

Dernières nouvelles des trous noirs:

JEAN-PIERRE LUMINET

LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE
MARSEILLE (LAM)

CENTRE DE PHYSIQUE THÉORIQUE (CPT)

& OBSERVATOIRE DE PARIS (LUTH)

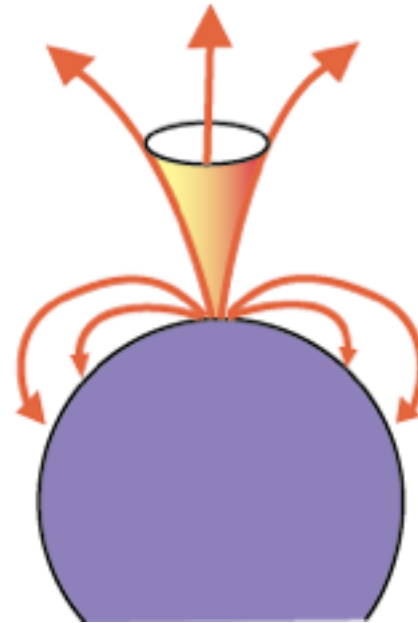
Gravitation newtonienne

Michell 1784, Laplace 1796

Vitesse de libération >
300 000 km/s

==>

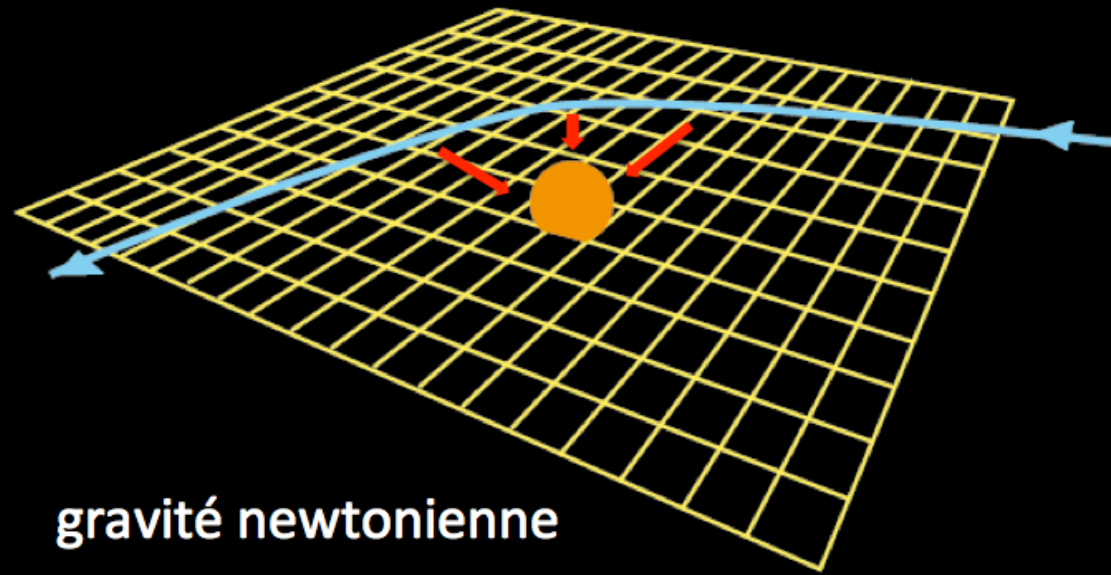
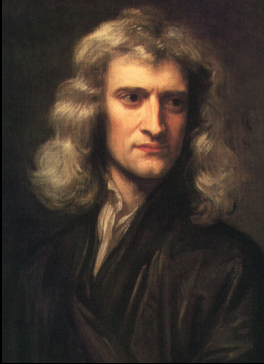
astre invisible



densité du soleil, 500 fois son rayon : astre invisible

Théorie de Newton

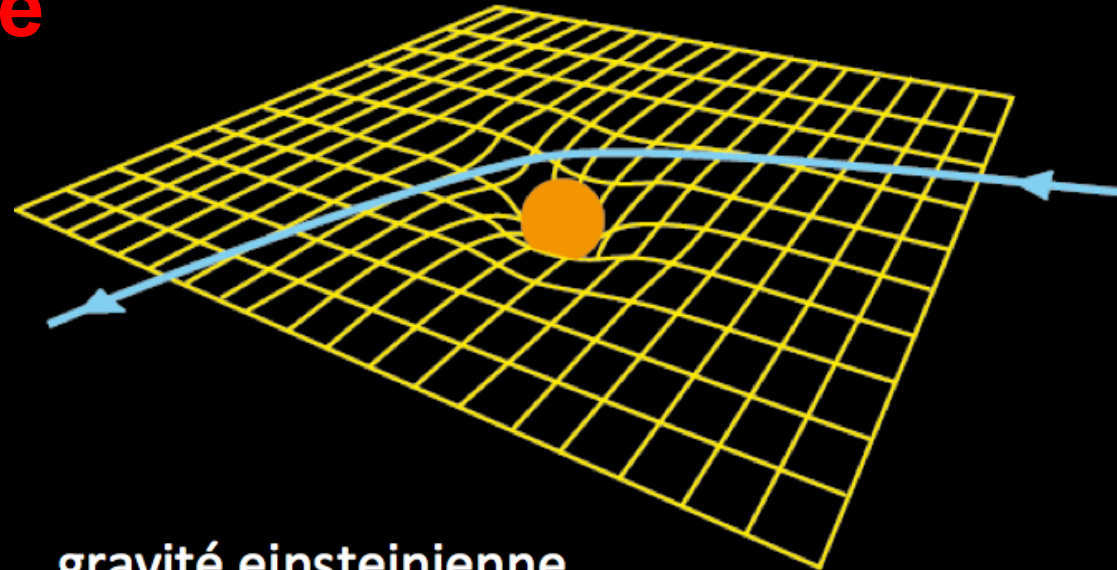
*Gravité = Force
d'attraction instantanée*



gravité newtonienne

Relativité Générale

*Gravité = Courbure de
l'espace-temps*



gravité einsteinienne

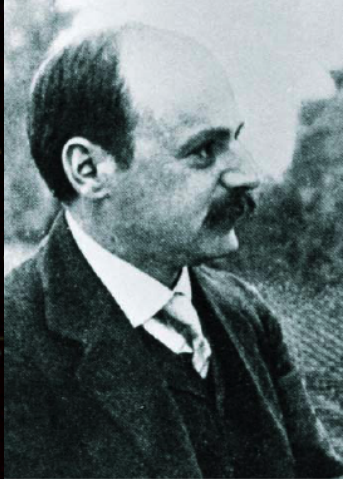
Equations d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = k T_{\mu\nu}$$

courbure = matière-énergie

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

Effondrement gravitationnel



K. Schwarzschild



S. Chandrasekhar

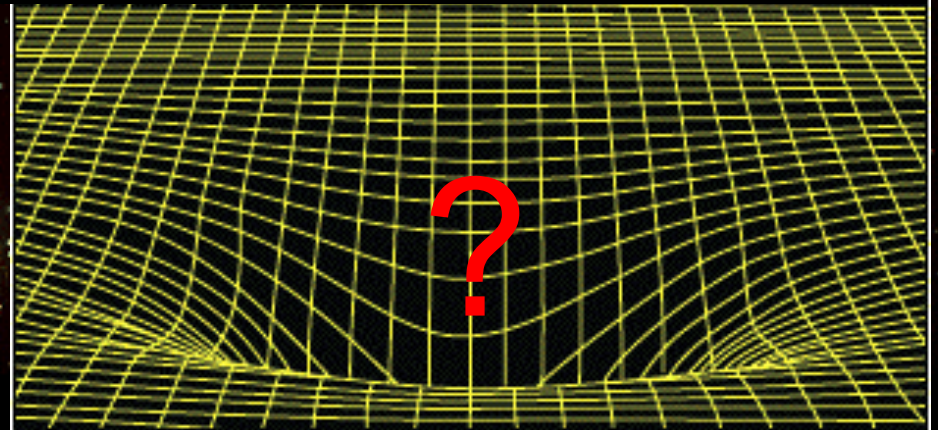


R. Oppenheimer



J. Wheeler

TROU NOIR



Un trou noir n'est pas
nécessairement « petit » :

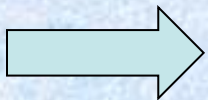
Rayon de Schwarzschild:

$$R_S = 2GM/c^2 \sim 3 \text{ km } M/M_S$$

Un trou noir n'est pas
nécessairement « dense » :

masse volumique moyenne $\propto 1/M^2$

- Pour $10 M_S$, $\rho \sim 10^{15} \text{ g/cm}^3$
- Pour $10^6 M_S$, $\rho \sim 10^3 \text{ g/cm}^3$
- Pour $10^9 M_S$, $\rho \sim 10^{-3} \text{ g/cm}^3$



Un trou noir est un objet **compact**

Taille réelle/Taille critique ~ 1



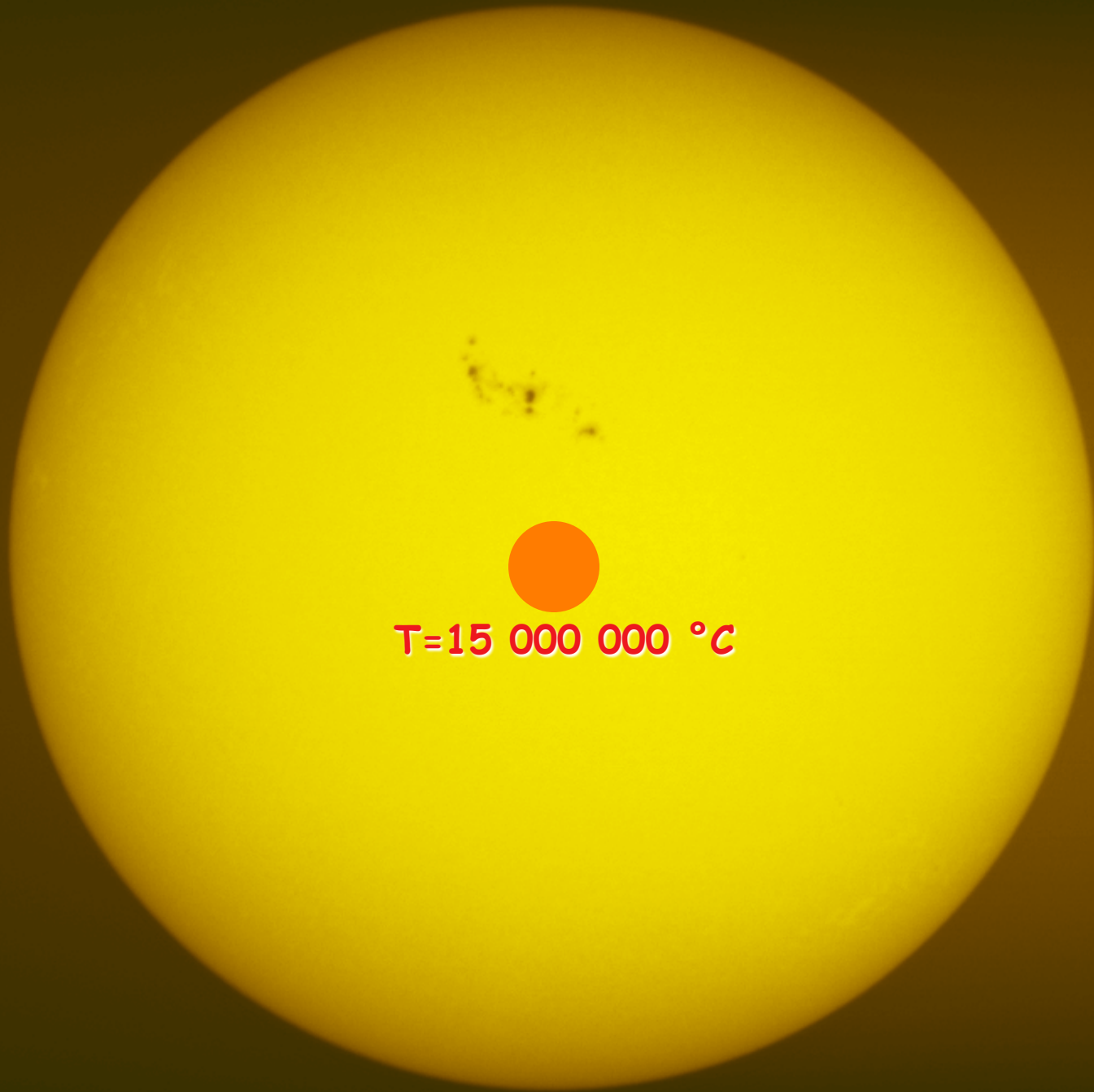
❖ Formation

❖ Physique des trous noirs

❖ Visualisation numérique

❖ Observation

❖ Les t.n. en gravité quantique



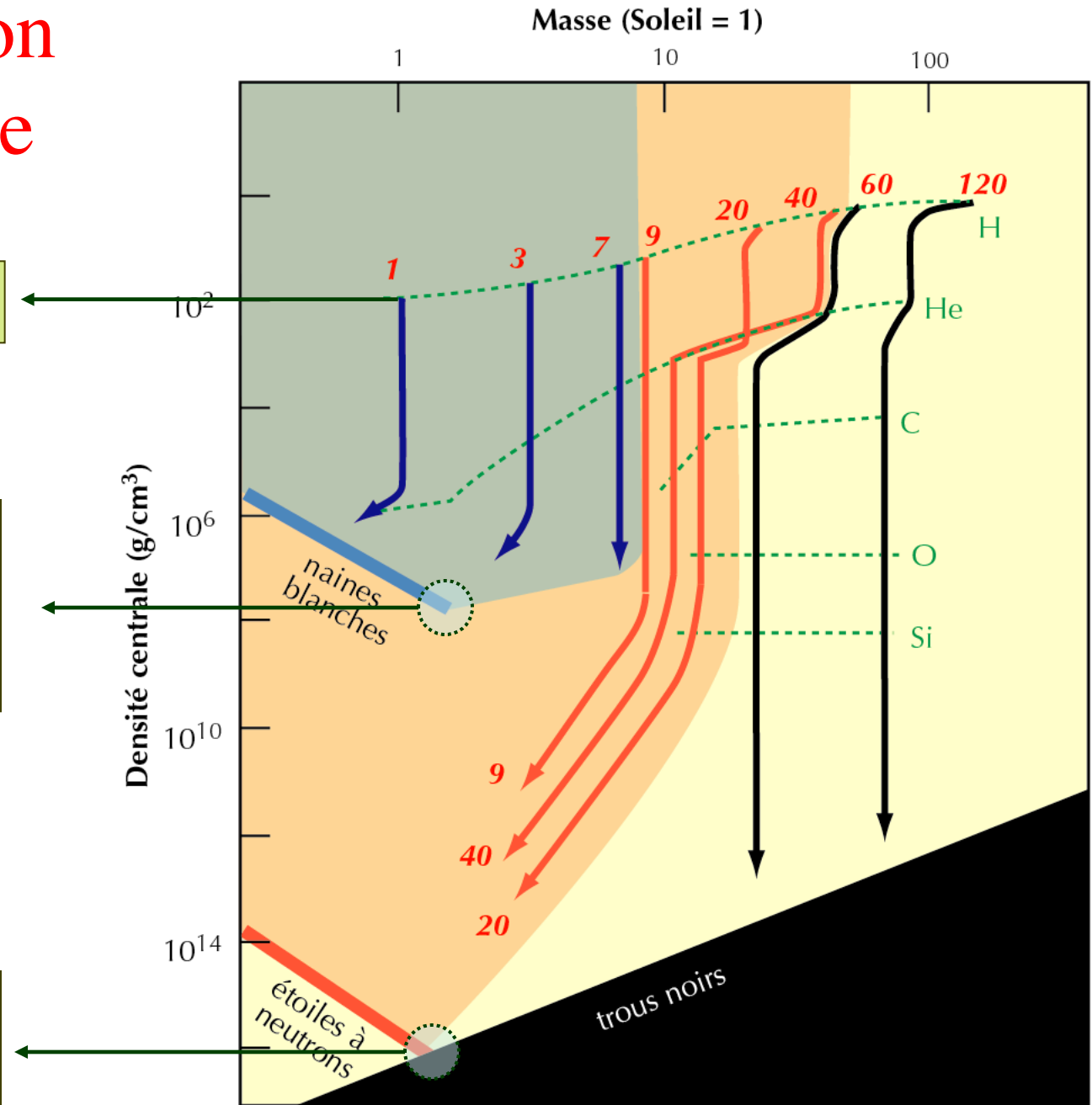
T=15 000 000 °C

Evolution stellaire

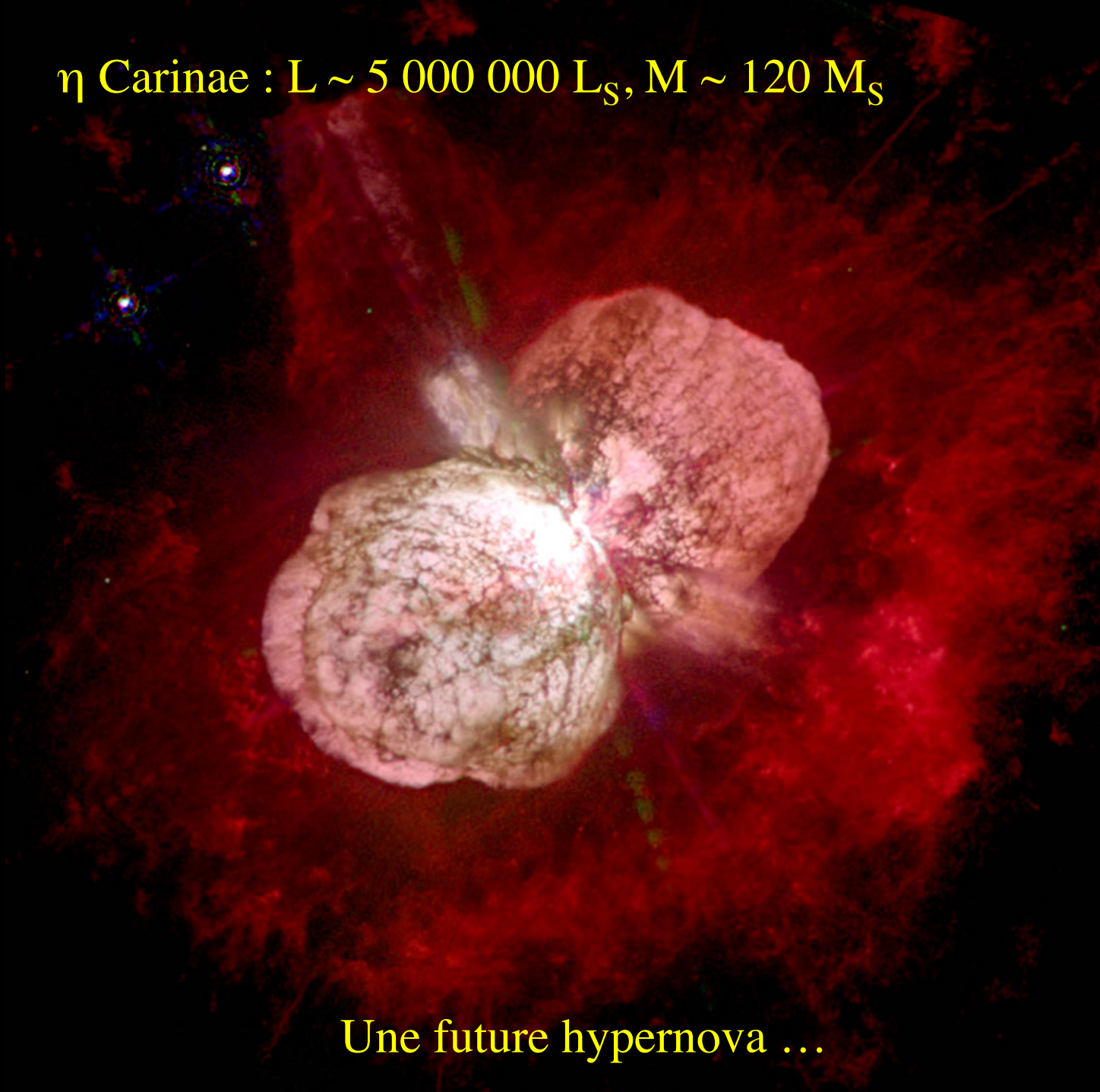
Masse initiale

Limite de Chandrasekhar
 $1,4 M_{\odot}$

Limite de LOV
 $\leq 3 M_{\odot}$

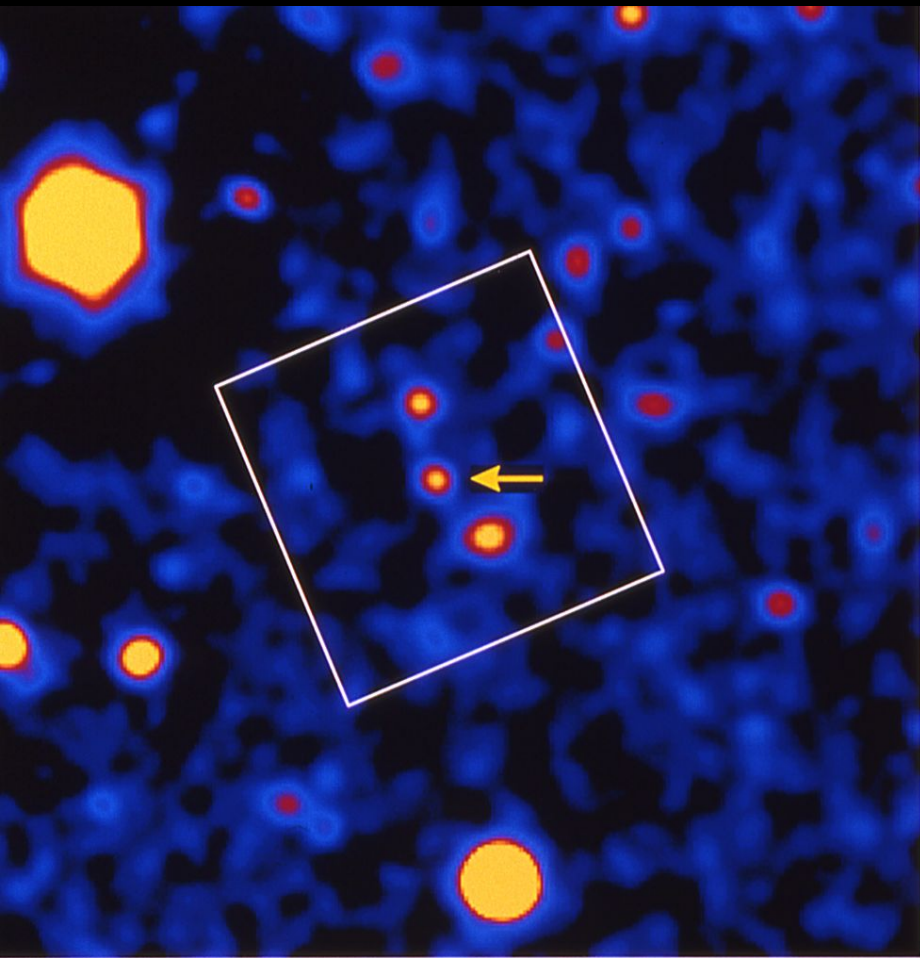


η Carinae : $L \sim 5\,000\,000 L_{\odot}$, $M \sim 120 M_{\odot}$

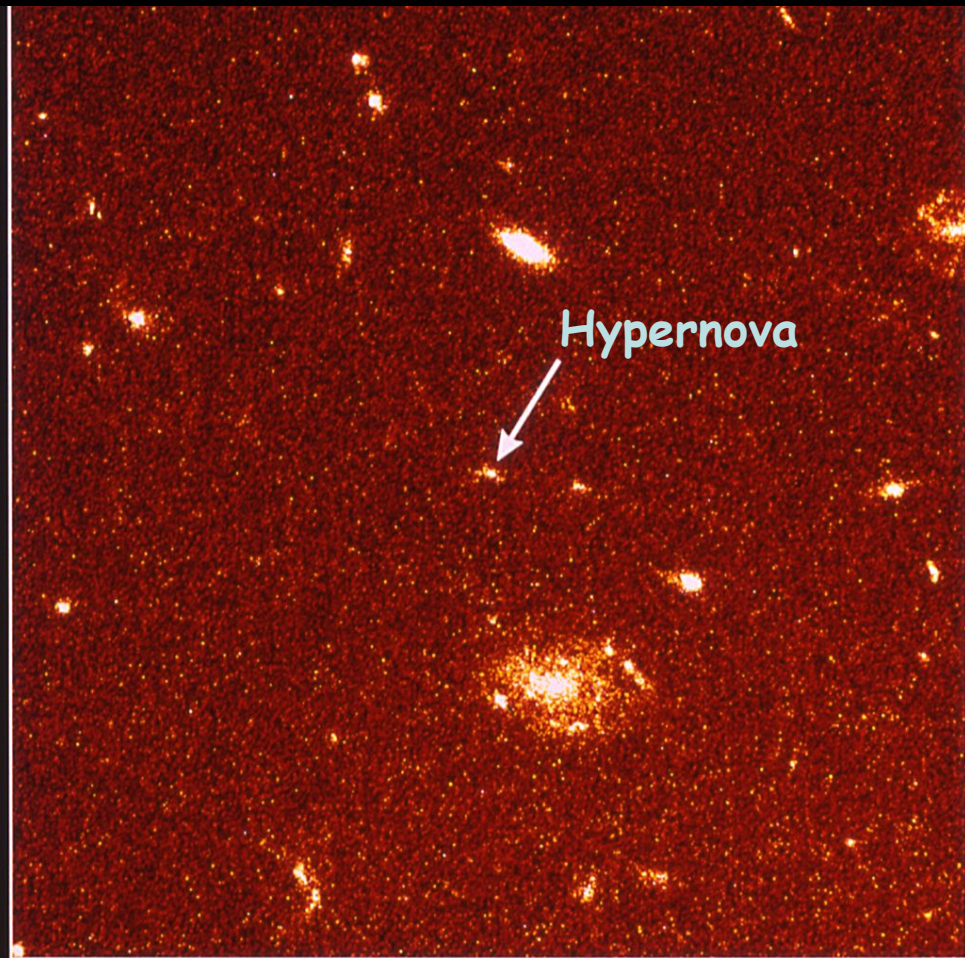


Une future hypernova ...

Sursaut Gamma 971 214

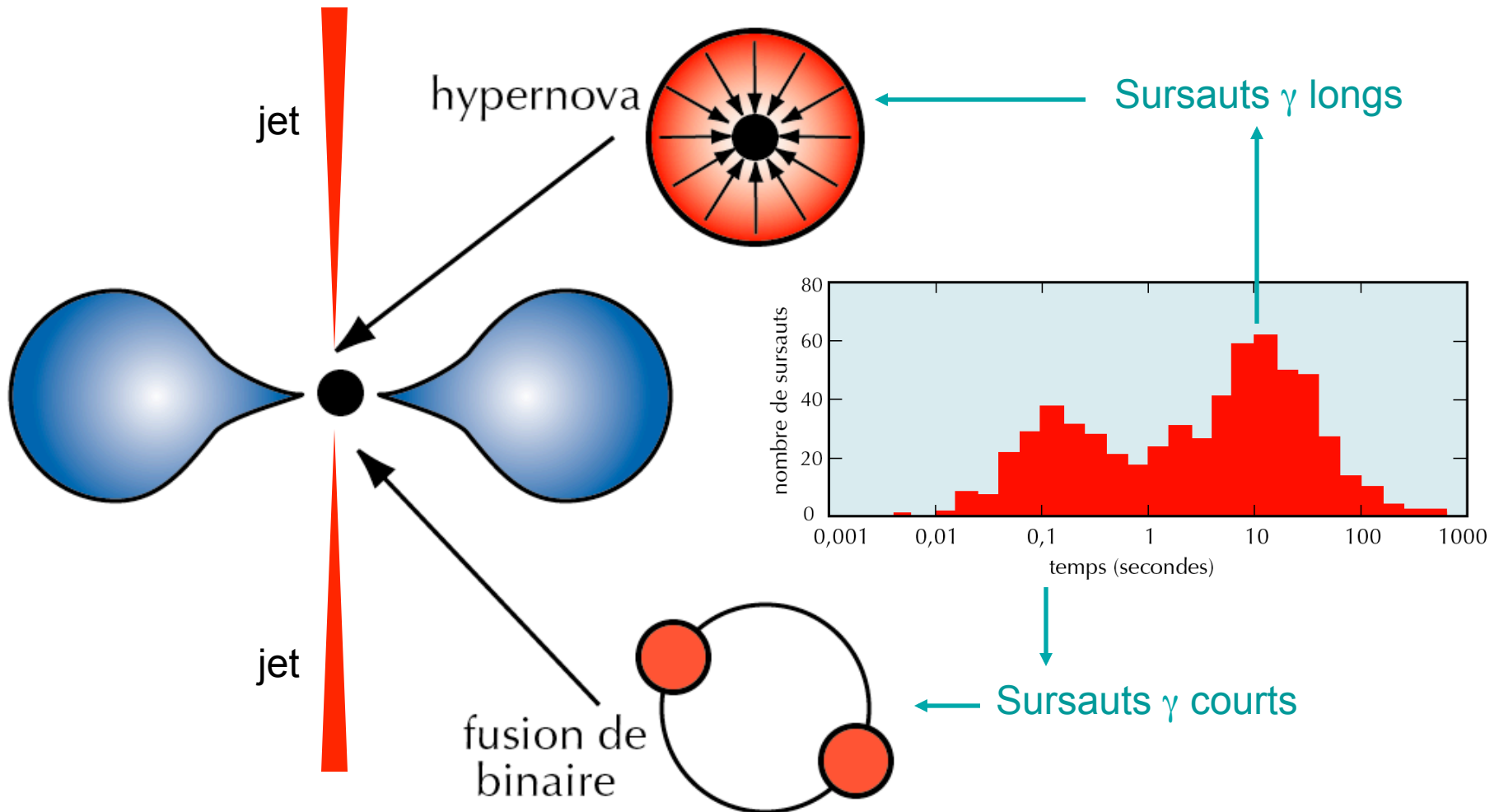


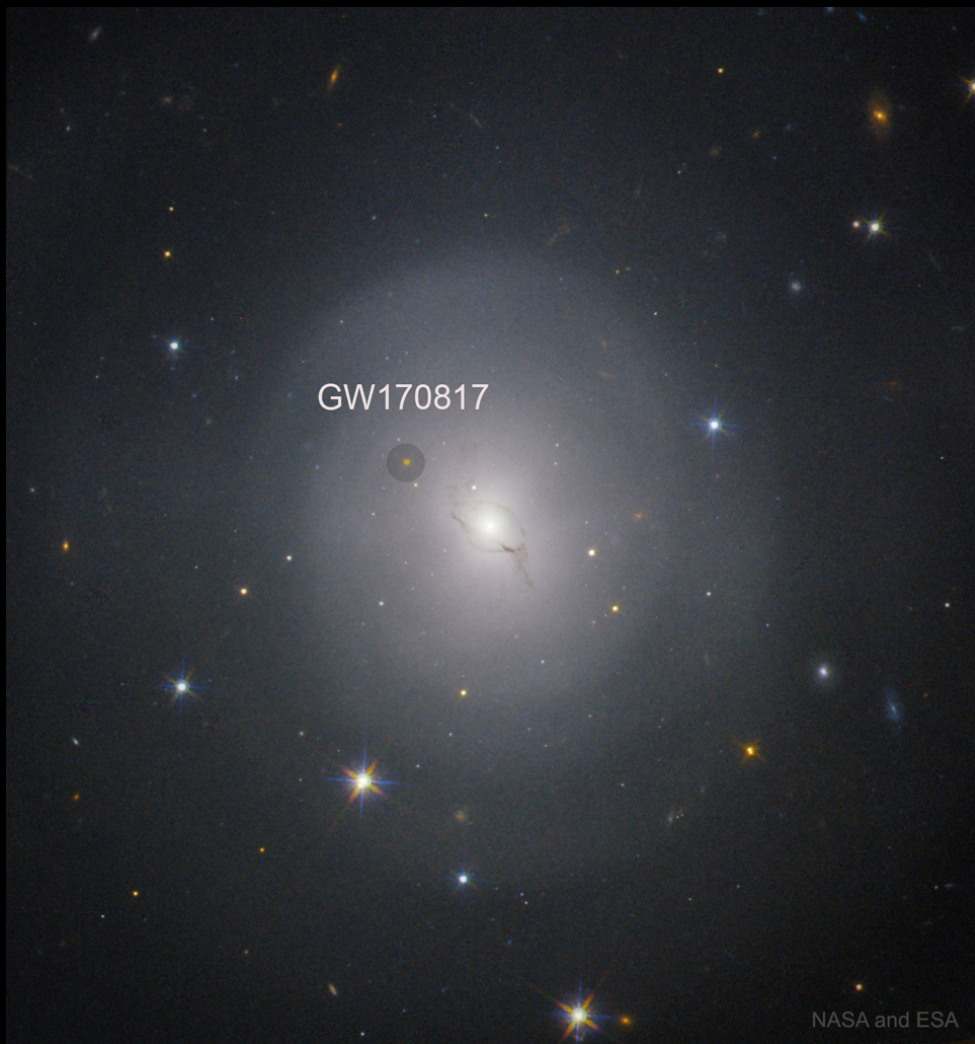
Keck • December 1997



HST/STIS • February 1998

Modélisation des Sursauts Gamma





NASA and ESA

GW170817

Une fusion de deux étoiles à neutrons

Une détection d'ondes gravitationnelles par LIGO-Virgo dont les contreparties électromagnétiques ont été observées par plus de 70 observatoires.



Distance
130 millions d'années-lumière

Découverte
17 août 2017

Type
Fusion d'étoiles à neutrons

14 h 41 min 4 s heure de Paris
Une onde gravitationnelle produite par une fusion d'étoiles à neutrons est détectée.

onde gravitationnelle
Deux étoiles à neutrons, chacune de la taille de Paris mais pesant au moins autant que le Soleil, sont entrées en collision.

sursaut gamma
Un sursaut gamma court est une bouffée intense de rayons gamma produits juste après la fusion.
+ 2 secondes
Détection d'un sursaut gamma.

GW170817 permet pour la première fois de mesurer directement le taux d'expansion de l'Univers avec des ondes gravitationnelles.

Détecter les ondes gravitationnelles émises lors d'une fusion d'étoiles à neutrons permet d'en apprendre plus sur la structure de ces astres étranges.

Cet événement "multi-messagers" confirme que des fusions d'étoiles à neutrons peuvent produire des sursauts gamma courts.

kilonova
La désintégration de noyaux riches en neutrons forme une kilonova brillante qui produit des métaux lourds comme de l'or et du platine.
+10 h 52 m
Une nouvelle source brillante de lumière visible est détectée dans la galaxie NGC4993, située dans la constellation de l'Hydre.

Au
L'observation d'une kilonova a permis de montrer que les fusions d'étoiles à neutrons sont responsables d'une partie de la production des noyaux lourds (comme l'or) dans l'Univers.

+11 h 36 m
Observation de l'émission infrarouge.

+15 h
Détection d'une émission brillante dans l'ultraviolet.

+9 jours
Détection d'une émission de rayons X.

Observer à la fois les ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par cet événement montre de manière convaincante que les ondes gravitationnelles voyagent à la même vitesse que la lumière.

+16 jours
Détection d'une émission en ondes radio.

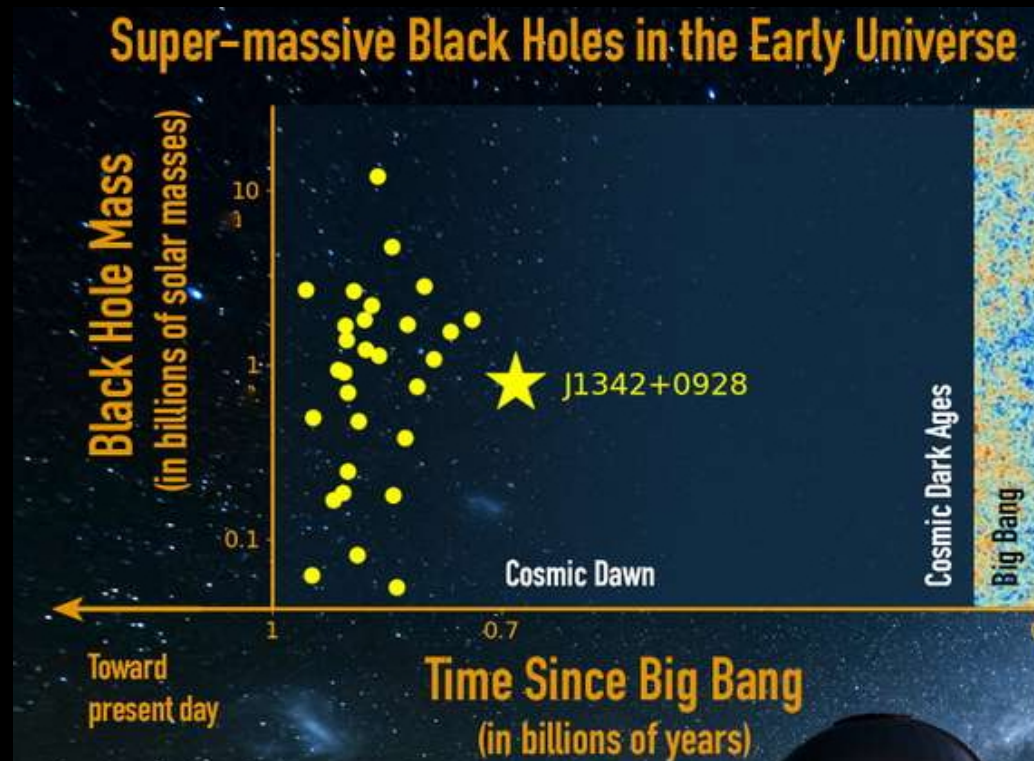
Le mystère des trous noirs supergéants



La petite galaxie lenticulaire NGC 1277 a un TN de 17 milliards de M_{\odot} : 14 % du total (normalement 0.1%)

J1342+0928 : 1 milliard M_{\odot}
700 millions d'années après le BB

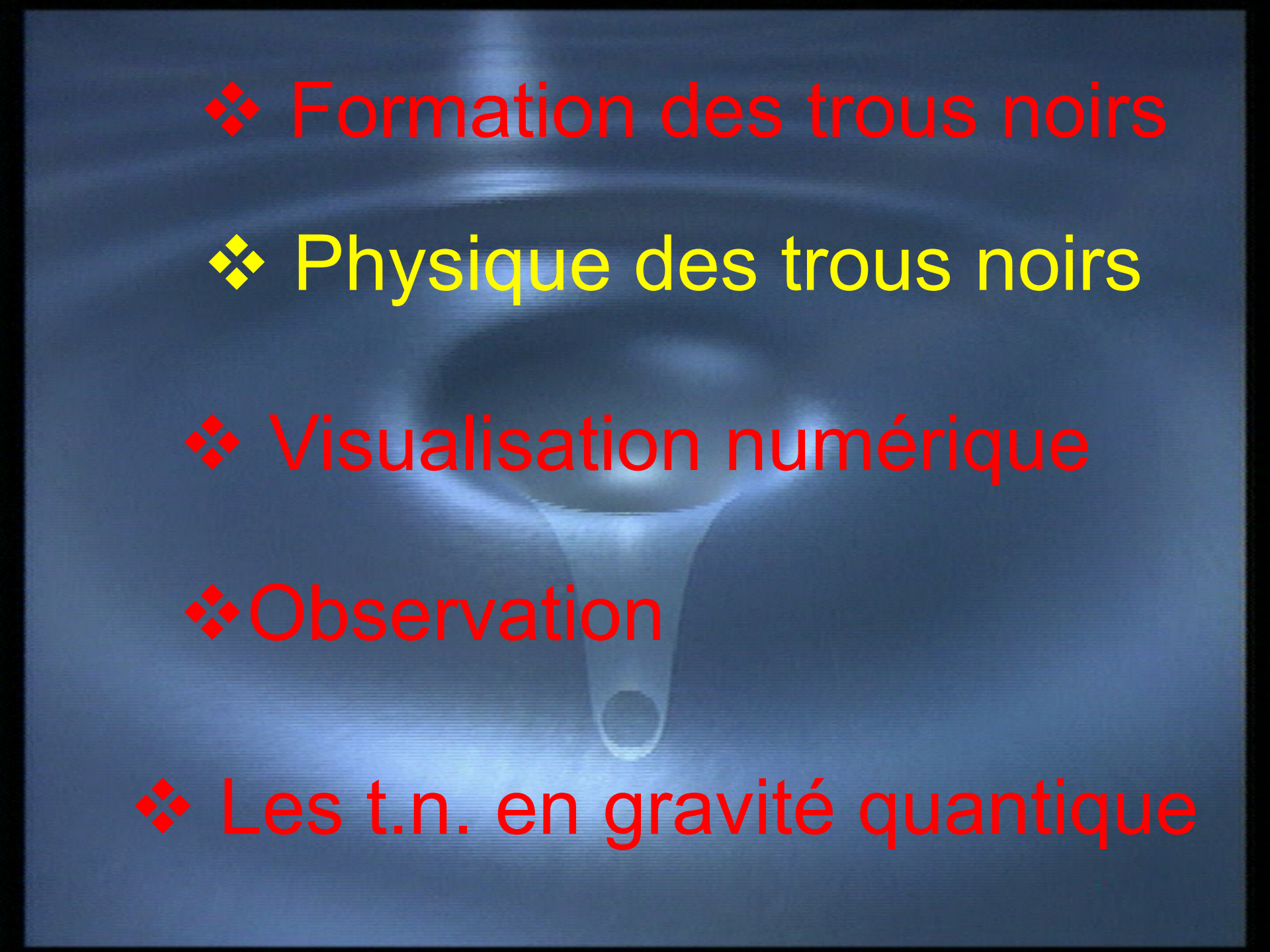
J0100+2802 : 12 milliards M_{\odot}
900 millions d'années après le BB



OB29323(Chandra X)
Paccuci et al. 2016)

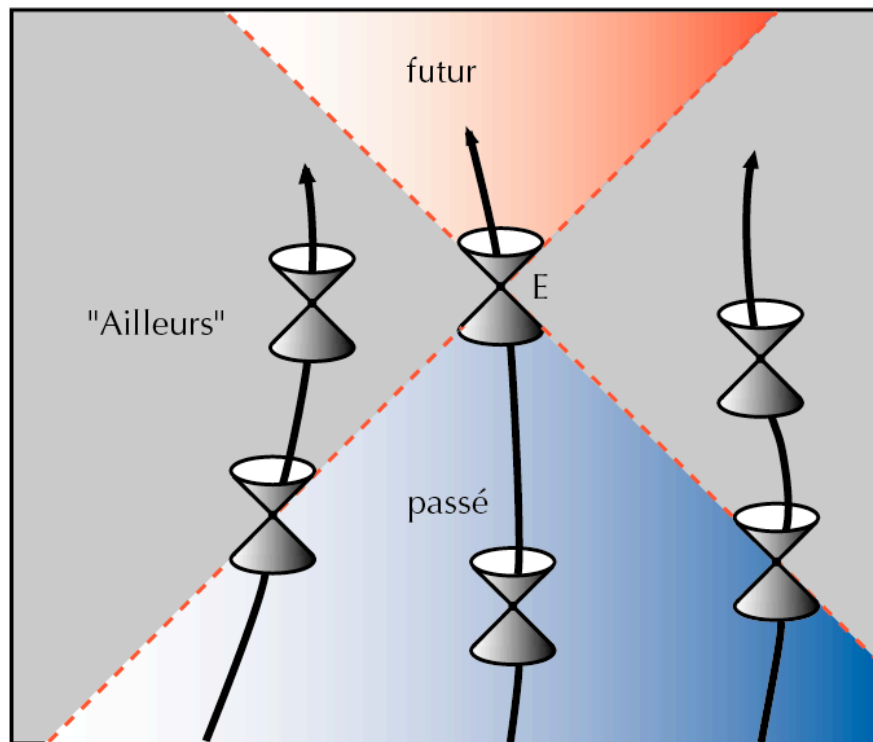


Effondrement de grands nuages de gaz ?

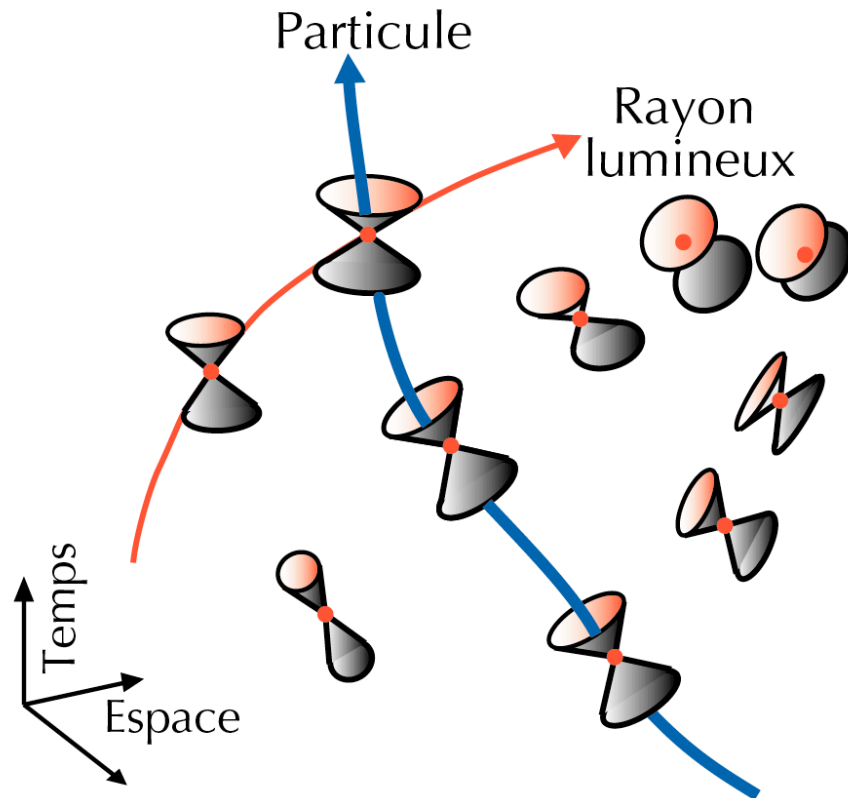
- 
- ❖ Formation des trous noirs
 - ❖ Physique des trous noirs
 - ❖ Visualisation numérique
 - ❖ Observation
 - ❖ Les t.n. en gravité quantique

Structure causale de l'espace-temps relativiste :

les « cônes de lumière »

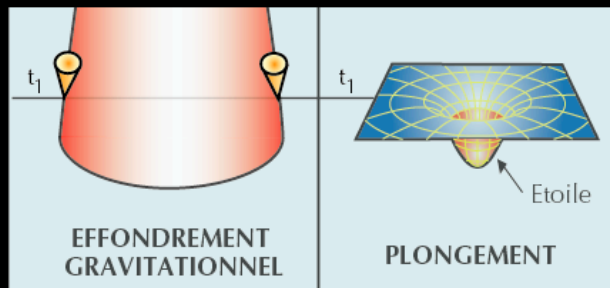


espace-temps plat



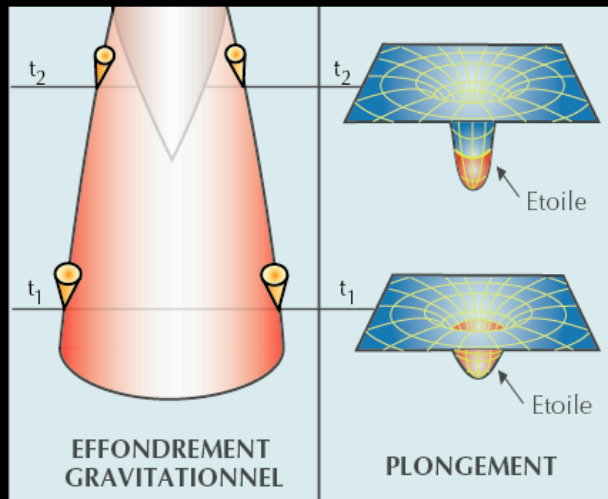
espace-temps courbe

Effondrement sphérique



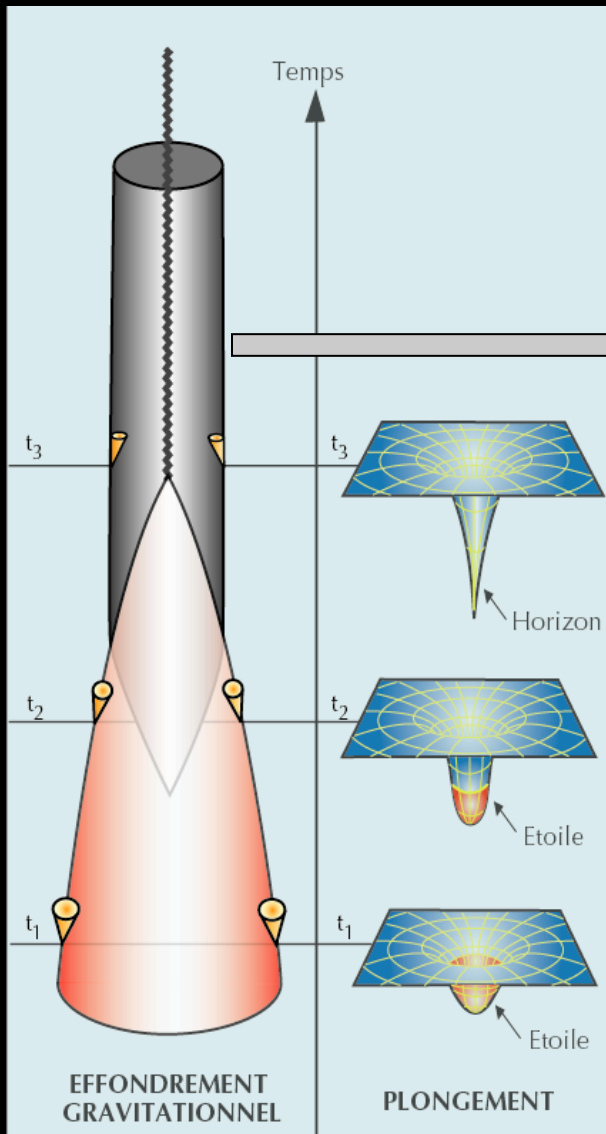
Stade 1

Effondrement sphérique



Stade 2

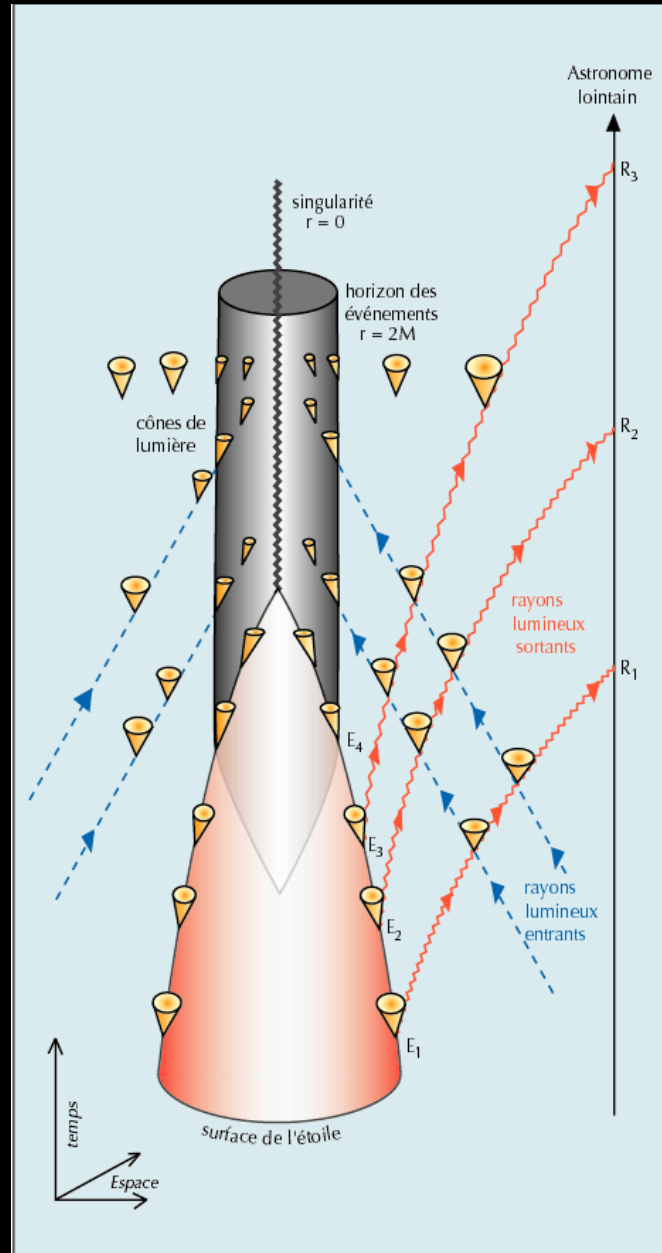
Effondrement sphérique



horizon des événements

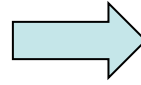
Stade 3 :
trou noir

Structure causale du trou noir

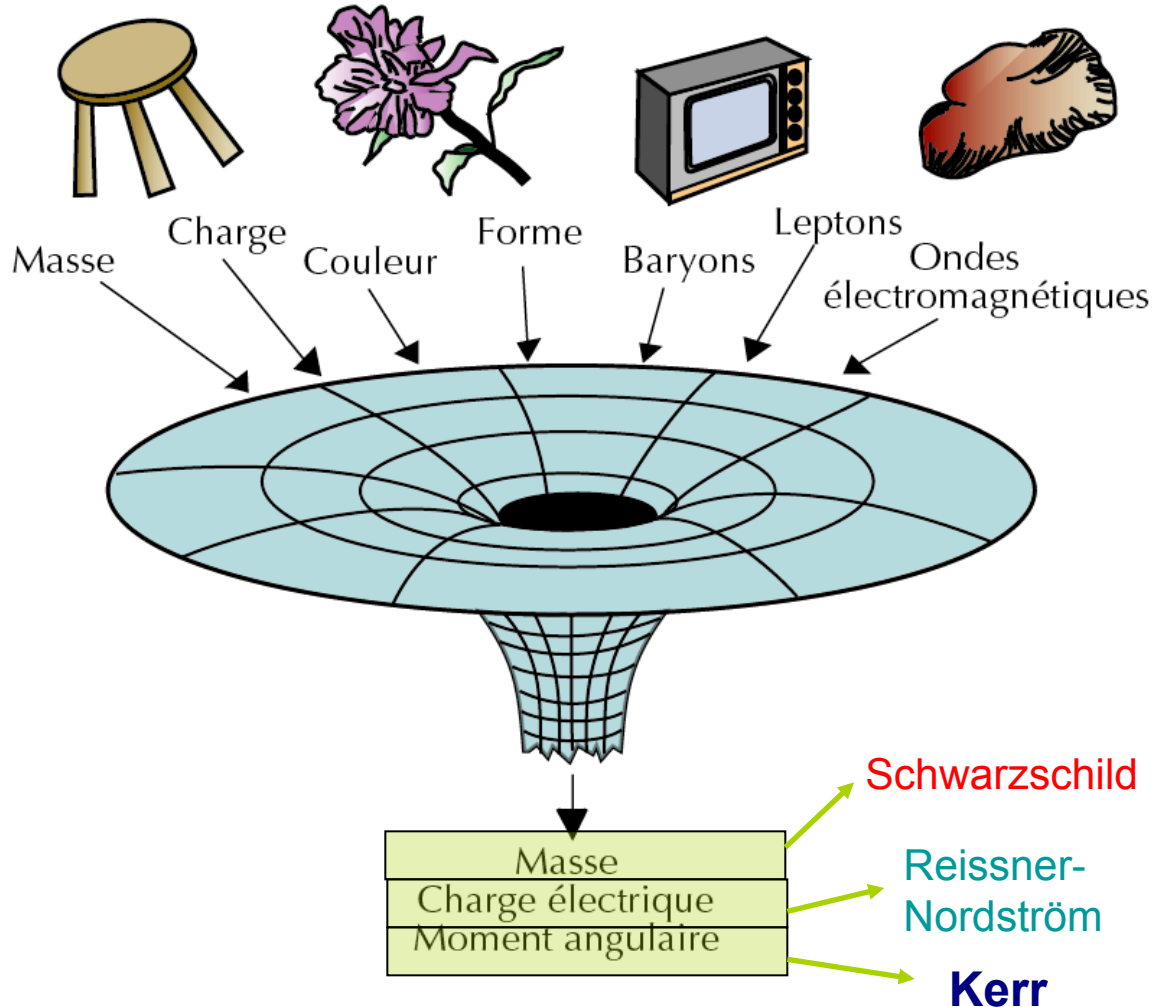
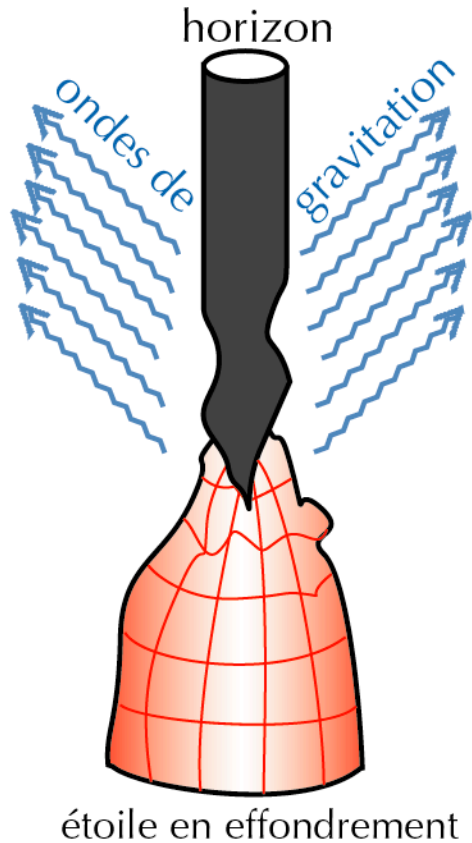


Effondrement non sphérique

Ondes gravitationnelles



Théorème « No hair »



Le trou noir de Kerr

(J,M) avec $J < M^2$

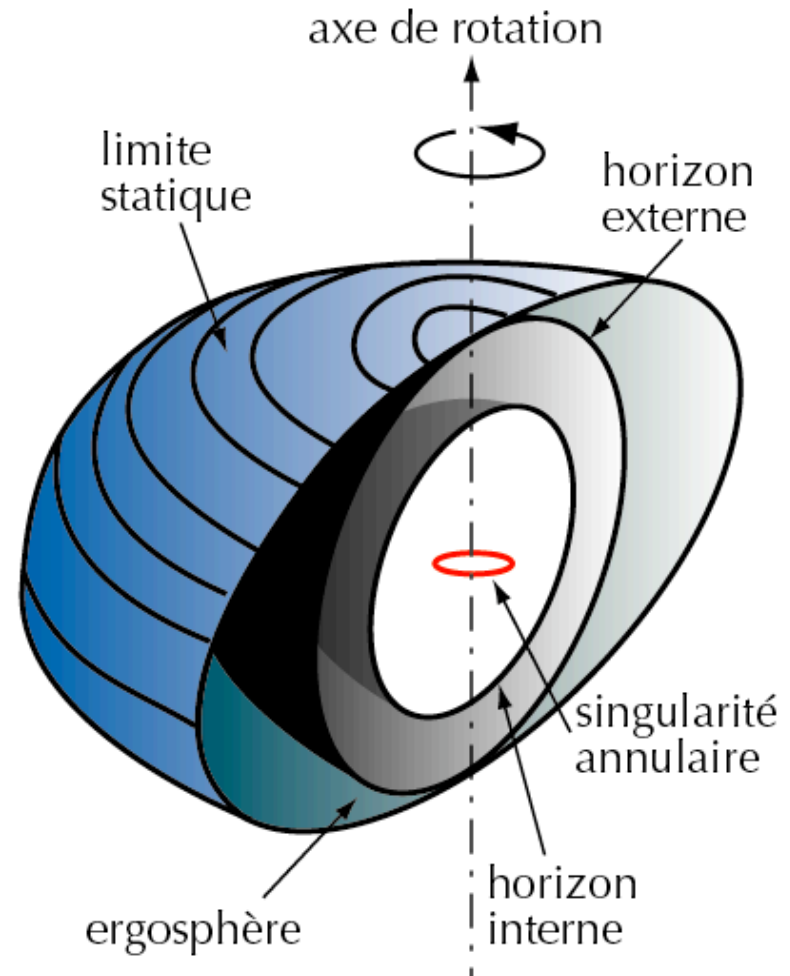
Energie totale :

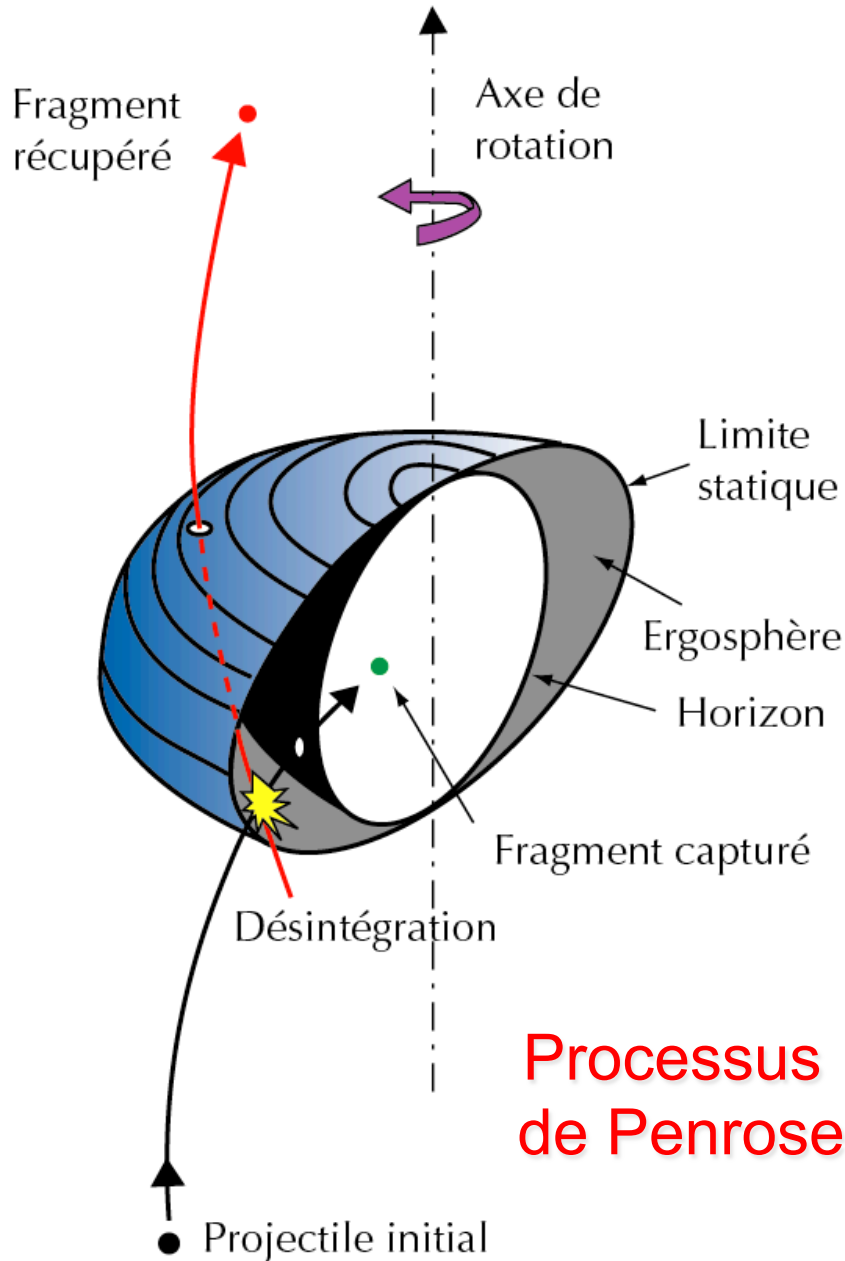
$$M^2 = J^2/4M_{ir}^2 + M_{ir}^2$$

↓
Energie
rotationnelle

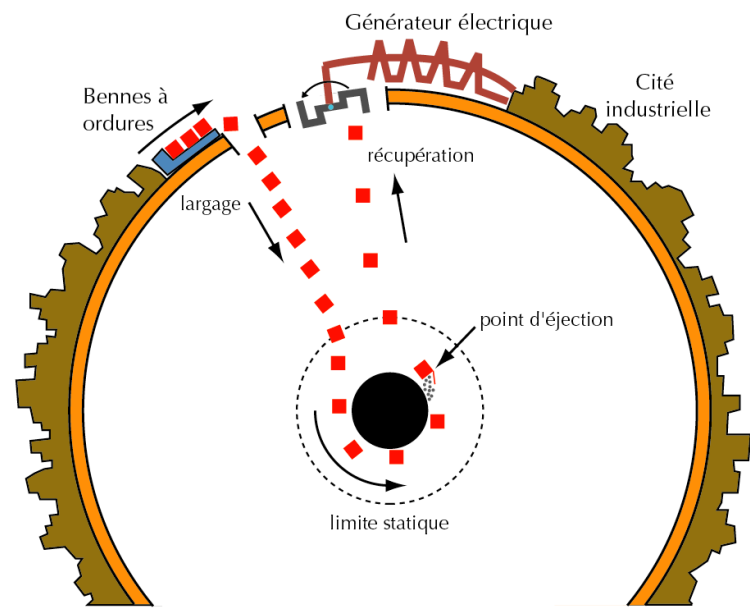
↓
Masse
irréductible

↓
Peut être extraite





Processus de Penrose



jusqu'à 29%

Thermodynamique des trous noirs

aire \propto entropie ?

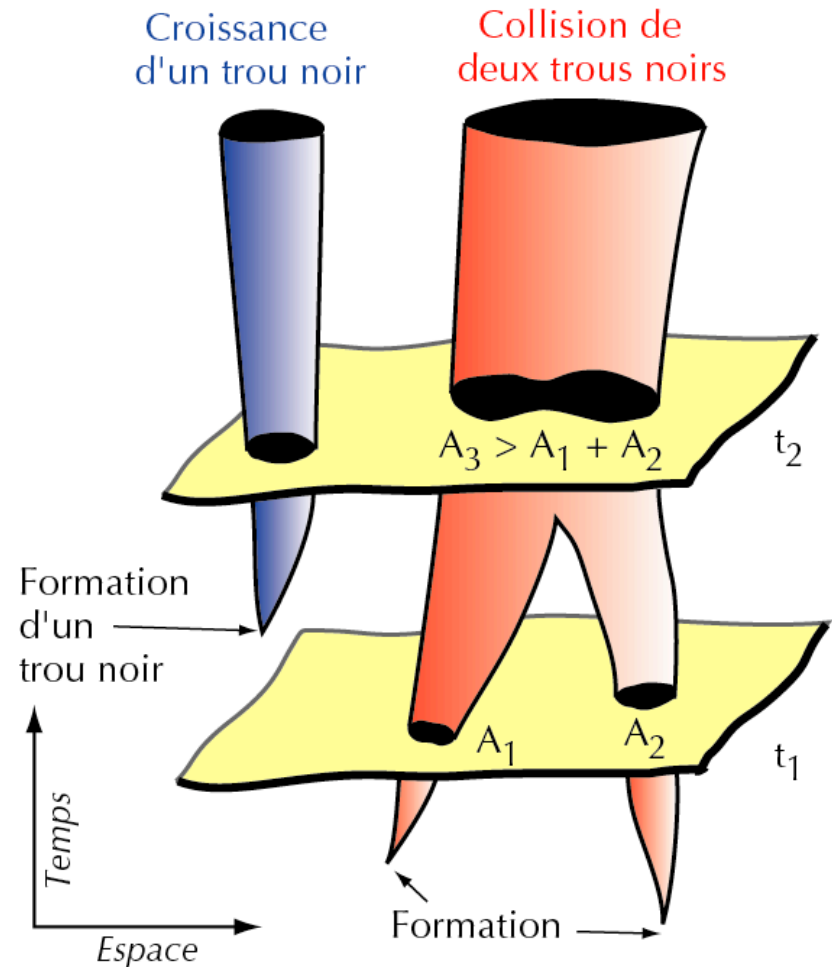
$$S = A/4$$

$$S = 10^{77} (M/M_S)^2$$

température \propto
gravité de surface ?

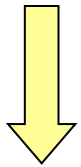
$$T = g/2\pi$$

$$T(K) = 10^{-7} M_S/M$$



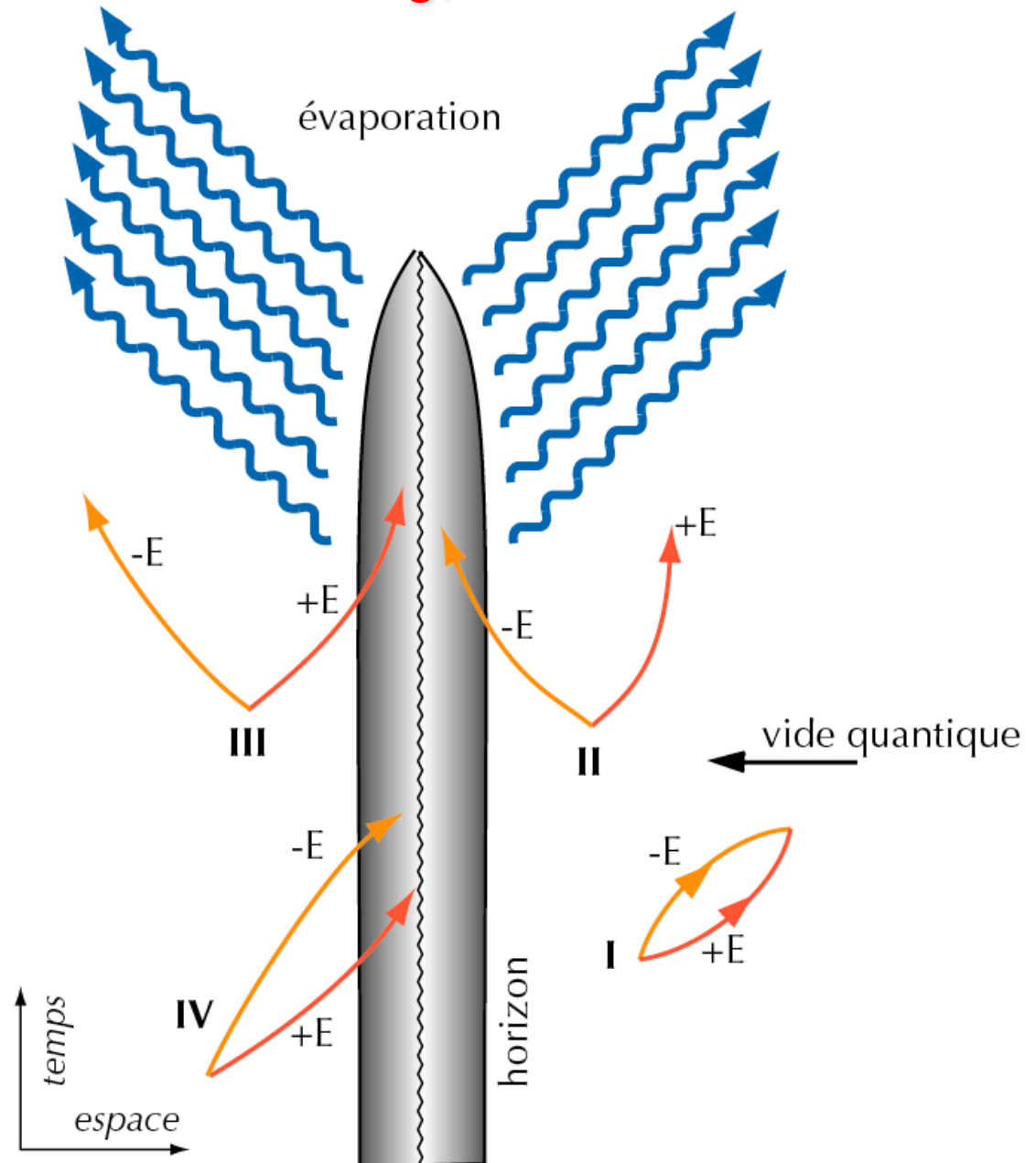
$$dA > 0$$

Evaporation quantique des mini- trous noirs



Paradoxe de
l'information
(unitarité)

Hawking, 1975



Objet « non effondré »

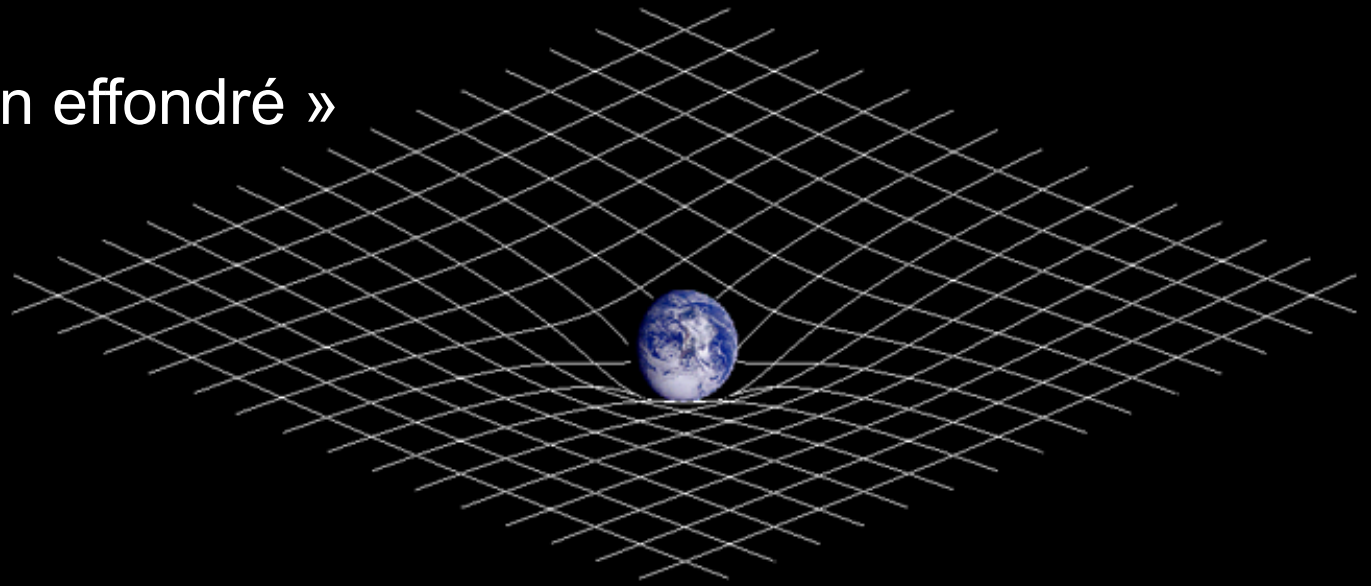
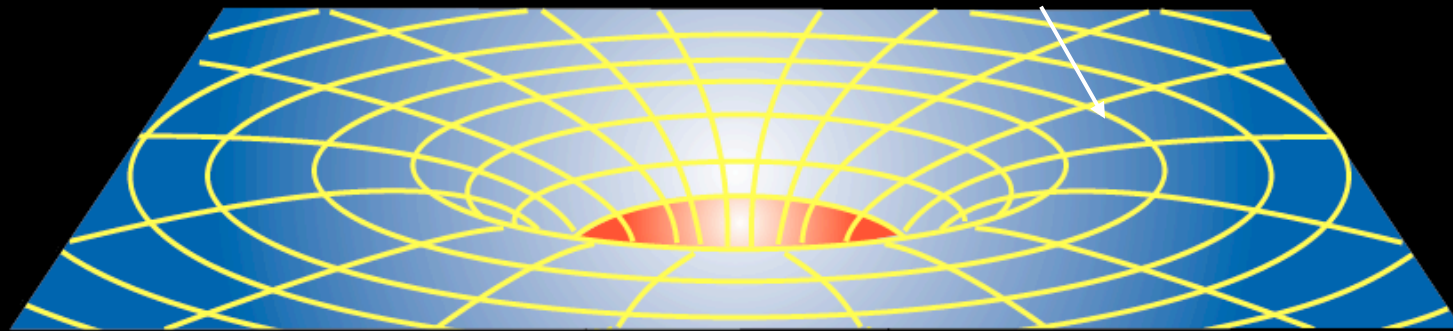


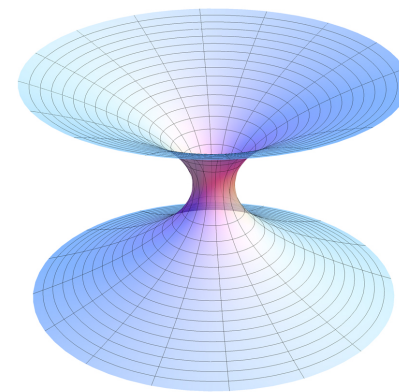
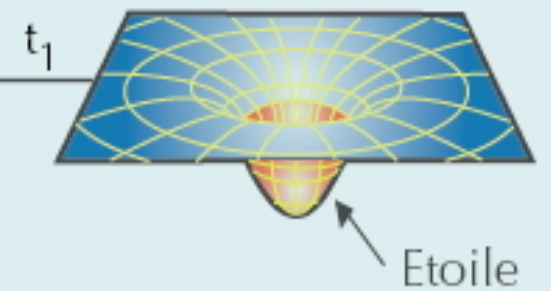
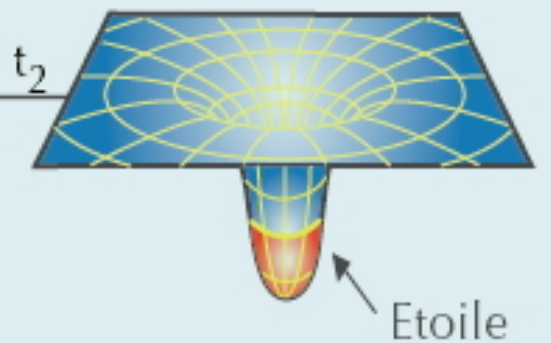
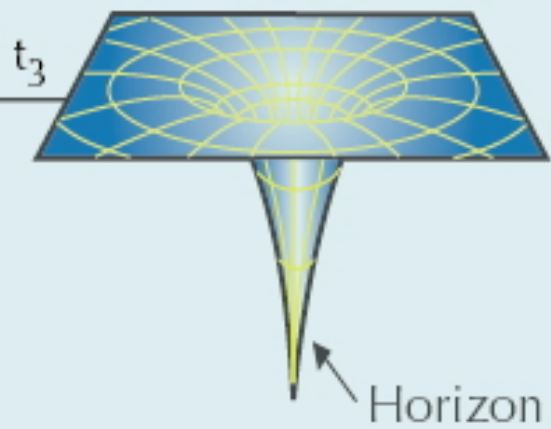
Diagramme de plongement

solution extérieure

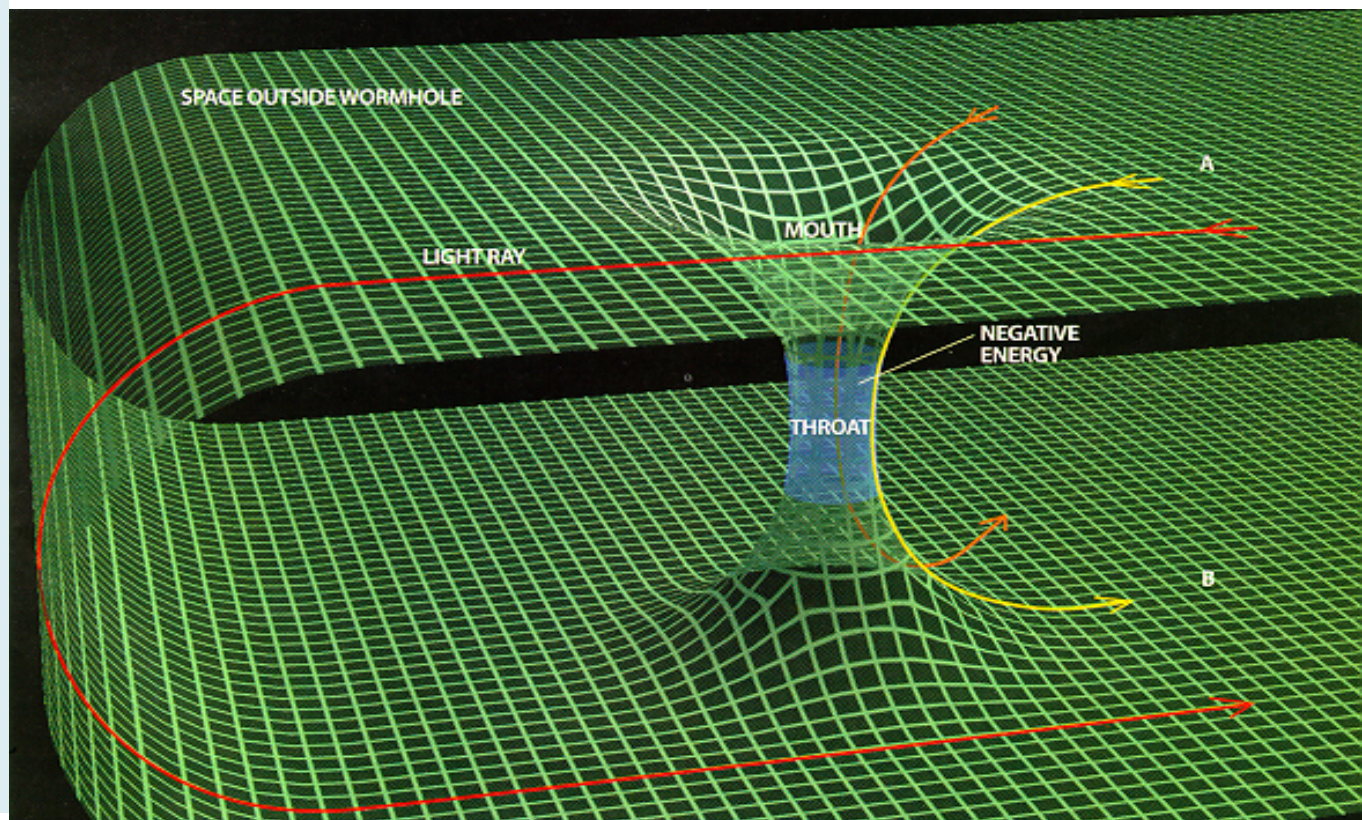


solution intérieure (régulière)





La solution « trou de ver »



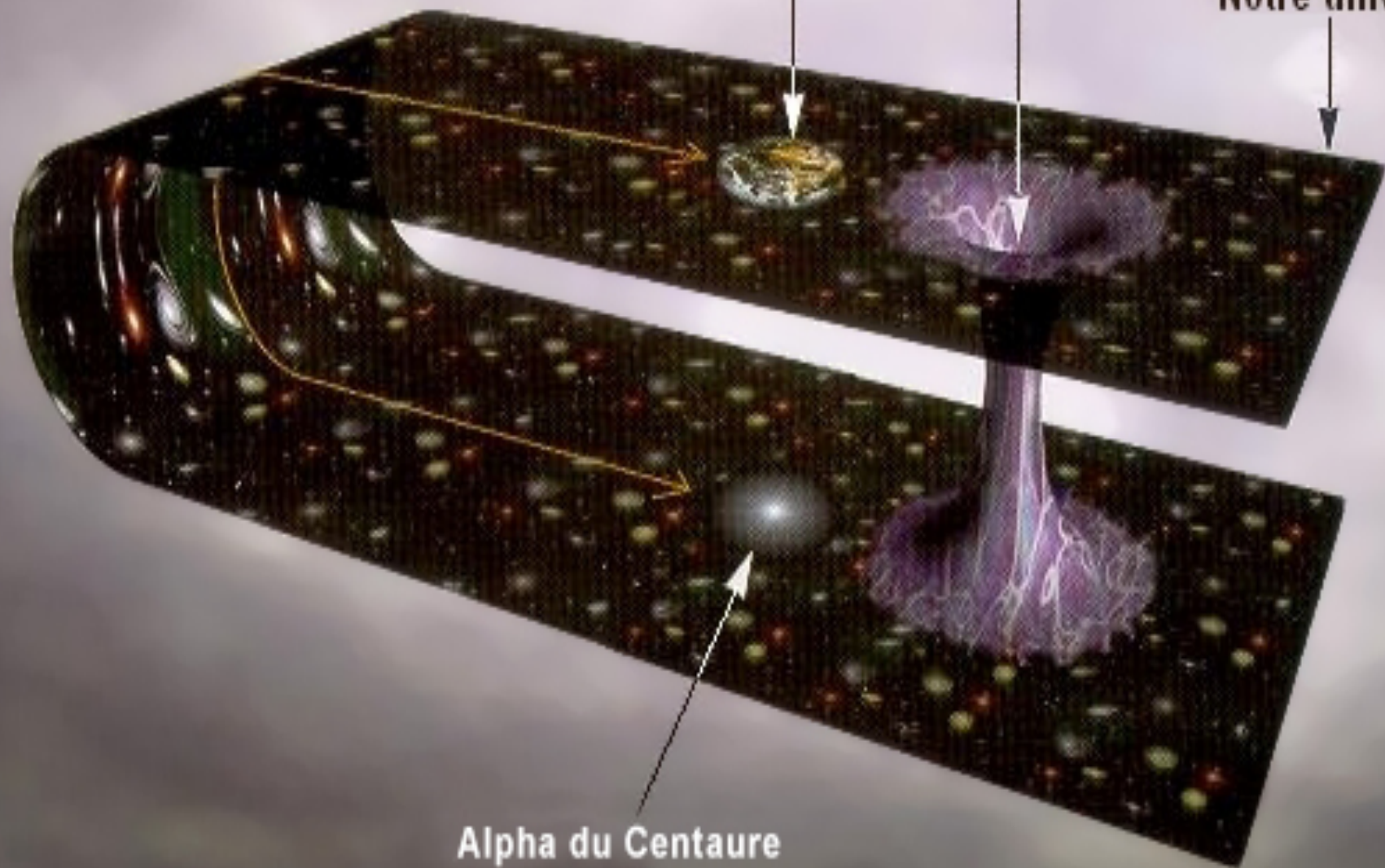
4.3 années-lumière


La Terre

Trou de ver

Notre univers

Alpha du Centaure



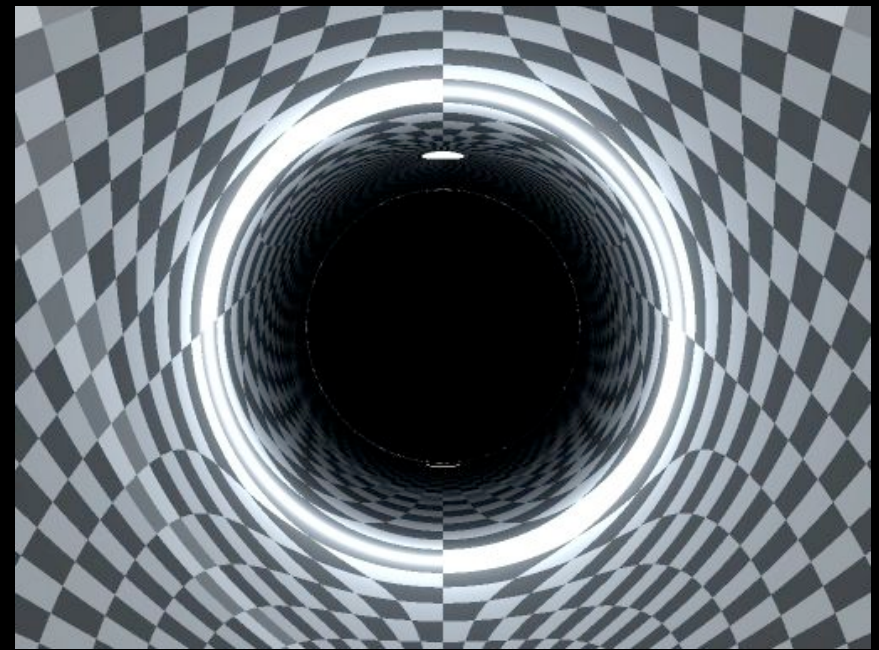
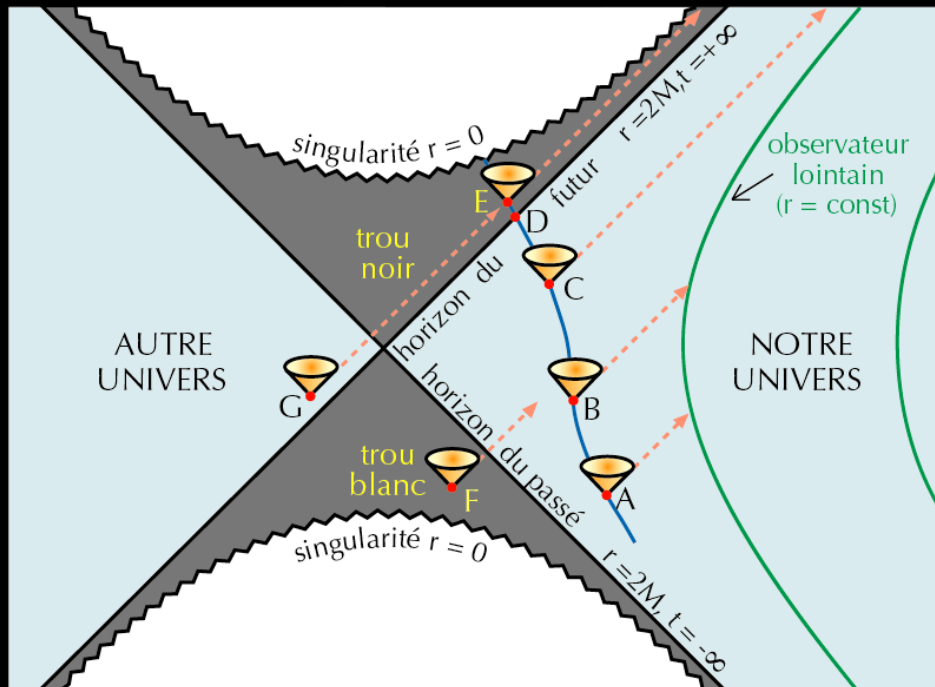


**Vol dans un trou
noir de
Schwarzschild**

Flight into a static black hole

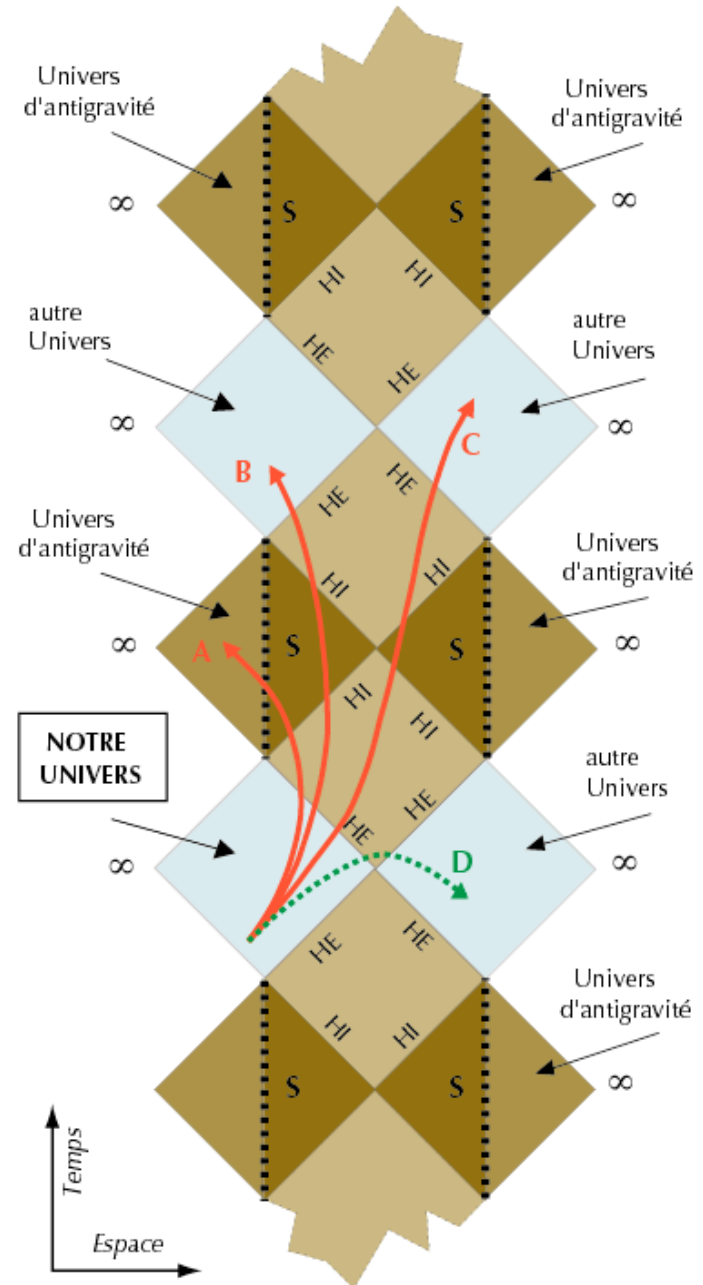
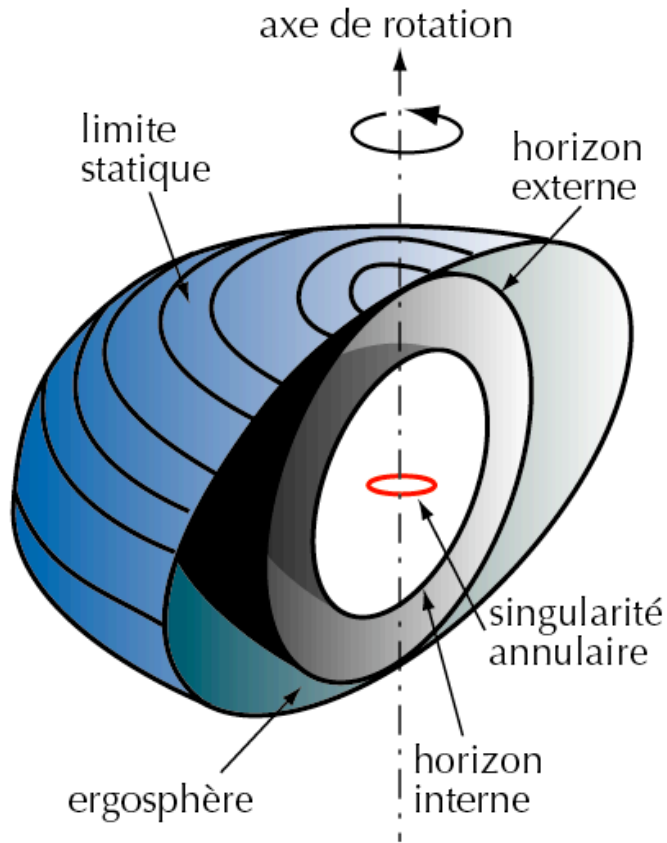
Radial photons

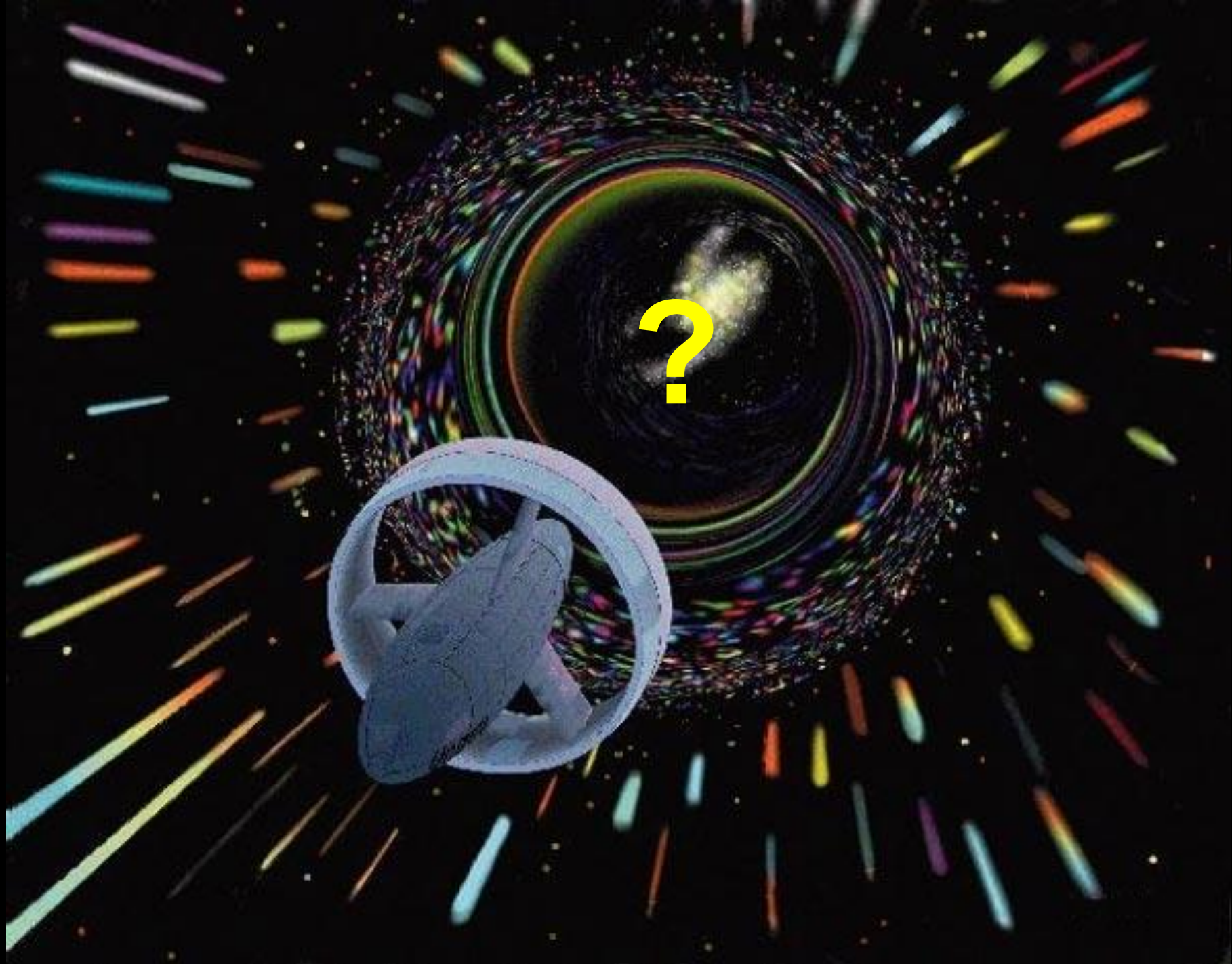
(A.Riazuelo, 2006)

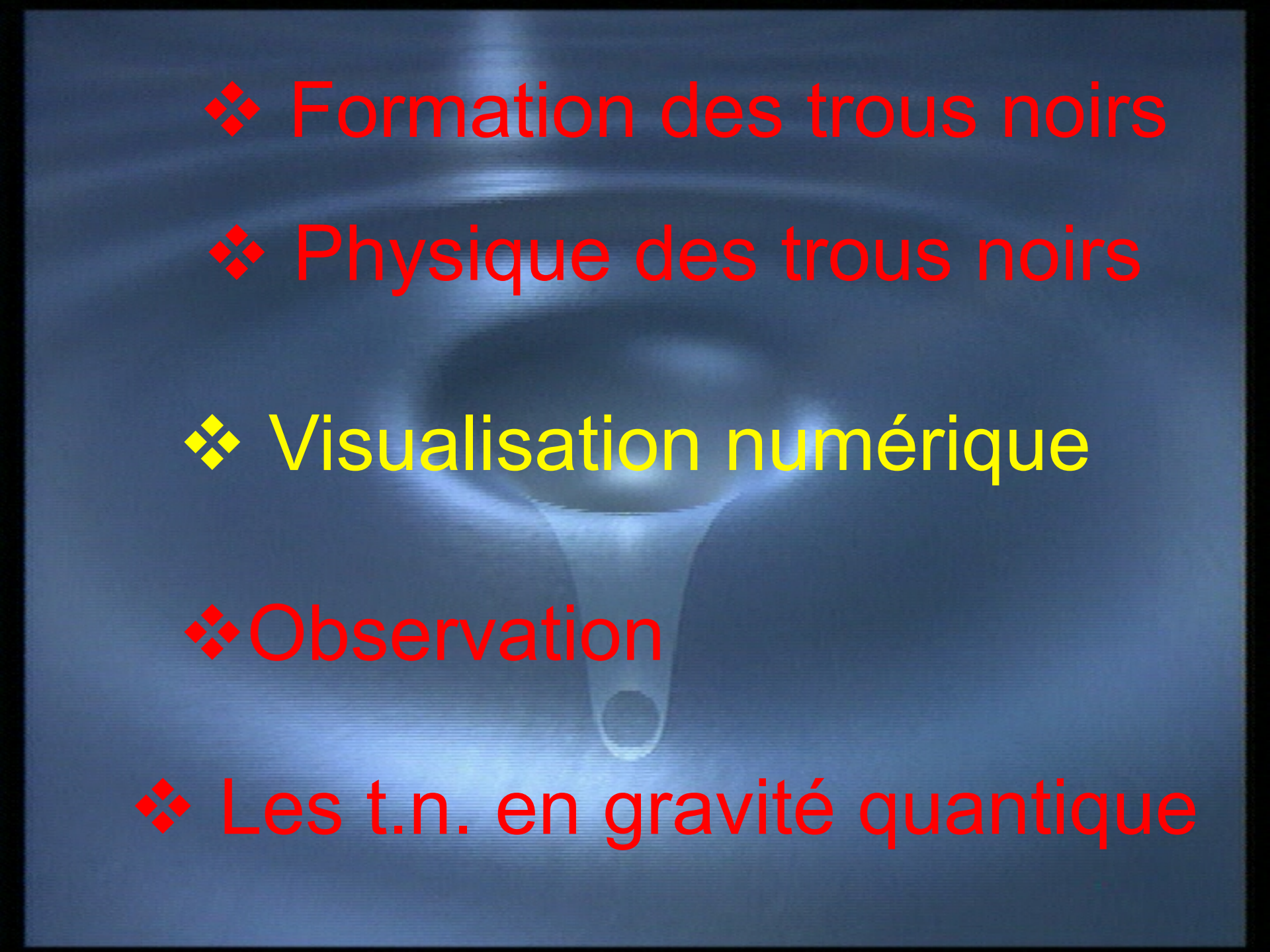


See movie 1

Trou noir & Trou de ver



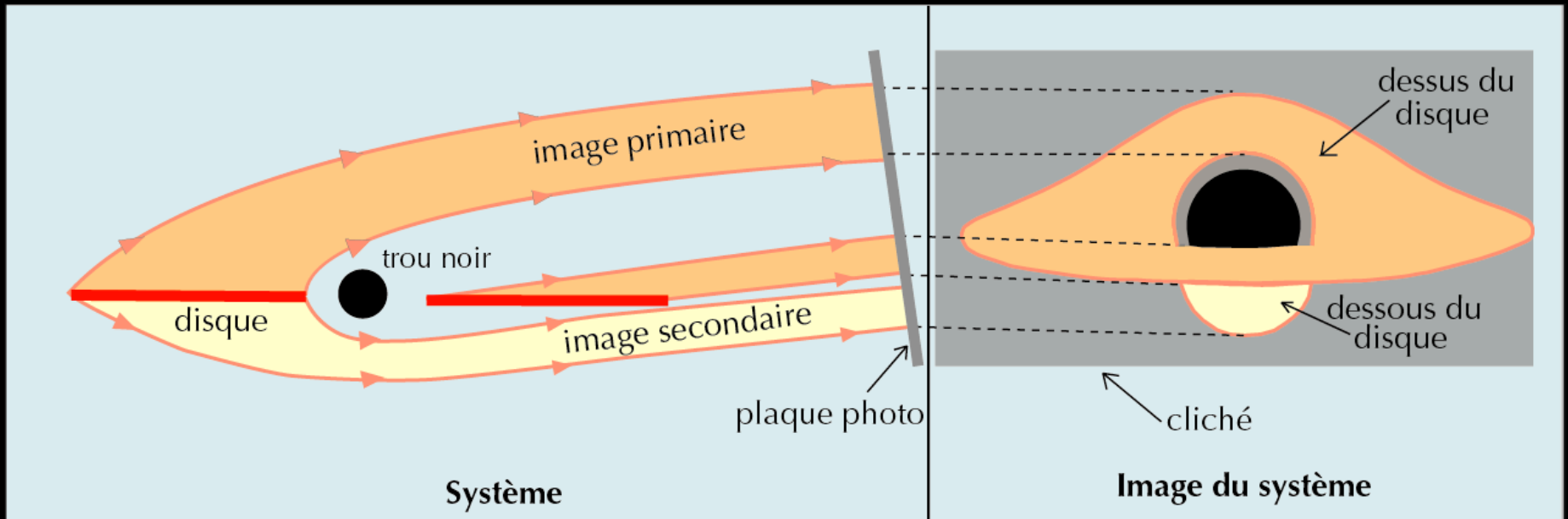


- 
- ❖ Formation des trous noirs
 - ❖ Physique des trous noirs
 - ❖ Visualisation numérique
 - ❖ Observation
 - ❖ Les t.n. en gravité quantique

Espace-temps newtonien



Espace-temps einsteinien



Courbes isoradiales

Trou noir statique
inclinaison 30°

Trou noir statique
inclinaison 10°

$$\theta_0 = 60^\circ$$

$$r = 30M$$

$$r = 20M$$

$$r = 10M$$

$$r = 6M$$

$$r = 6M$$

$$r = 10M$$

$$r = 30M$$

$$r = \infty$$

2M

$$\theta_0 = 80^\circ$$

$$r = 30M$$

$$r = 20M$$

$$r = 10M$$

$$r = 6M$$

$$r = 6M$$

$$r = 10M$$

$$r = 30M$$

$$r = \infty$$

2M

Isophotes

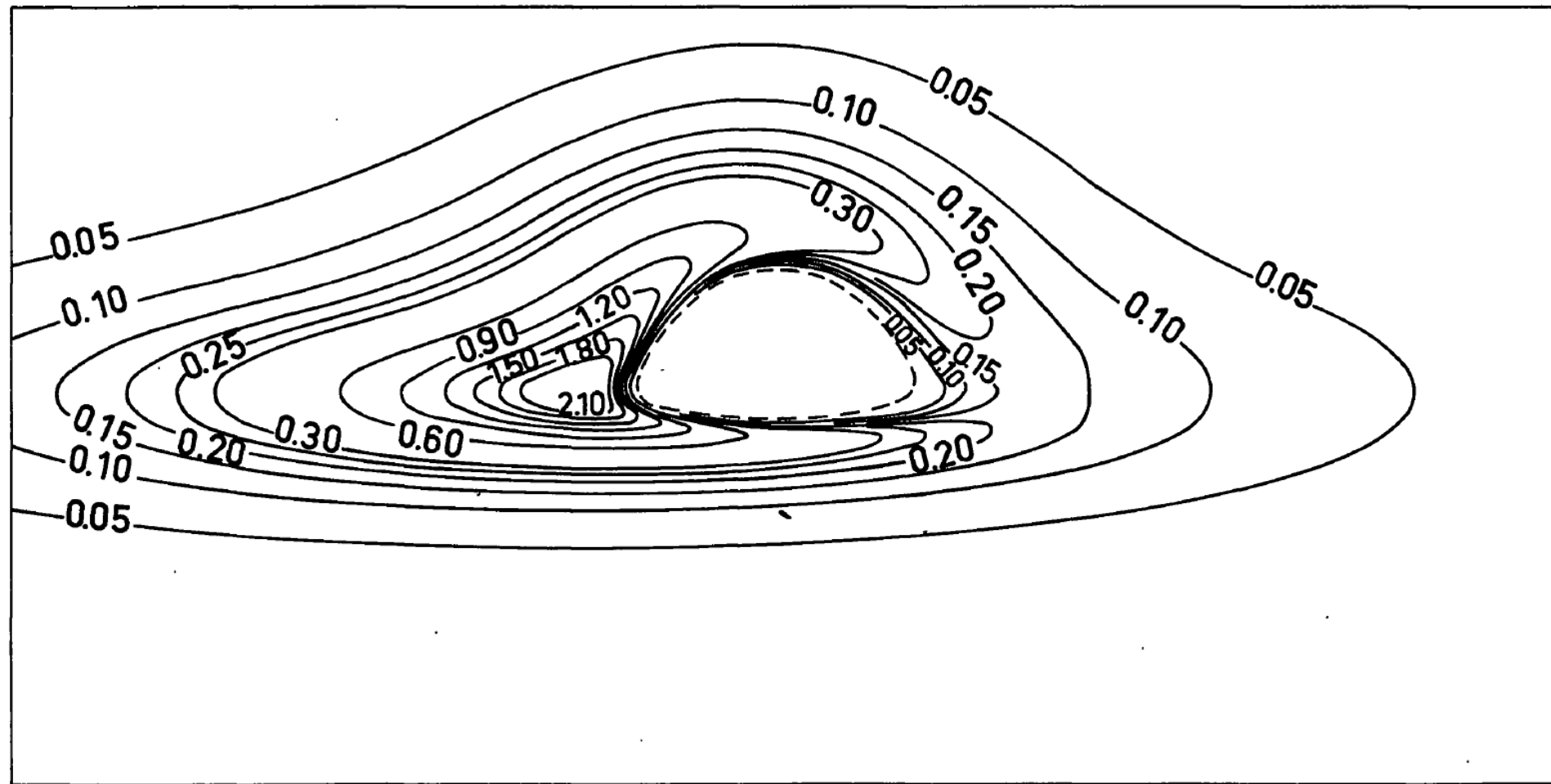
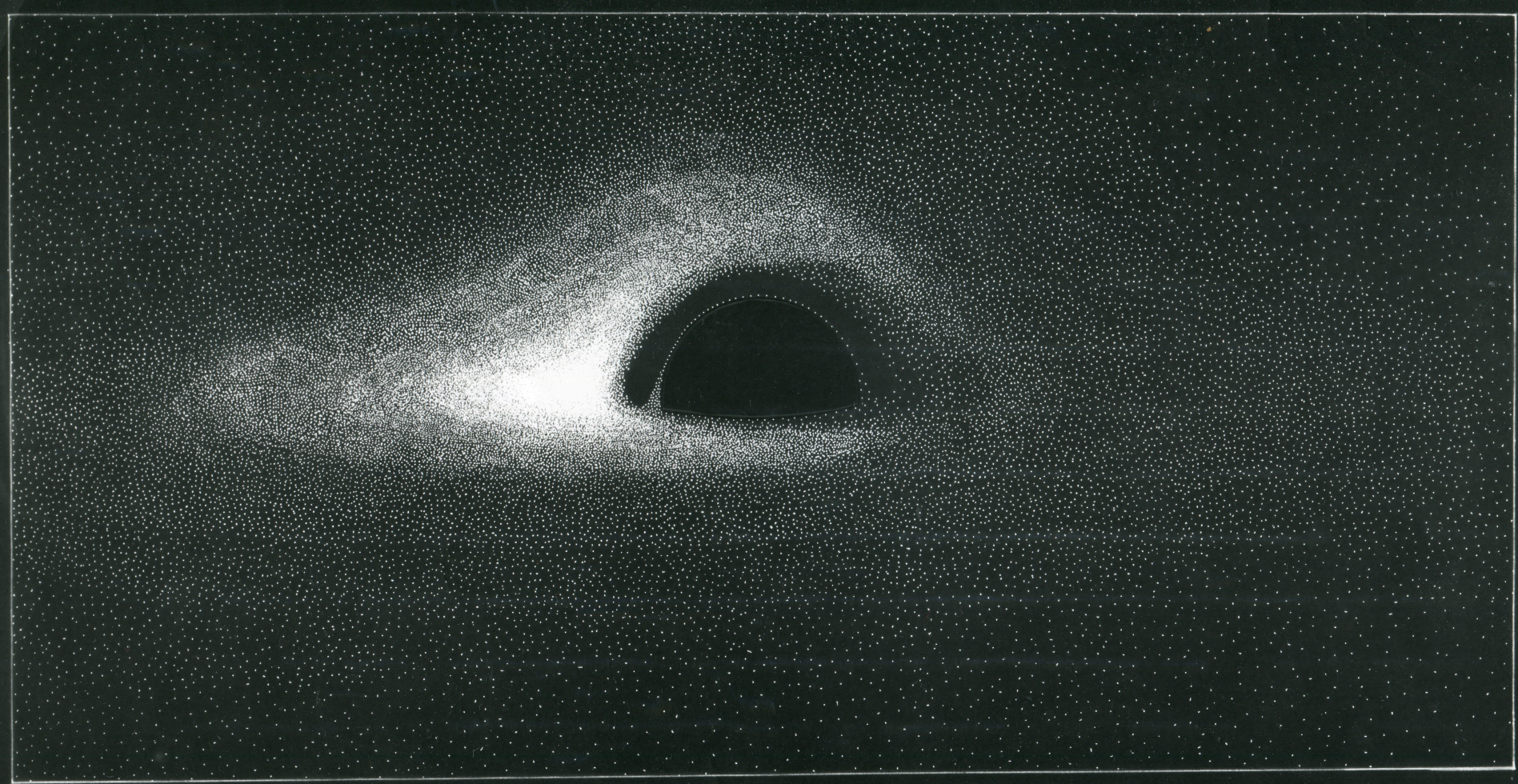


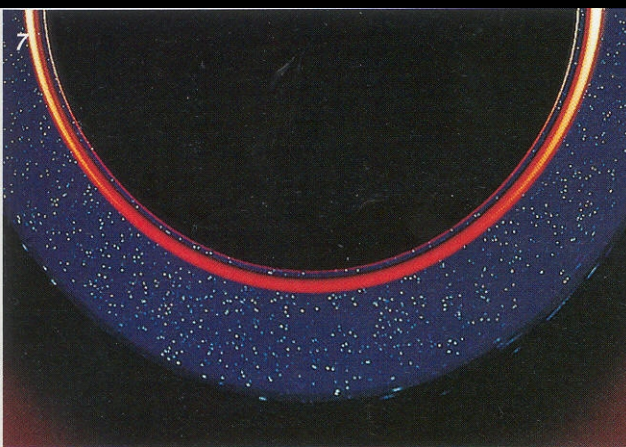
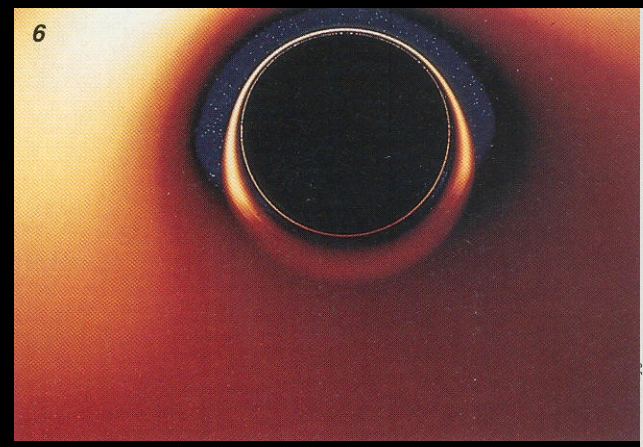
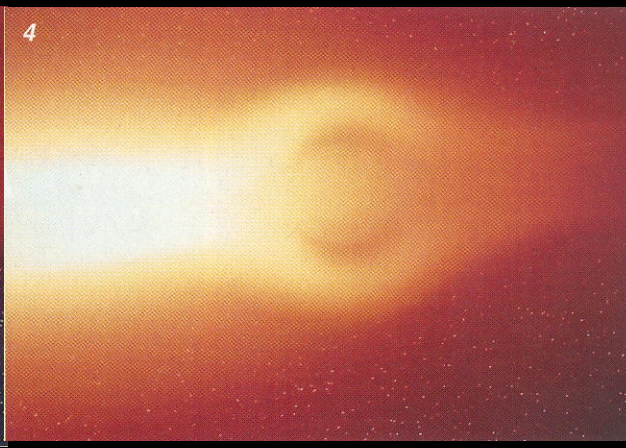
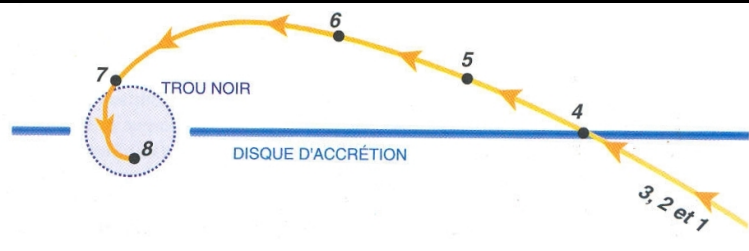
Image of a spherical black hole with thin accretion disk

(J.-P. Luminet, 1979)

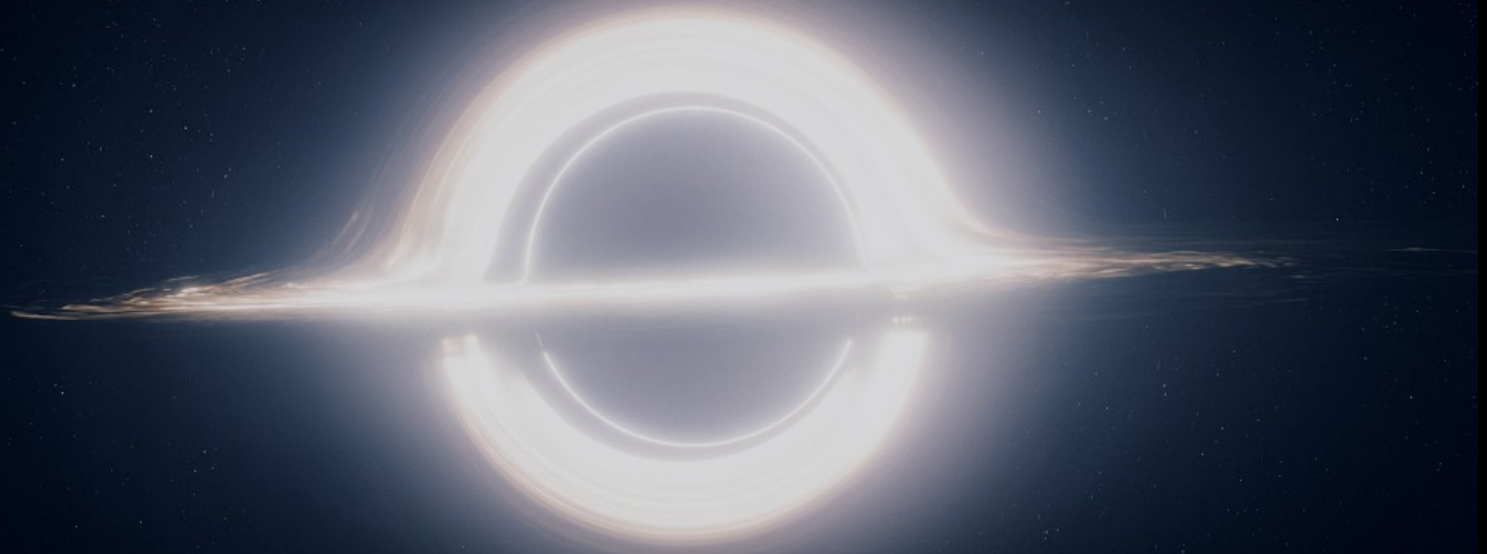


Vol dans un trou noir

(J.A.Marck, 1993)



Interstellar (Thorne et al., 2014)

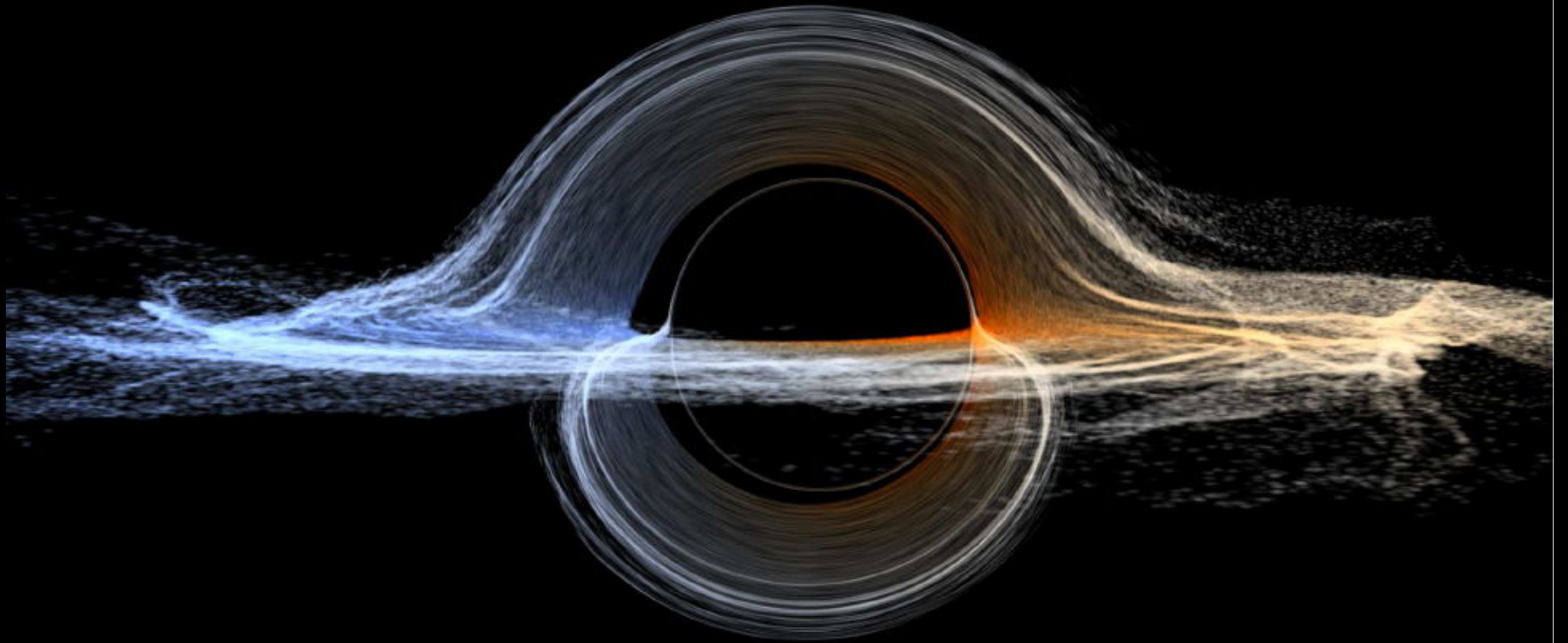


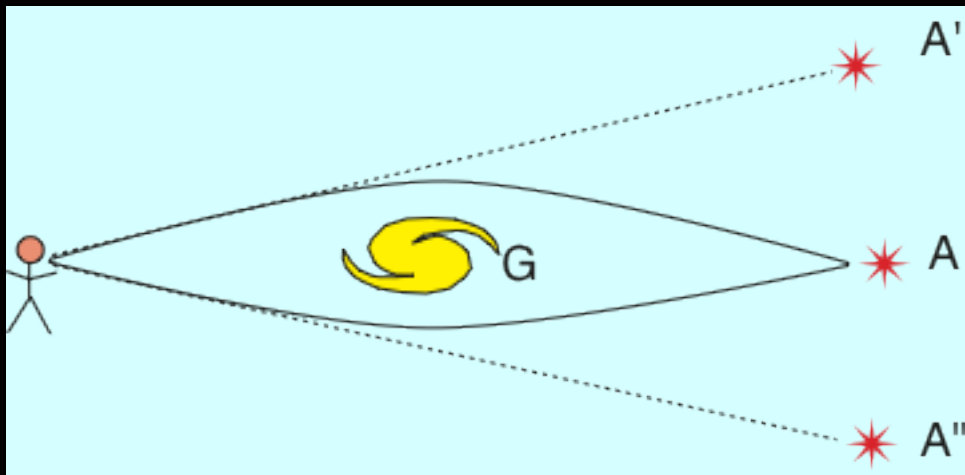
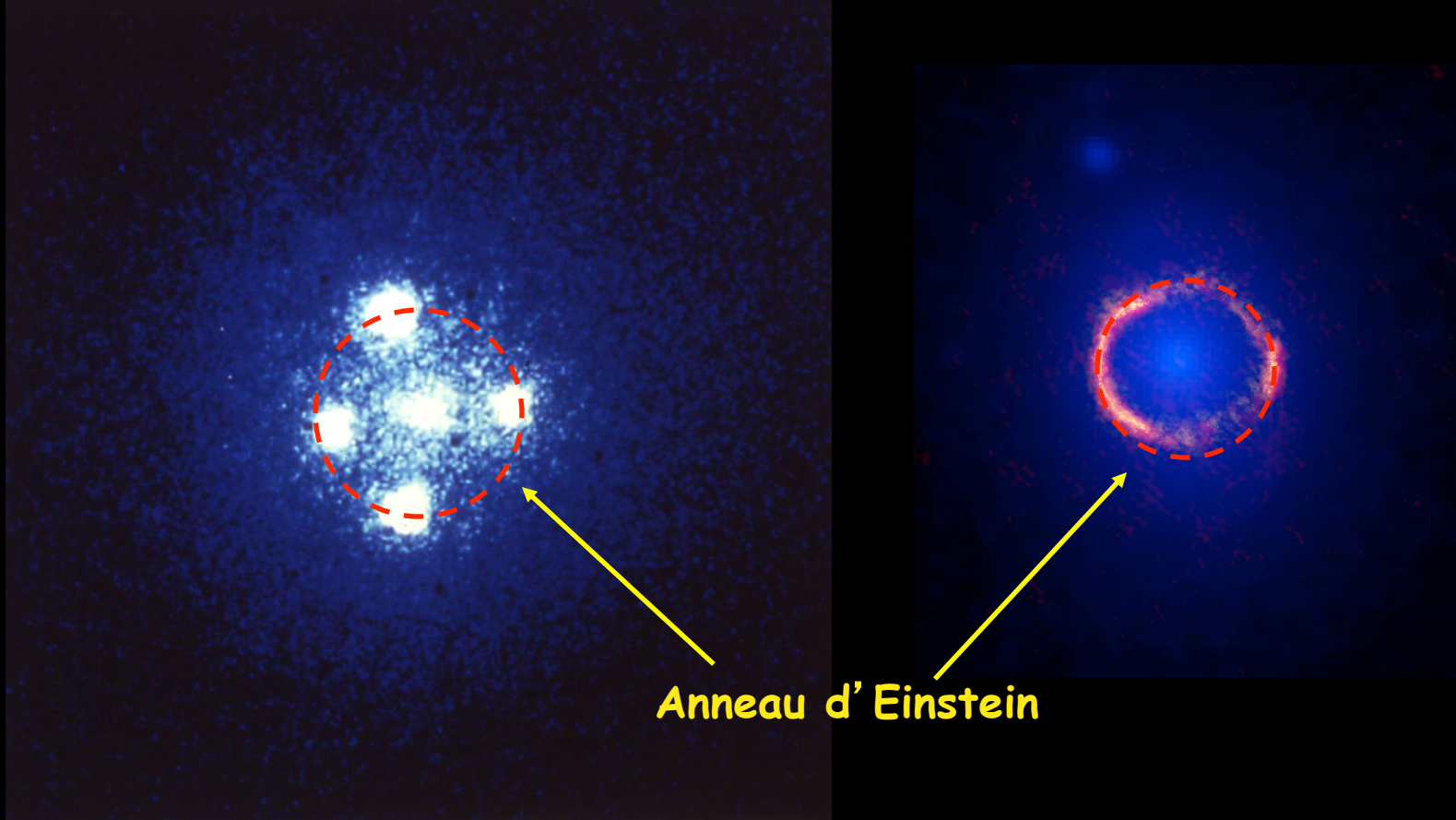
J.-P. Luminet & J.-A. Marck
Pour la Science (1997)



Thorne et al.

Class. Quantum Grav (2014)

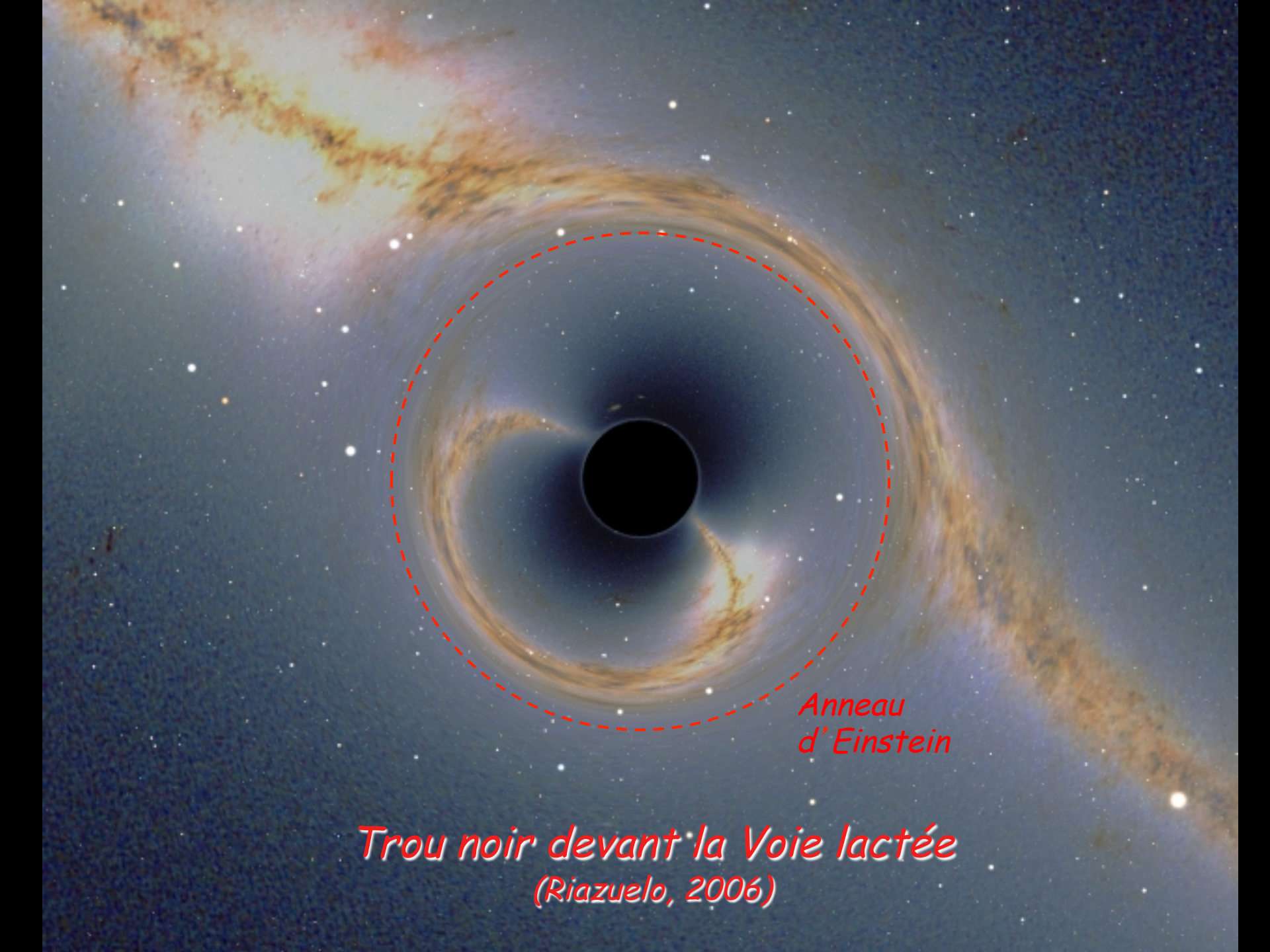




Mirage
Gravitationnel



Effet de mirage gravitationnel

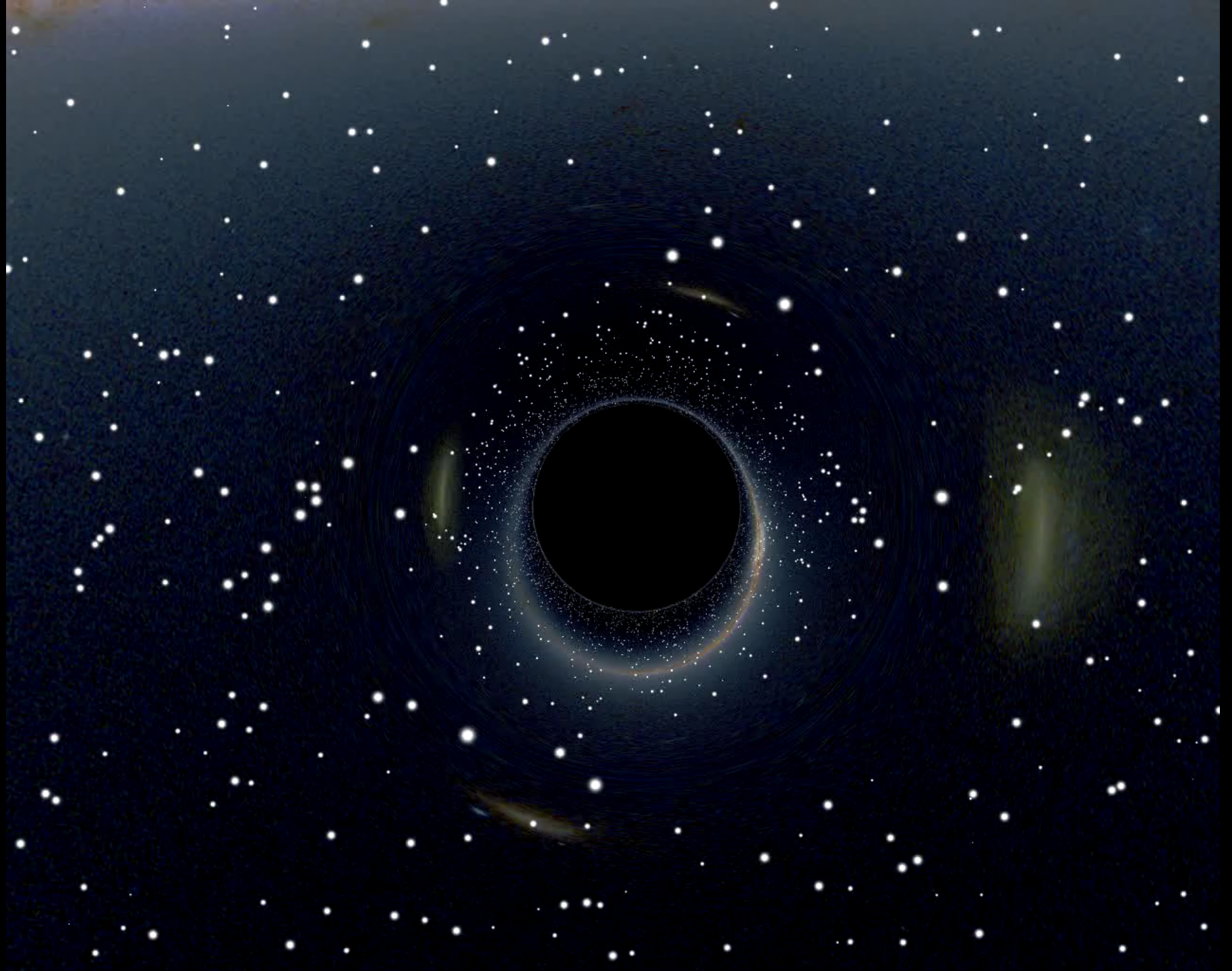


*Anneau
d'Einstein*

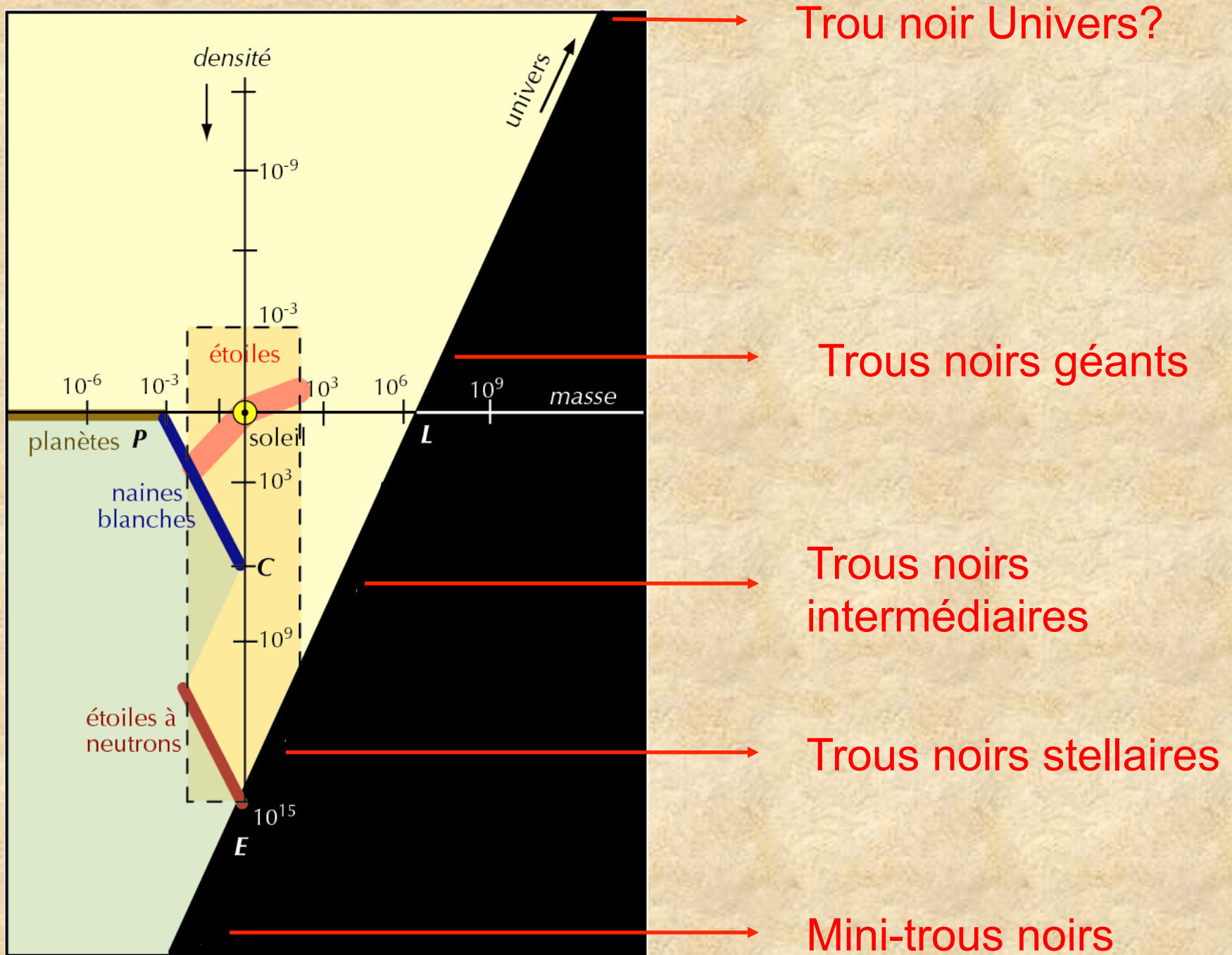
*Trou noir devant la Voie lactée
(Riazuelo, 2006)*



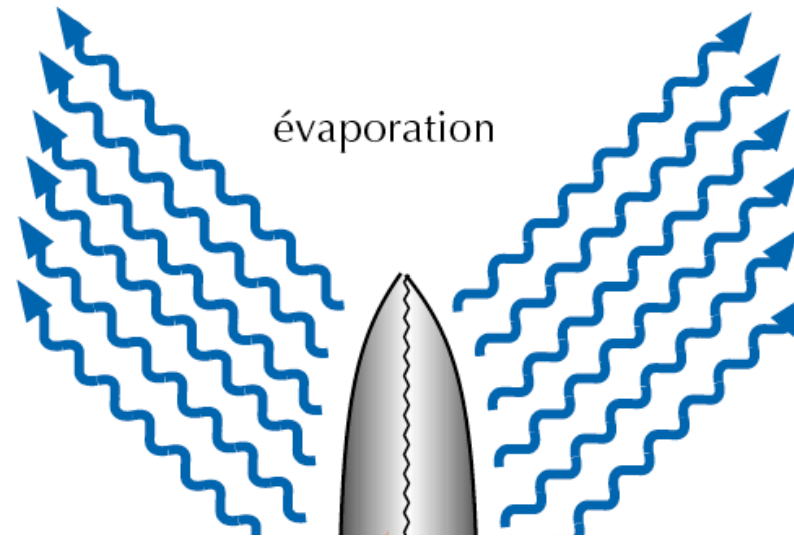
*Trou noir devant le Grand Nuage de Magellan
(A. Riazuelo, 2006)*



- 
- ❖ Formation des trous noirs
 - ❖ Physique des trous noirs
 - ❖ Visualisation numérique
 - ❖ Observation
 - ❖ Les t.n. en gravité quantique



Des micro-trous noirs primordiaux ?

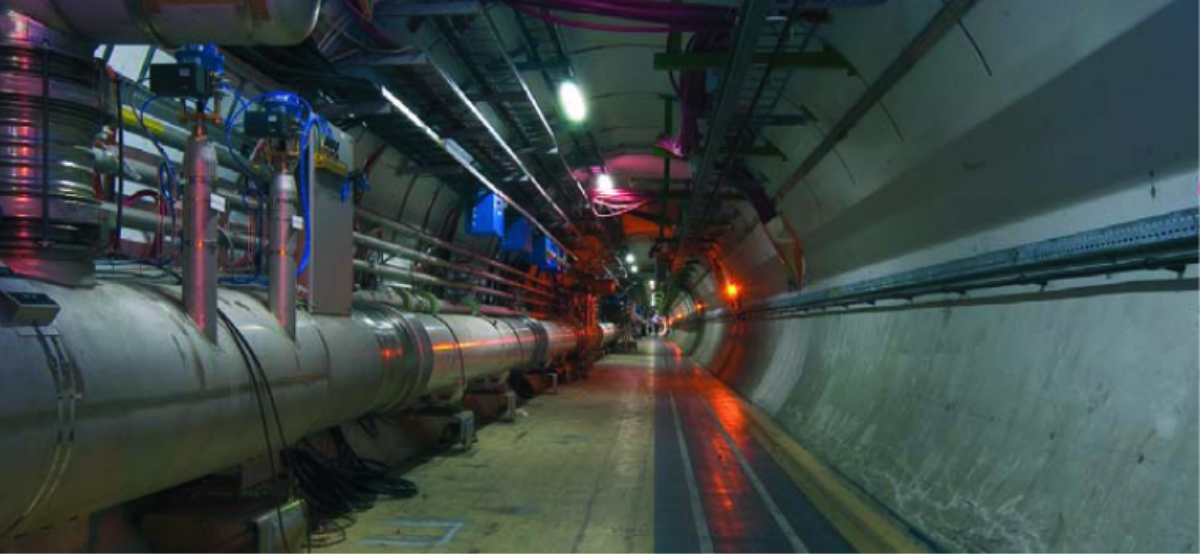


Temps d'évaporation < âge de l'univers

$$\text{si } M < 10^{15} \text{ g}$$

Contrainte observationnelle:

$$< 100 \text{ mini t.n/al}^3$$



Le LHC peut-il créer des mini-trous noirs artificiels ?

- Energie atteinte au LHC : 10^5 GeV
- Energie nécessaire pour créer un mini-trou noir: 10^{19} GeV

→ IMPOSSIBLE ! à moins que...

• Théorie des supercordes, 6 dimensions spatiales supplémentaires de taille ~ 1 mm

=> Energie nécessaire pour créer un mini-trou noir: 10^3 GeV

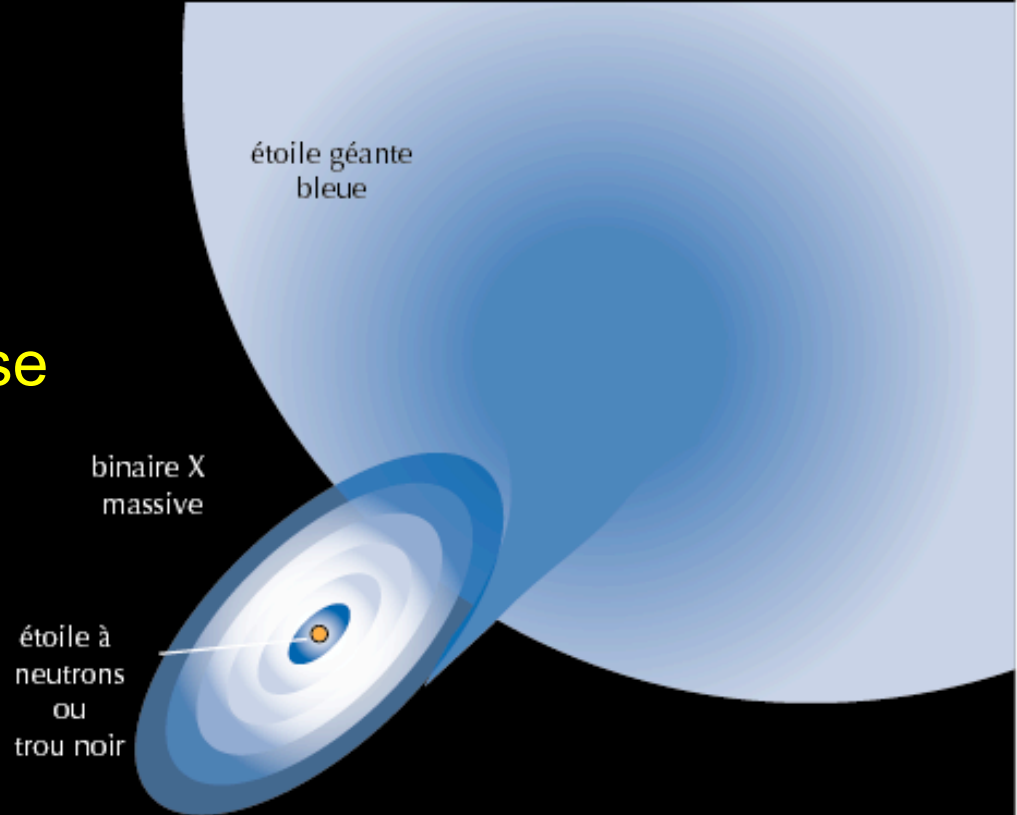
→ 1 mini t.n./seconde ! DANGER ? AUCUN !

Détection des trous noirs stellaires

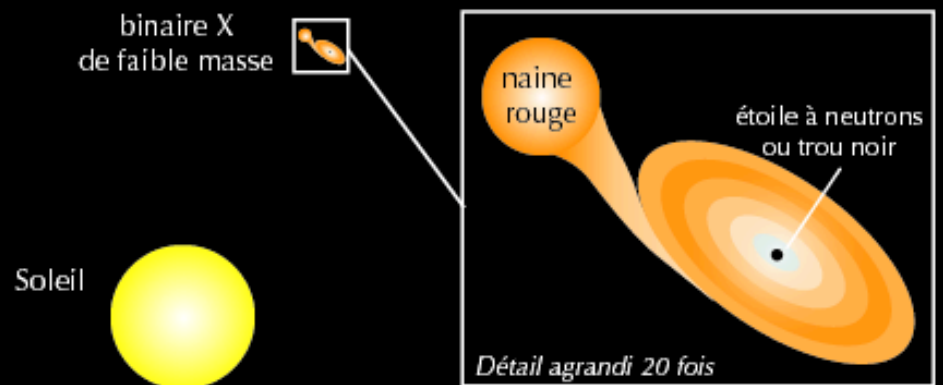
$(3 M_{\odot} < M < 100 M_{\odot})$

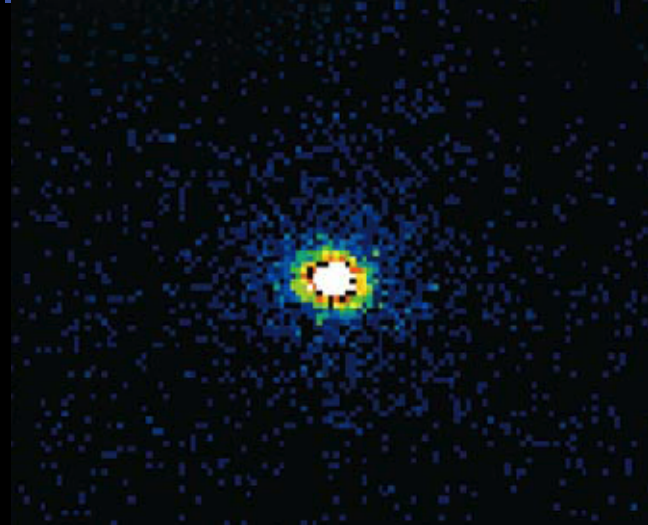
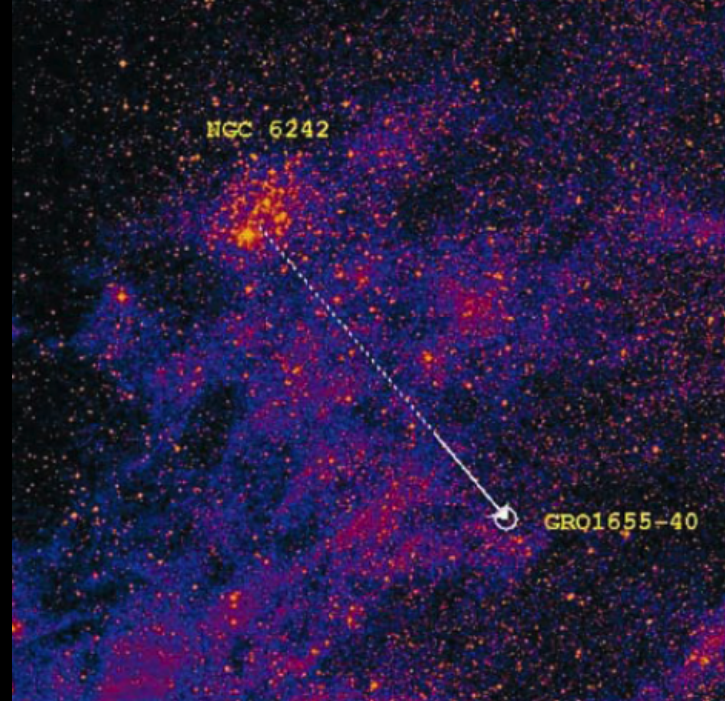
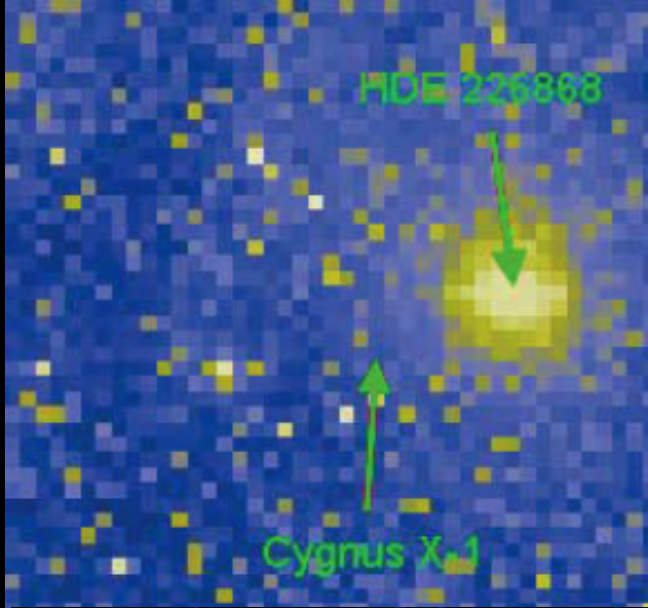


Binaires X de grande masse (HMXB)



Binaires X de faible masse (LMXB)

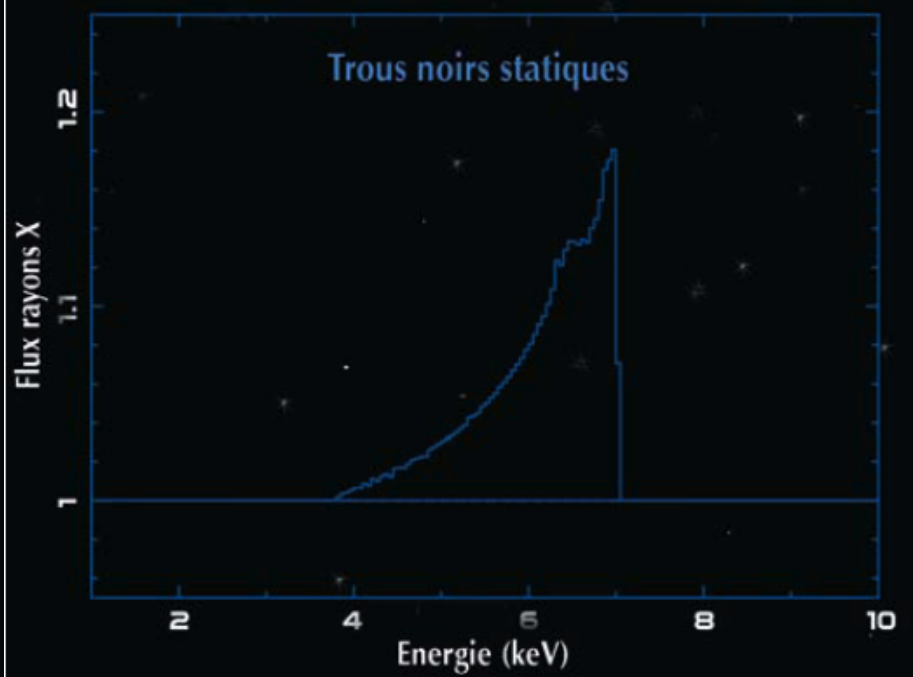
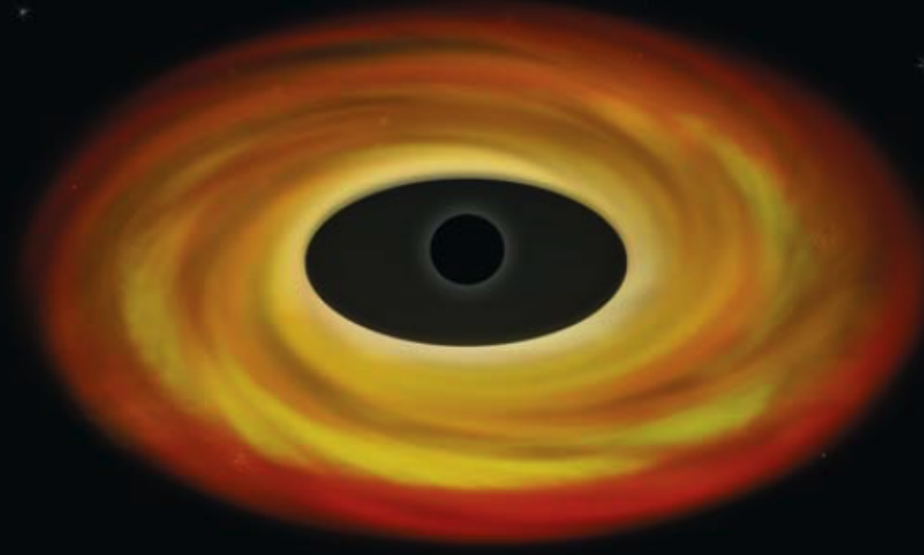
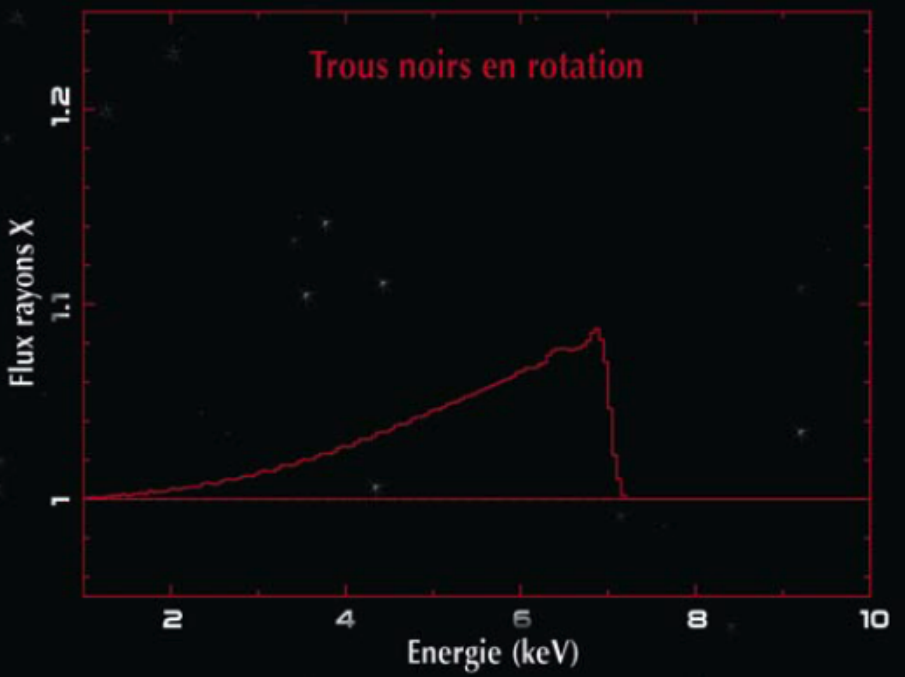
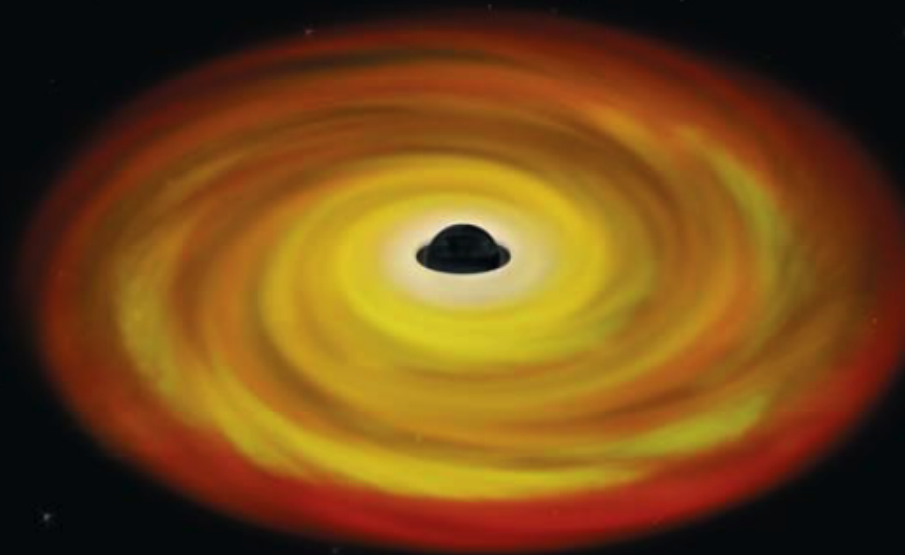




Cygnus X-1

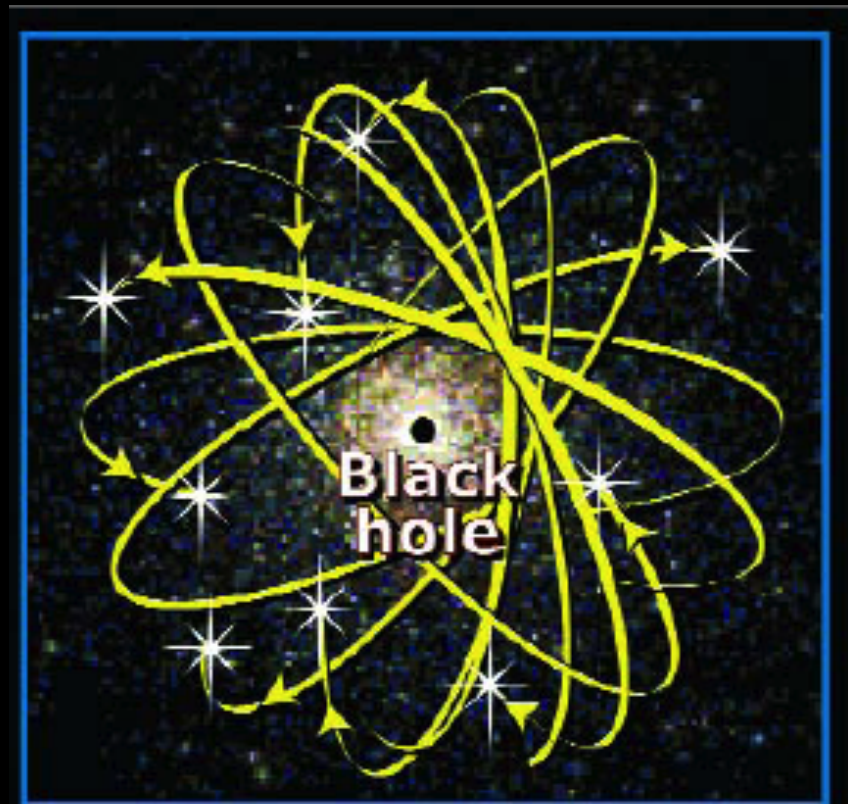
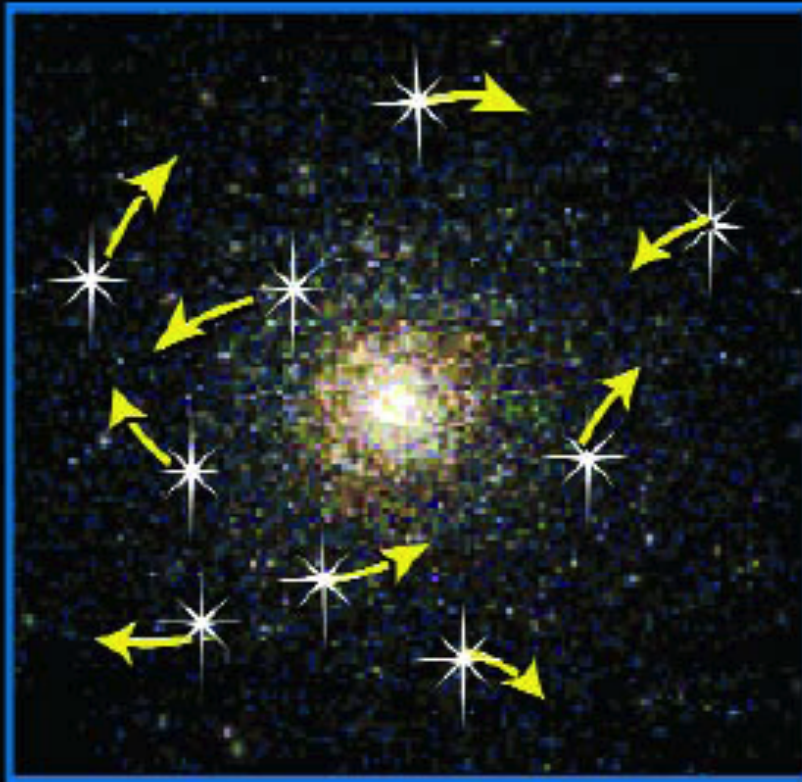


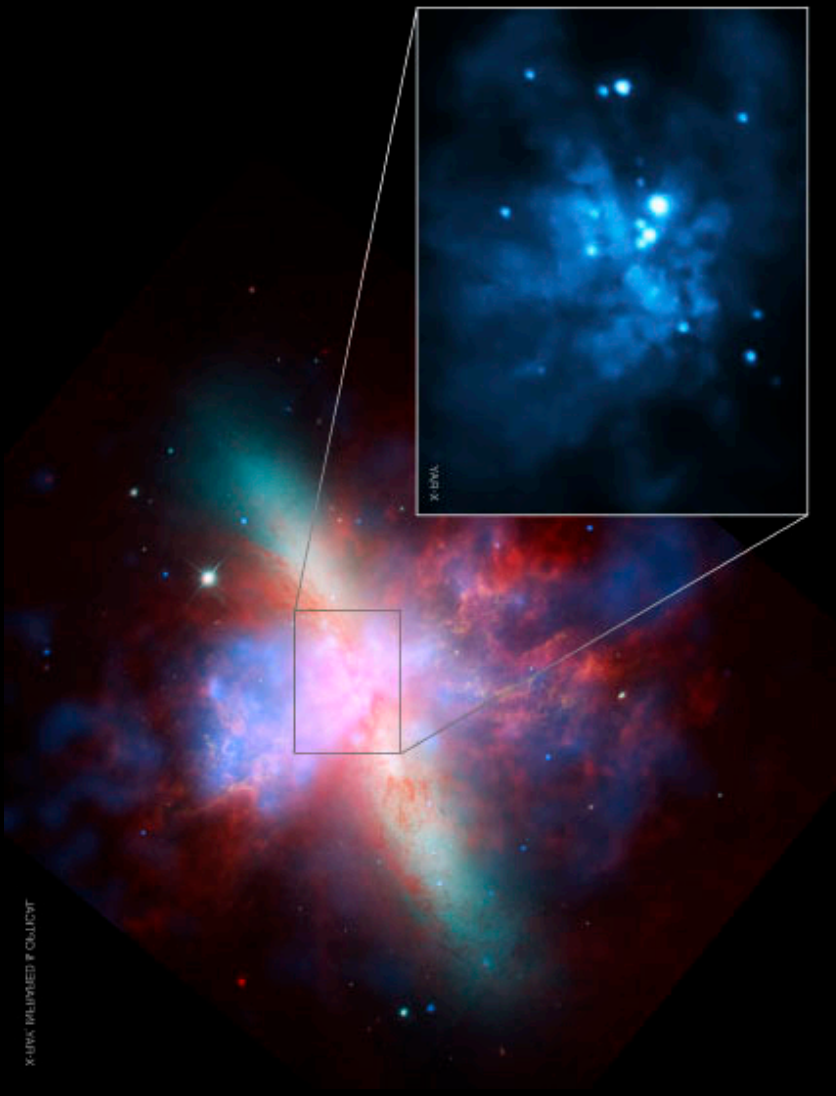
Trou noir errant



Détection des trous noirs intermédiaires

$(300 M_{\odot} < M < 10\,000 M_{\odot})$





M82 X-1
400 M_{\odot}

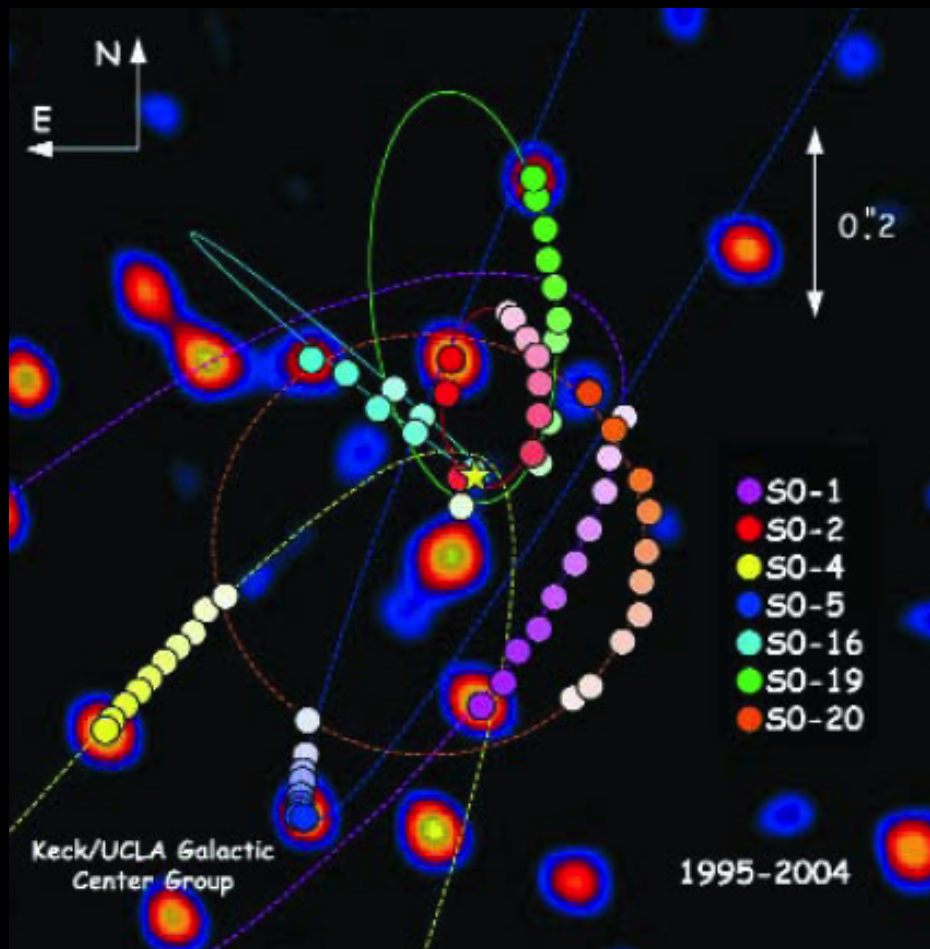


NGC 1313 X-1
5 000 M_{\odot}

Le Trou noir Galactique

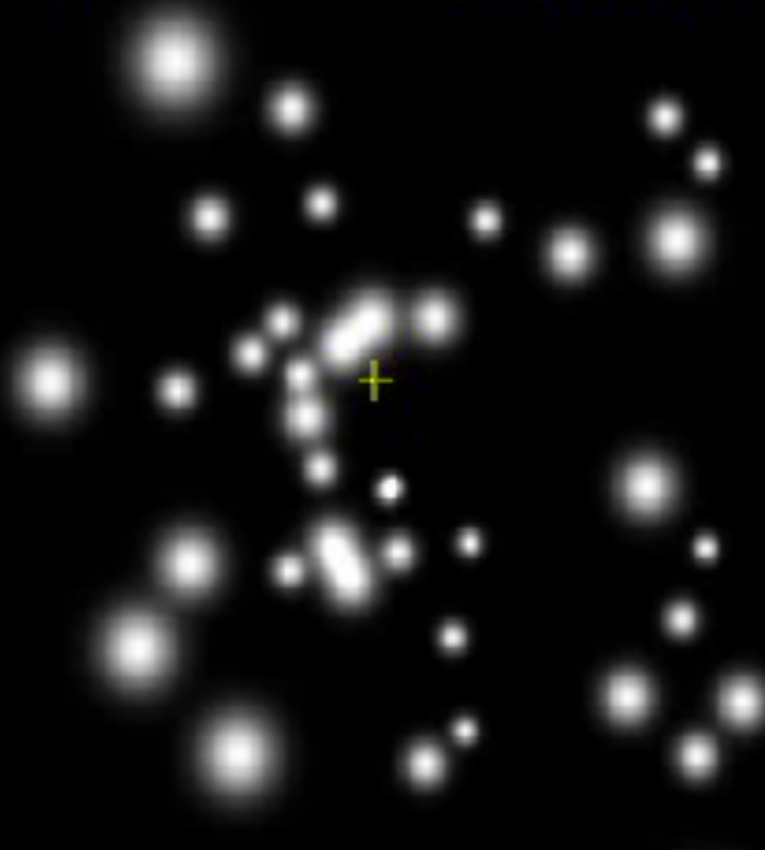


Sagittarius A*



1992

10 light days



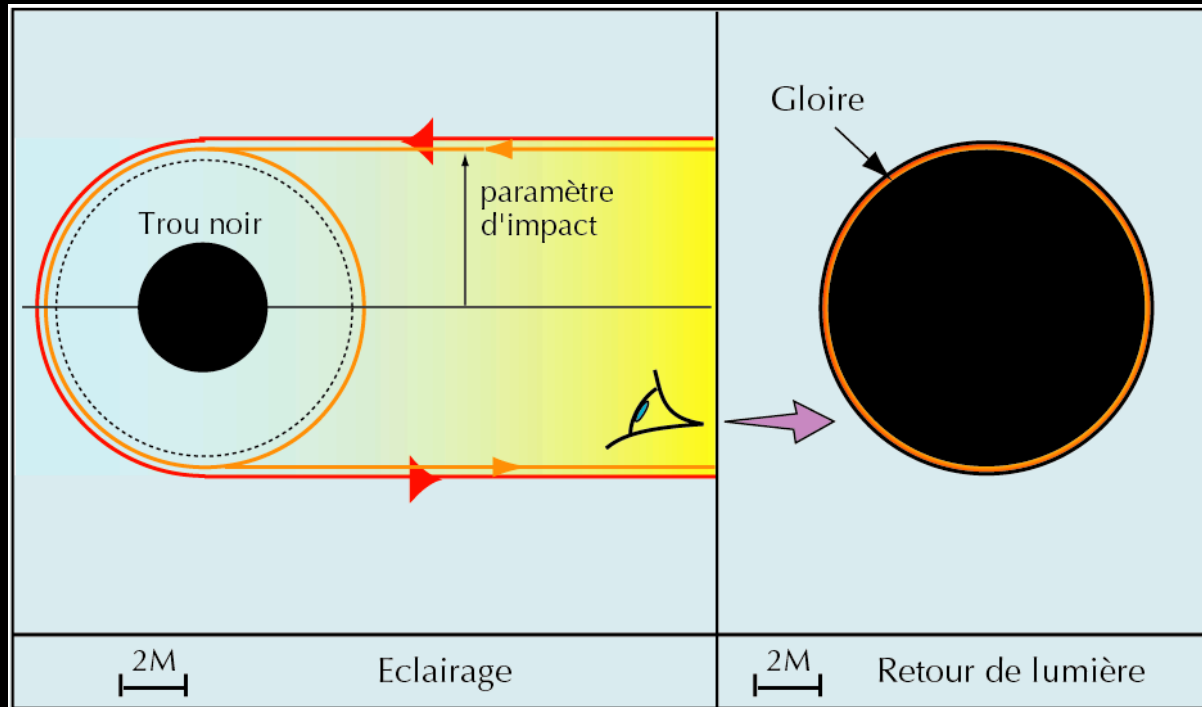
Masse = 4 000 000 masses solaires

Voir Sagittarius A* ?

$R_S \sim 3 \text{ km } M/M_S \rightarrow D_{\text{SagA}} \sim 25 \text{ millions km}$

à 30 000 années-lumière $\rightarrow D_{\text{ang}} \sim 20 \mu\text{arcsec}$

Mais effet de loupe gravitationnelle (Luminet 1979) :



Facteur d'agrandissement : $D = 4 M \rightarrow D_a = 10.4 M$

$\rightarrow D_{\text{app}} \sim 53 \mu\text{arcsec}$

Accessible à l'Event Horizon Telescope !

Submillimeter
Telescope (US)

- James Clerk
Maxwell Telescope
- Submillimeter
Array (US)

Large Millimeter
Telescope (Mexico)

IRAM 30-Meter
Telescope (Spain)

- Atacama Large
Millimeter Array
(ALMA)
- Atacama Pathfinder
Experiment
(APEX, Chile)

South Pole
Telescope

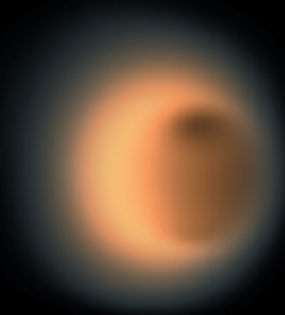
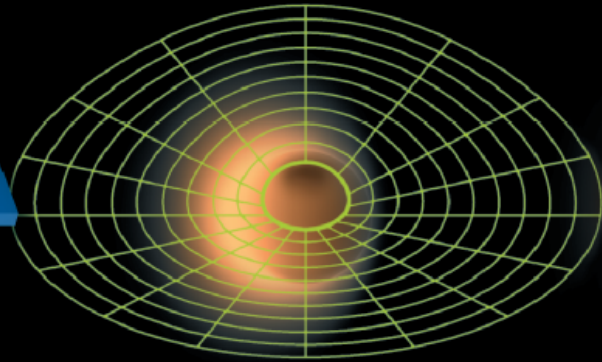
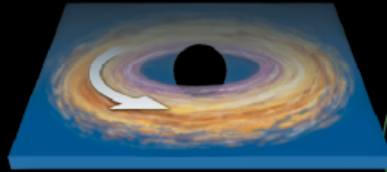


VLBI

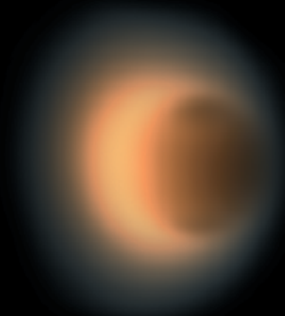
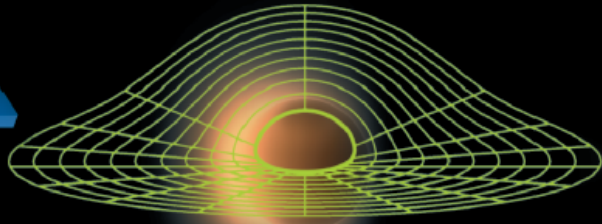
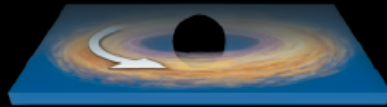
Résolution : $20 \mu\text{arcsec}$

Simulations Event Horizon Telescope

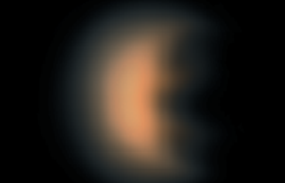
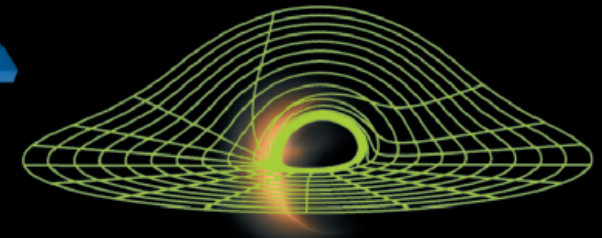
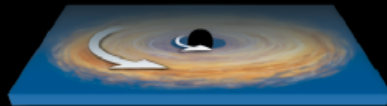
Trou noir statique
inclinaison 30°

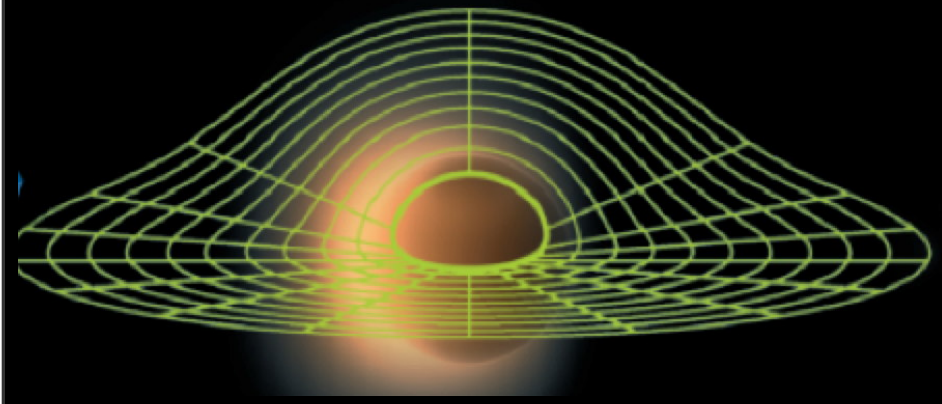
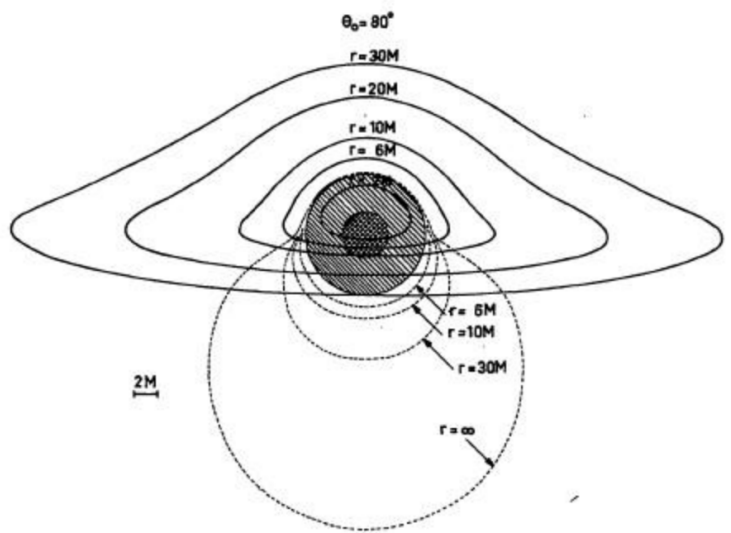
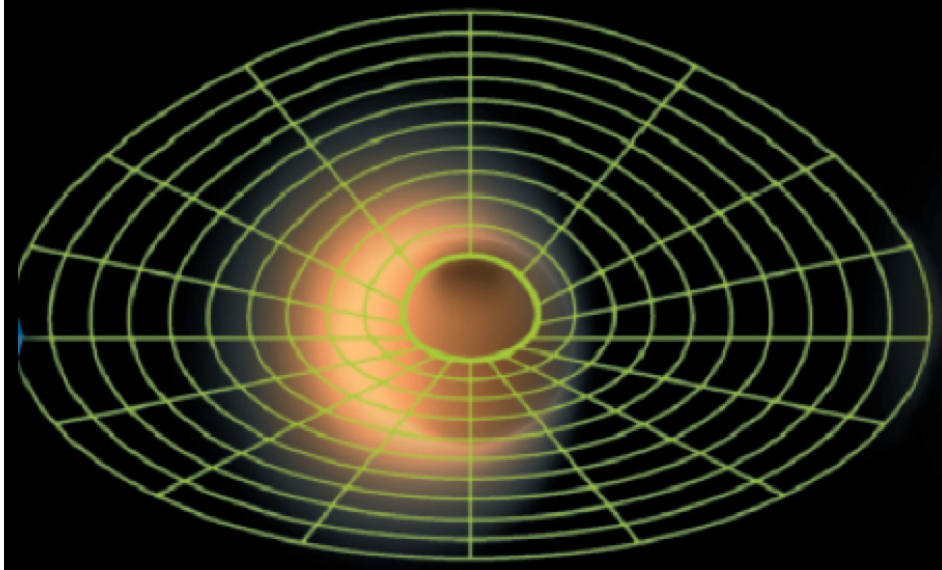
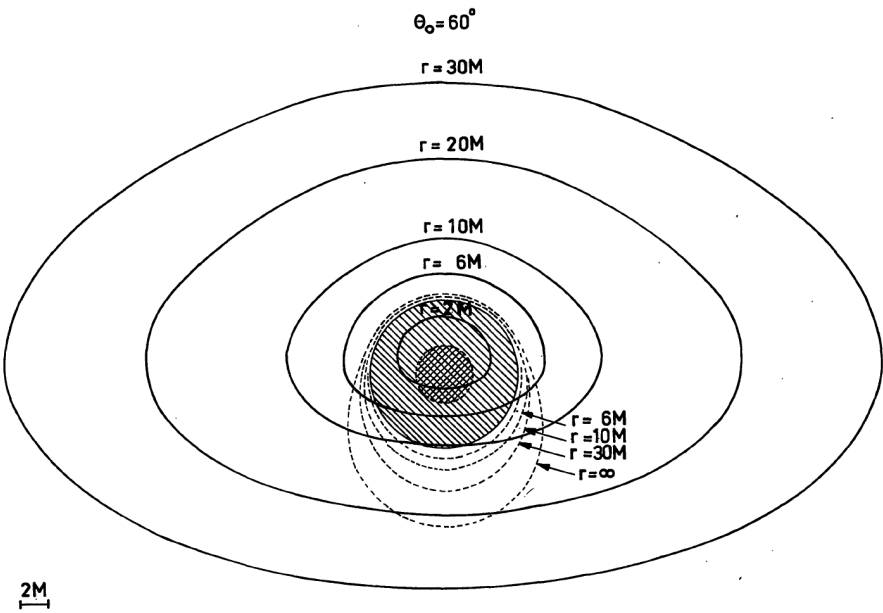


Trou noir statique
inclinaison 10°



Trou noir de Kerr
inclinaison 10°





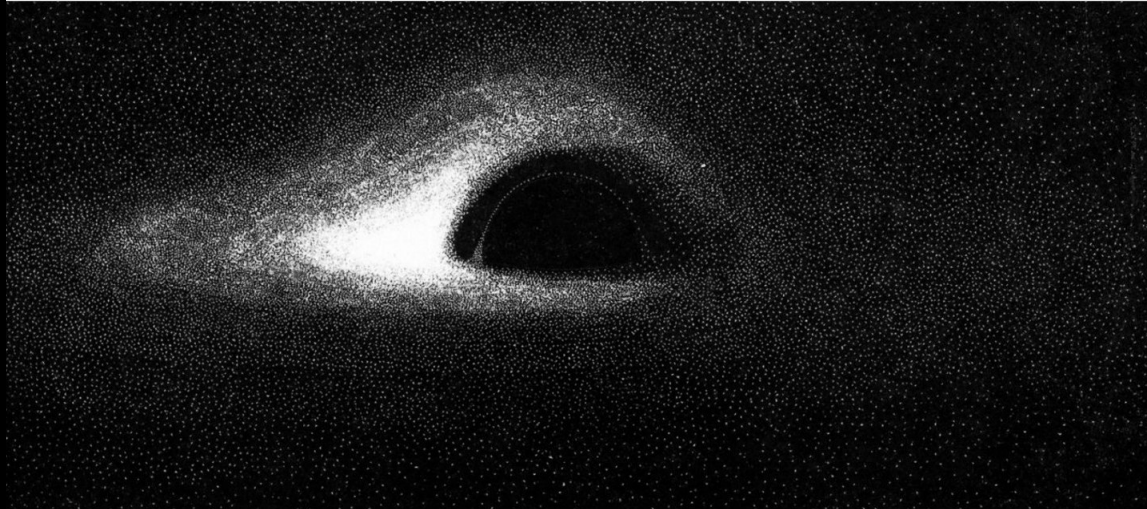


Image credit: Jean-Pierre Luminet

Remembering the first 'photo' of a
black hole

What Does a Black Hole Really Look Like?

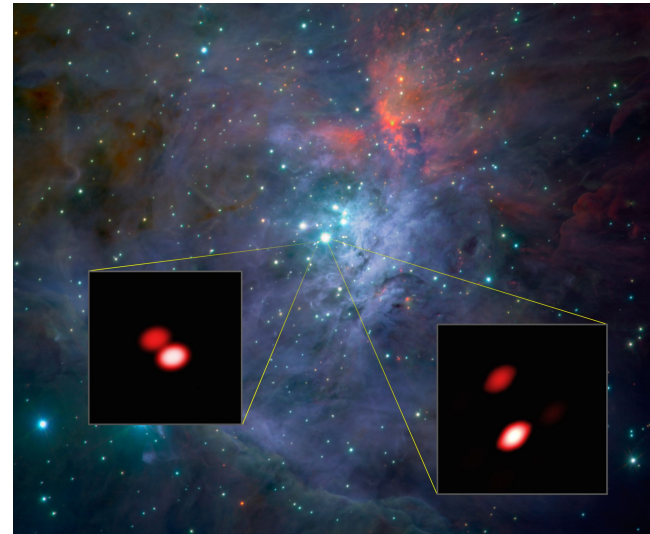
39-year-old drawing hints at what the Event Horizon Telescope may have just captured: the true shape of a black hole

Instrument GRAVITY (2016)



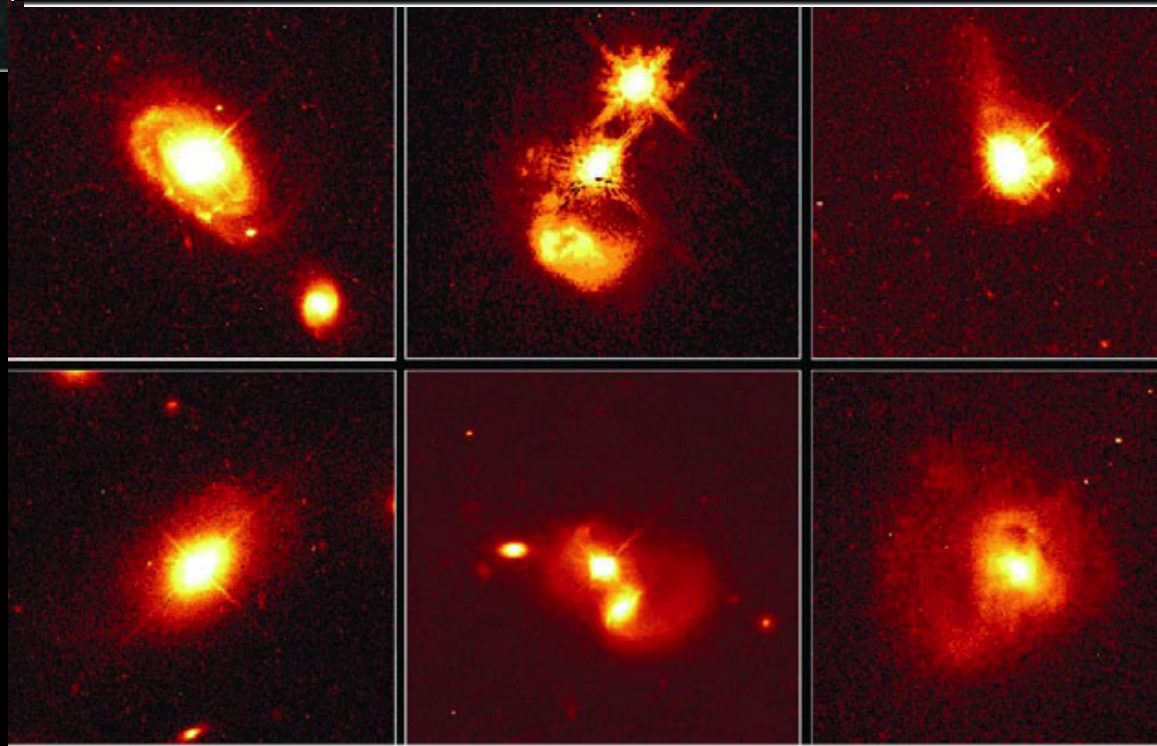
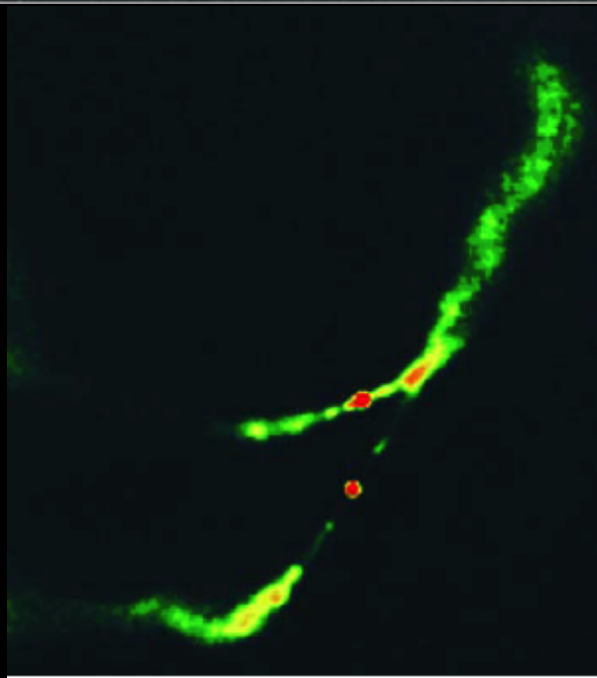
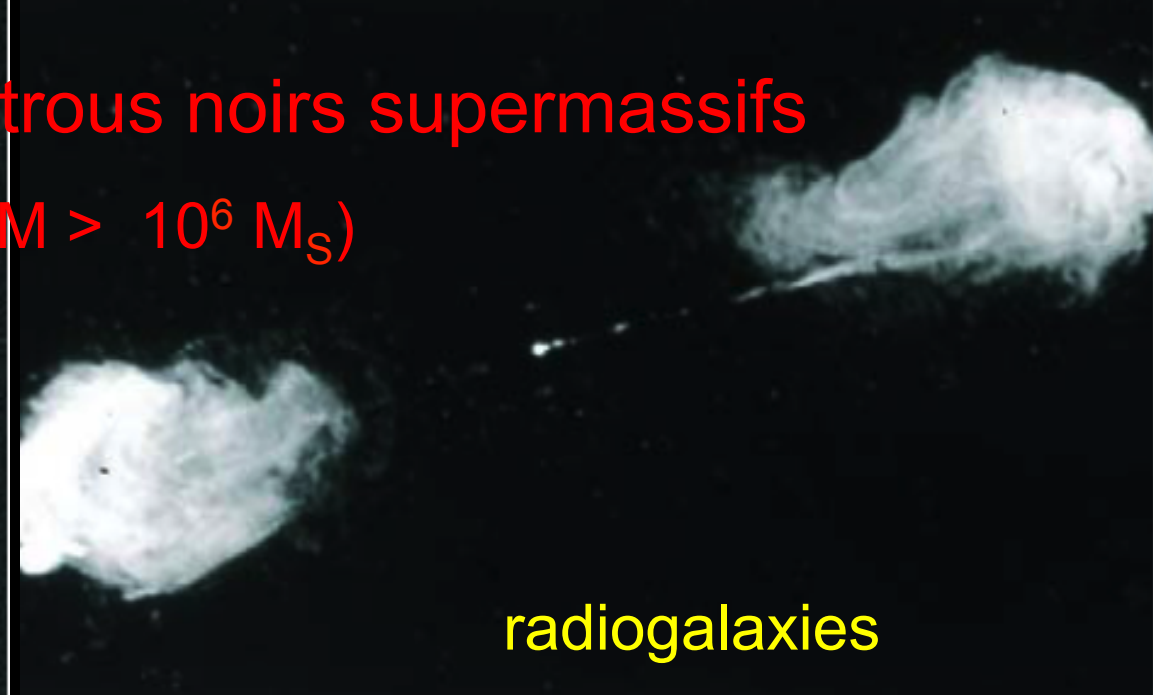
Interférométrie optique-IR
~ Ø 200 mètres !

Résolution :
4 milliarcsec



Détection des trous noirs supermassifs

($M > 10^6 M_{\odot}$)

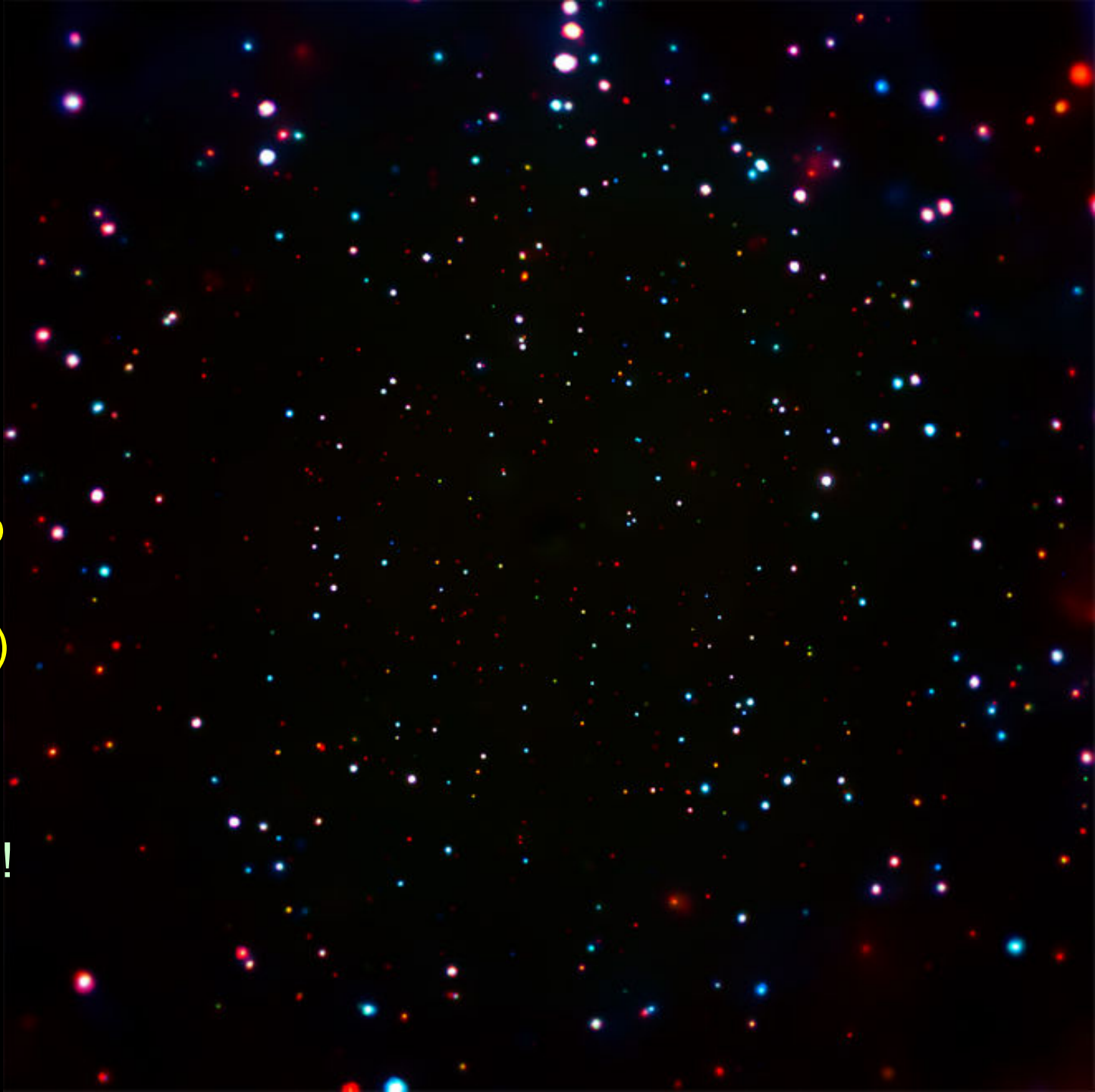


Télescope
Chandra
(rayons X)

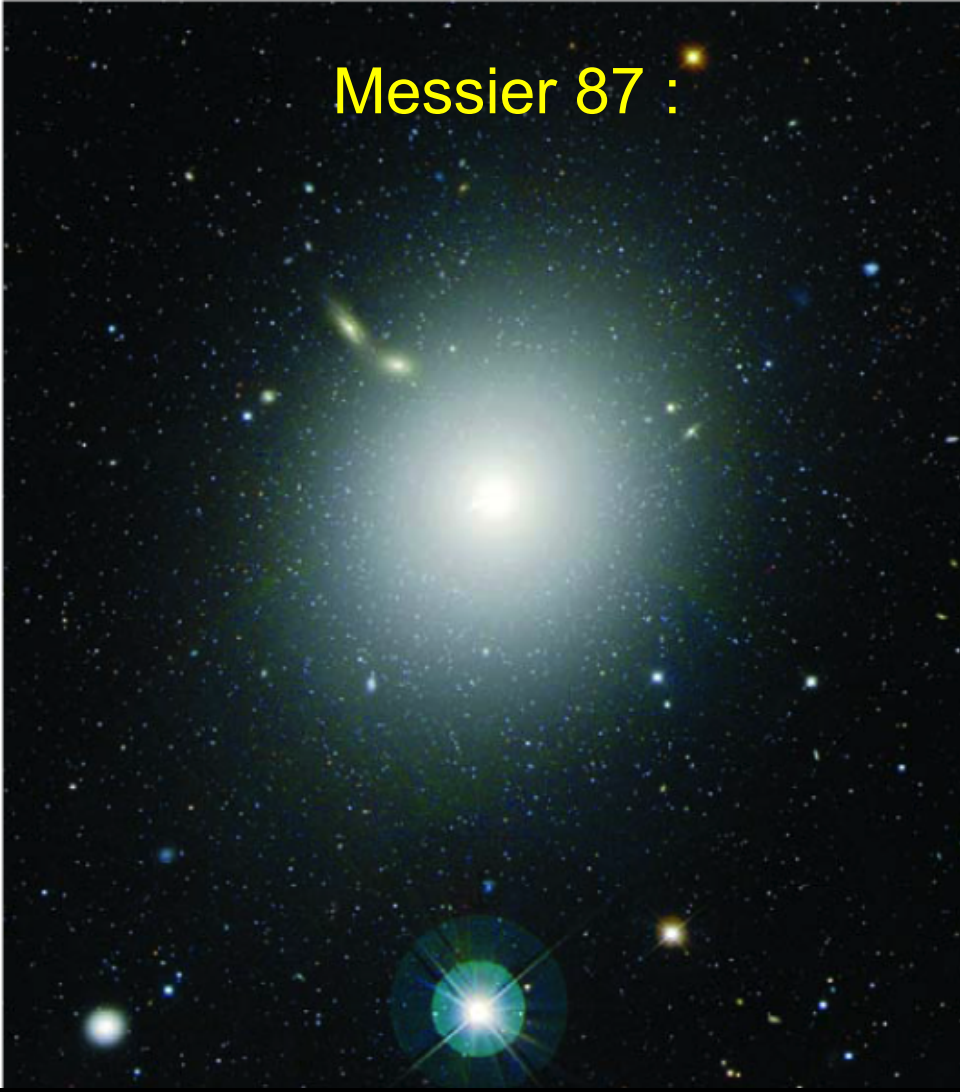
5000 TNSM
dans un champ
de 30'
(~ pleine Lune)



~ 10^9 TNSM !

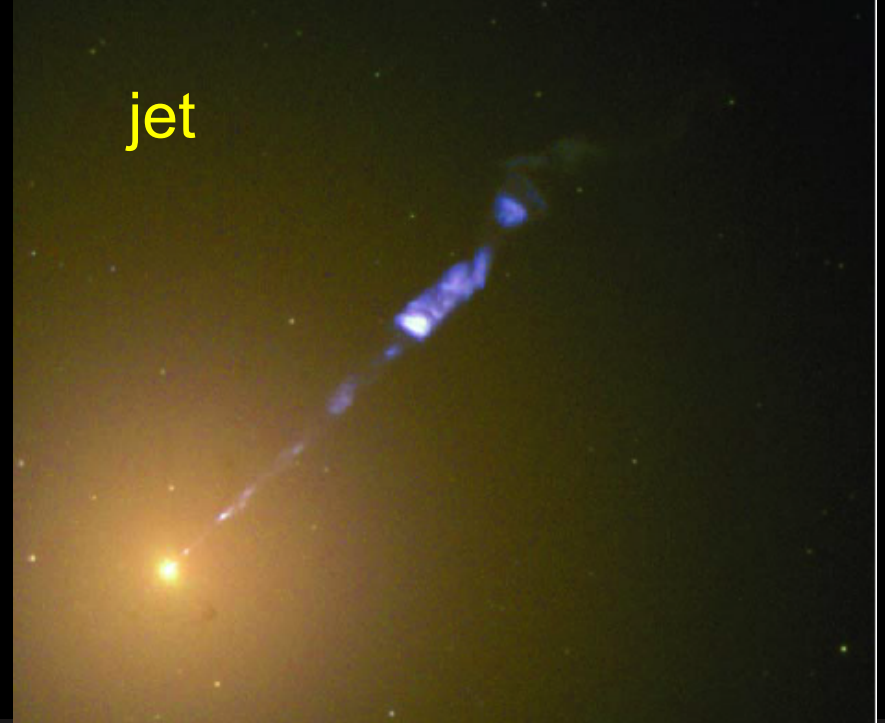


Messier 87 :

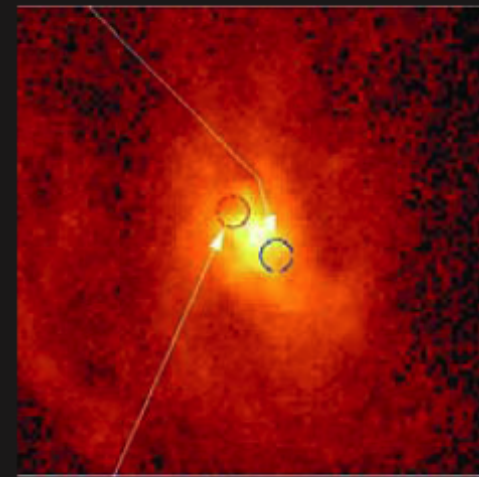
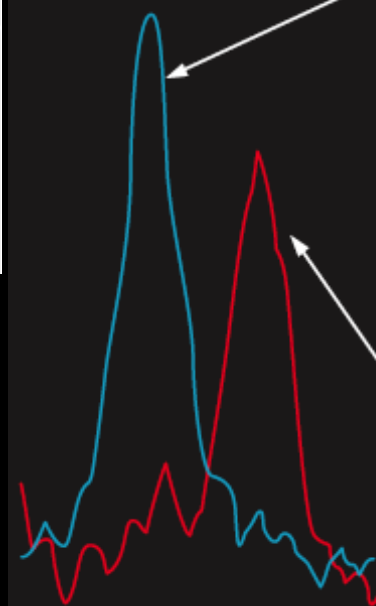


$M_{\text{tn}} \sim 6,2 \times 10^9 M_{\text{S}}$
à 50 millions a.l.

jet



rapprochement



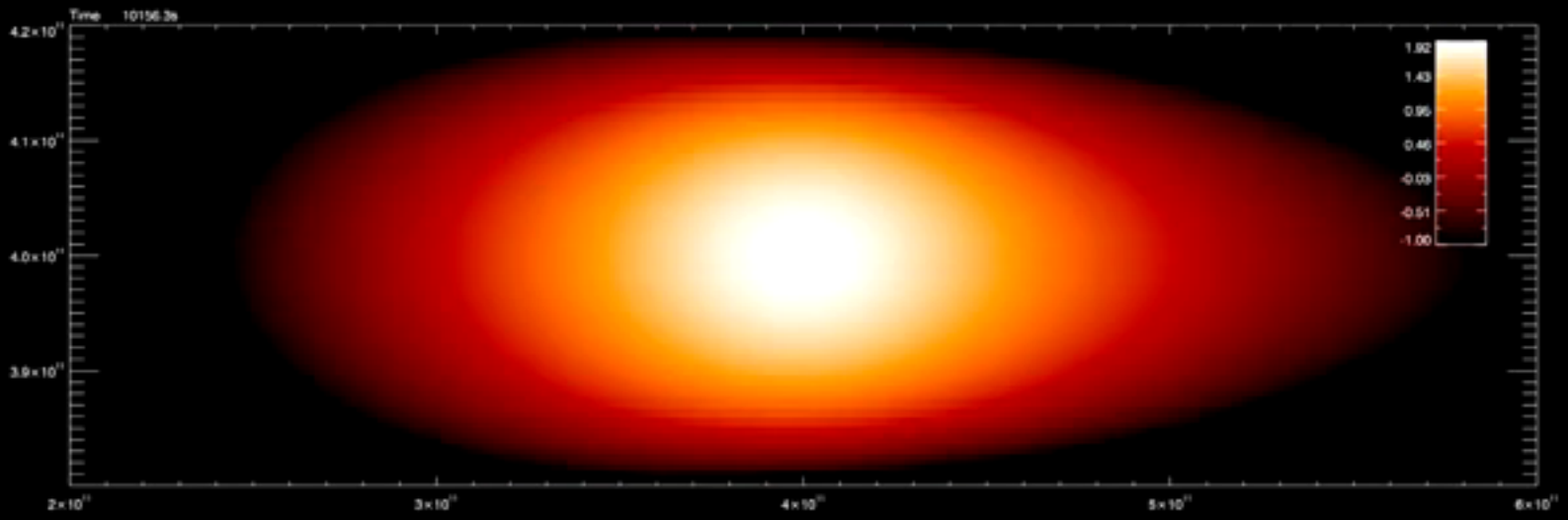
éloignement

disque

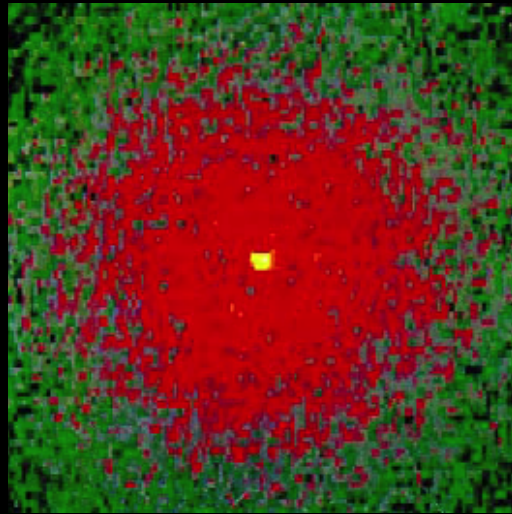
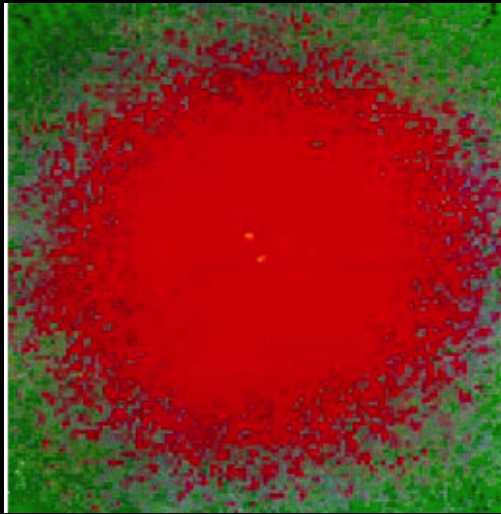
Crêpe stellaire flambée

(Carter & Luminet, 1982)



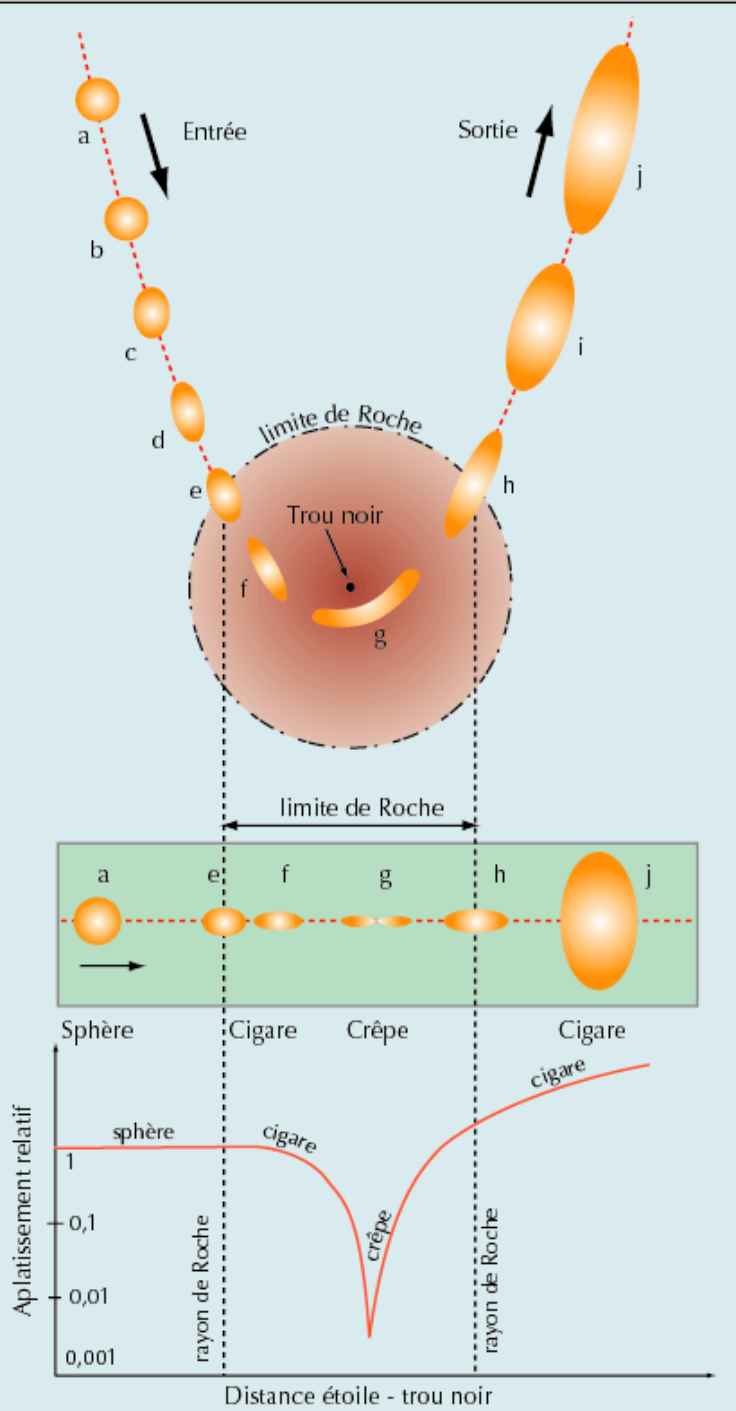


NGC 4252 (1995)

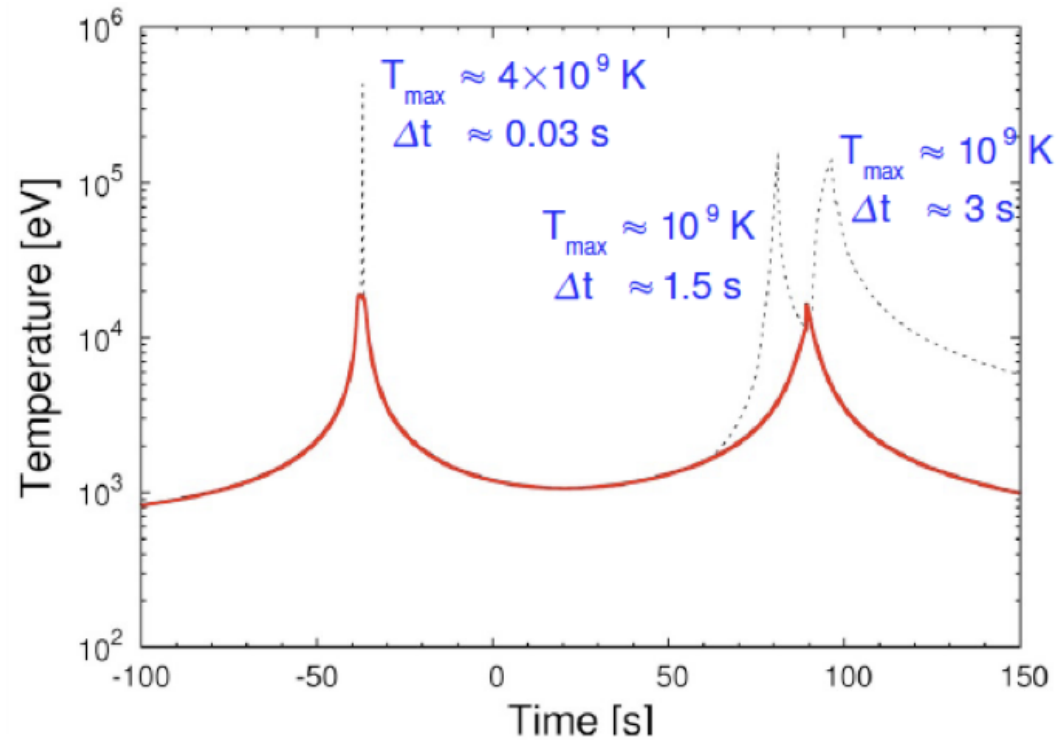


UV-transient
(ROTSE telescope 2009)





Supernovae maréales ?

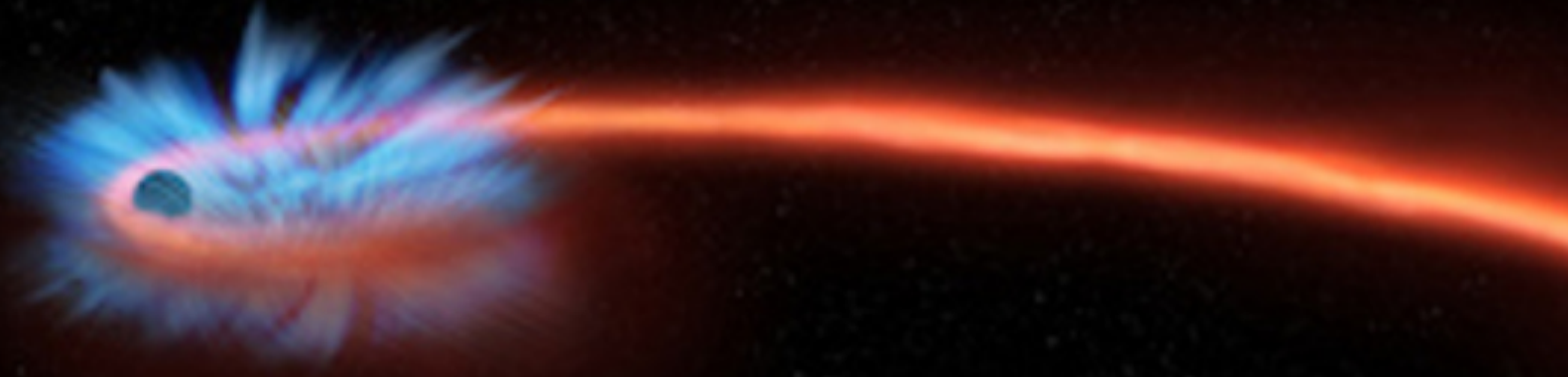


(Brassart & Luminet, 2010)



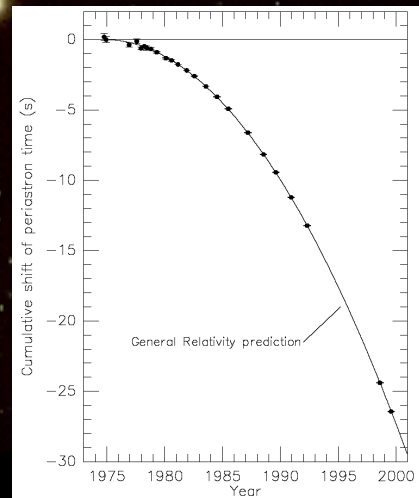
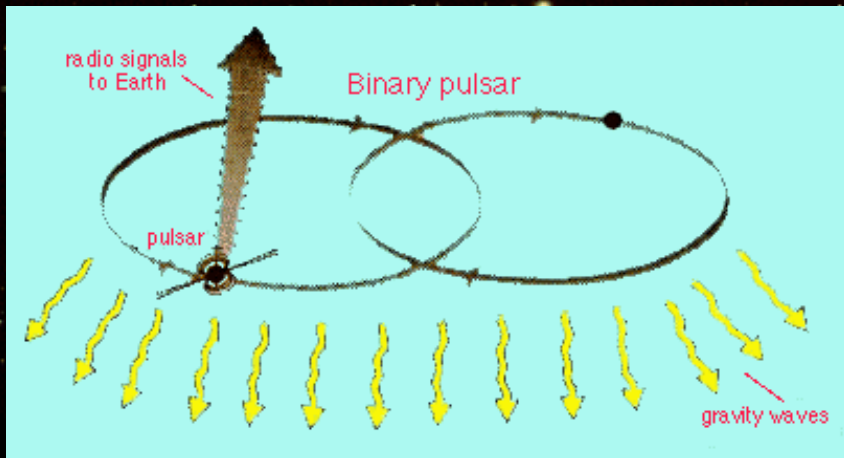
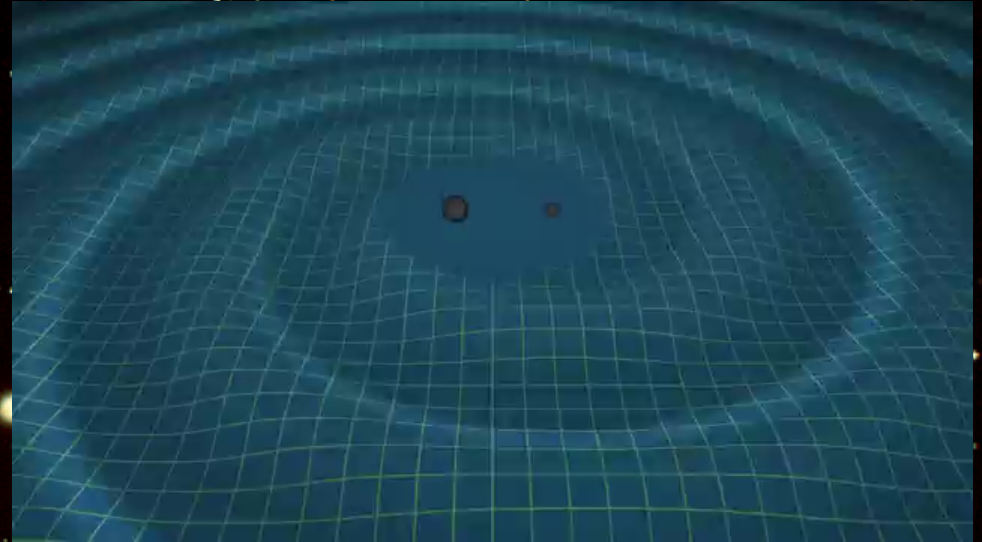
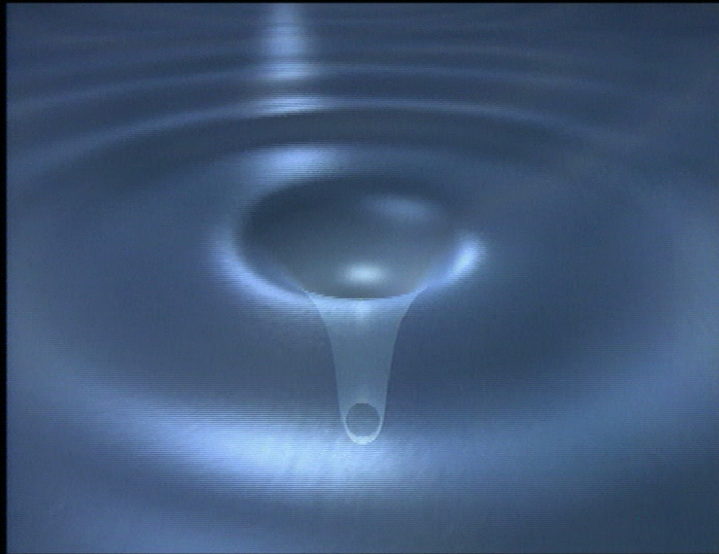
Sursauts UV/X/gamma

ASASSN-15lh (2015)
la plus brillante « supernova » jamais observée



→ *Destruction d'une naine blanche par un trou noir de masse intermédiaire...*

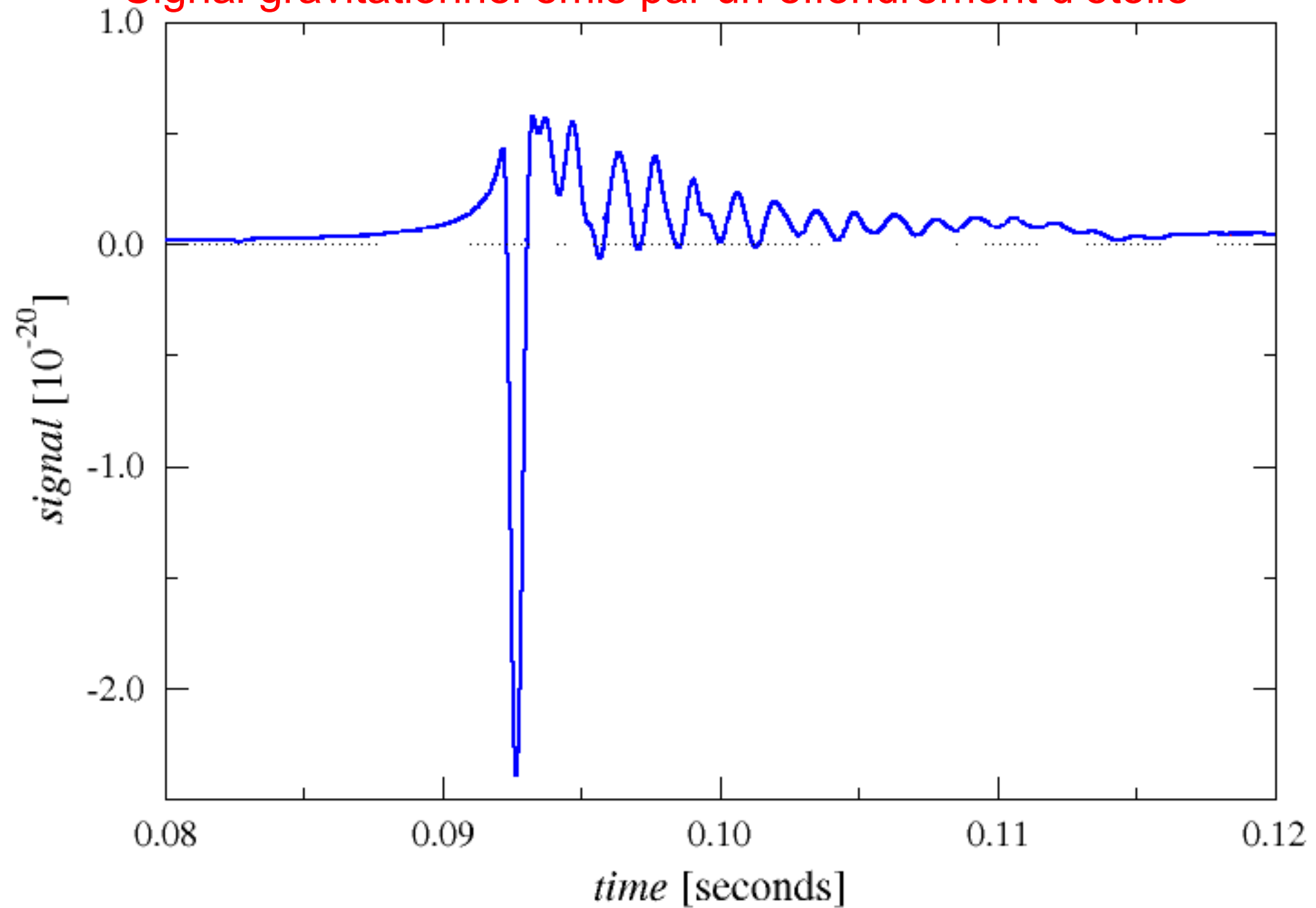
Ondes gravitationnelles



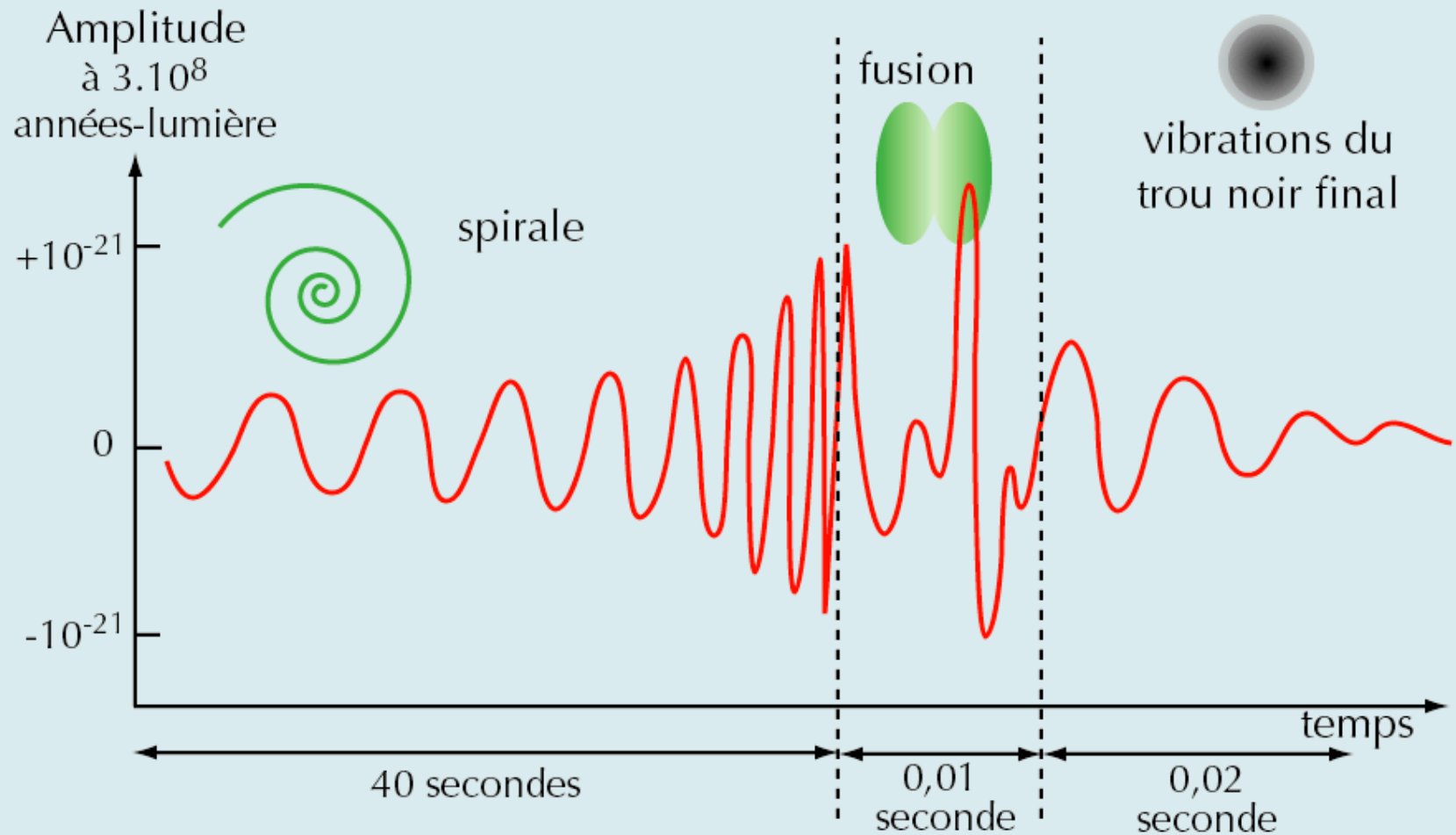
Hulse

Taylor

Signal gravitationnel émis par un effondrement d'étoile



Simulation numérique du signal gravitationnel émis par une coalescence



Nouvelles technologies

VIRGO
(France-Italie)

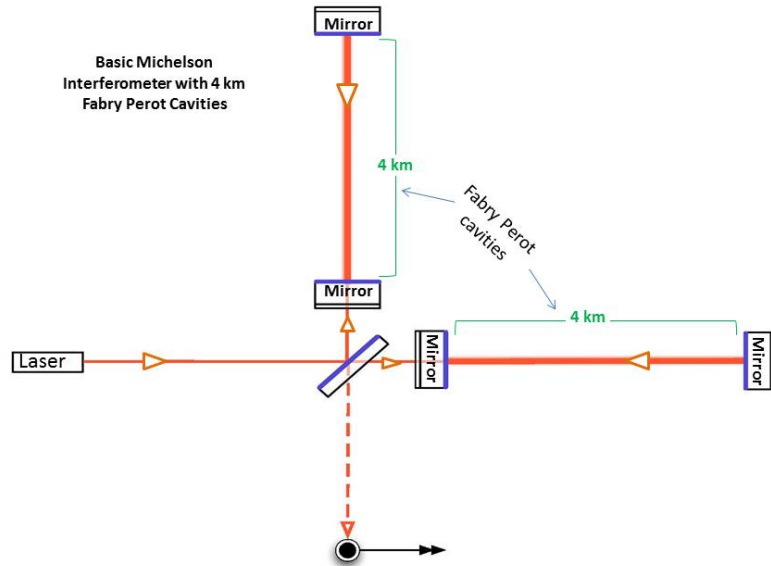
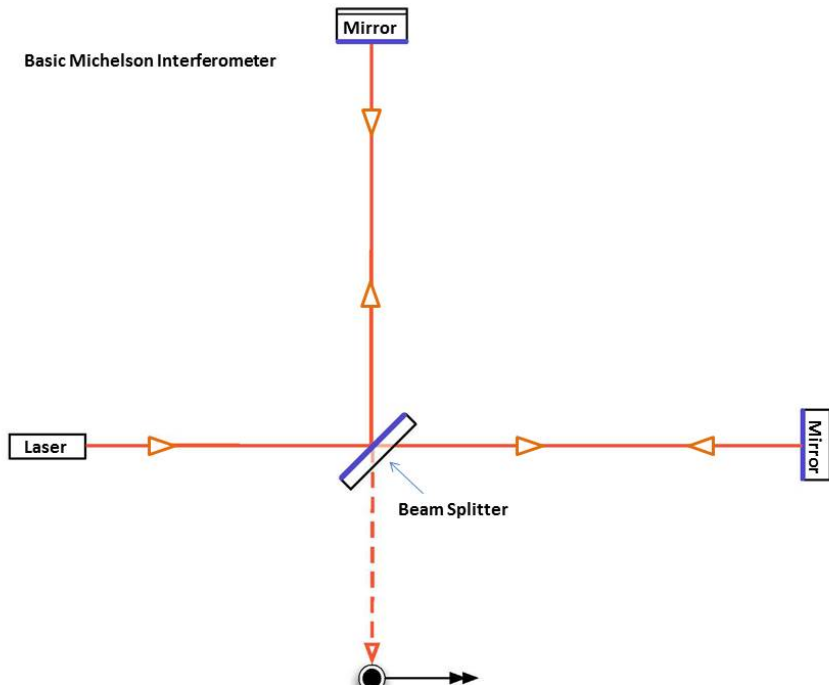
LIGO
(USA)



- faisceaux laser cohérents
- miroirs parfaits ($< 10^{-6}$)
- ultravide (10^{-12} atm)
- ultra froid (< 0.1 K)
- isolation sismique (10^{-14})



Interféromètre Michelson



Taille :
4 km x 280 = 1120 km !

Sensibilité :
 $\delta L/L \sim 10^{-21}$

Evénements GW150914/GW151226:

Premières détections **directes**
des ondes gravitationnelles

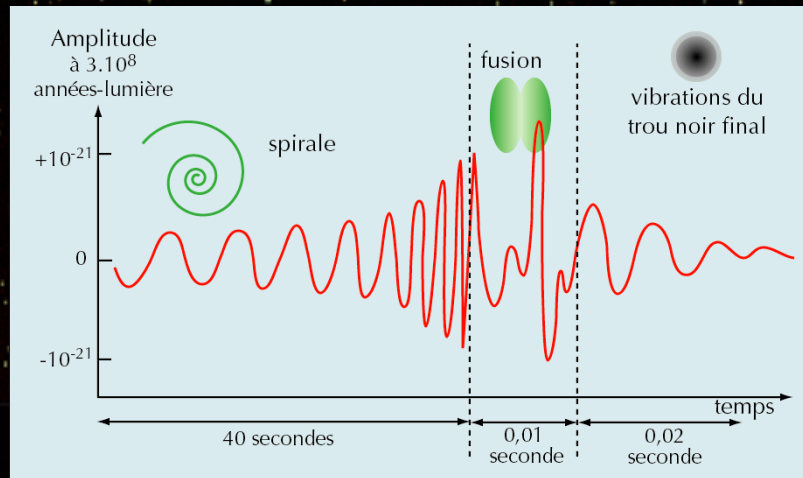


Hanford (Washington)

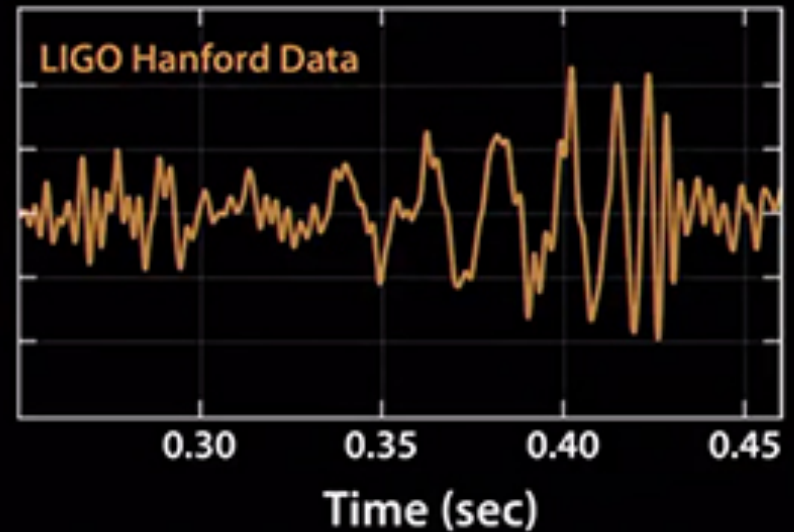
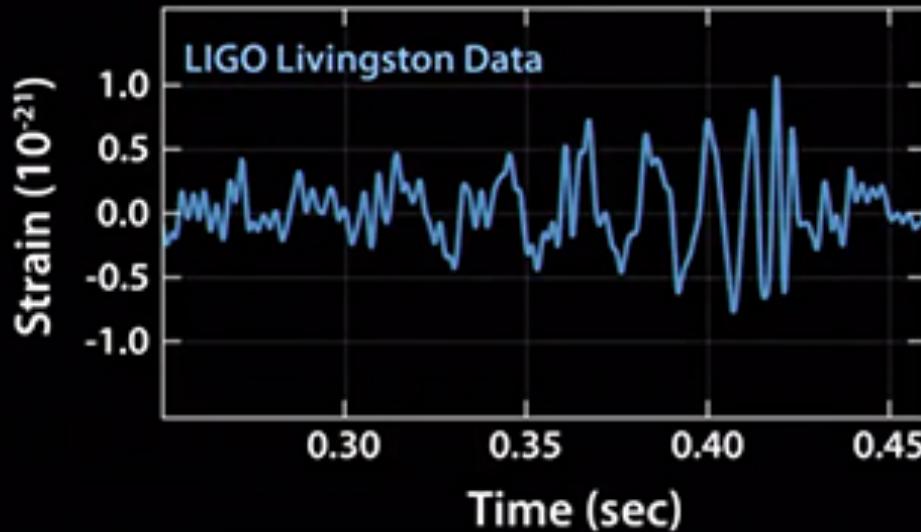
3000 km

Livingston (Louisiane)

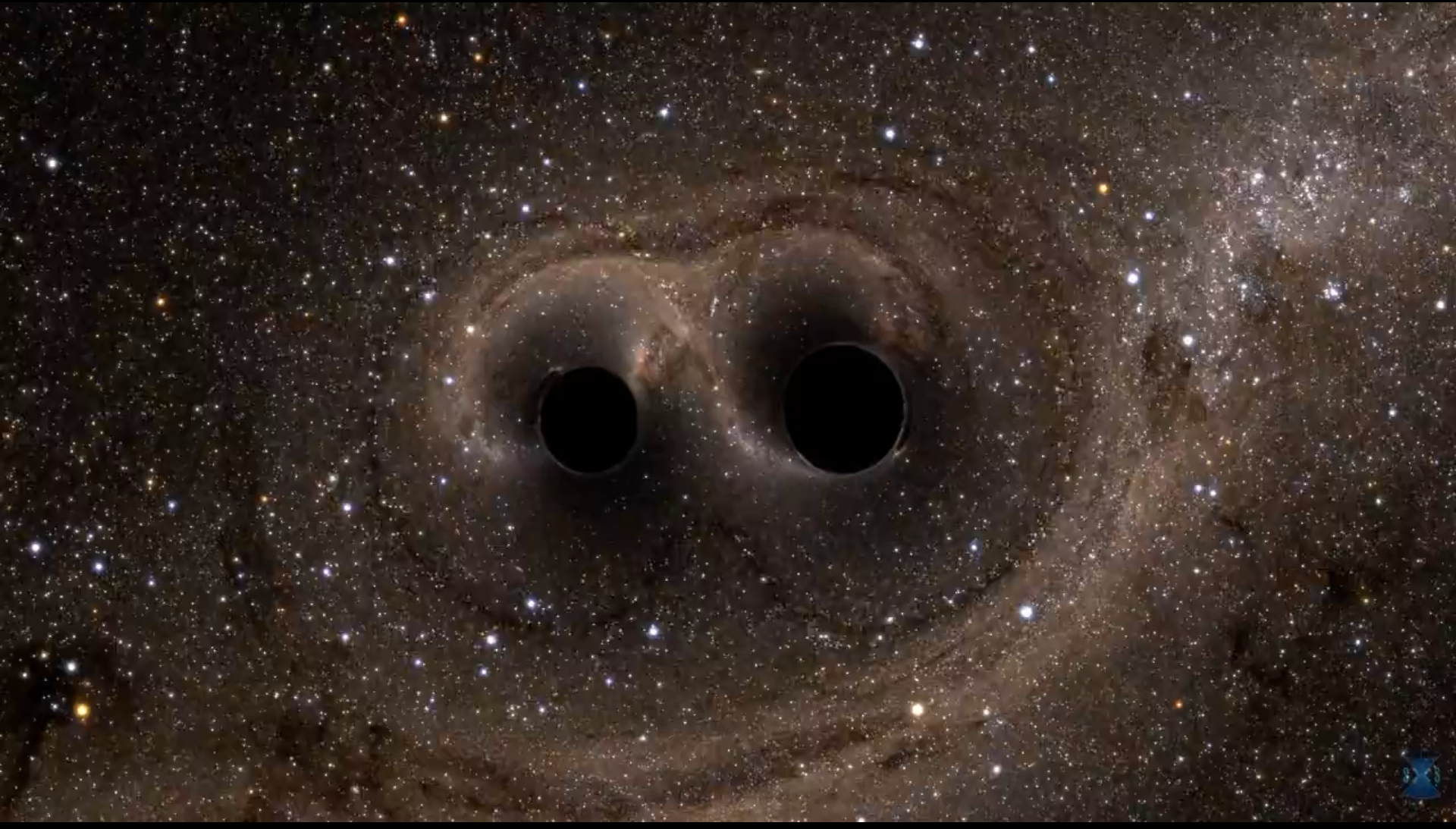
Simulation numérique du signal gravitationnel émis par une fusion de trous noirs



Signal gravitationnel mesuré par LIGO :



Simulation coalescence de trous noirs





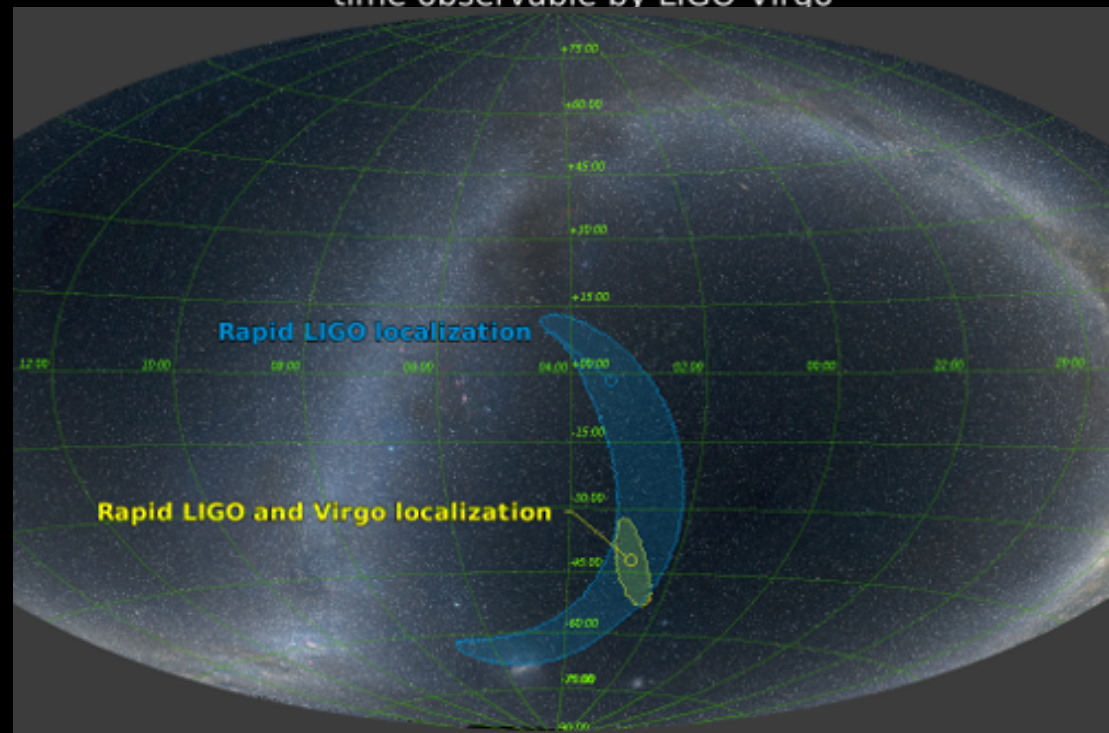
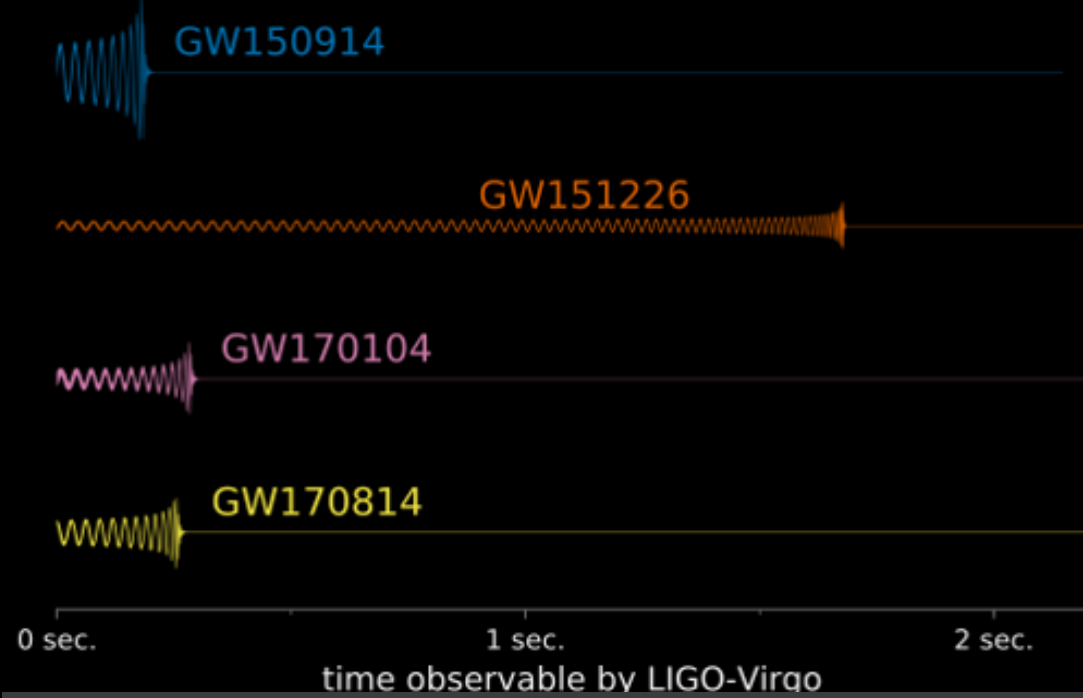
GW150914 : $M_1 = 36 M_S$, $M_2 = 29 M_S$, $M_f = 62 M_S$

d = 1,3 milliards a.l.

GW151226 : $M_1 = 14 M_S$, $M_2 = 8 M_S$, $M_f = 21 M_S$

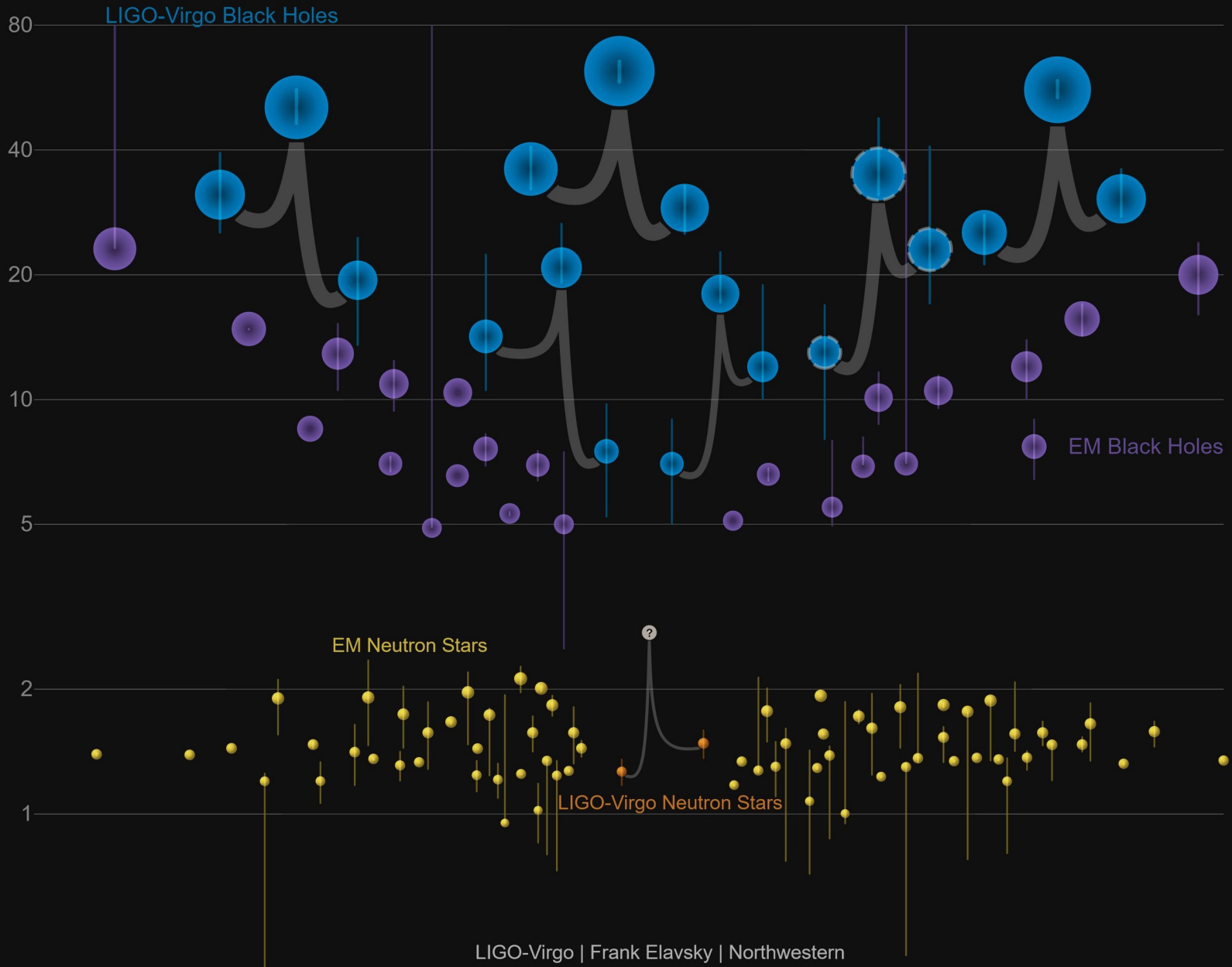
d = 1,4 milliards a.l.

Nouvelles détections 2017 : LIGO+VIRGO

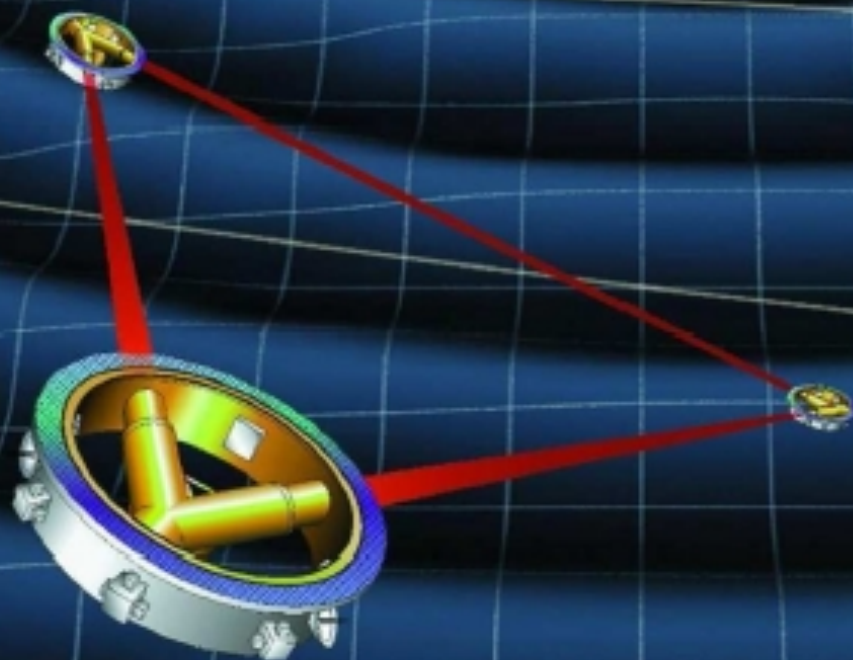


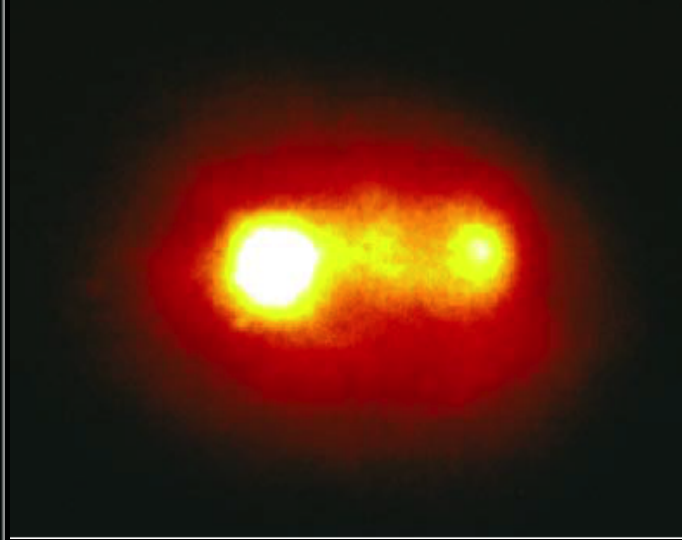
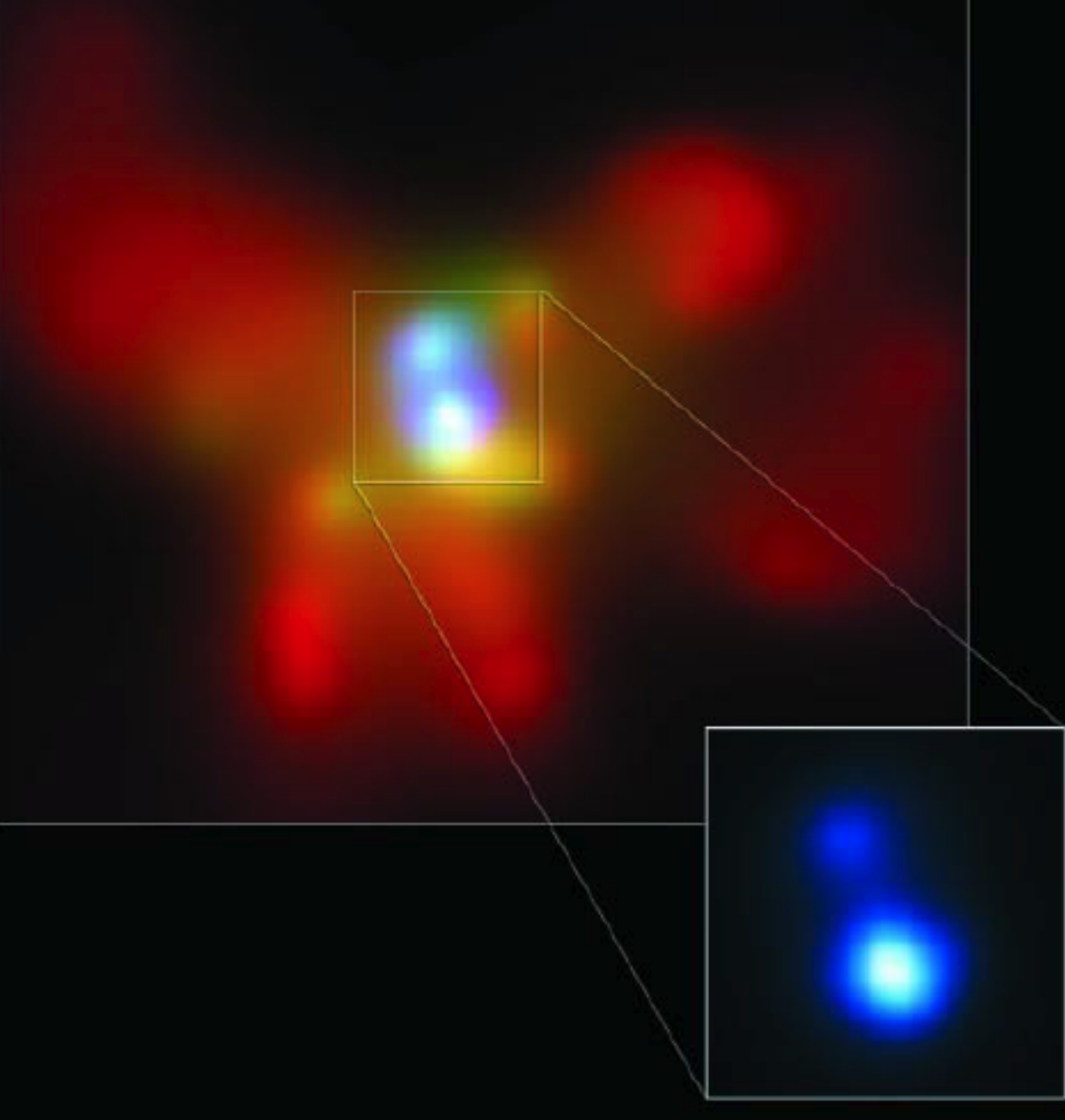
Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses

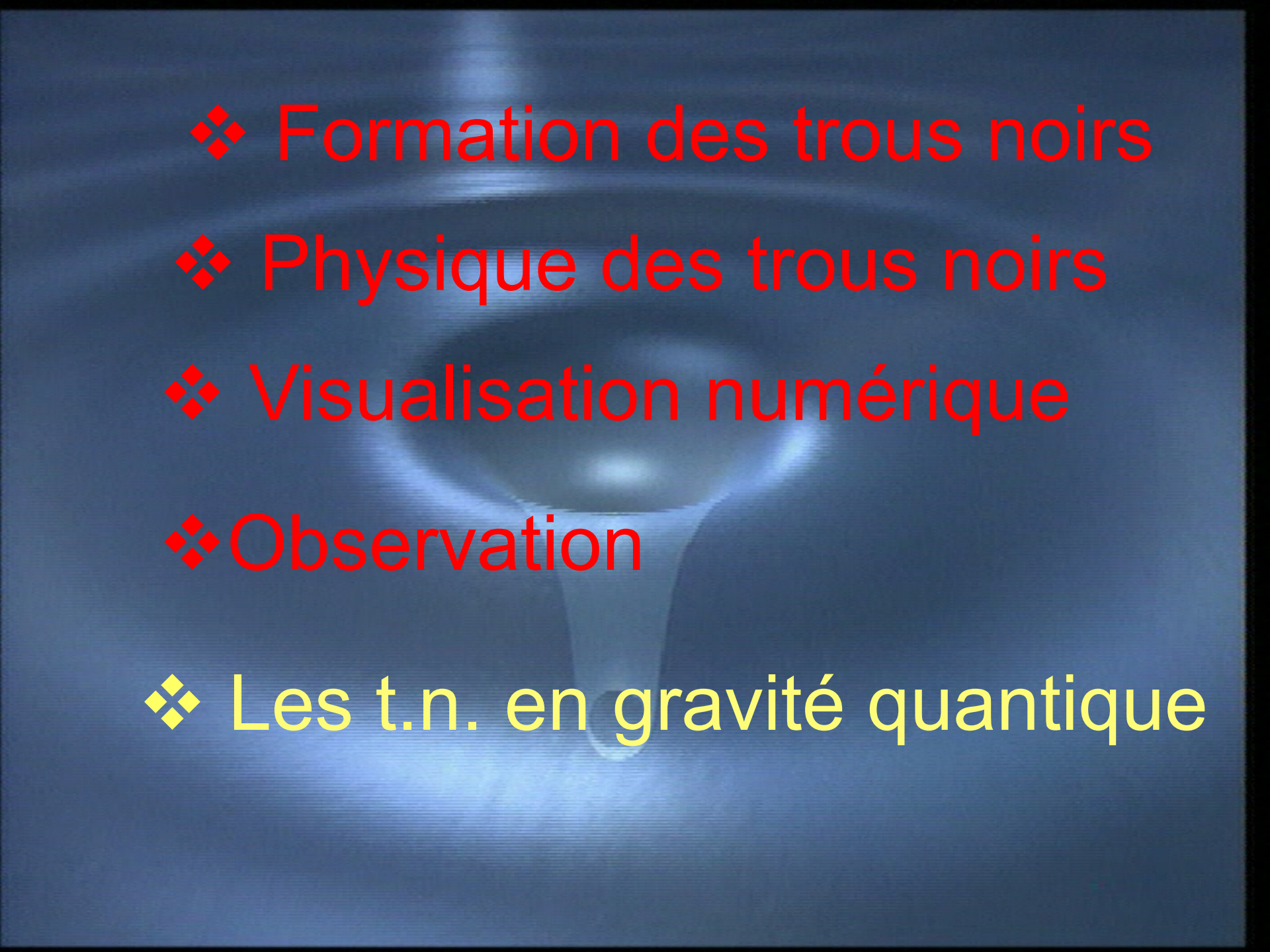


evolved Laser Interferometer Space Antenna (projet eLISA)

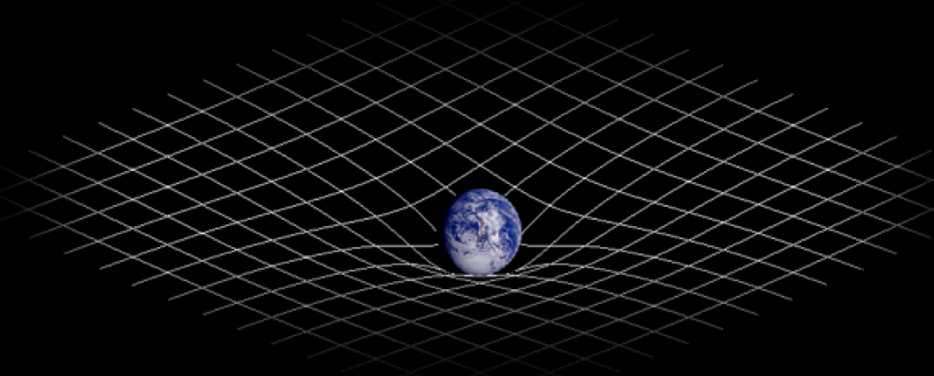




Coalescence de
trous noirs
supermassifs

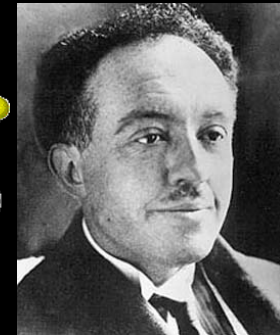
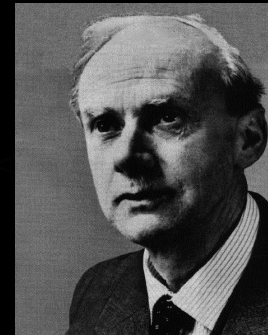
- 
- ❖ Formation des trous noirs
 - ❖ Physique des trous noirs
 - ❖ Visualisation numérique
 - ❖ Observation
 - ❖ Les t.n. en gravité quantique

Relativité Générale



$$G_{\mu\nu} = k T_{\mu\nu}$$

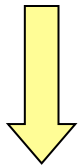
Mécanique quantique



$$i\hbar\partial/\partial t |\Psi\rangle = H |\Psi\rangle$$

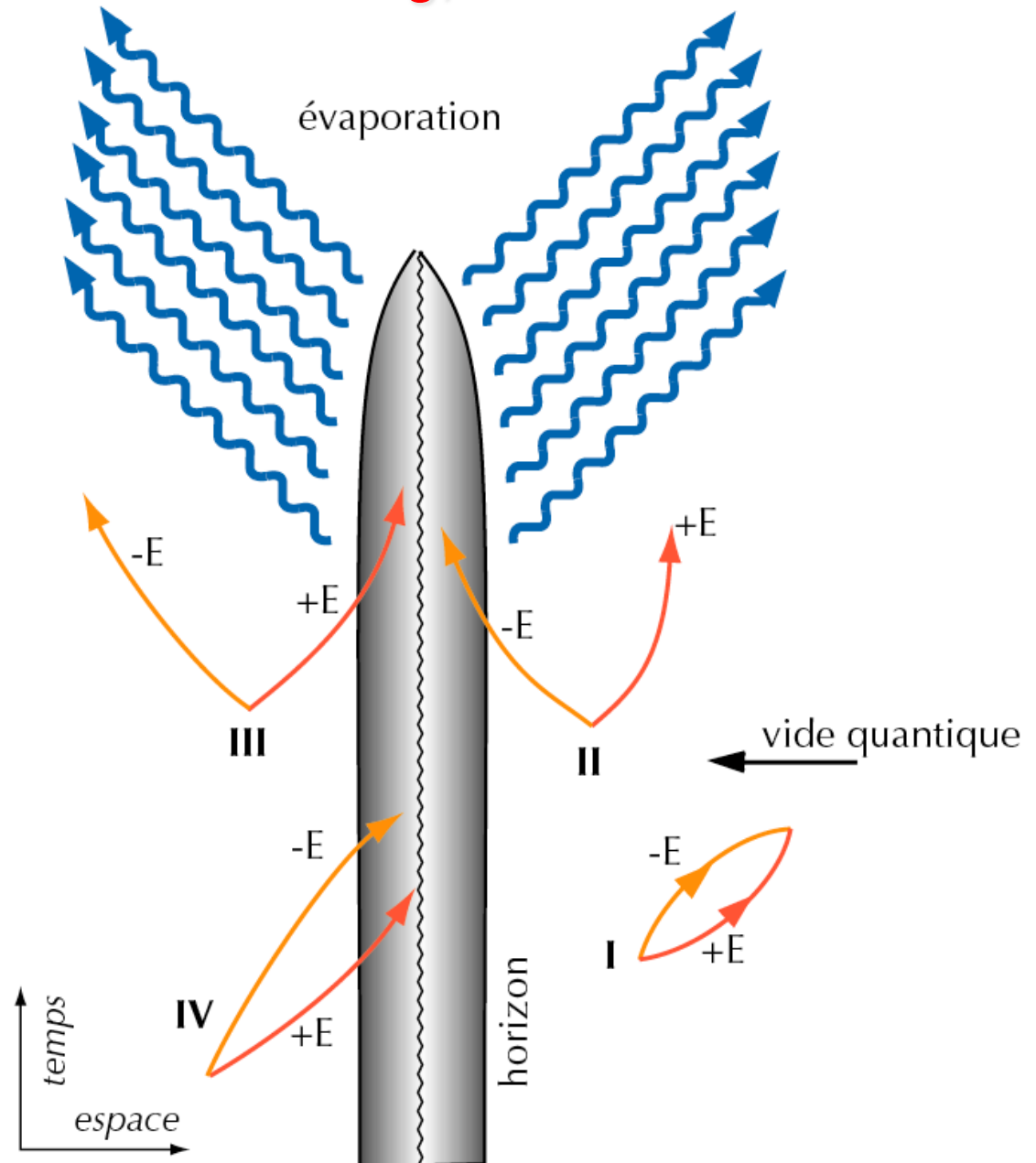
Evaporation quantique des mini- trous noirs

($M < 10^{15}$ g)



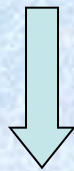
Paradoxe de
l'information
(unitarité)

Hawking, 1975



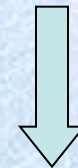
La gravitation quantique

Réduire la
géométrie aux
champs



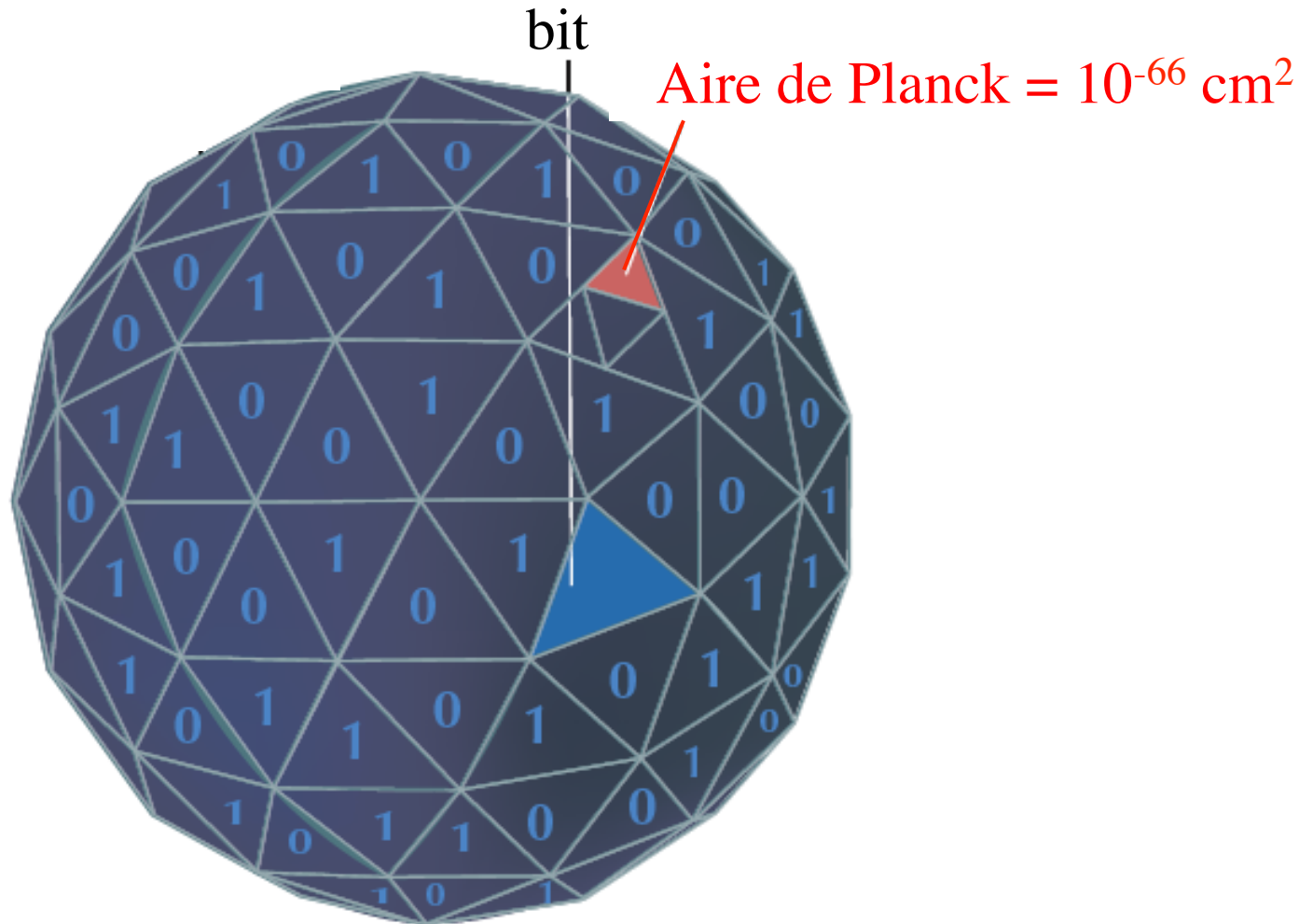
Supercordes
branes

Réduire les
champs à la
géométrie



Gravité
quantique à
boucles

L'entropie du trou noir

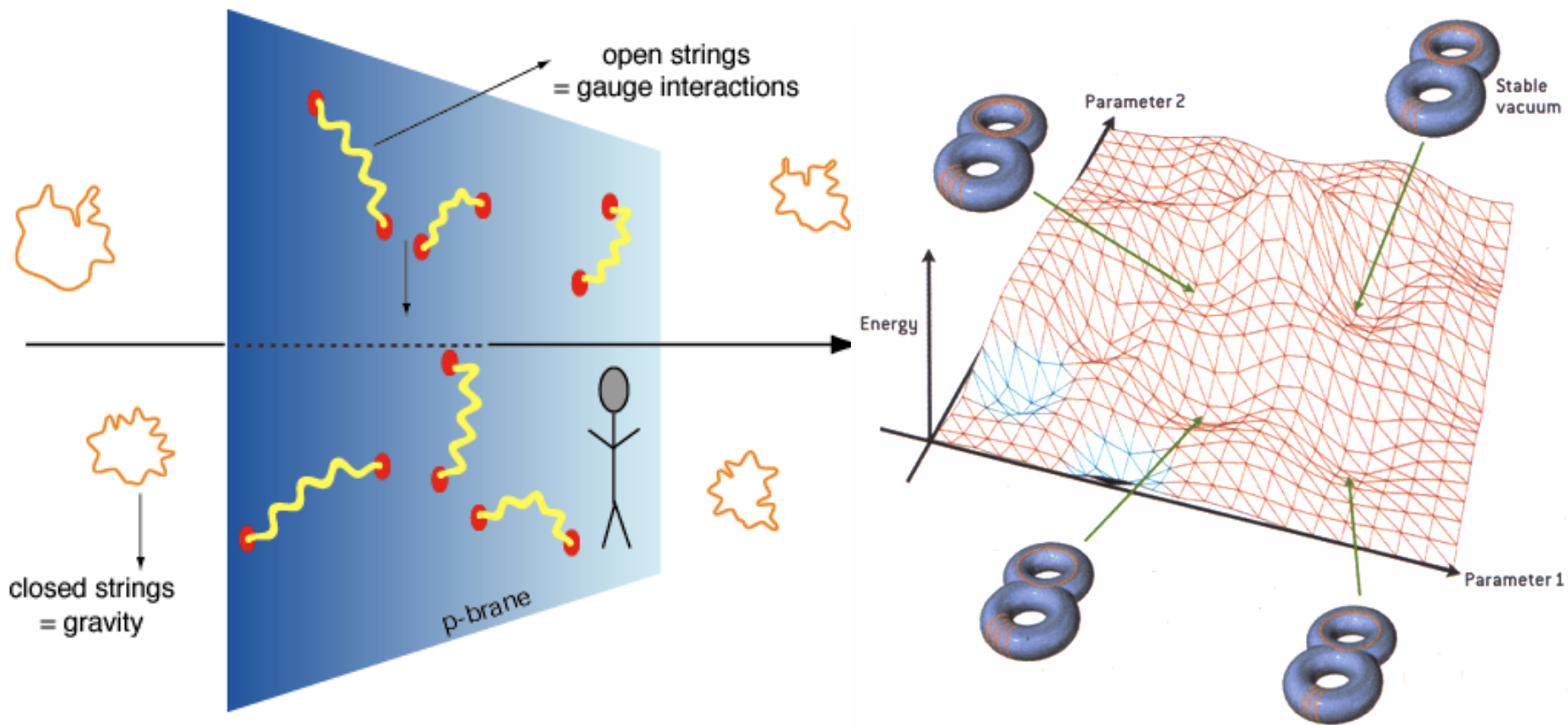


→ $S = A/4$

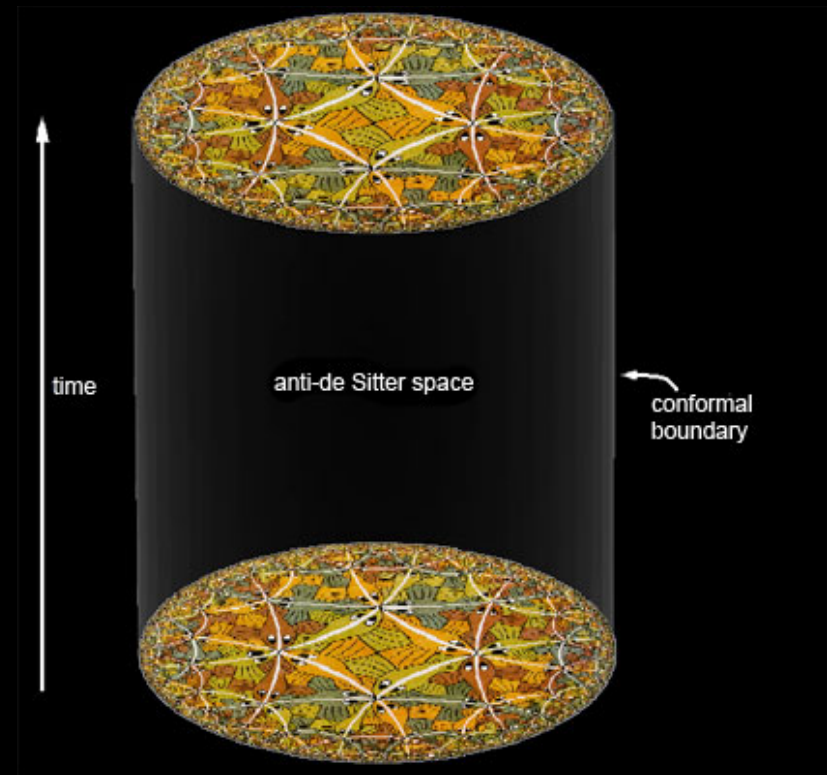
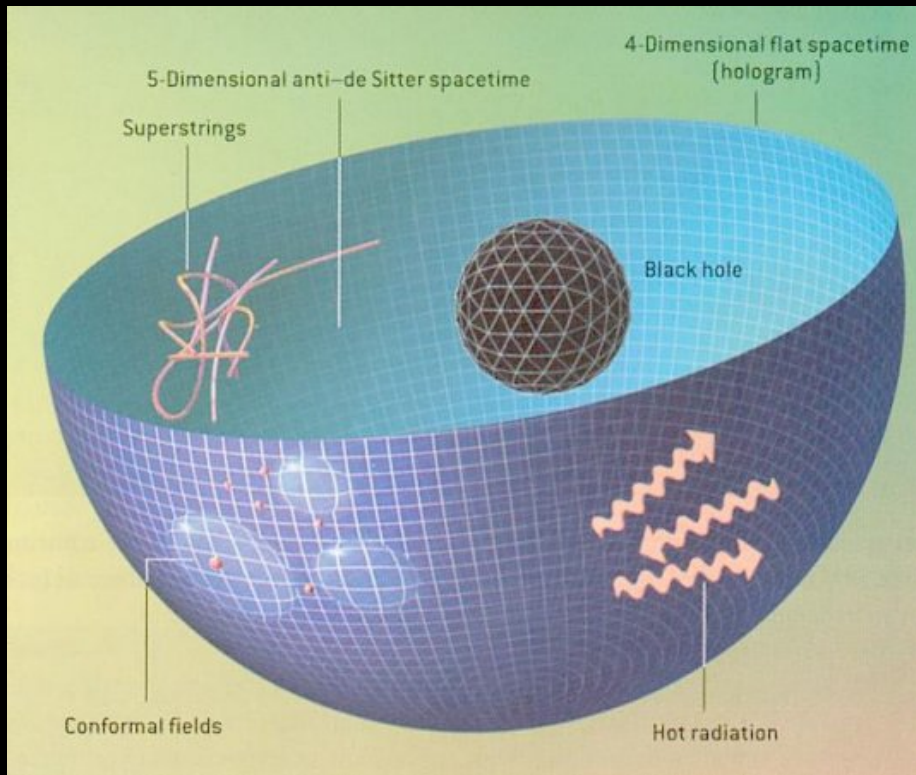
Théorie des cordes

Prix à payer 1 :
Dimensions supplémentaires

Prix à payer 2 :
 10^{500} solutions



Le trou noir est-il holographique ?

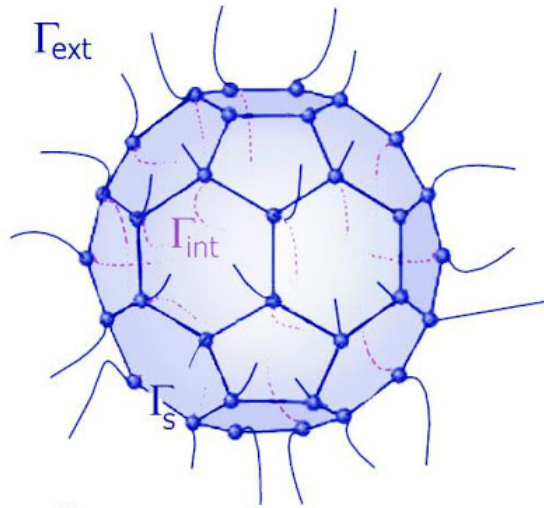


Maldacena (1997) : **AdS/CFT conjecture**

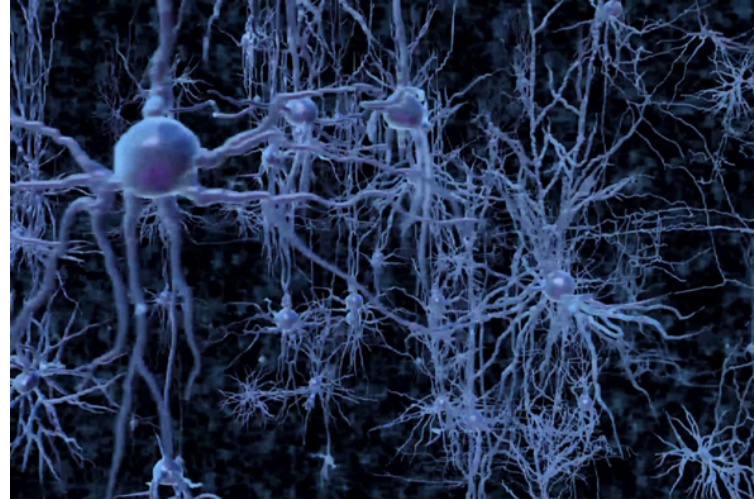
String theory on $AdS_5 \times S^5 \sim$ Gauge theory on the 4D border,

Gravité quantique à boucles

Atomes d'espace : vol $\sim 10^{-99}$ cm³



egrav.blogspot.com



Que deviennent les trous noirs ?

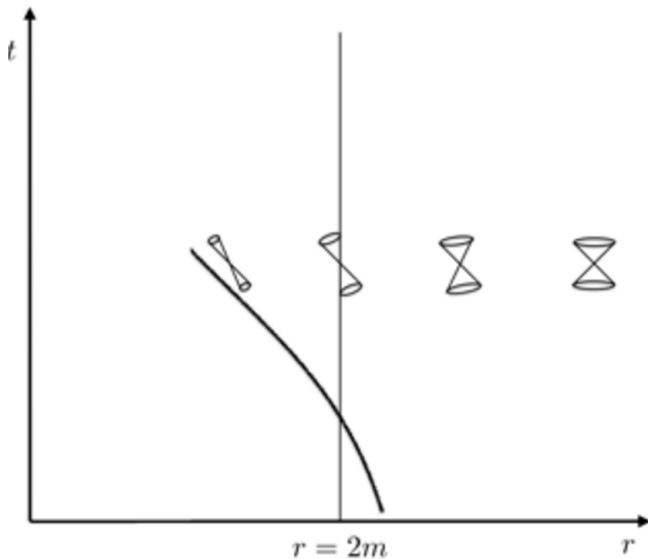


Rovelli & Vidotto, 2014

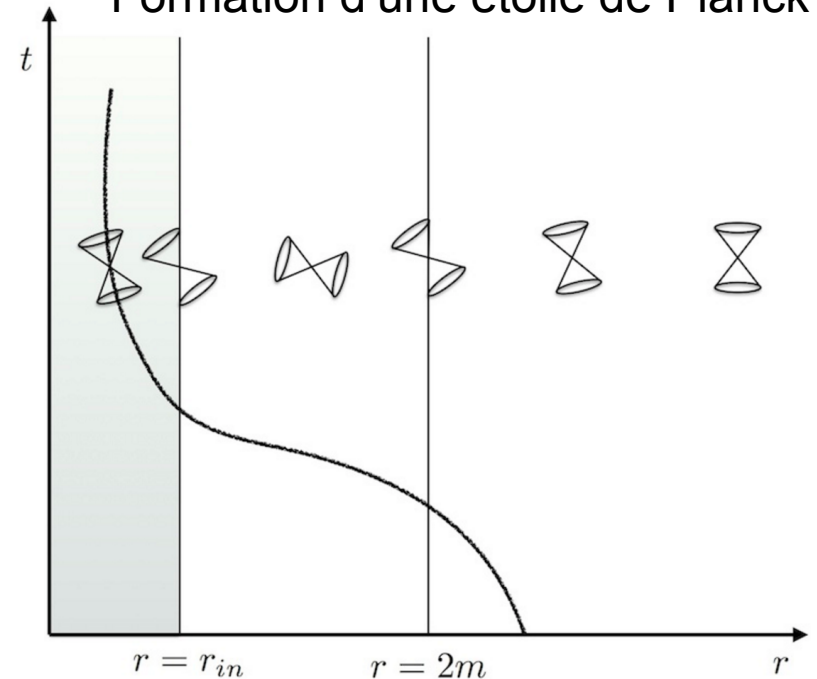
Trous noirs ou étoiles de Planck ?

- Quand la densité d'une étoile en effondrement sphérique atteint la **valeur de Planck** (10^{93} g/cm³), la gravité s'inverse et l'étoile rebondit.

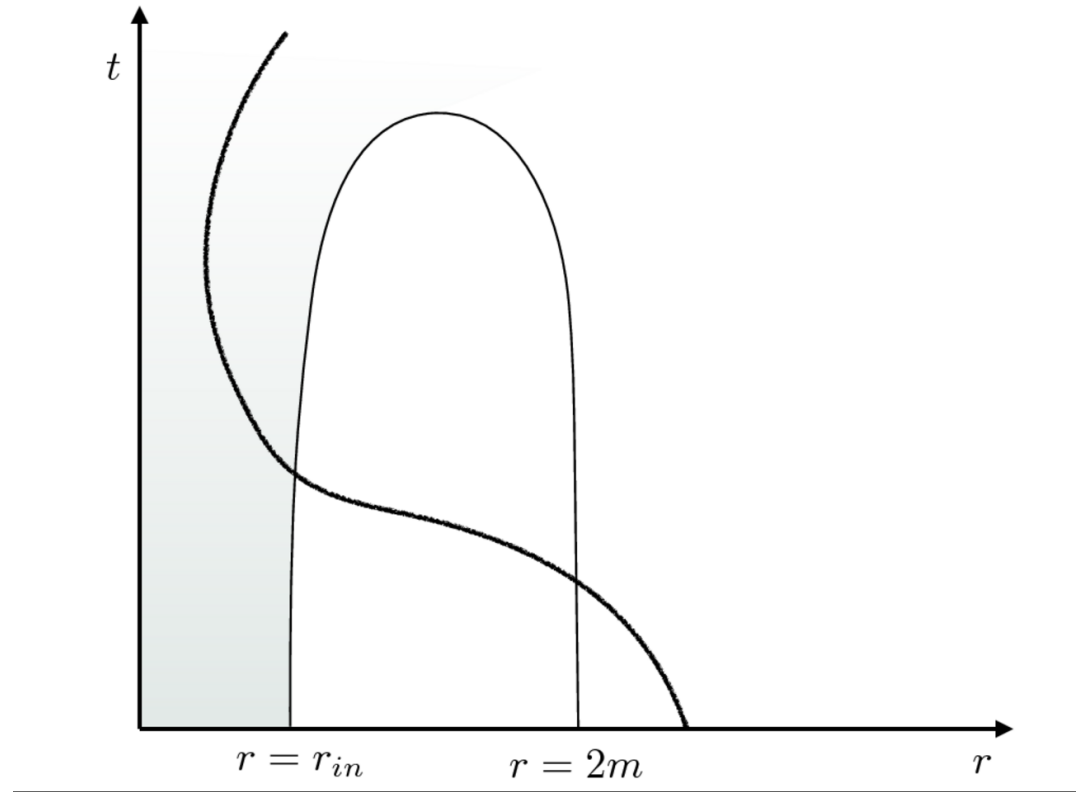
Effondrement sphérique classique



Effondrement sphérique quantique :
Formation d'une étoile de Planck



Rebond, disparition de l'horizon des événements et **fontaine blanche**



Un trou noir serait une étoile de Planck en rebond vue en temps ralenti ...

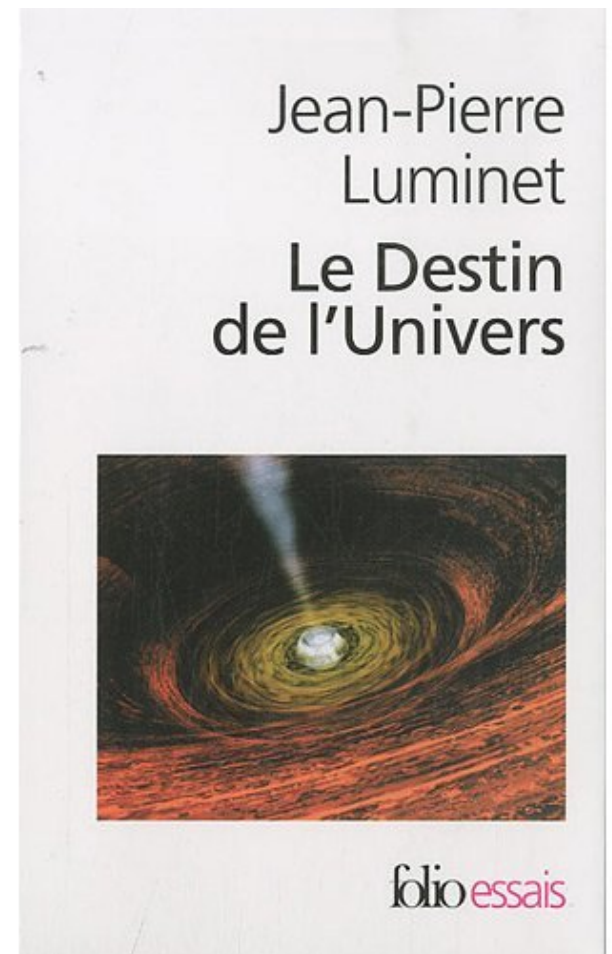
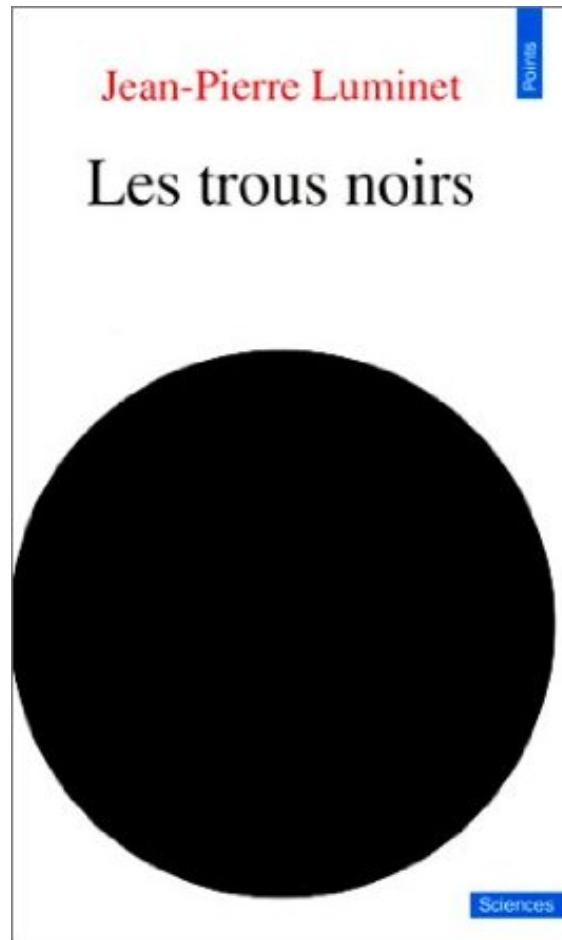
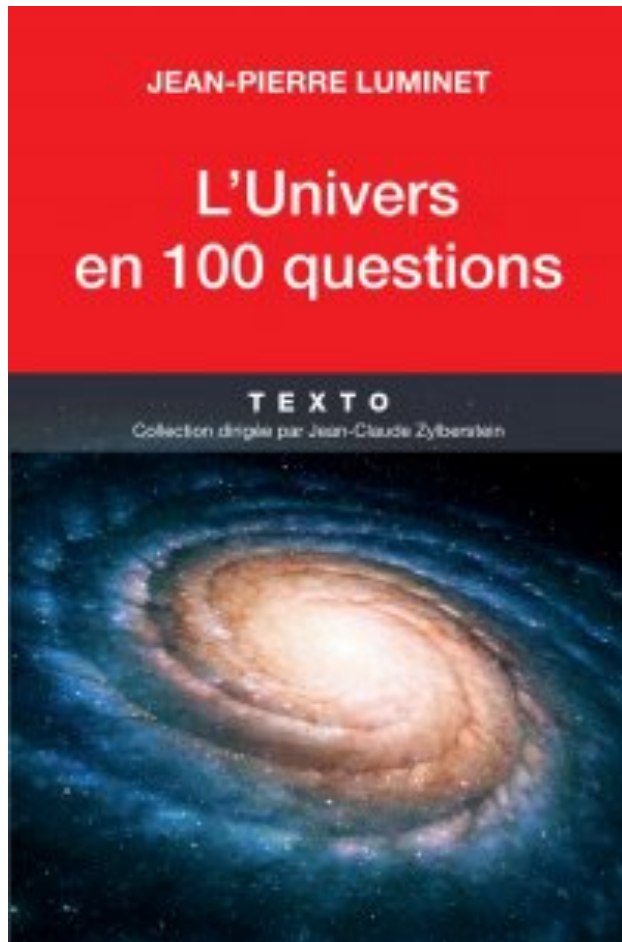
Avantages :

- Pas de « firewall »
- Pas de paradoxe de l'information

Inconvénients :

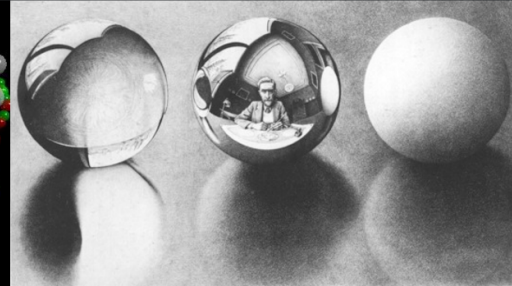
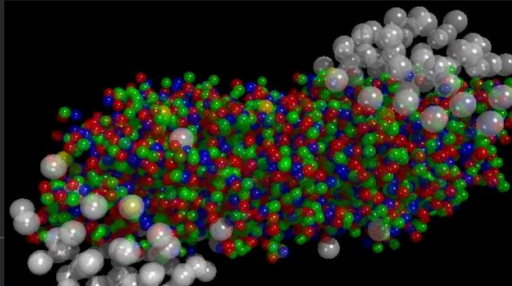
- Aucune solution connue pour l'effondrement non sphérique (Kerr)
- Signature observationnelle?

Pour en savoir plus sur les trous noirs : du plus simple au plus compliqué...





J'eus le vertige et je pleurai car mes yeux avaient vu cet objet secret et conjectural dont les hommes usurpent le nom, mais qu'aucun homme n'a regardé : l'inconcevable univers. Jorge Luis Borges, L'Aleph (1949)



- SCIENTES ▶
- ARTS ▶
- LITTÉRATURE ▶
- AUDIOVISUEL ▶

ASTRONOMIE, ESSAI, MES PUBLICATIONS, SCIENCES

L'UNIVERS HOLOGRAPHIQUE (5) : LA QUÊTE DES DUALITÉS

ASTRONOMIE, MES PUBLICATIONS, SCIENCES

L'UNIVERS HOLOGRAPHIQUE (4) : LA CONJECTURE DE MALDACENA

LITTÉRATURE, NOUVELLES

CONTES DE L'OUTRE-TEMPS (4) : L'ESPION

ARTICLES RÉCENTS

L'univers holographique (5) : La quête des dualités

L'univers holographique (4) : La conjecture de Maldacena

Contes de l'Outre-temps (4) : L'espion

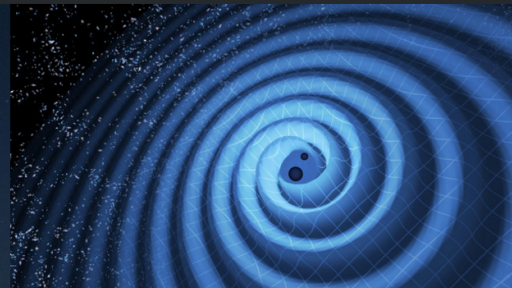
L'univers holographique (3) : De l'entropie à l'hypothèse holographique

Le Météore du 13 Août



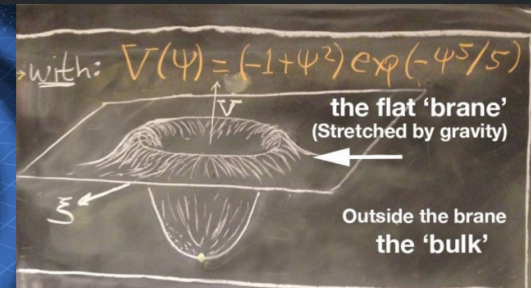
ACTUALITÉS, ASTRONOMIE, POÉSIE

LE MÉTÉORE DU 13 AOÛT



ACTUALITÉS, ASTRONOMIE, SCIENCES

ÉVÉNEMENTS ONDES GRAVITATIONNELLES : UN RÉSUMÉ EN IMAGES



CINÉMA, MES PUBLICATIONS, SCIENCES

LA PHYSIQUE ÉTRANGE D'INTERSTELLAR (6/6) : L'ÉQUATION ULTIME