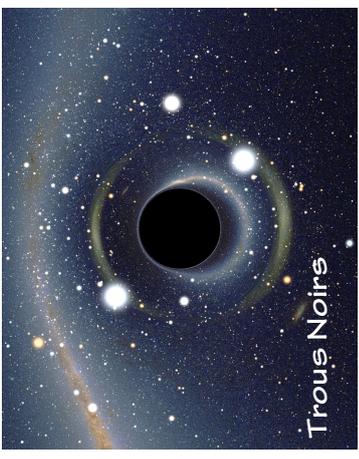


Frédéric Vincent
Observatoire de Paris

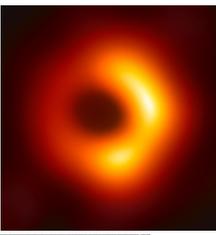


L'Univers dans ma poche

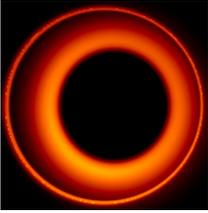
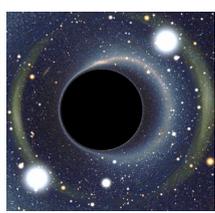
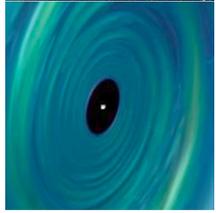
Réponse au dos



Laquelle de ces images est le résultat d'une observation ?

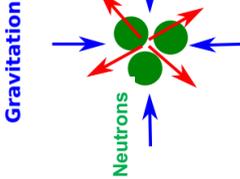


QUIZ



Trous noirs supermassifs

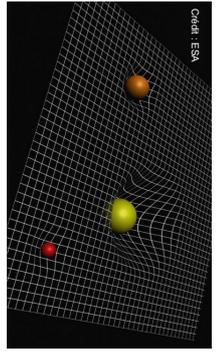
En dehors des trous noirs nés de l'effondrement d'étoiles massives, il existe des trous noirs « supermassifs » au centre des galaxies.
Le Prix Nobel 2020 a été attribué pour l'étude des orbites des étoiles occupant la région la plus centrale de notre Voie Lactée, révélant l'existence d'une masse de 4 millions de fois la masse du Soleil rassemblée dans une région pas plus grande que notre Système solaire.
D'autres observations portant sur la galaxie Messier 87 ont permis d'obtenir en 2019 la première image des environs immédiats d'un autre trou noir supermassif, qui donne d'autres arguments très forts pour soutenir l'existence de ces objets extrêmes.



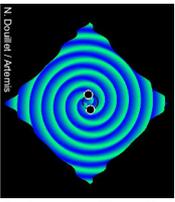
En l'absence de carburant nucléaire, la gravitation fait s'effondrer l'étoile, ce qui conduit à compresser très fortement la matière de l'étoile. La mécanique quantique fait alors apparaître un **nouveau terme de pression, dite de dégénérescence**, qui grandit d'autant plus que la compression augmente. Un nouvel adversaire apparaît donc en face de la gravitation, lorsque la pression thermique n'est plus suffisante pour supporter l'étoile. Cependant, si l'étoile est assez massive, c'est la gravitation qui finit par l'emporter, et l'effondrement se poursuit jusqu'à la formation d'un trou noir.

Fin de vie d'une étoile massive

Lorsque tout le combustible a été utilisé au cœur de l'étoile, l'équilibre pression-gravité est rompu. La gravité l'emporte lorsque la pression thermique ne suffit plus à supporter le poids de l'étoile. L'étoile s'effondre alors sur elle-même. Si la masse de l'étoile dépasse 10 fois celle du Soleil, l'étoile continue de s'effondrer jusqu'à ce qu'une forme exotique de pression appelée « pression de dégénérescence des neutrons » apparaisse et lutte contre l'effondrement. L'étoile explose en supernova, soufflant ses couches externes. Si le noyau stellaire résiduel a environ deux masses solaires, il restera une étoile à neutrons. Mais si à une masse plus importante, alors même la dégénérescence des neutrons ne pourra pas fournir une pression suffisante pour contrer la gravité et l'étoile s'effondrera en un trou noir.



La présence d'objets massifs déforme l'espace-temps en leur voisinage. Si ces objets sont statiques, cette déformation ne va pas évoluer.

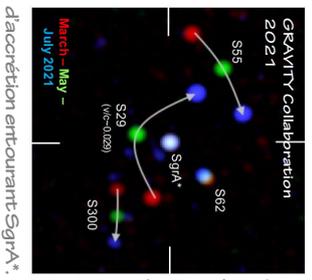


Si ces objets sont des trous noirs en rotation l'un autour de l'autre, la déformation se propage à la vitesse de la lumière comme les rides à la surface d'un étang dans lequel une pierre a été jetée : ce sont des ondes gravitationnelles. La figure ci-dessus représente l'émission de ces ondes par un couple de trous noirs en rotation l'un autour de l'autre.

Ondes gravitationnelles

Les trous noirs peuvent exister par paires : les deux composants de la paire vont alors tourner l'un autour de l'autre et émettre des ondes gravitationnelles. Imagine une couche de framboises avec une framboise posée dessus : elle va déformer légèrement la surface de la gelée. Une autre framboise posée à côté ajoute sa propre déformation. Si on fait tourner les framboises l'une autour de l'autre, des rides de déformation vont se propager dans la gelée.

De même, les ondes gravitationnelles sortent des rides de déformation de l'espace-temps autour de trous noirs en mouvement. De telles rides ont été détectées sur Terre pour la première fois en 2016. Elles donnent un moyen d'accéder très précieusement aux propriétés des trous noirs. Le prix Nobel 2017 fut attribué à cette détection.



Mouvement de quatre étoiles à proximité du trou noir supermassif Sgr A* au centre de la Voie Lactée. Le point blanc central correspond au rayonnement issu du disque



EHT Collaboration 2019
Image de la zone la plus centrale du disque d'accrétion entourant le trou noir supermassif au centre de la galaxie M87 (Messier 87).

Formation d'un trou noir

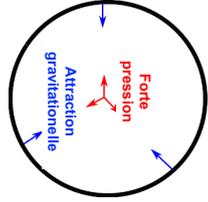
Imaginons un photon (une particule de lumière) émis au centre de l'étoile en train de s'effondrer. Initialement, ce photon peut bien entendu s'échapper de l'étoile. Cependant, à un stade très avancé de l'effondrement de l'étoile, ce photon va commencer à s'éloigner, mais sera rapidement contraint de revenir vers le centre de l'étoile. Pourquoi ? Parce qu'une nouvelle structure de l'espace-temps est née, appelée « horizon de l'horizon des événements ».

Ceci signifie la création du trou noir. La lumière émise à l'intérieur de l'horizon des événements est soumise à une gravitation si extrême qu'elle est piégée à l'intérieur de cet horizon. Un trou noir est donc, en effet, noir, en ce sens que la lumière ne peut plus s'en échapper pour aller rejoindre un télescope lointain.

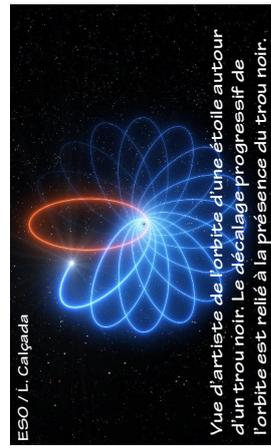


L'énorme pression au cœur de l'étoile pousse vers l'extérieur comme la vapeur dans une casserole d'eau bouillante.

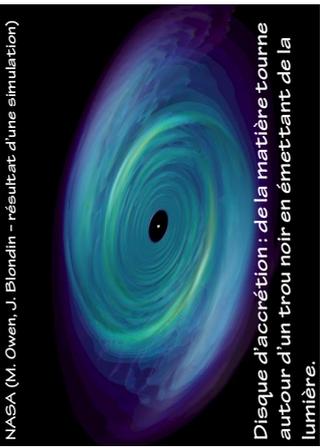
La gravitation tend à faire tomber les particules extérieures de l'étoile vers son centre comme la pomme détachée de l'arbre tombe par effet de l'attraction terrestre.



Une étoile est en équilibre entre l'action de la pression thermique vers l'extérieur et l'action de la gravitation dirigée vers l'intérieur.



Vue d'artiste de l'orbite d'une étoile autour d'un trou noir. Le décalage progressif de l'orbite est relié à la présence du trou noir.



Disque d'accrétion : de la matière tourne autour d'un trou noir en émettant de la lumière.

Simulation d'un disque d'accrétion entourant un trou noir (Owen & Blondin, 2005).

Image observée du disque d'accrétion au centre de la galaxie M87 (Collaboration EHT 2019)

Simulation de l'image d'un fond de ciel de la Voie Lactée avec un trou noir en avant-plan (Riazuelo 2009).

Simulation d'un disque d'accrétion entourant un trou noir au centre de la galaxie M87 (Vincent et al. 2019).

Simulation d'un disque d'accrétion entourant un trou noir au centre de la Voie Lactée (Lamy et al. 2019).

Réponse

Trous noirs et matière environnante

Si un trou noir est noir, il n'en est pas de même de la matière qui l'entoure. Un trou noir n'est pas un grand aspirateur cosmique : de la matière peut se maintenir en orbite en son voisinage et créer un « disque d'accrétion ». Ces disques émettent un copieux rayonnement dans toutes les longueurs d'ondes, portant la marque de la présence du trou noir. Par ailleurs, des étoiles peuvent se maintenir en orbite autour d'un trou noir, et leurs trajectoires porteront également la marque de la présence de l'objet compact. Tout comme les ondes gravitationnelles, la lumière émise au voisinage d'un trou noir et les orbites des étoiles proches constituent des sondes utiles pour étudier les propriétés des trous noirs..

L'Univers dans ma poche N° 17

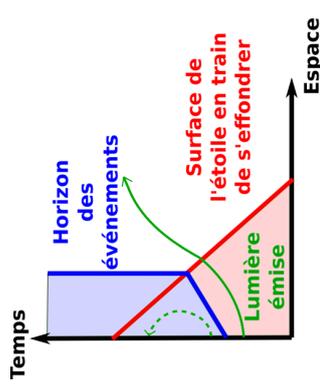
Ce mini-livre a été écrit en 2022 par Frédéric Vincent de l'Observatoire de Paris (France) et revu par Eric Gourgoulhon, également de l'Observatoire de Paris et Stan Kurtz (UNAM, Mexique).

Image de couverture: simulation par Alain Riazuelo (AP) d'un fond de ciel de la Voie Lactée avec en avant-plan un trou noir.



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter <http://www.tulump.org>

TULUMP Creative Commons



Ce diagramme représente la taille de l'étoile en effondrement (partie rouge du schéma, qui diminue au fil du temps). A un certain stade de l'effondrement, l'horizon des événements apparaît et croît jusqu'à sa taille finale (partie bleue du schéma). La lumière émise hors de l'horizon peut s'échapper (trajectoire en trait plein vert), mais la lumière émise sous l'horizon (trajectoire en tirets verts) y reste piégée. Le trou noir est la partie bleue du schéma.

L'équilibre d'une étoile

Une étoile est en équilibre entre deux tendances opposées.

Les réactions nucléaires au cœur de l'étoile (fusion de l'hydrogène en hélium, fusion de l'hélium en carbone etc. voir TULUMP 14) chauffent sa matière et lui confèrent ainsi une certaine pression qui tend à dilater l'étoile (comme la vapeur d'eau sous le couvercle de la casserole chauffée).

La gravitation fait « tomber » les parties externes de l'étoile vers son centre, ce qui tend à contracter l'étoile.

Ces deux tendances se compensent exactement pendant la majeure partie de la vie de l'étoile. Mais que se passe-t-il lorsque le carburant interne de l'étoile est épuisé ?