

# À LA CONQUÊTE DES TROUS NOIRS

## LES TROUS NOIRS ET LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Jérôme Novak

[Jerome.Novak@obspm.fr](mailto:Jerome.Novak@obspm.fr)

Laboratoire de l'Univers et de ses Théories (LUTH)  
CNRS / Observatoire de Paris

Fête de la science à Limoges, 12 octobre 2006



# TROUS NOIRS : DU CONCEPT À LA PREUVE ...

## 1 QU'EST-CE QU'UN TROU NOIR ?

- Une idée folle...
- Quelques chiffres

## 2 COMMENT LE FABRIQUER ?

- Vie et mort des étoiles
- Quand la gravitation l'emporte
- Voyage autour d'un trou noir

## 3 COMMENT LE VOIR ?

- Trous noirs, compagnons d'étoiles
- Au centre des galaxies
- Des jets à la vitesse de la lumière

## 4 LES ONDES GRAVITATIONNELLES, LA PREUVE DÉFINITIVE ?

- L'espace-temps qui ondule
- Des LASERs de plusieurs kilomètres
- Sonder le bord des trous noirs

# Qu'est-ce qu'un trou noir ?

# UNE IDÉE FOLLE...

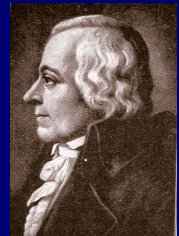
La **vitesse de libération**, sur un tel astre, est plus grande que la vitesse de la lumière.

⇒ la lumière ne peut pas s'échapper, ni parvenir jusqu'à nous !

Présente dans les écrits, pour la première fois au XVIII<sup>e</sup> siècle :

- John Mitchell, à Cambridge (Angleterre) en 1783,
- Pierre-Simon Laplace, à Paris en 1799

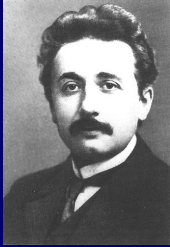
PIERRE-SIMON LAPLACE



$$\text{MAIS... } R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

La lumière n'est pas bien sensible à la force de gravité !!  
Autrement dit, les photons n'ont pas de masse...mais ce n'est pas grave.

ALBERT EINSTEIN



- La théorie de la **Relativité Générale**, énoncée par Albert Einstein en 1915 prévoit la déviation de la lumière par la force de gravité.
- Les concepts sont plus compliqués, mais le résultat est le même : si
$$\frac{2GM}{Rc^2} = 1$$

La lumière ne peut pas s'échapper de l'astre et lui retombe dessus.

# QUELQUES CHIFFRES

Si l'on applique la formule à des exemples astrophysiques ...

	taille ( $R$ )	Masse ( $M$ )	Rapport ( $2GM/Rc^2$ )
 moi	0,91 m	67 kg	0,0 ... (23 zéros) ... 01
 Terre	6000 km	$0,000003 \times M_{\odot}$	0,000 000 002
 Soleil	700 000 km	$1 M_{\odot}$	0,000 004
 Sirius B	5 500 km	$0,94 M_{\odot}$	0,000 5
 PSR 1913+16	15 km	$1,44 M_{\odot}$	0,29

# Comment naissent les trous noirs ?

ou “La victoire de la gravitation”

# DU CAILLOU À L'ÉTOILE

En prenant de plus en plus de matière, la force de gravité domine de plus en plus :

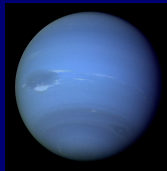
ASTÉROÏDE



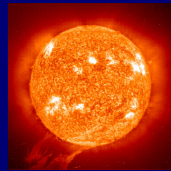
PLANÈTE  
TELLURIQUE



PLANÈTE  
GÉANTE  
GAZEUSE



ÉTOILE



Au fur et à mesure que la gravitation augmente :

- la pression au centre de l'astre augmente
- la température au centre de l'astre aussi

⇒ les réactions nucléaires démarrent au-delà d'un seuil de température.

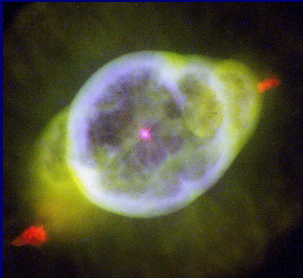


# VIE ET MORT DES ÉTOILES

Une étoile brûle son combustible nucléaire pendant des millions, voire des milliards d'années, puis s'effondre :

FAIBLE MASSE

⇒ NAIN BLANCHE



Nébuleuse planétaire NGC3242

MASSE MOYENNE

⇒ ÉTOILE À NEUTRONS



Reste de la *supernova* du Crabe

# QUAND LA GRAVITATION L'EMPORTE DÉFINITIVEMENT

- Pour les naines blanches, c'est la **pression des électrons** qui s'oppose à la gravitation.
- Pour les étoiles à neutrons, les électrons se sont combinés aux protons et ce sont les **forces nucléaires** entre neutrons qui s'opposent à la gravitation.

Si la masse est trop importante (plus de  $25M_{\odot}$ ), aucune force connue ne peut arrêter l'effondrement.

- La masse se concentre en un point, appelé **singularité centrale**.
- La théorie de la Relativité Générale prévoit alors la formation d'un **horizon** autour de la singularité.

L'horizon délimite la région où la lumière "retombe" sur la singularité centrale (intérieur du trou noir).

# RIEN NE SORT D'UN TROU NOIR... OU PRESQUE !

La théorie de la **Relativité Restreinte** stipule que aucun corps, aucune information ne voyage plus vite que la lumière.

⇒ la vitesse de libération étant plus grande que celle de la lumière, rien ne peut sortir de l'intérieur de l'horizon.

- La lumière ne sort pas ⇒ objet "noir" ;
- tout ce qui y tombe est définitivement perdu ⇒ "trou".

Il est seulement possible de connaître sa masse, son "état de rotation" (moment angulaire), et sa charge électrique.

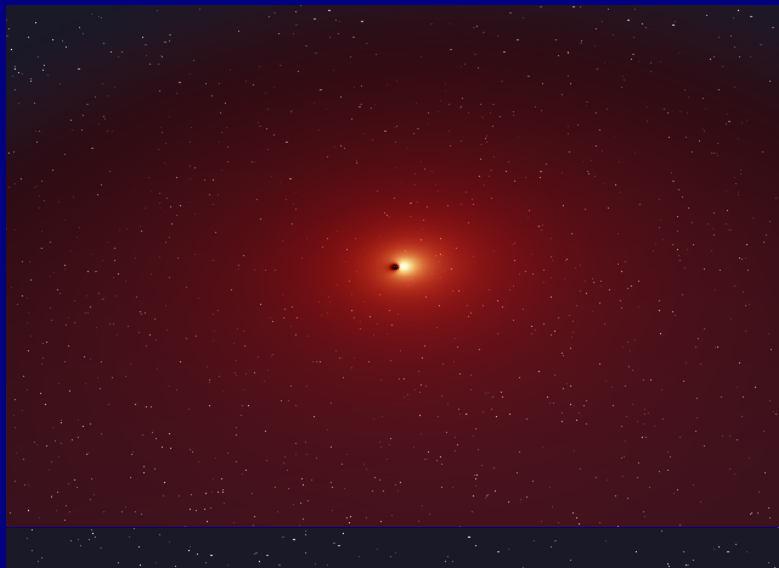
## IDÉE REÇUE

- Il n'attire pas les objets plus fortement que l'étoile qui lui a donné naissance.
- Il "avale" tout ce qui arrive à *son bord* (horizon)

Si notre Soleil se transformait en trou noir, avec la même masse, la Terre continuerait de tourner autour !

# VOYAGE AUTOUR D'UN TROU NOIR

*Il n'est pas nécessaire qu'un objet émette de la lumière pour le voir ;  
il suffit de l'éclairer*

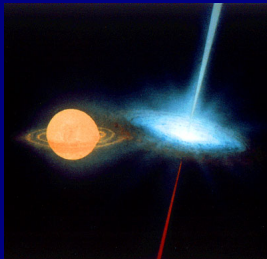


# Comment observer les trous noirs ?

Existent-ils vraiment ?

# LES TROUS NOIRS COMPAGNONS D'ÉTOILES

Il existe de nombreuses étoiles doubles, certaines se sont effondrées en trous noirs.



- la matière s'échappe de l'étoile "normale" pour tomber en spirale vers le trou noir,
- elle est accélérée de plus en plus fort et émet de plus en plus à haute énergie,
- observation en rayons X de ce **disque d'accrétion**,
- du mouvement orbital des deux astres  $\Rightarrow$  la masse au centre du disque.

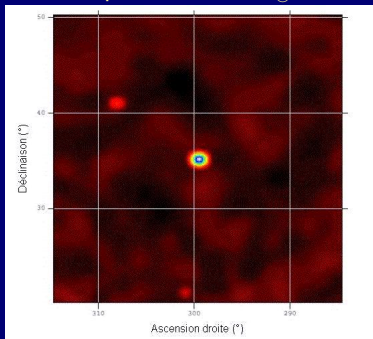
Si cette masse est supérieure à celle maximale pour une étoile à neutrons (3 masses solaires), on l'appelle "candidat trou noir".

# CANDIDATS TROUS NOIRS

Il existe plus d'une quinzaine de ces candidats, dont :

## CYGNUS X-1

masse supérieure à  $10M_{\odot}$



## LMC X-3

masse supérieure à  $5M_{\odot}$



# TROUS NOIRS AU CENTRE DES GALAXIES

C'est la seconde famille de trous noirs astrophysiques.

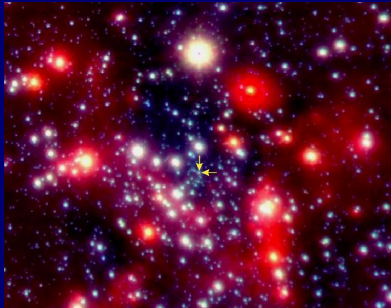


- Masse entre un million et un milliard de fois celle du Soleil.
- Formation au cours de l'histoire de l'Univers par accumulation de gaz interstellaire et d'étoiles



# OBSERVATIONS DES MOUVEMENTS D'ÉTOILES

## CENTRE DE NOTRE GALAXIE



- concentration de masse de plus de deux millions de masses solaires
- aucune émission lumineuse, pas d'étoiles...

⇒ seule explication plausible, en l'état actuel de nos connaissances : un **trou noir super-massif**

## LES QUATRE TÉLÉSCOPES DU VLT



Observations faites au *Very Large Telescope* (VLT) de l'Observatoire Austral Européen (ESO) au Chili

# LES GALAXIES ACTIVES

Comme pour les “petits” trous noirs, les gros peuvent être entourés de disques de matière très chaude et émettre des rayons X

⇒ **Noyaux Actifs de Galaxies** ; par exemple : *Centaurus A*

RAYONS X



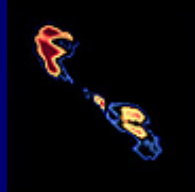
VISIBLE



INFRA-ROUGE



ONDES RADIO

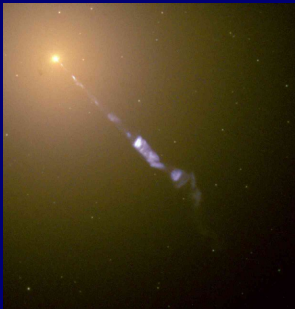


# DES JETS À LA VITESSE DE LA LUMIÈRE

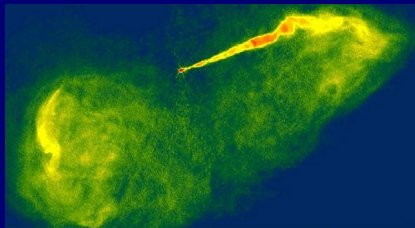
La gravitation tend à comprimer la matière s'approchant du trou noir,

⇒ en présence de champ magnétique, elle peut s'échapper sous forme de jet extrêmement rapide.

## CENTRE DE M87 EN VISIBLE



## CENTRE DE M87 EN ONDES RADIO



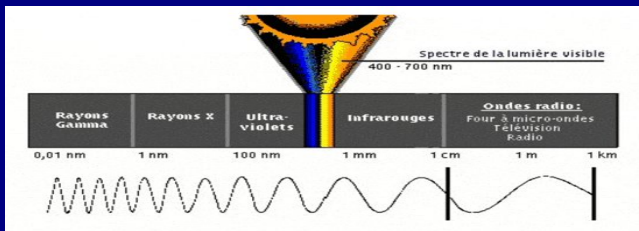
M87

# Les ondes gravitationnelles

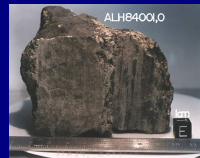
La preuve définitive ?

# COMMENT A-T-ON DES INFORMATIONS SUR L'UNIVERS ?

- en regardant la lumière  $\Rightarrow$  ondes électromagnétiques



- en examinant ce qui tombe du ciel ...



- en allant chercher des indices sur place (Apollo, Mars Explorer, Cassini-Huygens,...) Ces deux dernières méthodes sont limitées au système solaire.
- dernier canal en date : les neutrinos
- et, à l'avenir les ondes gravitationnelles

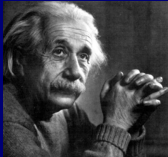
# QUI A INVENTÉ CETTE IDÉE ?

Dans la théorie de Newton, la force de gravité se déplace **instantanément**

ISAAC NEWTON



ALBERT EINSTEIN

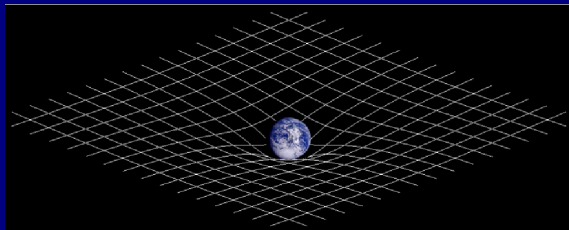


Dans le cadre de la **Relativité générale**, cette force se propage au maximum à la vitesse de la lumière

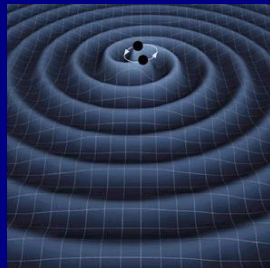
⇒ c'est cette théorie (Einstein, 1915) qui prédit l'existence d'ondes gravitationnelles.

# L'ESPACE-TEMPS QUI ONDULE

D'après la Relativité Générale d'Einstein (et aussi des tests et des observations), les masses courbent l'espace-temps.



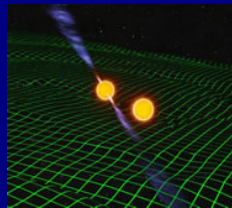
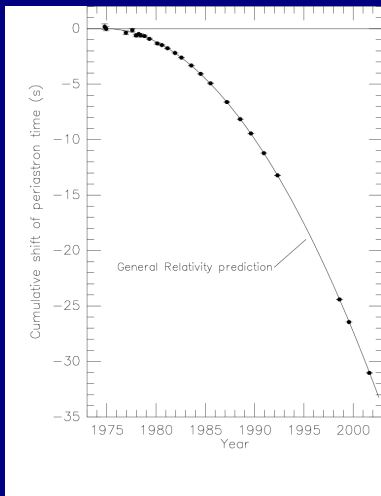
Quand les masses bougent, cette courbure se propage, comme des vagues à la surface de l'eau  
⇒ **ondes gravitationnelles**



# LES ONDES GRAVITATIONNELLES EXISTENT-ELLES VRAIMENT ?

Oui !!

Le rapprochement des deux étoiles à neutrons (pulsars) de PSR1913+16 correspond, avec une précision extrême, à ce qui est prédit si ces deux étoiles émettent des ondes gravitationnelles.



⇒ Prix Nobel de Physique pour Hulse et Taylor en 1993



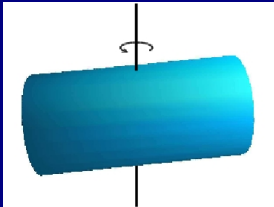
# COMMENT PRODUIRE DES ONDES GRAVITATIONNELLES ?

SUR TERRE ...

Au XIX<sup>e</sup> siècle, le physicien allemand Hertz prouve l'existence des ondes électromagnétiques en les produisant dans son laboratoire. Peut-on faire la même chose pour les ondes gravitationnelles ?

- les **ondes électromagnétiques** sont produites par l'accélération de **charges électriques**,
- les **ondes gravitationnelles** sont produites par l'accélération de **masses**.

Le plus efficace pour accélérer un objet, c'est de le faire tourner :



Prenons un cylindre d'acier

- d'un mètre de diamètre et de **vingt** mètres de long,
- qui pèse **490 tonnes**,
- qui peut tourner à plus de 260 tours/mn (limite de rupture de l'acier),

⇒ **aucun** espoir de détection (émission trop faible).

# COMMENT PRODUIRE DES ONDES

## GRAVITATIONNELLES ?

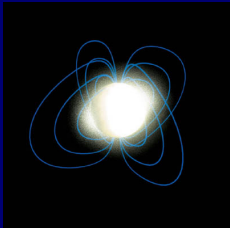
DANS L'ESPACE...

Avec l'aide de la Relativité Générale, on peut estimer que les ondes gravitationnelles les plus fortes peuvent être émises par des masses accélérées :

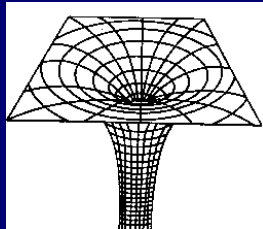
- qui possèdent un très fort champ gravitationnel,
- qui vont à une vitesse proche de celle de la lumière,
- qui n'ont pas une forme sphérique.

Dans le "bestiaire" astrophysique, les plus efficaces semblent être :

LES ÉTOILES À NEUTRONS



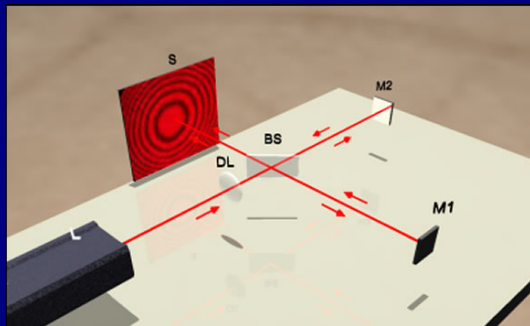
... ET LES TROUS NOIRS



... surtout s'ils sont à deux, tournant l'un autour de l'autre...

# COMMENT DÉTECTER LES ONDES GRAVITATIONNELLES ?

Espace-temps qui ondule  $\iff$  léger changement des distances au cours du temps  
Même avec ces "champions", la taille des ondes gravitationnelles arrivant sur Terre est très faible et la variation de distance à mesurer correspond à :  
la taille d'un atome par rapport à la distance Terre-Soleil !!



$\Rightarrow$  mesure par LASER des déplacements des miroirs d'un **interféromètre**

# DES LASERS DE PLUSIEURS KILOMÈTRES

VIRGO : FRANCE/ITALIE À PISE



LIGO : USA, LOUISIANE



LIGO : USA, WASHINGTON



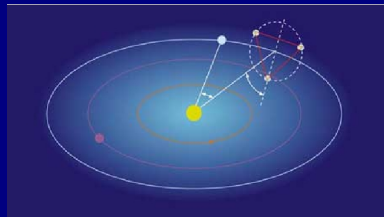
Les bras où passe le LASER font 3 km (VIRGO) et 4 km (LIGO) de long  
... avec un vide quasi-parfait !

# DES LASERS DE PLUSIEURS MILLIONS DE KILOMÈTRES

Sur Terre, les vibrations du sol (routes, activité sismique, ...) limitent les détecteurs.



⇒ projet LISA (ESA / NASA) prévu pour être lancé en 2015 : 3 satellites à 5 millions de kilomètres les uns des autres, tournants autour du Soleil...

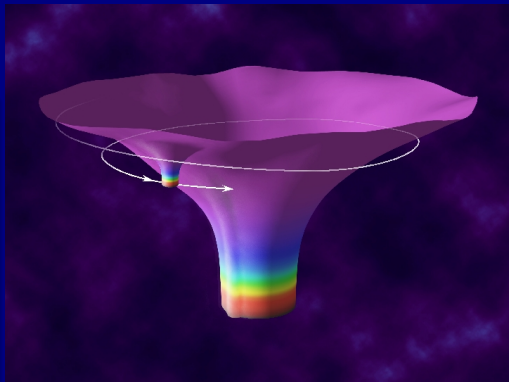
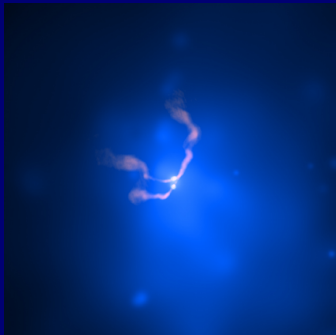


Beaucoup plus de sources visibles (basses fréquences).

# SONDER LE BORD DES TROUS NOIRS

Un "petit" trou noir tombant  
(spirallant) dans un grand  
Informations sur  
l'espace-temps au voisinage du  
grand trou noir

3C75



⇒ preuve observationnelle que les trous noirs sont tels, que nous nous les  
représentons **OU** une grosse surprise !!

# EN BREF...

- Les trous noirs sont exotiques et contre-intuitifs.
- Ils semblent aujourd'hui faire partie d'une réalité observationnelle (vus en ondes radio, infra-rouge, X).
- Vraiment vus??!!
- C'est la seule explication des phénomènes observés, la "plus simple" ;
- en attendant une éventuelle confirmation par les nouveaux messagers : les ondes gravitationnelles ...
- ... ou des surprises ...

