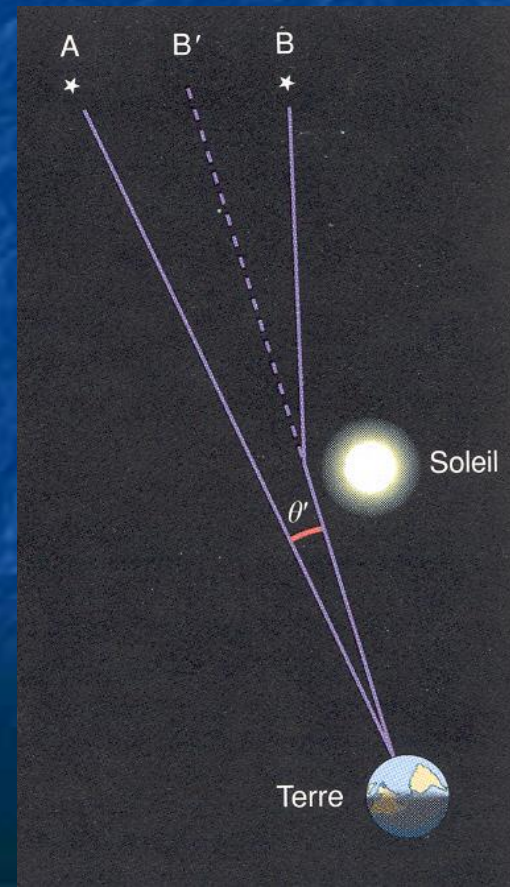
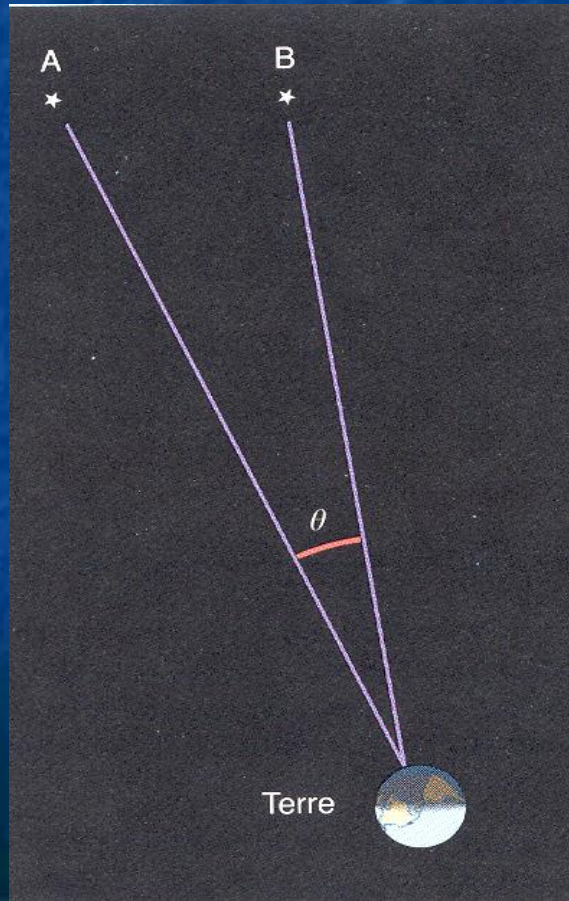
Relativité Générale

L' espace-temps devient dynamique



- la matière courbe l' espace-temps
- l' espace-temps détermine le mouvement de la matière

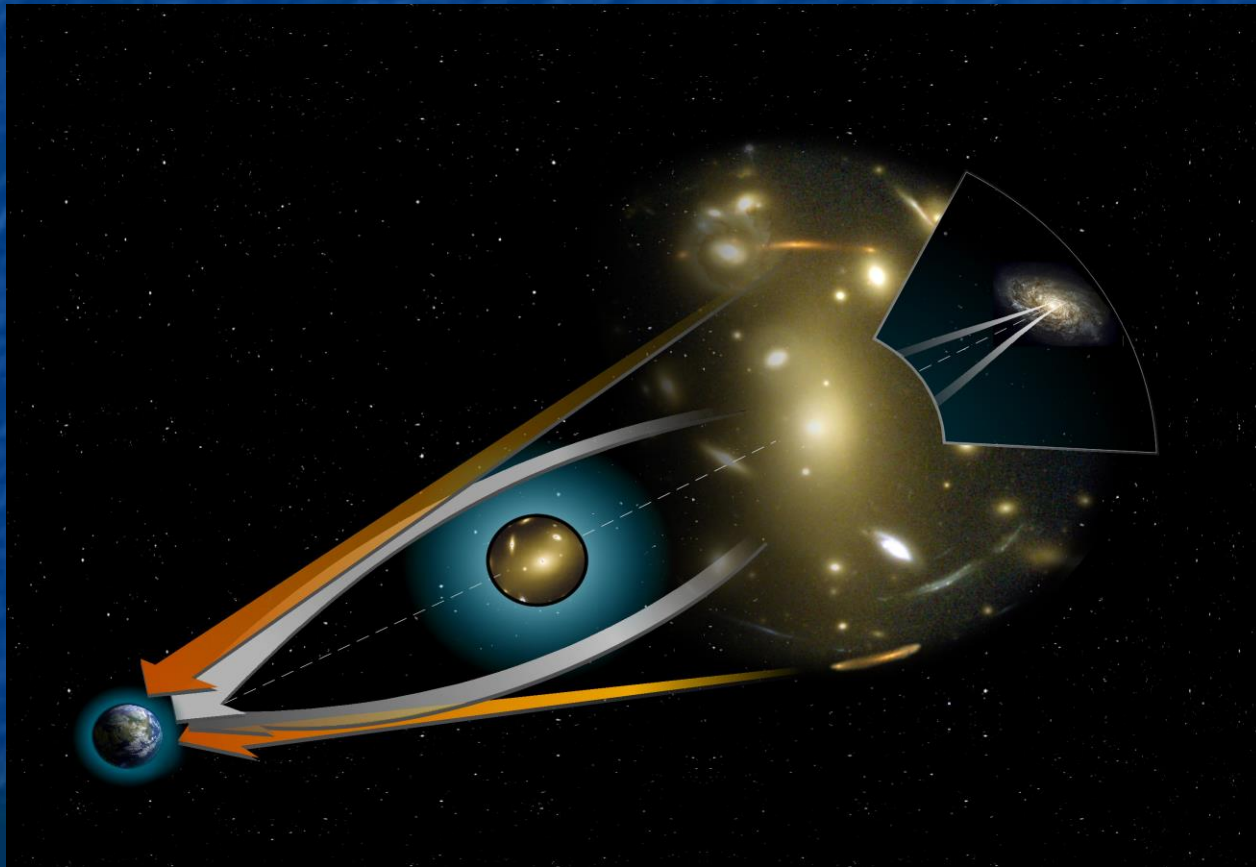
Un premier effet de la courbure de l'espace-temps est que la lumière est affectée par la gravitation

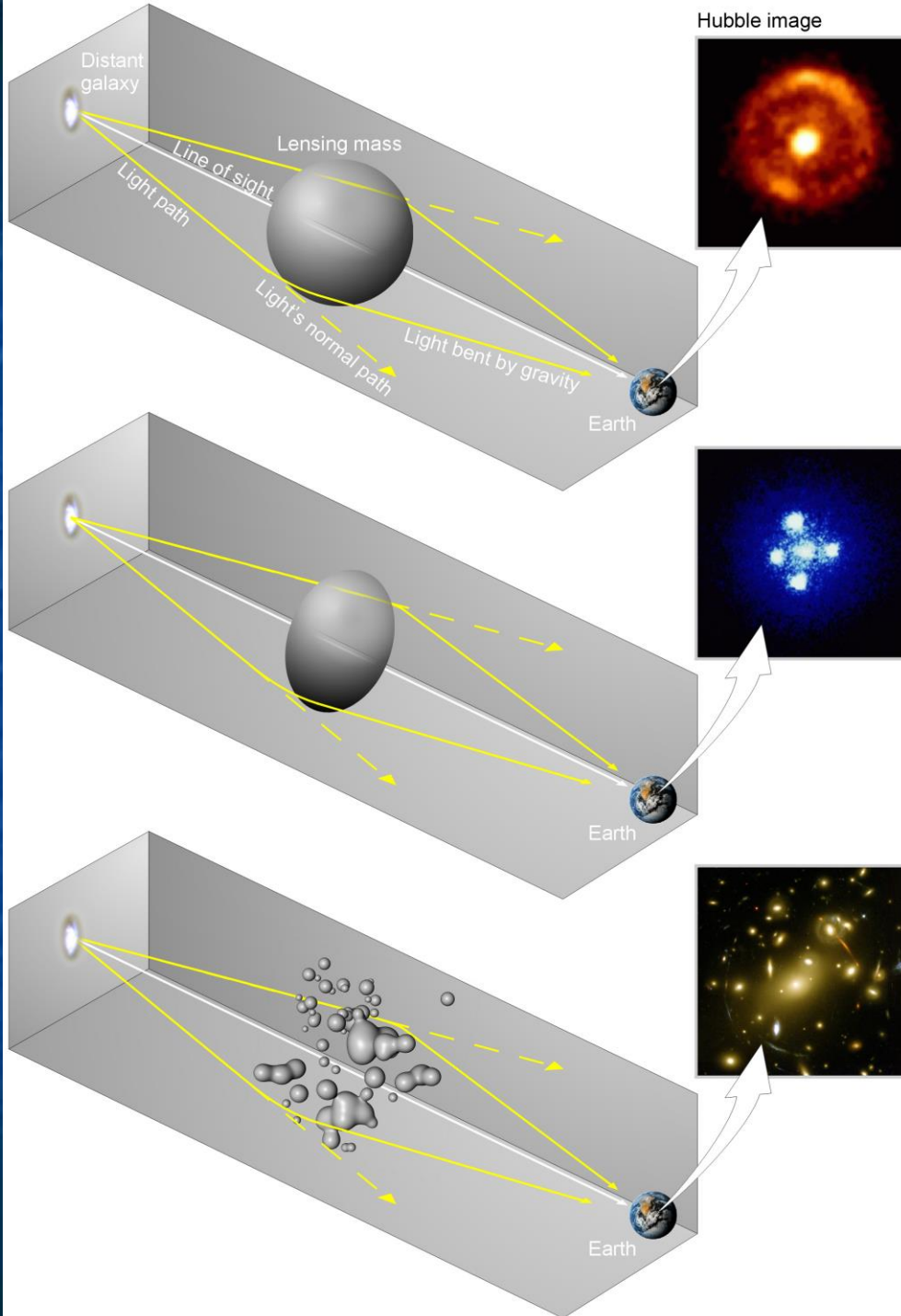




la sonde spatiale
CASSINI
mesure le retard
sur la transmission
des ondes radio,
dû à la courbure de
l'espace-temps.
Confirmation de la RG
au niveau de 20 parts
par million !

Lentilles gravitationnelles



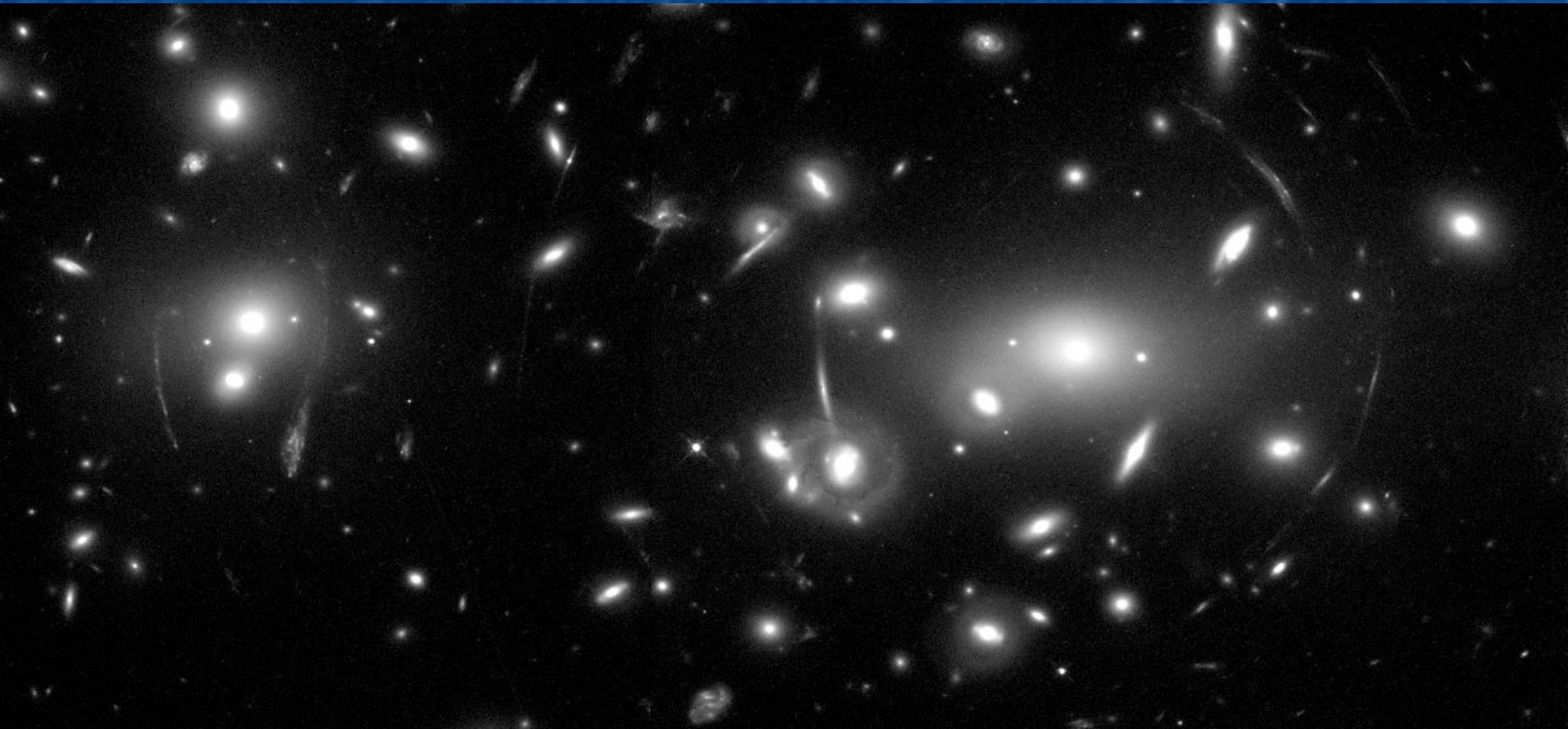


La distribution de la matière détermine la forme de l' image

Confirmation spectaculaire de la RG

Méthode de diagnostique: on peut reconstruire la distribution de masse même pour de la matière "obscure"

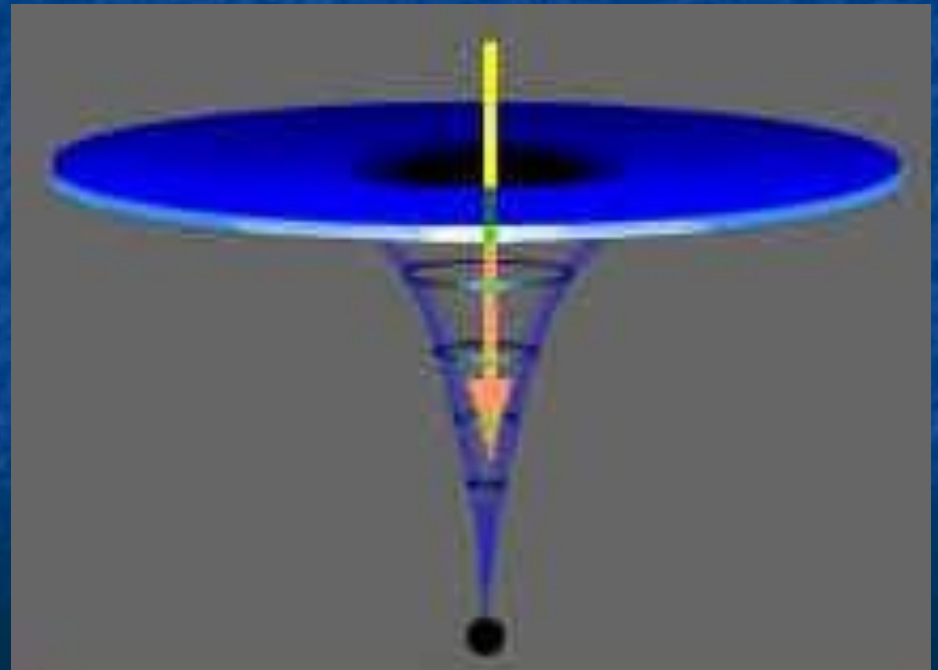
Galaxy cluster Abell 2218 (HST)



Les trous noirs

- La conséquence extrême de la RG:
une masse M à l'intérieur d'un rayon R , avec $R < R_s = 2GM/c^2$

- Singularité
- Zone de non-retour
(event horizon)



Autour du trou noir il se forme une zone de non-retour

- a l'intérieur, même la lumière n'arrive pas à s'échapper !
- le rayonnement émis par un objet qui tombe dans un trou noir devient
de plus en plus décalé vers le rouge
au fur et à mesure qu'il s'approche de la zone de non-retour
- si le trou noir est en rotation, même l'espace-temps à l'extérieur est entraîné en rotation

Une démonstration fausse(!!) de l'existence de la zone de non-retour

- $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m v^2$ $U = - GMm/R$

vitesse de libération : $E_{\text{kin}} + U > 0$

$$\frac{1}{2} m v^2 > GMm/R \quad \rightarrow \quad v^2 > 2GM/R$$

(correct pour une particule non-relativiste dans un champ faible)

- si on l'utilise pour $v=c$ (ce qui est faux!)

$$c^2 > 2GM/R \quad \rightarrow \quad R > 2GM/c^2$$

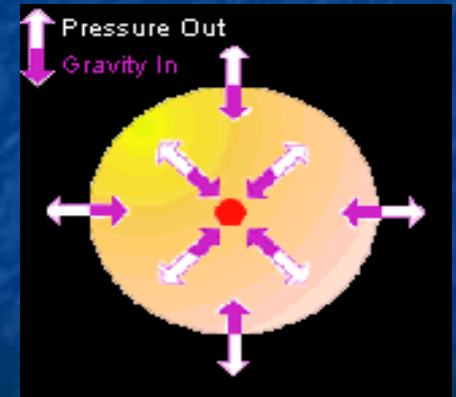
(Michell, Laplace, XIX siècle)

Formation des trous noirs

Toute la masse de la Terre dans 1 cm
ou
toute la masse du Soleil dans 3 km

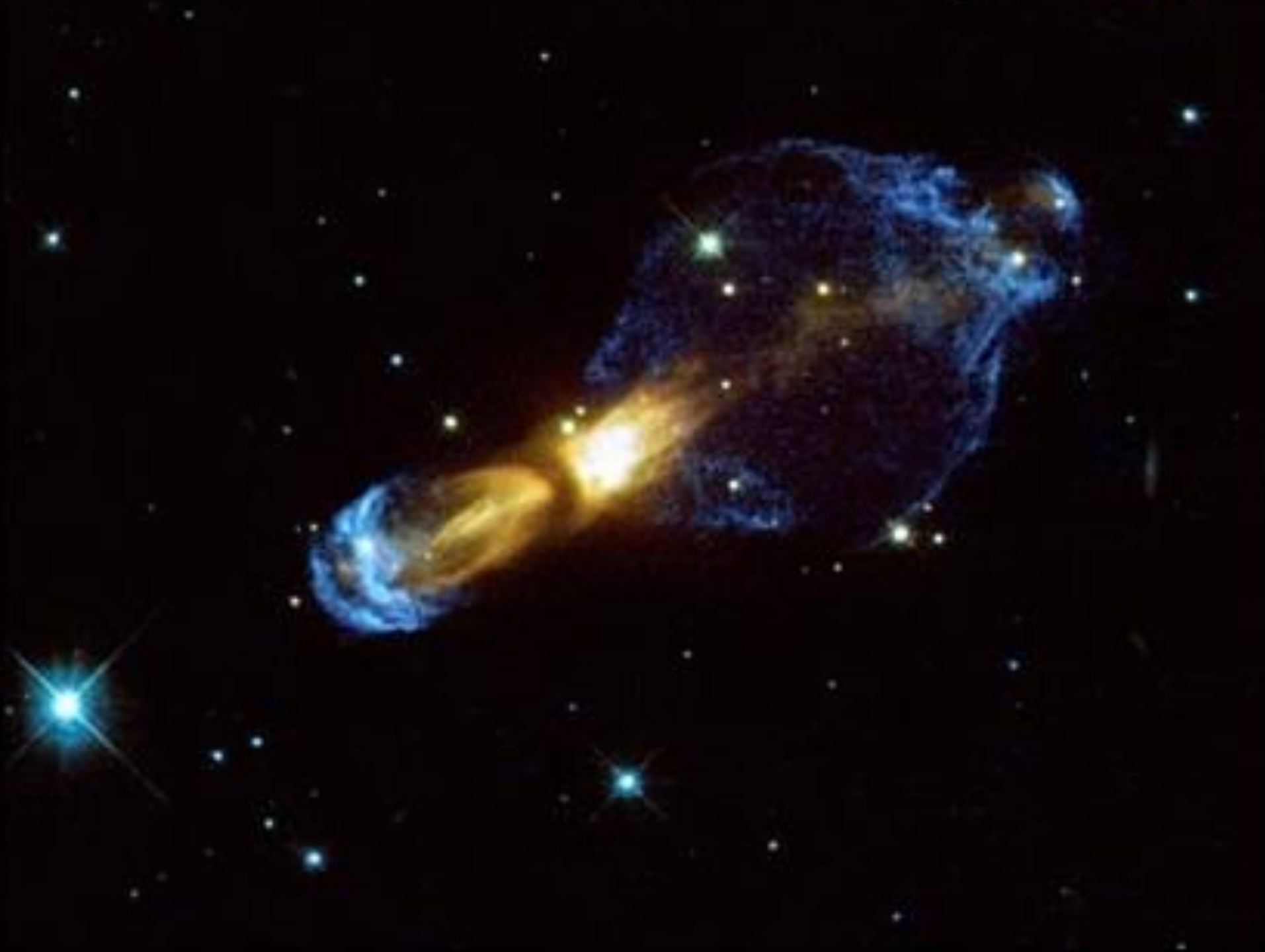
Des objets extrêmes peuvent être créés, comme le résultat final de l'évolution stellaire.

→ balance entre réactions nucléaires et contraction gravitationnelle

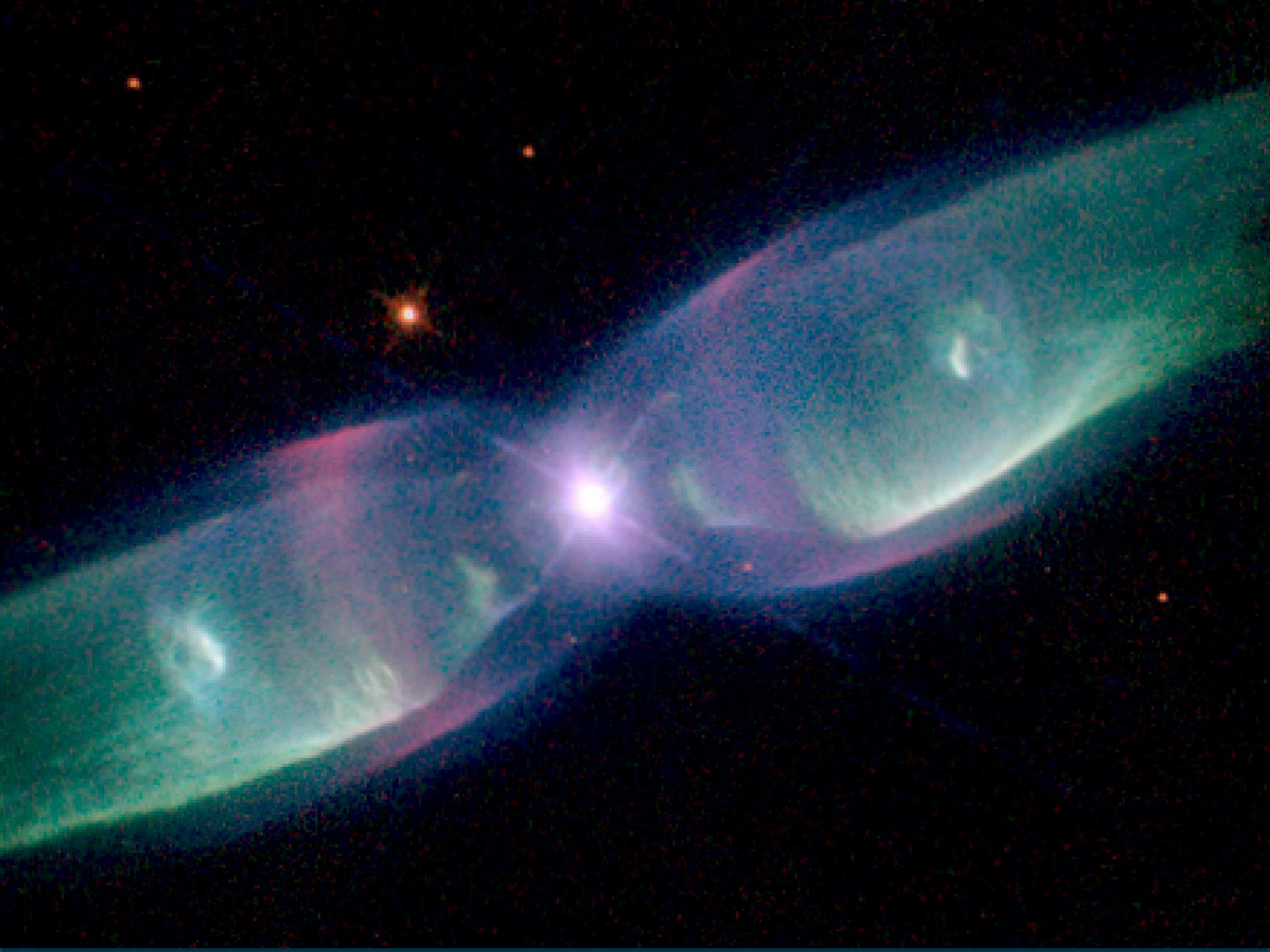


Quand le combustible nucléaire se termine, commence une dynamique complexe qui dépend de la masse de l'étoile

- Explosion et éjection des couches externes
- Contraction du noyau
 - $M < 1.4 M_{\odot}$: la pression quantique des électrons stabilise l'étoile à $R \approx 10^4$ km
→ **naine blanche**
 - $1.4 M_{\odot} < M < 3 M_{\odot}$: la pression quantique des neutrons stabilise l'étoile à $R \approx 10$ km
→ **étoile à neutrons** ($R \approx R_S$!)
 - $M > 3 M_{\odot}$ → **trou noir**

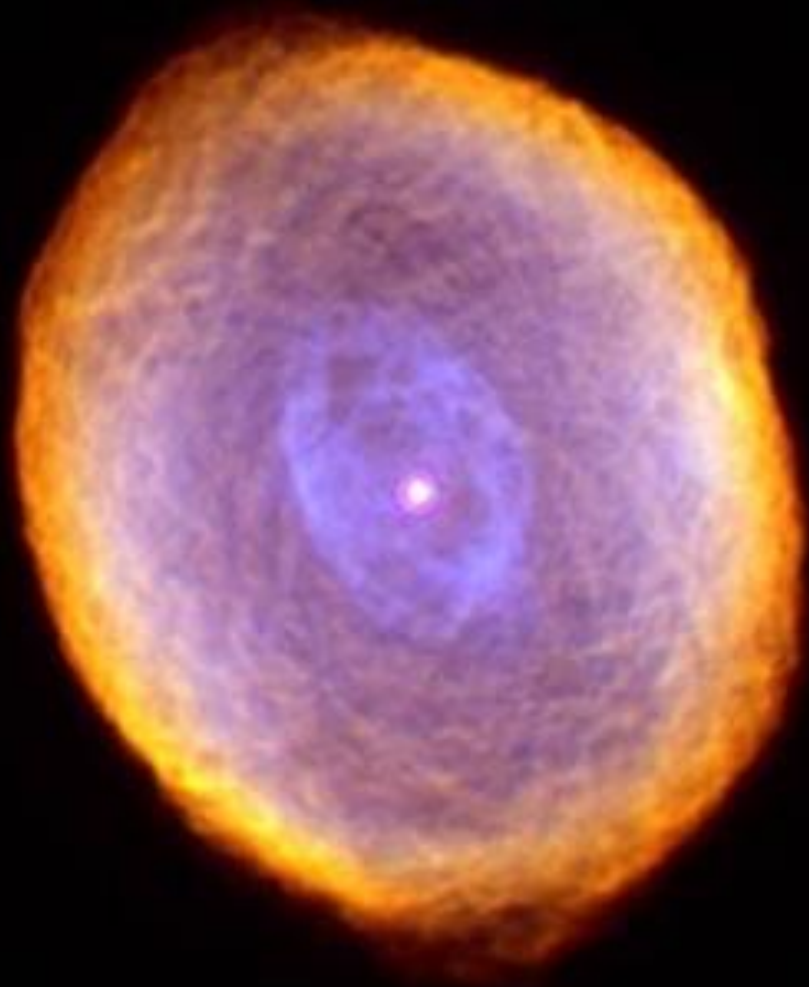














Étoiles à neutrons

- Observables comme pulsars

- après la contraction, l'étoile a une vitesse angulaire énorme: $L = m v r = m \omega r^2$;

le moment cinétique L est conservé:

ωr^2 est constant. $r : 10^4 \text{ km} \rightarrow 10 \text{ km}$

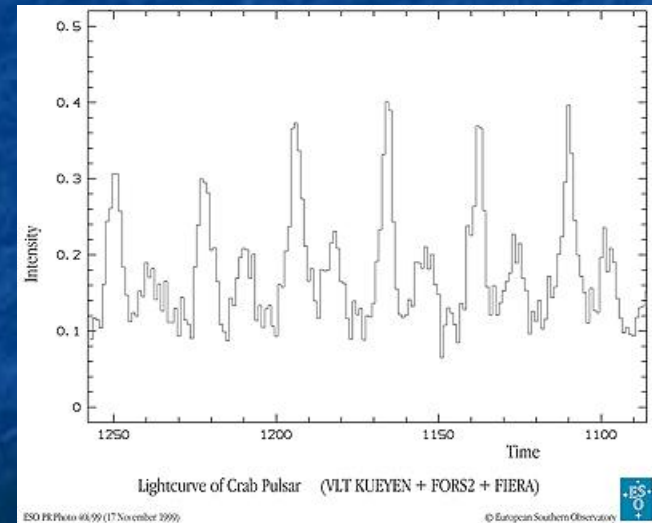
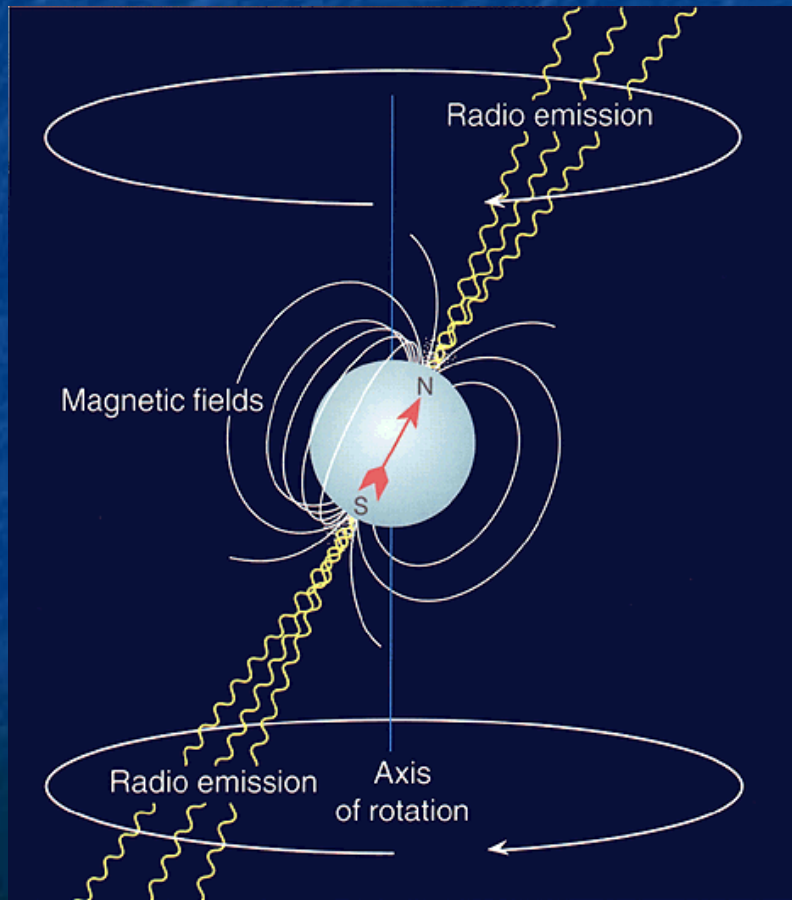
donc ω **augmente de un facteur 10^6 !**

Typiquement la période est entre **1ms (!!!)** et quelques seconds

- Pour des raisons similaires il y a de grands champs magnétiques et électriques à la surface

Étoiles à neutrons observables comme **pulsars**

- 1000 pulsars connus dans la Galaxie



Crab pulsar

Résultat de
l'explosion d'une
supernova observé
par les Chinois en
1054

L'énergie rayonnée
par la nébuleuse est
énorme et vient de
l'énergie rotationnelle
du pulsar

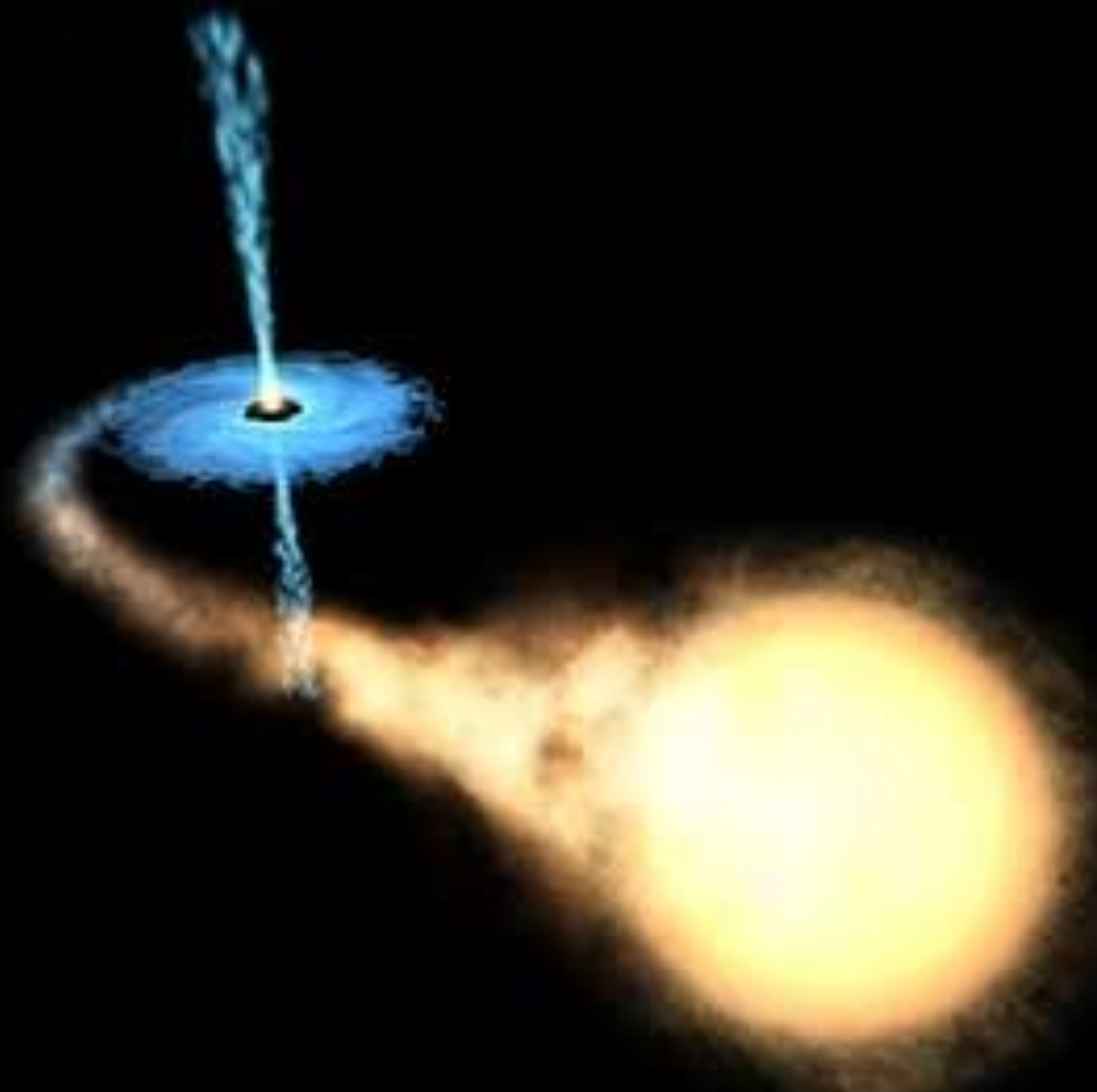


Trous noirs

■ Comment détecter un trou noir?

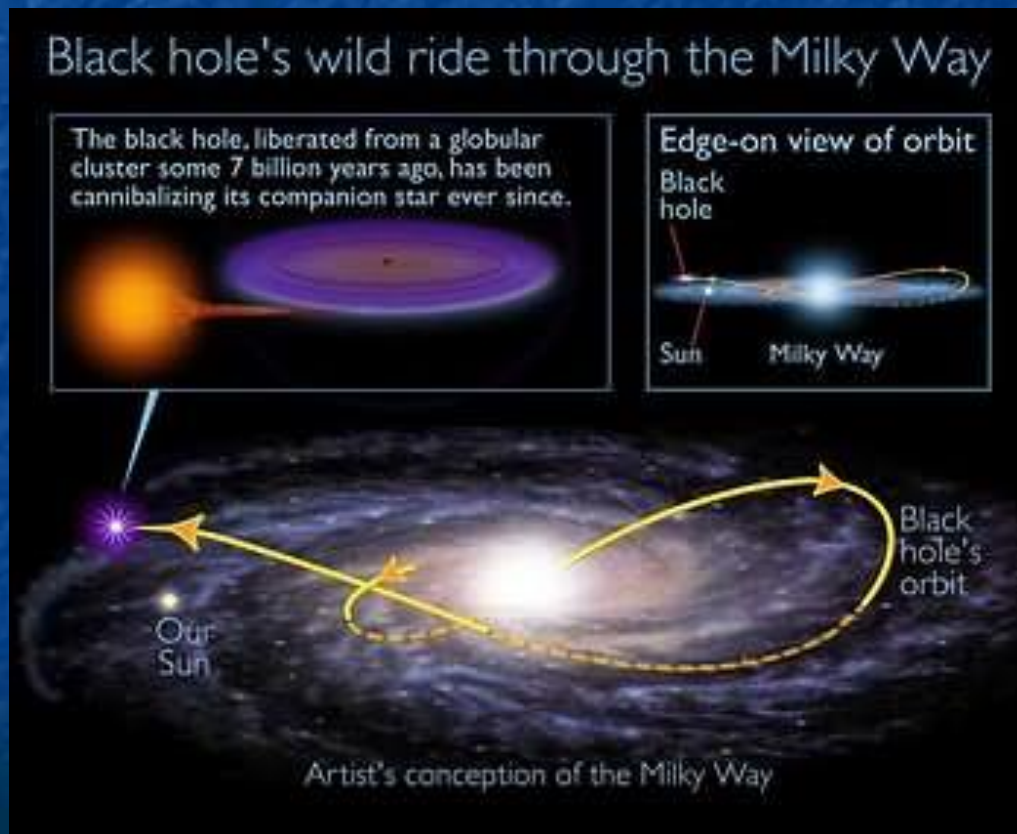
Pourquoi “noir”?

- La lumière émise dans la zone de non-retour n'arrive pas à l'extérieur
- La lumière émise près de la zone de non-retour perd presque toute son énergie pour s'échapper et devient invisible
“décalage vers le rouge gravitationnel”
- → on observe uniquement l'effet gravitationnel du trou noir sur des objets proches



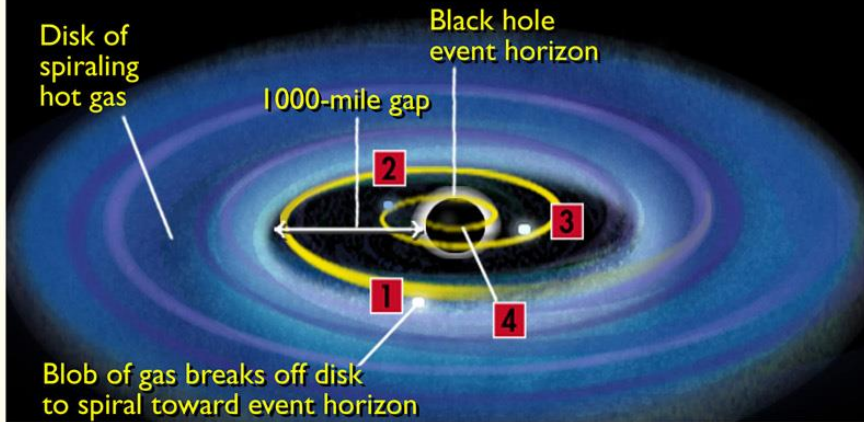
Trous noirs observé

- $M \approx 3M_{\odot}$: dans le plan galactique (Voie lactée)

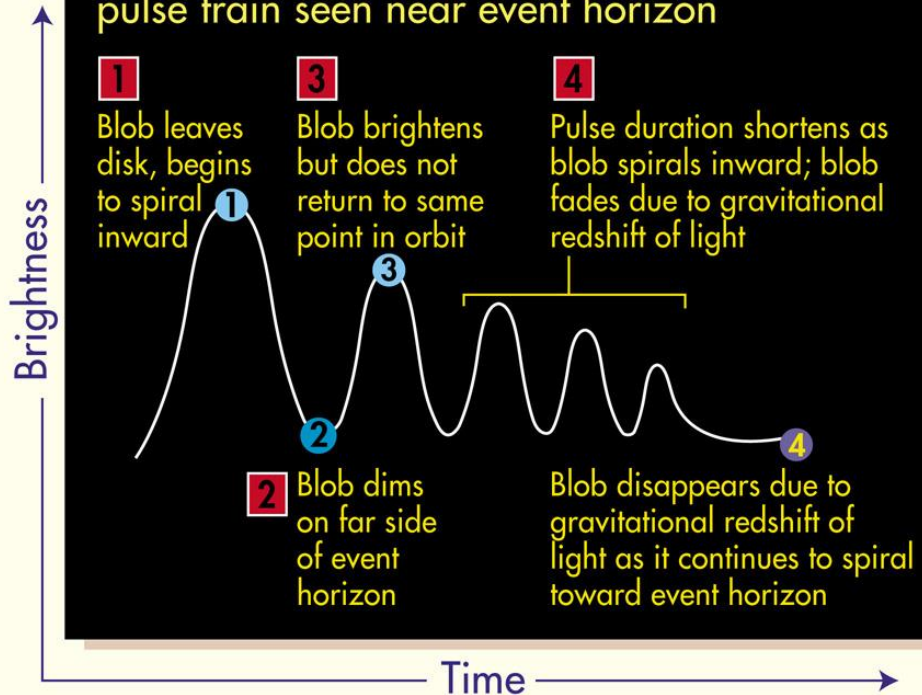


The object is called XTE J1118+480 and was discovered by the Rossi X-Ray satellite on March 29, 2000. Later observations with optical and radio telescopes showed that it is about 6,000 light-years from Earth, and it is a "microquasar" in which material sucked by the black hole from its companion star forms a hot, spinning disk that spits out "jets" of subatomic particles that emit radio waves.

Signature of piece of matter falling into black hole Cygnus XR-1



Ultraviolet light signature of dying pulse train seen near event horizon



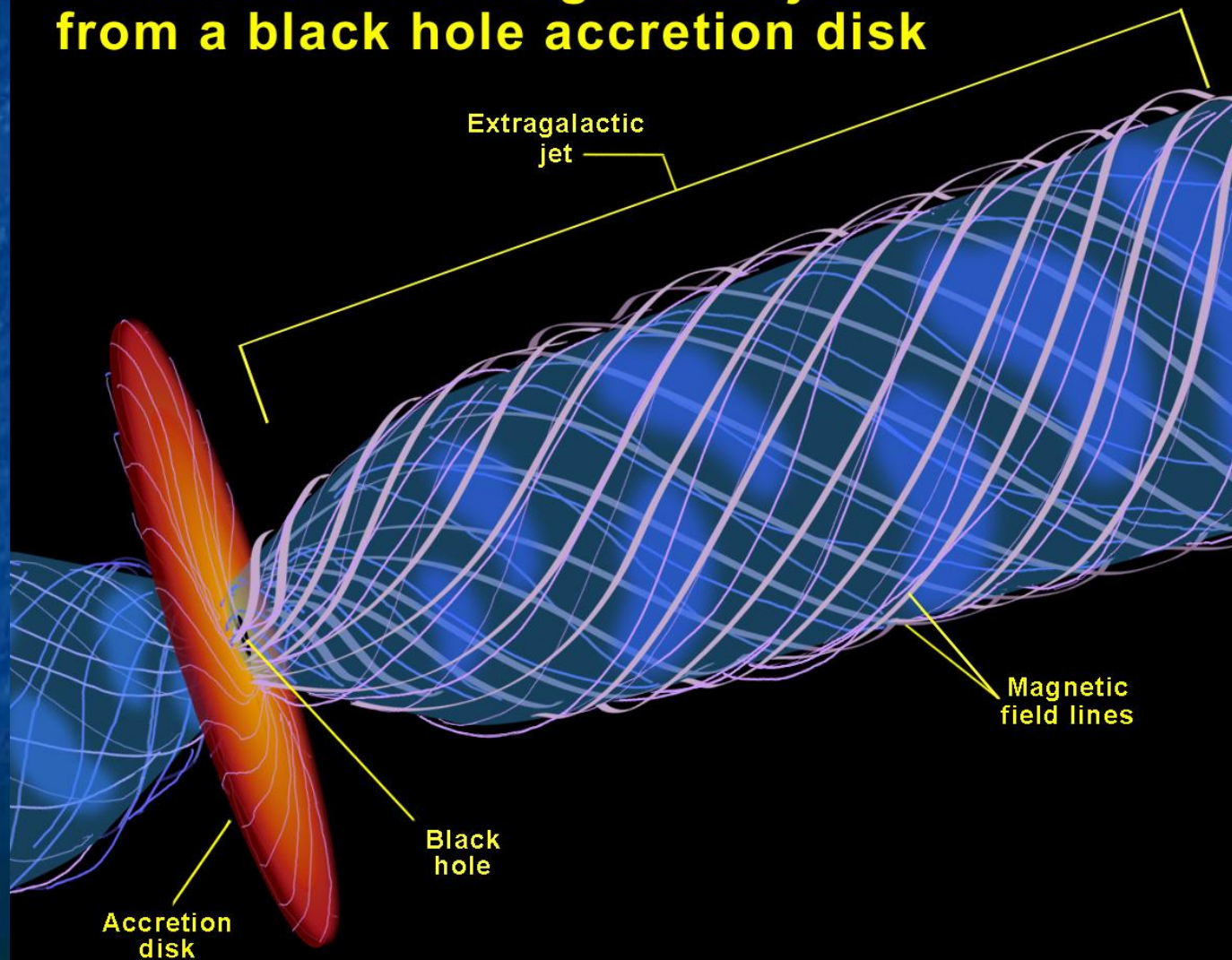
NASA's Hubble Space Telescope may have, for the first time, provided direct evidence for the existence of black holes by observing the disappearance of matter as it falls beyond the event horizon....observing pulses of ultraviolet light from clumps of hot gas fade and then disappear as they swirled around a massive, compact object called Cygnus XR-1. This activity is just as would have been expected if the hot gas had fallen into a black hole.

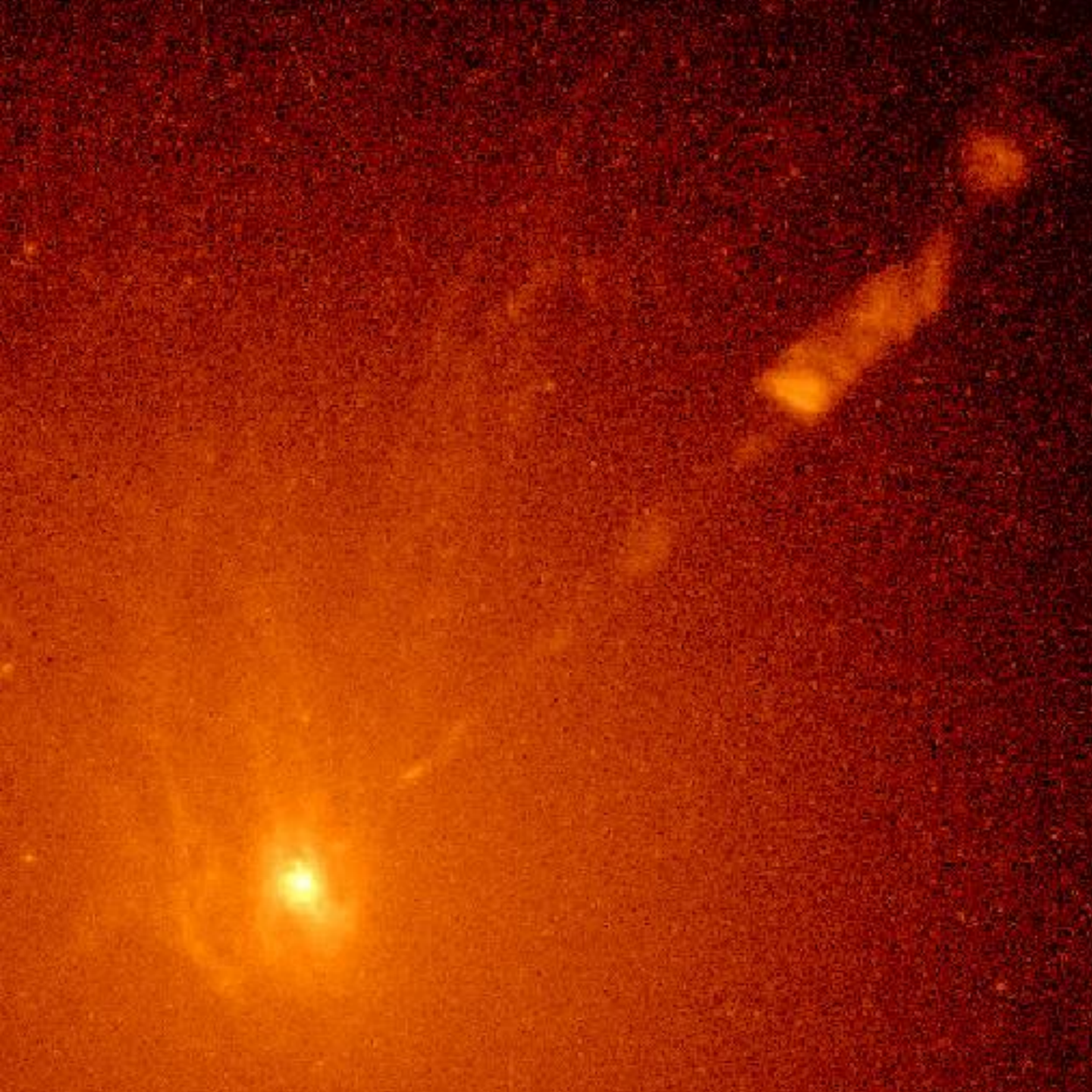
Trous noirs géants

- Au centre des galaxies ils peuvent se cacher des trous noirs de masse $10^6-10^9 M_{\odot}$
- Même dans le centre de **notre galaxie!**
 - La source radio Sgr A* émet 100 000 fois plus que le Soleil, et l'émission provient d'une zone plus petite que l'orbite de la Terre autour du Soleil
 - La vitesse de la matière qui tourne autour de Sgr A* permet de déterminer la masse:
 $M = 2.6 \cdot 10^6 M_{\odot}$

Détection des trous noirs géants extragalactiques

Formation of extragalactic jets from a black hole accretion disk





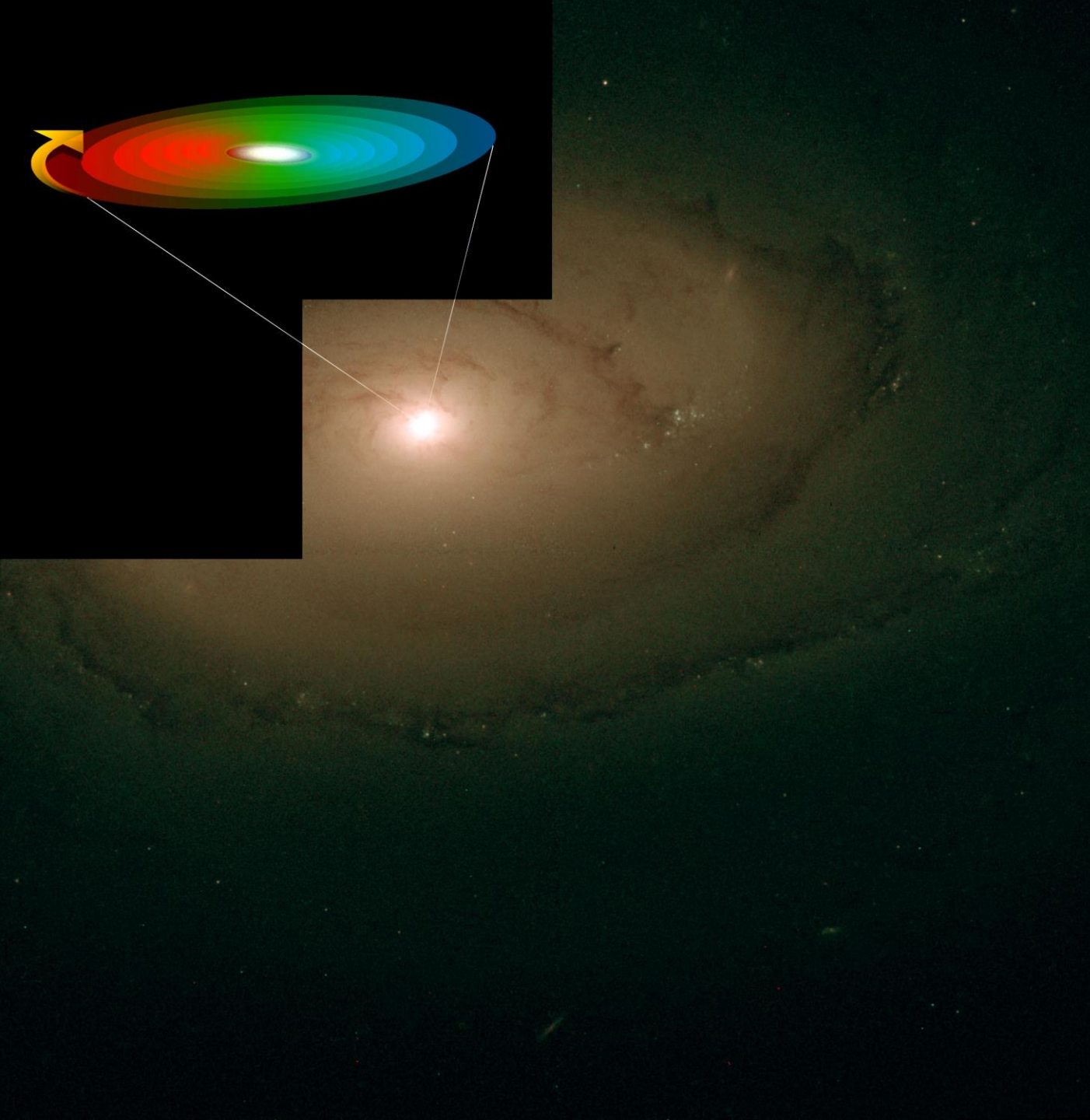
Galaxie elliptique
géante M87

Distance: 50M a.l.
amas de la Vierge

Par la rotation de
la matière on
trouve un trou
noir central de

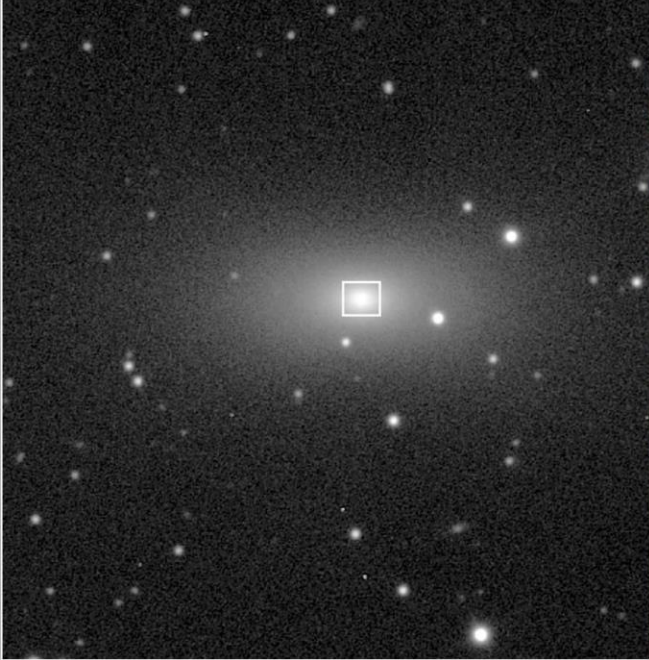
$$M = 10^9 M_{\odot}$$

Le faisceau est
bien visible

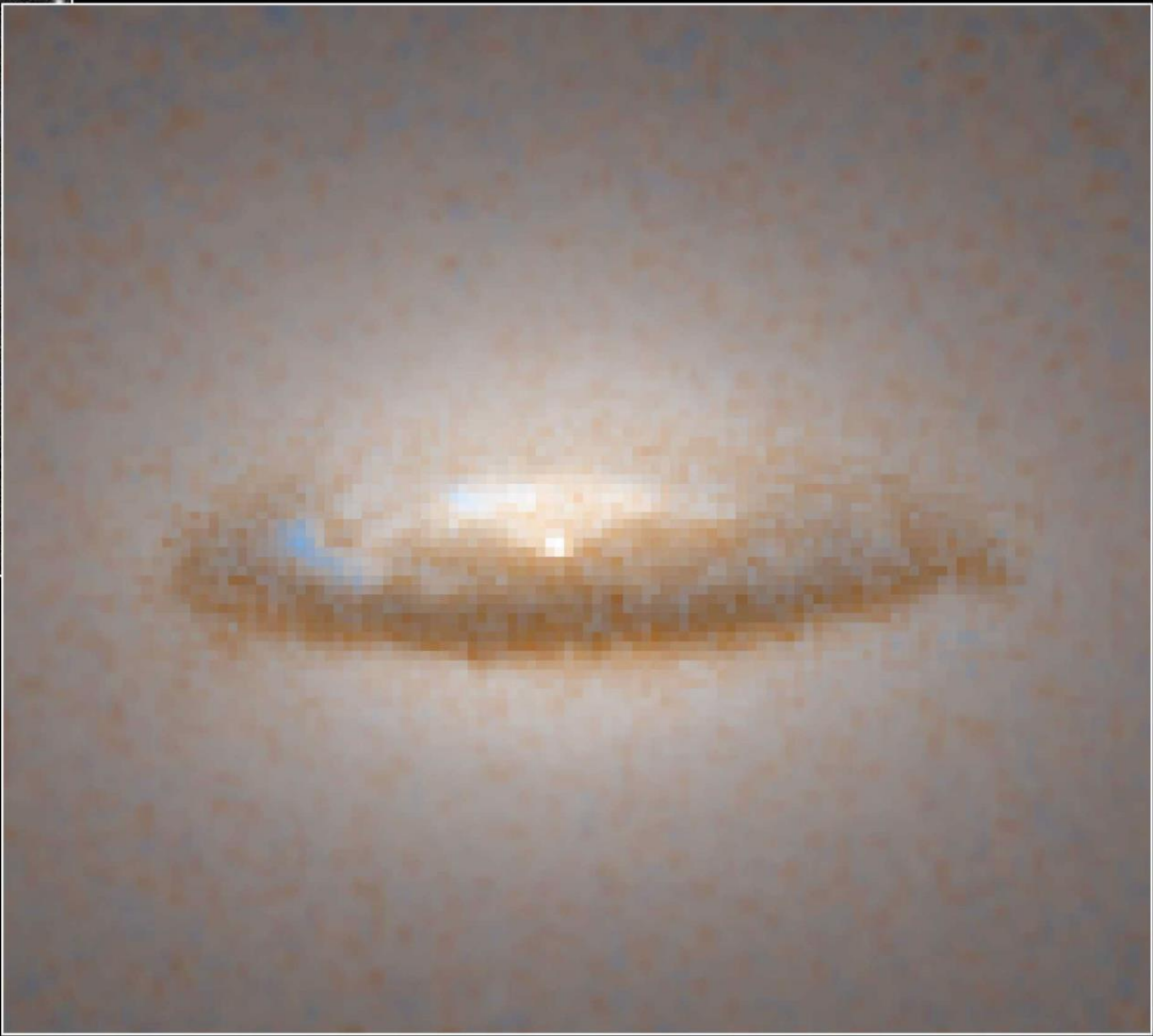


Galaxie

NGC 4450

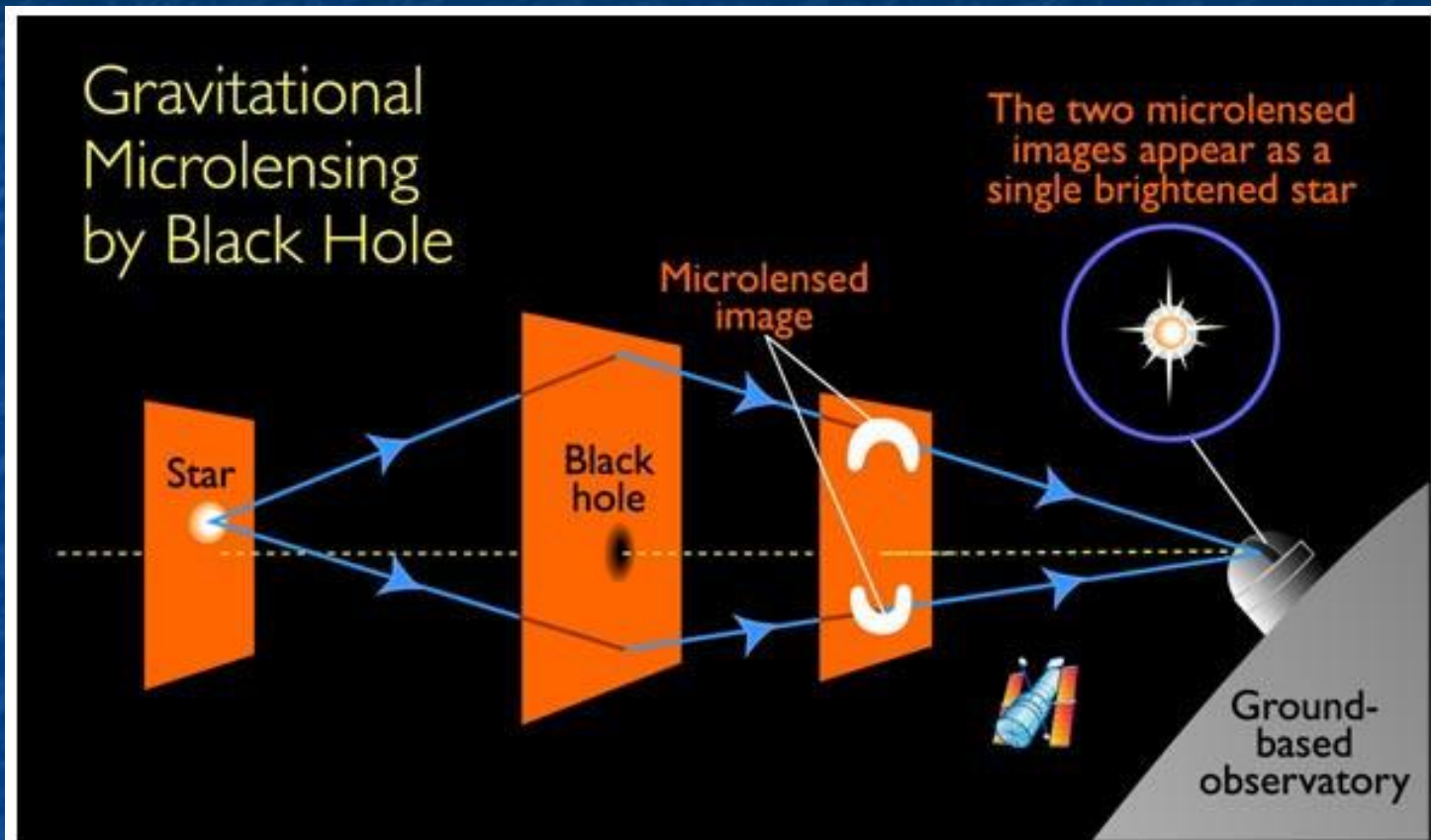


Ground



Disk around a Black Hole in Galaxy NGC 7052
Hubble Space Telescope • Wide Field Planetary Camera 2

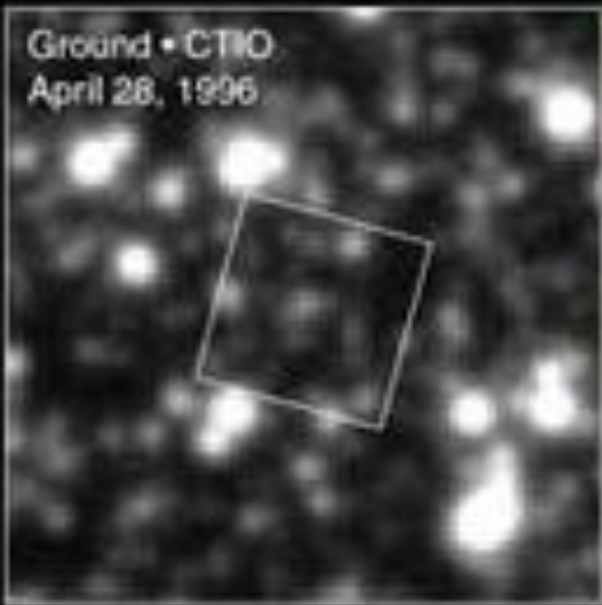
Trous noirs isolés détectés par microlensing



The intense gravitational field of a foreground black hole acts like a powerful lens in space. In the diagram, the black hole "lens" distorts and brightens the image of a background star. The gravitational lens smears the star's image into two banana-shaped images with a total surface area several times that of the original stellar disk.

Though the angular separation is shown here, it is 100 times smaller than what HST can resolve. Hence the phenomenon is called "microlensing." HST and other telescopes instead see a brightening of the star as the black hole drifts by, but they do not resolve the multiple images.

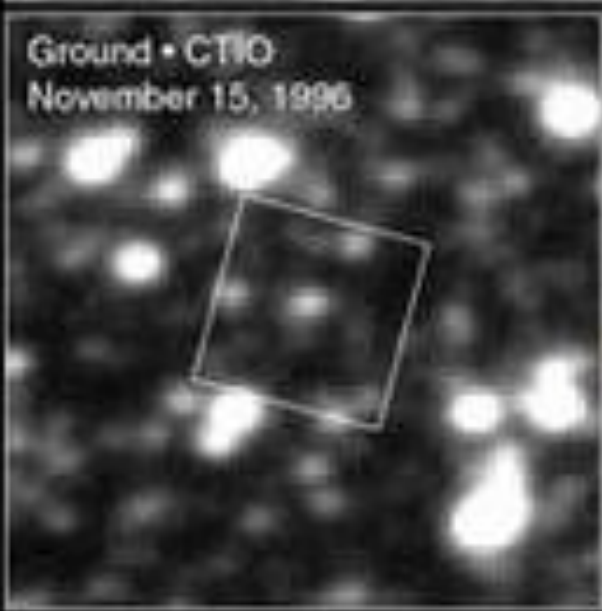
Ground • CTIO
April 28, 1996



HST • WFPC2



Ground • CTIO
November 15, 1996

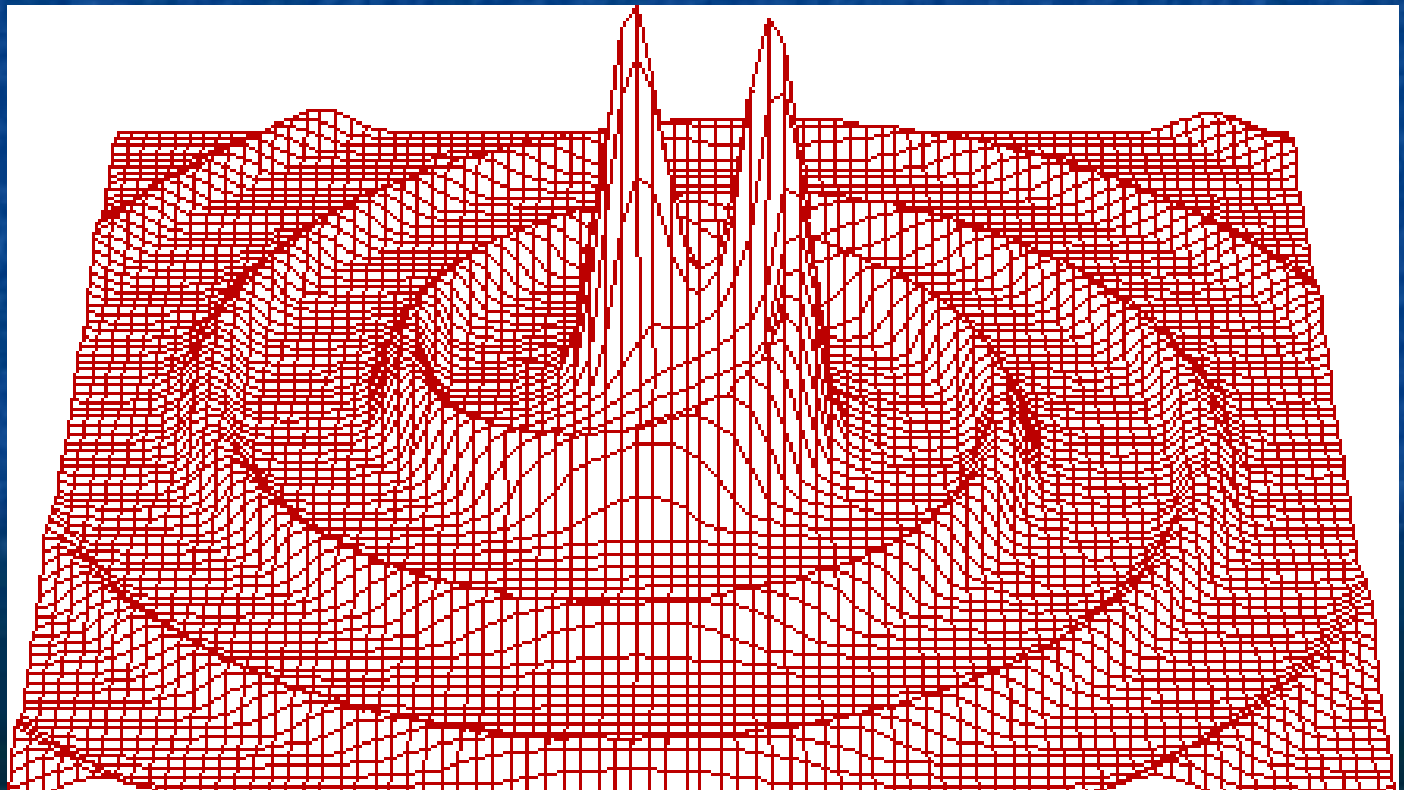


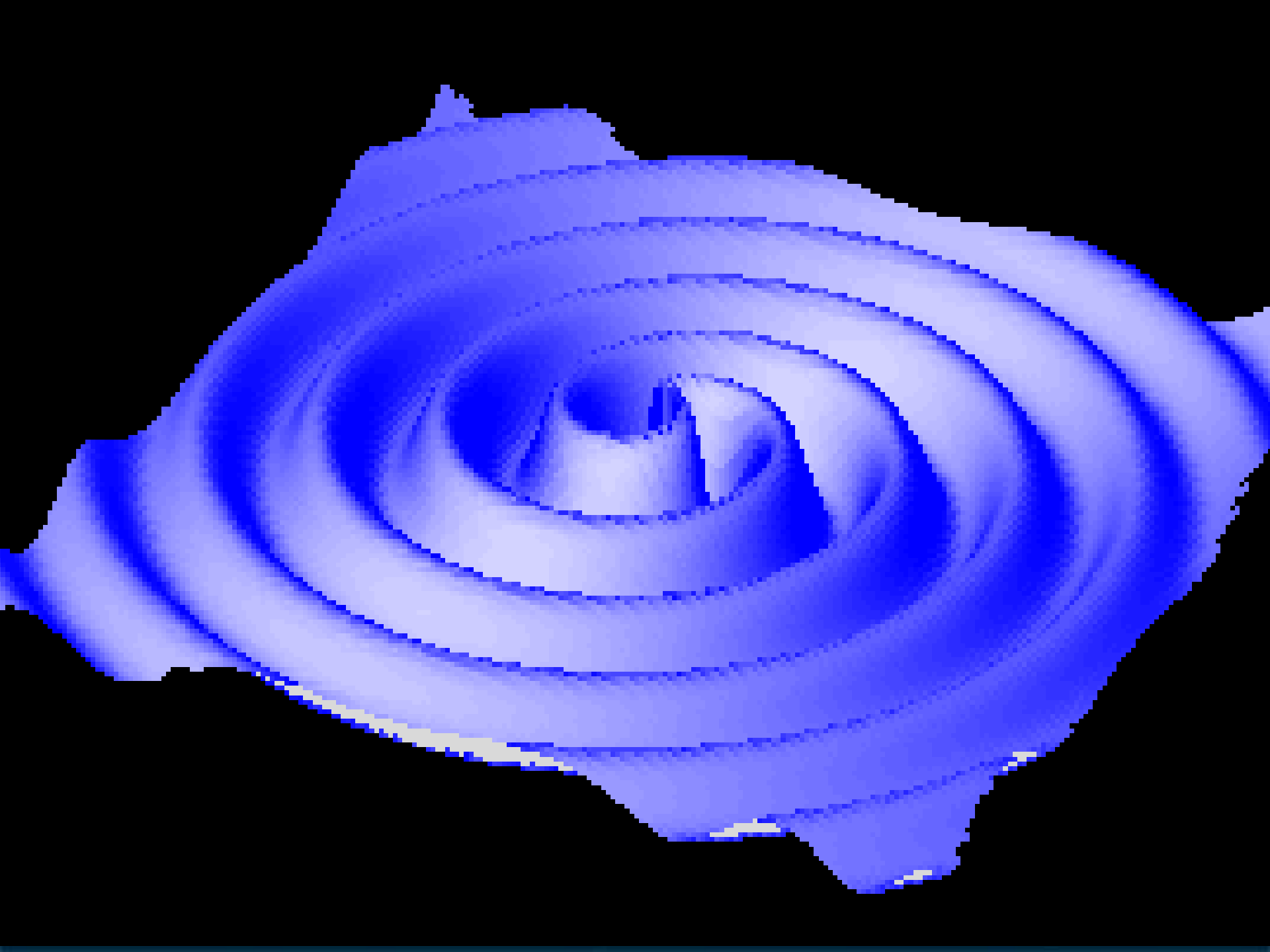
Microlens Event MACHO-96-BLG-5
Hubble Space Telescope • WFPC2

$M \approx 6 M_{\odot}$

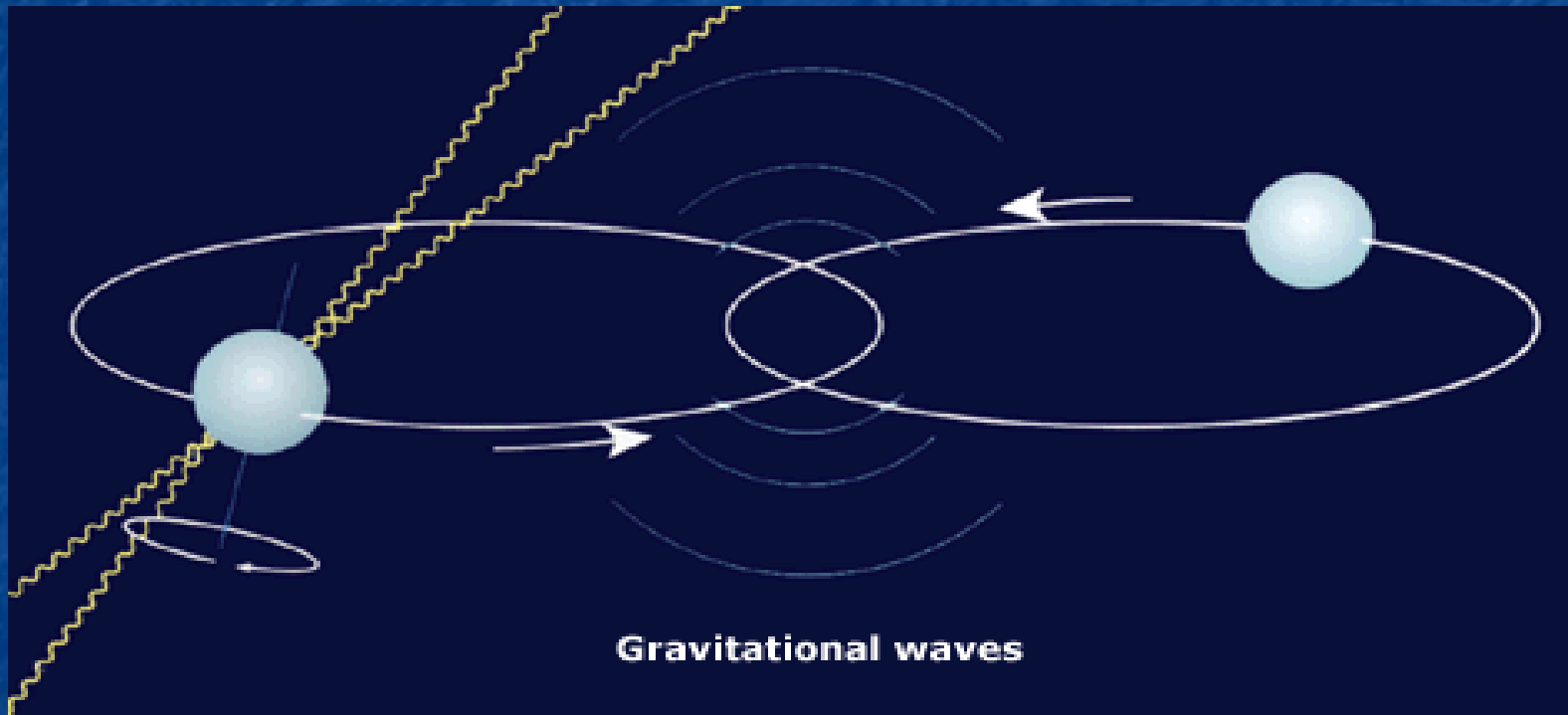
Les ondes gravitationnelles

- Petites perturbations dans la courbure de l'espace-temps, générées par le mouvement de masses





Ondes gravitationnelles par le pulsar PSR1913+16



$$P=27906.9807807(9) \text{ s}$$

$$dP/dt= -2.425(10) 10^{-12}$$

- Pulsars sont des horloge naturels d' une stabilité intrinseque exceptionnelle.
(Au moins comparable aux horloges atomiques)
- Les résidues temporels sont influencés par des effets relativistes divers
(e.g. Roemer, Einstein and Shapiro time delays)

- Le fit de la formule du timing (après 27 ans d'observations!), permet de déterminer les paramètres keplerien avec une très bonne précision:

$$a_1 \sin i = 2.341774(1) \text{ s}, \quad e = 0.6171338(4)$$

$$T_0 \text{ (MJD)} = 46443.99588317(3), \quad \omega = 226.57518(4) \text{ deg}$$

$$P = 27906.9807807(9) \text{ s}$$

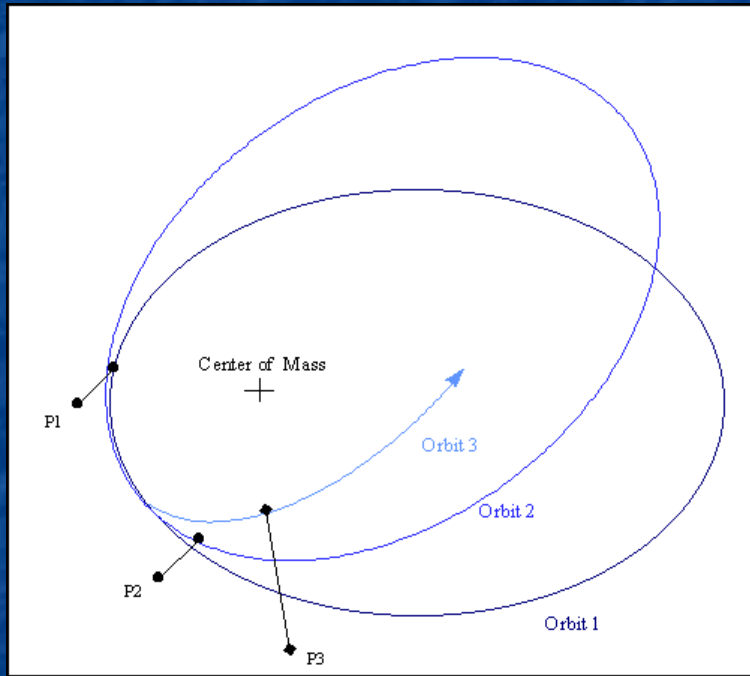
- 3 paramètres post-keplerien:

$$d\omega/dt = 4.226607(7) \text{ deg/yr}, \quad \dot{\omega} = 0.004294(1)$$

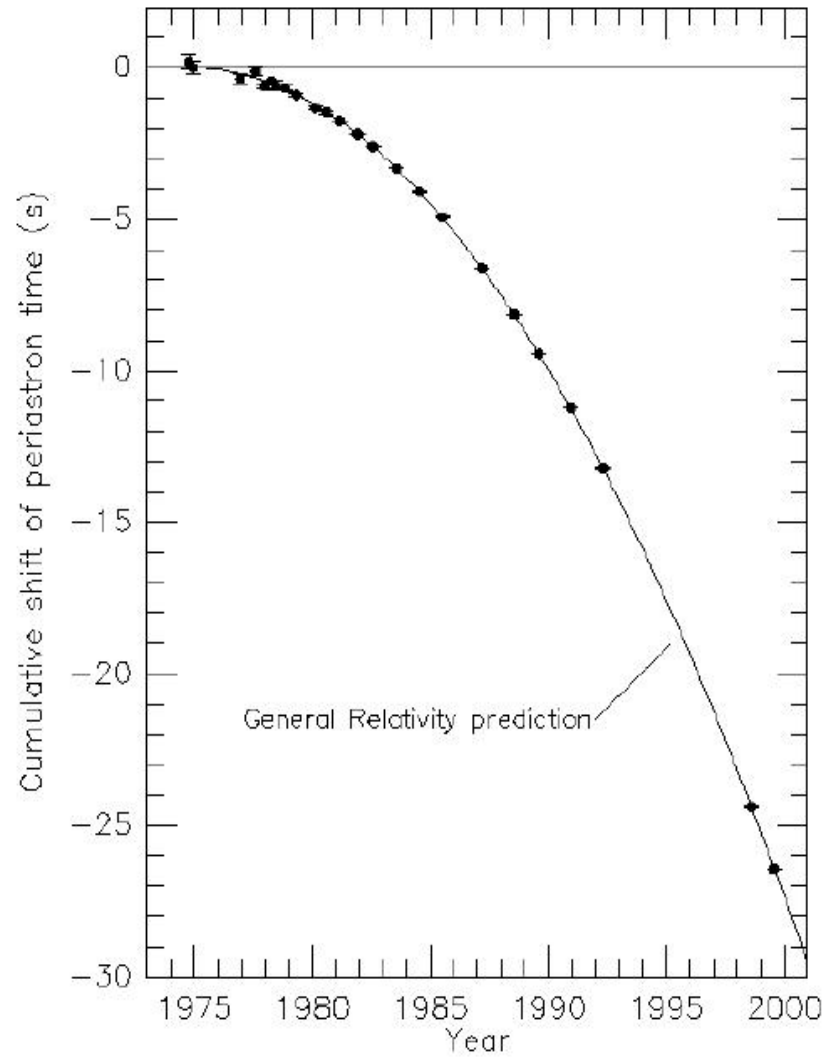
$$dP/dt = -2.4211(14) \times 10^{-12}$$

- $d\omega/dt$, $\dot{\varphi}$ fixé par la RG en fonction des masses m_p et m_c
- dP/dt fixé par la formula du quadrupole pour l'émission d'ondes gravitationnelles.
 - $\dot{\varphi}$ $m_p = 1.4408(3) M_S$, $m_c = 1.3873(3) M_S$

$$(dP/dt)_{\text{exp}} / (dP/dt)_{\text{GR}} = 1.002 \pm 0.005$$



Hulse-Taylor,
Nobel Prize 1993

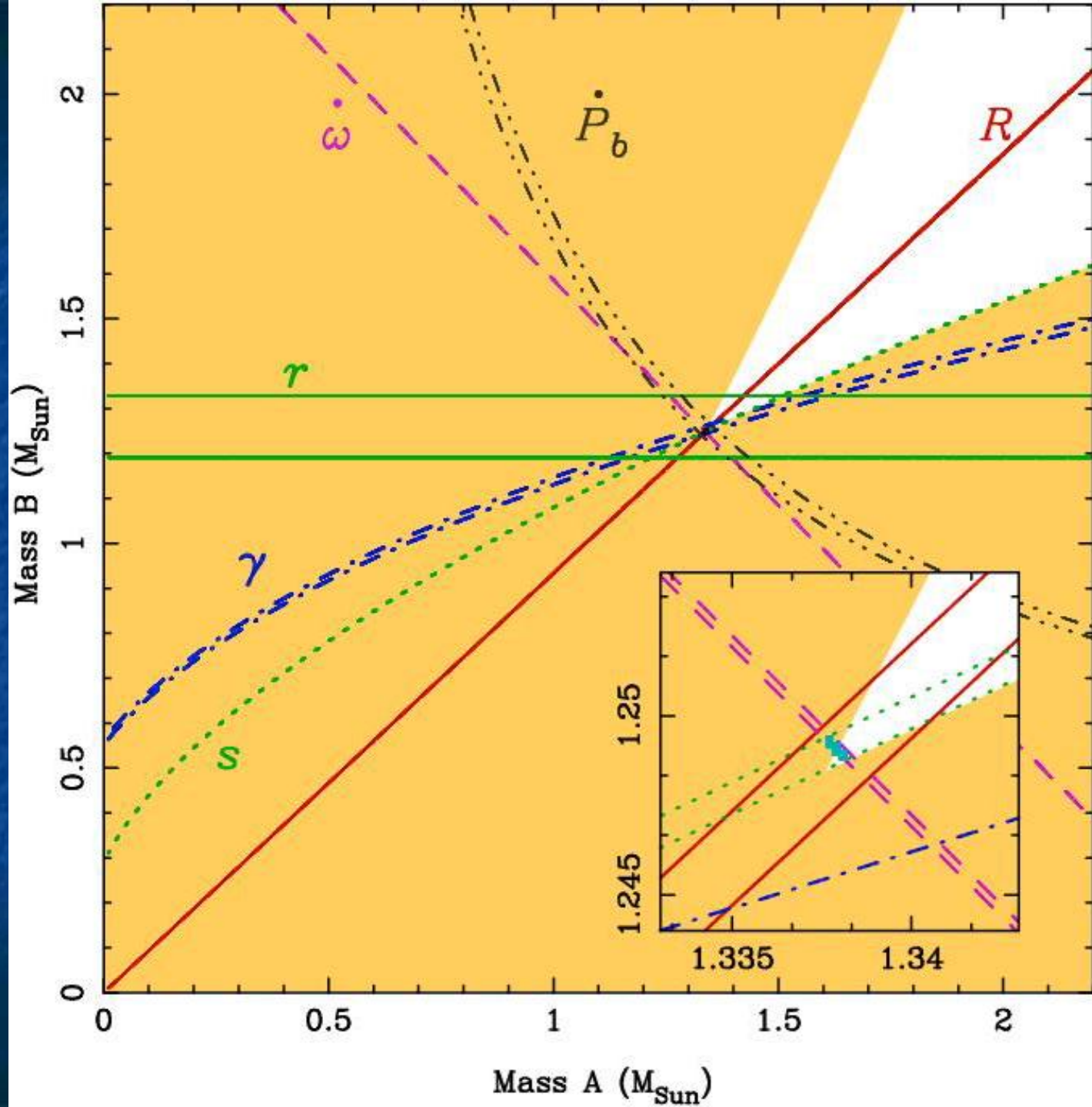


double pulsar PSR J0737-3039

- deux étoiles à neutron, détectées comme pulsars
- période de l'orbite 2.4 hr !
- presque 'edge-on' (Shapiro delay)
- pulse étroit, faible mouvement propre , $d=500$ pc petites corrections dues à accélération différentielle de la galaxie).

5 paramètres post-Keplerien mesurés

après juste 2.5 ans de données, test de la RG au niveau de 0.05%, beaucoup mieux que le pulsar de Hulse-Taylor



What we learn from this

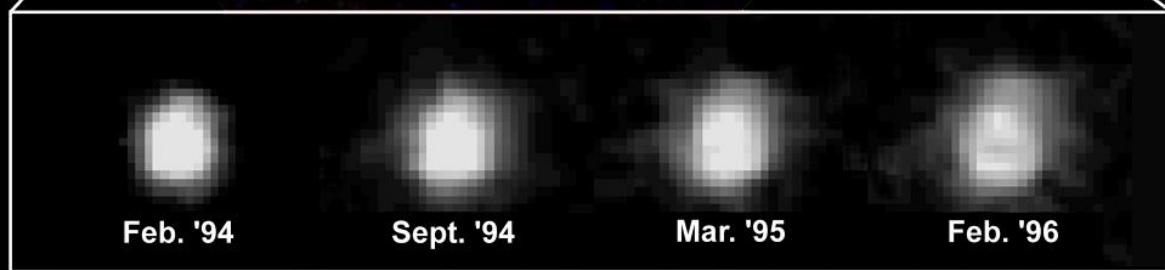
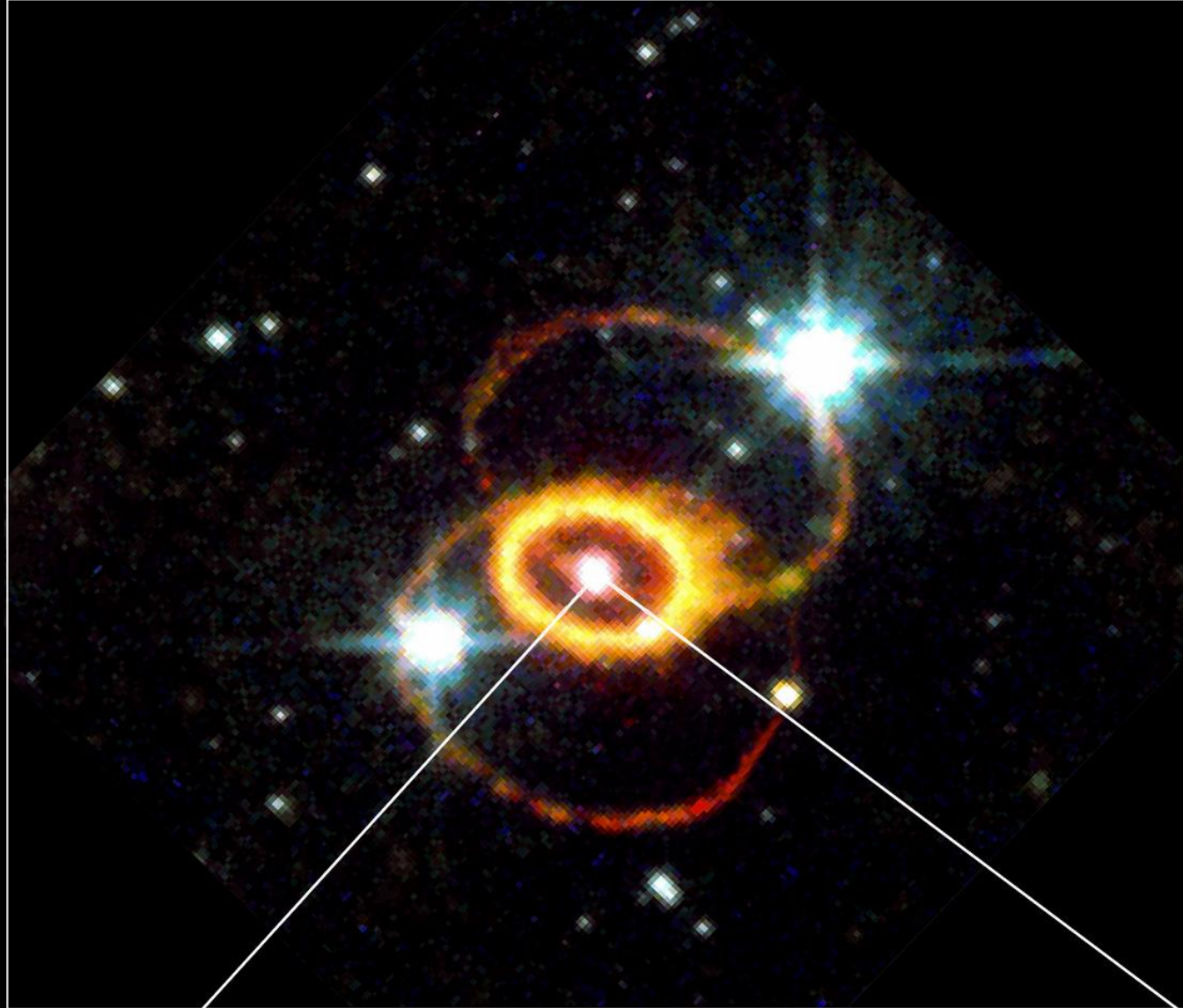
- **GWs exist !** (Not obvious theoretically until the 1950s)
- **We are able to compute their emission,** even when the sources have strong gravitational fields
- **We understand how GWs backreact on the sources**

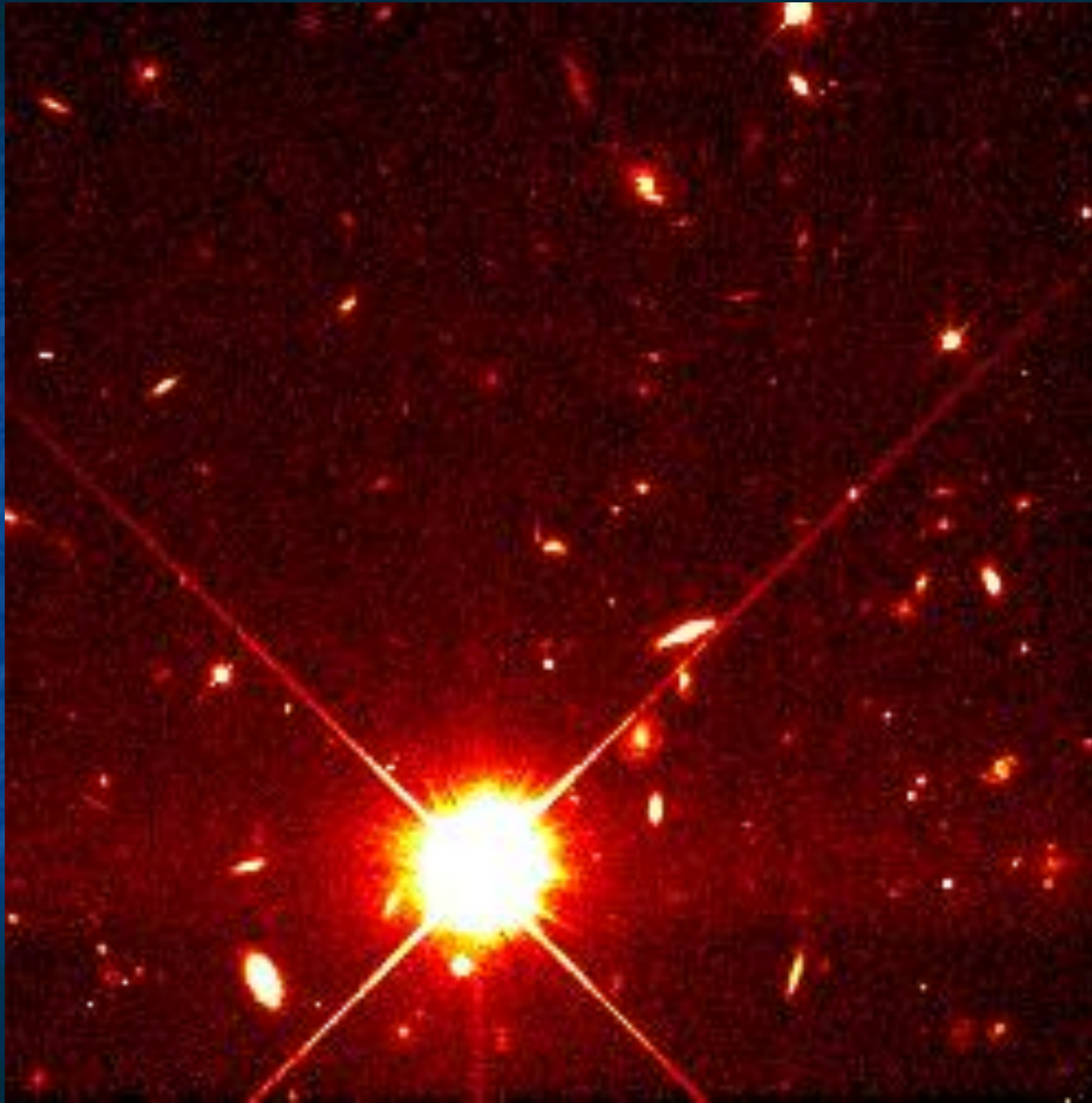
Not obvious theoretically (because of the non-linearity of GR) until the 1980s-1990s

La gravitation est la plus faible des forces.
Pour produire des OG mesurable, il faut
des événements **titanesques**...

...qui, d'un autre côté, ne sont pas si rares
dans l'Univers

SN1987A

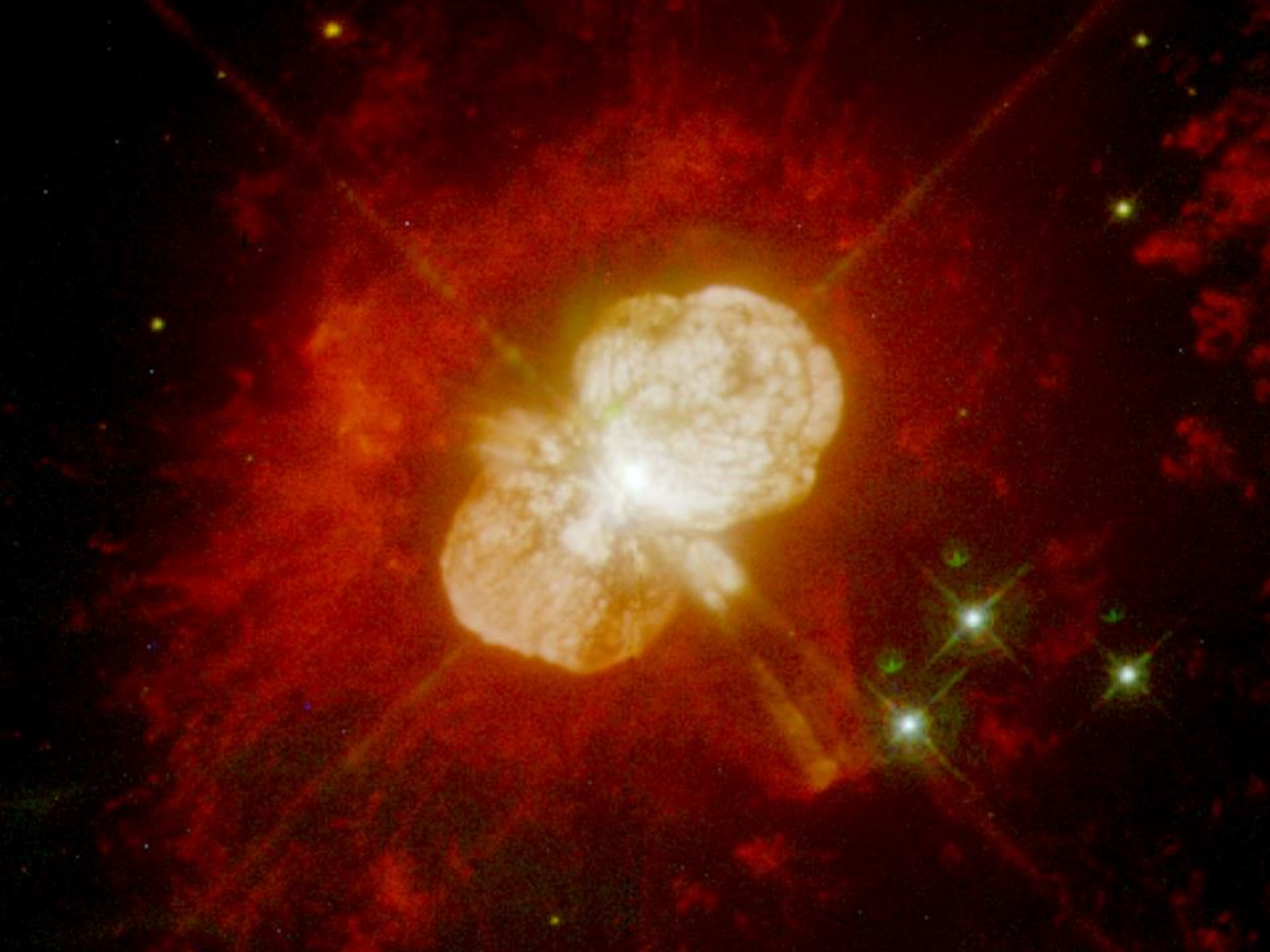


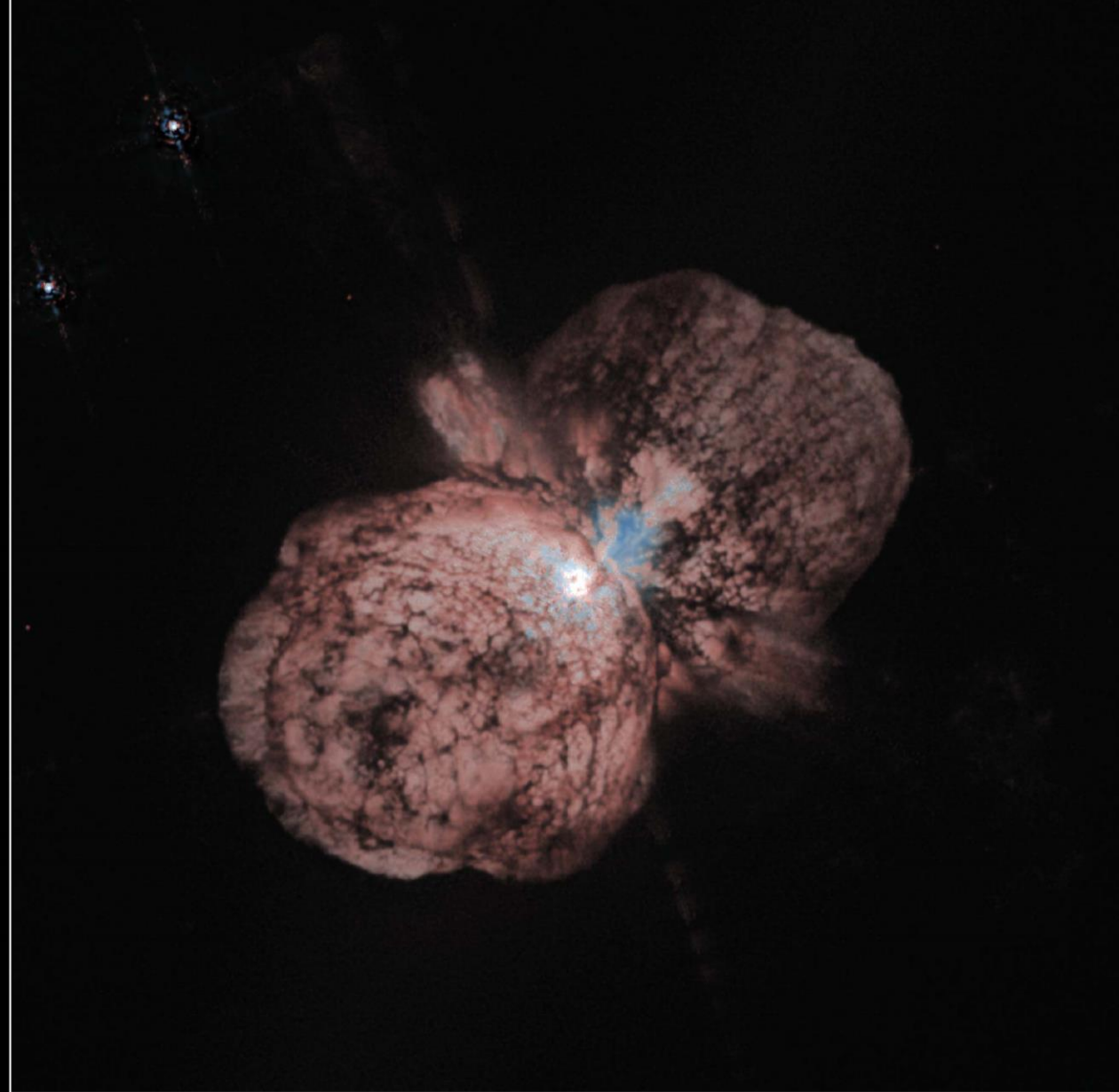


Supernova
1997ce
Très loin:
5 milliard a.l.



Nébuleuse
NGC3372





Dans la Voie Lactée,
à 9000 a.l.

En 1840 elle avait rivalisé
en brillance avec Sirius,
l' étoile la plus lumineuse
du ciel

Largeur de l' image env.
1 a.l.

Vitesse du gaz: 700km/s
 $1 \text{ a.l.} / (700 \text{ km/s}) \approx 150 \text{ ans}$

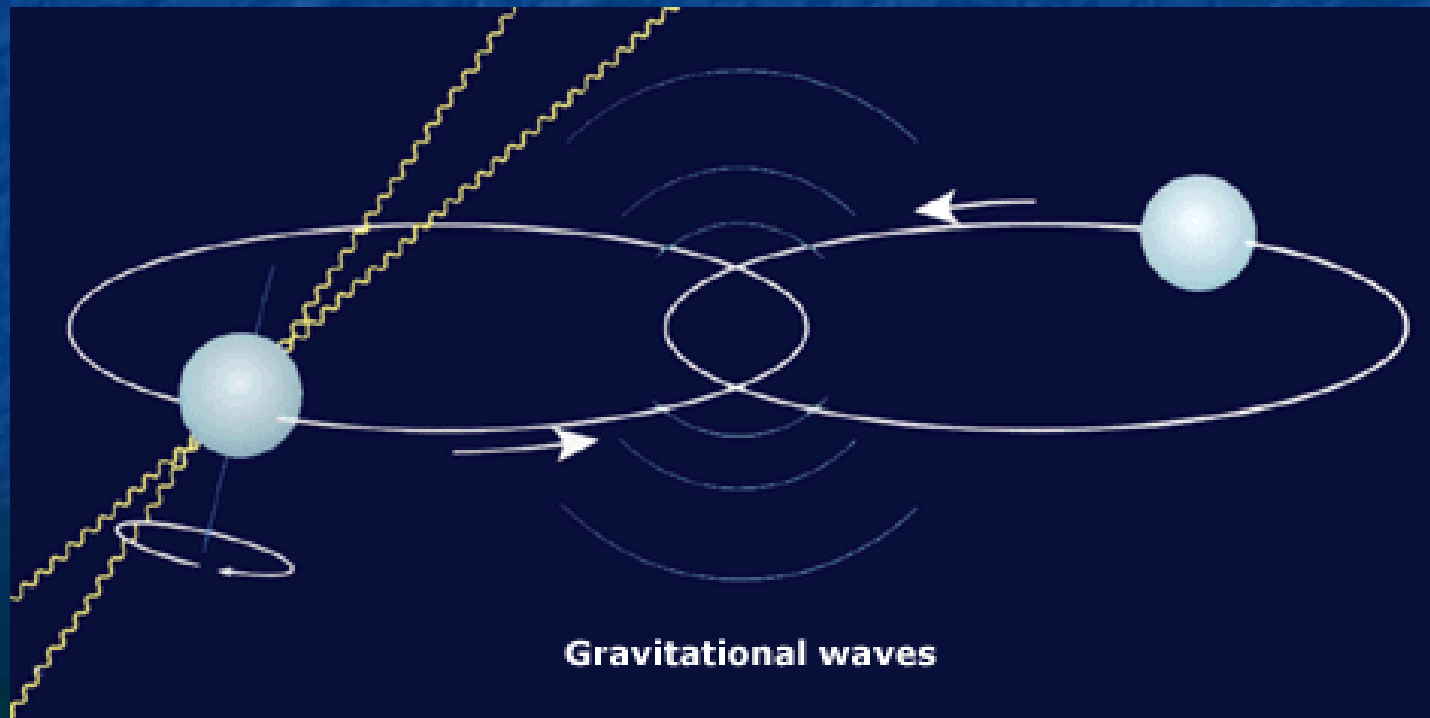
C' est un objet très
énigmatique:
une future supernova?

Eta Carinae

Hubble Space Telescope • WFPC2

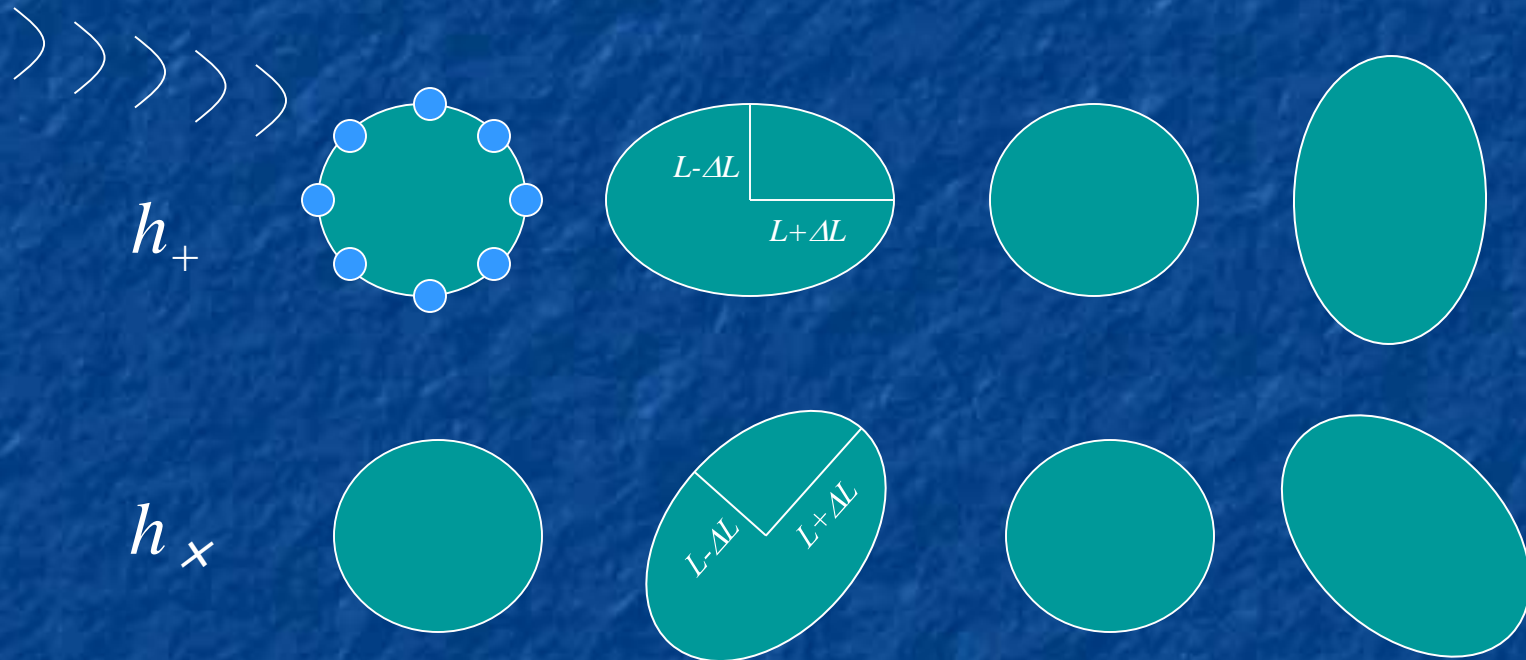
Une autre source très puissante d'ondes gravitationnelles:

l'explosion d'un système binaire
de deux étoiles à neutron





La détection des ondes gravitationnelles



$$DL = \frac{1}{2} hL$$

Un schéma de détection

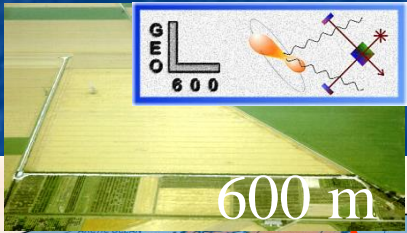
- Interféromètre:



$\Delta L \approx 10^{-16} \text{ cm} \approx 10^{-3} \text{ noyaux atomique!!}$

Après plus de 20 ans de préparation, des expériences de ce type sont entrées en fonction

- **VIRGO** (Italie et France, à Pise) et **LIGO** (USA)
 - Longueur de bras 3km (Virgo), 4 km (LIGO)
 - Longueur effective: **plusieurs centaines de km**
 - **Laser très puissant**, et techniques pour amplifier la lumière à l'intérieur des bras
 - **Isolation sismique extrême**



June 1998

Boundary representation is not necessarily authoritative.

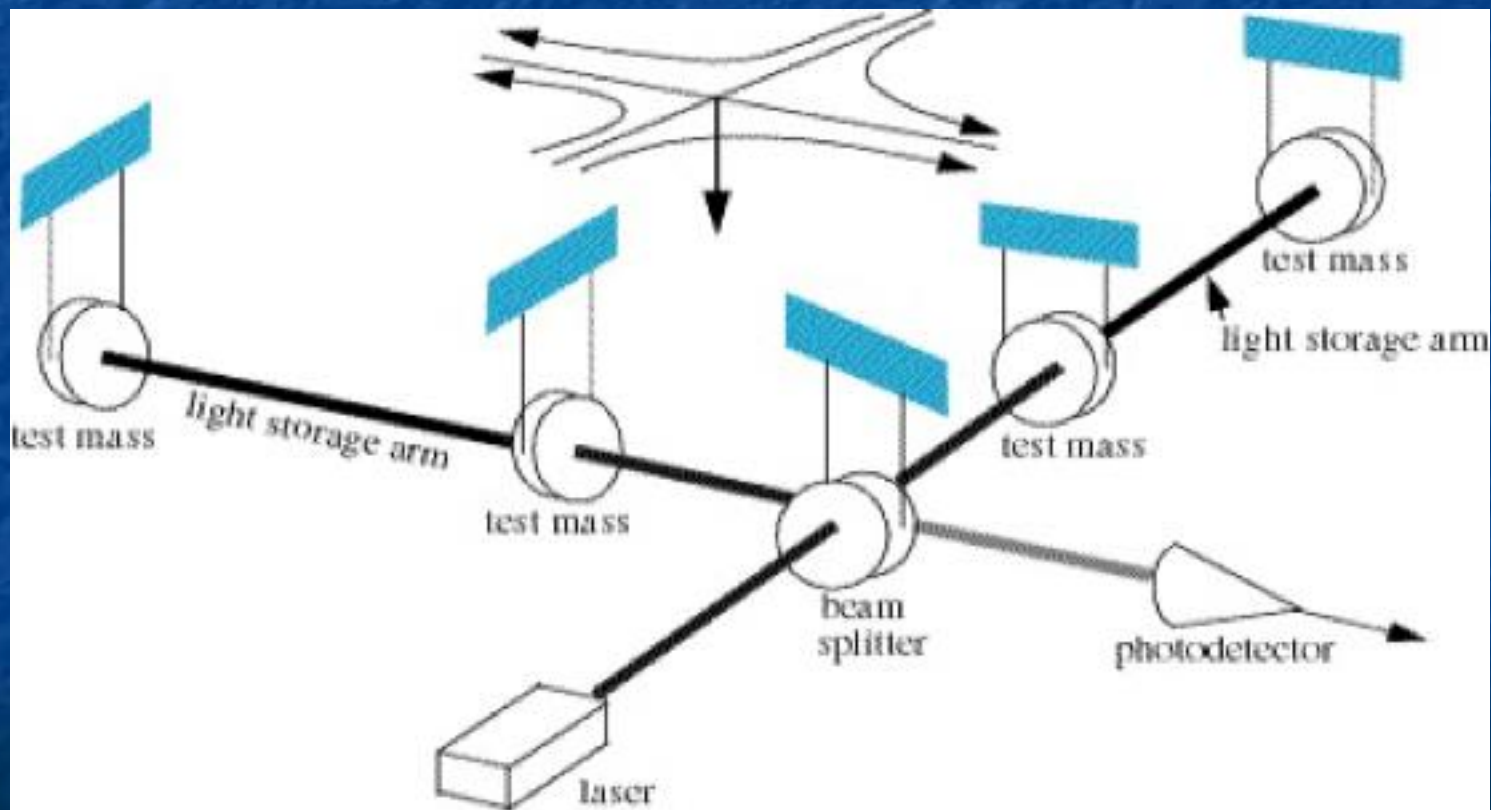
802599 (R00352) 6-98

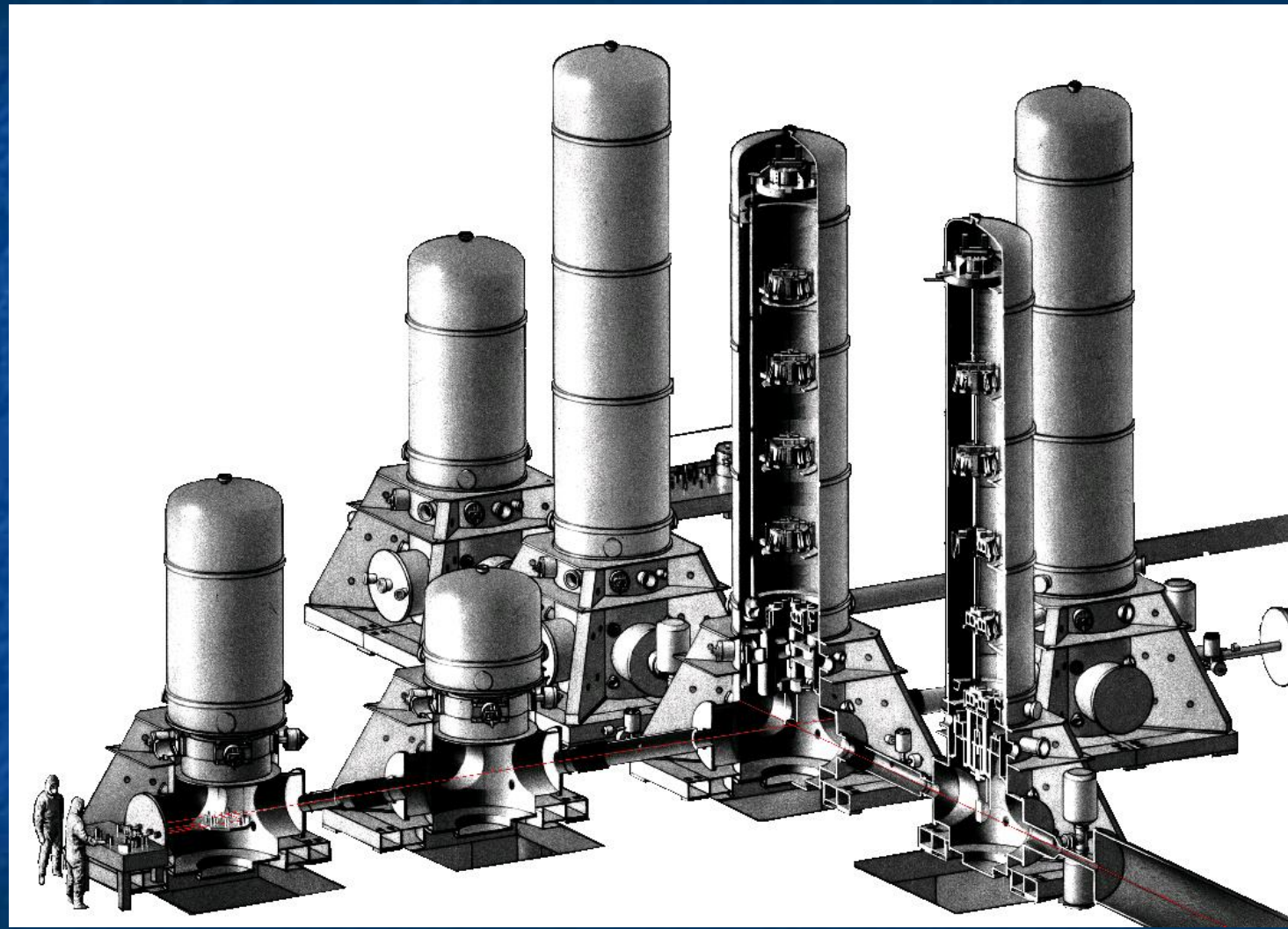
VIRGO

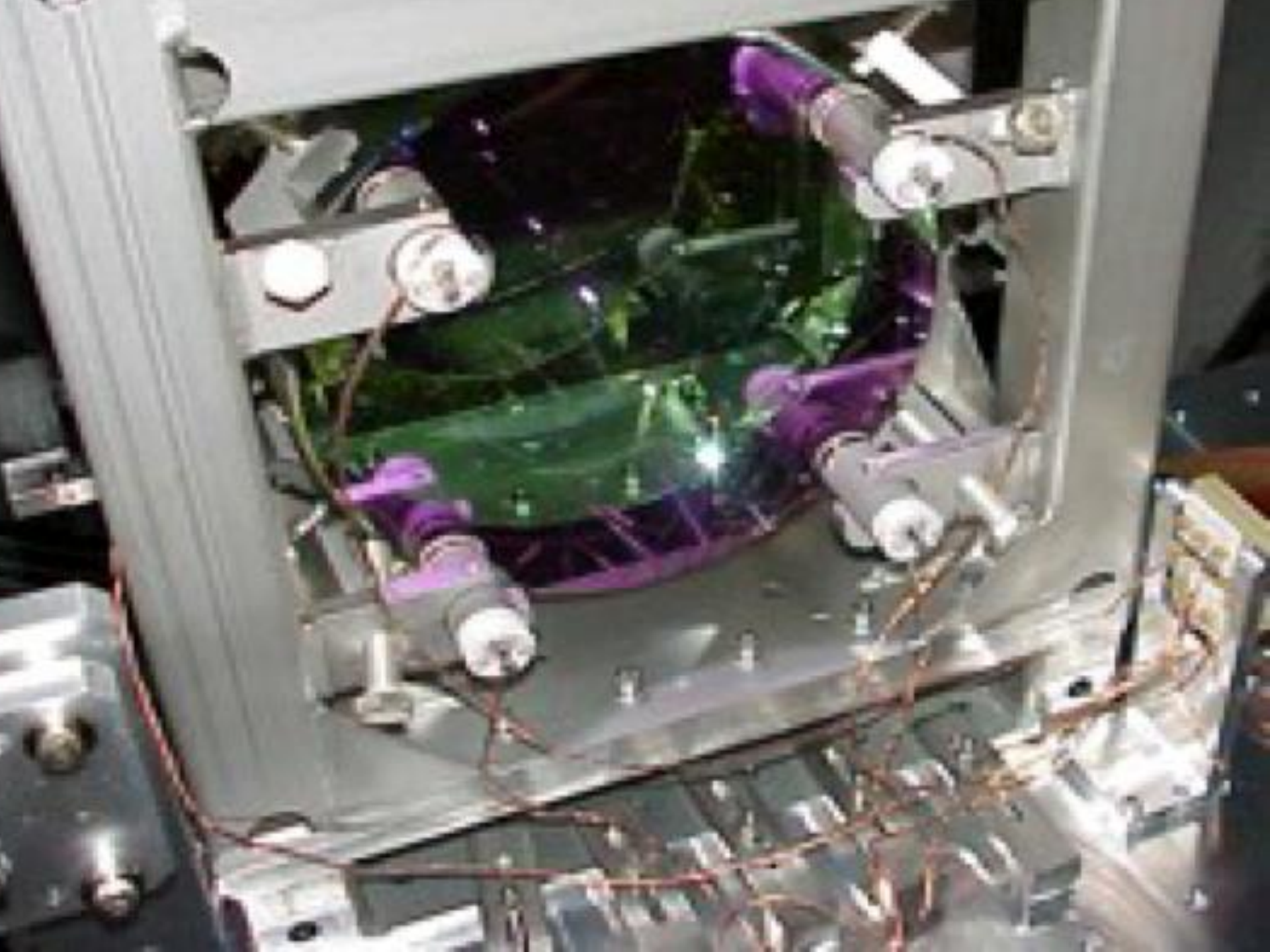


LIGO, Livingstone site



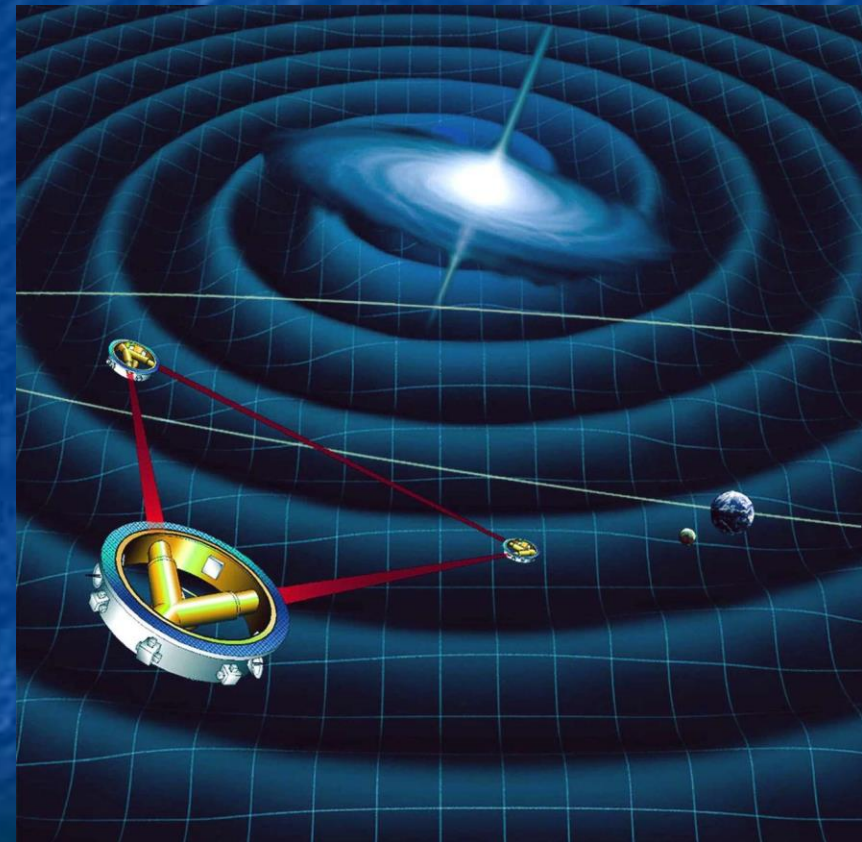


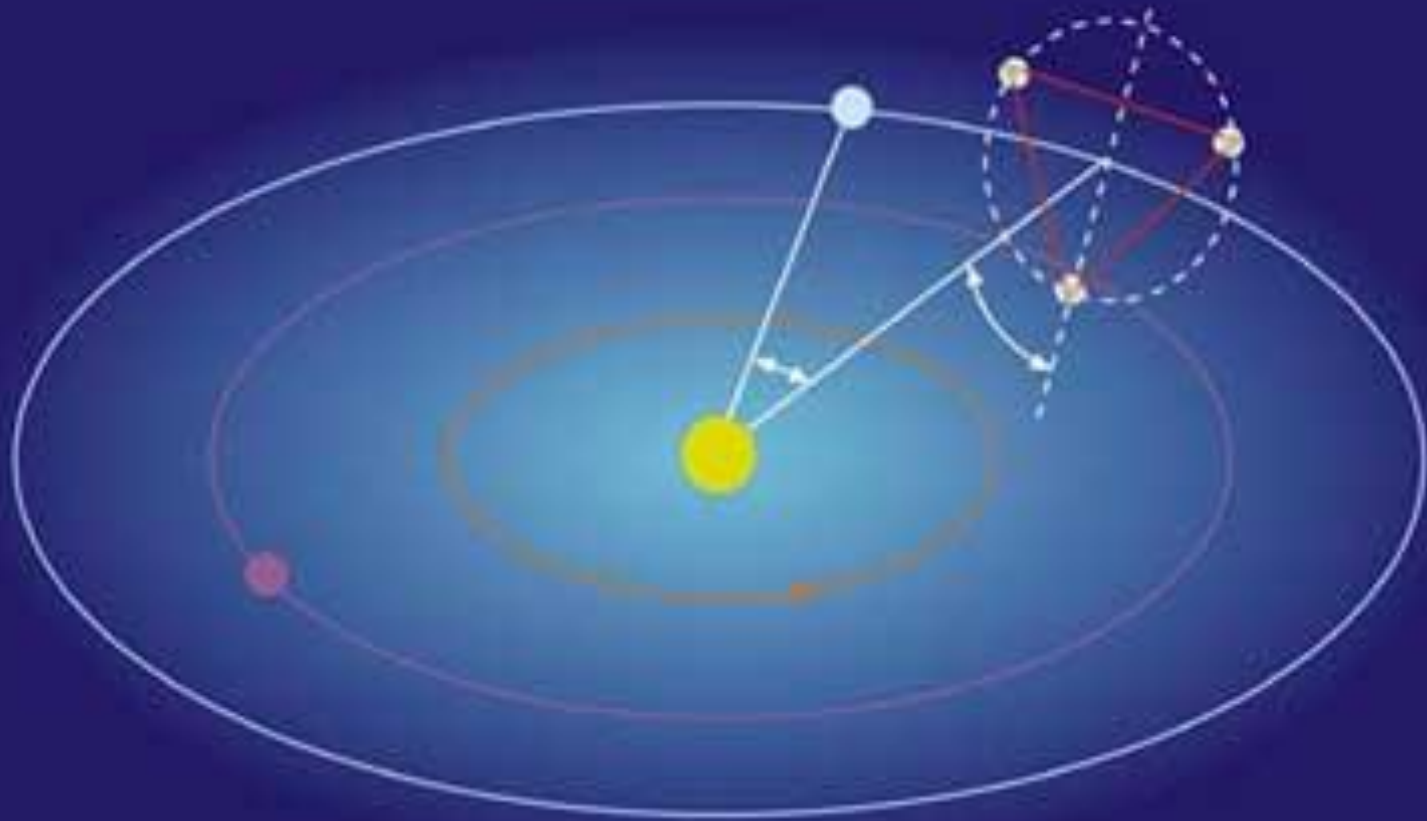




Le future: LISA

- Interféromètre dans l'espace
 - ESA
 - si approuvé lancé en 2020 ?
 - pas de bruits sismiques
 - bras de 5 millions de km !!!
 - sensibilité exceptionnelle
 - cherche les OG de petites fréquences





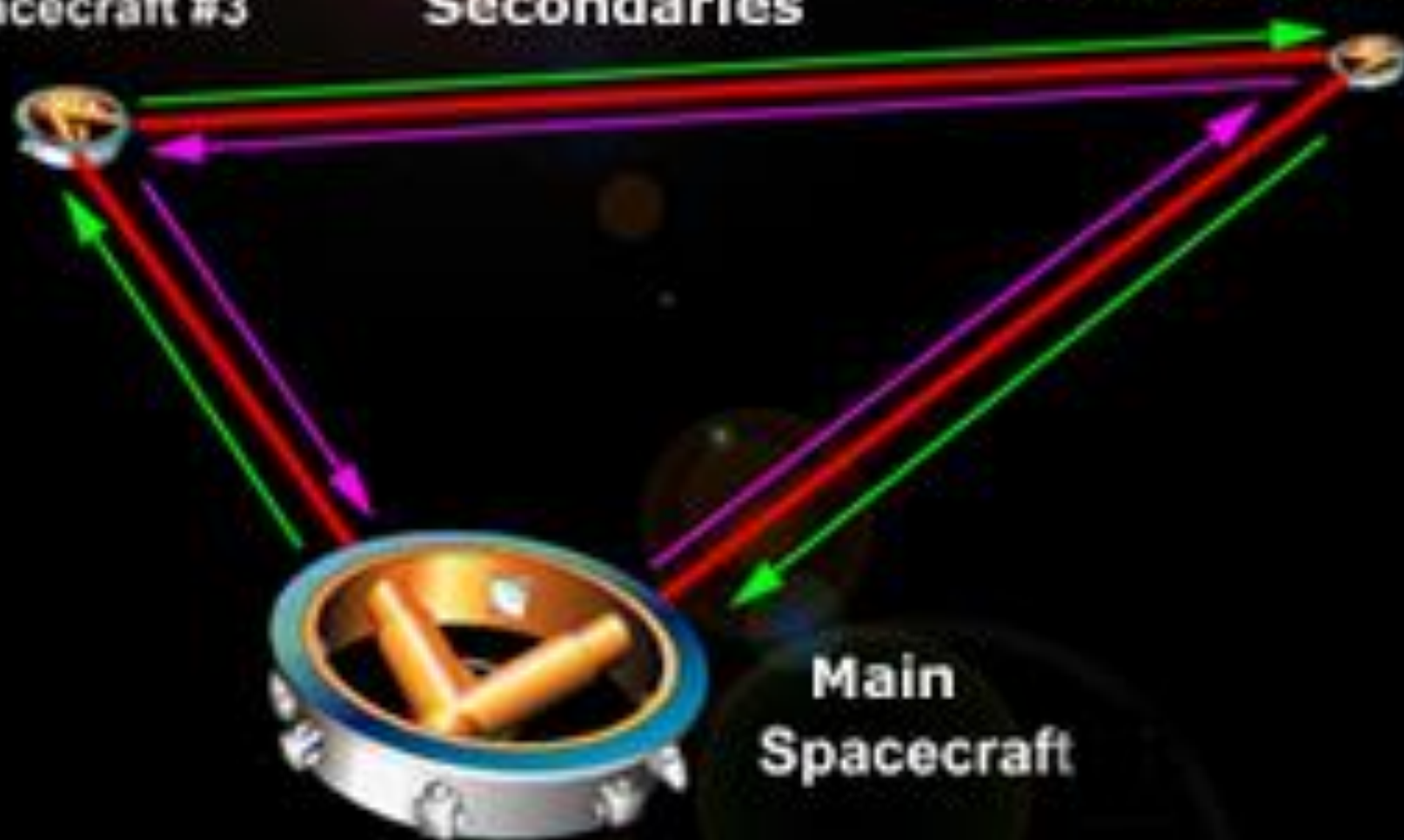
Bras: 5Mkm

distance Terre-Soleil: 150 Mkm

Spacecraft #3

Secondaries

Spacecraft #2

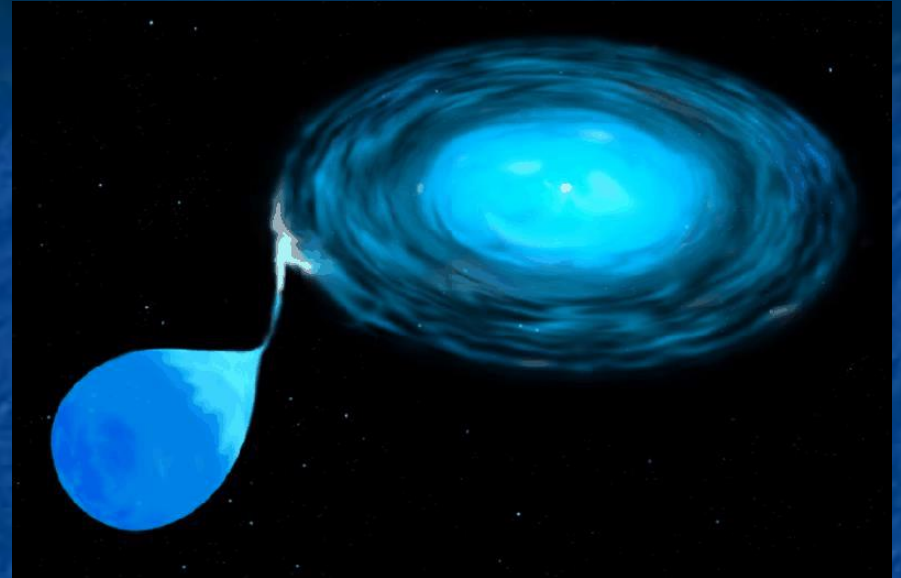


Main
Spacecraft

Potentialities of LISA

Galactic Binaries:

SNR up to 500 in 1 year



Massive black hole binaries from merging galaxies cores

SNR up to 2000 in one year at $z \approx 1 - 3$

Angular resolution few' -few^o

