

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



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

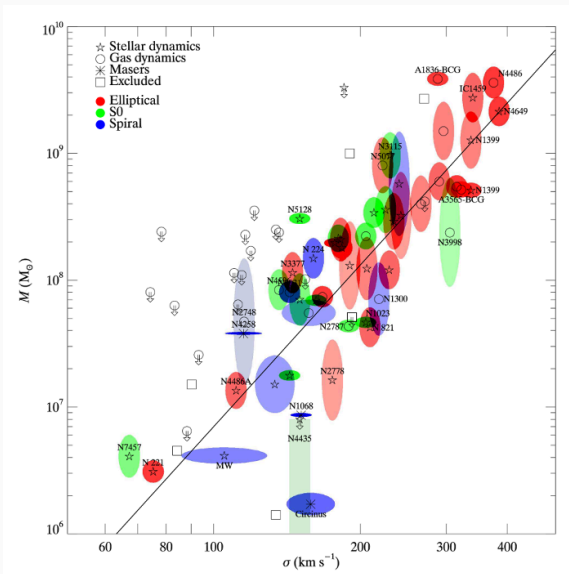
$\times 10^7$



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



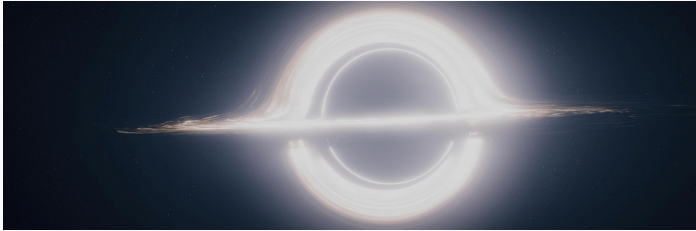
[ESA/Hubble, L. Calçada (ESO)]

- 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**

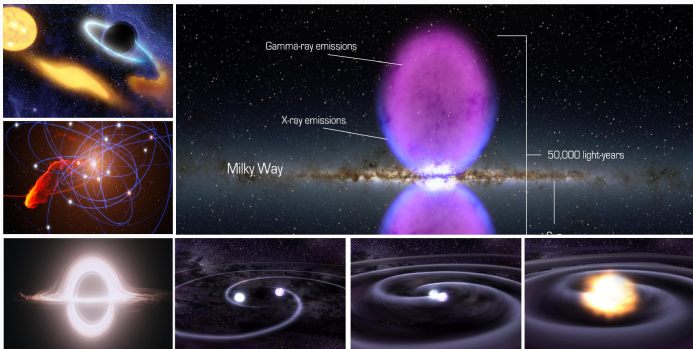


[Warner Bros, Entertainment Inc. and Paramount Pictures Corporation. Auteur: double negative, <http://www.dneg.com>]

- **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)



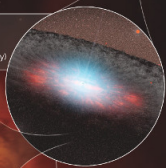


Stellar Associations

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

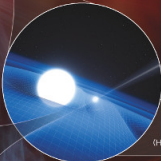
Quasar Remnants

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)

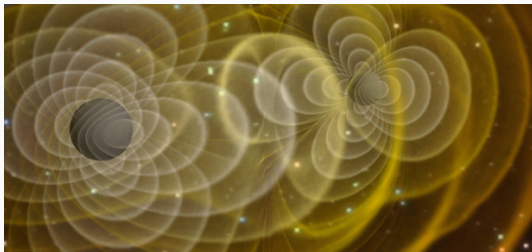
Stellar Black Holes

3-30 km
(diameter of a Berlin district)

Concept: 100th anniversary
Competition: 100th anniversary
Wage: 100th anniversary
Date: 100th anniversary
Origin: 100th anniversary
Name: 100th anniversary
Mile: 100th anniversary
Area: 100th anniversary
Area: 100th anniversary
Area: 100th anniversary

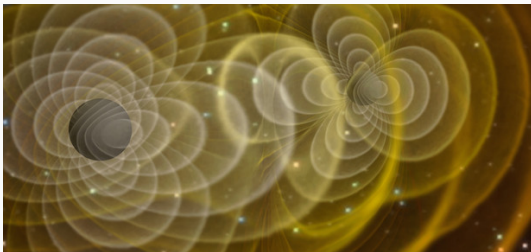


IL N'Y A QU'UNE SONDE QUI PUISSE
RENDRE CE RÊVE POSSIBLE



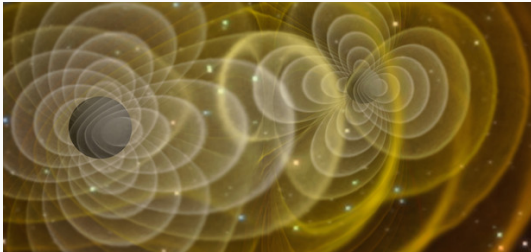
[Henze, NASA]

▷ Prédites en 1918 par Albert Einstein



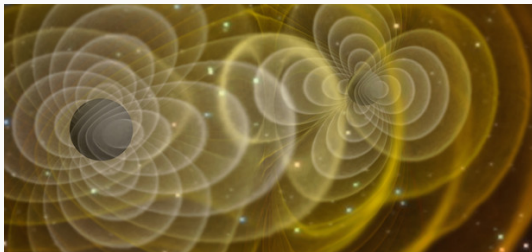
[Henze, NASA]

- ▷ 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?



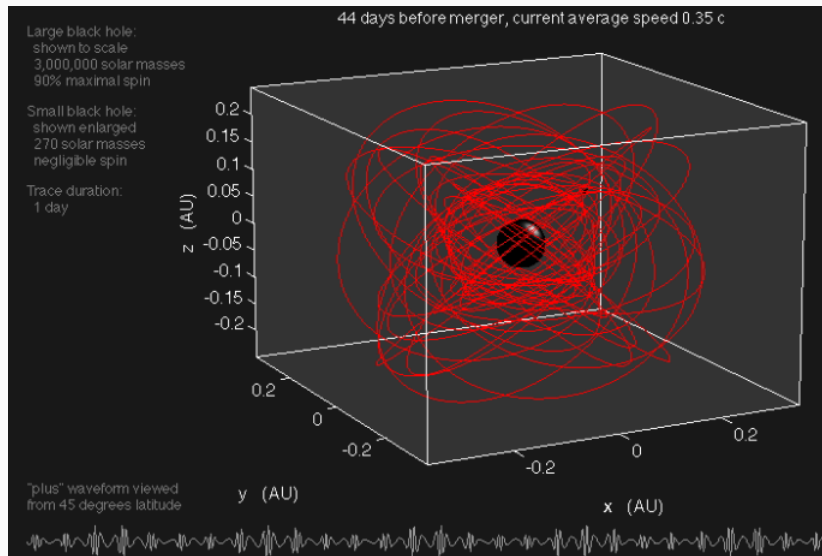
[ESO/L. Calçada]

- ▷ 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



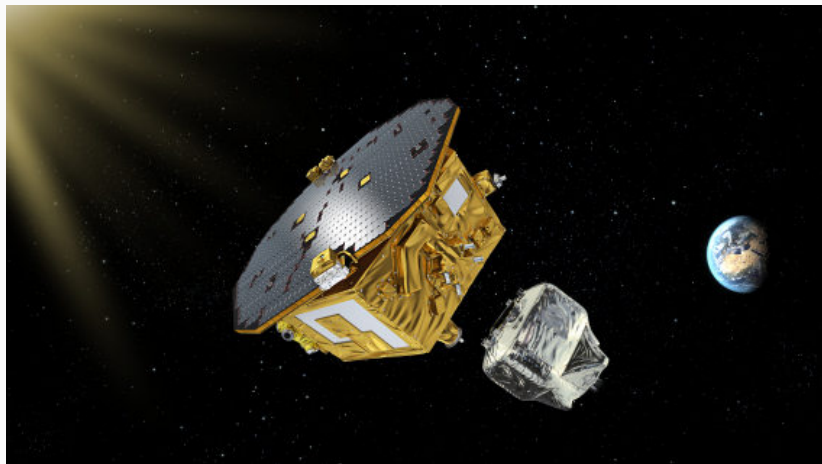
[Film: "Jungle et galaxie"]

CAPTURE GRAVITATIONNELLE



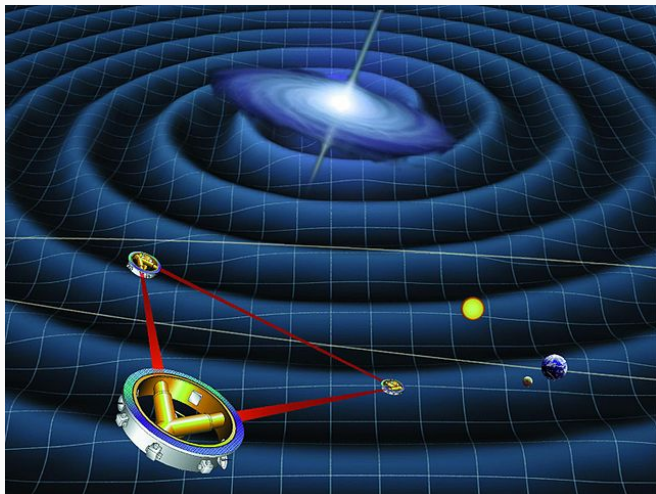
[Film: "pièce, EMRI"]

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!