

# Les trous noirs

## Définition

Un Trou Noir, est un région de l'espace dotée d'un champ gravitationnel (champ dont le vecteur est le graviton selon la relativité générale) si intense qu'aucun corps ni aucun rayonnement ne peut s'échapper de son voisinage et qui n'émet donc aucun rayonnement électromagnétique (champ dont le vecteur est le photon). Un Trou Noir est essentiellement caractérisé par sa masse, sa charge, et son moment cinétique. Un Trou Noir est donc une région de l'espace au centre de laquelle la densité de matière est infinie et de laquelle on ne peut tirer aucune observation puisque rien ne peut: en sortir, mais il existe une distance à partir de laquelle la vitesse de libération devient inférieure à la vitesse de la lumière et au-delà de laquelle une particule est susceptible de s'échapper : cette distance est appelée "horizon du Trou Noir". Ainsi, cette région apparaît noire.

Un tel champ gravitationnel peut être créé par un corps de densité infinie et de masse relativement petite ou bien par un corps de faible densité et de masse très importante. La zone spatiale qui entoure le Trou Noir au-delà de l'horizon du Trou Noir est appelée ergosphère. C'est une zone où l'attraction gravitationnelle est très forte et dans laquelle viennent graviter des poussières interstellaires de plus en plus nombreuses jusqu'à former un disque d'accrétion. Les gaz présents dans l'ergosphère sont si chauds qu'ils émettent des rayons X. C'est ce rayonnement électromagnétique qui permet aux astronomes de déceler les Trous Noirs.

On pense très fortement que les Trous Noirs sont dus à l'effondrement gravitationnel de supernovae dont le noyau est devenu trop massif et a dépassé la limite d'Oppenheimer-Volkoff pour laquelle la pression de dégénérescence devient relativiste (c.à.d à la limite des singularités de cette théorie de la matière dégénérée).

La notion classique d'espace-temps n'a donc plus de signification à proximité d'un Trou Noir. Un corps ou un rayonnement qui pénètre dans un Trou Noir ne peut théoriquement plus en sortir en raison de la force gravitationnelle considérable du Trou Noir. Ainsi, un Trou Noir déforme la structure de l'espace-temps dans son voisinage. On peut comparer cette déformation de l'espace à celle que produirait un tourbillon, dont le centre serait le Trou Noir.

## Trous Noirs

Les corps obscurs, objets proches des Trous Noirs ont été imaginés assez facilement dès le 18<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton. A la fin du 18<sup>e</sup> siècle, John Mitchell et Pierre Simon de Laplace se sont intéressés aux corps sur lesquels la vitesse nécessaire pour échapper à leur attraction est supérieure à la vitesse de la lumière (vitesse de libération). Ces corps seraient en quelque sorte des éternels "avaleurs" de matière.

En 1916, Albert Einstein expose sa théorie de la Relativité Générale. La même année, Karl Schwarzschild est le premier à trouver une solution aux équations d'Einstein dans le cas d'un système à symétrie sphérique sans charge, placé dans le vide (Rayon de Schwarzschild). En 1923, George Birkhoff montre que la solution de Schwarzschild est la seule solution possible aux équations d'Einstein dans ce cas. Ceci va conduire à l'introduction théorique d'un nouveau type d'astres : les Trous Noirs.

Toutefois, en 1939, il n'était pas question de Trou Noir pour quiconque. Albert Einstein publia alors un article devant prouver l'inexistence des Trous Noirs, objets célestes si denses que leur gravité empêche même la lumière de s'en échapper. Il utilisa pour cela sa théorie flamboyante neuve : la Relativité Générale, publiée en 1916, qui est aujourd'hui utilisée pour montrer que les Trous Noirs sont l'état final de nombreux corps célestes. D'ailleurs, Robert Oppenheimer et Hartland Snyder publièrent quelques mois après lui un article utilisant la même théorie et montrant comment les Trous Noirs pourraient se former. Pourtant l'étude moderne des Trous Noirs s'appuie sur un aspect différent de l'héritage d'Einstein : la physique statistique.

La théorie des Trous Noirs fut bâtie par Robert Oppenheimer et ses étudiants à partir d'une idée totalement fautive. En 1932, le physicien James Chadwick découvrait le neutron. Fritz Zwicky et Lev Landau imaginèrent alors que ceux-ci fournissent leur énergie aux naines blanches. L'étoile serait alors entièrement faite de neutrons. Vers 1938, Oppenheimer et ses étudiants Serber et Volkoff établirent que pour de tels étoiles, la limite en masse était comparable à la limite de Chandrasekhar pour les naines blanches. Oppenheimer suggéra à Snyder d'étudier le problème d'une étoile de masse supérieure, en négligeant la pression du gaz dégénéré ou la rotation éventuelle de l'étoile; hypothèses qu'il ne pensait pas nécessaires (attention !!!).

Snyder trouva alors que la vision d'une étoile qui s'effondre dépend de la position de l'observateur. En effet, si un observateur au repos est à bonne distance de l'étoile, et qu'un autre à la surface de l'étoile, accompagne son effondrement et transmet des signaux lumineux à son collègue; à mesure que l'étoile s'effondre, l'observateur stationnaire verra les signaux se décaler progressivement vers le rouge du spectre électromagnétique .

La fréquence des signaux étant assimilable au rythme d'une montre, il verra la montre de l'observateur mobile ralentir progressivement. Lorsque le rayon de l'étoile atteindra le rayon de Schwarzschild : l'étoile est gelée dans l'état de Schwarzschild (avec le rayon du même nom). Mais pour l'observateur mobile, ce rayon ne signifie rien, il le traverse, et en quelques heures il atteindra le centre. L'étoile qui s'effondre tend à se fermer à toute communication avec un observateur distant (aucun signal ne peut en sortir); seul persiste son champ gravitationnel ainsi que son éventuelle charge électrique, moment cinétique, un trou noir s'est formé !

L'hypothèse de l'existence des Trous Noirs en relativité générale a depuis été renforcée par l'étude de l'évolution des étoiles. En effet, on connaît aujourd'hui assez bien le devenir d'une étoile ressemblant au soleil, en fonction de sa masse.

La méthode de classification des étoiles est basée sur la position dans leur spectre, des raies spectrales d'absorption. Autrefois classées de A à Q, l'évolution de la spectrométrie a permis leur regroupement et leur réorganisation. Les classes sont aujourd'hui définies par les lettres OBAFGKM, et chacune est divisée en 10 sous-classes, notées de 0 à 9. La classification spectrale (tirée d'un spectre continu dont il ne résulte seulement certaines raies du spectre après le passage de la lumière dans un milieu donné) peut être croisée avec les classes de luminosité dont on tire la température à la surface de l'étoile.

L'évolution d'une étoile de même masse que le soleil qu'après un passage sur la séquence principale, elle devient une géante rouge, éventuellement une nébuleuse planétaire (éjection du combustible de l'étoile à de grandes distances), puis elle termine sa vie sous la forme d'une naine blanche. Les étoiles 10 ou 30 fois plus massives que le Soleil quittent la séquence principale pour devenir des supergéantes puis elle finissent en supernovae qui ne peuvent être représentées sur ce diagramme !

Chacune des étoiles du ciel trouve sa place sur le diagramme introduit par Hertzsprung et Russell dont les diverses régions permettent d'en repérer le stade d'évolution. Il est alors possible d'y tracer une courbe représentative de l'évolution d'une étoile donnée à partir de la connaissance de son état au moment de l'observation.

Ainsi les étoiles massives évoluent plus vite que les étoiles de faible masse, mais ce résultat est déduit d'autres considérations que celles permettant de construire le diagramme. Le diagramme sert notamment à évaluer l'âge moyen d'un amas d'étoiles à partir de celui de ses composants. De même, il permet de caractériser les étoiles variables et leurs composantes telles les géantes rouges qui deviennent instables et pulsantes en vieillissant. Cette famille d'objets instables définit une bande d'instabilité sur le diagramme. Ce diagramme traduit la classification spectrale des étoiles ou leur température de surface en fonction de leur magnitude absolue ou de leur luminosité.

### *Supernovae*

Une supernovae est une explosion stellaire de très grande ampleur au cours de laquelle une fraction importante de la masse de l'étoile est projetée dans l'espace. On distingue deux types d'explosion. On pense que les supernovae de type I se produisent au sein des naines blanches appartenant à des systèmes binaires qui accumulent de la matière par accrétion comme dans les novae. Mais au lieu de parvenir à une explosion de nova, la matière accumulée exerce une pression telle qu'elle provoque une réaction thermonucléaire suffisamment puissante pour entraîner la destruction de l'étoile entière. Les supernovae de type II, en revanche, concernent les étoiles massives, supérieures à 8 masses solaires

Dans ces étoiles, la fusion nucléaire du noyau produit tous les éléments du tableau périodique dont le fer. La fusion du fer demandant trop d'énergie, le phénomène de fusion s'arrête de lui-même et le noyau devient alors inerte et constitué de fer uniquement. Lorsque la masse du noyau atteint 1.4 masses solaires (limite de Chandrasekhar), la force de gravitation arrive à compenser la force de dégénérescence électronique et le noyau de l'étoile s'effondre, entraînant l'effondrement de l'étoile elle-même. Il se produit alors, en retour, une onde de choc qui détruit l'étoile et disperse la matière qui la compose dans l'espace. La supernova s'épanouit au bout de quelques mois, lorsque l'énergie présente au moment de l'explosion a fait place à la décomposition radioactive des noyaux atomiques instables. S'il ne disparaît pas en même temps que l'explosion, le noyau de l'étoile se transforme en étoile à neutrons ou en Trou Noir. La matière environnante est dispersée dans l'espace où elle forme une nébuleuse, appelée résidu de supernova.

### *Naine blanche*

Au 19<sup>e</sup> siècle, les astronomes avaient identifié une catégorie d'étoiles particulières, les naines blanches, de masse voisine de celle du Soleil, mais de densité considérable, environ 60 tonnes par centimètre cube (le Soleil a une densité de 1,4 tonnes par mètre cube). En 1924, Eddington imagina que la force gravitationnelle comprimant une naine blanche pouvait arracher des électrons à ses atomes. Ceux-ci perdant ainsi leur frontière électronique et la pression du gaz d'électrons dégénéré agglutinant les noyaux en un amas petit et dense. L'effondrement de la naine blanche cesserait alors quand la pression du gaz dégénéré compenserait la force de gravitation (cette deuxième pression est causée par les neutrons et non plus par les électrons).

Une naine blanche, est le résidu du noyau d'une étoile en fin de vie, dans lequel le phénomène de fusion nucléaire a cessé. La naine blanche est composée de matière électronique dégénérée et se rencontre souvent dans les nébuleuses planétaires. Sa température varie entre 4'000 et 100'000

[°K]. Les naines blanches n'ont plus de source interne de chaleur mais elles émettent peu à peu leur énergie résiduelle jusqu'à devenir des naines noires. Cependant, le temps de refroidissement de la naine blanche est si long que l'on estime l'Univers encore trop jeune pour qu'il puisse déjà y exister des naines noires.

En Juillet 1930, Subrahmanyan Chandrasekhar, âgé de 19 ans, déduisit une masse limite pour les naines blanches. En effet, ces astres étant électriquement neutres, chaque électron a un proton correspondant, or le proton est étant 2000 fois plus massif que l'électron, ils engendrent l'essentiel de la compression gravitationnelle. Si la naine blanche ne s'effondre pas, c'est que la pression du gaz dégénéré et la pression gravitationnelle s'équilibrent. Cet équilibre limite le nombre de protons et, par suite, la masse de la naine blanche (la pression dégénérée a une valeur maximale alors que la masse n'en a pas).

Cette masse maximale est égale à 1.4 fois la masse du Soleil. Les naines plus massives étant instables et devraient donc s'effondrer indéfiniment ! Les naines blanches sont toujours très petites puisque, la plupart du temps, leur diamètre est inférieur à celui de la Terre. Leur masse est limitée supérieurement à 1.4 masse solaire (limite de Chandrasekhar) puisque, au-delà, elles se transformeraient en étoiles à neutrons composées de matière baryonique dégénérée. Dans les systèmes binaires, les naines blanches peuvent générer des novae ou des supernovae de type I.

### *Étoile à neutrons*

Une étoile à neutrons est le noyau résiduel d'une étoile massive qui a subi une explosion de supernova. Une étoile à neutrons est composée de matière baryonique dégénérée et sa densité est très élevée. Généralement son rayon n'est que d'une dizaine de kilomètres pour une masse volumique de . On a longtemps pensé que les étoiles à neutrons étaient impossibles à détecter depuis la Terre mais on estime aujourd'hui que les objets célestes que l'on appelle pulsars ne seraient jamais que des étoiles à neutrons à rotation rapide. Par ailleurs, il est admis que les pulsars à rayonnement X appartiennent à des systèmes binaires, la période propre du pulsar étant modulée par l'autre composant de l'étoile double.

### *Pulsars*

De nombreuses sources de pulsations dans le spectre des ondes radio, appelées pulsars, ont été découvertes grâce aux radiotélescopes. Les pulsars sont formés essentiellement de neutrons : ces étoiles à neutrons, petites (de 20 à 30 km de diamètre) et extrêmement denses (de l'ordre de un milliard de tonnes au centimètre cube), sont en rotation très rapide, ce qui est à l'origine des pulsations radio. Le pulsar est visible grâce aux deux lignes de champ électromagnétique balayant notre champ visuel.

Les périodes de rotation vont de plusieurs secondes à quelques millièmes de seconde, comme l'ont confirmé des observations optiques et aux rayons X. Les pulsations sont si constantes que seules les horloges les plus précises peuvent détecter une légère augmentation de l'intervalle moyen de pulsation (et seulement dans le cas d'un petit nombre de pulsars). La vitesse de rotation de ce type de pulsar diminue avec le temps, à cause de la perte d'énergie cinétique de rotation qui vient de l'émission de rayonnement électromagnétique de freinage des particules constituant l'étoile.

## L'effondrement gravitationnel

Un collapsar est une étoile qui s'est effondrée sur elle-même parce que le phénomène de fusion nucléaire qui a lieu en son noyau, s'est arrêté. Quelques collapsars deviennent des naines blanches et des étoiles à neutrons alors que d'autres se transforment en Trous Noirs. Cela dépend de la masse de l'étoile comme on la vu précédemment.

### Matière dégénérée

L'état de dégénérescence est un arrangement spécifique des atomes qui se distingue des autres formes correspondant aux autres états que peut prendre une substance :

- L'état dégénéré de la matière électronique est une forme de destruction atomique due à la trop forte densité de matière : les électrons sont forcés d'occuper, malgré le principe d'exclusion de Pauli, le même état quantique correspondant au niveau d'énergie le plus bas. C'est la pression exercée par les électrons qui arrête le processus de dégénérescence. Au-delà de la limite de Chandrasekhar (1.4 masse solaire), la pression de dégénérescence devient supérieure à la pression gazeuse : on dit alors que la matière est dégénérée.
- 
- L'état dégénéré de la matière baryonique est du à l'entrée forcée d'électrons à l'intérieur du noyau. Les électrons fusionnent avec les protons pour former des neutrons. Les neutrons, obéissant au principe d'exclusion de Pauli, fournissent alors une pression de dégénérescence suffisante pour arrêter le phénomène gravitationnel.

### Limite de Chandrasekhar

La limite de Chandrasekhar est la masse limite au-delà de laquelle la force de gravité d'un objet est supérieure à la pression de dégénérescence. Cette masse limite est égale à 1.4 fois celle du Soleil et, lorsqu'elle est atteinte, les électrons sont forcés à l'intérieur des noyaux où ils se combinent avec les protons pour donner des neutrons. Le phénomène d'effondrement gravitationnel est stoppé par la pression qu'exercent les neutrons lorsqu'ils ont atteint l'état de dégénérescence baryonique, à moins que la masse de l'objet soit supérieure à 3.2 fois celle du Soleil ce qui correspond à la masse limite d'Oppenheimer-Volkoff .

### Limite d'Oppenheimer-Volkoff

La limite d'Oppenheimer-Volkoff est la masse au-delà de laquelle la pression de dégénérescence baryonique n'est plus capable d'équilibrer les forces gravitationnelles. Le phénomène d'effondrement ne peut concerner que des corps dont la masse est comprise entre 3.2 et 5 masses solaires, ce qui correspond à la masse limite supérieure d'une étoile à neutrons et à la masse limite d'un Trou Noir.

Les Trous Noirs sont des objets dont la masse totale de matière inerte non productrice d'énergie est donc d'au moins 3.2 fois celle du Soleil. Au-delà de cette limite (appelée donc limite d'Oppenheimer-Volkoff); la pression baryonique de dégénérescence, qui s'exerce entre les neutrons pour résister à la pression de gravitation, ne ralentit que peu de temps le phénomène d'effondrement gravitationnel. À mesure que le rayon de l'étoile diminue, la force de gravitation à sa surface augmente de telle sorte que la vitesse de libération de l'astre croît jusqu'à atteindre, théoriquement la vitesse de la lumière. Quand la vitesse de libération atteint ce seuil, rien ne peut s'échapper pas même la lumière, et tout rayonnement en provenance du milieu spatial qui l'atteint est définitivement capturé.

La pression nécessaire pour qu'une étoile devienne un Trou Noir est d'autant plus faible que sa masse est importante. La valeur que son rayon doit atteindre pour qu'elle devienne un Trou Noir est le rayon de Schwarzschild. Il définit une région appelée horizon du Trou Noir. Personne ne pourra jamais savoir ce qui se passe au-delà de l'horizon du Trou Noir, mais on suppose que la matière continue de s'y comprimer jusqu'à ce que qu'elle devienne un point minuscule de densité infinie, que l'on appelle singularité de l'espace-temps.

La gravitation autour d'un Trou Noir est si intense qu'elle courbe l'espace-temps autour de lui. Les astrophysiciens pensent que les Trous Noirs tournent sur eux-mêmes, entraînant dans leur mouvement l'espace-temps. Ce voisinage de l'astre, appelé l'ergosphère, présente une frontière caractérisée par une transition de stationnarité : à l'intérieur de cette région, rien ne peut rester stationnaire et tout est entraîné dans un mouvement rotatif autour du Trou Noir. Quand un objet franchit l'horizon limite du Trou Noir, il est perdu à jamais et on pense qu'il finit par disparaître dans le point singulier.

## *Trou Noir*

On appelle "Trou Noir " tout objet dont la vitesse de libération est supérieure à la vitesse de la lumière dans le vide. Ainsi, rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière. Mais la vitesse de libération dépend explicitement de la distance entre le point considéré et le centre du trou noir. Ce qui signifie que la vitesse de libération est supérieure à la vitesse de la lumière qu'en déca d'un certain rayon, pourvu qu'il contienne la masse totale du Trou Noir. Ce rayon s'appelle "Rayon de Schwarzschild". Ce rayon marque également la limite de validité de toute théorie actuelle connue !

En effet, selon la théorie de la Relativité Générale, toute masse courbe l'espace-temps de sorte que tout objet dont le mouvement est uniquement causé par la gravité soit en chute libre. Ainsi, tout objet immobile à l'infini verra sa vitesse atteindre la vitesse de libération de sa position par rapport à l'astre. Dans le cas d'un Trou Noir, notre objet atteindrait la vitesse de la lumière en arrivant au niveau de son horizon. Cela signifie que la courbure de l'espace-temps devient infinie à partir de là. En conséquence, le temps doit théoriquement se stopper au niveau de cet horizon par rapport à un observateur externe à cet horizon. Cela se traduira pour un observateur par le fait qu'un objet plongeant vers le trou noir mettra un temps infini à atteindre son horizon. Il est impossible de savoir ce qui se passe après : d'où son nom, horizon des événements.

S'il est impossible de décrire quoi que ce soit d'un Trou Noir au-delà de son horizon, c'est parce qu'il faudrait disposer d'une théorie quantique de la gravitation qui soit assez efficace. Or on ne sait pas actuellement comment concilier effets de la gravitation et effets de la mécanique quantique qui peut amener une particule à se trouver en deux endroits distincts au même instant, ou encore à agir comme le décrit une fonction d'onde. Le problème que posent les Trous Noirs, c'est qu'en leur sein, la courbure de l'espace-temps est infinie : c'est à dire que sa densité est elle aussi quasi-infinie, et donc que toute la masse de départ, subissant les effets de la gravitation puisque c'est elle qui est la cause de cette densité, acquiert la taille d'une petite particule subissant les effets de la mécanique quantique : on verra plus loin que le principe d'exclusion de Pauli s'oppose plusieurs fois à la gravité.

La zone spatiale qui entoure le Trou Noir au-delà de l'horizon du Trou Noir est appelée ergosphère. C'est une zone où l'attraction gravitationnelle est très forte et dans laquelle viennent graviter des poussières interstellaires de plus en plus nombreuses jusqu'à ce que ce forme le disque d'accrétion. Les gaz présents dans l'ergosphère sont si chauds qu'ils émettent des rayons-X (par excitation thermique des électrons des atomes constituant le gaz). C'est ce rayonnement électromagnétique qui permet aux astronomes de déceler les Trous Noirs. On pense que les

Trous Noirs sont dus à l'effondrement gravitationnel de supernovae dont le noyau est devenu trop massif et a dépassé la limite d'Oppenheimer-Volkoff pour laquelle la pression de dégénérescence devient relativiste.

Quels événements peuvent donc être à l'origine d'un tel monstre ? En fait, on en distingue trois différents, qui donneront chacun un Trou Noir de masse bien déterminée :

- Les plus légers, les micro-Trous Noirs ou Trous Noirs quantiques, sont nés peu après le Big Bang, et se sont peut-être déjà évaporés.

- Ceux de masse intermédiaire, sont les restes hyper-denses d'une étoile massive.

- Et enfin les Trous noirs de plus grande masse qui se situent au beau milieu de plusieurs galaxies et quasars.

Viennent alors les Trous Noirs de masse plus respectable, et que l'on appellera trous noirs stellaires. Leur formation est le fruit de la longue évolution d'une étoile de masse supérieure à la limite d'Oppenheimer-Volkoff. Cette limite n'a pas pu être déterminée avec une grande précision en raison de notre actuelle incapacité à établir l'équation d'état de la matière neutronique dans les conditions de température et de pression d'une étoile à neutrons. Sa valeur est donc comprise entre 2.4 et 3.2 masses solaires.

L'appellation de Trou Noir est souvent réduite au Trou Noir de type stellaire. C'est très certainement dû au fait que ce type de Trou Noir a été le premier à être mis en équation par les astrophysiciens. C'est par ailleurs celui que l'on connaît le mieux, ce qui explique que l'on puisse maintenant dresser un schéma précis de sa naissance. Tout part d'une étoile apparemment stable et sans problème. Son existence est en fait le fruit d'une lutte incessante entre la gravité causée par la propre masse de l'étoile et l'énergie qu'elle rayonne qui vient s'opposer à l'effondrement gravitationnel en imposant à ses différentes couches un mouvement de convection. Tout va bien jusqu'à ce que le combustible nucléaire vienne à manquer.

Le cœur de l'étoile est alors fait de fer, tandis que les couches extérieures contiennent successivement du silicium, de l'oxygène, du carbone et de l'hélium. Sans énergie rayonnée, la force gravitationnelle se retrouve seule, et l'étoile rentre dans une phase de contraction : habituellement la contraction, qui occasionne une augmentation conséquente de la température, démarre un autre cycle de réactions thermonucléaires.

Les éléments produits lors des cycles précédents fusionnent pour produire un autre élément, la réaction dégageant de l'énergie, qui stoppe la contraction. Mais à ce stade, la fusion du fer fournit moins d'énergie que l'énergie qui aura été nécessaire pour occasionner cette fusion. La contraction ne cesse donc pas. La matière se regroupe alors autour du cœur, qui agit alors comme une sorte de mur. Les couches extérieures rebondissent dessus, et l'étoile éclate alors en supernova. Ce qui reste du cœur continue de s'effondrer sous l'effet de sa masse. L'état de densité atteint est tel que les électrons sont forcés de se placer sur les orbites électroniques de plus haute énergie, et donc de se trouver dans un même état quantique.

Le respect du principe d'exclusion de Pauli oblige les électrons à se déplacer de plus en plus rapidement : leur énergie cinétique devient supérieure à leur énergie de masse au repos, et l'électron devient relativiste. La pression associée à ce gaz d'électrons relativistes, pression dite "quantique", va s'opposer à la contraction. Mais la force de gravité est la plus forte vu que le noyau avait une masse supérieure à la limite de Chandrasekhar. La contraction continue, et le noyau devient de plus en plus dense : plus de . Les électrons deviennent tellement énergétiques

qu'ils vont se fondre aux protons des noyaux atomiques pour former des neutrons. Là aussi le principe d'exclusion de Pauli, interdisant aux neutrons de se trouver dans un même état quantique, explique la pression de dégénérescence fournie par les neutrons de plus en plus serrés.

Cette pression s'avère également insuffisante pour stopper l'effondrement car le noyau de l'étoile a une masse supérieure à la limite d'Oppenheimer-Volkoff (comprise entre 2.4 et 3.2 masses solaires). Le noyau ne se stabilise donc pas en étoile à neutrons. Le noyau continue son effondrement jusqu'à ce que la masse totale du noyau se trouve inférieure à l'horizon des événements correspondant à cette masse. Pour le Soleil, ce rayon serait de 2.9 [km], c'est à dire que si une force quelconque emprisonnait le Soleil dans une sphère de tel rayon, le Soleil serait un Trou Noir. En ce qui concerne le Soleil, cette force ne sera pas la force gravitationnelle puisqu'il n'est pas assez lourd. Cela signifie que la pression quantique due à la dégénérescence de la matière leptonique (les électrons) suffira à stabiliser notre Soleil en naine blanche.

On a cependant découvert que les Trous Noirs stellaires n'étaient pas les trous noirs les plus massifs de l'univers. Il est en effet presque certain que certaines galaxies, dont la notre, renferment en leur cœur un trou noir de plusieurs millions de masses solaires. Des trous noirs de cette dimension s'attaquent directement aux étoiles environnantes, c'est à dire qu'ils n'arrachent pas peu à peu la matière des étoiles, mais bien peu à peu les étoiles de la galaxie. C'est ce qui explique l'intense activité des noyaux de plusieurs galaxies : ce sont de puissantes radiosources d'une puissance de l'ordre de  $10^{40}$  [W]. Un tel phénomène n'est absolument pas explicable par la mise en jeu de réactions thermonucléaires dans plusieurs étoiles. En fait, seule une transformation, directe, de l'énergie gravitationnelle en rayonnement dans un processus d'accrétion pourrait l'expliquer. La masse alors mise en jeu pourrait même dépasser le milliard de masses solaires, dans un rayon d'une dizaine d'unités astronomiques !

L'origine de tels Trous Noirs est assez confuse, d'autant plus que leur nature n'a pas été validée par toute la communauté scientifique. En effet, le Trou Noir est le seul phénomène connu capable de telles prouesses, mais il n'est absolument pas exclu qu'il y en ait d'autres. En fait, si réellement il y avait un Trou Noir au centre de notre galaxie, on devrait alors expliquer pourquoi on n'observe pas son activité dans l'infrarouge comme on pourrait s'y attendre normalement.

Le cas des quasars est encore plus sujet à controverse : leur incroyable luminosité pourrait être expliquée par une amplification gravitationnelle de leur lumière. Comme les quasars sont des astres lointains, la lumière qu'ils émettent a certainement subi l'influence de champs gravitationnels, ce qui aurait pu l'amplifier (il est par ailleurs actuellement impossible de savoir dans quelle mesure elle a été amplifiée).

Ainsi, il est probable que des Trous Noirs de grande masse se cachent dans les bulbes galactiques. Leur intense activité est détectée dans presque tout le spectre électromagnétique, et les gaz du noyau, avec une vitesse de l'ordre du centième de celle de la lumière, semblent indiquer que l'astre qui en est à l'origine a une masse d'au moins un million de masses solaires (les dernières mesures lui donnent 2.6 millions de masses solaires), tandis que des mesures interférométriques la situent dans un rayon d'à peine 100 fois le rayon de Schwarzschild.

De plus, de récentes observations extragalactiques ont été témoins de disparitions spontanées de matière proche d'un noyau actif de galaxie. De plus, l'observation du centre galactique en visible est gênée par une accumulation de poussières qui forme un disque autour du noyau, et qui ressemble bien à un disque d'accrétion, comme l'ont montré les dernières observations d'une galaxie de la constellation de la Baleine...



Un Trou Noir est finalement, un noyau stellaire si dense qu'aucune particule, pas même un photon, ne peut s'en échapper et qui n'émet donc aucun rayonnement électromagnétique à part le rayonnement de Hawking. Un Trou Noir est essentiellement caractérisé par sa masse, sa charge et son moment cinétique (ce qui caractérise sa rotation propre).

### *Trou Noir quantique*

La possible existence de mini-trous noirs dans notre univers a été démontrée par l'astrophysicien Stephen Hawking. Alors que le Big Bang vient d'avoir lieu, la température de l'univers est encore très élevée, ce qui traduit un intense mouvement brownien. Les chocs entre particules sont donc nombreux et très énergétiques. Bien que l'univers soit initialement homogène, quelques réactions nucléaires entraînant des brisures de symétries (symétries CPT (Charge Parité Temps)) provoquent localement des points plus denses, qui s'effondrent alors sur eux-mêmes. Très vite, à cause de la température, la matière devient si dense que leptons et baryons se mêlent les uns aux autres passant d'états dégénérés à d'autres. Ces points ont une masse de quelques kilogrammes et sont contenus dans un volume comparable à une sphère "Univers" de rayon de l'ordre de 10-26 m. Cet état de densité est tel que la lumière ne peut s'échapper : un mini-Trou Noir s'est alors formé. Il faut cependant garder à l'esprit qu'un tel phénomène fut possible grâce à la température élevée du milieu. Avec l'expansion, l'énergie a été amenée à occuper un plus grand volume, ce qui a eu pour effet de diminuer la température globale. Celle-ci est actuellement de 3 [°K]. La pression quantique de la matière dégénérée suffit alors à stopper ces effondrements en considérant qu'il existe encore des régions de l'univers suffisamment dense pour démarrer un tel phénomène avec si peu de matière.

Stephen Hawking a par ailleurs montré qu'un Trou Noir émet un très faible rayonnement (le rayonnement de Hawking) qui se traduit par une légère augmentation de la température : + 10<sup>-7</sup> [°K]. Une augmentation insignifiante et quasiment indécélable. Pourtant, cela acquiert une grande importance lorsqu'on parle de mini-trous noirs à cause de leur faible masse. En effet, ceux-ci sont alors susceptibles de s'évaporer, et donc d'avoir une durée de vie limitée. Il ne serait donc pas surprenant que ces objets n'existent plus de nos jours

### *L'ergosphère*

L'ergosphère est une zone qui entoure le Trou Noir au-delà de l'horizon de celui-ci et dans laquelle le continuum spatio-temporel est entraîné par la rotation du Trou Noir, si celui-ci possède un moment cinétique. Dans cette zone, aucun système de référence respectant le continuum espace-temps n'est applicable au reste de l'Univers.

### *L'horizon des événements*

Dans la vision actuelle que nous en avons, les Trous Noirs sont constitués d'un centre extrêmement massif qui attire tous les objets de son entourage. Il existe une surface entourant le Trou Noir et à l'intérieur de laquelle, aucun objet ne peut échapper à l'attraction de l'astre. Tout corps se trouvant à l'intérieur de cette surface est condamné à être aspiré par la quantité de masse située au centre du Trou Noir et donc à augmenter cette masse et donc à accroître son attraction. Cette surface étant le dernier point d'où la lumière peut nous parvenir, on l'a nommée "horizon du Trou Noir".

Différents résultats théoriques ont depuis été obtenus concernant l'horizon des Trous Noirs : tout d'abord, en 1972, Stephen Hawking a prouvé que la surface de l'horizon ne pouvait pas décroître. Ce résultat peut sembler logique puisque la masse du Trou Noir ne peut que augmenter

et donc son attraction aussi (en négligeant le rayonnement de Hawking). Le zone où l'attraction domine tout, ne peut donc que s'accroître. La même année, Jacob Bekenstein propose l'idée que cette surface est proportionnelle à l'entropie du Trou Noir. Cette idée provient du fait que toute l'information concernant un système est définitivement perdue lorsque ce système est absorbé par le Trou Noir.

## Les forces de marée

Les forces de marée sont un effet remarquable lors du passage d'un objet au voisinage d'un Trou Noir. Avant tout, rappelons qu'en mécanique classique, la force de gravitation décroît de manière inversement proportionnelle au carré de la distance et croît de manière proportionnelle aux masses des corps concernés. Bien qu'en relativité générale le phénomène soit beaucoup plus complexe, il en reste similaire.

En considérant un exemple sympathique et impressionnant d'une barre de masse non nulle, orientée dans la direction d'un autre corps massif. La force gravitationnelle exercée par ce corps sur les différents points de la barre varie puisque la distance entre ces points et la masse varie. Concrètement, l'extrémité proche du corps est plus attirée que l'autre. Cependant, ce phénomène reste souvent très faible puisque la force de gravitation varie peu, en valeur relative, sur les intervalles considérés. En revanche, lorsque l'attracteur est un Trou Noir, les forces de gravitation à son voisinage deviennent si grandes que leur variation sur une petite distance l'est également.

Un objet passant à proximité d'un Trou Noir va donc subir des forces de marée qui vont l'étirer jusqu'à ce qu'il éclate si celles-ci dépassent la force de rupture du matériau. Mais en fait, la forme que prend l'objet sous cette action dépend beaucoup de la façon dont il s'approche du Trou Noir, ainsi que de l'éventuelle rotation de celui-ci. L'objet pourra selon les cas, prendre l'aspect d'une crêpe ou d'un cigare...

Par ailleurs, on peut remarquer qu'un homme qui voudrait savoir ce qu'il y a au centre d'un Trou Noir ne le pourrait donc pas puisqu'il serait disloqué avant même de franchir l'horizon. Cet effet ne s'observe cependant pas qu'au voisinage des Trous Noirs. Les autres corps massifs le produisent également : ainsi, si on s'approche à 2000 kilomètres d'une étoile à neutrons comme Geminga (la plus proche de nous, qui se trouve à 510 années-lumière), l'attraction gravitationnelle diffère de  $100.g$  (où  $g = 9.81 [m/s^2]$ ) entre nos pieds et notre tête ce qui équivaut sur terre à nous attacher un poids d'environ 0.7 tonne aux deux jambes.

## Le Trou Noir source d'énergie

### *Rayonnement de Hawking*

Il peut être intéressant d'étudier ce qu'on peut voir du Trou Noir. En effet, le Trou Noir en lui-même est totalement invisible, de par le fait qu'il absorbe toute la lumière qui passe à son voisinage. Il n'émet donc aucune lumière. Cependant, Stephen Hawking a montré qu'il était en fait possible de capter un rayonnement qui provient du Trou Noir. Ce raisonnement se base sur les fluctuations du vide quantique et du principe d'incertitude de Heisenberg appliqué à l'énergie et au temps. En effet, ce principe autorise la violation de la conservation de l'énergie pendant un court instant. Une paire de particules peut donc apparaître à partir du vide à condition qu'elle s'annihile peu après.

Si ce phénomène se produit près de l'horizon d'un Trou Noir, une des deux particules peut pénétrer l'horizon sans l'autre. La première va alors être absorbée et pas l'autre. La paire ne

s'annihilera donc jamais et la particule résultante va continuer son trajet et pourra être captée par un observateur. C'est ce qu'on appelle le rayonnement de Hawking. Cependant ce phénomène reste très faible et ne permet donc pas de détecter un Trou Noir de manière sûre. La conséquence principale en est une évaporation progressive du Trou Noir. Avec le temps (très beaucoup de temps, je vous laisse faire le calcul...), le Trou Noir finit par s'évaporer complètement

### Le disque d'accrétion

Comme rien ne peut s'échapper d'un Trou Noir, il est très difficile d'en détecter un. Or, à l'instar des naines blanches et des étoiles à neutrons; les Trous Noirs peuvent, en principe, être une composante d'une étoile binaire. Dans ce cas, les gaz du compagnon du Trou Noir sont sous l'influence de son champ de gravitation et finissent par être littéralement aspirés par lui. Ces deux astres gravitant autour de leur centre de masse commun, tout se passe comme si l'étoile compagnon tournait autour du Trou Noir.

Le gaz qui s'échappe de l'étoile forme un disque de matière qui tourbillonne autour du Trou Noir et cela si rapidement que les collisions entre les molécules et les atomes qui le constituent induisent un rayonnement X thermique qui peut être détecté de la Terre. Par cette émission, le disque perd de l'énergie et se fond progressivement dans le Trou Noir en suivant des trajectoires circulaires ou spiralées.

Le disque d'accrétion peut tout aussi bien être formé de gaz et de poussières stellaires. L'objet X-1 de la constellation du Cygne est un exemple probable de Trou Noir; c'est une source de rayons X qui gravite autour d'une supergéante bleue, 20 à 30 fois plus massive que le Soleil. Cette grosse étoile semble en effet attirée par un compagnon invisible, 9 à 10 fois plus massif que le Soleil, et tout se passe comme si le rayonnement X était émis par un disque de matière qui tourne autour de l'objet invisible.

Par ailleurs, certains indices laissent à penser que le centre des galaxies actives et des quasars comporte un Trou Noir dont la masse serait égale à des milliers de fois celle du Soleil.

Malgré le faible rayonnement d'Hawking, les Trous Noirs sont quasiment invisibles. Cependant, il est possible de les repérer en étudiant leur entourage. Les Trous Noirs possèdent un disque d'accrétion constitué par la quantité de matière qui, attirée, se met à tourner autour de l'horizon jusqu'à finalement y entrer.

L'observation de ce disque permet alors de savoir si l'objet situé en son cœur est très massif. En effet, si c'est le cas, les rayons lumineux émis par le disque vont être très déviés par l'intense champ gravitationnel. La formation d'un disque d'accrétion est due au fait que les zones d'effondrement gravitationnel ne sont pas immobiles : elles gravitent autour du centre de la galaxie et possèdent donc un moment cinétique.

Le disque vu de profil légèrement par le dessus sera complètement déformé. La partie arrière est complètement basculée vers l'avant tandis que la face inférieure de cette partie apparaît également par en-dessous. La partie avant n'est que peu déformée puisque les rayons qu'elle émet vers l'observateur ne passent pas à proximité du cœur massif. On peut imaginer cela aussi autrement, la forme du disque est celle d'une spirale descendante car, outre leur attraction vers le centre, elles sont aspirées par le puits de potentiel attaché au corps céleste :

## Résultats actuels des observations

L'un des objectifs de nombreux astrophysiciens est la mise en évidence des Trous Noirs. En effet, ces derniers sont invisibles, car ils retiennent la lumière. Cependant, on peut détecter indirectement un Trou Noir par l'attraction gravitationnelle et les effets électriques qu'il exerce sur les astres environnants.

Comme nous l'avons vu, un Trou Noir a ceci de particulier qu'aucun des rayonnements qu'il émet ne peut quitter son environnement, et en particulier tout rayonnement électromagnétique. Et même si l'astronomie exploite le spectre électromagnétique au maximum, elle se cantonne à ces rayonnements. Alors comment observer directement un Trou Noir si le seul rayonnement observable ne nous parvient pas ?

Réponse : on va tout simplement chercher les répercussions d'un intense champ gravitationnel sur une étoile voisine. Une étoile que l'on pourra observer !

Quel type d'effet doit-on trouver pour pouvoir déduire la présence d'un objet si particulier ? En fait, le propre d'un trou noir est d'avoir un champ gravitationnel puissant : on va donc localiser nos recherches sur les étoiles dont le mouvement semble être causé par quelque chose de lourd. Il semble évident alors que nos efforts vont se concentrer sur les étoiles tournant autour d'un objet, c'est à dire sur les systèmes multiples. Or on sait aujourd'hui que la plupart des étoiles font partie d'un système au moins binaire, et la majorité de ces couples sont loin d'abriter un quelconque Trou Noir. Il faut donc trouver un moyen de savoir quels systèmes ont le plus de chances d'abriter un Trou Noir.

Pour cela on a d'abord étudié en détail un tel couple pour savoir ce qui pourrait le différencier des autres. On s'est ainsi rendu compte qu'une étoile de type géante, c'est à dire de densité faible et dont le rayon peut être de plusieurs centaines de milliers de kilomètres, tournant autour d'une étoile très dense (de type naine blanche, étoile à neutrons, et même Trou Noir) voit sa matière arrachée par l'astre central. Lorsque celle-ci percute la surface de son étoile compagnon, la matière s'embrase (reprise des réactions thermonucléaires dans ce surplus de matière), et on assiste alors à un phénomène appelé novae c'est à dire une brusque augmentation de la luminosité de l'étoile.

Malheureusement ce type d'événement est relativement rare car la matière, si elle est bien arrachée de la géante, ne tombe pas directement sur l'étoile centrale. Elle est en effet entraînée dans un disque d'accrétion, et effectue de nombreuses révolutions autour de l'étoile avant de s'y précipiter. C'est la présence de ce disque qui va nous permettre de sélectionner les couples d'étoiles appropriés. En effet, la matière dans ce disque est de plus en plus dense au fur et à mesure que la géante en perd, et chaque particule de ce flot entre en collision de plus en plus souvent avec les autres particules. L'énergie dégagée se traduit alors par une émission de rayonnement à haute fréquence : des rayons X et gammas.

Évidemment, la réciproque est fautive, c'est à dire que toute source de rayons X n'est pas forcément un des couples précédemment décrits. C'est pourquoi on va d'abord chercher à comparer l'image du ciel en rayons X avec l'image du ciel en visible, infrarouge et ultraviolet. On s'intéressera alors particulièrement aux points du ciel où émission X correspond avec émission dans le visible (une étoile). On va alors observer cette étoile à l'aide d'un spectrographe et d'un photomètre pour obtenir les informations qui nous permettront de conclure sur la nature probable de l'astre central.

Le but ultime est de déterminer la masse de la composante invisible du couple . C'est en effet cette caractéristique qui est la seule pouvant nous permettre de reconnaître un Trou Noir. Cela ne

vaut que pour un Trou Noir d'origine stellaire, ce qui n'est en aucun cas gênant car un Trou Noir quantique ne produirait pas l'effet sur lequel on s'appuie ; tandis qu'un Trou Noir galactique, c'est à dire bien plus massif perturbera les étoiles alentours de telle sorte que c'est toute la galaxie qui tournerait autour (de tels Trous Noirs se localisent donc forcément au centre d'une galaxie).

Notre Trou Noir d'origine stellaire ne peut donc pas avoir n'importe quelle masse. On a vu que cette masse devait impérativement être supérieure à 3.2 masses solaires. En deçà, on est face à une étoile à neutrons ou à une naine blanche. Une fois tout ce travail effectué, on pourra conclure sans difficultés quant à la nature de l'astre central. La seule incertitude que l'on a, tient à la valeur réelle de la masse mesurée.

En effet, un grand nombre de paramètres sont simplifiés ou négligés. Ainsi, il est possible que l'étoile concernée ait une orbite plus elliptique que prévu, et dans ce cas, la masse réelle peut être inférieure à celle calculée. C'est pourquoi il est difficile de trancher lorsque la masse est proche de la limite. En conclusion, plus la masse trouvée est élevée, plus l'erreur devra être grande pour que la masse réelle soit sous les 3.2, et plus il sera certain que l'astre est bien un Trou Noir.

Par exemple, les astronomes ont découvert une source de rayons X dans la constellation du Cygne, Cygnus X-1, associée à un système stellaire binaire dont la composante connue est une supergéante bleue. Il semble que celle-ci tourne autour d'un compagnon invisible, dont la masse atteint dix fois celle du Soleil. Ce compagnon n'est donc pas une étoile à neutrons ; il s'agit probablement d'un Trou Noir. Les rayons X observés sont émis lorsque le Trou Noir aspire l'enveloppe gazeuse du compagnon stellaire.

Il semblerait également qu'une source de rayons X située dans une galaxie voisine de la nôtre, le Grand Nuage de Magellan, et qu'une autre source de rayons X située dans la constellation de la Licorne soient également des Trous Noirs. D'après de nombreux astrophysiciens, les noyaux des plus grandes galaxies contiendraient tous des Trous Noirs dont la masse pourrait atteindre dix milliards de fois celle du Soleil. Ces Trous Noirs constitueraient des quasars.

Que savons-nous des Trous Noirs aujourd'hui ? On en a toujours pas observé réellement mais il existe de très sérieux candidats : tout d'abord, en 1971, la source binaire Cygnus X-1/HDK 226S6S puis GS2023+33S/V404 Cygni en 19S9. Pourquoi des systèmes binaires ? Parce qu'à priori, on ne peut détecter un Trou Noir isolé puisqu'il n'émet aucun rayonnement. Lorsqu'on observe un objet apparemment seul et qu'on constate des variations de sa position, on peut en déduire qu'il possède un compagnon et qu'ils gravitent tous les deux l'un autour de l'autre. C'est ainsi que l'on a pu montrer que Sirius, l'étoile la plus brillante du ciel, est en fait une étoile double. En observant la période de ce mouvement, on peut évaluer la masse et donc le type de l'invisible compagnon. En l'occurrence, il s'est avéré que le compagnon Sirius B était une naine blanche (la plus proche du système solaire). Dans les cas où le compagnon est extrêmement lourd, on peut en déduire qu'il doit s'agir d'une étoile à neutrons ou, dans les cas extrêmes d'un Trou Noir.

Par ailleurs, lorsqu'un Trou Noir forme un système binaire avec un autre astre, l'enveloppe gazeuse de celui-ci est peu à peu absorbé. Il se forme donc un disque d'accrétion autour du Trou Noir et cela provoque l'émission de rayonnement très énergétique de manière assez irrégulière. Les sursauts sont caractéristiques de l'engloutissement d'une énorme quantité de matière par le Trou Noir. Les variations rapides de la position d'un astre accompagné de l'émission de sursauts de rayonnement très énergétiques permettent donc de considérer un système comme étant des binaires dont une composante est un Trou Noir.

D'autres types de candidats ont depuis été découverts, parmi lesquels les centres de certaines galaxies comme M31, la galaxie d'Andromède. En effet, l'étude de la vitesse de rotation de ces

objets permet d'en calculer la masse. Or, si cette masse est supérieure à celle évaluée expérimentalement, on peut en déduire qu'une masse énorme se trouve cachée dans la galaxie. Les Trous Noirs sont alors de bons candidats. Un Trou Noir se trouve donc peut-être tout proche de nous, au cœur de la voie lactée

.

Les Trous Noirs se présentent comme d'excellents candidats d'une matière supposée exister dans l'Univers en grande quantité mais très difficile à détecter car très peu lumineuse. Les cosmologistes ont suggéré son existence afin d'expliquer certains phénomènes gravitationnels observés dans l'Univers, particulièrement dans les vitesses angulaires des galaxies. D'après le physicien britannique Stephen Hawking, de nombreux Trous Noirs seraient apparus lors de la formation de l'Univers. S'il en est ainsi, la plupart de ces Trous Noirs sont trop éloignés de toute matière pour pouvoir former des disques d'accrétion décelables. Cependant, ils représenteraient une portion non significative de la masse totale de l'Univers (pas un bon candidat pour la matière noire...). Stephen Hawking a également supposé que les Trous Noirs forment des couloirs d'échappement vers d'autres univers distincts du notre