

An artist's drawing a black hole named Cygnus X-1. It formed when a large star caved in. This black hole pulls matter from blue star beside it

1

# LES TROUS NOIRS

Alain LIGAIRE – Version 5-N1- 12 mai 2023

# RÉFÉRENCES

## ○ Jean-Pierre Lasota

- 'La science des trous noirs' , 2010, Odile Jacob



## ○ Jean-Pierre Luminet,

- ' Le destin de l'Univers - Trous noirs et énergie sombre ' , 2006, Folio
- et ' Les trous noirs en 100 questions' , 2022, Taillandier

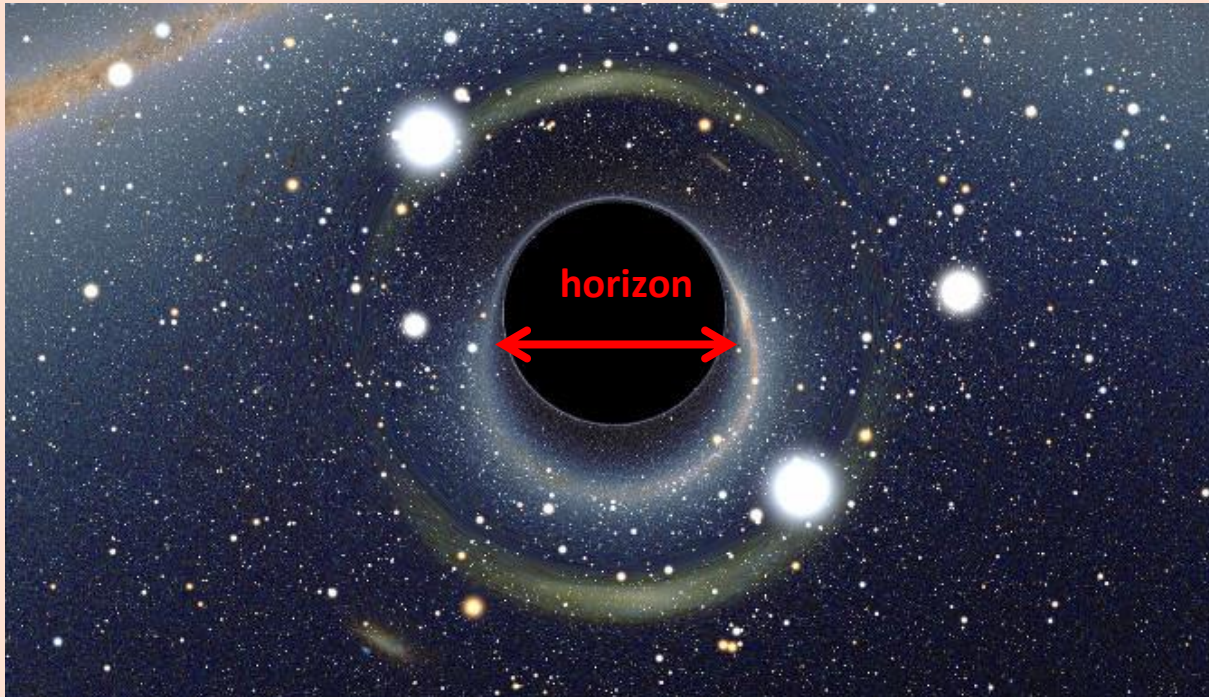


- Sites de la NASA et de l'ESA
- RG – Thomas A. MOORE – deBoek Edition

# SOMMAIRE

- Préambule
  - Définition
  - Découverte- Bref historique
- I) TN : Objet Mathématique
  - Rappel
    - Représentation espace et temps
    - Propriété de la RG : La courbure de l'espace temps & déviation de la lumière
  - Les trous Noirs – aspects théoriques
- II) TN : Objet astrophysique
  - Caractéristiques des trous noirs - Les différents types
  - Formation des TN
  - Observations des TN
    - Stellaires
    - Supermassifs
- **Option : le Film** - LA VOUTE CÉLESTE TELLE QUE LA VERRAIT UN OBSERVATEUR SITUÉ PRÈS D'UN HYPOTHÉTIQUE TROU NOIR DEVANT NOTRE GALAXIE ' LA VOIE LACTÉE ' simulation mathématique d'un TN Stellaire par l'astrophysicien Alain Riazuelo (38 mn)

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

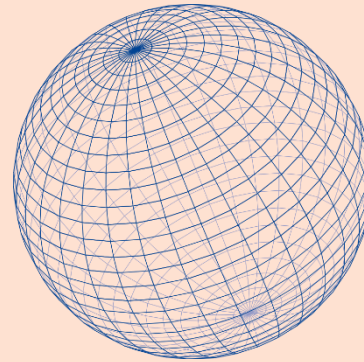


En astrophysique, un **trou noir** est un objet céleste si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper.

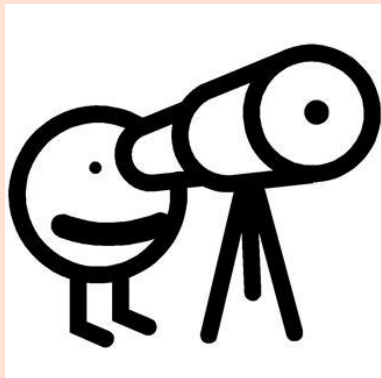
*Image de synthèse d'Alain Riazuelo, 2007*

- La frontière (immatérielle) entre l'intérieur du trou noir et le reste de l'univers est appelée **horizons des événements** de rayon  $R_s$  (appelé rayon de Schwarzschild ou rayon gravitationnel) . Il n'est ni gazeux, ni solide, il est purement géométrique, semblable à l'entrée d'un puits dont on ne peut ressortir
- Le centre du trou noir est la **singularité**.
- Par définition, un trou noir n'est pas directement observable, mais sa silhouette l'est
  - S'il est entouré de matière (disque d'accrétion)
  - S'il est observé sur un fond étoilé (déformation par la courbure des rayons lumineux)

# HISTORIQUE

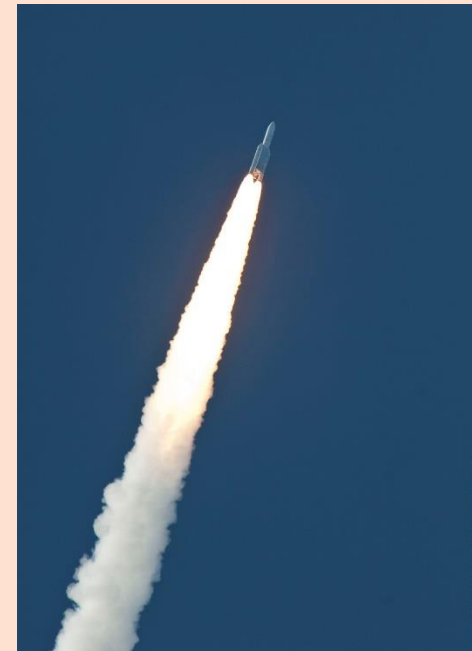
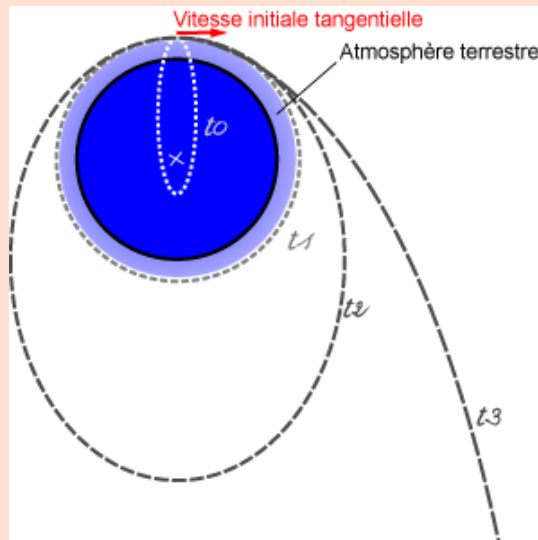
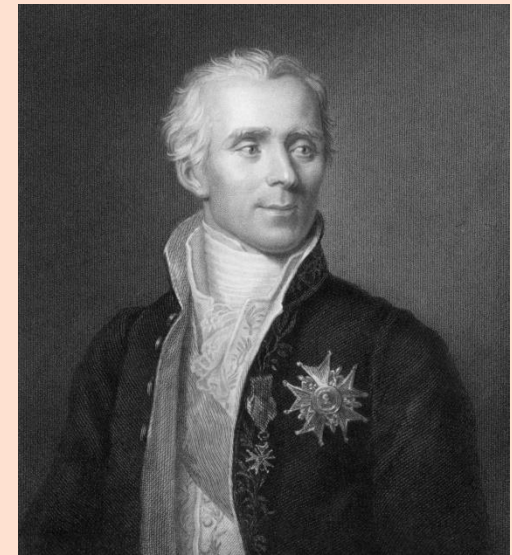


- Les trous noirs ont été longtemps un concept de mathématiques avancées avant de devenir un objet d'observation astronomique nécessitant les technologies les plus récentes



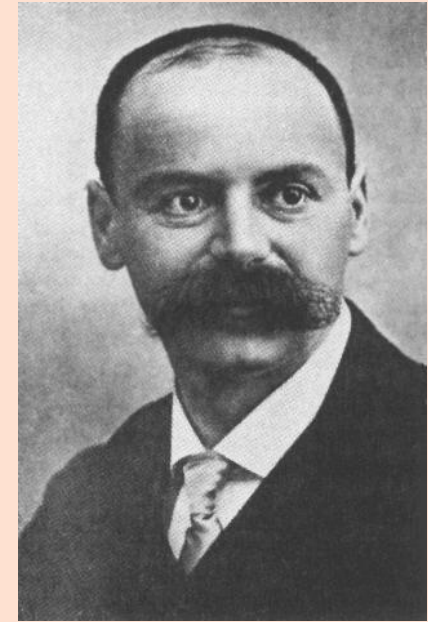
# HISTORIQUE RÉSUMÉ EN 4 POINTS - I

- Fin du XIX . S, dans le cadre de la théorie de Newton, en combinant les notions de *vitesse finie* de la lumière et de *vitesse de libération* d'un astre, **John Michell** et **Pierre Simon Laplace** évoquèrent le concept de trous noirs ( appelés grand corps obscurs à l'époque) . Bien que d'une grande valeur historique et didactique, les bases théoriques utilisées n'étaient pas adaptées à la description véritable d'un trou noir.



## HISTORIQUE - II

- En 1916, **Karl Schwarzschild** utilise la formulation de la **Relativité Générale** récemment publiée par Einstein en l'appliquant à la gravitation des étoiles. Il établit ainsi la géométrie de la courbure de l'espace-temps à l'extérieur d'un objet sphérique entouré de vide qui ne tourne pas.
- Dans le cas d'un astre massif et compact, ses équations mettent en évidence un rayon de sphère particulier (appelé désormais rayon de Schwarzschild) où la vitesse de libération (calculée « à la Newton ») est égale à la vitesse de la lumière de sorte que la lumière ne peut s'en échapper.
- Ce rayon et ses équations (la métrique de Schwarzschild) seront utilisés 50 ans après sa mort pour définir la théorie des trous noirs .



Karl Schwarzschild  
(1873-1916).

$$R_s = 2GM / c^2$$

*Avec M masse de l'astre central, G constante gravitationnelle, c constante vitesse de la lumière dans le vide.*

## Equation d'Einstein de la relativité général

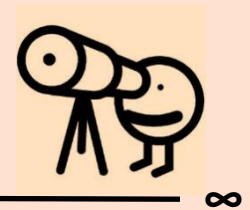
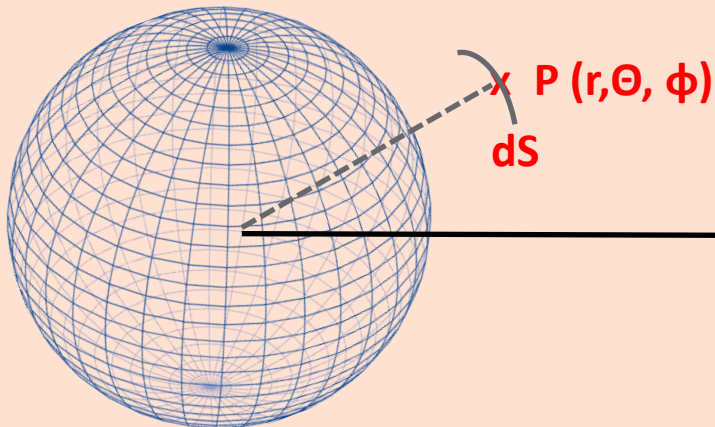


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \left[ \frac{8\pi G}{c^4} \right] T_{\mu\nu} \quad (*)$$

- La géométrie de l'espace-temps (à gauche) est lié à son contenu masse-énergie (à droite). L'équation d'Einstein se présente comme un système de 10 équations différentielles couplées non linéaires du second ordre portant sur la métrique. En trouver des solutions n'est pas chose aisée !

## La métrique de Schwarzschild solution de l'équation d'Einstein dans un cas particulier

- $ds^2 = - (1 - 2GM/r) dt^2 + (1 - 2GM/r)^{-1} dr^2 + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2\theta d\phi^2$
- Et si  $r = 2GM$ , on a le rayon critique  $r_s$  appelé rayon de Schwarzschild ! Il définit l'horizon des évènements pour un trou noir



$t$  = temps propre d'un objet au repos mesuré par un observateur situé à l'infini

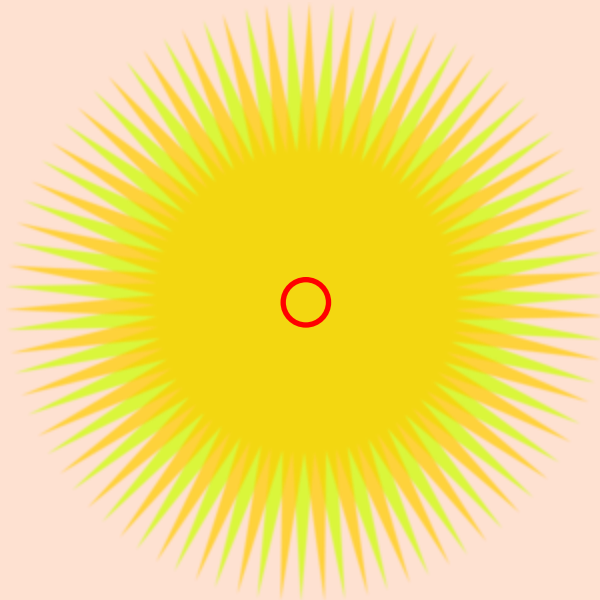
Objet sphérique immobile dans le vide de masse  $M$  ( $\approx$  étoile, trou noir,..)

(\*) La constante cosmologique n'a pas été prise en compte ici car elle intervient à une échelle très grande : super amas, univers



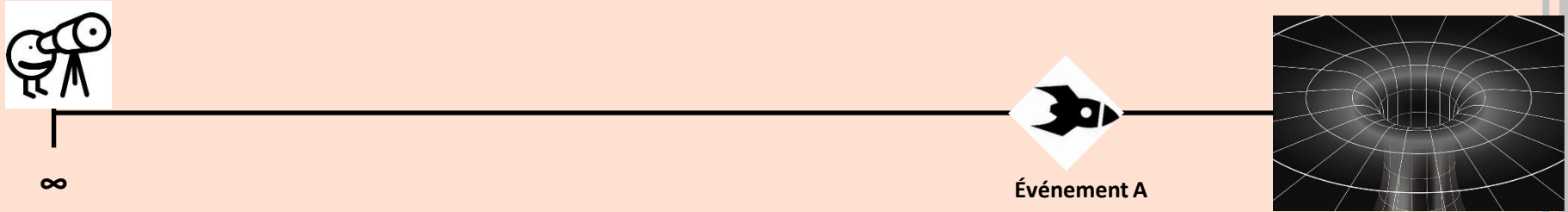
## REMARQUE SUR LE RAYON GRAVITATIONNEL $R_S = 2GM$

- Nous avons vu qu'il y a quelque chose de particulier pour la distance  $r_s = 2GM$  (\*) le **rayon de Schwarzschild** est défini comme un rayon critique en deçà duquel rien ne peut s'échapper (donc y compris les rayons lumineux). Si une étoile au cours d'un effondrement gravitationnel atteint un rayon égal à ce rayon critique, alors elle devient un trou noir .
  - Pour le soleil , le calcul donne un  $r_s$  d'environ 3km, donc bien plus petit que son rayon réel. Le soleil n'est évidemment pas un trou noir.



Nota : En unité conventionnelle  $r_s = 2GM/c^2$  , en unité relativiste  $c=1$  et donc  $r_s = 2GM$   
Et G est la constante de gravitation de Newton

# Coordonnées temps $t$ et temps propre $\tau$



**L'observateur 1** à l' $\infty$   
mesure le temps de  
l'événement A avec sa  
coordonnée  $t$

**L'observateur 2** dans la  
fusée en mouvement au  
niveau de l'événement A  
mesure le temps avec sa  
propre horloge appelé  
"temps propre  $\tau$ "

**Trou noir**

*Dans un univers plat sans effet de la gravitation décrit par la Relativité Restreinte, on passe de  $t$  à  $\tau$  par la formule de Lorentz  $\tau = t \sqrt{1-(v/c)^2}$   
Dans la Relativité Générale qui prend en compte la gravitation, il n'y a pas de relation simple entre  $t$  et  $\tau$ . Observateur de Weyl voir L'Astronomie mag. N°93 p.36*

## HISTORIQUE - III

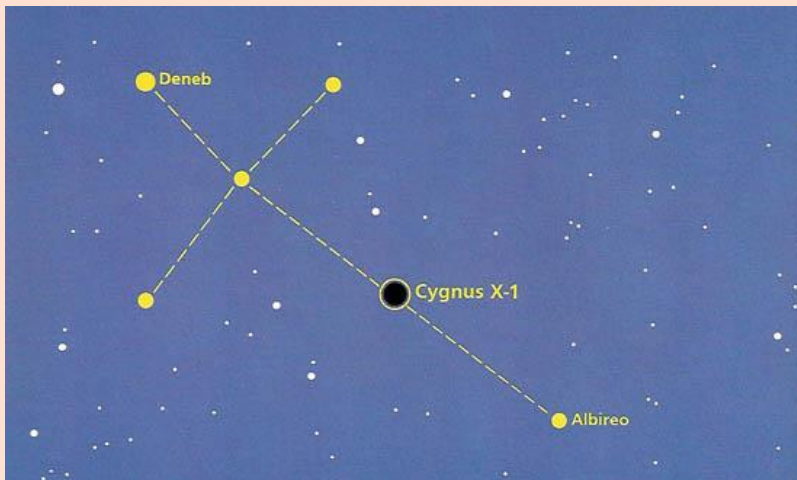
- **Les années 1960** : la découverte des quasars, des pulsars (\*) et des sources X binaires ravivent les réflexions sur le destin ultime des étoiles massives en effondrement gravitationnel
- Le terme de 'trou noir' est utilisé pour la 1<sup>ère</sup> fois fin 1967 par John Wheeler



(\*) *Le premier pulsar (étoile à neutrons) découvert fut PSR 1919+21 en 1967, par Jocelyn Bell, .*

# HISTORIQUE - IV

- 1<sup>ère</sup> observation d'un objet contenant un trou noir : une puissante source de rayons X issue de Cygnus X-1 par le satellite Uhuru en 1971



Cygnus X-1 est en fait une binaire composé d'une étoile supergéante et d'un trou noir. Distance 6 000 al

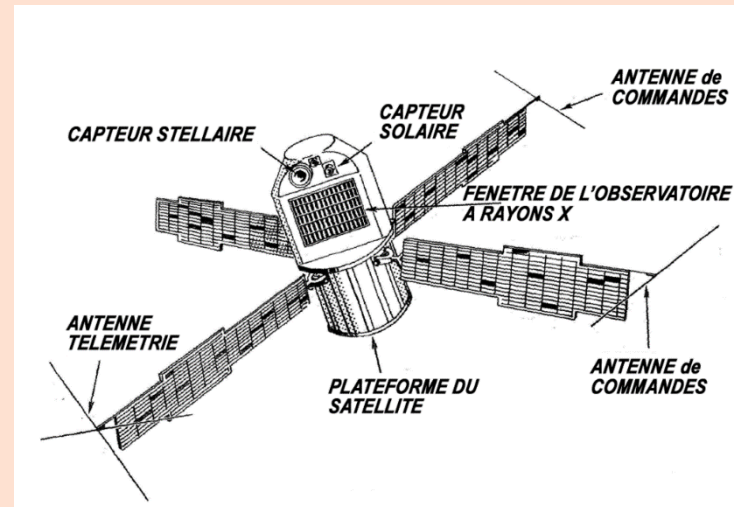


Image de Cyg X-1 (rayons X) prise par le télescope spatial CHANDRA

# HISTORIQUE – V : 21<sup>ÈME</sup> SIÈCLE – LES DÉCOUVERTES S'ACCÉLÈRENT ...

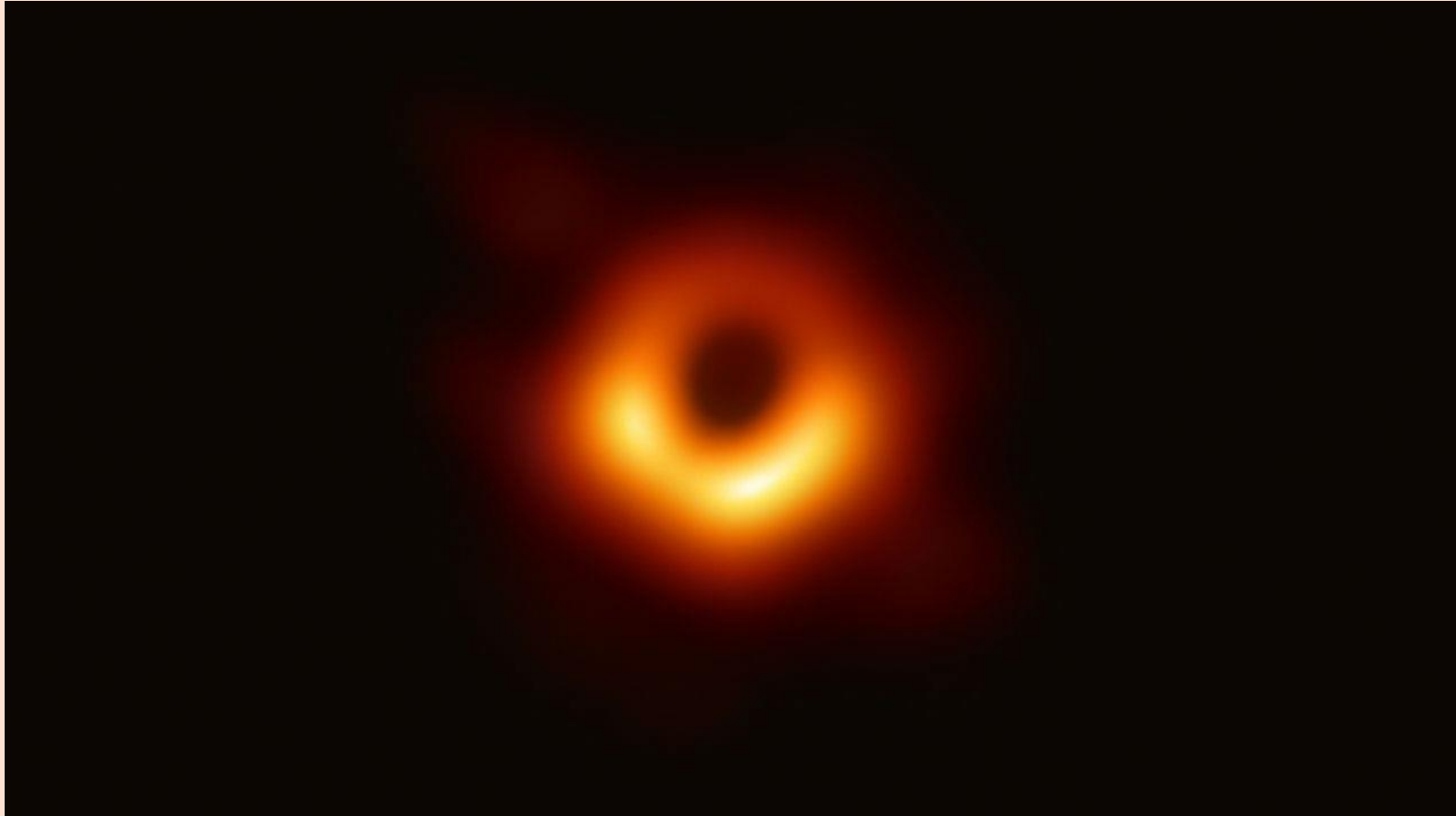


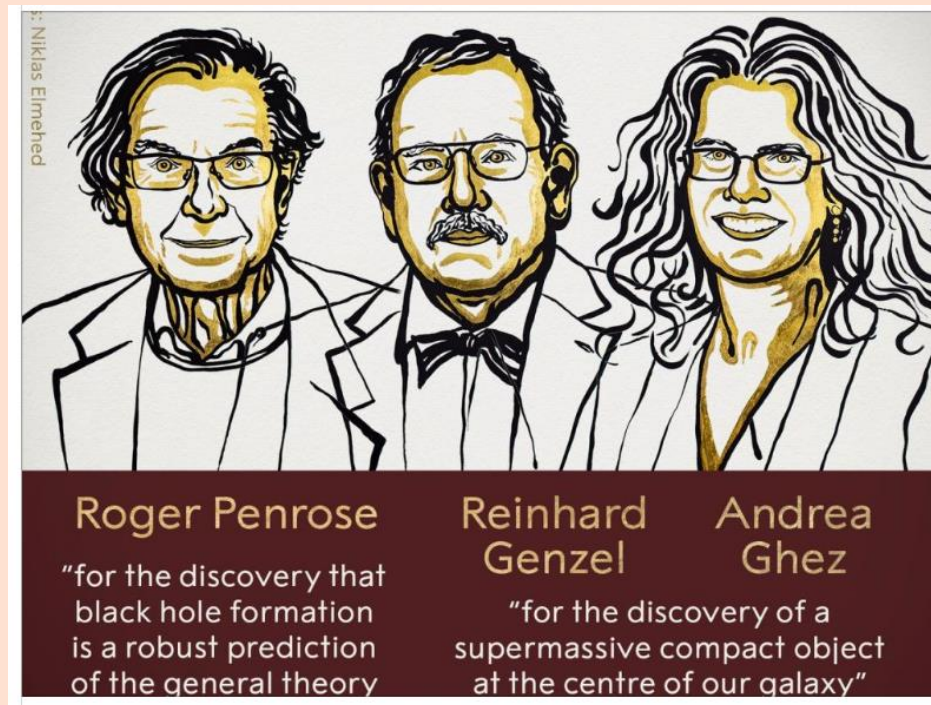
Photo du trou noir au cœur de M87 prise par le regroupement interférentiel de grands radiotélescopes mondiaux 'Event Horizon Telescope'

*(En fait le rayonnement de la brillante matière qui l'entoure )*

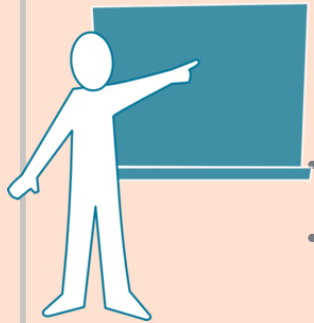
In 2017, astrophysicists took the **first photo of a black hole** (seen above)—one that lies 55 million light-years away from Earth in the Messier 87 (M87) galaxy—and noticed a shadow covering the red-hot plasma flowing into it. Using mathematical modeling and data collected with the Event Horizon Telescope, scientists built on this single snapshot and created a sequence of images using data from 2009 to 2017. Now, for the first time, they are seeing **how a black hole's appearance changes** through time, *Science News* reports. M87's black hole looks like a ring, and the brightest spot swiveled around the ring over the years; for example, the left side was brightest in 2011 but darkest in 2013. The black hole's changing appearance is **due to variations in its environment**, such as the strength of its magnetic fields, how fast it spins, and its tilt.

## HISTORIQUE – V : 21<sup>ÈME</sup> SIÈCLE – LES DÉCOUVERTES SONT RÉCOMPENSÉES

- Le Britannique Roger Penrose, l'Allemand Reinhard Genzel du Max-Planck-Institute (Garching, Allemagne) et l'Américaine Andrea Ghez ont reçu le prix Nobel de physique 2020 pour leur découverte sur les trous noirs, avec des approches théoriques, observationnelles et instrumentales.



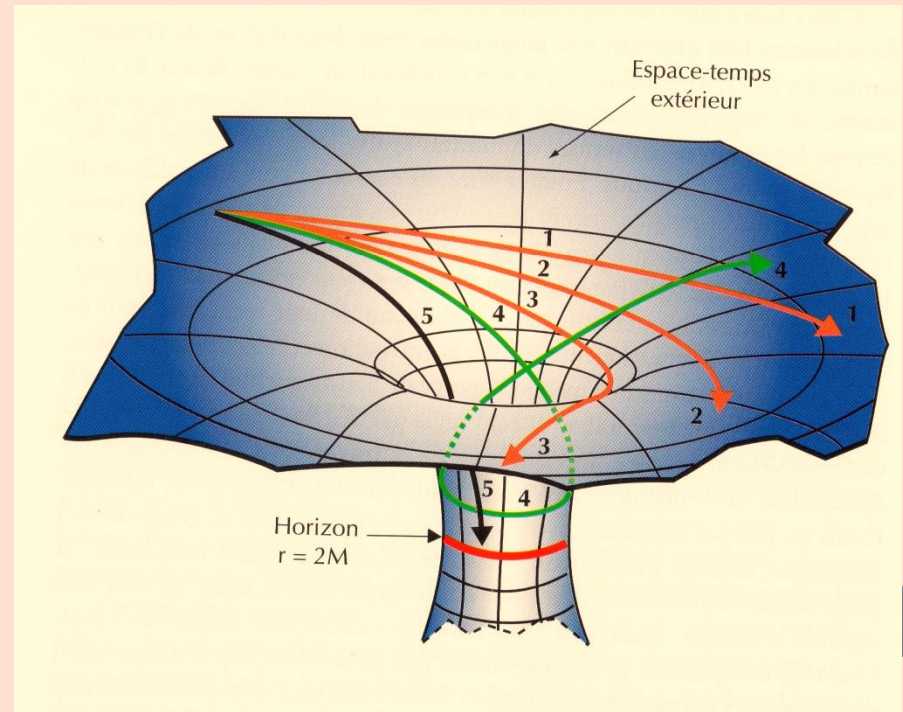
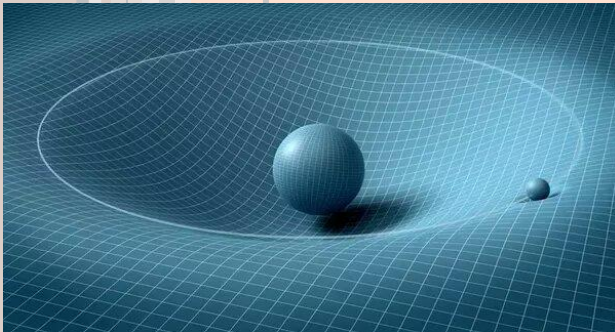
# LES TROUS NOIRS : OBJET MATHÉMATIQUE



*Auparavant, rappelons des notions sur :*

La représentation classique de l'espace et du temps

- Quelques propriétés de la relativité générale

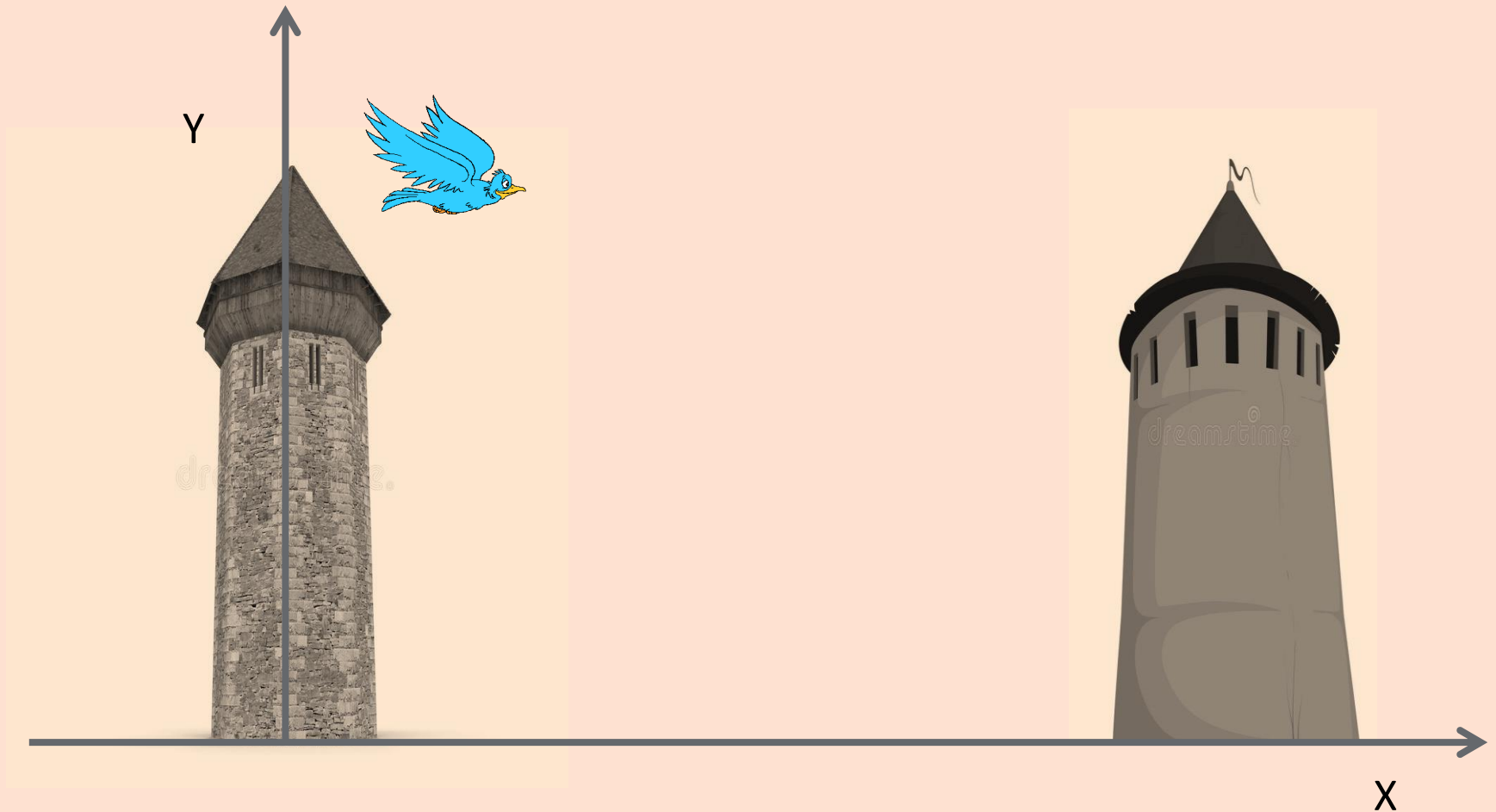


# REPRÉSENTATION CLASSIQUE DU MOUVEMENT DANS L'ESPACE ET DANS LE TEMPS

16

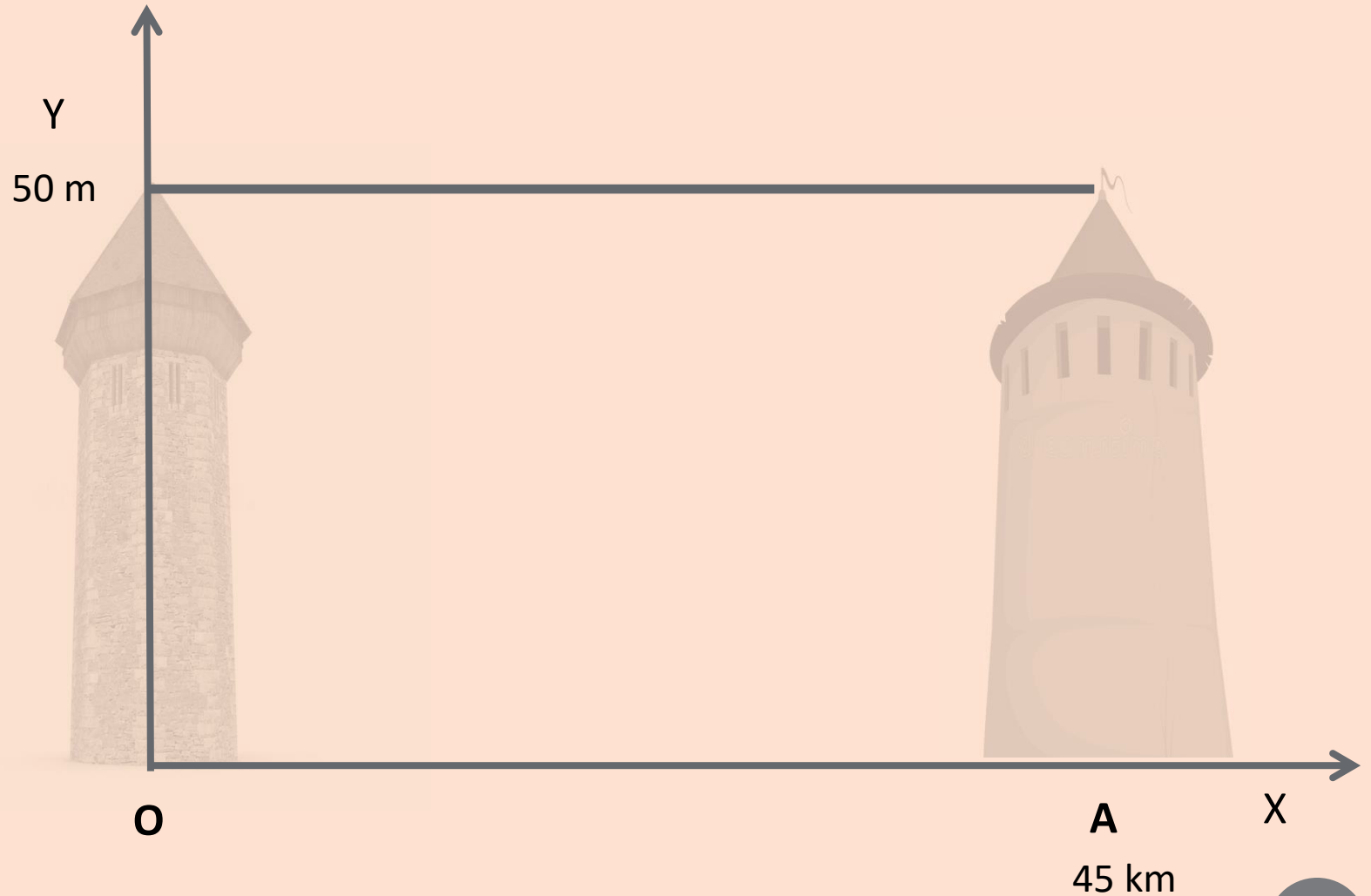


## ESPACE : REPRÉSENTATION D'UNE TRAJECTOIRE



**Exemple** : un pigeon s'envole entre 2 tours de même hauteur distantes de 45 km  
On définit ici un espace à 2 dimensions x et y

# REPRÉSENTATION GRAPHIQUE D'UNE TRAJECTOIRE



Un espace représenté ici en 2 dimensions x & y :  
trajectoire d'un pigeon entre 2 tours

# REPRÉSENTATION GRAPHIQUE ESPACE

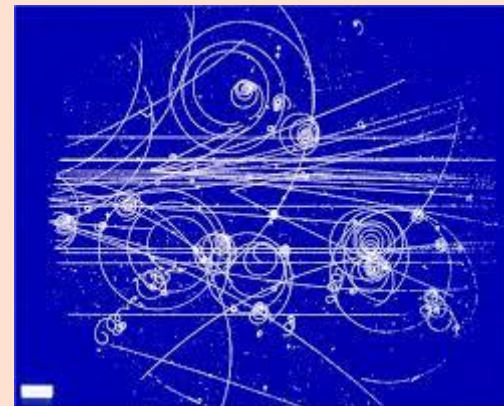
*La représentation graphique des déplacements dans l'espace en 2 ou 3 D ( $x, y, z$ ) est intuitive car elle correspond à une notion que l'être humain peut souvent visualiser*



Trajectoire d'un avion

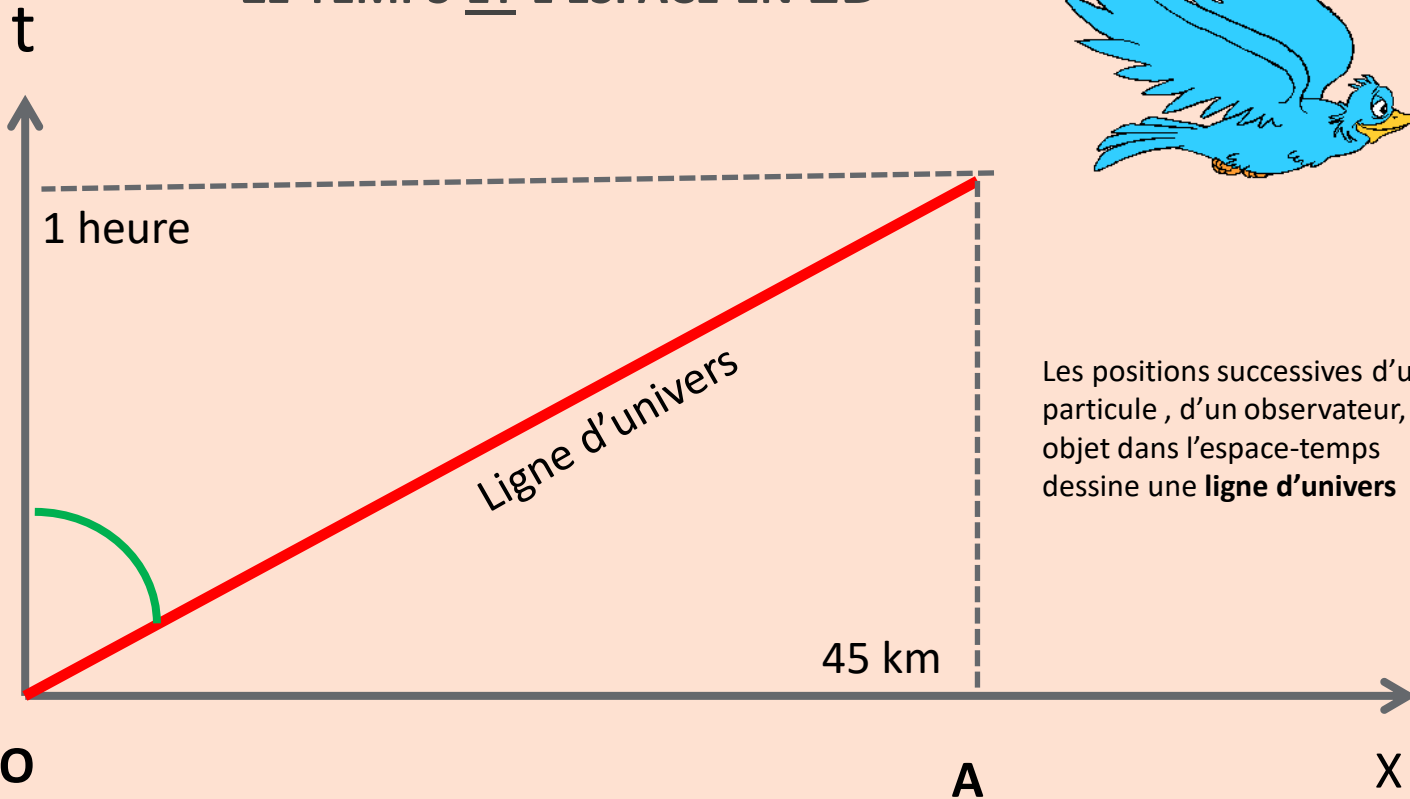


Déplacement dans la neige



Chambre à bulles: trajectoire de particules

## LE TEMPS ET L'ESPACE EN 2D



Les positions successives d'une particule, d'un observateur, d'un objet dans l'espace-temps dessine une **ligne d'univers**

Le même exemple de déplacement représenté dans un diagramme en 2 dimensions :

- $x$  : Espace (on a gardé ici seulement la longueur en  $x$ )
- $t$  : Temps

*Dans cet exemple, l'intégration du temps dans la représentation graphique mathématique reste simple mais devient moins intuitive.*

## LE TEMPS ET L'ESPACE

○ **Question pour un champion** : Quelle est la forme de votre ligne d'univers quand vous faites un tour de manège ?



- A) Une droite oblique
- B) Un cercle
- C) Un point
- D) Une hélice
- E) Une ellipse

# IMAGES DE LIGNE D'UNIVERS

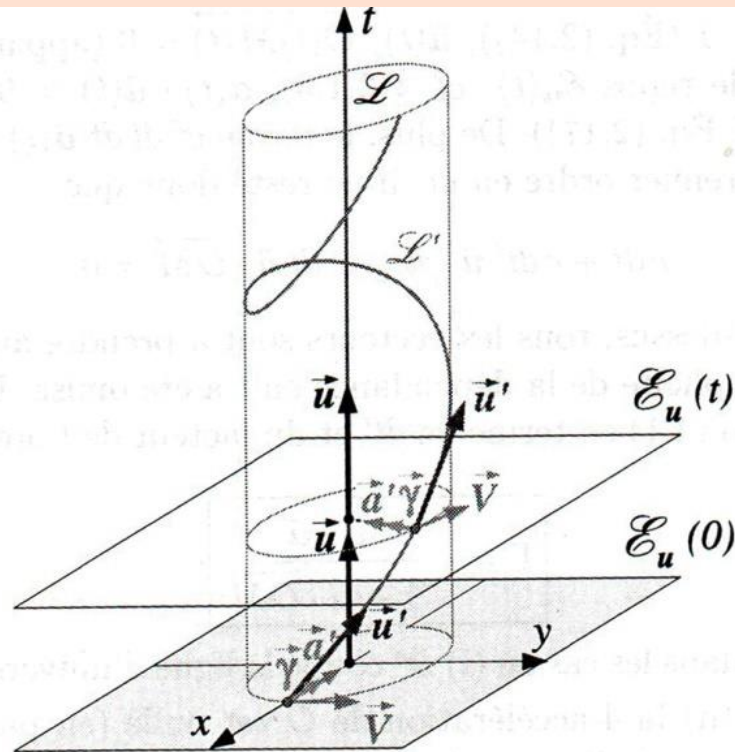


FIG. 4.4 – Exemple 3 : mouvement circulaire uniforme.

## Réponse D

**Tour de manège dans  
l'espace-temps =  
une hélice !**

Quand vous avez fait un tour,  
vous avez vieilli de qq minutes !,  
vous vous êtes aussi déplacés  
dans le temps

*Toujours la difficulté d'intégrer le temps =>*

Représentation en 3D : 2 espace, 1 temps

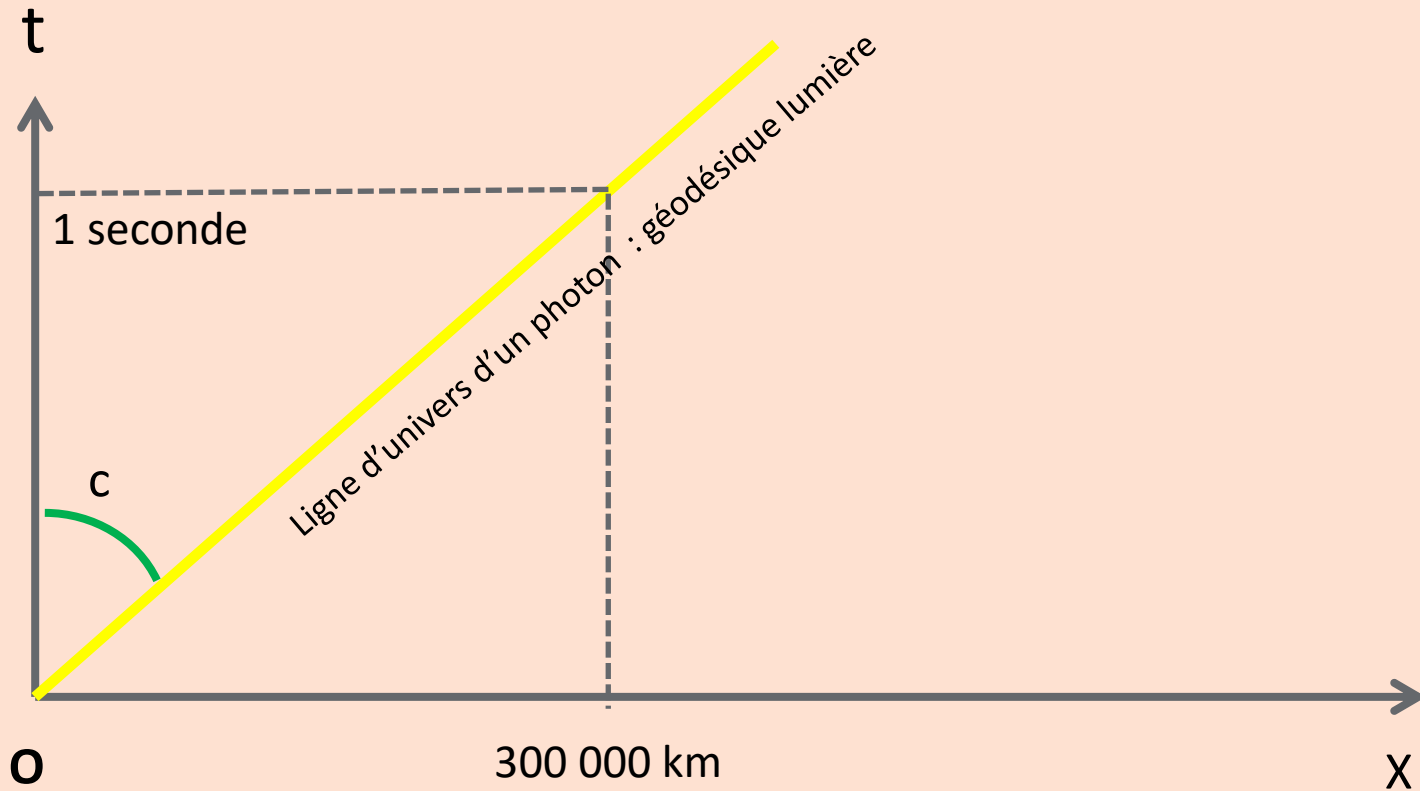


## REPRÉSENTATION GRAPHIQUE : IDEM AVEC UN PHOTON



Un espace représenté ici en 2 dimensions x & y :  
trajectoire d'un photon

## LE TEMPS ET L'ESPACE : DÉPLACEMENT D'UN PHOTON



Le même exemple de déplacement représenté dans un diagramme en 2 dimensions :

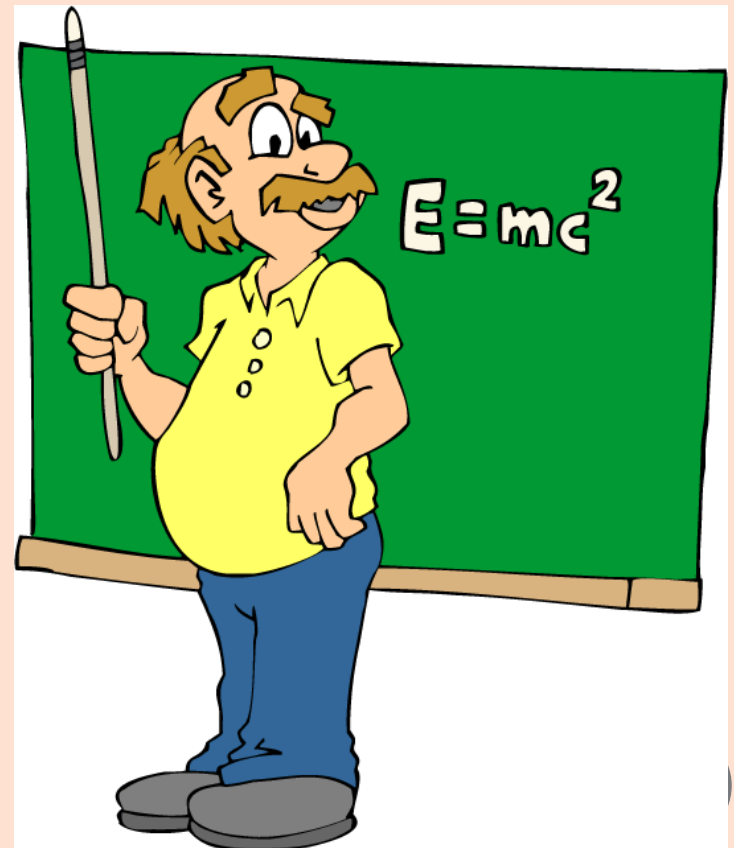
- $x$  : Espace (on a gardé ici seulement la longueur en  $x$ ) et  $t$  : Temps
- Pour la lumière, par convention on représente la ligne d'univers à  $45^\circ$ , c'est-à-dire en  $x$ , à une seconde lumière, on fait correspondre une seconde en temps.



# UNE DES PROPRIÉTÉS DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE :

## COURBURE ESPACE-TEMPS SOUS L'ANGLE DE LA COURBURE DES RAYONS LUMINEUX

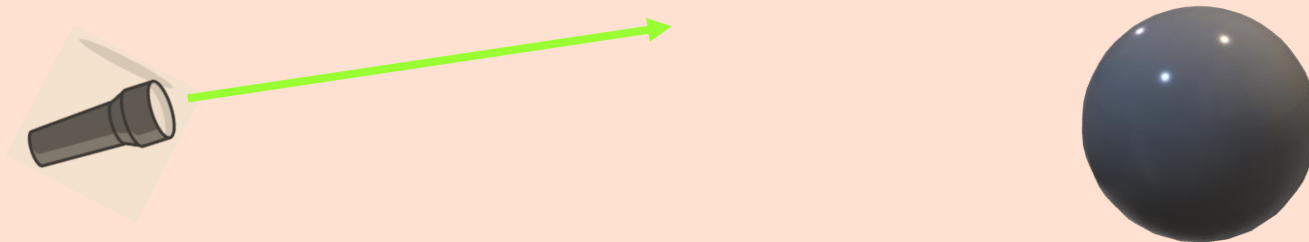
- **Rappel de la RG** : Il n'y a plus attraction des corps les uns par les autres, c'est une propriété intrinsèque de l'espace-temps qui impose un mouvement dont la cinématique est définie par la courbure de l'espace (et la vitesse initiale de l'objet).
- En particulier, les photons suivent une géodésique de cet espace ce qui produit, au voisinage des masses, une déviation des rayons lumineux par rapport à une trajectoire rectiligne





*Et donc dans la RG, comment illustrer le déplacement d'un photon près d'un trou noir ?*

- l'espace-temps est à 4 dimensions, notre imagination n'est pas d'un grand secours !*
- Les équations (solution de Schwarzschild) sont complexes !*



**Graphiquement** : Il nous faut raisonner par analogie avec des espaces de dimensions inférieures à savoir une surface, espace à 2D.

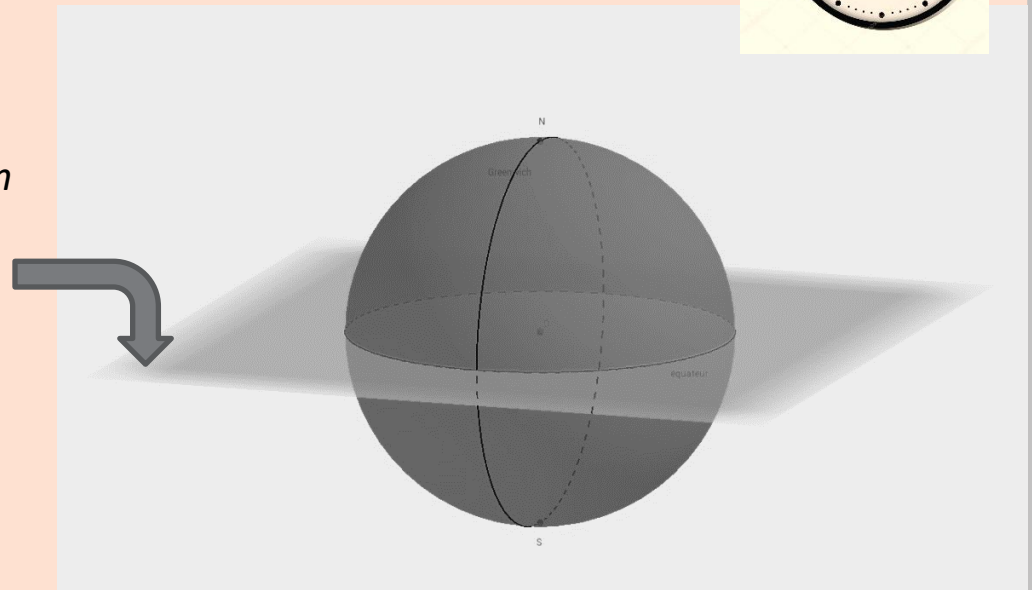
( cette méthode est appelée plongement )



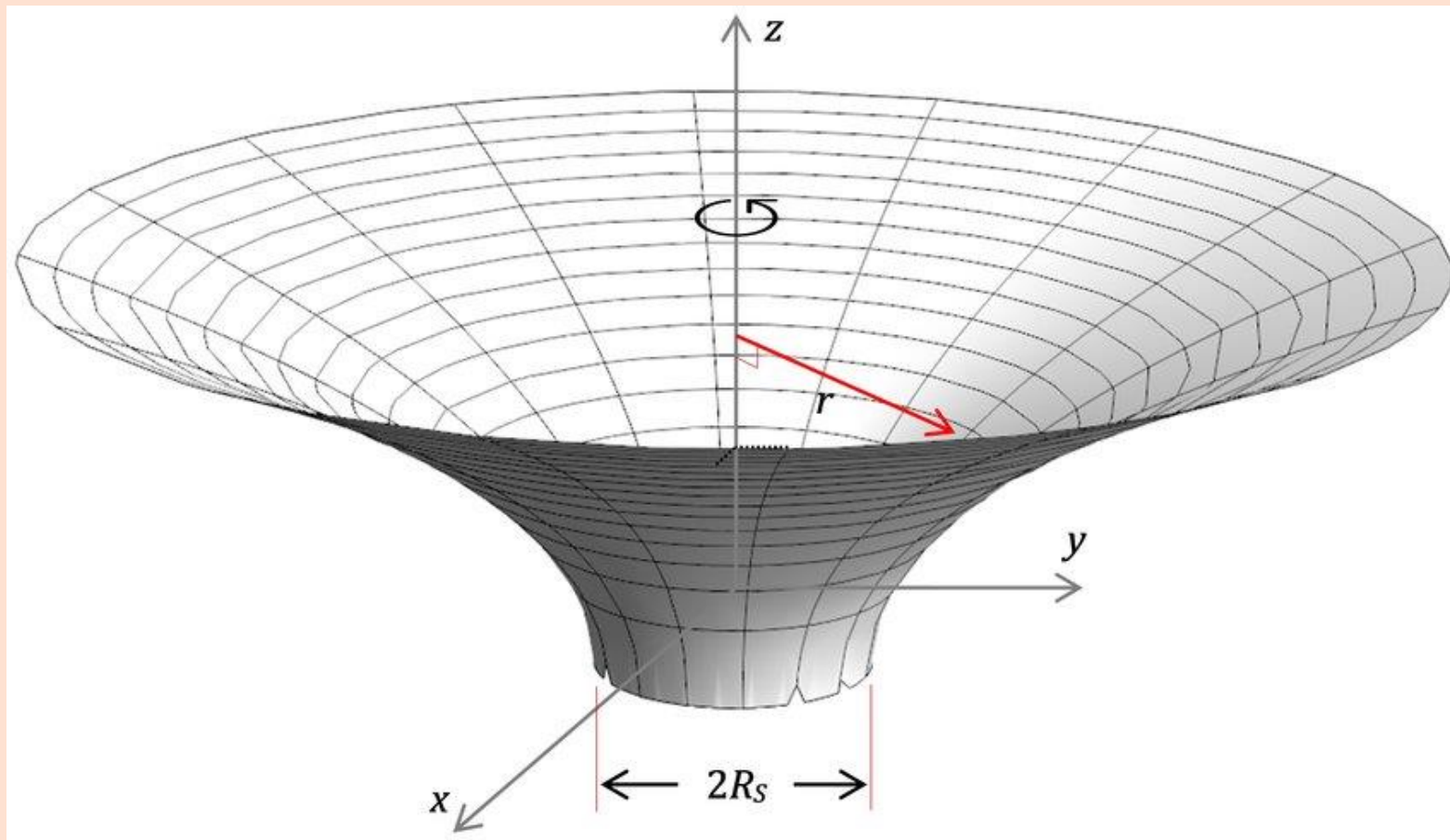
On va considérer que le déplacement du photon se fait dans le plan équatorial à un instant donné. On n'a donc plus que 2 dimensions :  $r$  ( coordonnée radiale ) et l'angle  $\phi$ .

La métrique de Schwarzschild appliquée à ce plan reste cependant abstraite.

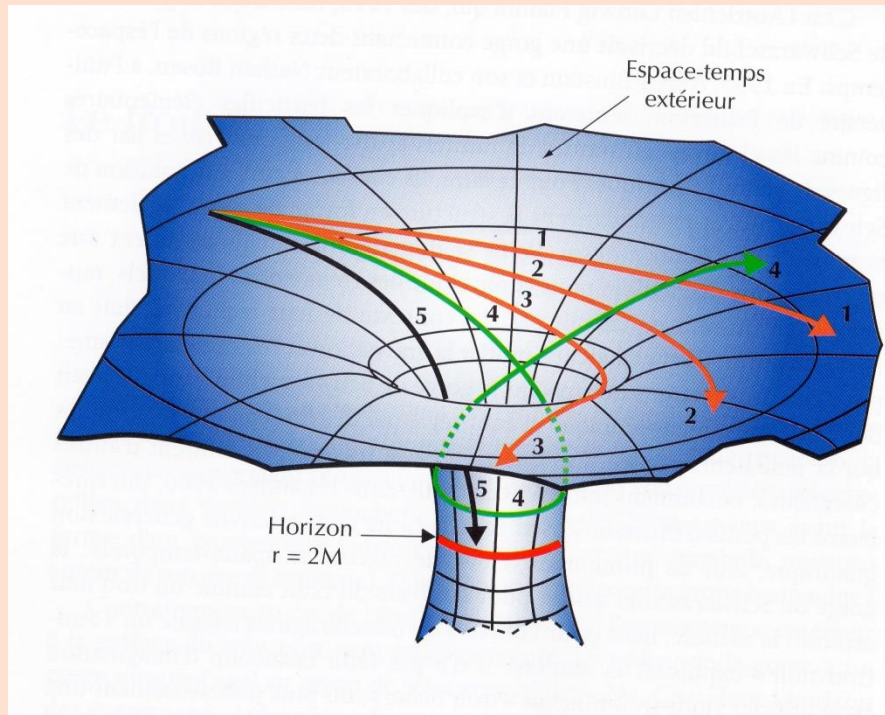
Il se trouve cependant qu'une surface appelée **paraboloïde de Flamm** a les mêmes propriétés géométriques ...



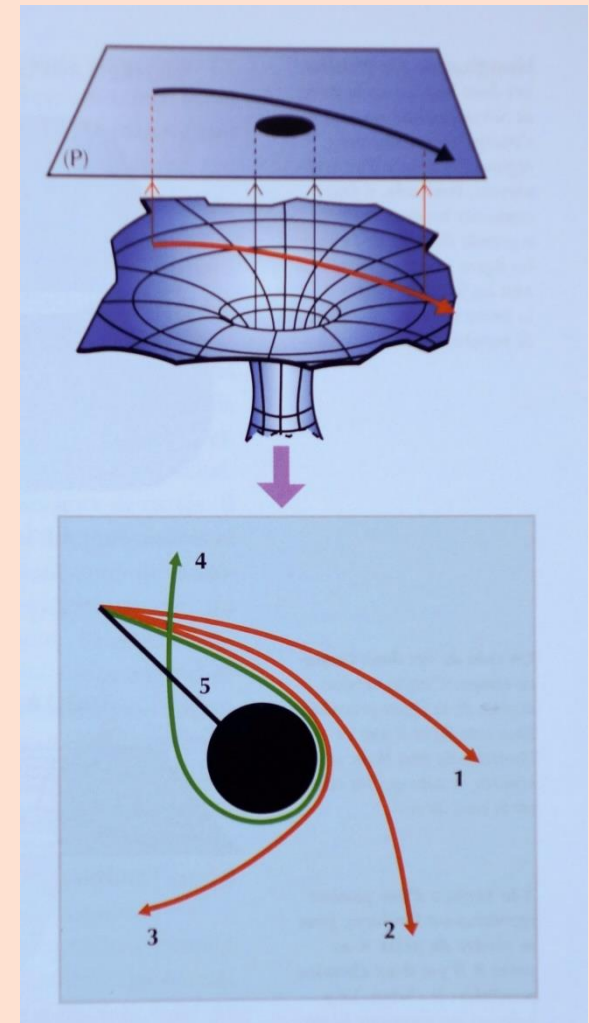
# PARABOLOÏDE DE FLAMM : LA REPRÉSENTATION ICONIQUE D'UN TROU NOIR !



# COURBURE ESPACE TEMPS D'UN TROU NOIR



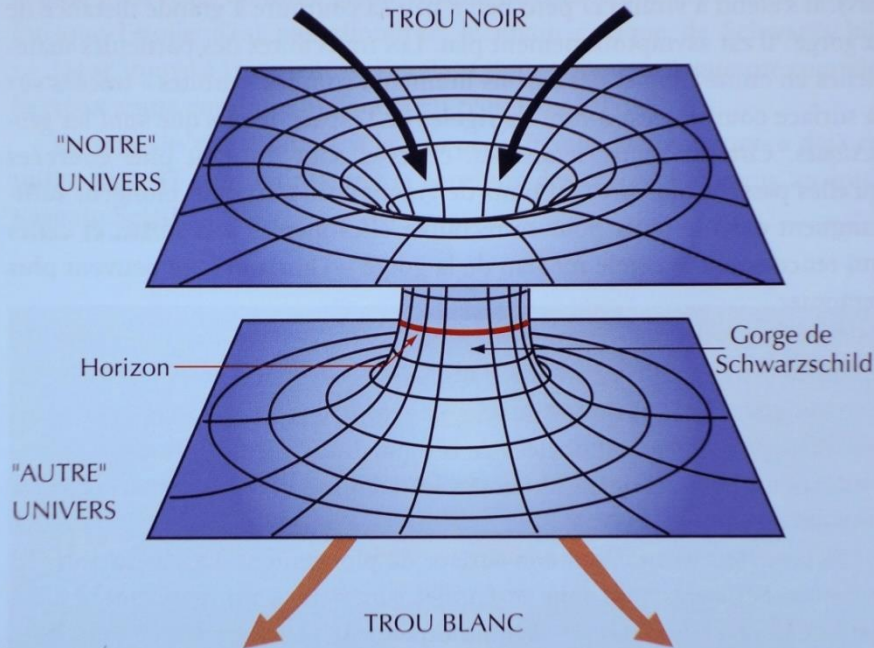
Géodésiques de l'espace temps de Schwarzschild. Les 5 géodésiques dessinées sur la surface de plongement représentent des trajectoires possibles de corps en chute libre passant plus ou moins près du trou noir. Les géodésiques 1, 2, 3 sont de plus en plus infléchies par la courbure. La géodésique 4 plonge dans le puits et se recoupe elle-même en ressortant. La géodésique 5 tombe radialement dans le trou et ne remonte pas.



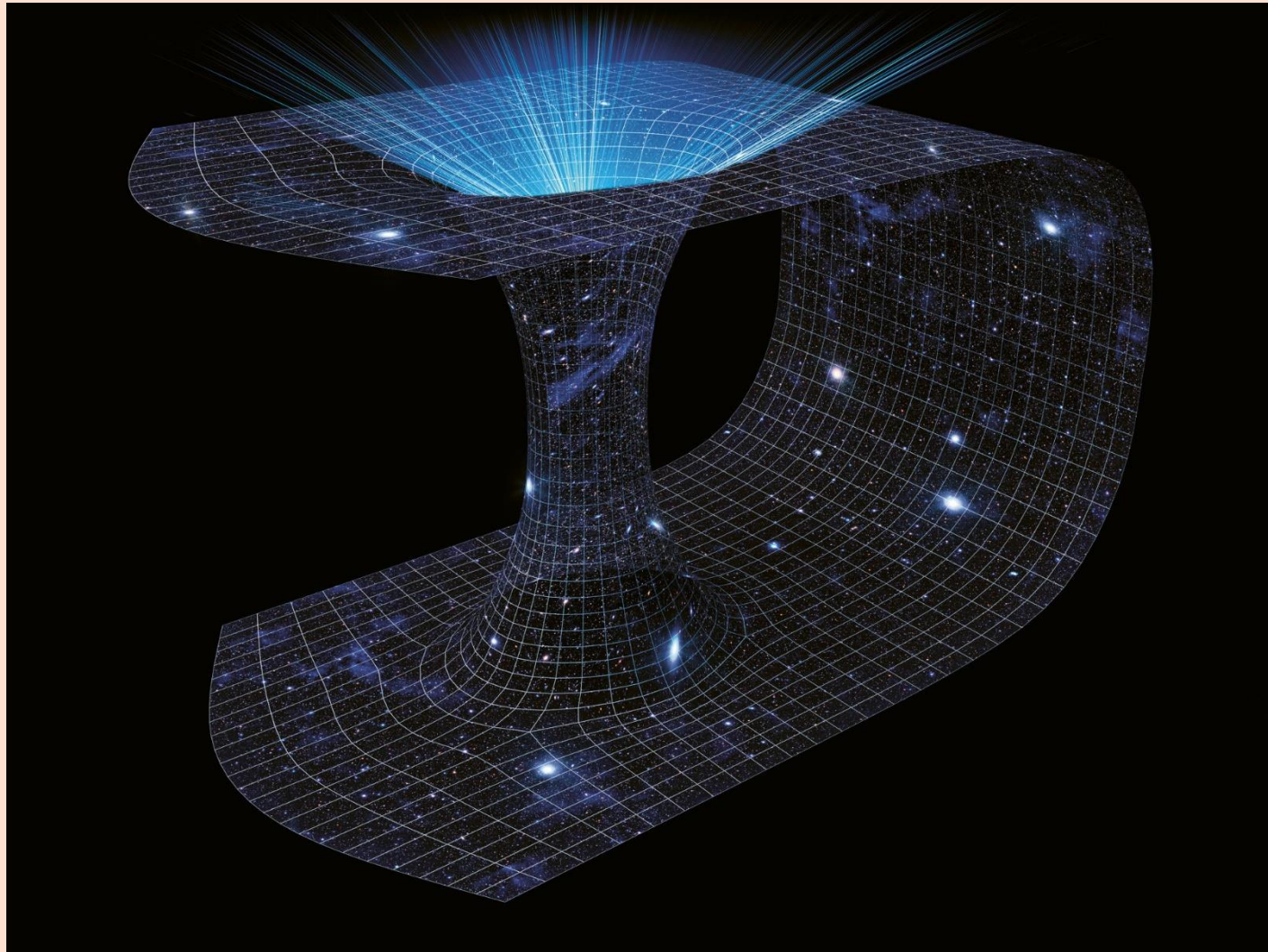
Ici les géodésiques précédentes sont projetées sur un plan P // au cercle horizon. Le résultat illustre parfaitement le principe d'équivalence en rendant l'illusion newtonienne d'un univers plat dans lequel les particules sont déviées de la ligne droite par des forces de gravitation au lieu d'épouser librement les contours d'une géométrie courbe sous-jacente

# EXTRAPOLATION MATHÉMATIQUE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE AUX TROUS NOIRS

Plongement de l'espace-temps de Schwarzschild.  
La gorge de Schwarzschild connecte « notre » univers (feuillelet supérieur) à un « autre » univers (feuillelet inférieur).

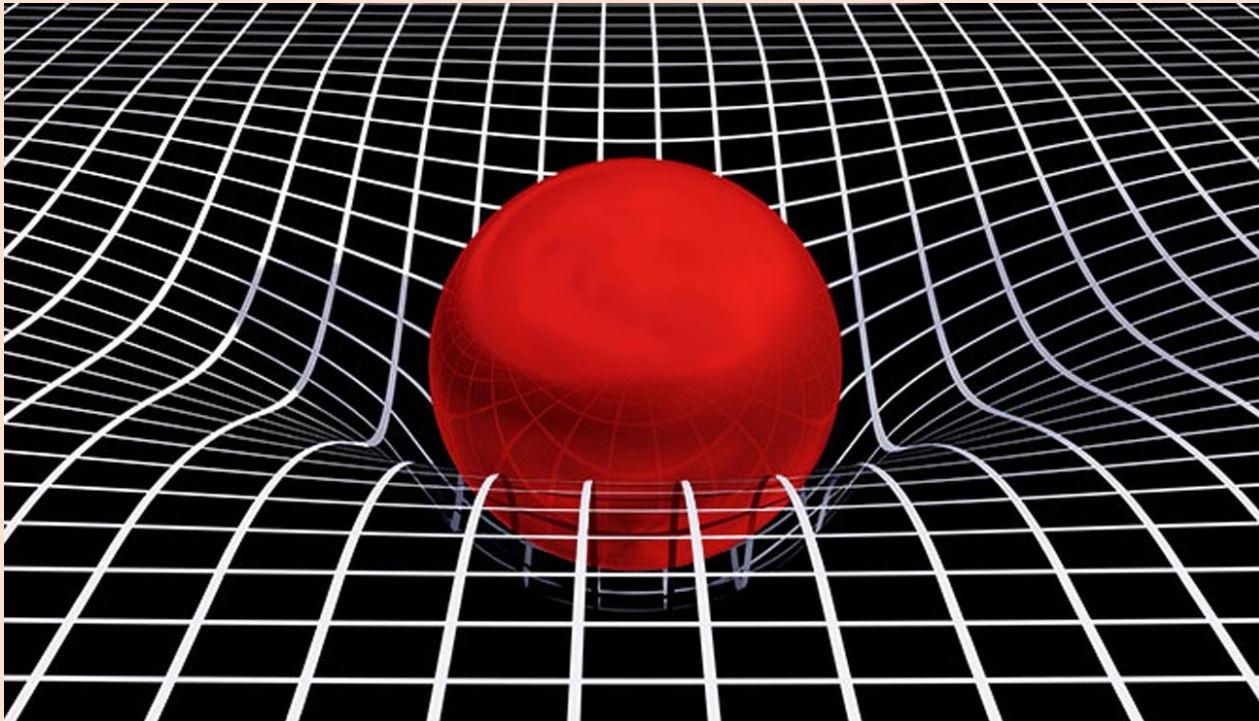


Alain Riazuelo, astrophysicien : « *La théorie n'interdit pas les trous de vers. Ils peuvent théoriquement exister mais probablement pas réellement* »



*Néanmoins les spéculations théoriques continuent de plus belle notamment avec les TN de Kerr ...*

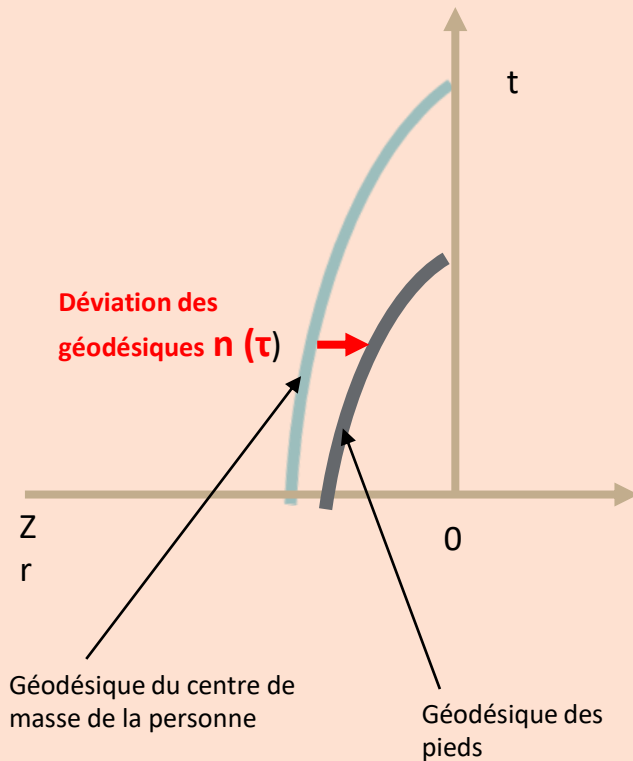
Attention : *La représentation suivante « l'équivalent d'une boule sur un drap tendu » que l'on voit assez fréquemment amène plus de confusions que de compréhension !*



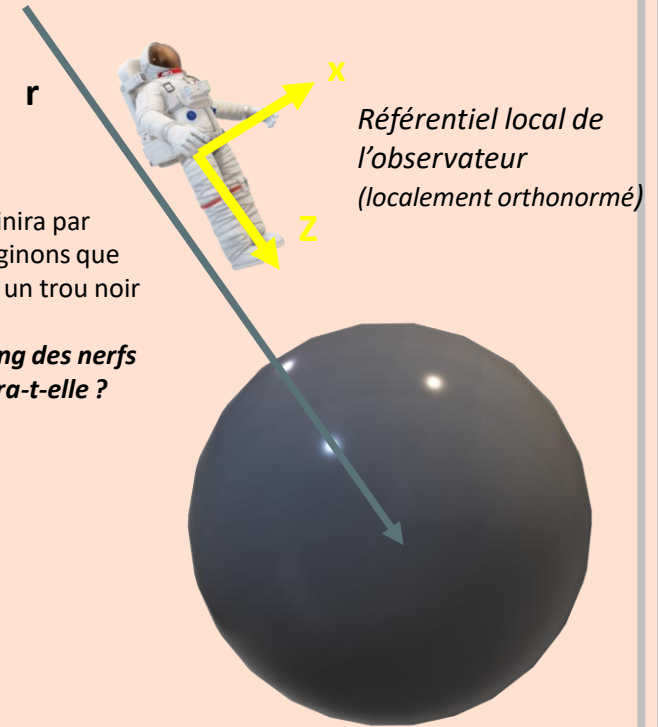


# COURBURE ESPACE-TEMPS :

## EXEMPLE CHUTE DANS UN TROU NOIR - FORCE DE MARÉE



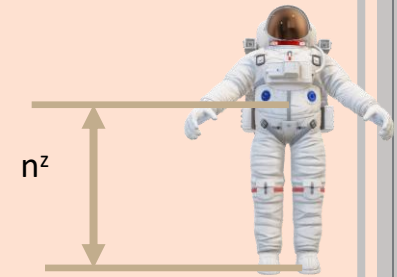
Une personne tombant dans un trou noir finira par être déchirée par les forces de marée. Imaginons que la personne tombe les pieds en avant dans un trou noir, depuis une position de repos à l'infini. **Sachant que la douleur est transmise le long des nerfs à une vitesse de  $1m/s$ , la personne souffrira-t-elle ?**



Les 2 géodésiques sont parallèles à  $\tau=0$ . Elles vont s'écarter progressivement, l'écart est mesuré par le quadri-vecteur  $n$

## COURBURE ESPACE-TEMPS : CHUTE DANS UN TROU NOIR - FORCE DE MARÉE

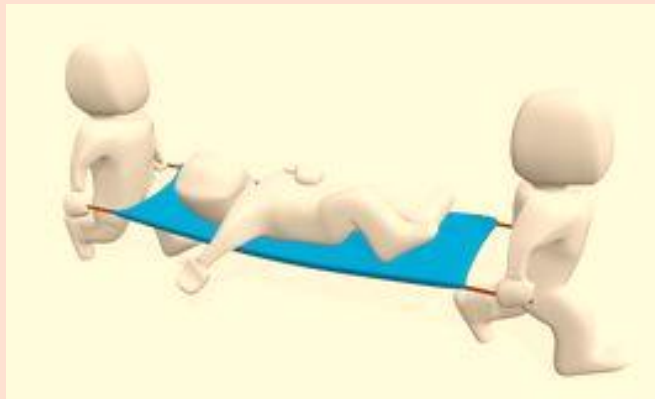
- Au cours du déplacement vers le trou noir, un objet, telle qu'une personne, qui a une assez grande dimension, aura son centre de masse qui suit une géodésique différente de ses extrémités. Ceci implique une force de tension croissante au fur et à mesure que ces géodésiques divergent. En termes pratiques, une personne standard peut tenir une accélération de 5G (5 fois l'accélération due à la gravité à la surface de la Terre) le long de sa direction verticale avant de perdre conscience.
- En partant de l'estimation où la vitesse de la douleur est environ 1 m/s, il en résulte que la personne n'aura pas le temps de la ressentir. En effet ce temps  $\tau$  de remontée de la douleur sera de 1s comparé au 0,2 s de la durée de la chute entre le moment où l'accélération atteint 5G et l'arrivée à la singularité



### SPAGHETTIFICATION.

A real term that describes what happens when matter gets too close to a black hole. It's squeezed horizontally and stretched vertically, resembling a noodle.

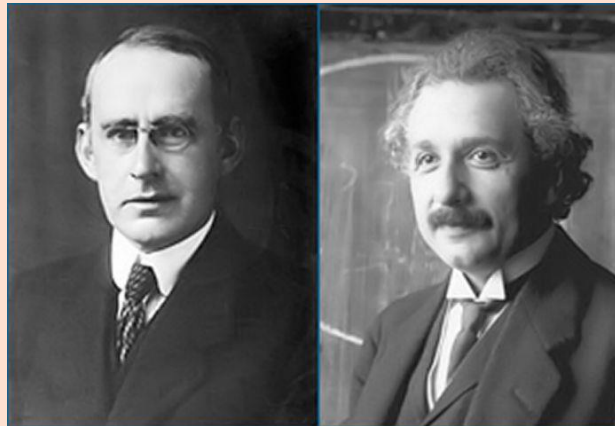
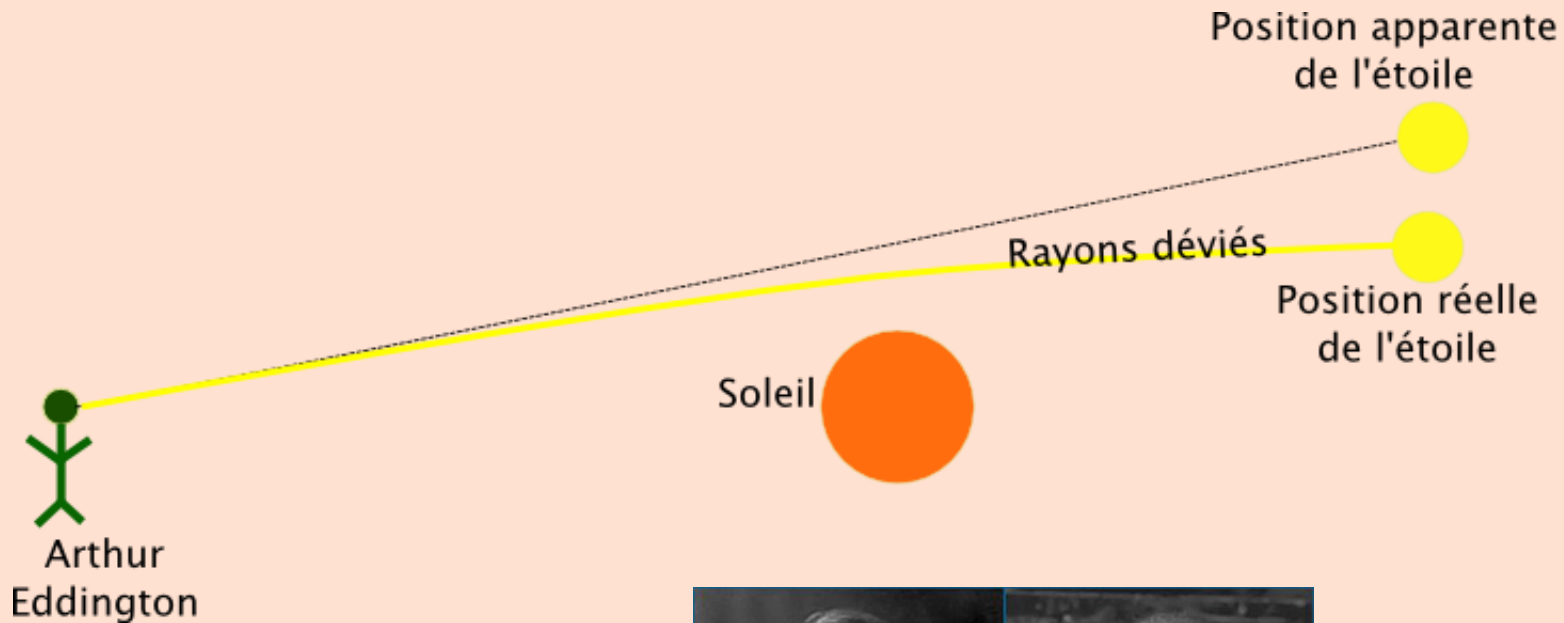
ON POURSUIT !



OUI, mais seulement dans l'espace 3D,  
on laisse le temps de côté ...



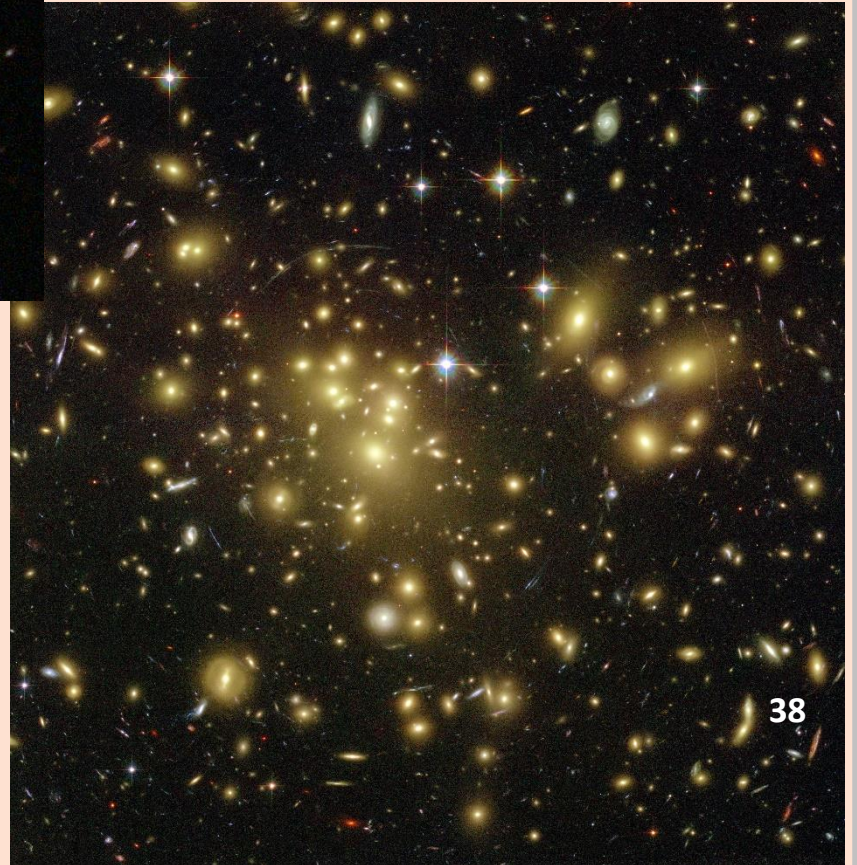
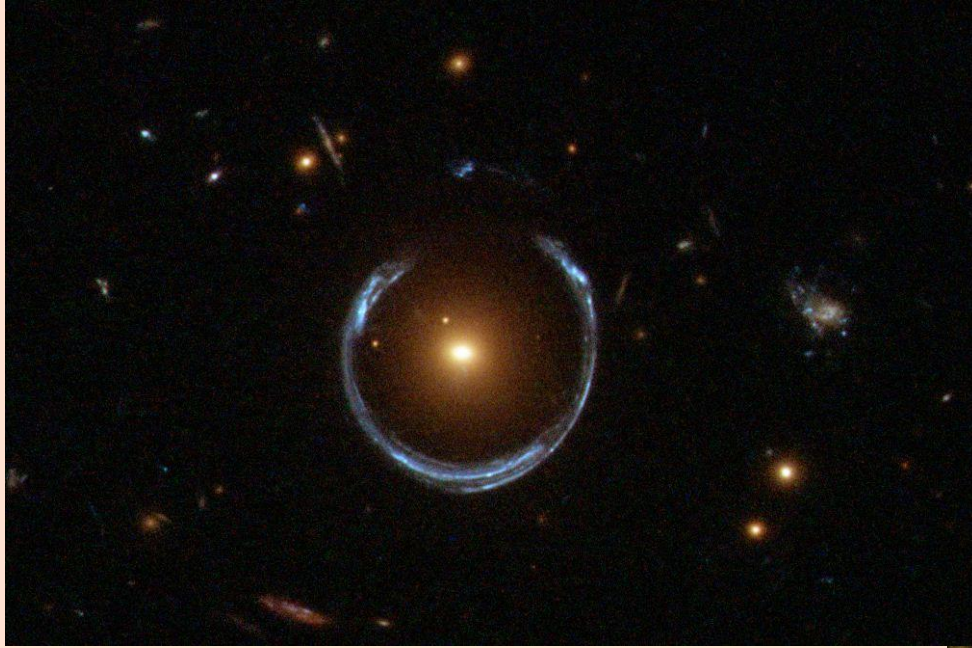
# COURBURE ESPACE-TEMPS : DÉVIATION DES RAYONS LUMINEUX



Calculé par Einstein en 1915, vérifié par Eddington en mai 1919 lors d'une éclipse

# COURBURE ESPACE-TEMPS : DÉVIATION DES RAYONS LUMINEUX

## PHOTO HUBBLE LENTILLE GRAVITATIONNELLE



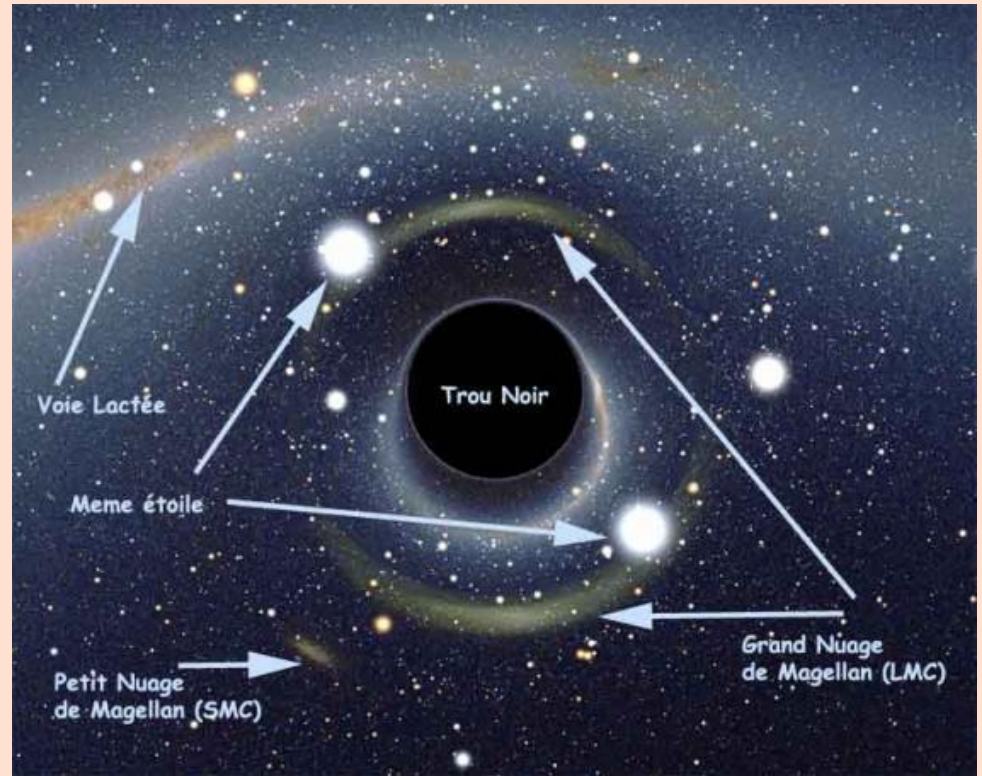
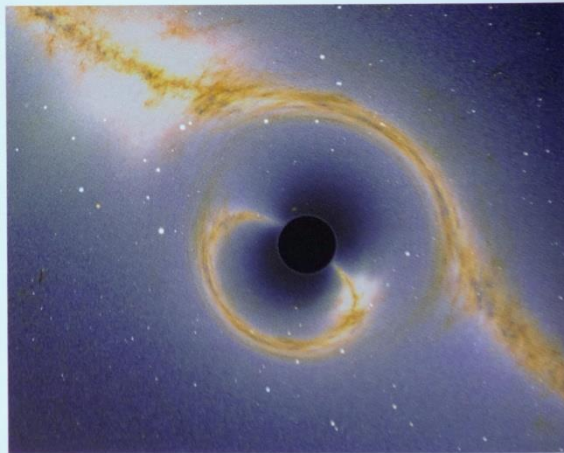
## LENTILLE GRAVITATIONNELLE : SIMULATION AVEC UNE GALAXIE



[www.eso.org](http://www.eso.org)

Les effets sont beaucoup plus marqués avec un trou noir ...

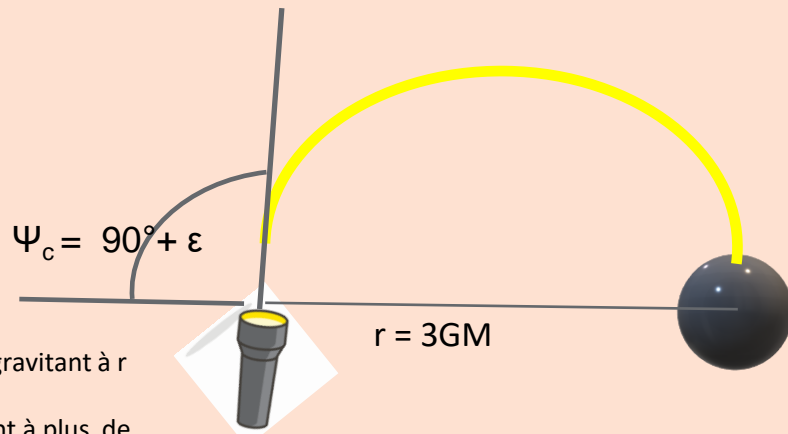
# COURBURE ESPACE TEMPS D'UN TROU NOIR



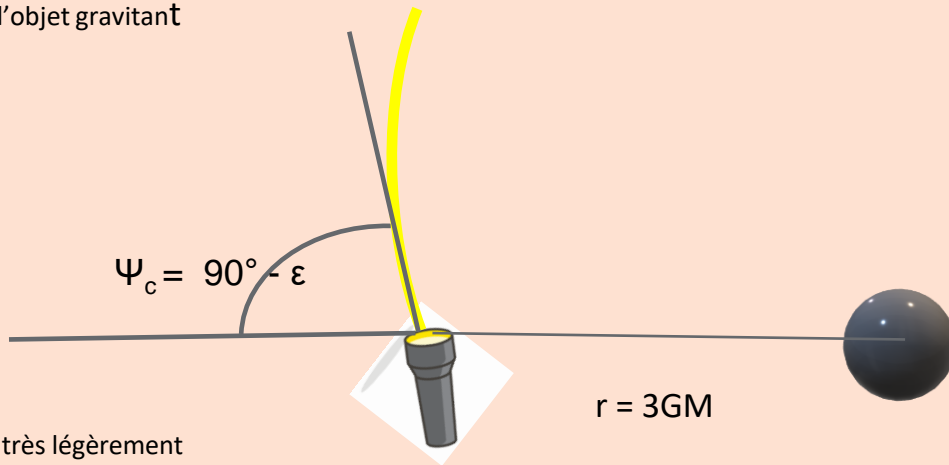
*Développement voir film  
simulation d'Alain Riazuelo*



# TROU NOIR : ORBITE DE PHOTON , ILLUSTRATION DE DIFFÉRENTS CAS À LA DISTANCE $r = 3GM$



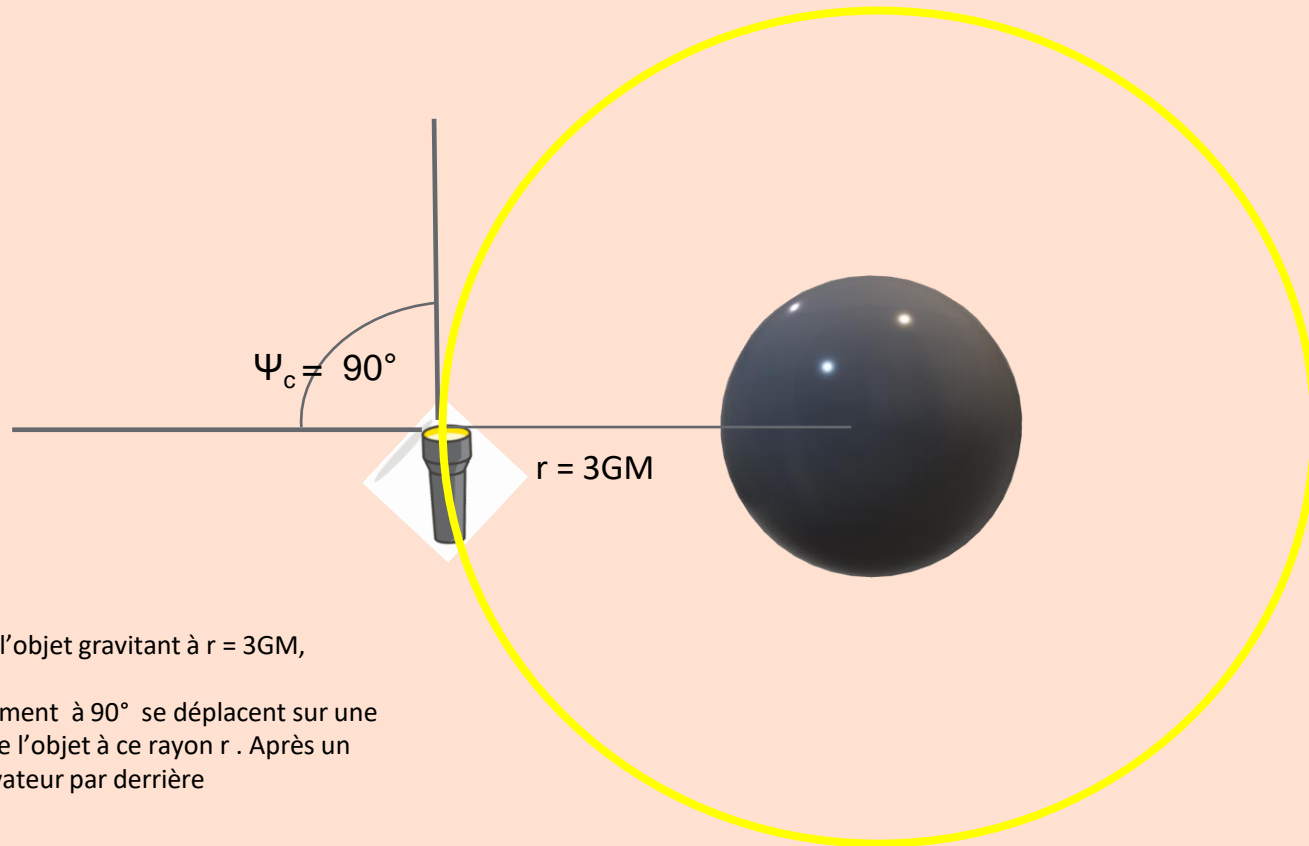
Quand on s'approche de l'objet gravitant à  $r = 3GM$ , l'angle critique est  $90^\circ$ .  
Les photons émis très légèrement à plus de  $90^\circ$  seront captés par l'objet gravitant



Les photons émis très légèrement à moins de  $90^\circ$  pourront s'échapper

Nota : Schéma non à l'échelle du trou noir, son horizon fait  $r = 2GM$

## ORBITE DE PHOTON : ILLUSTRATION DE DIFFÉRENTS CAS



Quand on s'approche de l'objet gravitant à  $r = 3GM$ , l'angle critique est  $90^\circ$ .

Les photons émis exactement à  $90^\circ$  se déplacent sur une orbite circulaire autour de l'objet à ce rayon  $r$ . Après un tour, ils éclairent l'observateur par derrière

# LES TYPES THÉORIQUES DE TROUS NOIRS

( APPLICATIONS MATHÉMATIQUES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE )

- Un trou noir est caractérisé par 3 grandeurs :
  - Masse  $M$
  - Moment cinétique  $Q$  ( énergie de rotation )
  - Charge électrique  $J$
- $Q$  et  $J$  pouvant être nul, il y a 4 cas théoriques de trous noirs

	$M > 0$	
	$Q = 0$	$Q \neq 0$
$J = 0$	Schwarzschild	Reissner- Nordström
$J \neq 0$	Kerr	Kerr-Newman

- Seuls les trous noirs de **Kerr** présentent un véritable intérêt astrophysique car ils correspondent au modèle observé à ce jour : un trou noir qui absorbe la matière environnante via un **disque d'accrétion** tournant en spirale .
- Il reste possible que des trous noirs à moment cinétique faible type **Schwarzschild** existe
- Les 2 autres cas sont des hypothèses improbables dans la nature.

# DISQUE D'ACCRÉTION

- La matière qui tombe sur un trou noir forme un disque d'accrétion. Son image est déformé par la courbure des rayons lumineux

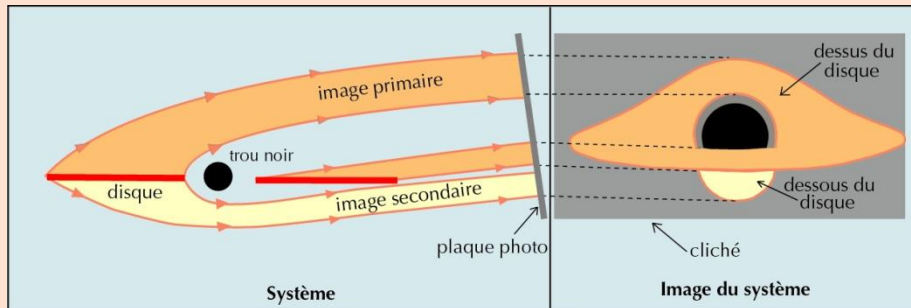
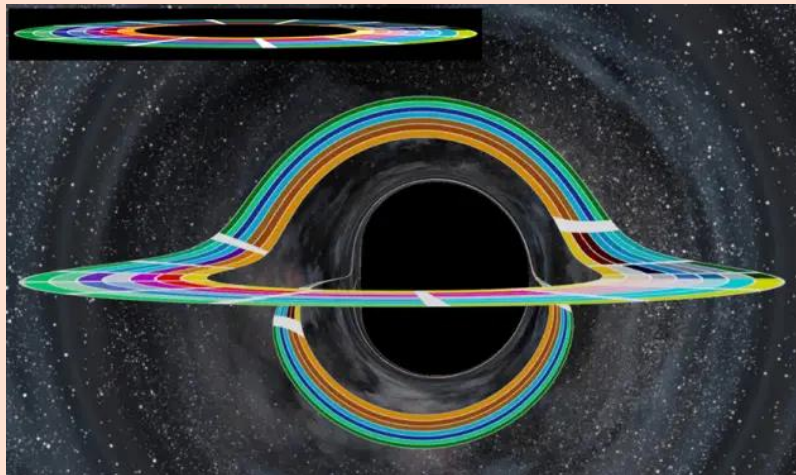


Schéma du disque d'accrétion et son image tel qu'il serait vu ( courbure des rayons lumineux) . *Etude de JP LUMINET (1979)*

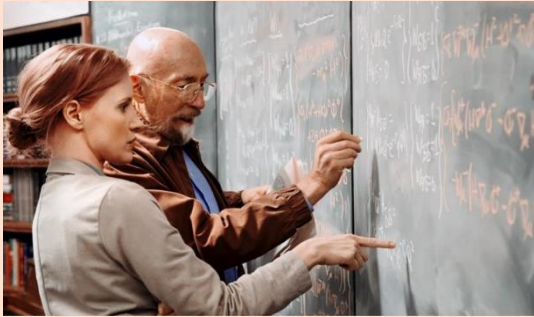


Etude de Kip Thorne – astrophysicien – conseiller scientifique du film Interstellar



Images calculée par JA Marck (1996)

# REPRIS DANS LE FILM INTERSTELLAR !



Kip Thorne et Jessica Chastain



Gargantua :  
Apparence d'un TN  
de 100 millions de  
ms en rotation  
limite de la  
maximale  
autorisée



## II) LES TROUS NOIRS : OBJETS ASTROPHYSIQUES

- **Classification des trous noirs**
- **Formations des trous noirs stellaires**
- **Observations actuelles**
  - Trous noirs stellaires
  - Trous noirs supermassifs

# LES 4 CLASSES DE TROUS NOIRS ( ASTROPHYSIQUE)

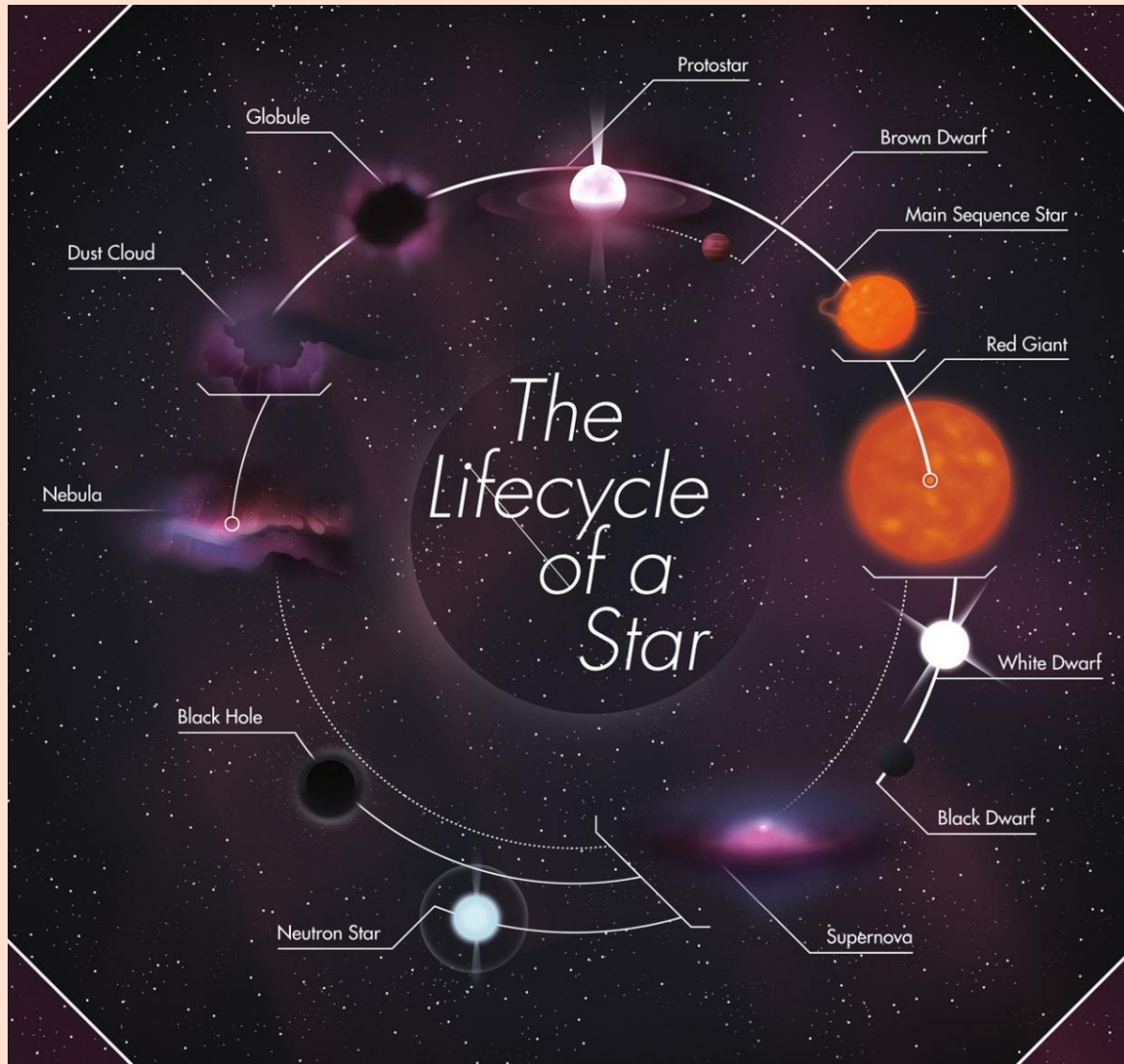
	<i>Mini-trous noirs</i>	<b>Stellaires</b>	<i>Intermédiaires</i>	<b>Supermassifs</b>
Masse Rayon	<i>Domaine spéculatif.</i>	Env. 10 à 30 $M_s$ Env. 30 à 90 km	$500 M_s < M < 10^5 M_s$	Env. $10^5$ à $10^{10} M_s$ Env. $3 \times 10^5$ km à 200 ua
Formation	<i>Taille <math>10^{-18} m</math> ? Durée <math>10^{-27} s</math> ?</i>	Effondrement gravitationnel du cœur d'étoiles très massives	Origine stellaire, puis croissance par accrétion de matière	Croissance d'un trou noir de masse inférieure, Effondrement d'un nuage de gaz dans l'univers primordial, Effondrement du cœur d'un gros amas d'étoiles
Localisation		Partout où il y a des étoiles ( galaxies, amas stellaires, ) sous forme isolée ou dans des systèmes binaires	Cœur des amas globulaires ; Centre des galaxies naines	Noyaux de galaxies
Détection indirecte		Microlentille gravitationnelle si isolé ; émissions X ; émission de jets (microquasars)	Lentille gravitationnelle; Etoiles en orbite.	Etoiles en orbite, Gaz absorbé (disque accrétion) ou éjecté (jets) ; Arguments énergétiques (quasars)

Nota : Les jets observés principalement dans le domaine radio , résultent des changements de champ magnétique à grande échelle se produisant dans le disque d'accrétion du trou noir .

Les quelques découvertes faites depuis 2004 concernant les trous noirs intermédiaire demandent confirmation. Voir p.203 les TN- JP luminet



# FORMATION DES TROUS NOIRS STELLAIRES



Dans l'état actuel des connaissances :  
l'effondrement gravitationnel des étoiles les plus massives (25 à 40  $M_{\odot}$ ) conduit sous certaines conditions à la formation des trous noirs :

- La masse du cœur dégénéré dépasse la limite de stabilité des étoiles à neutrons, l'effondrement conduit directement à un trou noir
- Ou une étoile à neutrons s'est formée, celle-ci absorbe les couches stellaires résiduelles, augmente ainsi sa masse, devient instable et s'effondre en trou noir.

Evolution stellaire : les 4 types de résidus froids, c à d non alimentés par des réactions thermonucléaires, à savoir naines blanches, étoiles à neutrons, étoiles à quarks et trous noirs s'appellent ' Collapsars '

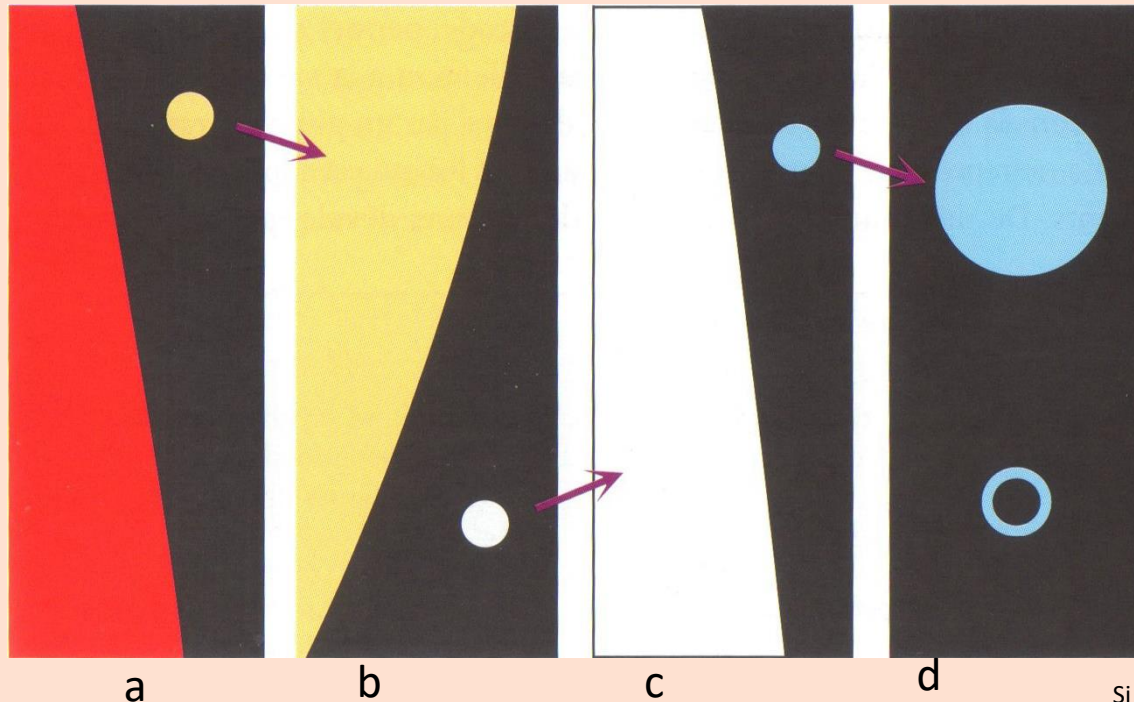
# GRAVITATION : EQUILIBRE ET EFFONDREMENT

Objet	Gravité équilibrée par	Densité
<b>Etoiles séquence principale</b> Ex. : Soleil	Réactions thermonucléaires	Moyenne : 1400 kg/m <sup>3</sup> Cœur : 150 000 kg/m <sup>3</sup>
<b>Naines blanches</b> ( <i>masse maxi : 1,4 M<sub>s</sub></i> )	Pression de dégénérescence Des électrons (1)	1million de tonne / m <sup>3</sup> Soit 1 tonne / cm <sup>3</sup>
<b>Etoiles à neutrons</b> ( <i>masse maxi &lt; 3 M<sub>s</sub></i> )	Interaction forte (ou force forte) (2)	Cœur : 10 <sup>14</sup> tonnes/m <sup>3</sup> soit 100 millions de tonnes dans un dé à coudre

Rappel . Densité de l'eau sur terre : 1000 kg/m<sup>3</sup>.. (1)La matière est un plasma de noyaux sans liaisons et d'électrons. les électrons y sont confinés dans un volume réduit selon la théorie quantique et résiste à toute compression extérieure supplémentaire en exerçant une pression interne colossale appelée pression de dégénérescence. (2) Phénomène de ' photodésintégration' du noyau de fer, conséquemment les électrons sont poussés vers les protons qui se transforment en neutrons

- Un trou noir est le stade ultime de l'effondrement gravitationnel. La force gravitationnelle l'emporte sur toutes les autres forces
- Dans le cas des trous noirs stellaires, la formation se produit quand le cœur résiduel de la supernova dépasse 3,3 masse solaire (limite d'Oppenheimer-Volkoff)

# ORDRE DE GRANDEUR MACROSCOPIQUE & MICROSCOPIQUE



## Taille comparée des étoiles.

Les étoiles sont supposées avoir la même masse que le Soleil. De gauche à droite:

- (a) La réduction de diamètre entre une géante rouge et le Soleil est de 250,
- (b) celle entre le Soleil et une naine blanche est de 100,
- (c) celle entre une naine blanche et une étoile à neutrons est de 500,
- (d) celle entre une étoile à neutrons et un trou noir est de 5.

Si le soleil était un trou noir , il aurait 3 km de rayon

- La matière ordinaire est constituée de vide : cas de l'hydrogène : le rayon du noyau (proton) est environ 100 000 fois plus petit que celui de l'atome (*enveloppe externe de l'orbitale de l'électron*).
- Si le noyau est comparé à une bille, l'atome mesurerait 2 km de diamètre
- Comparativement le rapport de l'orbite de Pluton sur le rayon du soleil est env. 8600 donc plus 'compact' (  $R_0 = 696\,300\text{ km}$  ,  $\frac{1}{2}$  grand axe 5,9 milliards de km)

Horizon des événements : Rayon de Schwarzschild d'un trou noir

$$r_s = 3M \quad \text{où } r_s \text{ est en km et } M \text{ en masse solaire}$$

# UN TROU NOIR EST-IL FORCÉMENT DENSE ?

## ○ NON

- On ignore la distribution de la matière et de l'énergie à l'intérieur d'un TN , on ne peut parler que de densité moyenne
- Pour un TN stellaire de  $10 m_s$  , elle est en effet gigantesque de l'ordre du milliard de tonne par centimètre cube
- Pour un TN massif de 100 millions de  $m_s$  , la densité moyenne tombe à qq grammes par centimètre cube, soit équivalente à celle de la Terre
- Pour un TN ultra massif de plusieurs milliards de  $m_s$  , comme celui qui se trouve au centre de la galaxie M87, leur densité moyenne devient plus faible que celle de l'air

***Le trou noir n'est pas un astre forcément dense; c'est un astre suffisamment compact pour emprisonner la lumière***

## REVENONS À NOTRE ASTRONAUTE COBAYE : CAS D'UN TN STELLAIRE

Les forces de marée sont d'autant plus grandes qu'il sera proche du trou noir.  
L'astronaute attiré par un TN de  $10\text{ ms}$  - dont le rayon de Schwarzschild est de  $30\text{ km}$  - serait tué par les forces de marée à une altitude de  $400\text{ km}$ , donc bien avant d'atteindre l'horizon des événements



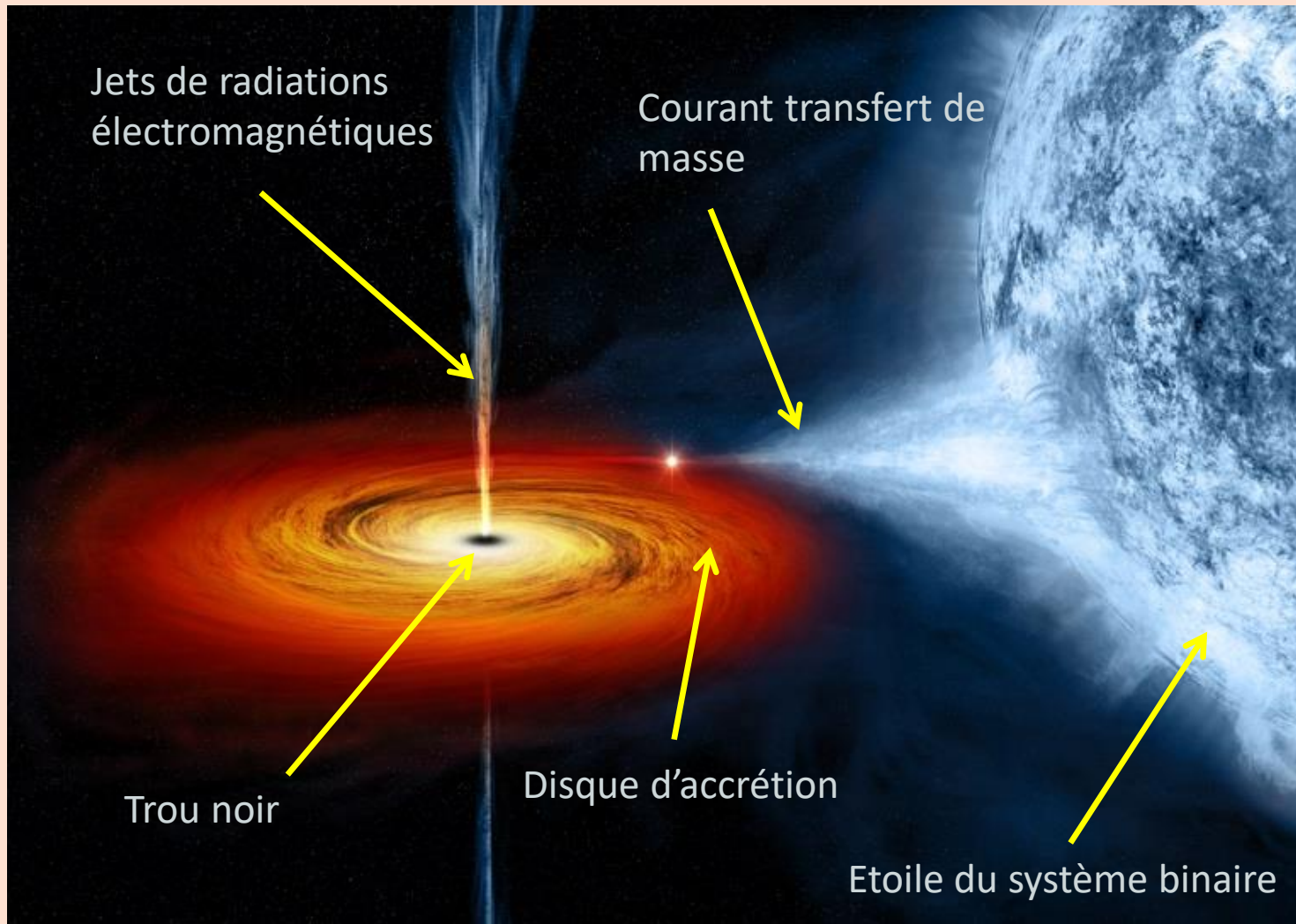
## ASTRONAUTE COBAYE : CAS D'UN TN SUPER MASSIF

« Plus un TN est massif, plus faible est sa densité moyenne et plus douce est la variation de courbure qu'il imprime à l'espace-temps extérieur. Par conséquent, les abords d'un TN beaucoup plus massif qu'une étoile deviendraient fréquentables par un être humain. Notre astronaute cobaye pourrait atteindre sain et sauf l'horizon d'un TN de  $1\,000\ m_{\odot}$ , et pourrait même explorer l'intérieur d'un TN géant de 100 millions de  $m_{\odot}$ , les forces de marée à l'horizon des événements devenant plus faibles que celles, déjà imperceptibles à l'échelle du corps humain, engendrées par la Lune sur la Terre » J.P. LUMINET

Néanmoins, une fois franchi l'horizon, il serait irrésistiblement capturé par la singularité centrale et là, quelle que soit la masse du TN, il ne lui resterait que qq mn avant d'être déchiqueté par des forces de marées gigantesques !



## TROU NOIR ACTIF : CAS D'UN SYSTÈME BINAIRE



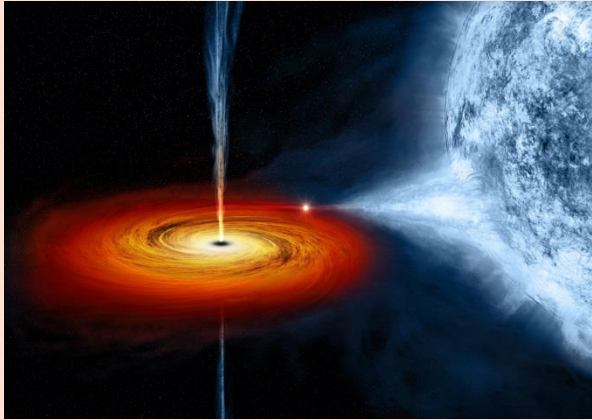
Lorsqu'1 kg d'hydrogène tombe dans un trou noir en suivant une courbe en spirale, 100 gr sont transformé en énergie rayonnée soit un rendement de 10% pour le disque d'accrétion, supérieur en comparaison à 0,7% de la fusion thermonucléaire des étoiles ordinaires

# TROUS NOIRS STELLAIRES – OBSERVATIONS

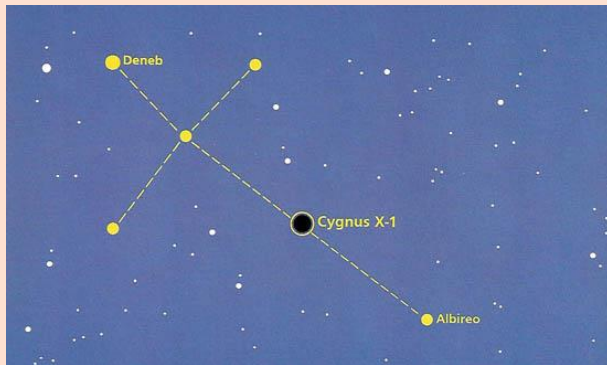
- **Cygnus X-1 dans le Cygne**
- **XTE J1118+480 dans la Grande Ourse**



# TROUS NOIRS STELLAIRES : CYGNUS X-1



Vue d'artiste



L'objet est situé au milieu de la série d'étoiles qui forme le cou de la constellation du Cygne.

Distance 7200 al  
(nouvelle mesure en 2019)

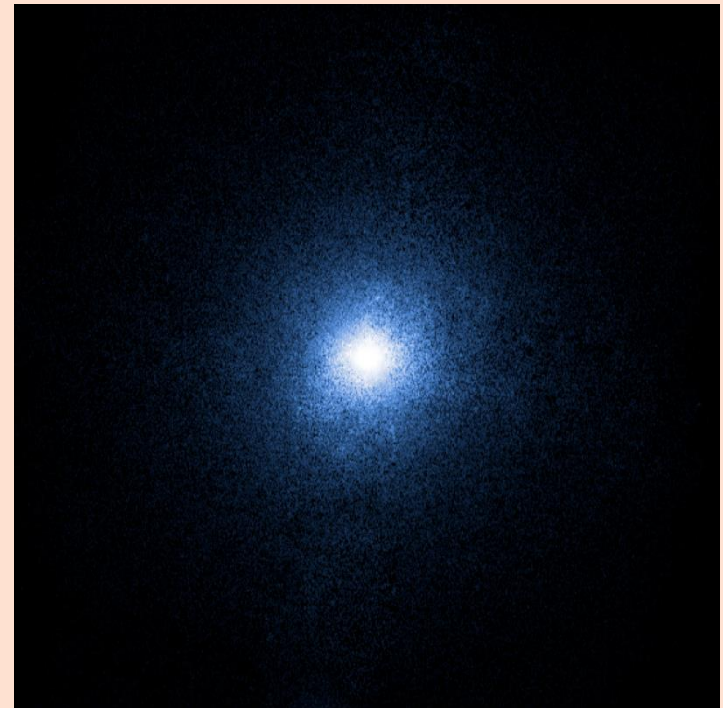


Image de Cygnus X-1 par le télescope spatial à rayons x « Chandra »

Cygnus X-1 est une des plus importantes source de rayons X cosmiques recensée. Elle fut le premier candidat trou noir identifié .

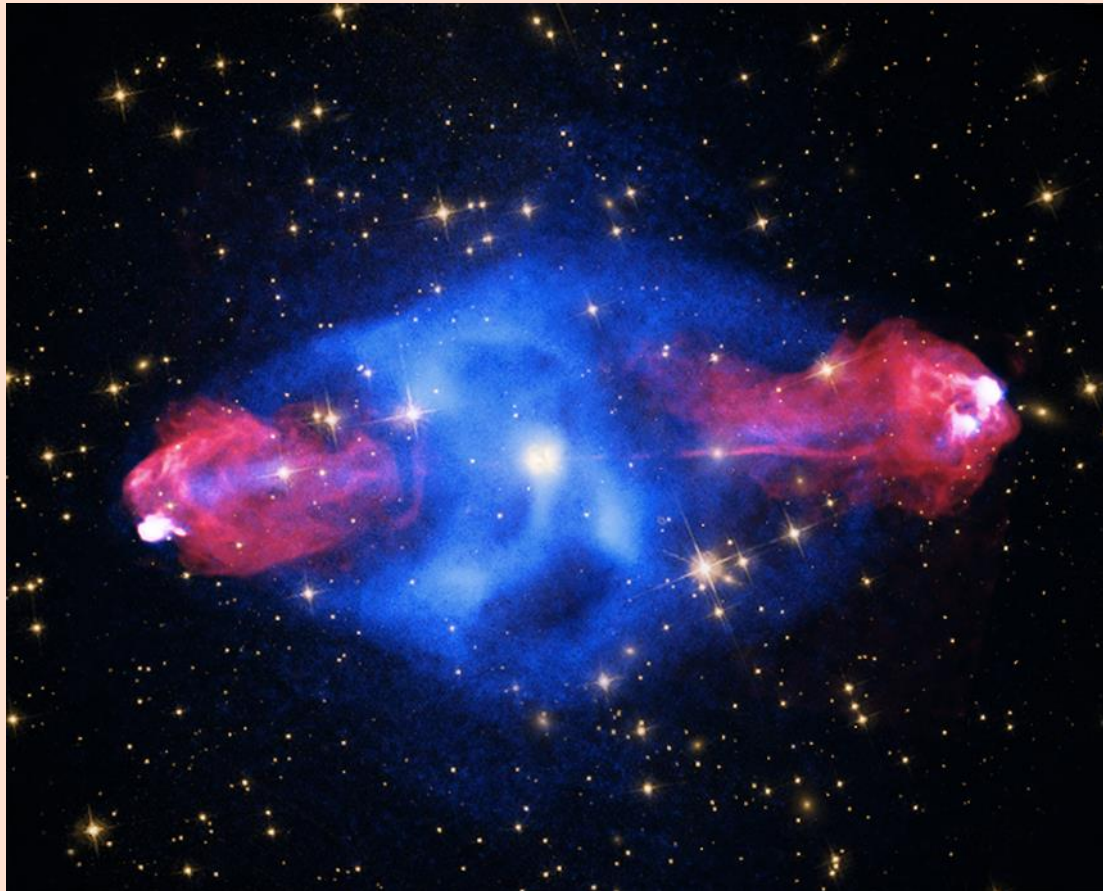
Le système consiste en un trou noir d'environ  $21 M_{\odot}$  et une étoile géante bleue ' HDE 226868 ' d'environ  $25$  à  $40 M_{\odot}$ . Le trou noir dévore peu à peu l'étoile compagne en lui arrachant du gaz qui conséquemment est chauffé à plusieurs millions de degrés provoquant l'émission de rayonnement de haute énergie .

Si on comparait l'étoile HDE 226868 à un ballon de football, Cygnus X-1 ne serait qu'un grain de sable situé à quelques centimètres de sa surface.

Ref. Les Trous noirs – jp Luminet p. 166

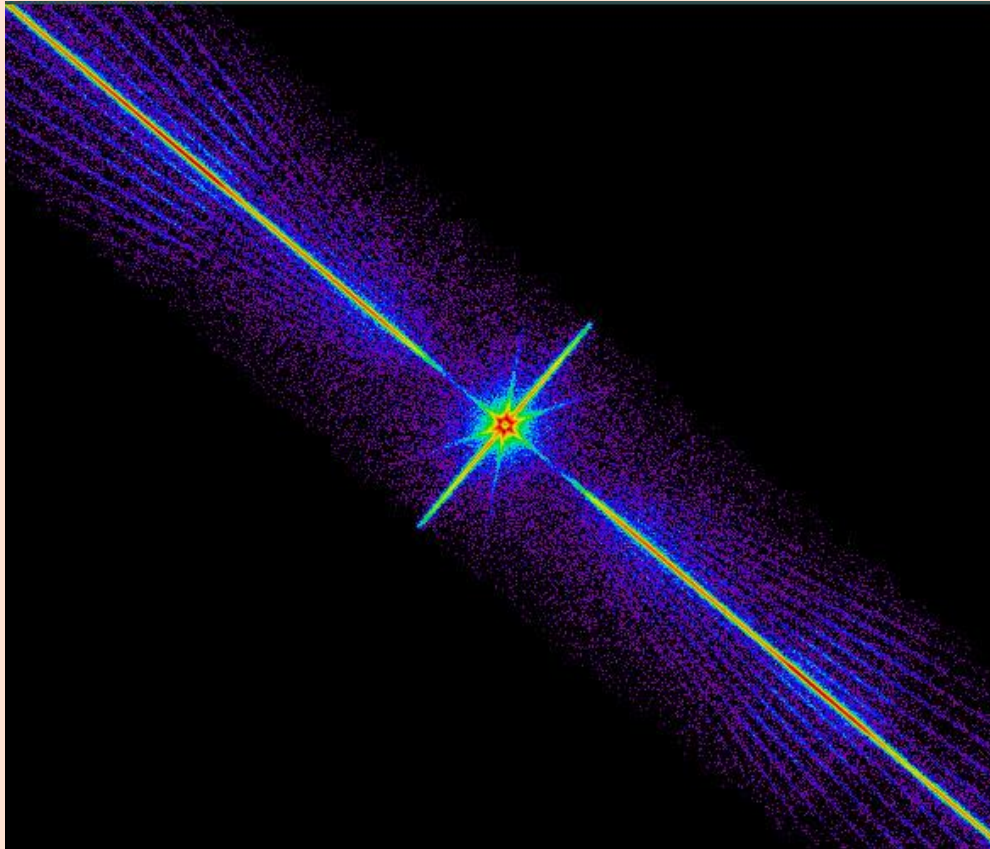
# CYGNUS X-1

- Photo composite NASA: superposition images
  - rayons X du satellite Chandra (en bleu)
  - + signaux radiotélescopes (en rouge => les 2 jets )
  - + image télescope Hubble



# Trou noir stellaire : arcs en ciel de rayons X

**XTE J1118+480** , est une étoile accompagnée d'un trou noir (masse 6 Ms ) situé à 6 000 al dans la direction de la Grande Ourse. Son rayonnement X a été capté en 2000 par le satellite Chandra et a été décomposé par niveau de puissance et colorisé en fausse couleur . Il s'étend dans tout le disque d'accrétion.

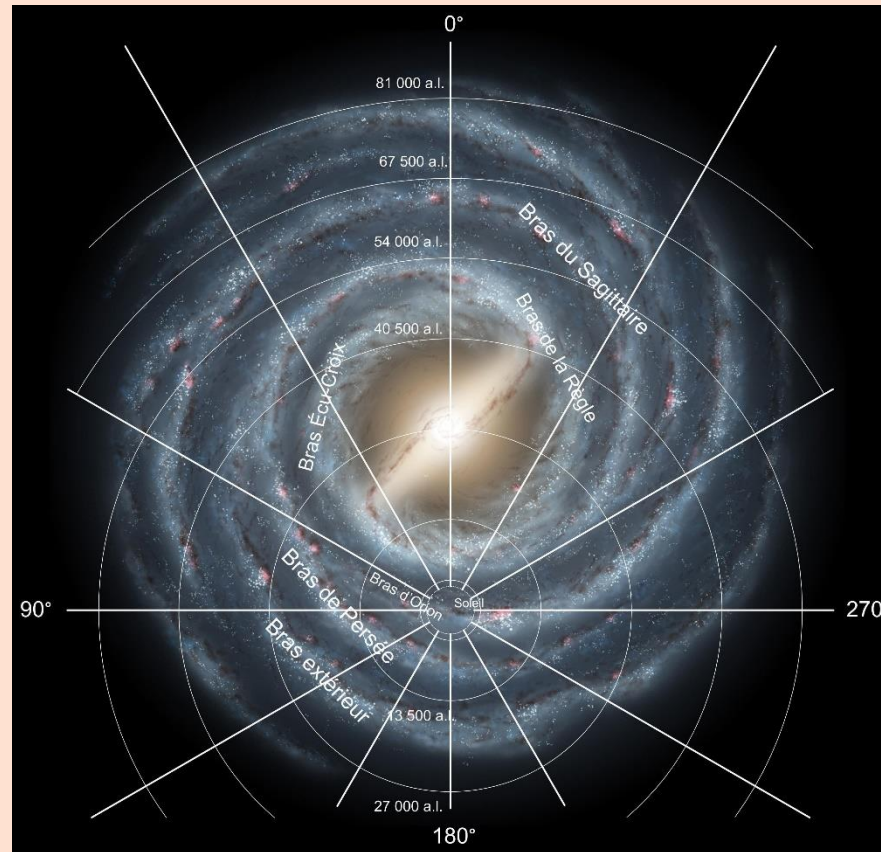


Credit	NASA/CfA/J.McClintock & M.Garcia
Scale	Image is across.
Category	<u>Black Holes</u>
Coordinates (J2000)	RA 11h 18m 10.80s   Dec +48° 02' 12.30
Constellation	<u>Ursa Major</u>
Observation Dates	April 18, 2000
Observation Time	8 hours
Obs. IDs	1701
Color Code	Intensity
Instrument	<u>LETG</u>
Distance Estimate	5,000 light years
Release Date	May 07, 2001

« On estimait jusqu'à récemment à quelques dizaine de millions de trous noirs stellaires dans notre galaxie : la Voie Lactée. On pense suite aux détection à partir de 2015 d'ondes gravitationnelles liées à la fusion de TN que ce nombre est sous estimé »

JP Luminet les TN p.282

Plus d'une vingtaine de TN stellaires ont été identifiés à ce jour ...



En 2023, le TN stellaire le plus proche de la Terre '1A 062000-00' est à 3 000 al  
ref. NASA mai 2023  
(rappel le rayon de notre galaxie est 52 850 al)

# TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

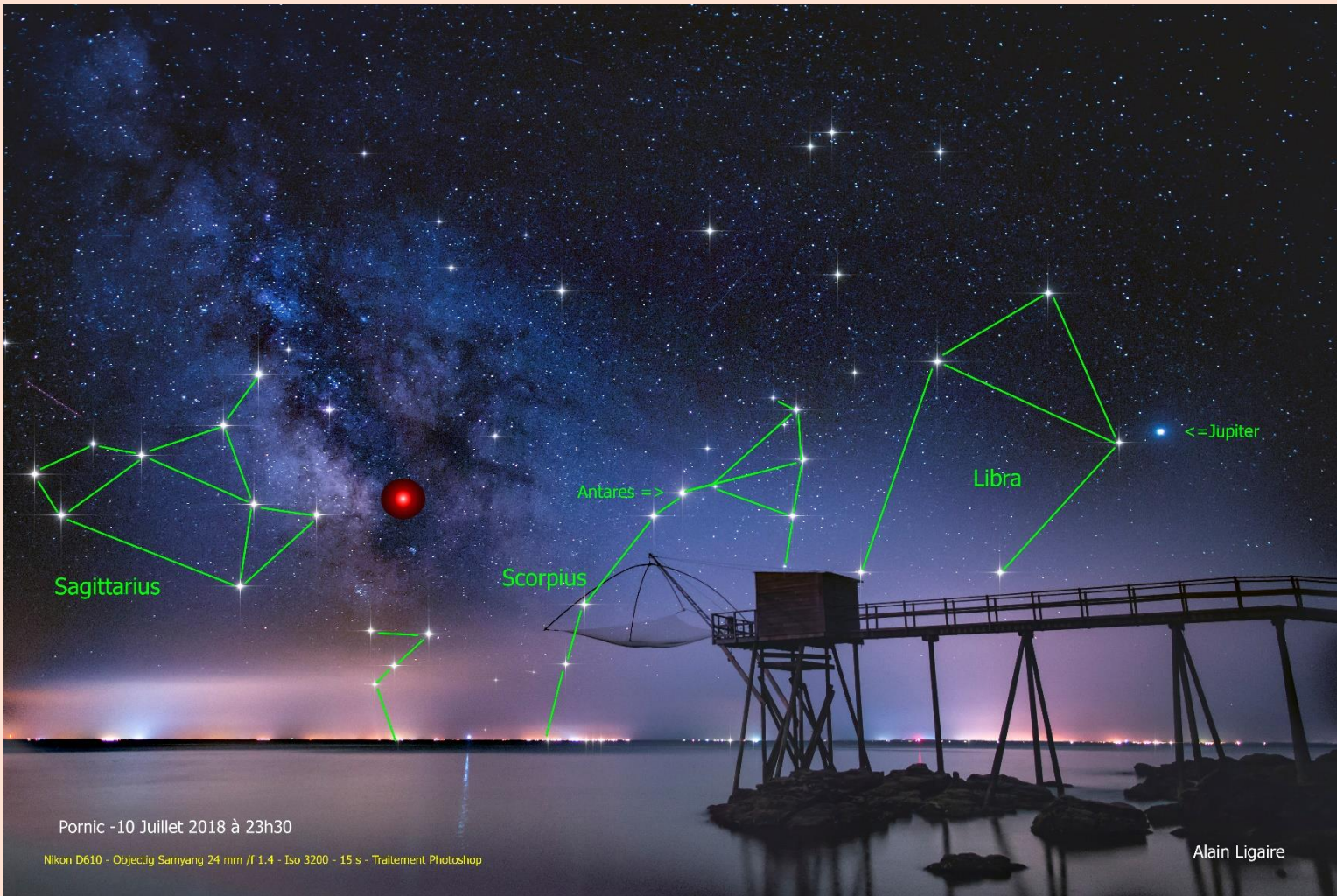
## EXEMPLES D'OBSERVATION

- **I) Centre Voie Lactée : Sagittarius A\***
- **II) Centre galaxie elliptique M87**

Au coeur de notre galaxie :  
La Voie Lactée .....



# I) LE TROU NOIR SAGITTARIUS A\* À 26 000 A.L. DE LA TERRE



# I) TROUS NOIRS MASSIFS : SAGITTARIUS A\*

Sgr A\* est une radiosource intense située dans la constellation du Sagittaire . elle correspond (\*) à un trou noir super massif situé au centre de notre Galaxie. Ce trou noir est l'objet primaire d'un amas stellaire de 12 étoiles orbitant autour de lui.

C'est l'observation et l'étude prolongée (20 ans ) de l'orbite d'une de ces étoiles (S2) qui a permis d'obtenir que Sgr A\* est un objet extrêmement massif et compact.

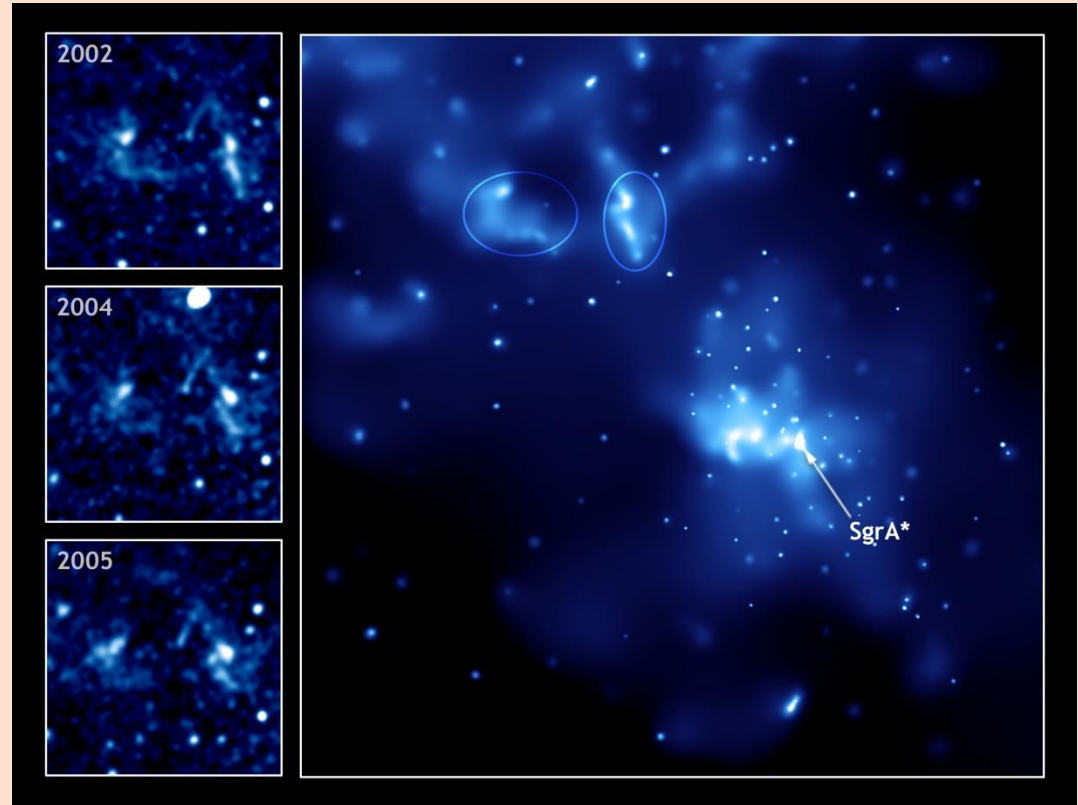


Photo de Sagittarius A\* prise par le satellite X-ray Chandra . (et de 2 échos provenant d'une explosion récente)

Masse estimée de Sgr A\* : 4 Millions de  $M_{\odot}$  .

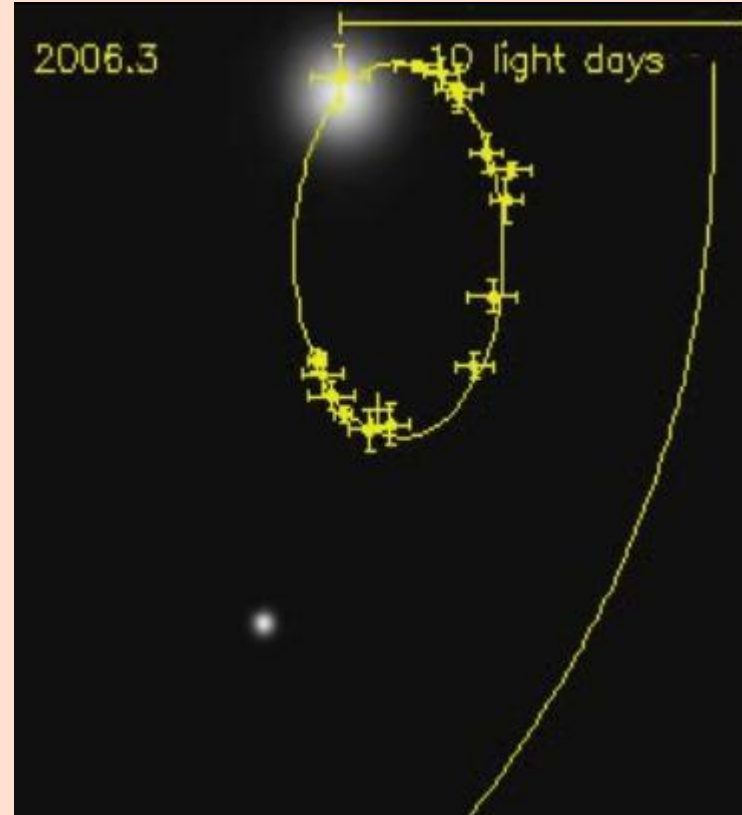
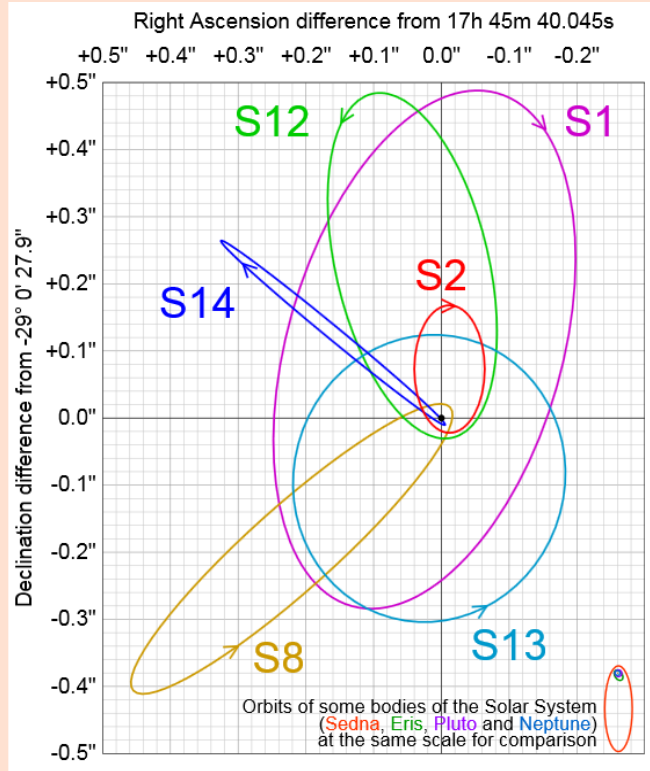
(\*) on utilisait le conditionnel il y a encore qq années ou le terme ' meilleur candidat ' ou 'très probable' ....



# I) SAGITTARIUS A\*

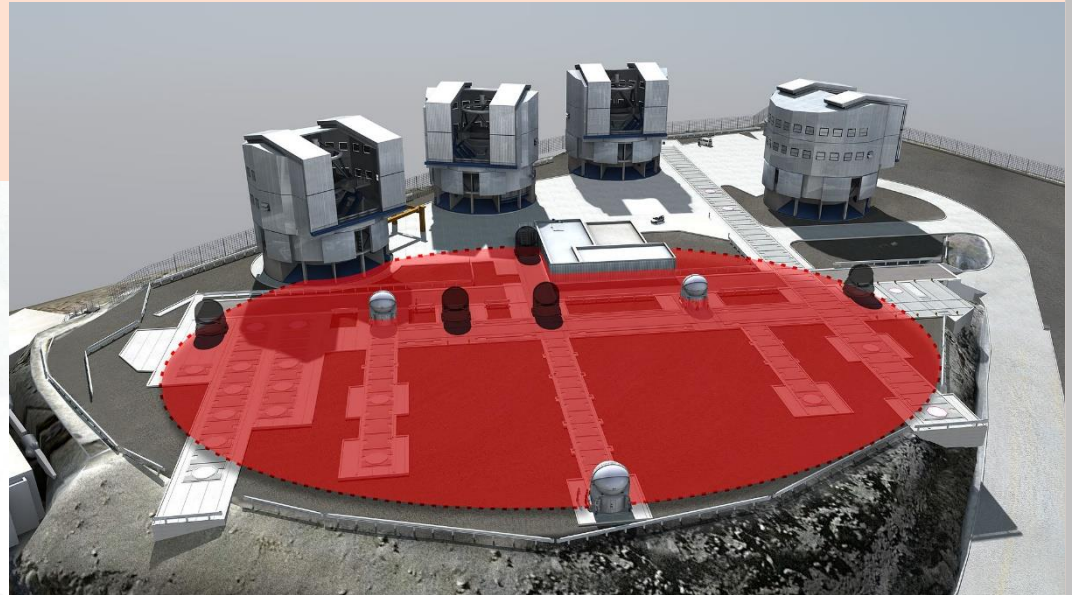
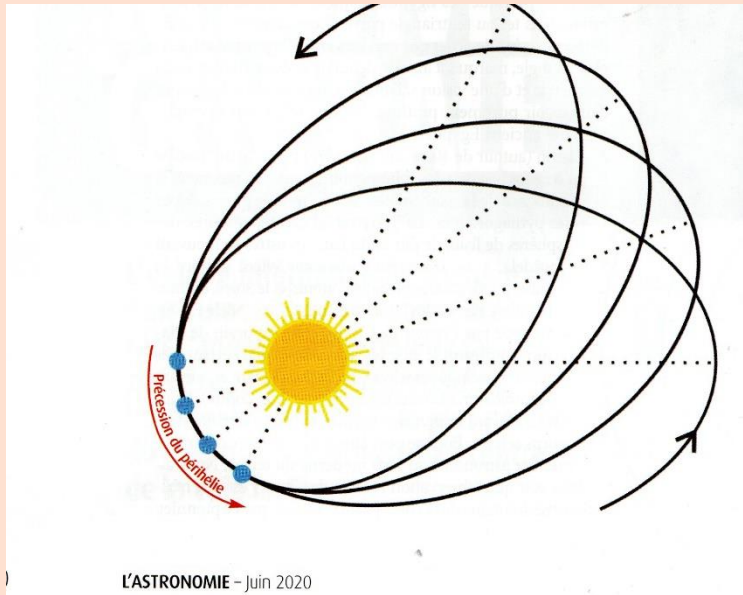
## ÉTUDE DE L'ÉTOILE S2 EXTRÊMEMENT PROCHE DU CENTRE GALACTIQUE

Prix Nobel 2020 => Astrophysicien allemand Reinhard GENZEL



Images ESO

# I) SAGITTARIUS A\* - NOUVEAU TEST DE LA RG => VÉRIFICATION DE LA PRÉCESSION DE LA PÉRIHÉLIE DE S2 PAR L'INSTRUMENT GRAVITY DU VLT AU CHILI



Gravity (interférométrie optique) mis en service en 2016 recombine la lumière issue de 4 télescopes géant de 8m : précision 30 microsecondes d'angle = un cheveu situé à Barcelone vu de Paris

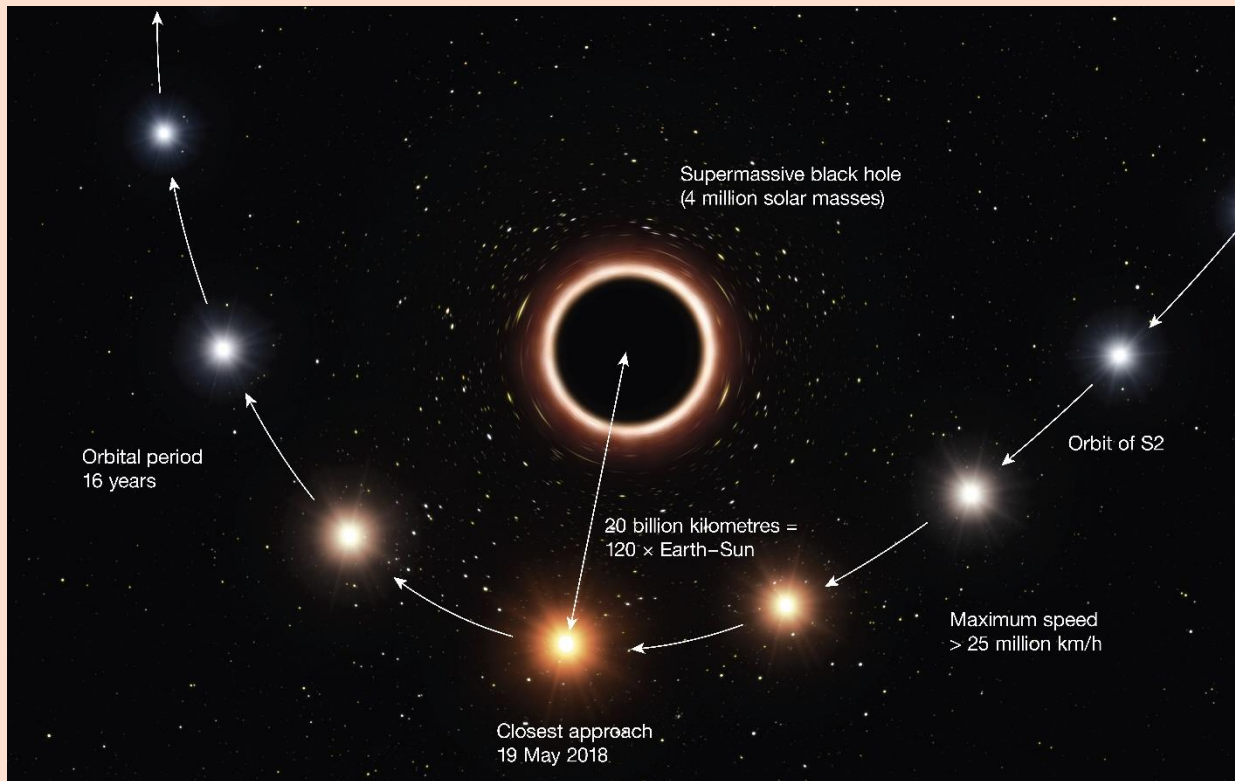
Le 19 mai 2018, cette étoile a été au plus proche du trou noir, et a atteint théoriquement la vitesse de près de 8 000 km/s (environ 25 millions de km/h), soit 2,7 % de celle de la lumière<sup>5,6</sup>. À cette occasion, le dispositif interférométrique Gravity mis en service au VLT a observé un **décalage fréquentiel vers le rouge** cohérent avec la théorie de la **relativité générale**<sup>6,5,7</sup>.

L'orbite de S2 subit une **précession** de 12 " par rotation due au champ gravitationnel du trou noir<sup>8</sup>; ce phénomène, en accord avec la **relativité générale**, est analogue à celui de l'**avance du périhélie de Mercure**.

# I) SAGITTARIUS A\* - ETUDE DE L'ÉTOILE S2

Lien web ci-dessous : La simulation montre les orbites d'un groupe d'étoiles proches du trou noir supermassif de la Voie lactée. En 2018, une de ces étoiles S2 passa très près du trou noir et devint l'objet d'observation intense avec les télescopes de 'ESO.

[https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Simulation\\_of\\_the\\_orbits\\_of\\_stars\\_around\\_the\\_black\\_hole\\_at\\_the\\_centre\\_of\\_the\\_Milky\\_Way.webm](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Simulation_of_the_orbits_of_stars_around_the_black_hole_at_the_centre_of_the_Milky_Way.webm)



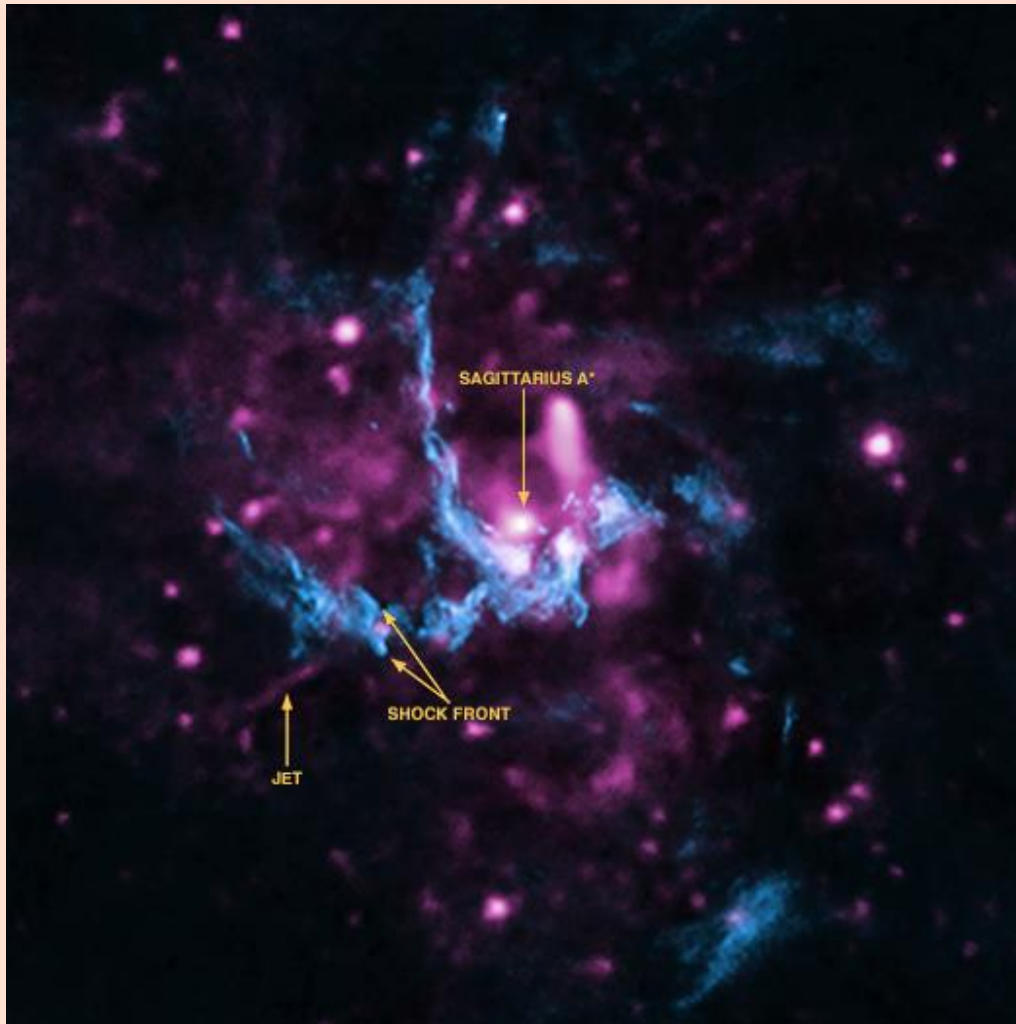
## 1) SAGITTARIUS A\* - ETUDE DE L'ÉTOILE S2 – VIDÉO DE L'ESO

Lien ci-dessous : Au cœur de la Voie Lactée : étoile S2 et Sagittarius A\*

<https://www.eso.org/public/videos/eso1835c/>



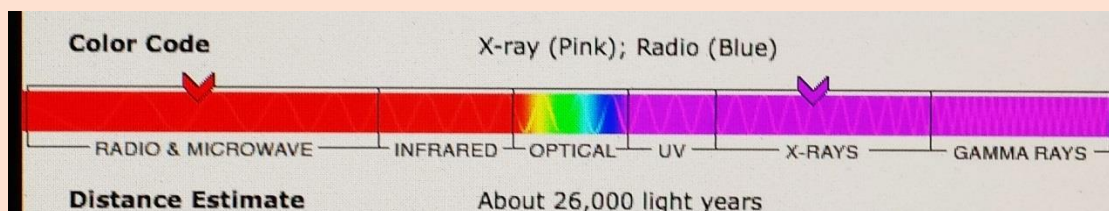
# I) TROUS NOIRS MASSIFS : AUTOUR DE SAGITTARIUS A\*



Présence d'un jet de particules à hautes énergies issu de Sgr A . Celui-ci provoque une onde de choc en rencontrant une masse de gaz distante de plusieurs années-lumière .

Photo composite éditée en 2013:

- Rayons X en violet (Chandra)
- Emission radio en bleu (VLA)
- A nécessité 54 observations entre sept 1999 et Mars 2011, durée cumulée 477 heures



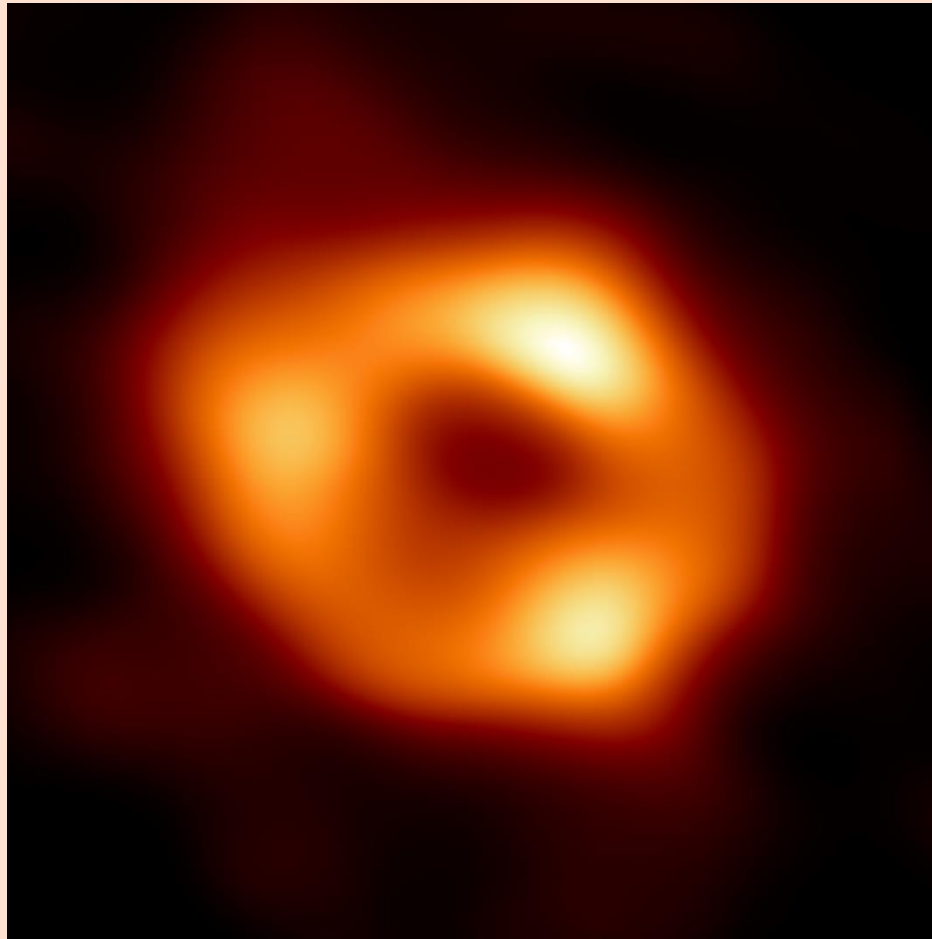
# 12 MAI 2022 PHOTO DE SAGITTARIUS A\*

## PAR 'EVENT HORIZON TELESCOPE'

### Astronomers Reveal First Image of the Black Hole at the Heart of Our Galaxy

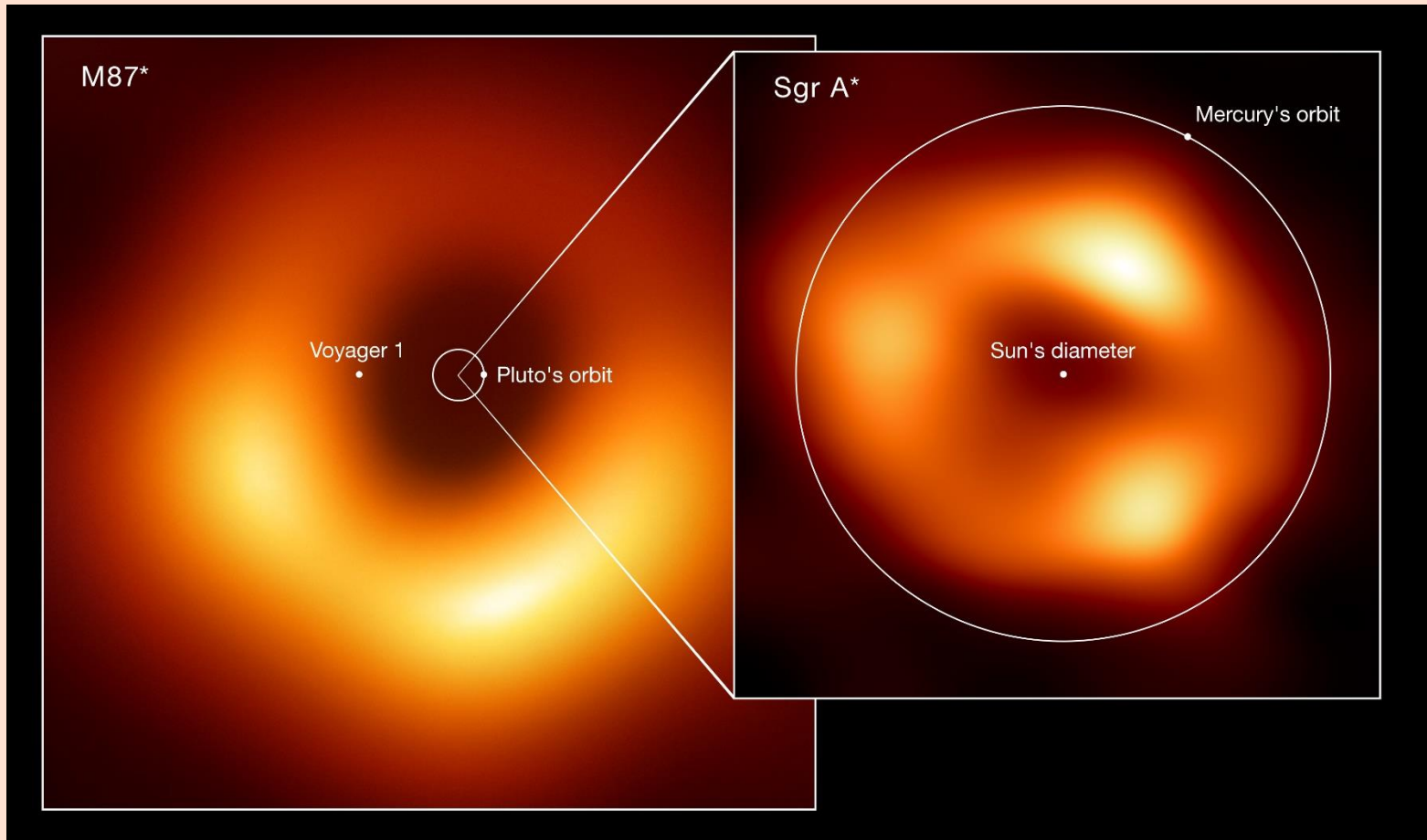
May 12, 2022

Astronomers have unveiled the first image of the supermassive black hole at the centre of our own Milky Way galaxy. This result provides overwhelming evidence that the object is indeed a black hole and yields valuable clues about the workings of such giants, which are thought to reside at the centre of most galaxies. The image was produced by a global research team called the Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration, using observations from a worldwide network of radio telescopes.



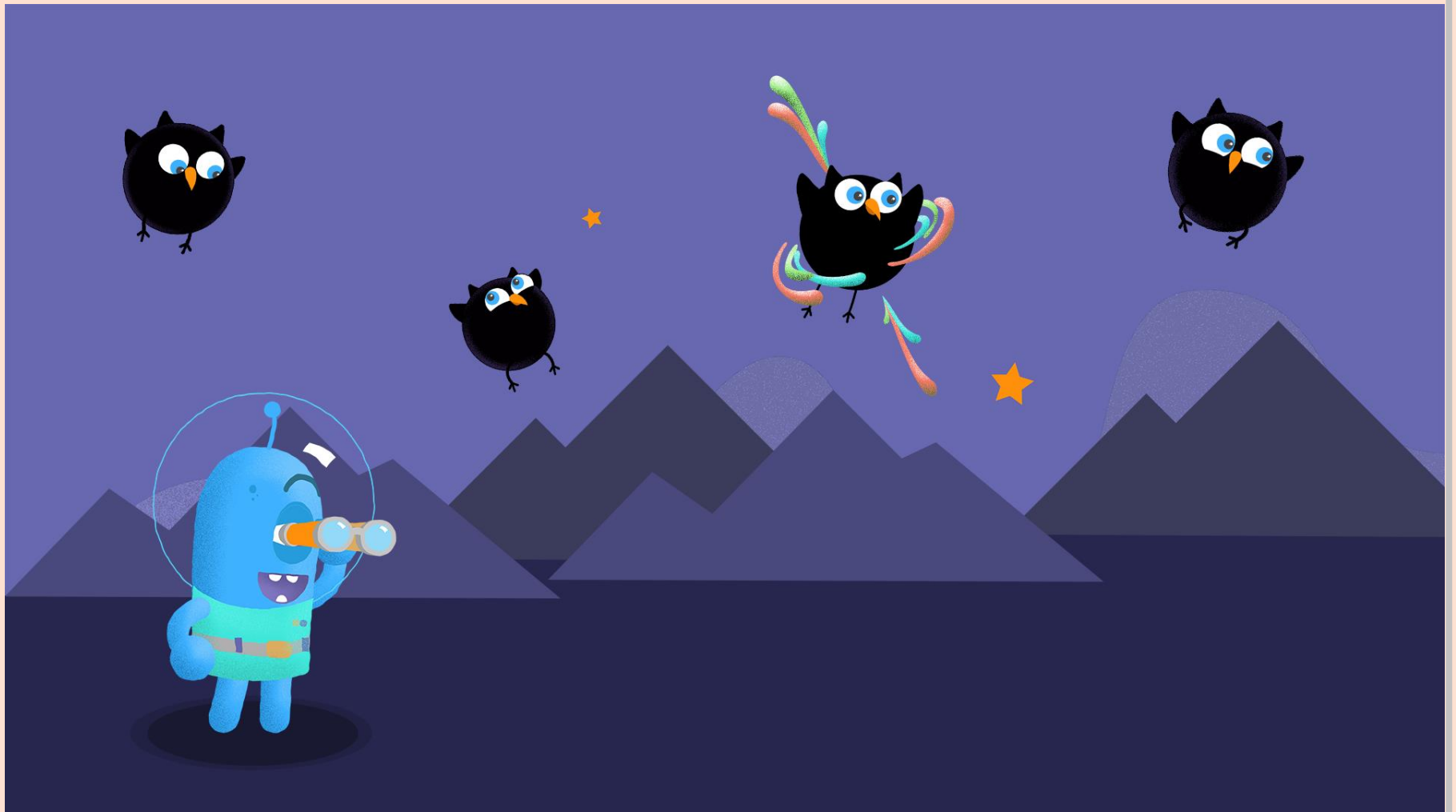
L'image a nécessité 5 ans de traitement avec de puissants calculateurs

# Comparaison TN Sgr A\* et M87\*



Info :

- Demi-grand axe orbite Mercure  $\approx$  58 millions de km
- Position de Voyager 1  $\approx$  24 milliards de km du Soleil (NASA-JPL mai 2023)



Passons à M87\*



## II) M 87\* : AU CŒUR DE L'AMAS DE GALAXIES DE LA VIERGE

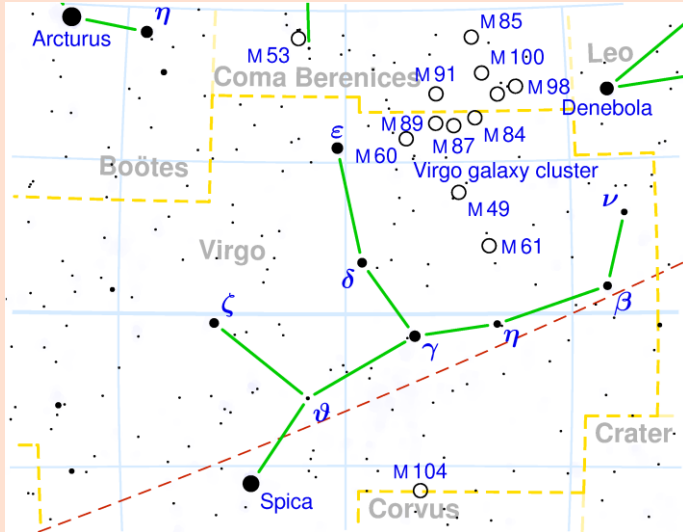
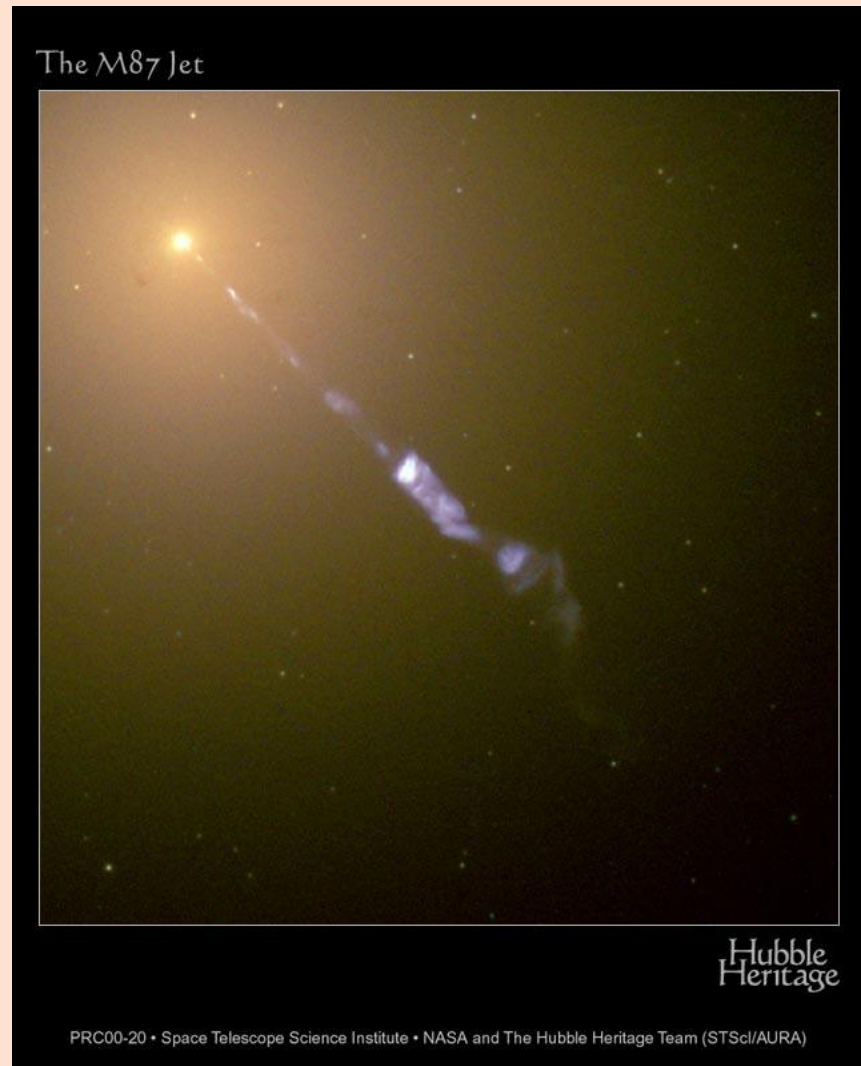


Photo télescope Hubble



La galaxie elliptique géante M87 abrite un trou noir supermassif M87\* (6,5 milliards de  $M_{\odot}$ ). Un jet de plasma émerge du coeur et s'étend sur plus de 5 000 a.l.

## AMAS DE LA VIERGE (PARTIEL)



Chaîne de  
Markarian et  
M 87

Mosaïque de  
4 images

AL

# M87

M87 est une galaxie elliptique supergéante, c'est la plus grande des galaxies de l'amas de la Vierge

*La galaxie vue par des instruments d'astronomes amateurs*



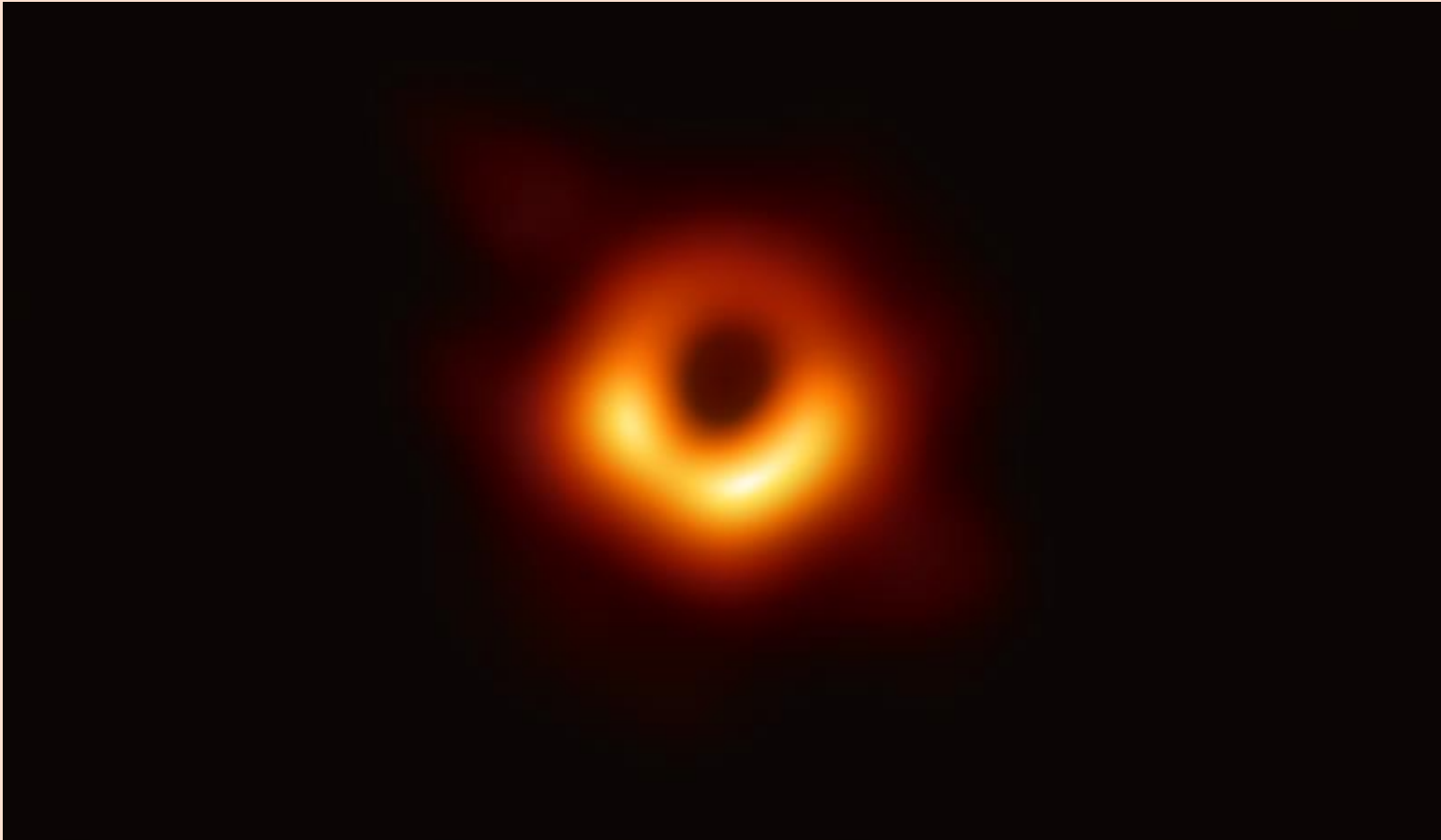
Photo AL - 23 avril 2023 – focale 2000mm



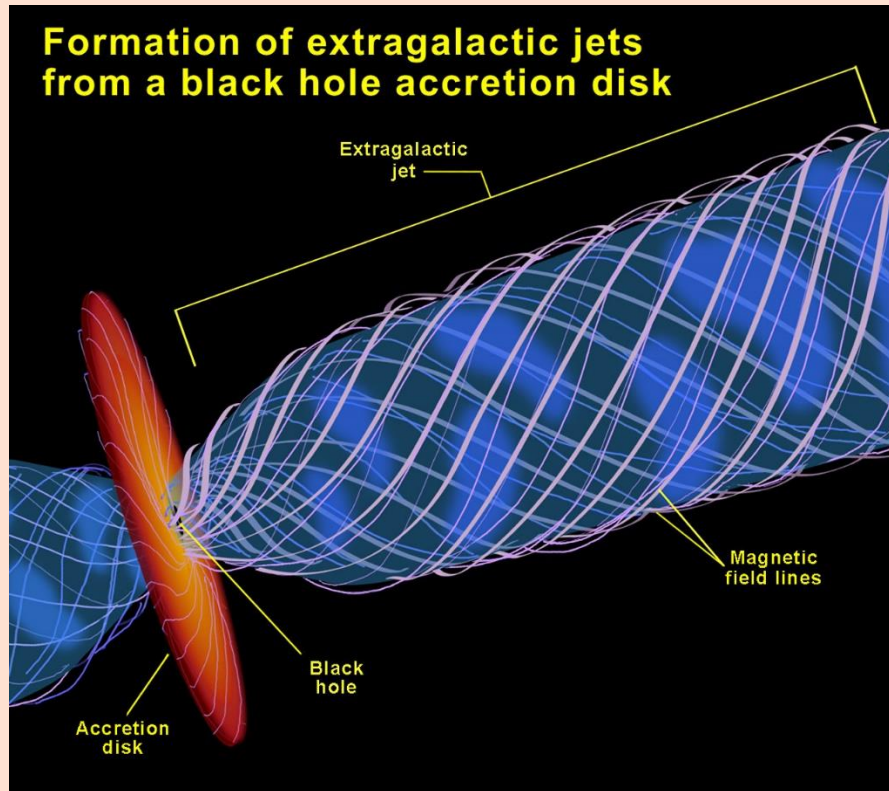
## PHOTO DU TROU NOIR AU CŒUR DE M87 PRISE PAR 'EVENT HORIZON TELESCOPE'

Ce TN supermassif est estimé à 6,5 milliards de  $m_{\odot}$

Le diamètre de son horizon des événements est 254 ua, soit 3 fois le diamètre de l'orbite moyenne de Pluton

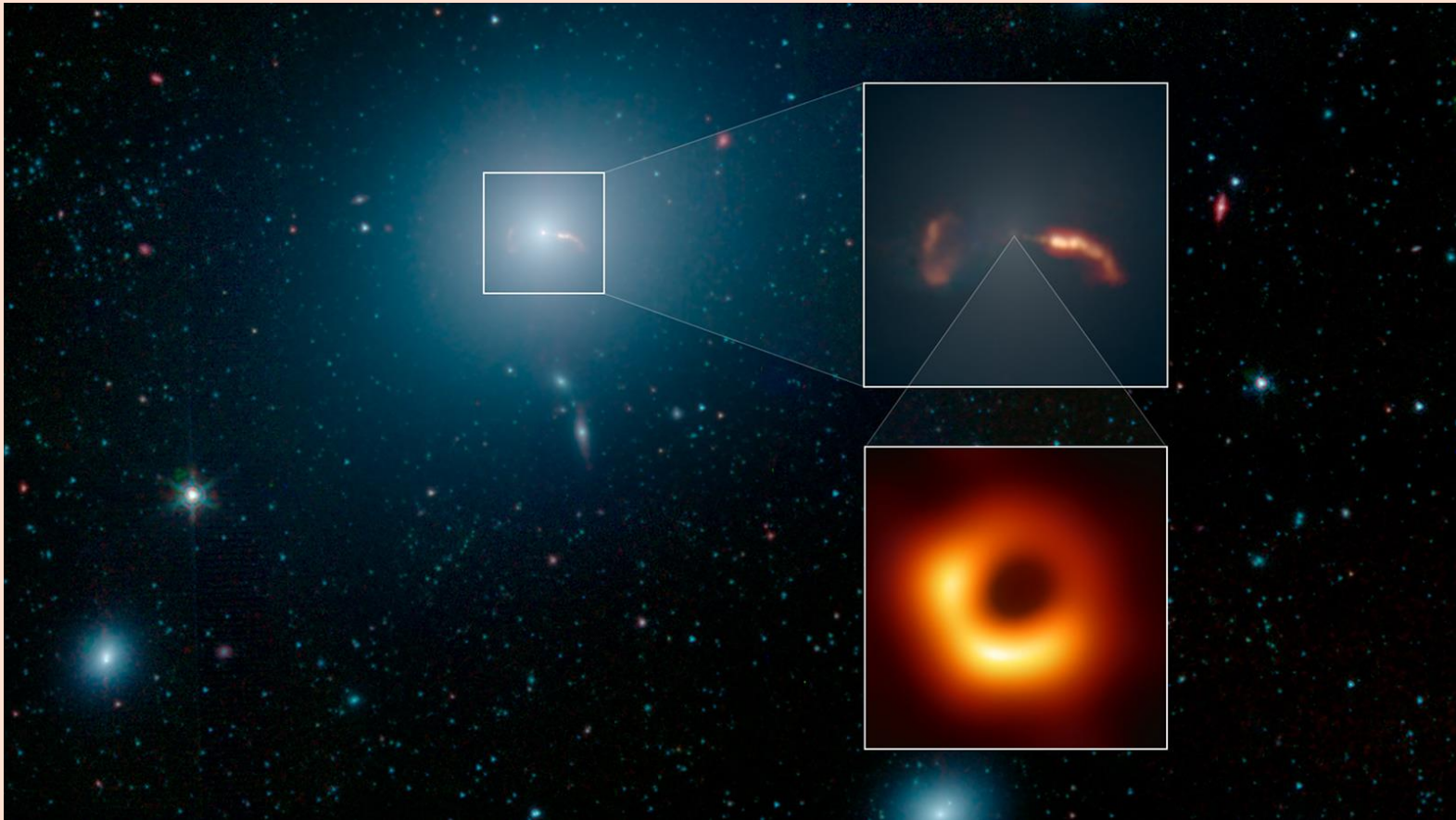


## II) M87 - Trou noir super massif : Schéma type d'un jet



La plupart des observations montrent que les jets seraient composés principalement de plasma électron-positron. On ignore encore comment les disques d'accrétion accélèrent les jets ou produisent du plasma électron-positron, on pense qu'ils génèrent des champs magnétiques emmêlés qui accélèrent et concentrent les jets ( scénario effet Blandford-Znajek)

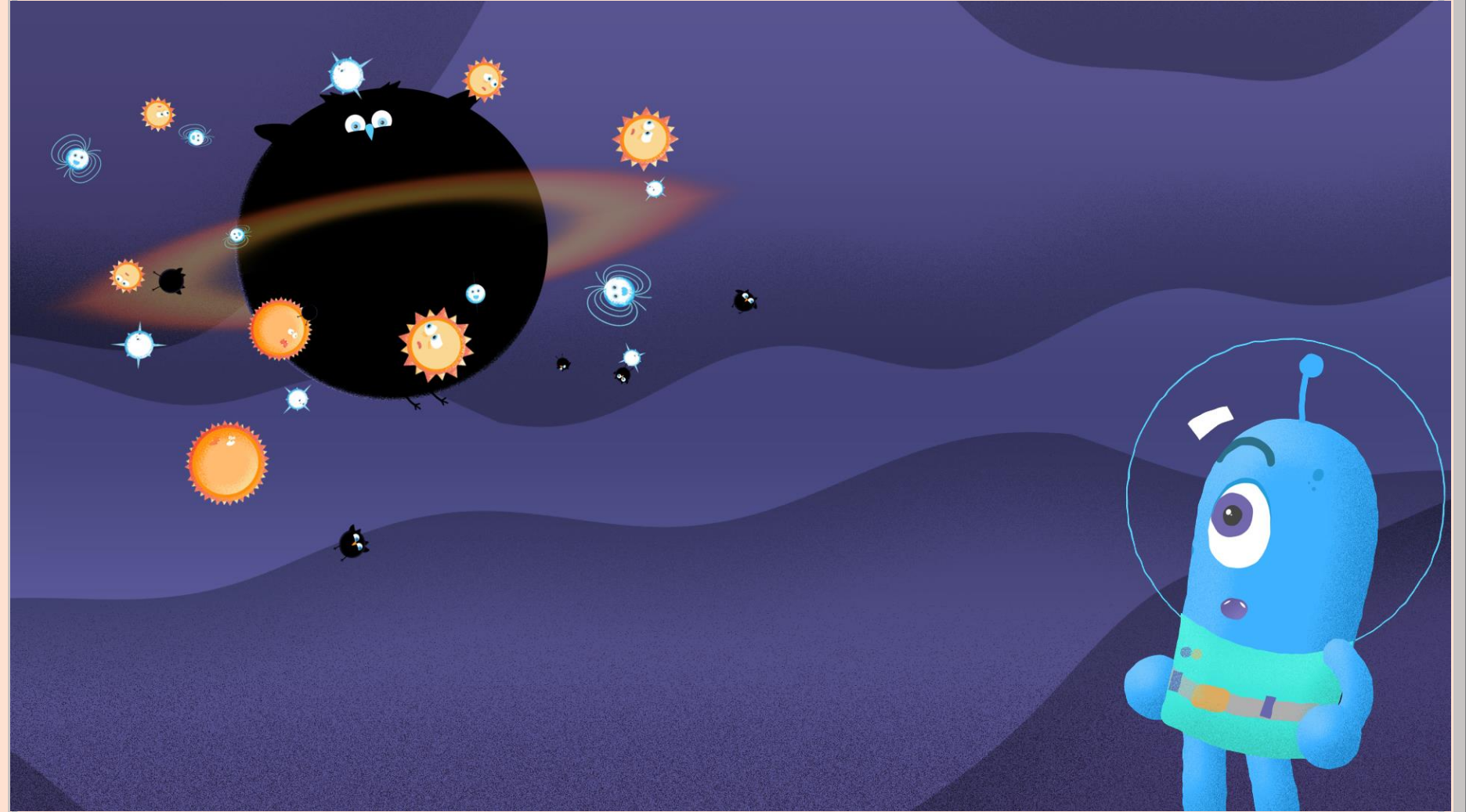
## M87 : IMAGE DIDACTIQUE NASA 04 MAI 2023 : LA GALAXIE , LE JET ET LE TROU NOIR



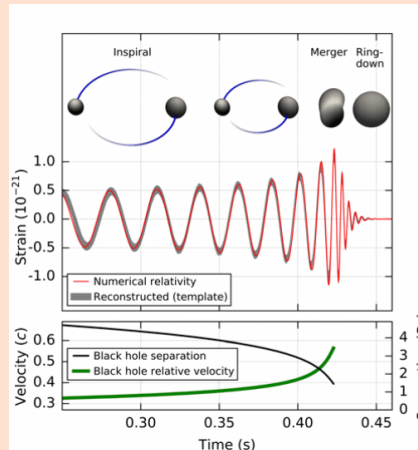
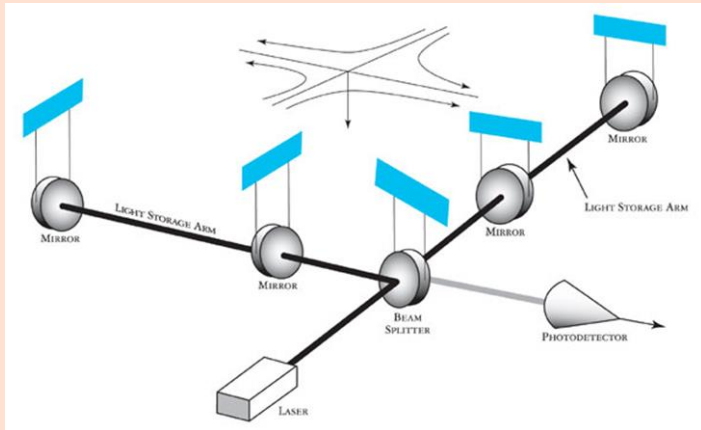
### The Galaxy, the Jet, and a Famous Black Hole

Image Credit: [NASA](#), [JPL-Caltech](#), [Event Horizon Telescope Collaboration](#)

**Explanation:** [Bright elliptical galaxy Messier 87 \(M87\)](#) is home to the supermassive black hole captured in 2017 by planet Earth's [Event Horizon Telescope](#) in the first ever image of a black hole. Giant of the Virgo galaxy cluster about 55 million light-years away, M87 is the large galaxy rendered in blue hues in this infrared [image from the Spitzer Space telescope](#). Though M87 appears mostly featureless and cloud-like, the Spitzer image does record details of relativistic jets blasting from the galaxy's central region. Shown in the inset at top right, the jets themselves span thousands of light-years. [The brighter jet](#) seen on the right is approaching and close to our line of sight. Opposite, the shock created by the otherwise unseen receding jet lights up a fainter arc of material. Inset at bottom right, the [historic black hole image](#) is shown in context, at the center of giant galaxy and relativistic jets. Completely unresolved in the Spitzer image, the [supermassive](#) black hole surrounded by infalling material is the source of enormous energy driving [the relativistic jets from the center of active galaxy M87](#). The Event Horizon Telescope image of M87 has now been enhanced to reveal a [sharper view of the famous supermassive black hole](#).



# Nouvel instrument d'observation des trous noirs : Détection des ondes gravitationnelles par des interféromètres à laser



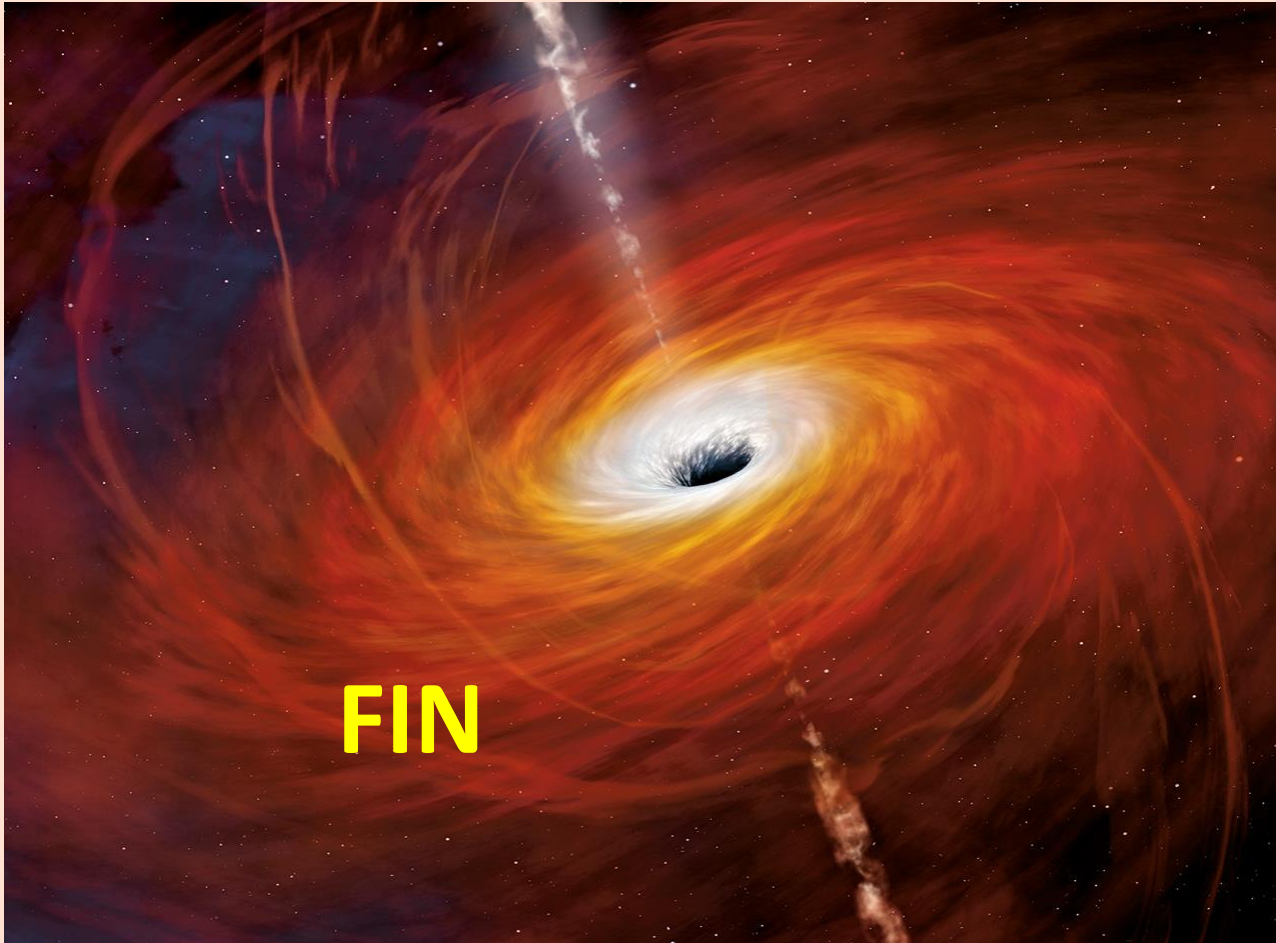
## Événement GW150914

Le 14 Septembre 2015, les 2 interféromètres à laser LIGO ont détecté la 1ère onde gravitationnelle prédite un siècle auparavant par Albert EINSTEIN dans la relativité Générale.

Les 2 détecteurs séparés par 3000 km ont détecté le même signal avec un décalage de 7 ms correspondant au temps nécessaire à l'onde gravitationnelle pour se propager d'un détecteur (Livingston) à l'autre (Handford). La forme du signal mesuré est un "chirp" comme attendu par **la fusion de 2 trous noirs**.







*« Les trous noirs ont un avenir brillant : la vraie astronomie des trous noirs est encore devant nous »*

*Jean-Pierre LASOTA – Directeur de recherche à l’institut d’astrophysique de Paris .*