

TROUS NOIRS (BINAIRES)

Pelons l'oignon couche à couche jusqu'à l'horizon des événements

Pau Amaro Seoane

25 Janvier 2016

Institut Albert Einstein

GALAXIES PRIMITIVES ET TROUS NOIRS MONSTRUEUX



[ESO/M. Kornmesser]

- Quasar “quasi-stellar radio sources”, $z \in [0.06, 6.5]$



[ESO/M. Kornmesser]

- Quasar “quasi-stellar radio sources”, $z \in [0.06, 6.5]$
- Les objets les plus puissants et énergétiques **de tout l'univers connu**



[ESO/M. Kornmesser]

- Quasar “quasi-stellar radio sources”, $z \in [0.06, 6.5]$
- Les objets les plus puissants et énergétiques de tout l'univers connu
- Ils habitent les centres des galaxies actives



[ESO/M. Kornmesser]

- Quasar “quasi-stellar radio sources”, $z \in [0.06, 6.5]$
- Les objets les plus puissants et énergétiques de tout l'univers connu
- Ils habitent les centres des galaxies actives
- Ils peuvent émettre des milliers de fois toute la luminosité de la Voie Lactée



[ESO/M. Kornmesser]

- Quasar “quasi-stellar radio sources”, $z \in [0.06, 6.5]$
- Les objets les plus puissants et énergétiques de tout l'univers connu
- Ils habitent les centres des galaxies actives
- Ils peuvent émettre des milliers de fois toute la luminosité de la Voie Lactée
- Comment??



[NASA/JPL-Caltech]

▷ Accrétion de matière **par un trou noir supermassif** (probablement)



[NASA/JPL-Caltech]

- ▷ Accrétion de matière par un trou noir supermassif (probablement)
- ▷ On a besoin d'une masse entre un million et mille millions de masses solaires



[NASA/JPL-Caltech]

- ▷ Accrétion de matière par un trou noir supermassif (probablement)
- ▷ On a besoin d'une masse entre un million et mille millions de masses solaires
- ▷ Pour créer la luminosité typique d'un quasar, le TNSM avale 10 étoiles par année



[NASA/JPL-Caltech]

- ▷ Accrétion de matière par un trou noir supermassif (probablement)
- ▷ On a besoin d'une masse entre un million et mille millions de masses solaires
- ▷ Pour créer la luminosité typique d'un quasar, le TNSM avale 10 étoiles par année
- ▷ Le plus grand connu mange 600 Terre par minute



[NASA/JPL-Caltech]

- ▷ Accrétion de matière par un trou noir supermassif (probablement)
- ▷ On a besoin d'une masse entre un million et mille millions de masses solaires
- ▷ Pour créer la luminosité typique d'un quasar, le TNSM avale 10 étoiles par année
- ▷ Le plus grand connu mange 600 Terre par minute
- ▷ Quand il n'y a plus à manger, ils s'éteignent

ET NOTRE GALAXIE?



[NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)]

★ Observations du centre de la Galaxie **révèlent une chose bizarre**



[NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)]

- ★ Observations du centre de la Galaxie **révèlent une chose bizarre**
- ★ Les étoiles bougent... **Autour d'un point** (une source radio, SgrA*)



[NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)]

- ★ Observations du centre de la Galaxie révèlent une chose bizarre
- ★ Les étoiles bougent... Autour d'un point (une source radio, SgrA*)
- ★ Quatre millions de masses solaires, quatre millions de soleils



[NASA/JPL-Caltech/S. Stolovy (SSC/Caltech)]

- ★ Observations du centre de la Galaxie révèlent une chose bizarre
- ★ Les étoiles bougent... Autour d'un point (une source radio, SgrA*)
- ★ Quatre millions de masses solaires, quatre millions de soleils
- ★ Contenue dans un rayon de 22 millions de km ($\sim 1/3$ fois la distance au Soleil)



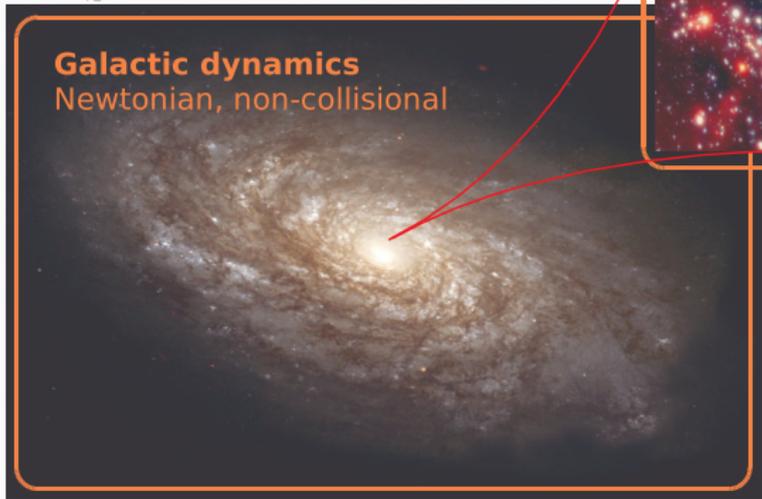
[Film: "Étoiles S"]

UN PETIT POINT DANS LA GALAXIE
QUI DÉTERMINE PLEIN DE CHOSES...

15000 COMPARÉ À 0,0000001 EST TRÈS, TRÈS, TRÈS GRAND

$$\begin{aligned}\rho_{\star, \text{gal}} &\sim 0.05 M_{\odot} \text{pc}^{-3} \\ \sigma_{\star, \text{gal}} &\sim 40 \text{ km s}^{-1} \\ t_{\text{rlx, gal}} &\sim 10^{15} \text{ yrs}\end{aligned}$$

Galactic dynamics
Newtonian, non-collisional



$\times 1000$

Cluster dynamics
Newtonian, collisional



$$\begin{aligned}\rho_{\star, \text{cl}} &\sim 10^6 - 10^8 M_{\odot} \text{pc}^{-3} \\ \sigma_{\star, \text{cl}} &\sim 100 - 1000 \text{ km s}^{-1} \\ t_{\text{rlx, cl}} &\sim 10^8 - 10^{10} \text{ yrs}\end{aligned}$$

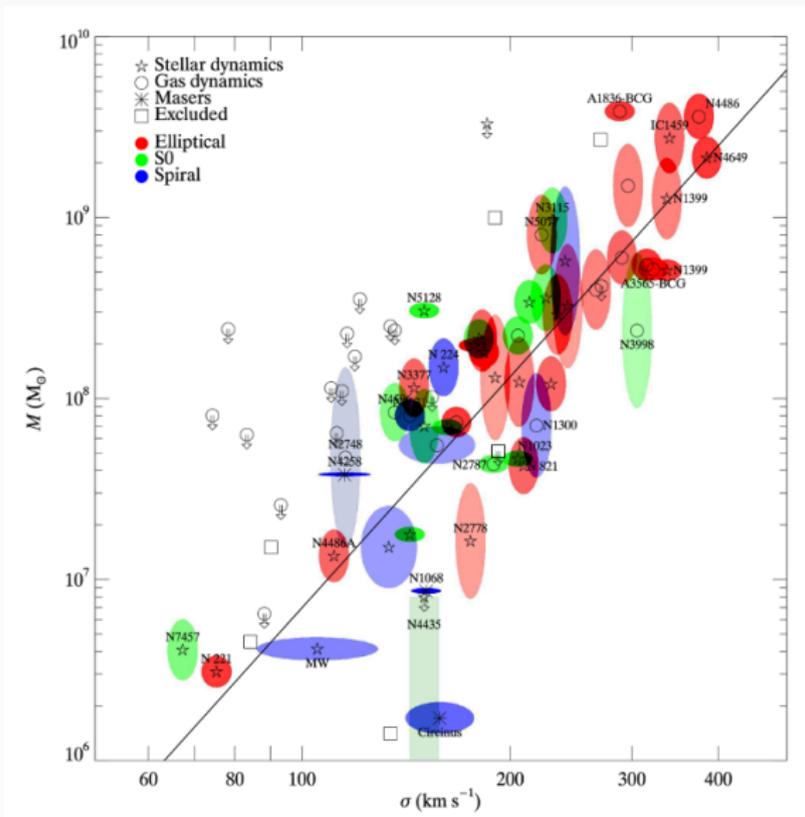
$\times 10^7$



Relativistic dynamics
collisional or not (low N)

$$\begin{aligned}M_{\bullet} &\sim 10^6 - 10^9 M_{\odot} \\ R_{\text{Schw}} &= 10^{-7} - 10^{-4} \text{ pc}\end{aligned}$$

DES CORRÉLATIONS



UN TROU NOIR? VRAIMENT?



[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- La théorie de la relativité générale prédit leur existence



[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- La théorie de la relativité générale prédit leur existence
- On a une longue liste d'indications observationnelles indirectes



[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- La théorie de la relativité générale prédit leur existence
- On a une longue liste d'indications observationnelles indirectes
- On a une longue liste de motivations théoriques pour leur existence



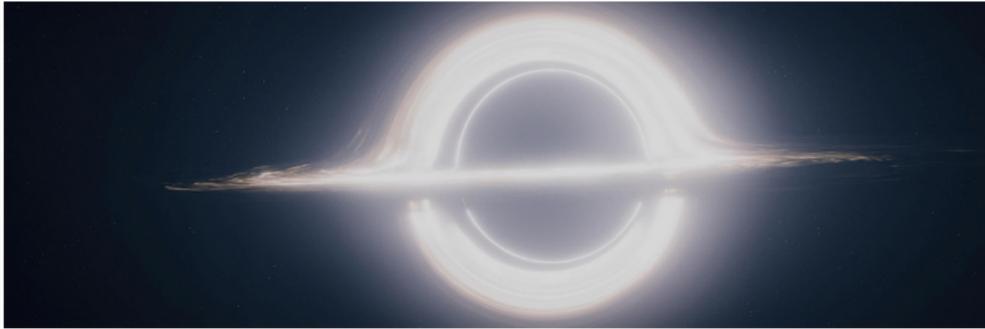
[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- La théorie de la relativité générale prédit leur existence
- On a une longue liste d'indications observationnelles indirectes
- On a une longue liste de motivations théoriques pour leur existence
- Pourquoi de si longues listes?



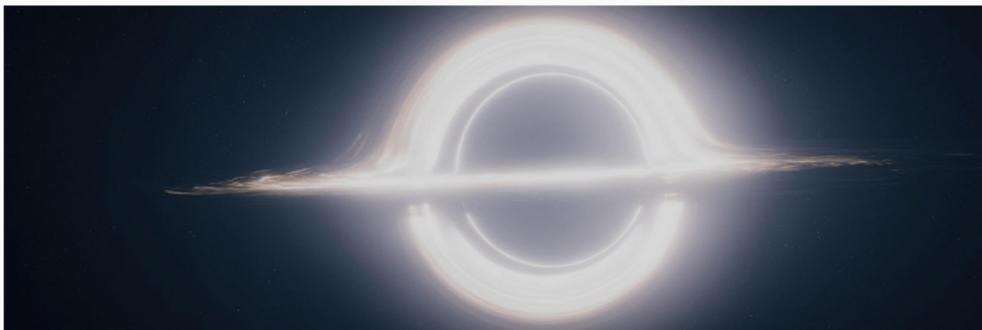
[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- La théorie de la relativité générale prédit leur existence
- On a une longue liste d'indications observationnelles indirectes
- On a une longue liste de motivations théoriques pour leur existence
- Pourquoi de si longues listes?
- Parce qu'on n'a pas une preuve directe



[Warner Bros, Entertainment Inc. and Paramount Pictures Corporation. Auteur: double negative, <http://www.dneg.com>]

■ TNSMs: Ils existent, probablement



[Warner Bros, Entertainment Inc. and Paramount Pictures Corporation. Auteur: double negative, <http://www.dneg.com>]

- **TNSMs:** Ils existent, probablement
- **Quasars:** Fonctionnent grâce à l'accrétion, en principe



[Warner Bros, Entertainment Inc. and Paramount Pictures Corporation. Auteur: double negative, <http://www.dneg.com>]

- **TNSMs:** Ils existent, probablement
- **Quasars:** Fonctionnent grâce à l'accrétion, en principe
- **La meilleure preuve des TNSM dans notre galaxie: Un groupe d'étoiles en orbite autour d'un point**

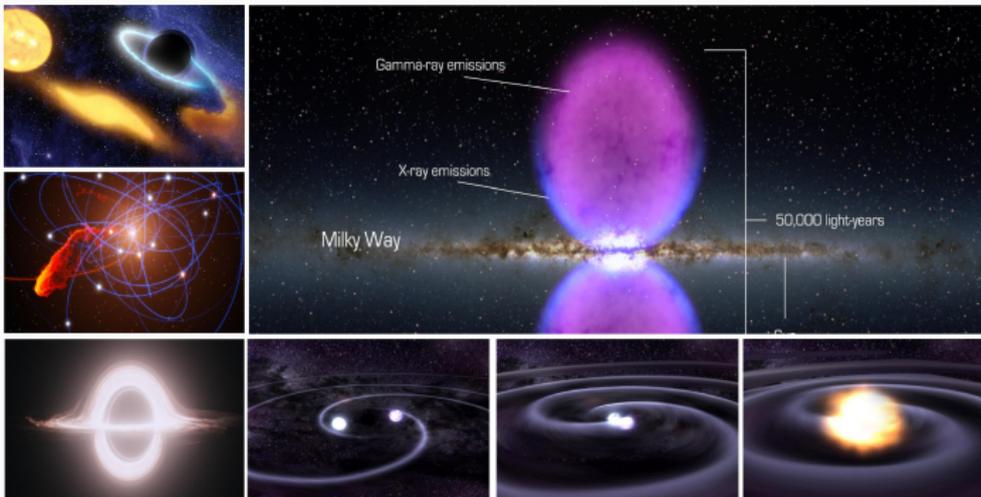


[Warner Bros, Entertainment Inc. and Paramount Pictures Corporation. Auteur: double negative, <http://www.dneg.com>]

- **TNSMs:** Ils existent, probablement
- **Quasars:** Fonctionnent grâce à l'accrétion, en principe
- **La meilleure preuve des TNSM dans notre galaxie:** Un groupe d'étoiles en orbite autour d'un point
- **L'évolution de toute la galaxie liée à un point "sub atomique":** Parce que... eeehm...

LA RÉPONSE EST L'HORIZON DES
ÉVÉNEMENTS

COMMENT CORROBORER QU'IL S'AGIT DE TROUS NOIRS?



- **La RG prédit les TNSMs:** Caractéristique unique et définitoire: *L'horizon des événements*
- **Les étoiles, le gaz et les objets compacts sont des sondes:** *Via leur mouvement autour d'un TNSM, et comment ils interagissent entre eux*
- **Moment opportun – Des données nombreuses:** *Télescopes, mais aussi observatoires d'ondes gravitationnelles*

ALLONS PELER L'OIGNON!

■ **1^{ère} couche – Cinématique des galaxies:** comment et où se forment les conditions initiales

■ **2^e couche – Dynamique stellaire:** combien d'étoiles et objets compacts, et comment ils se distribuent, pour savoir avec quelle fréquence ils interagissent avec le TNSM

■ 3^e couche – **Accrétion**: combien de masse a un TNSM à un moment donné pendant sa croissance cosmique

■ 4^e couche – **Radiation gravitationnelle**: quelle est la nature des objets massifs trouvés dans les galaxies: Très probablement des TNSMs (détection directe avec des erreurs ridiculement petites)

Depuis la taille d'une galaxie à celle de Paris

- 1^{ère} couche – Cinématique des galaxies: Échelles galactiques

Depuis la taille d'une galaxie à celle de Paris

- 1^{ère} couche – Cinématique des galaxies: Échelles galactiques
- 2^e couche – Dynamique stellaire: Un centième d'une galaxie

Depuis la taille d'une galaxie à celle de Paris

- 1^{ère} couche – Cinématique des galaxies: Échelles galactiques
- 2^e couche – Dynamique stellaire: Un centième d'une galaxie
- 3^e couche – Accrétion: Un millième d'une galaxie

Depuis la taille d'une galaxie à celle de Paris

- 1^{ère} couche – Cinématique des galaxies: Échelles galactiques
- 2^e couche – Dynamique stellaire: Un centième d'une galaxie
- 3^e couche – Accrétion: Un millièmè d'une galaxie
- 4^e couche – Radiation gravitationnelle: 100 km, et plus petit encore*

* Systèmes binaires compacts (distance Paris – Évreux), Systèmes binaires ultra compacts (20-60 km, Paris – Taverny), trous noirs stellaires (environ la taille de Paris, ou un peu plus grand)

Astrodynamics
Spheres of Influence

Galaxies

Thousands of light years
(the size of a galaxy)

Giant Molecular Clouds

Hundreds of light years
(a tenth the size of a galaxy)

Globular Clusters

Ten light years
(several hundredths the size of a galaxy)

Galactic Nuclei

Several light years
(a hundredth the size of a galaxy)



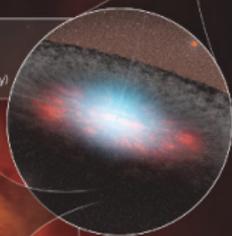


Stellar Associations

600 light hours
(4,000 times Earth-Sun distance)

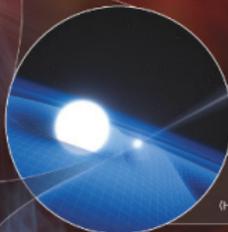
Quasar Remnants

One light year
(a thousandth the size of a galaxy)



Binary Star Systems

Hundreds of millions of km
(several times Earth-Sun distance)



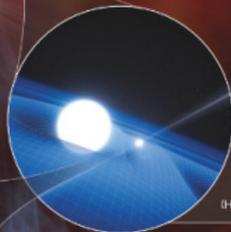
Compact Binary Stars

Below 100 km
(Heidelberg-Frankfurt distance or smaller)



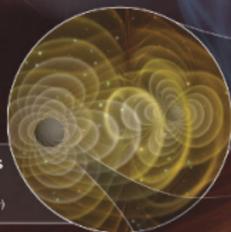
Binary Star Systems

Hundreds of millions of km
(several times Earth-Sun distance)



Compact Binary Stars

Below 100 km
(Heidelberg-Frankfurt distance or smaller)



Ultra-compact Binaries

20-60 km
(the diameter of Berlin or smaller)

Stellar Black Holes

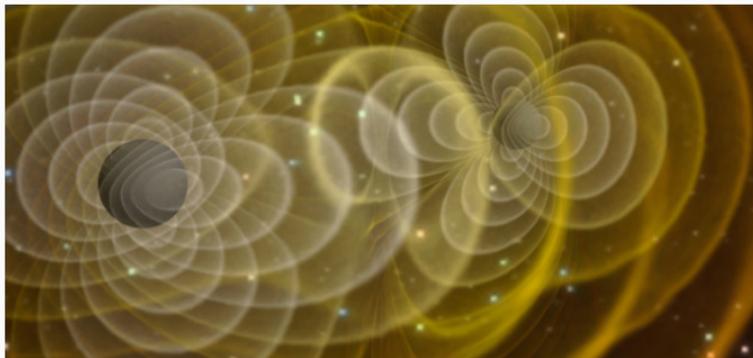
3-30 km
(diameter of a Berlin district)



Concept: J. van den Kroonenburg
Computer: J. van den Kroonenburg
Image credits: NASA, ESA, Hubble
Caption: NASA/ESA Hubble Space Telescope image of the
Orion Molecular Cloud (M42) in the constellation Orion.
Image credit: NASA/ESA, Hubble Space Telescope
M42, also known as the Great Orion Nebula, is a diffuse nebula
located in the constellation of Orion. It is one of the largest and
brightest nebulae in the sky. The nebula is a stellar nursery,
where new stars are born. The image shows the intricate
filamentary structure of the nebula, with bright spots of
ionized gas and dust. The central region is particularly
dense and bright, indicating the presence of young stars.



IL N'Y A QU'UNE SONDE QUI PUISSE
RENDRE CE RÊVE POSSIBLE



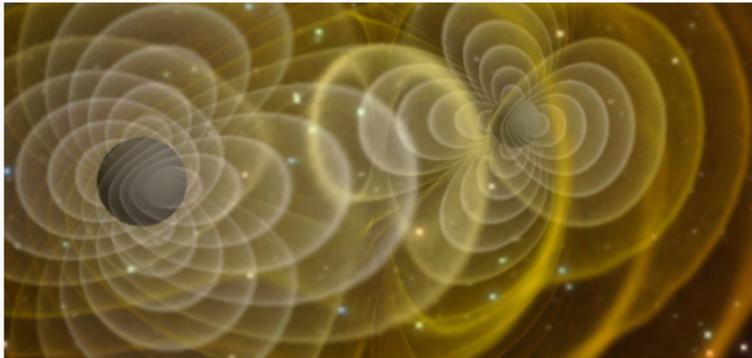
[Henze, NASA]

▷ Prédites en 1918 par Albert Einstein



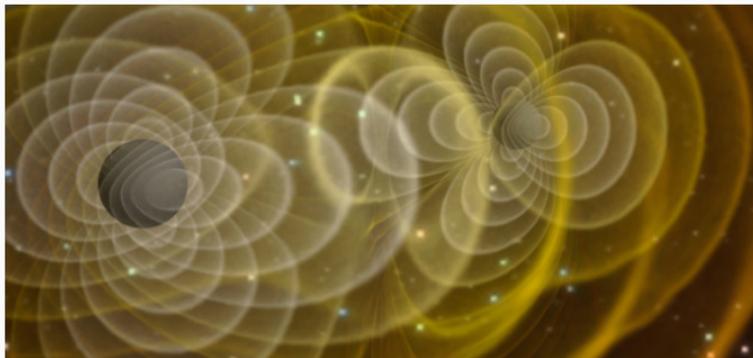
[Henze, NASA]

- ▷ Prédites en 1918 par Albert Einstein
- ▷ Les ondes électromagnétiques sont produites par les particules chargées accélérées



[Henze, NASA]

- ▷ Prédites en 1918 par Albert Einstein
- ▷ Les ondes électromagnétiques sont produites par les particules chargées accélérées
- ▷ Les ondes gravitationnelles sont produites par des masses accélérées



[Henze, NASA]

- ▷ Prédites en 1918 par Albert Einstein
- ▷ Les ondes électromagnétiques sont produites par les particules chargées accélérées
- ▷ Les ondes gravitationnelles sont produites par des masses accélérées
- ▷ On sait qu'elles existent: Le pulsar binaire PSR B1913+16 de Russell Hulse et Joseph Taylor

À QUOI SERVENT-ELLES?



[ESO/L. Calçada]

- ▷ Au contraire de la lumière, elles se propagent à des distances très grandes

À QUOI SERVENT-ELLES?



[ESO/L. Calçada]

- ▷ Au contraire de la lumière, elles se propagent à des distances très grandes
- ▷ Elles contiennent une information très détaillée sur le temps et l'espace

À QUOI SERVENT-ELLES?



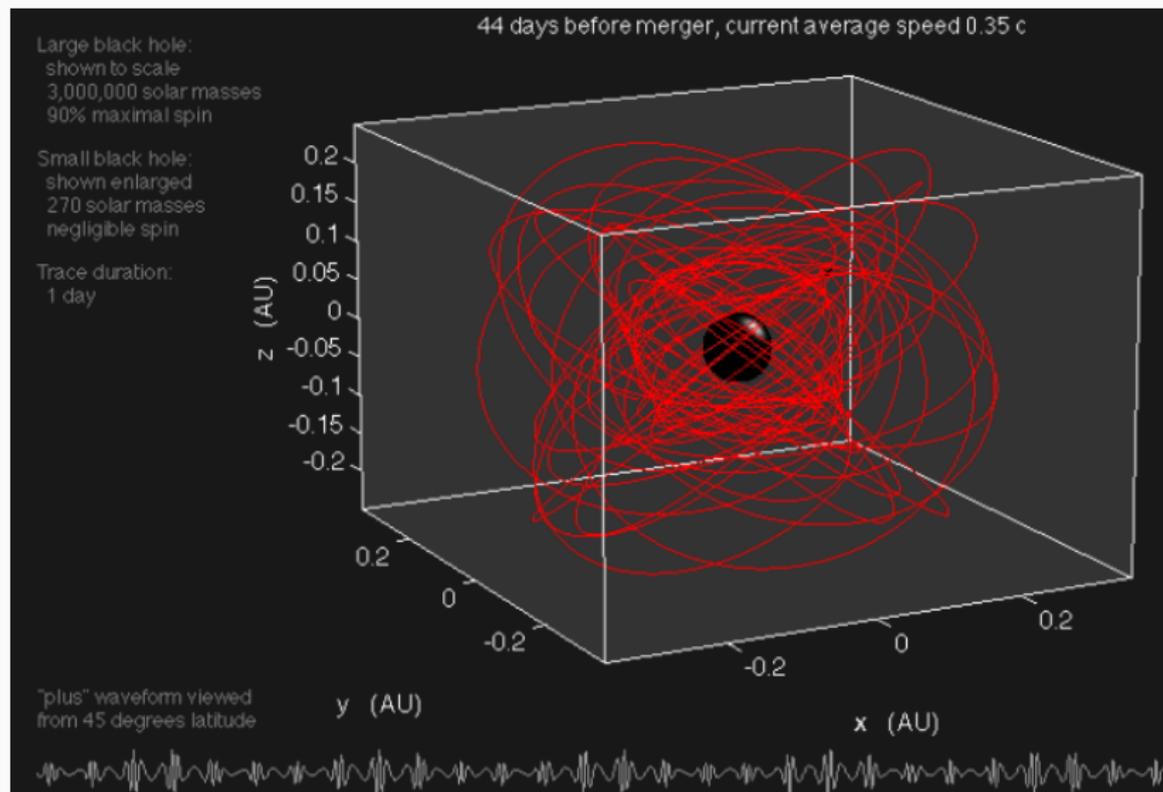
[ESO/L. Calçada]

- ▷ Au contraire de la lumière, elles se propagent à des distances très grandes
- ▷ Elles contiennent une information très détaillée sur le temps et l'espace
- ▷ Une nouvelle façon de voir, d'écouter l'univers



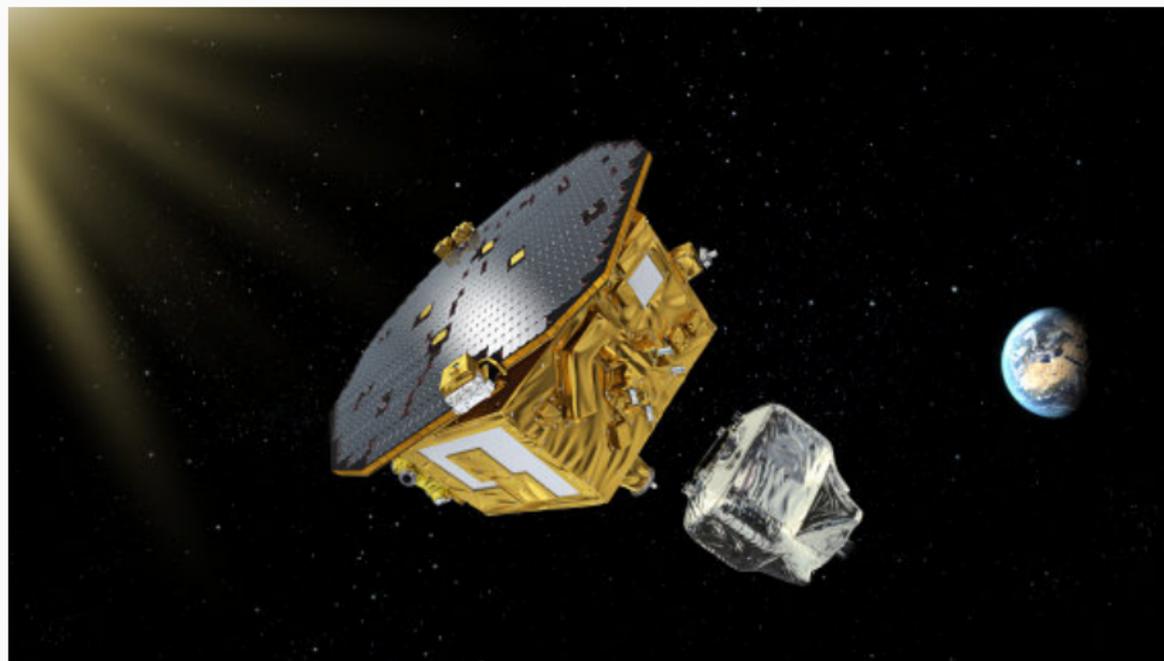
[Film: "Jungle et galaxie"]

CAPTURE GRAVITATIONNELLE



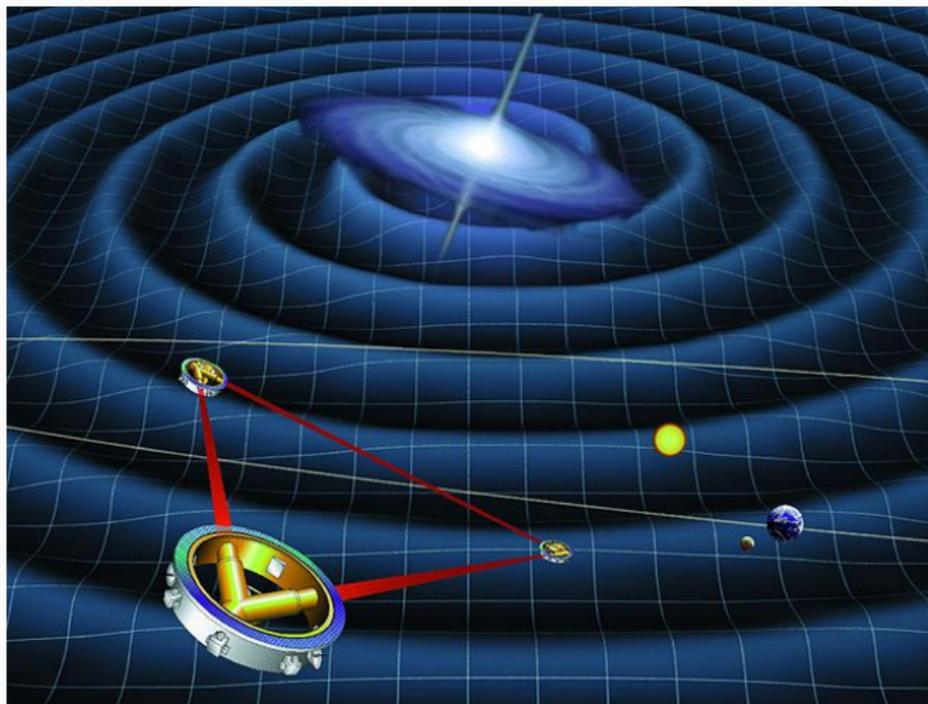
[Film: "pièce, EMRI"]

LISA PATHFINDER - ARRIVÉ LE 22 JANVIER À L1!!!



[Film: "LISA Pathfinder"]

LISA - LASER INTERFEROMETER SPACE ANTENNA



[Film: "Unlock"]

CONCLUSIONS

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas!

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas!
"Malheureusement" nous sommes des scientifiques, et ces mots-là (doivent, ridicule, etc) n'ont aucune importance – **Nous devons démontrer leur existence**

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas!
"Malheureusement" nous sommes des scientifiques, et ces mots-là (doivent, ridicule, etc) n'ont aucune importance – **Nous devons démontrer leur existence**
- **L'évolution des galaxies est liée aux TNSMs: Comprendre leur croissance cosmique nécessite de comprendre celle des TNSMs**

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas!
"Malheureusement" nous sommes des scientifiques, et ces mots-là (doivent, ridicule, etc) n'ont aucune importance – **Nous devons démontrer leur existence**
- **L'évolution des galaxies est liée aux TNSMs:** Comprendre leur croissance cosmique nécessite de comprendre celle des TNSMs
- **C'est très difficile de "voir" une binaire de TNSMs: mais on peut les entendre**

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas! "Malheureusement" nous sommes des scientifiques, et ces mots-là (doivent, ridicule, etc) n'ont aucune importance – **Nous devons démontrer leur existence**
- **L'évolution des galaxies est liée aux TNSMs:** Comprendre leur croissance cosmique nécessite de comprendre celle des TNSMs
- **C'est très difficile de "voir" une binaire de TNSMs:** mais on peut les entendre
- **Il y aura sans doute des surprises:** Et c'est notre métier d'êtres humains, notre nature, que d'essayer de tout comprendre

Que sais-je, encore?

- **Les TNSMs doivent exister:** Ça serait ridicule qu'ils n'existent pas! "Malheureusement" nous sommes des scientifiques, et ces mots-là (doivent, ridicule, etc) n'ont aucune importance – **Nous devons démontrer leur existence**
- **L'évolution des galaxies est liée aux TNSMs:** Comprendre leur croissance cosmique nécessite de comprendre celle des TNSMs
- **C'est très difficile de "voir" une binaire de TNSMs:** mais on peut les entendre
- **Il y aura sans doute des surprises:** Et c'est notre métier d'être humains, notre nature, que d'essayer de tout comprendre
- **On ne vient que de commencer: Le futur est ouvert**

J'ÉSPERE QUE VOUS AVEZ DES QUESTIONS... MOI,
J'EN AI!