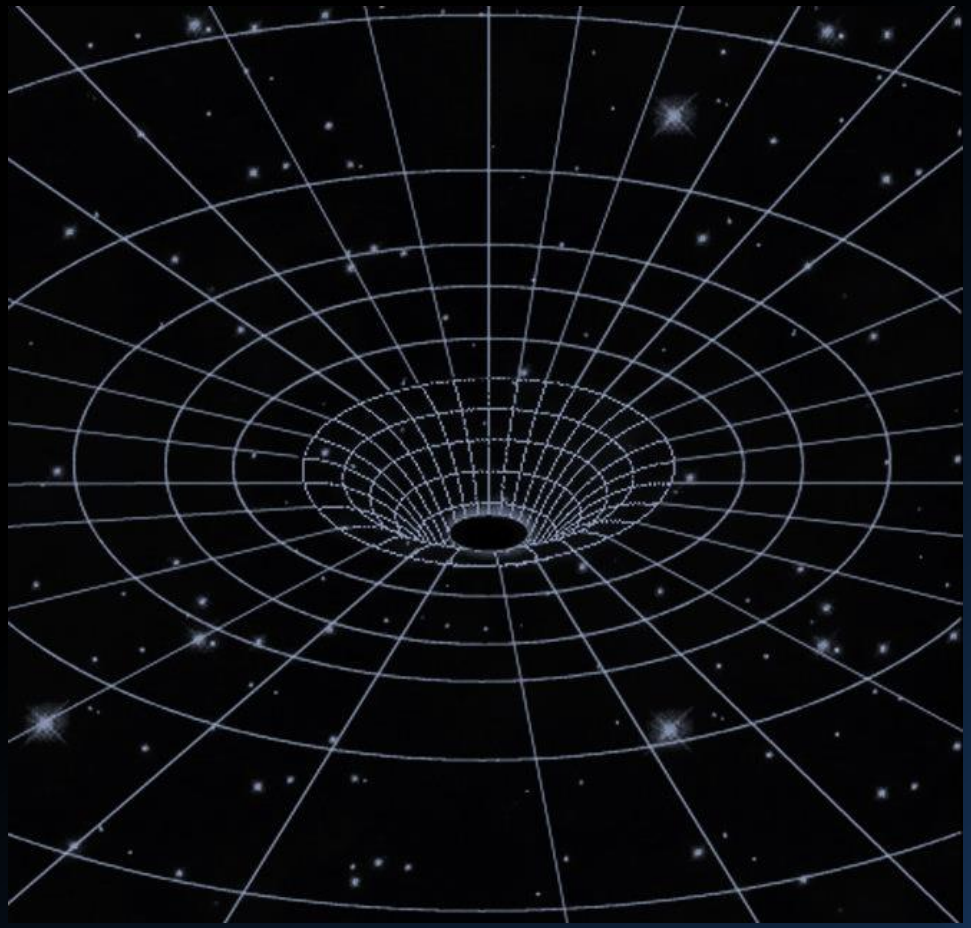
Les Trous Noirs



Club Astro-Amateurs
SAINT SAUVEUR

Nicolas DAGONEAU

Sommaire

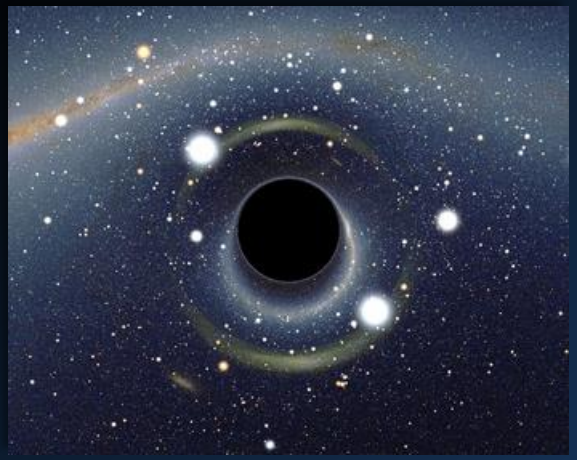
- Définition Actuelle
- Historique
- Structure Interne et Externe
- Types Théorique de Trous Noirs
- Types Physique de Trous Noirs
- Détection et Observation des Trous Noirs
- Evaporation des Trous Noirs
- Scénarios Trou Noir

Définition

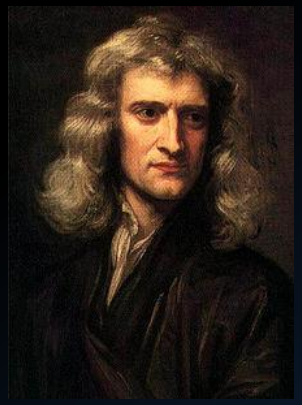
Un trou noir est un objet massif. Son champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière, de rayonnement de s'en échapper. Il n'émet pas de lumière et donc est invisible. Il n'est pas pour autant indétectable.

Le trou noir est décrit par la théorie de la relativité générale. Il déforme l'espace et le temps.

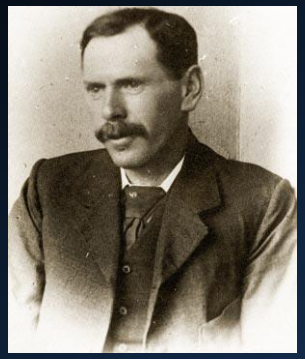
Aujourd'hui, l'existence de trous noirs est une certitude.



Historique



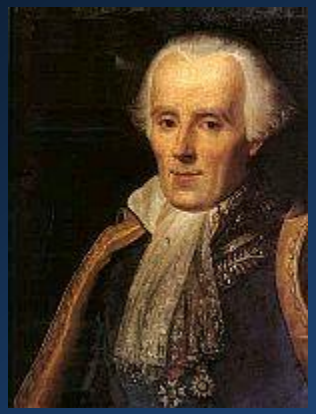
XVI-XVII : Issac Newton énonce les lois de gravitation et du mouvement.



1783 : John Michell (géologue et astronome amateur anglais) énonce le concept du « trou noir » :

« Une sphère de même densité que le Soleil dépassant son rayon dans une proportion de 1 à 500. »

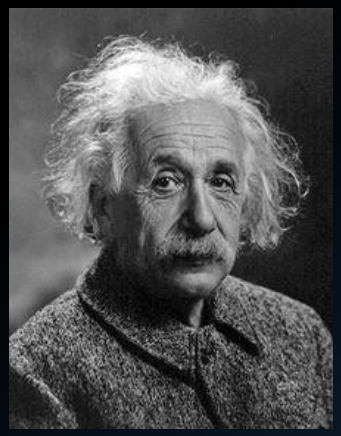
« Toute la lumière émise par un tel corps y retournerait, par sa propre gravité. »



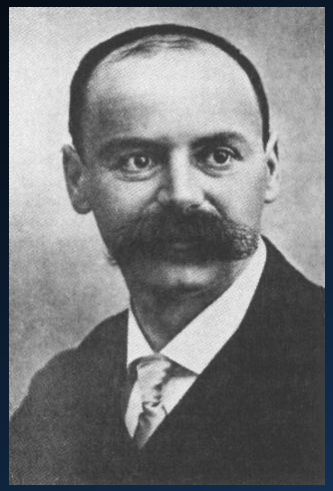
1796 : Pierre Simon de Laplace (mathématicien, philosophe et astronome) arrive à la même conclusion:

« Un astre lumineux, de la même densité que la Terre, et dont le diamètre serait 250 fois plus grand que le Soleil, ne permettrait à aucun de ses rayons de parvenir jusqu'à nous. Il est possible que les plus grands corps lumineux de l'univers puissent, par cette cause, être invisibles .»

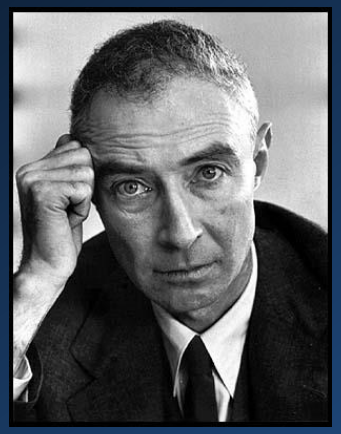
1915 : Albert Einstein énonce ses lois de la relativité générale.



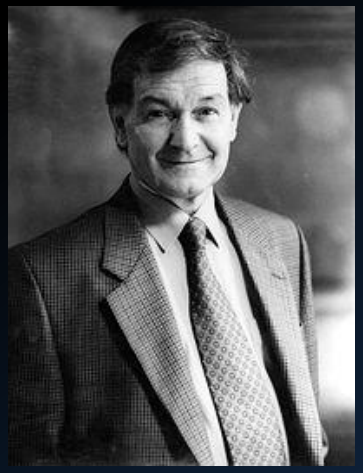
1916 : Karl Schwarzschild trouve une solution aux équations d'Einstein. Il calcul la courbure de l'espace temps pour laquelle la matière emprisonne le rayonnement. Il prédit l' existence des « trous noirs » .



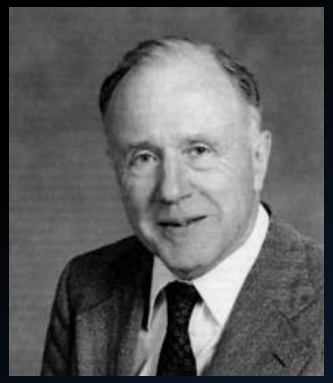
1939 : Roger Oppenheimer découvre que l'effondrement d'une étoile morte peut donner naissance à un « trou noir »



1965-1970 : Stephen Hawking et Roger Penrose montrent qu’a l’intérrieur d’un « trou noir » il y a un points et une courbure d’une densité infinie.



1967 : John Wheeler invente le terme « trou noir » qui remplace « astres occlus » ou « sphère de Schwarzschild ».

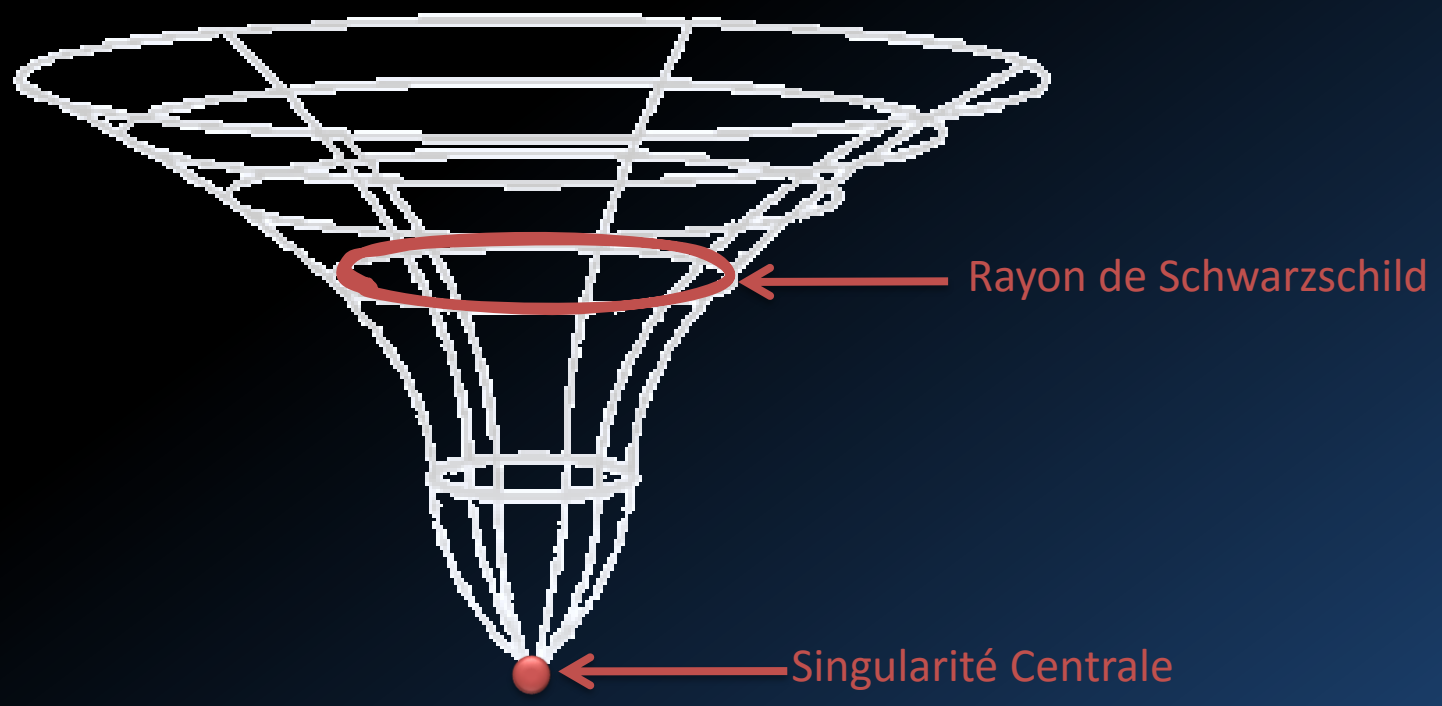


1970 : Lancement de Uhuru (NASA), premier satellite dédié à l'observation des sources de rayon X.

1971 : Premier trou noir identifié : Cygnus X-1.

Structure

Structure Interne du Trou Noir (2D)



Attention :
Représentation en 2D. Il faut
imaginer la même chose mais en 3D.

Le Rayon de Schwarzschild :

Le rayon de Schwarzschild R_S (ou Horizon des Evènements) est le « point de non retour » du trou noir. C'est une zone sphérique d'où l'énergie (matière et lumière) ne peut pas s'échapper.

Il est calculé simplement à partir de la vitesse de libération de la lumière.

A l'intérieur d'un trou noir, la vitesse de libération est supérieur à la vitesse de la lumière. Le rayon de Schwarzschild est donc le rayon maximal pour lequel la vitesse de libération est exactement égale à celle de la lumière.

On exprime donc le rayon en fonction de la vitesse de la lumière, de la constante de gravitation et de la masse du trou noir.

Par le calcul, on s'aperçoit que pour chaque masse solaire supplémentaire, le rayon augment de 3km environ.

Cela montre bien qu'un trou noir est extrêmement dense.

La singularité centrale :

La singularité centrale est le centre du trou noir. La singularité centrale est caractérisée par :

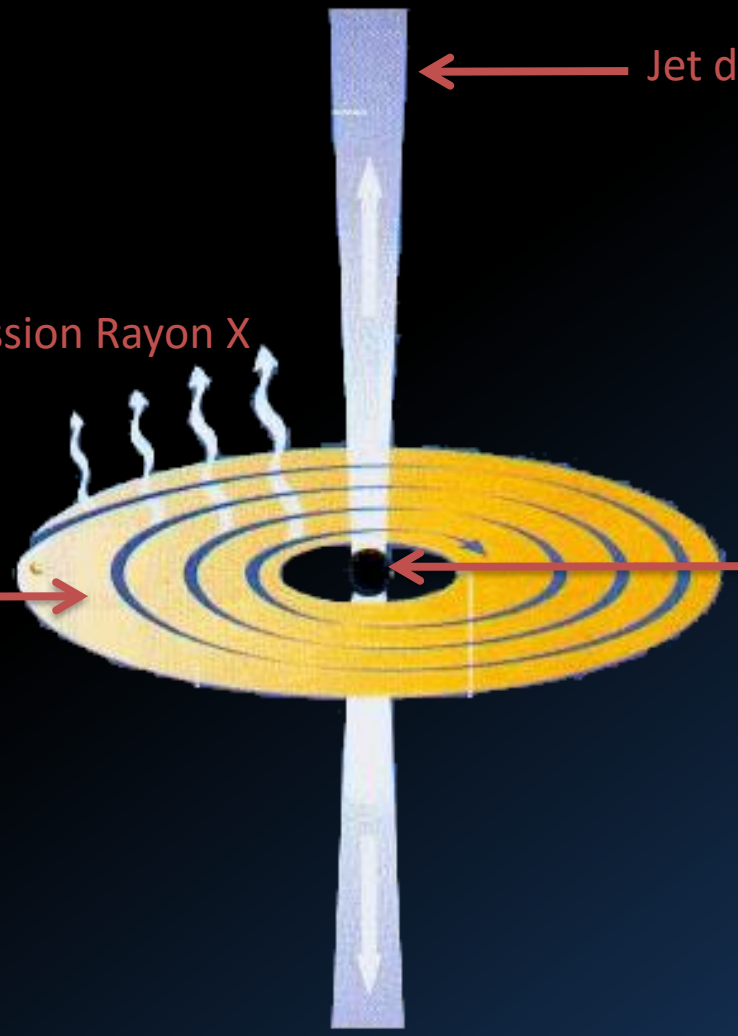
- une courbure infini de l'espace,
- une densité infinie,
- une force de gravitation infini,
- des effets de nature quantique.

Problème : La Relativité Générale ne permet pas de décrire :

- des régions où la courbure de l'espace est infinie .
- des effets gravitationnels de nature quantique.

La singularité centrale n'a aucun effet sur l'extérieur d'un trou noir.

Structure Externe du Trou Noir



Le Disque d'Accrétion

Un disque d'accrétion est une structure composé de matière en orbite autour d'un corps central et qui chute sur celui-ci. Dans le cas du trou noir, la matière suit la courbure de l'espace jusqu'à « tomber » dans le trou noir.

Le disque d'accrétion est caractérisé par la quantité de matière sur l'objet dans un temps donné : c'est le Taux d'Accrétion en $kg.\ s^{-1}$ (SI).

Le disque subit la force centrifuge. La friction entre les particules de matières présentent dans le disque engendre une émission de rayon X.

Les Jets

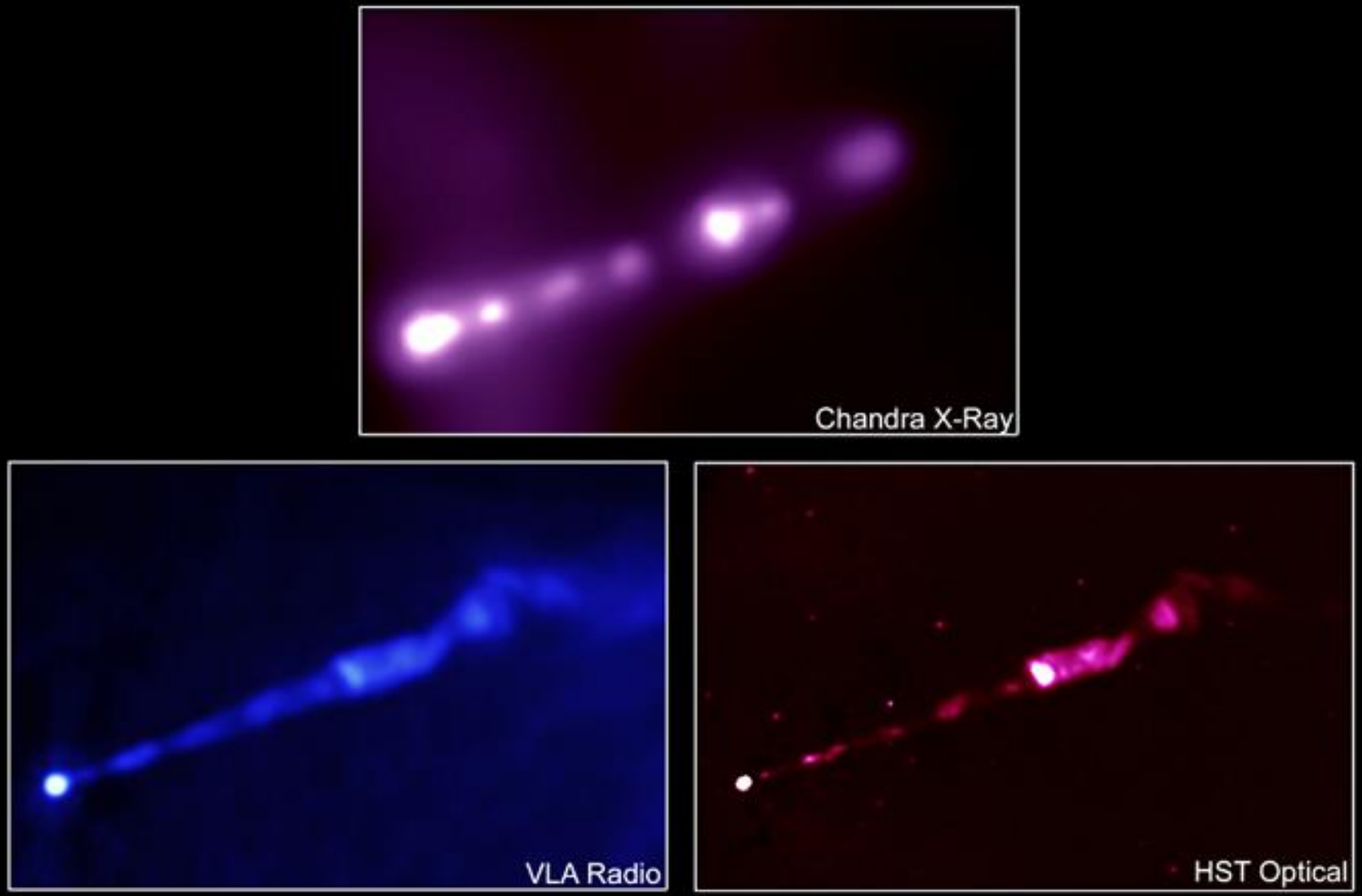
Un jet est un flux de matière éjecté par un corps.

Attention : La matière qui constitue le jet ne viens pas de l’ intérieur du trou noir.

La matière qui constitue le jet et une partie de la matière issue du disque d’accrétion. Elle est éjecté à cause du champs magnétique à une vitesse proche de celle de la lumière. Les jets sont perpendiculaires au plan du disque d’accrétion.

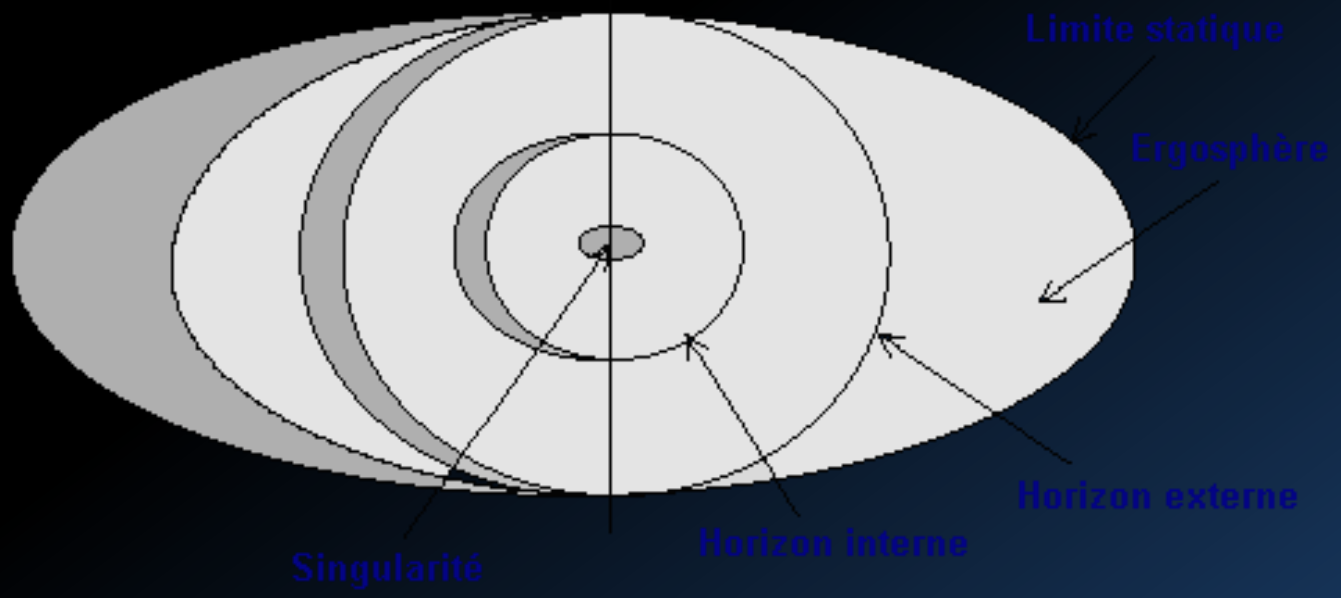
Ici, on peut voir le jet de particule issus du disque d’accrétion du trou noir situé au centre de M87. Le jet s ’étend sur 214 AL.

Il est constitué de Rayon X, Radio, Gamma …


Chandra X-Ray
VLA Radio
HST Optical

Powerful Jet from a Supermassive Black Hole in Galaxy System 3C 321
HUBBLESITE.org

Structure Générale du Trou Noir (3D)



Coupe d'un trou noir par le centre

Types Théorique de Trous Noirs

Les paramètres qui changent en fonction du type de trou noir sont :

- le moment angulaire J (≈ trou noir en rotation)
- la charge électrique Q

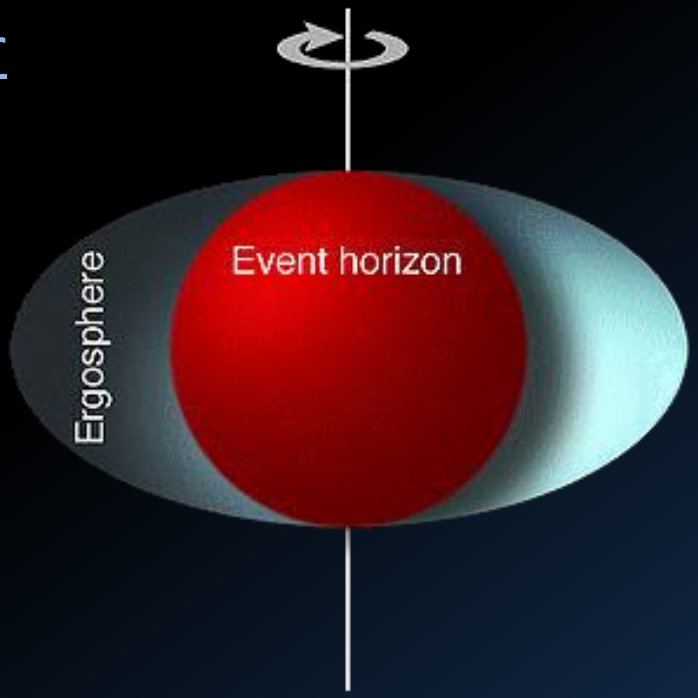
La masse M est strictement positive.

Il y a donc 4 types de trous noirs Possible

	M > 0	
	J = 0	J ≠ 0
Q = 0	~~Trou Noir de Schwarzschild~~	Trou Noir de Kerr
Q ≠ 0	~~Trou Noir de Reissner-Nordström~~	~~Trou Noir de Kerr-Newman~~

Purement théorique car J = 0

Trou Noir de Kerr



Théorème de Calvitie :

Le trou noir est décrit par 3 paramètre :

- il est en rotation,
- il a une charge électrique nulle,
- il a une masse non nulle

Il est décrit dans le cadre la relativité générale par la métrique de Kerr (fonction mathématique).

Ergosphère : c'est la zone où l'espace et le temps sont « entrainés » par le mouvement de rotation

Le trou noir de Kerr est le type de trou noir présent dans l'univers.

Types Réel de Trous Noirs

Il existe 4 types physique de trou noir :

- les Trous Noirs Stellaires,
- les Trous Noir Supermassifs,

- les Trous Noirs Intermédiaires,
- les Trous Noirs Primordiaux.

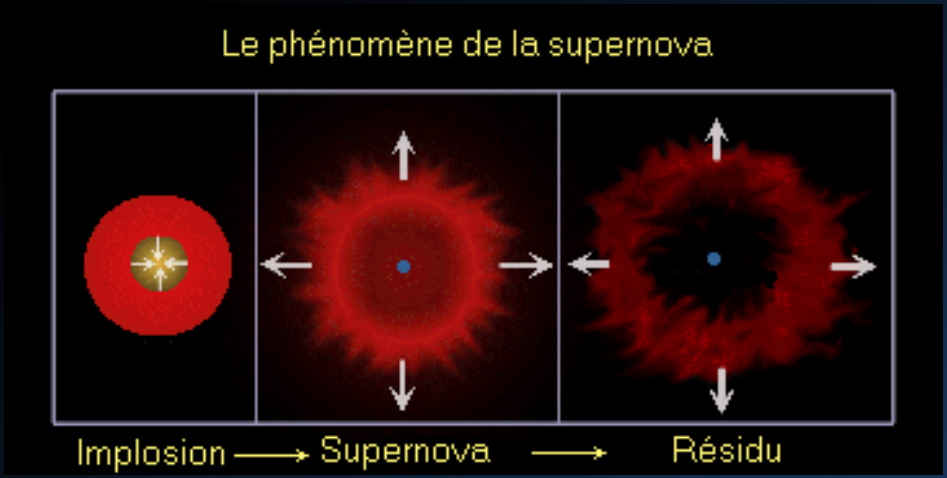
Trous Noirs Stellaires

Naissance : Après une supernova de type II :

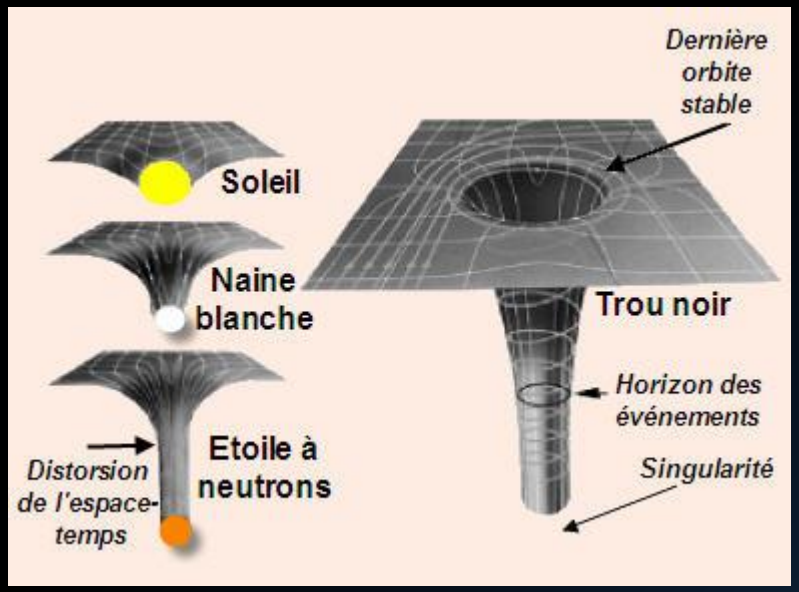
Lorsqu'une étoile massive ($M_{init} > 25M¤$) à transformé tout son gaz (hydrogène → hélium → carbone, → fer) , les réactions thermonucléaires s'arrêtent. En effet, l 'étoile n'a pas assez d'énergie pour transformer le Fer en un autre élément.

L'étoile ne produit plus assez d'énergie pour générer une **pression de radiation** suffisante pour soutenir les couche supérieur de l'étoile. La gravitation l'emporte et les couche externes s'effondre sur le noyau.

L'effondrement des couche externe produit une énergie énorme, l'étoile explose et les résidus sont éjectés à grande vitesse.



A ce stade, si la masse de l’étoile restante atteint la **limite d'Oppenheimer-Volkoff** soit 3,3M¤, l’objet s’effondre en trou noir.

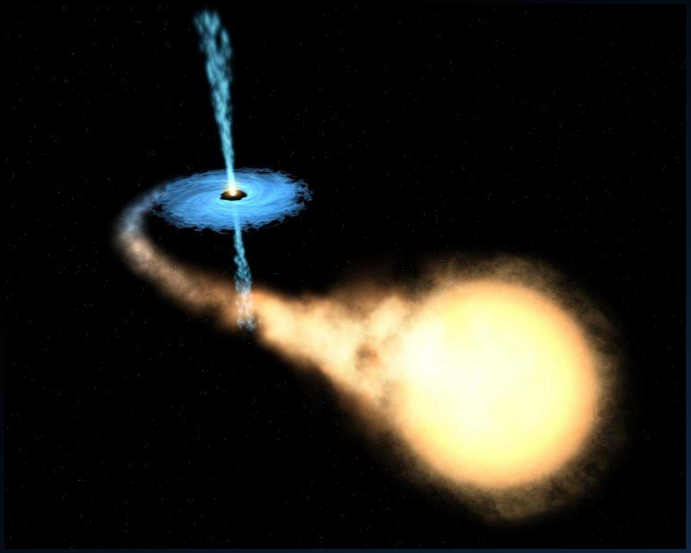


La **limite d'Oppenheimer-Volkoff** est la masse maximale théorique d’une étoile à neutron.

Système Binaire X ou Microquasar:

Un Système Binaire à rayon X est formé d'une étoile et d'un trou noir (ou d'une étoile à neutron).

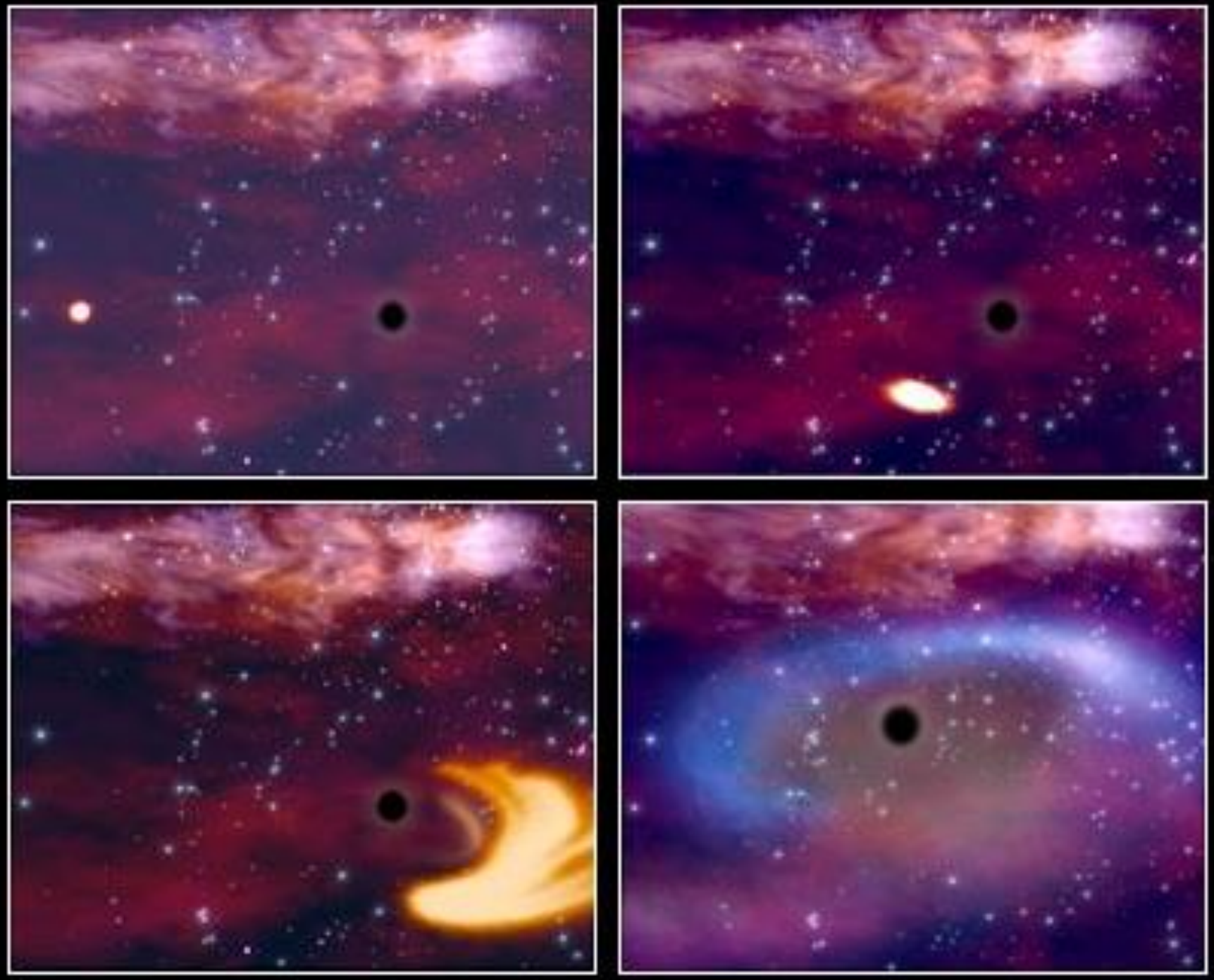
La matière de l'étoile est absorbée par le trou noir. Le rayonnement X provient du disque d'accrétion et des jets.



GRO J1655-40 (Scorpion)

Exemple de Trous Noirs Stellaires et Microquasar :

Cygnus X-1 (Cygne)
LMC X-1 (LMC)
LMC X-3 (LMC)
XTE J1819-254 (Sagittaire)



Trous Noirs Supermassifs

C'est le type de trou noir le plus massif. Sa masse varie de **1 million** à **1 milliard** de masses solaires.

Il sont situés au centre des grosses galaxies.

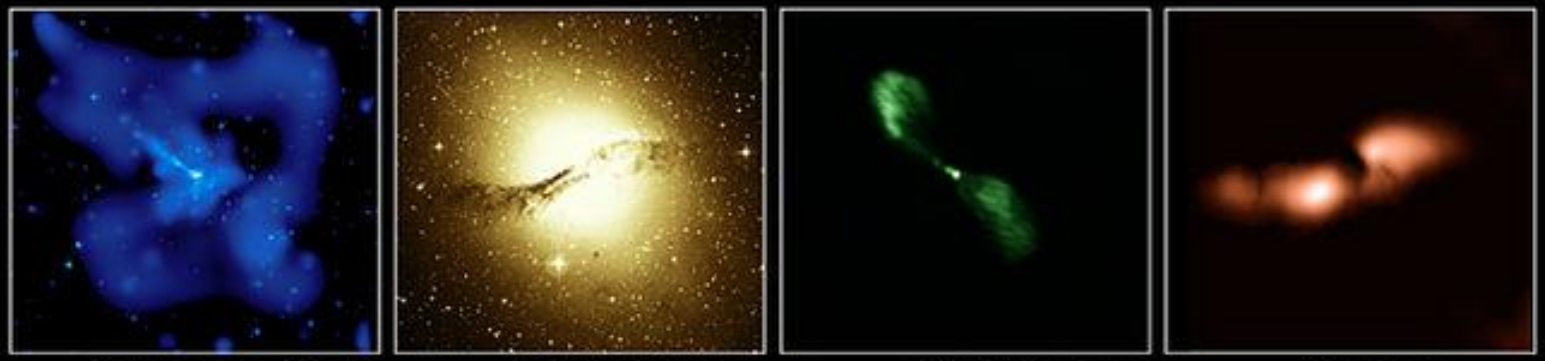
Naissance des Trous Noirs Supermassifs :

On suppose qu'ils seraient à l'origine des trous noirs stellaires qui ont accrété de la matière pendant des milliards d'années.

Cette hypothèse a de nombreux défauts :

- Nécessité d'une grande quantité de matière,

- Des trous noirs supermassif possédant un redshift élevé ont été repérés. Cela indique que ces trou noirs auraient été formé au début de l'évolution de l'univers.

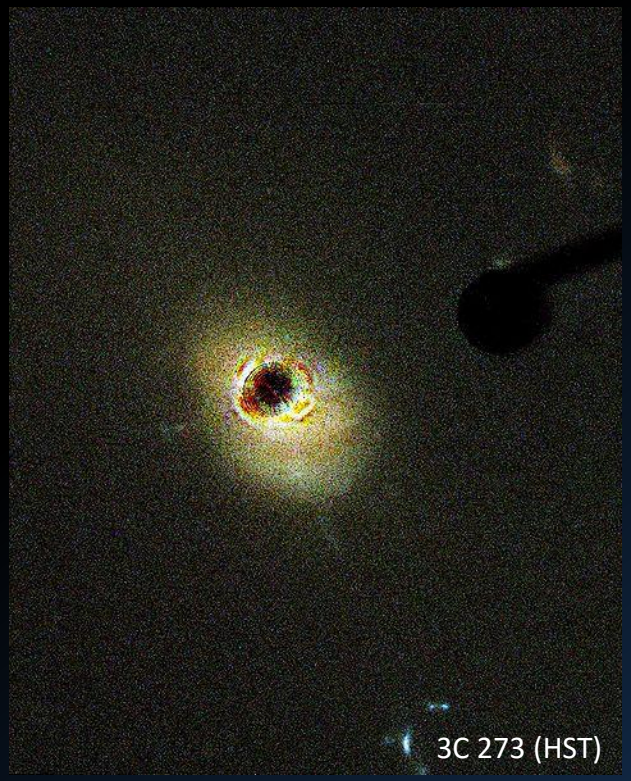


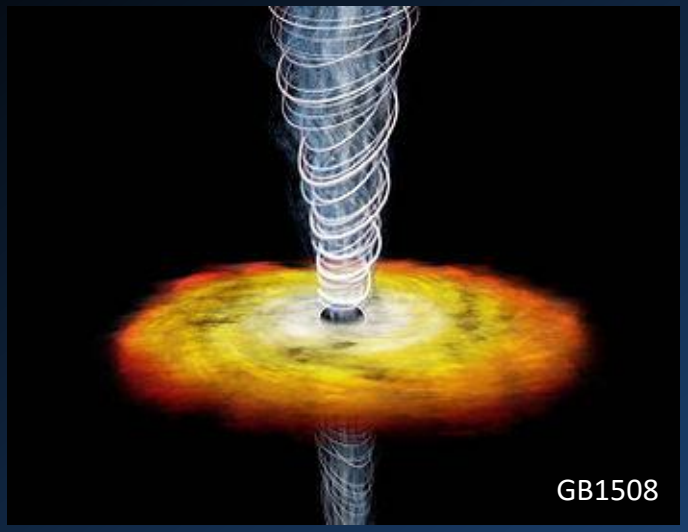
CHANDRA X-RAY | DSS OPTICAL | NRAO RADIO CONTINUUM | NRAO RADIO (21-CM)

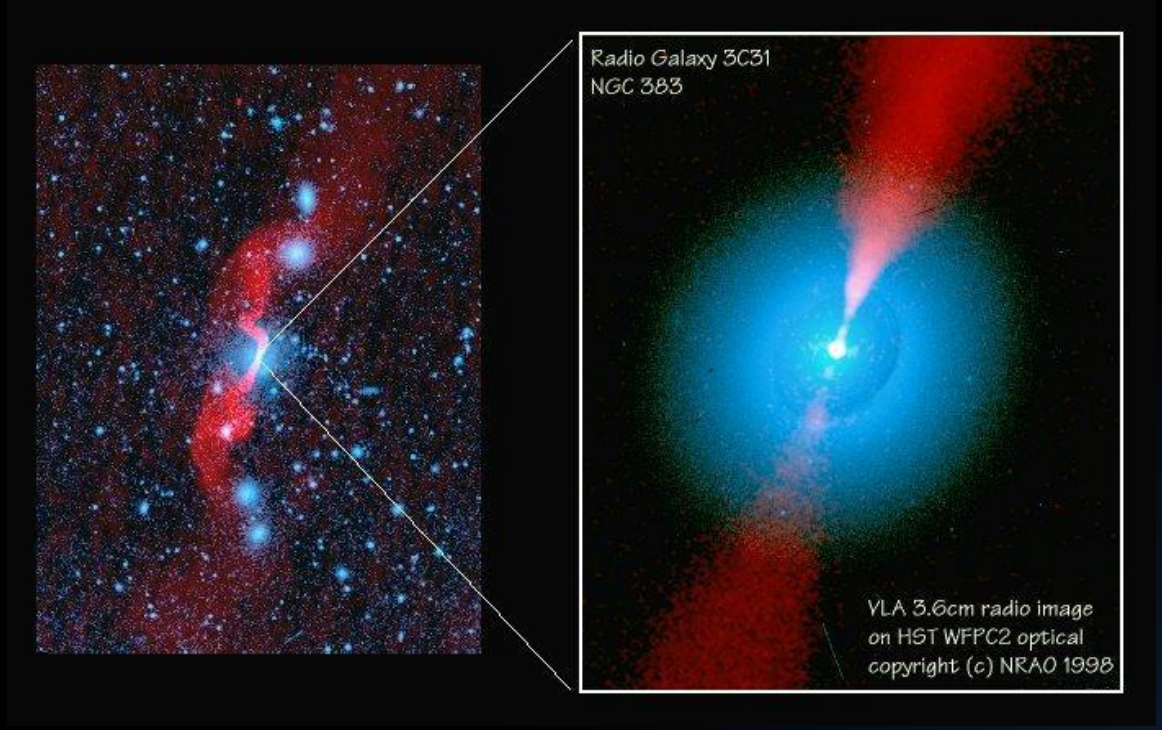
Noyaux Actifs de Galaxies (NAG), Quasars et Centre Galactique :

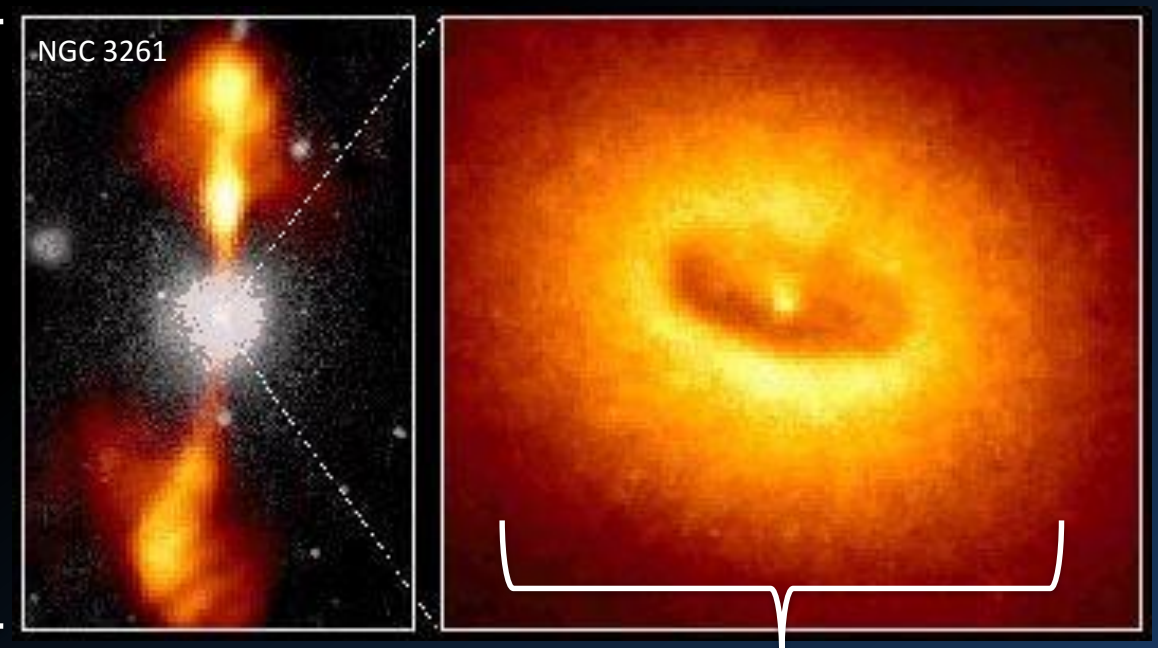
Le quasar est composé de trois partie : le trou noir, le disque d'accrétion et les jets.

Ils se situent au centre des galaxies. Ce sont les zones les plus lumineuse de l'univers sur tout le spectre de la lumière.







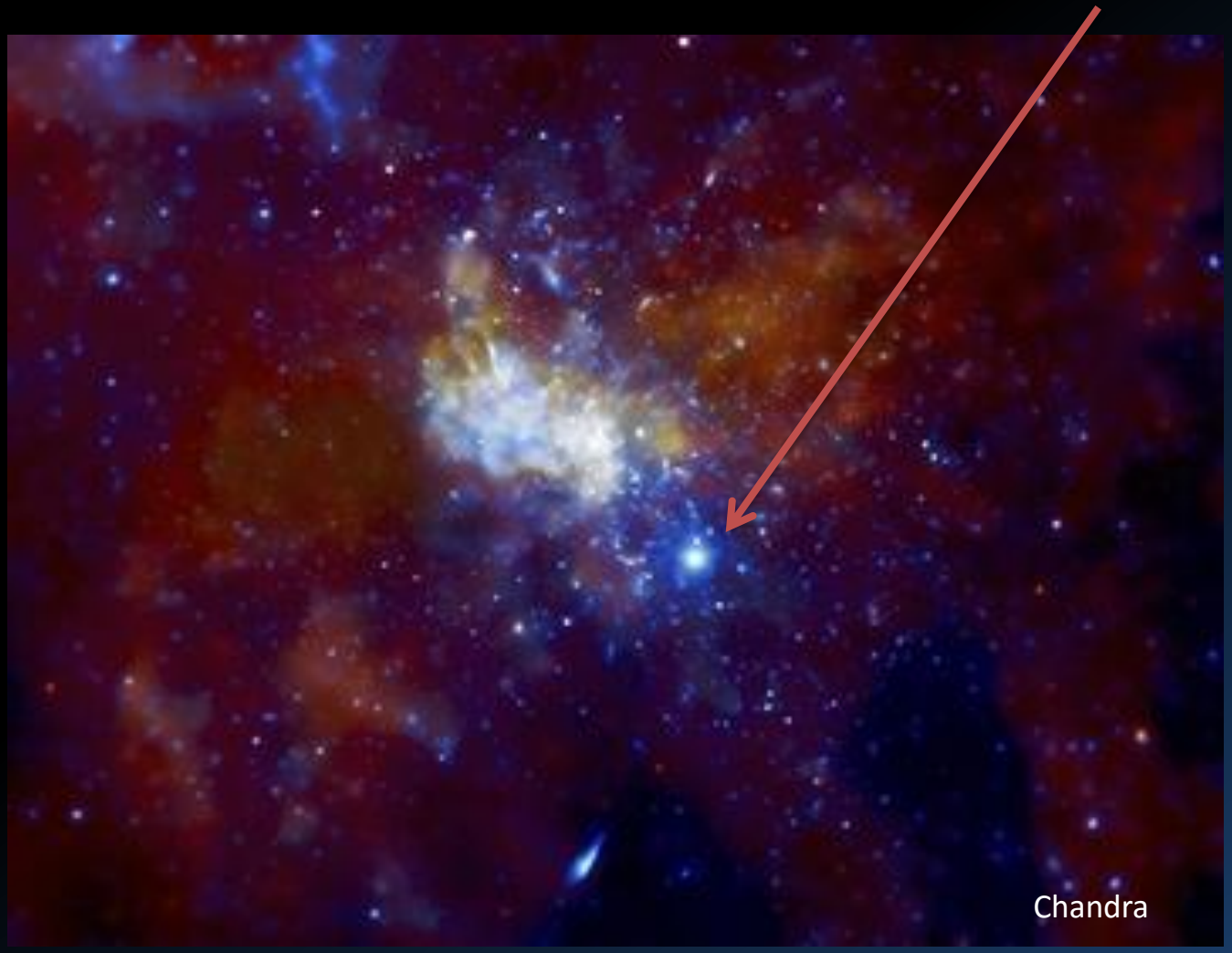


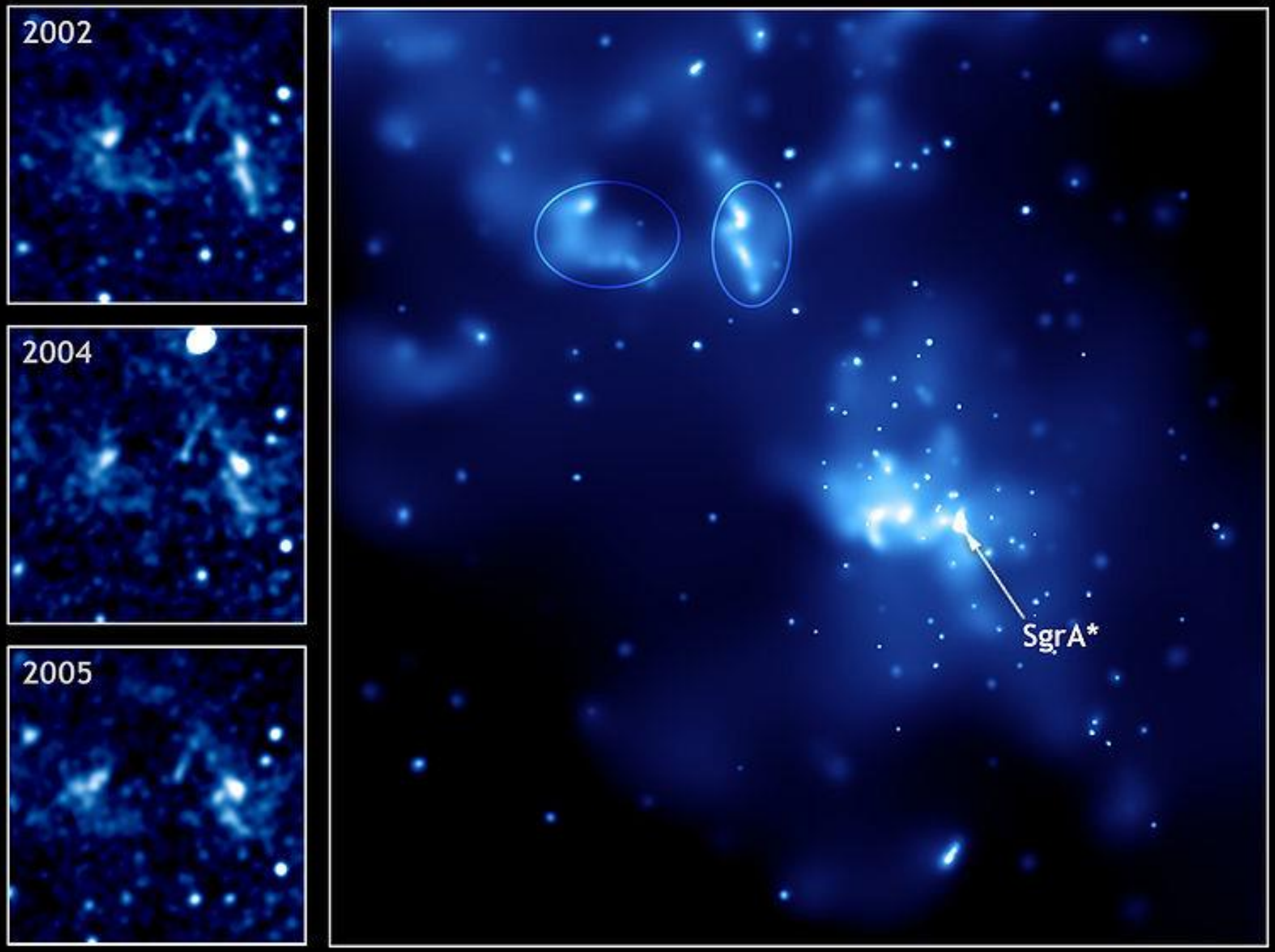
30 kpc
(10 000 AL)

2 400 AL

Le centre de la Voie Lactée : Sagittarius A*

Le centre de notre Galaxie, abrite un trou noir supermassif : Sagittarius A*.
Sa masse est de **3,7 ± 1,5 million** de masses solaires et son rayon **30 UA**.





Chandra

Trous Noirs Intermédiaires

Ce sont des objets récemment découvert.
Leur masse varie entre 100 et 10 000 M¤ .

Dans les années 2000, des observations ont montré l'existence de sources de rayon X (très lumineuse) dont la quantité de rayon X émis est trop importante pour être issus d'un trou noir stellaire. De plus, ces sources ne sont pas associées aux centre des galaxies.

On suppose qu'ils se formeraient dans des amas d'étoiles.

En 2004, le premier trou noir Intermédiaire est découvert à 3AL de Sgr A* dans un amas de 7 étoiles. Sa masse est de 1 300M¤.

En 2008, HST et Gemini montrent que l'amas Omega Centauri (NGC 5139) contiendrai un trou noir intermédiaire de masse M=4 000M¤.

NGC 5139

Trous Noirs Primordiaux, Micro Trous Noirs et Trous Noirs Quantiques

Ce sont des trous noirs formé au pendant le Bigbang. Ils sont formés par la présence de régions extrêmement dense de l'univers primitif.

Selon la théorie du Bigbang, à ces instants, à température et à pression très élevé, la moindre variation de densité provoque un effondrement gravitationnel rapide.

Une fois les régions à haute densités dissipées lors de l'expansion, les trous noirs Primordiaux restent stables.

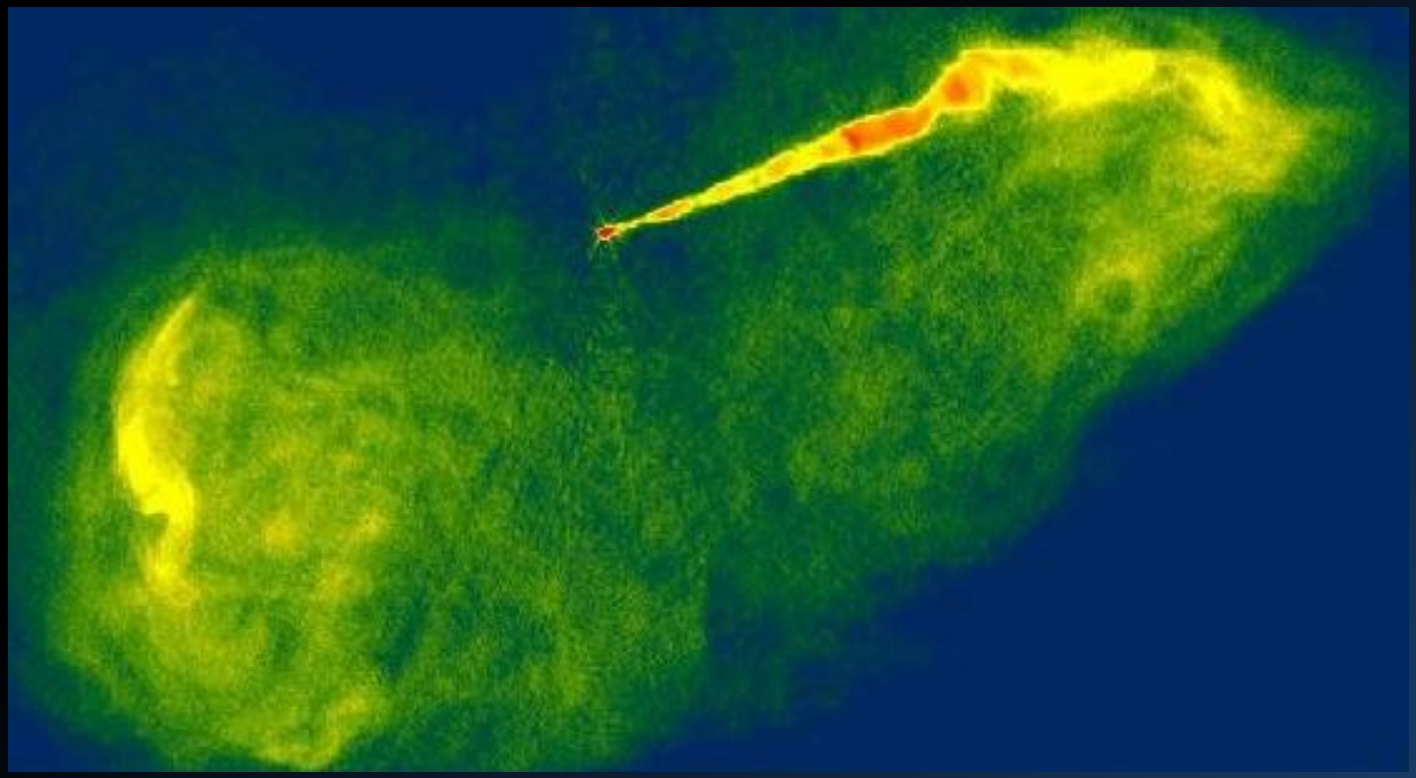
Aujourd'hui, aucun trou noir Primordial n'a été découvert.

Nous pouvons néanmoins créer des micro trous noirs artificiels dans des accélérateurs de particules comme dans le LHC au CERN.

Observation et Détection des Trous Noirs

Comme on ne peux pas observer directement de trous noirs, on utilise les indices qu'ils laissent dans leur environnement pour les détecter :

Les Jets :



Jets dans M87 en radio

Lentille Gravitationnelle :

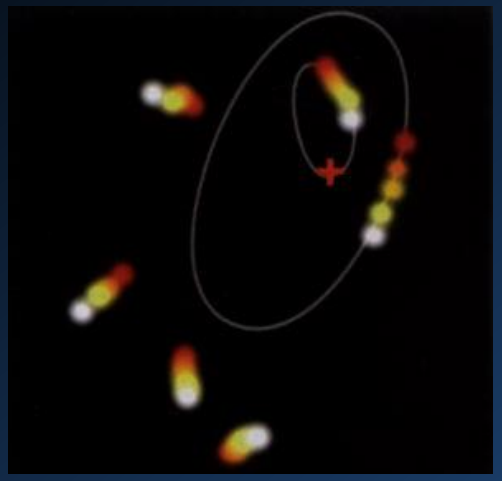
Comme un trou noir déforme l'espace, le rayon lumineux issus d'un objet situé derrière le trou noir sont déformés par la courbure de l'espace. On reçoit donc plusieurs images du même objet.

Rayonnement X et Gamma:

En utilisant la radioastronomie, il est possible de repérer les sources de rayonnement X et Gamma, souvent des trous noirs ou des centres galactiques actifs.

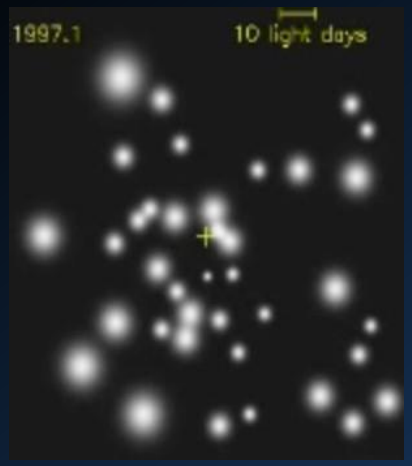
Trou Noir et Gravitation :

Avant l'horizon des évènement, un objet peut être en orbite autour d'un trou noir sans jamais tomber dedans.



Dans un système binaire, l'étoile compagnon alimente le trou noir. Dans le cas d'un trou noir supermassif, les autres étoiles sont en orbite autour du trou noir. Les lois de Kepler sont respectés.

Orbite de S2 autour de Srg A*



Vue d’un Trou Noir

Evaporation des Trous Noirs

En 1975, Stephen Hawking, prédit **l'Evaporation de Trous Noirs** (**Radiation de Hawking**).

Paradoxalement, un trou noir peut emmètre un très faible rayonnement.

<u>Principe</u> : En tenant compte de la **physique quantique** et de l'existence des **fluctuations du vide** :

En temps normal, des paires particules/anti-particules sont en permanence générées par le vide et s'annihilent aussitôt sauf si un phénomène les sépare les unes des autres en un temps inférieur à la durée de vie de la paire.

A proximité de l'horizon du trou noir, les forces de marées générées par le champ gravitationnel peuvent séparer la particule de l'anti-particule avant qu'elles ne s'annihilent.

L' anti-particule (énergie négative donc masse négative) est absorbé par le trou noir tandis que la particule (énergie positive donc masse positive ou nulle) s'éloigne dans le sens opposé.

Le trou noir perd donc de l'énergie : il s'évapore.

Temps d'Evaporation :

Il est possible d'estimer le temps d'évaporation du trou noir. Grâce à la formule établie, on estime le temps d'évaporation du trou noir à **10^{57} fois l'âge de l'univers**. Cela montre que l'évaporation des trou noir est négligeable car très lente.

Température de Surface:

L'effet Hawking implique que la surface du trou noir ait une température.

La température est proportionnelle à la gravité de surface du trou noir.

Grâce à la formule établie, on remarque que la température atteinte est inférieur à quelques microkelvin pour un trou noir stellaire et bien plus faible encore pour un trou noir supermassif.

En effet, comme la gravité de surface est inversement proportionnel à la masse du trou noir , plus le trou noir est petit, plus la température est élevé et inversement.

Scénarios Trou Noir

On considère 2 observateurs : A est éloigné du trou noir,
B se dirige vers le trou noir.

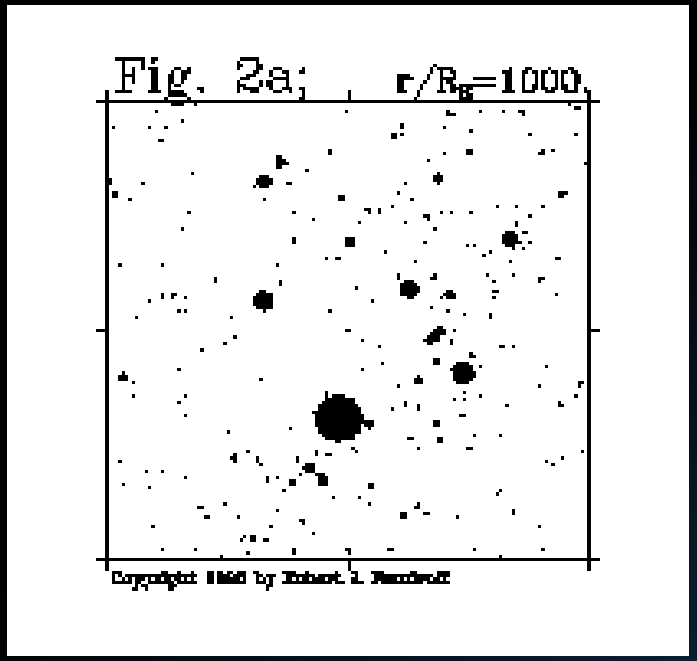
<u>Que voit A :</u>

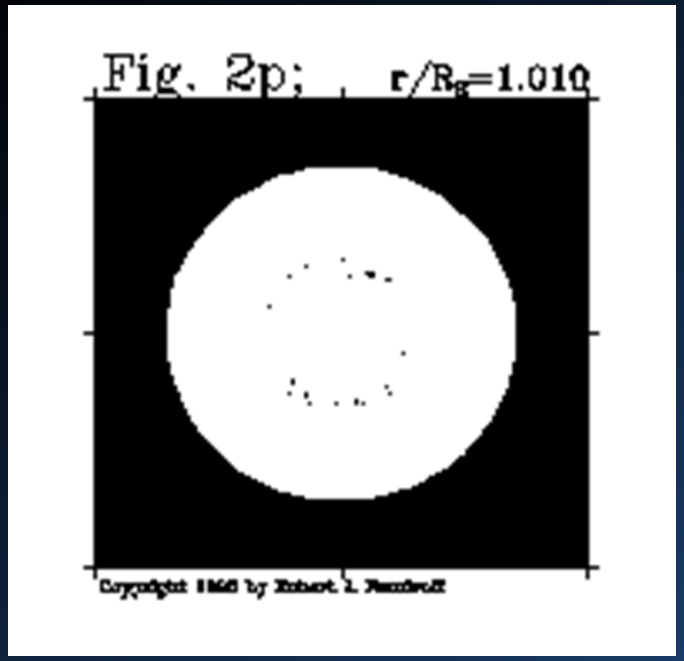
A voit B se diriger vers le trou noir .
Selon la théorie de la relativité générale et la dilatation du temps : A ne verra jamais B franchir l'horizon des événements. (Un corps de masse importante dilate et ralenti le temps). Pour A, B met un temps infini pour traverser l'horizon des événements avant d'être vaporisé par le rayonnement de Hawking.

Que voit B :

B ne ressent aucun effet lorsqu'il franchit l'horizon des événements. Il continue son chemin vers le centre du trou noir. Il ne peut plus faire demi tour. En s'approchant de la singularité centrale, B disparaitra à cause des forces qui s'y exercent.

Si il se retourne, il verra tout l'univers .





Problème : Le Paradoxe de Hawking

Où est vraiment B : à l'extérieur ou à l'intérieur ?
Traverse t-il vraiment l'horizon des évènements (selon B) ou ne le traverse t-il pas (selon A) ?

Les deux points de vues sont exacts, mais s'opposent.

Selon Léonard Susskind, la réponse est : « les deux ». B est à la fois à l'extérieur et à l'intérieur. Il n'y a pourtant un seul exemplaire de B.

→ Même principe que le chat de Schrödinger

○ Problème : généralisation des lois de la « physique quantique » à des objects macroscopiques.

○ Problème : Paradoxe du à l'évaporation du trou noir et à la vision de l'observateur extérieur.