

2.6 Trou noir

Un trou noir est l'état de fin de vie d'une étoile de masse importante, supérieure à 3 masses solaires au moment de l'effondrement. Celui-ci est produit par attraction gravitationnelle de la couche externe, que la pression de radiation du noyau ne peut arrêter.

2.6.1 Définition astronomique et formation d'un trou noir

Définition astronomique

Un trou noir est un astre exerçant une attraction gravitationnelle extrême à laquelle rien ne peut échapper en s'éloignant, pas même la lumière. Mais en tant que corps ayant une masse, il est lui-même attiré par une étoile ou un autre trou noir, autour desquels il peut tourner ; et il peut être lui-même absorbé par un trou noir plus grand.

Formation d'un trou noir

Première barrière d'effondrement : 1.44 masses solaires

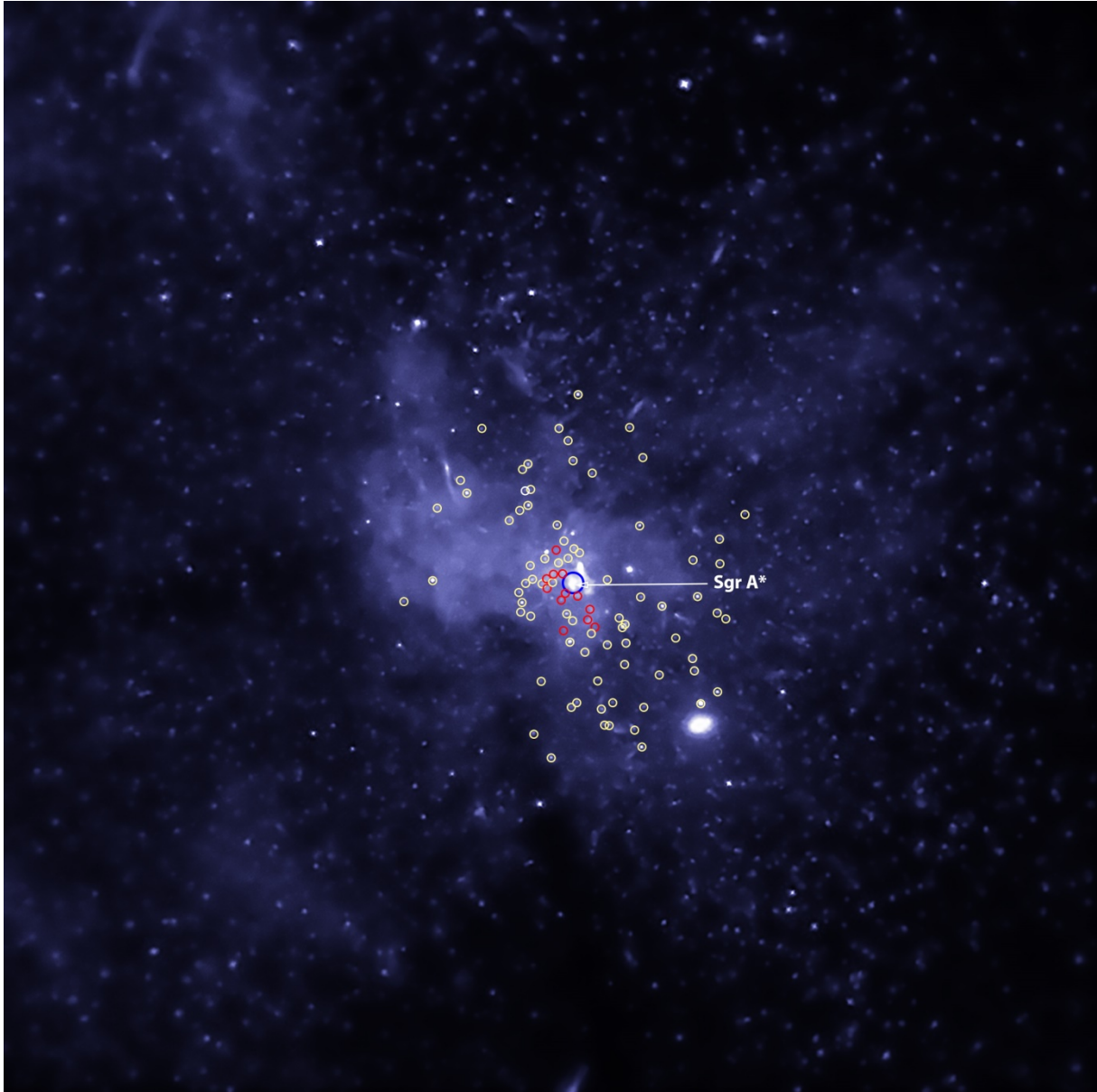
Lorsque la masse d'une étoile est inférieure à 1.44 masse solaire (limite dite « de Chandrasekhar »), son effondrement gravitationnel en fin de vie s'arrête lorsqu'une naine blanche s'est formée, grosse comme une petite planète : ~10 000 km de diamètre. Les forces qui résistent à la compression sont celles d'un gaz d'électrons dégénéré, dont un calcul de Relativité restreinte et Mécanique quantique montre qu'elles ne peuvent supporter plus de 1.44 masse solaire. Le résultat de cet effondrement est une étoile naine blanche, très dense et très chaude.

Deuxième barrière d'effondrement : ~3 masses solaires

Lorsque la masse d'une étoile est comprise entre 1.44 et ~3 masses solaires, l'explosion de fin de vie produit une supernova qui expulse son enveloppe gazeuse. L'effondrement s'arrête lorsqu'une étoile à neutrons s'est formée, avec un diamètre de l'ordre de 20 km. La densité de l'étoile est alors de l'ordre de celle d'un noyau atomique, et les forces qui résistent à la compression sont celles d'un tel noyau.

Il n'y a pas de troisième barrière : l'effondrement continue indéfiniment

Un trou noir se forme à la mort par effondrement d'une étoile de masse supérieure à 3 masses solaires environ. Quand celle-ci a épuisé son carburant thermonucléaire interne après avoir brillé pendant toute sa vie, elle devient instable : la pression de radiation due à la réaction de fusion thermonucléaire ne suffit plus pour équilibrer celle du poids des couches extérieures de l'étoile. Ces couches s'effondrent, leur masse étant attirée par le noyau stellaire. Cet effondrement (affectant les quelques centaines de milliers ou quelques millions de km d'épaisseur des couches stellaires) produit une compression si colossale qu'aucune loi physique ne peut l'arrêter : l'étoile tout entière est réduite à un point infiniment petit, le trou noir.



Trous noirs (repérés par de petits cercles) au voisinage du centre (Sagittarius A) de notre galaxie. Sagittarius A est lui-même un trou noir de 4 millions de masses solaires - © NASA

Une singularité de l'espace-temps

Ce point concentrant toute la masse de l'étoile, sa densité est infinie ; et comme l'étoile tournait sur elle-même, son moment cinétique de rotation se retrouve dans le trou noir, bien que le rayon de celui-ci soit nul. C'est donc une *singularité* de l'espace-temps, un point où sa courbure est infinie et où les hypothèses fondamentales de la Relativité générale cessent de s'appliquer.

Un trou noir stellaire ne se forme comme cela que si la masse stellaire après effondrement est supérieure à 3 masses solaires, c'est-à-dire $3 \times 2 \cdot 10^{30}$ kg, ce qui correspond à environ 5 masses solaires avant effondrement.

2.6.2 Rayon de Schwarzschild

L'équation des géodésiques de la métrique de Schwarzschild implique que l'accélération radiale initiale d'un corps au repos lâché en chute libre depuis une coordonnée r vaut :

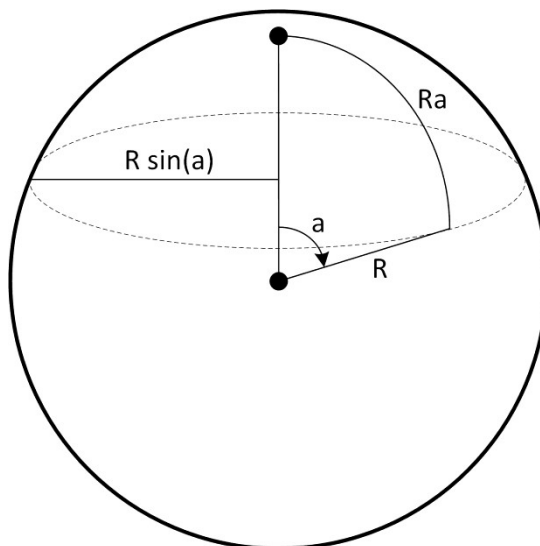
$$\frac{d^2r}{d\tau^2} = -\frac{r_s}{2r^2} \quad (\text{Schwarzschild})$$

où r_s est le « rayon circonférentiel » ou « coordonnée radiale circonférentielle » de l'événement, dont voici la définition.

Définition du rayon circonférentiel d'un événement

Voir dessin ci-dessous.

Sur la surface sphérique de rayon R on trace un cercle dont l'axe joint le "pôle Nord" au centre de la sphère. Un arc de longueur Ra de ce cercle est vu sous un angle a depuis le centre de la sphère. Le rayon r_s de ce cercle, mesuré dans son plan, a une longueur $R \sin(a)$: r_s est la coordonnée radiale circonférentielle ; $r_s = \frac{C}{2\pi}$, où C est la circonférence du cercle tracé.



Signification du rayon circonférentiel

La coordonnée de Schwarzschild r est une coordonnée radiale circonférentielle. Cette coordonnée est différente de la distance radiale parce que l'espace-temps est courbe dans la métrique de Schwarzschild : le rapport entre la circonférence d'un cercle et son rayon n'est pas toujours 2π .

D'après la loi de gravitation universelle de Newton (et en supposant son espace-temps plat implicite) l'attraction que doit subir un corps de masse M situé à une distance r de cette masse est :

$$\frac{d^2r}{d\tau^2} = -\frac{GM}{r^2} \quad (\text{Newton})$$

où τ est le temps mesuré par l'observateur de la chute.

Définition du rayon de Schwarzschild

On voit que l'équation précédente (Schwarzschild) n'est équivalente à l'équation (Newton) que si :

$$r_s = 2GM$$

où M est la masse du corps à l'origine de la gravitation.

Ce rayon limite r_s est appelé *rayon de Schwarzschild* du corps.

La singularité au centre d'un trou noir

L'affirmation de la Relativité générale que « l'accélération d'une masse inertielle est égale à l'attraction gravitationnelle », n'est possible que si :

- $r \gg r_s$, c'est-à-dire si le corps attiré est suffisamment loin du centre attracteur de masse M pour que l'espace-temps y soit à peu près plat, comme le veut la loi de Newton. Ce centre attracteur est appelé « singularité du trou noir », car la densité et la pression qui règnent dans ce volume infiniment petit sont infinies.
- $r_s = 2GM$ (en unités RG ; $r_s = 2GM/c^2$ en unités du système international SI).

Lorsque le corps est à une distance $r \leq r_s$ les lois de Newton ne s'appliquent plus