

# Le Big Bang



# Les trous noirs

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. De tels objets ne peuvent ni émettre, ni réfléchir la lumière et sont donc noirs, ce qui en astronomie revient à dire qu'ils sont invisibles. Toutefois, plusieurs techniques d'observation indirecte dans différentes longueurs d'ondes ont été mises au point et permettent d'étudier les phénomènes qu'ils induisent. En particulier, la matière happée par un trou noir est chauffée à des températures considérables avant d'être « engloutie » et émet une quantité importante de rayons X.

Envisagée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle, dans le cadre de la mécanique classique, leur existence, prédite par la relativité générale, est une certitude pour la quasi-totalité de la communauté scientifique concernée (astrophysiciens et physiciens théoriciens). Dans le cadre de la relativité générale, un trou noir est défini comme une singularité gravitationnelle occultée par un horizon *absolu* appelé *horizon des événements*. Selon la physique quantique, un trou noir est susceptible de s'évaporer par l'émission d'un rayonnement de corps noir appelé *rayonnement de Hawking*. Un trou noir ne doit pas être confondu avec un trou blanc ni avec un trou de ver.

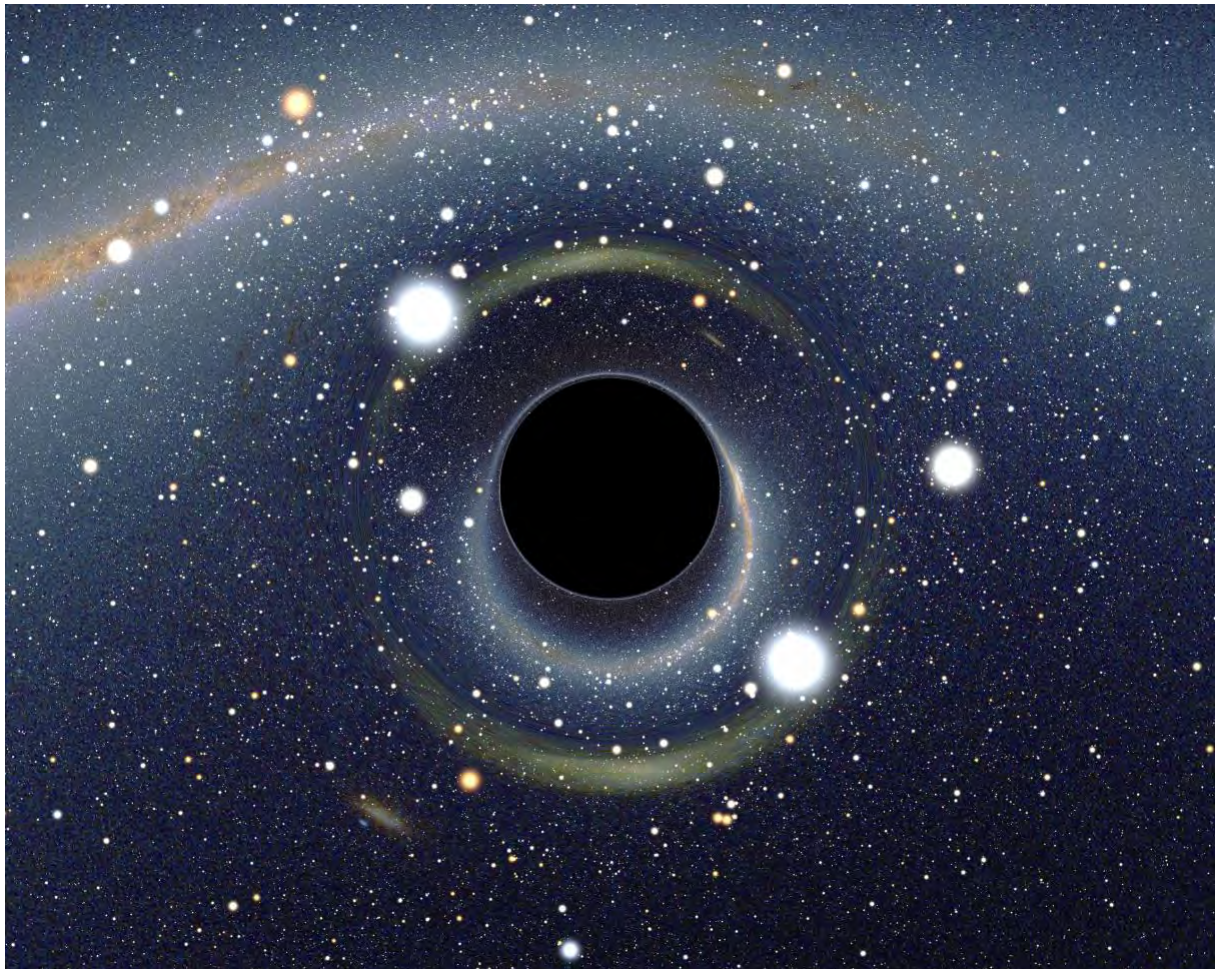
## Présentation et terminologie

Un trou noir possède une masse donnée, concentrée en un point que l'on appelle singularité gravitationnelle. Cette masse permet de définir une sphère appelée horizon du trou noir, centrée sur la singularité et dont le rayon est une limite maximale en deçà de laquelle le trou noir empêche tout rayonnement et *a fortiori* toute matière de s'échapper. Cette sphère représente en quelque sorte l'extension spatiale du trou noir. C'est ainsi que le terme « trou » est inapproprié : il serait plus correct de parler de « boule noire » pour conceptualiser concrètement sa forme physique réelle tridimensionnelle dans l'espace. Pour un trou noir de masse égale à celle du Soleil, son rayon vaut environ 3 kilomètres. À une distance interstellaire (en millions de kilomètres), un trou noir n'exerce pas plus d'attraction que n'importe quel autre corps de même masse; il ne s'agit donc pas d'un « aspirateur » irrésistible.

Par exemple, si le Soleil se trouvait remplacé par un trou noir de même masse, les orbites des corps tournant autour (planètes et autres) resteraient pour l'essentiel inchangées (seuls les passages à proximité de l'horizon induiraient un changement notable). Il existe plusieurs sortes de trous noirs. Lorsqu'ils se forment à la suite de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, on parle de *trou noir stellaire*, dont la masse équivaut à quelques masses solaires. Ceux qui se trouvent au centre des galaxies possèdent une masse bien plus importante pouvant atteindre plusieurs milliards de fois celle du Soleil; on parle alors de *trou noir supermassif* (ou trou noir galactique). Entre ces deux échelles de masse, il existerait des *trous noirs intermédiaires* avec une masse de quelques milliers de masses solaires.

Des trous noirs de masse bien plus faible, formés au début de l'histoire de l'Univers, peu après le Big Bang, sont aussi envisagés et sont appelés *trous noirs primordiaux*. Leur existence n'est, à l'heure actuelle, pas confirmée. Il est par définition impossible d'observer directement un trou noir.

Il est cependant possible de déduire sa présence de son action gravitationnelle : soit par les effets sur les trajectoires des étoiles proches; soit au sein des microquasars et des noyaux actifs de galaxies, où de la matière, située à proximité, tombant sur le trou noir va se trouver considérablement chauffée et émettre un fort rayonnement X. Les observations permettent ainsi de déceler l'existence d'objets massifs et de très petite taille. Les seuls objets correspondant à ces observations et entrant dans le cadre de la relativité générale sont les trous noirs.



*Image simulée d'un trou noir stellaire situé à quelques dizaines de kilomètres d'un observateur (à 9 fois le rayon du trou noir) et dont l'image se dessine sur la voûte céleste dans la direction du Grand Nuage de Magellan. L'image de celui-ci apparaît dédoublée sous la forme de deux arcs de cercle, en raison de l'effet de lentille gravitationnelle fort. La Voie lactée qui apparaît en haut de l'image est également fortement distordue, au point que certaines constellations sont difficiles à reconnaître, comme la Croix du Sud (au niveau de l'étoile orange lumineuse, Gacrux, en haut à gauche de l'image) dont la forme de croix caractéristique est méconnaissable. Une étoile relativement peu lumineuse (HD 49359, magnitude apparente de 7,5) est située presque exactement derrière le trou noir. Elle apparaît ainsi sous la forme d'une image double, dont la luminosité apparente est extraordinairement amplifiée, d'un facteur d'environ 4 500, pour atteindre une magnitude apparente de -1,7. Les deux images de cette étoile, ainsi que les deux images du Grand Nuage sont situées sur une zone circulaire entourant le trou noir, appelée anneau d'Einstein.*

## Historique

Le concept de trou noir a émergé à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la gravitation universelle d'Isaac Newton. La question était de savoir s'il existait des objets dont la masse était suffisamment grande pour que leur vitesse de libération soit plus grande que la vitesse de la lumière. Cependant, ce n'est qu'au début du XX<sup>e</sup> siècle et avec l'avènement de la relativité générale d'Albert Einstein que le concept de trou noir devient plus qu'une curiosité. En effet, peu après la publication des travaux d'Einstein, une solution de l'équation d'Einstein impliquant l'existence d'un trou noir central est publiée par Karl Schwarzschild. Les travaux fondamentaux sur les trous noirs remontent aux années 1960, précédant de peu les premières indications observationnelles solides en faveur de leur existence. La première « observation » d'un objet contenant un trou noir fut celle de la source de rayons X Cygnus X-1 par le satellite Uhuru en 1971.

Le terme de « trou noir » a émergé, dans le courant des années 1960, par l'intermédiaire du physicien américain Kip Thorne. Auparavant, on utilisait les termes de « corps de Schwarzschild » ou d'« astre

occlus ». Le terme de « trou noir » a rencontré des réticences dans certaines communautés linguistiques, notamment francophones et russophones, qui le jugeaient quelque peu inconvenant.

### Propriétés

Un trou noir est un objet astrophysique comme un autre. Il se caractérise par le fait qu'il est très difficile à observer directement (voir ci-dessous), et que sa région centrale ne peut être décrite de façon satisfaisante par les théories physiques en leur état du début du XXI<sup>e</sup> siècle, car elle abrite une singularité gravitationnelle. Cette dernière ne peut être décrite que dans le cadre d'une théorie de la gravitation quantique, manquante à ce jour. En revanche, on sait parfaitement décrire les conditions physiques qui règnent dans son voisinage immédiat, de même que son influence sur son environnement, ce qui permet de les détecter par diverses méthodes indirectes.

Par ailleurs, les trous noirs sont étonnants en ce qu'ils sont décrits par un très petit nombre de paramètres. En effet, leur description, dans l'univers dans lequel nous vivons, ne dépend que de trois paramètres : la masse, la charge électrique et le moment cinétique. Tous les autres paramètres du trou noir (par exemple ses effets sur les corps environnants et leur étendue) sont fixés par ceux-ci. Par comparaison, la description d'une planète fait intervenir des centaines de paramètres (composition chimique, différenciation de ses éléments, convection, atmosphère, etc.). La raison pour laquelle un trou noir n'est décrit que par ces trois paramètres est connue depuis 1967 : c'est le théorème de calvitie démontré par Werner Israel. Celui-ci explique que les seules interactions fondamentales à longue portée étant la gravitation et l'électromagnétisme, les seules propriétés mesurables des trous noirs sont données par les paramètres décrivant ces interactions, à savoir la masse, le moment cinétique et la charge électrique. Pour un trou noir, la masse et la charge électrique sont des propriétés habituelles que décrit la physique classique (c'est-à-dire non-relativiste) : le trou noir possède un champ gravitationnel proportionnel à sa masse et un champ électrique proportionnel à sa charge.

L'influence du moment cinétique est en revanche spécifique à la relativité générale. Celle-ci stipule en effet qu'un corps en rotation va avoir tendance à « entraîner » l'espace-temps dans son voisinage. Ce phénomène, difficilement observable dans le système solaire en raison de son extrême faiblesse pour des astres non compacts, est connu sous le nom d'effet Lense-Thirring (aussi appelé *frame dragging*, en anglais). Il prend une amplitude considérable au voisinage d'un trou noir en rotation, au point qu'un observateur situé dans son voisinage immédiat serait inévitablement entraîné dans le sens de rotation du trou noir. La région où ceci se produit est appelée ergorégion. La masse d'un trou noir galactique correspond en général à environ un millième de la masse de la matière présente dans le bulbe central.

### Quatre types théoriques

Les quatre types théoriques de trous noirs en fonction du moment cinétique ( $J$ ) et de la charge électrique ( $Q$ ). La masse ( $M$ ) est toujours strictement positive.		
	$M > 0$	
	$J = 0$	$J \neq 0$
$Q = 0$	Schwarzschild	Kerr
$Q \neq 0$	Reissner-Nordström	Kerr-Newman

Un trou noir possède toujours une masse non nulle. En revanche, ses deux autres caractéristiques, à savoir le moment cinétique (rotation) et la charge électrique, peuvent en principe prendre des valeurs nulles (c'est-à-dire égales à zéro) ou non nulles. La combinaison de ces états permet de définir quatre types de trous noirs.

Quand la charge électrique et le moment cinétique sont nuls, on parle de trou noir de Schwarzschild, du nom de Karl Schwarzschild qui, le premier, a mis en évidence ces objets comme solutions des équations de la relativité générale (les équations d'Einstein), en 1916. Quand la charge électrique est non nulle et le moment cinétique nul, on parle de trou noir de Reissner-Nordström. Ces trous noirs ne présentent pas

d'intérêt astrophysique notable, car aucun processus connu ne permet de fabriquer un objet compact conservant durablement une charge électrique significative; celle-ci se dissipe normalement rapidement par absorption de charges électriques opposées prises à son environnement. Un trou noir de Reissner-Nordström est donc un objet théorique très improbable dans la nature. Si le trou noir possède un moment cinétique (c'est-à-dire qu'il est en rotation sur lui-même) mais n'a pas de charge électrique, on parle de trou noir de Kerr, du nom du mathématicien néo-zélandais Roy Kerr qui a trouvé la formule décrivant ces objets en 1963. Contrairement aux trous noirs de Reissner-Nordström et de Schwarzschild, les trous noirs de Kerr présentent un intérêt astrophysique considérable, car les modèles de formation et d'évolution des trous noirs indiquent que ceux-ci ont tendance à absorber la matière environnante par l'intermédiaire d'un disque d'accrétion dans lequel la matière tombe en spiralant toujours dans le même sens dans le trou noir. Ainsi, la matière communique du moment cinétique au trou noir qui l'engloutit. Les trous noirs de Kerr sont donc les seuls que l'on s'attend réellement à rencontrer en astronomie. Cependant, il reste possible que des trous noirs à moment cinétique très faible, s'apparentant en pratique à des trous noirs de Schwarzschild, existent. La version électriquement chargée du trou noir de Kerr, dotée comme lui d'une rotation, est connue sous le nom de trou noir de Kerr-Newman et ne présente comme le trou noir de Reissner-Nordström ou celui de Schwarzschild que peu d'intérêt astrophysique étant donné sa très faible probabilité.

D'un point de vue théorique, il peut exister une multitude d'autres types de trous noirs avec des propriétés différentes. Par exemple, il existe un analogue du trou noir de Reissner-Nordström, mais en remplaçant la charge électrique par une charge magnétique, c'est-à-dire créée par des monopôles magnétiques, dont l'existence reste extrêmement hypothétique à ce jour. On peut de même généraliser le concept de trou noir à des espaces comprenant plus de trois dimensions. Ceci permet d'exhiber des types de trous noirs ayant des propriétés parfois différentes de celles des trous noirs présentés ci-dessus.

### **Le trou et le noir**

L'existence des trous noirs est envisagée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle indépendamment par John Michell et Pierre-Simon de Laplace. Il s'agissait alors d'objets prédits comme suffisamment denses pour que leur vitesse de libération soit supérieure à la vitesse de la lumière, c'est-à-dire que même la lumière ne peut vaincre leur force gravitationnelle. Plutôt qu'une telle force (qui est un concept newtonien), il est plus juste de dire que la lumière subit en fait un décalage vers le rouge infini. Ce décalage vers le rouge est d'origine gravitationnelle : la lumière perd la totalité de son énergie en essayant de sortir du puits de potentiel d'un trou noir. Ce décalage vers le rouge est donc d'une nature quelque peu différente de celui dû à l'expansion de l'Univers, que l'on observe pour les galaxies lointaines et qui résulte d'une expansion d'un espace ne présentant pas de puits de potentiels très profonds. De cette caractéristique provient l'adjectif « noir », puisqu'un trou noir ne peut émettre de lumière. Ce qui est valable pour la lumière l'est aussi pour la matière : aucune particule ne peut s'échapper d'un trou noir une fois capturée par celui-ci, d'où le terme de « trou ».

### **Horizon des événements**

La zone sphérique qui délimite la région d'où lumière et matière ne peuvent s'échapper, est appelée « horizon des événements ». On parle parfois de « surface » du trou noir, quoique le terme soit quelque peu impropre (il ne s'agit pas d'une surface solide ou gazeuse comme la surface d'une planète ou d'une étoile). Il ne s'agit pas d'une région qui présente des caractéristiques particulières : un observateur qui franchirait l'horizon ne ressentirait rien de spécial à ce moment-là (voir ci-dessous). En revanche, il se rendrait compte qu'il ne pourrait plus s'échapper de cette région s'il essayait de faire demi-tour. C'est une sorte de point de non-retour. En substance, c'est une situation qui est un peu analogue à celle d'un baigneur qui s'éloignerait de la côte. Si par exemple le baigneur ne peut nager que deux kilomètres, il ne ressentira rien s'il s'éloigne à plus d'un kilomètre de la côte; mais s'il doit faire demi-tour, il se rendra compte qu'il n'a pas assez d'énergie pour atteindre la rive.

En revanche, un observateur situé au voisinage de l'horizon remarquera que le temps s'écoule différemment pour lui et pour un observateur situé loin du trou noir. Si ce dernier lui envoie des signaux lumineux à intervalles réguliers (par exemple une seconde), alors l'observateur proche du trou noir recevra des signaux plus énergétiques (la fréquence des signaux lumineux sera plus élevée, conséquence du décalage vers le



bleu subi par la lumière qui tombe vers le trou noir) et les intervalles de temps séparant deux signaux consécutifs seront plus rapprochés (moins d'une seconde, donc). Cet observateur aura donc l'impression que le temps s'écoule plus vite pour son confrère resté loin du trou noir que pour lui. À l'inverse, l'observateur resté loin du trou noir verra son collègue évoluer de plus en plus lentement, le temps chez celui-ci donnant l'impression de s'écouler plus lentement. Si l'observateur distant voit un objet tomber dans un trou noir, les deux phénomènes de dilatation du temps et de décalage vers le rouge vont se combiner. Les éventuels signaux émis par l'objet seront de plus en plus rouges, de moins en moins lumineux (la lumière émise perd de plus en plus d'énergie avant d'arriver à l'observateur lointain) et de plus en plus espacés. En pratique, le nombre de photons reçus par l'observateur distant va décroître très rapidement, jusqu'à devenir nul : à ce moment-là, l'objet en train de chuter dans le trou noir est devenu invisible. Même si l'observateur distant tente d'approcher l'horizon en vue de récupérer l'objet qu'il a eu l'impression de voir s'arrêter juste avant l'horizon, celui-ci demeurera invisible. Pour un observateur s'approchant d'une singularité, ce sont les effets de marée qui vont devenir importants. Ces effets, qui déterminent les déformations d'un objet (le corps d'un astronaute, par exemple) du fait des hétérogénéités du champ gravitationnel, seront inéluctablement ressentis par un observateur s'approchant de trop près d'un trou noir ou d'une singularité. La région où ces effets de marée deviennent importants est entièrement située dans l'horizon pour les trous noirs super massifs, mais empiète notablement hors de l'horizon pour des trous noirs stellaires. Ainsi, un observateur s'approchant d'un trou noir stellaire serait déchiqueté avant de passer l'horizon, alors que le même observateur qui s'approcherait d'un trou noir super massif passerait l'horizon sans encombre. Il serait tout de même inéluctablement détruit par les effets de marée en s'approchant de la singularité.

## Ergosphère

### Dernière orbite circulaire stable (ISCO)

« Dernière orbite circulaire stable » redirige ici. Pour les autres significations, voir *Orbite circulaire*. La dernière orbite circulaire stable, généralement abrégée en ISCO (pour l'anglais *Innermost stable circular orbit*), désigne l'orbite circulaire la plus proche d'un trou noir en-deçà de laquelle la matière finit inéluctablement par tomber sur le trou noir.

Pour un trou noir de Schwarzschild, le rayon de l'ISCO vaut trois fois le rayon de Schwarzschild de ce trou noir. Pour un trou noir de Kerr, il varie en fonction du moment angulaire du trou noir considéré et n'est plus que de 0,6 fois le rayon de Schwarzschild pour un trou noir ayant une rotation maximale.

### Sphère photonique, singularité

Au centre d'un trou noir se situe une région dans laquelle le champ gravitationnel et les distorsions de l'espace-temps (on parle plutôt de courbure de l'espace-temps) deviennent infinis. Cette région s'appelle une singularité gravitationnelle. La description de cette région est délicate dans le cadre de la relativité générale puisque celle-ci ne peut décrire des régions où la courbure devient infinie. De plus, la relativité générale est une théorie qui ne peut pas incorporer en général des effets gravitationnels d'origine quantique. Or quand la courbure tend vers l'infini, on peut montrer que celle-ci est nécessairement sujette à des effets de nature quantique. Par conséquent, seule une théorie de la gravitation incorporant tous les effets quantiques (on parle alors de gravitation quantique) est en mesure de décrire correctement les singularités gravitationnelles. La description d'une singularité gravitationnelle est donc pour l'heure problématique. Néanmoins, tant que celle-ci est située à l'intérieur de l'horizon du trou noir, elle ne peut influencer ce qui est à l'extérieur de cet horizon, de la même façon que de la matière située à l'intérieur de l'horizon d'un trou noir ne peut en ressortir. Ainsi, aussi mystérieuses que soient les singularités gravitationnelles, notre incapacité à les décrire, signe de l'existence de limitations de la relativité générale à décrire tous les phénomènes gravitationnels, n'empêche pas la description des trous noirs pour la partie située de notre côté de l'horizon des événements.

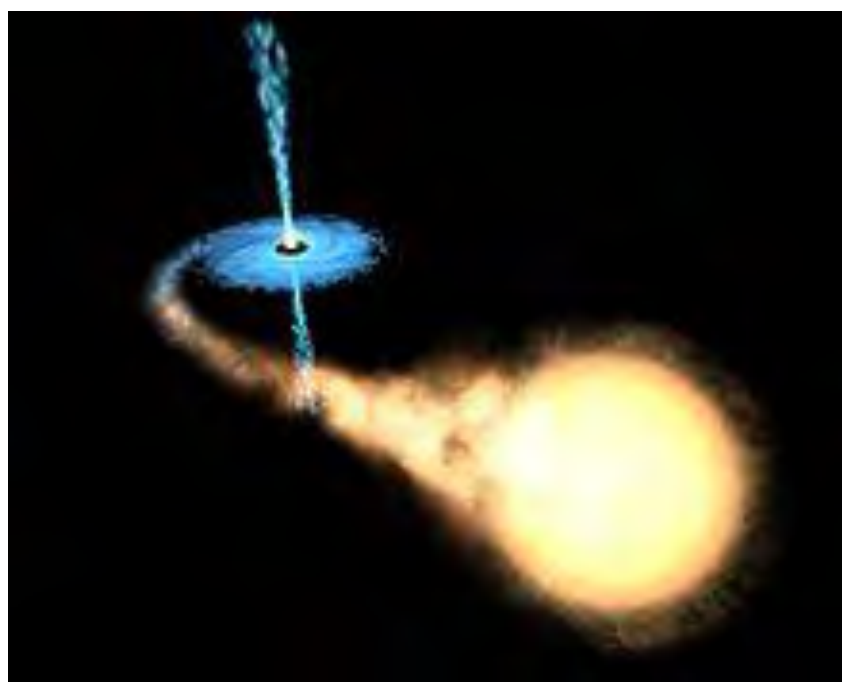
## Formation

La possibilité de l'existence des trous noirs n'est pas une conséquence exclusive de la relativité générale : la quasi-totalité des autres théories de la gravitation physiquement réalistes permet également leur existence. Toutefois, la relativité générale, contrairement à la plupart de ces autres théories de la gravité, a non seulement prédit que les trous noirs *peuvent* exister, mais aussi qu'ils seront formés partout où

suffisamment de matière peut être compactée dans une région de l'espace. Par exemple, si l'on compressait le Soleil dans une sphère d'environ trois kilomètres de rayon (soit à peu près quatre millièmes de sa taille), il deviendrait un trou noir. Si la Terre était compressée dans un volume de quelques millimètres cubes, elle deviendrait également un trou noir. Pour l'astrophysique, un trou noir peut être considéré comme le stade ultime d'un effondrement gravitationnel. Les deux stades de la matière qui, en termes de compacité, précèdent l'état de trou noir, sont ceux atteints par exemple par les naines blanches et les étoiles à neutrons. Dans le premier cas, c'est la pression de dégénérescence des électrons qui maintient la naine blanche dans un état d'équilibre face à la gravité. Dans le second, il ne s'agit pas de la pression de dégénérescence des nucléons, mais de l'interaction forte qui maintient l'équilibre. Un trou noir ne peut se former à la suite de l'effondrement d'une naine blanche : celle-ci, en s'effondrant, initie des réactions nucléaires qui forment des noyaux plus lourds que ceux qui la composent. Ce faisant, le dégagement d'énergie qui en résulte est suffisant pour disloquer complètement la naine blanche, qui explose en supernova dite thermonucléaire (ou de type Ia). Un trou noir se forme lorsque la force de gravité est suffisamment grande pour dépasser l'effet de la pression, chose qui se produit quand l'astre progéniteur dépasse une certaine masse critique. Dans ce cas, plus aucune force connue ne permet de maintenir l'équilibre, et l'objet en question s'effondre complètement. En pratique, plusieurs cas de figures sont possibles : soit une étoile à neutrons accrète de la matière issue d'une autre étoile, jusqu'à atteindre une masse critique, soit elle fusionne avec une autre étoile à neutron (phénomène *a priori* beaucoup plus rare), soit le cœur d'une étoile massive s'effondre directement en trou noir.

L'hypothèse de l'existence d'un état plus compact que celui d'étoile à neutrons a été proposée dans le courant des années 1980; ce serait celui des étoiles à quarks aussi appelées étoiles étranges en raison du nom donné pour des raisons historiques à certains des quarks constituant l'objet, appelés « quarks étranges ». Des indications d'une possible détection indirecte de tels astres ont été obtenues depuis le courant des années 1990, sans trancher pour autant définitivement la question<sup>12</sup>, mais cela ne change rien au fait qu'au-delà d'une certaine masse ce type d'astre finit par s'effondrer en trou noir, seule la valeur de la masse limite change. En 2006, on distingue quatre grandes classes de trous noirs en fonction de leur masse : les trous noirs stellaires, super-massifs, intermédiaires et primordiaux (ou micro trous noirs). L'existence voire l'abondance de chaque type de trou noir est directement liée à la possibilité de leur formation.

## Trous noirs stellaires



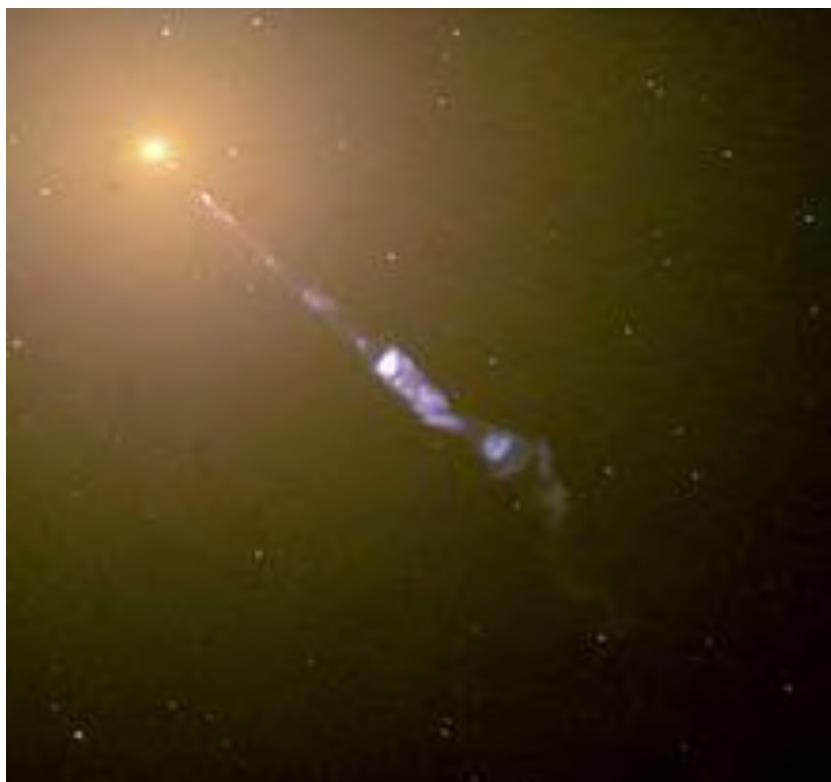
*Illustration de la formation de jets. Au sein d'un système binaire composé d'un trou noir et d'une étoile, cette dernière voit son gaz arraché et aspiré vers le trou noir. En s'approchant, le gaz engendre un disque d'accrétion qui fournit lui-même la matière dont est composé le jet.*

Un trou noir de la masse du soleil aurait un diamètre de 6 kilomètres. Les trous noirs stellaires ont une masse d'au moins quelques masses solaires. Ils naissent à la suite de l'effondrement gravitationnel du résidu des étoiles massives (environ dix masses solaires et plus, initialement). En effet, lorsque la combustion par les réactions thermonucléaires dans le cœur de l'étoile massive se termine, faute de carburant, une supernova se produit. Cette dernière peut laisser derrière elle un cœur qui continue à s'effondrer rapidement. En 1939, Robert Oppenheimer a montré que si ce cœur a une masse supérieure à une certaine limite (appelée limite d'Oppenheimer-Volkoff et égale à environ 3,3 masses solaires) la force gravitationnelle l'emporte définitivement sur toutes les autres forces et un trou noir se forme. L'effondrement vers un trou noir est susceptible d'émettre des ondes gravitationnelles, qui devraient être détectées dans un futur proche avec des instruments tels que le détecteur Virgo de Cascina en Italie, ou avec les deux interféromètres américains de LIGO. Les trous noirs stellaires sont aujourd'hui observés dans les binaires X et les microquasars et sont responsables parfois de l'apparition de jets tels que ceux observés dans certains noyaux actifs de galaxies.

### Trous noirs supermassifs

Les trous noirs super-massifs ont une masse comprise entre quelques millions et quelques milliards de masses solaires. Ils se trouvent au centre des galaxies et leur présence provoque parfois l'apparition de jets et du rayonnement X. Les noyaux de galaxies qui sont ainsi plus lumineux qu'une simple superposition d'étoiles sont alors appelés noyaux actifs de galaxies.

Notre galaxie, la Voie lactée, contient un tel trou noir (Sagittarius A), ainsi qu'il a été démontré par l'observation des mouvements extrêmement rapides des étoiles proches du trou noir. En particulier, une étoile nommée S2 a pu être observée lors d'une révolution complète autour d'un objet sombre non détecté en moins de onze ans. L'orbite elliptique de cette étoile l'a amenée à moins de vingt unités astronomiques de cet objet (soit une distance de l'ordre de celle Uranus-Soleil) et la vitesse à laquelle l'orbite est parcourue permet d'assigner une masse d'environ 2,3 millions de masses solaires pour l'objet sombre autour duquel elle gravite. Aucun modèle autre que celui d'un trou noir ne permet de rendre compte d'une telle concentration de matière dans un volume aussi restreint. Le télescope Chandra a également permis d'observer au centre de la galaxie NGC 6240 deux trous noirs super-massifs en orbite l'un autour de l'autre. La formation de tels géants est encore débattue, mais certains pensent qu'ils se sont formés très rapidement au début de l'univers.



*Le jet émis depuis le centre de la galaxie M87 est probablement formé grâce à la présence d'un trou noir supermassif dont la masse est estimée à 6,8 milliards de masses solaires. Seul un côté du jet est visible, il s'agit de celui dirigé vers nous. Celui-ci apparaît bien plus brillant que le contre jet, car ayant sa luminosité considérablement augmentée par l'effet de décalage vers le bleu, alors que le contre jet subit un décalage vers le rouge qui le rend bien moins lumineux.*



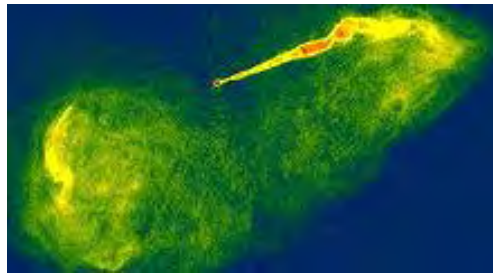
## Trous noirs intermédiaires

Les trous noirs intermédiaires sont des objets récemment découverts et ont une masse entre 100 et 10 000 masses solaires. Dans les années 1970, les trous noirs de masse intermédiaire étaient supposés se former dans le cœur des amas globulaires mais aucune observation ne venait soutenir cette hypothèse. Des observations dans les années 2000 ont montré l'existence de sources de rayons X ultra-lumineuses (*Ultra-luminous X-ray source* en anglais, ou *ULX*). Ces sources ne sont apparemment pas associées au cœur des galaxies où l'on trouve les trous noirs super-massifs. De plus, la quantité de rayons X observée est trop importante pour être produite par un trou noir de 20 masses solaires, accrétant de la matière avec un taux égal à la limite d'Eddington (limite maximale pour un trou noir stellaire). Ces trous noirs intermédiaires pourraient aussi résulter de l'effondrement d'étoile de population III : ce sont des populations hypothétiques d'étoiles très massives (des milliers de masses solaires) qui se seraient formées au début de l'Univers, constituées des éléments les plus légers : l'hydrogène ou l'hélium.

## Trous noirs primordiaux

Les trous noirs primordiaux, aussi appelés *micro trous noirs* ou *trous noirs quantiques*, auraient une taille très petite. Ils se seraient formés durant le Big Bang (d'où l'appellation trou noir « primordial »), à la suite de l'effondrement gravitationnel de petites sur-densités dans l'univers primordial. Dans les années 1970, les physiciens Stephen Hawking et Bernard Carr ont étudié un mécanisme de formation des trous noirs dans l'univers primordial. Ils avancèrent l'idée d'une profusion de mini-trous noirs, minuscules par rapport à ceux envisagés par la formation stellaire. La densité et la répartition en masse de ces trous noirs ne sont pas connues et dépendent essentiellement de la façon dont se produit une phase d'expansion rapide dans l'univers primordial, l'inflation cosmique. Ces trous noirs de faible masse émettent, s'ils existent, un rayonnement gamma qui pourrait éventuellement être détecté par des satellites comme INTEGRAL. La non détection de ce rayonnement permet de mettre des limites supérieures sur l'abondance et la répartition en masse de ces trous noirs. Selon certains modèles de physique des hautes énergies, il serait possible de créer des mini-trous noirs similaires en laboratoire, dans des accélérateurs de particules comme le LHC, installé près de Genève, en Suisse. En 2005, Frans Pretorius est parvenu à simuler la fusion complète de deux trous noirs; la phase finale de ce processus est plus simple qu'on l'imaginait et surtout plus courte : de l'ordre de la milliseconde.

## Observation



*Jet de plasma observé en interférométrie dans la galaxie M87. L'effet est imputé au champ magnétique intense à proximité du trou noir supermassif en rotation situé au centre de cette galaxie*

Les deux seules classes de trous noirs pour lesquelles on dispose d'observations nombreuses (indirectes, mais de plus en plus précises, voir paragraphe suivant) sont les trous noirs stellaires et super-massifs. Le trou noir super-massif le plus proche est celui qui se trouve au centre de notre Galaxie à environ 8 kiloparsecs. Une des premières méthodes de détection d'un trou noir est la détermination de la masse des deux composantes d'une étoile binaire, à partir des paramètres orbitaux. On a ainsi observé des étoiles de faible masse avec un mouvement orbital très prononcé (amplitude de plusieurs dizaines de km/s) mais dont le compagnon est invisible. Le compagnon massif invisible peut généralement être interprété comme une étoile à neutrons ou un trou noir, puisqu'une étoile normale avec une telle masse se verrait très facilement. La masse du compagnon (ou la fonction de masses, si l'angle d'inclinaison est inconnu) est alors comparée à la masse limite maximale des étoiles à neutrons (environ 3,3 masses solaires). Si elle dépasse cette limite, on considère que l'objet est un trou noir. Sinon, il peut être une naine blanche. On considère également que certains trous noirs stellaires apparaissent lors des sursauts de rayons gamma (ou *GRB*, pour *gamma-ray*

*burst* en anglais). En effet, ces derniers se formeraient via l'explosion d'une étoile massive (comme une étoile Wolf-Rayet) en supernova, et que dans certains cas (décrits par le modèle collapsar), un flash de rayons gamma est produit au moment où le trou noir se forme. Ainsi, un GRB pourrait représenter le signal de la naissance d'un trou noir. Des trous noirs de plus faible masse peuvent aussi être formés par des supernovæ classiques. Le rémanent de la supernova 1987A est soupçonné d'être un trou noir, par exemple. Un deuxième phénomène directement relié à la présence d'un trou noir, cette fois pas seulement de type stellaire, mais aussi super-massif, est la présence de jets observés principalement dans le domaine des ondes radio. Ces jets résultent des changements de champ magnétique à grande échelle se produisant dans le disque d'accrétion du trou noir.

### **Observation directe**

La petite taille d'un trou noir stellaire (quelques kilomètres) rend son observation directe impossible. En guise d'exemple, et même si la taille angulaire d'un trou noir est plus grande que celle d'un objet classique de même rayon, un trou noir d'une masse solaire et situé à un parsec (environ 3,26 années-lumière) aurait un diamètre angulaire de 0,1 *micro* seconde d'arc. Cependant, la situation est plus favorable pour un trou noir super-massif. En effet, la taille d'un trou noir est proportionnelle à sa masse. Le trou noir du centre galactique a une masse, bien estimée, d'environ 3,6 millions de masses solaires. Son rayon de Schwarzschild est donc d'environ 11 millions de kilomètres. La taille angulaire de ce trou noir, situé à environ 8,5 kiloparsecs est de l'ordre de 40 microsecondes d'arc. Cette résolution est inaccessible dans le domaine visible, mais est assez proche des limites actuellement atteignables en interférométrie radio. La technique de l'interférométrie radio, avec une sensibilité suffisante, est limitée en fréquence au domaine millimétrique. Un gain d'un ordre de grandeur en fréquence permettrait une résolution meilleure que la taille angulaire du trou noir. L'imagerie directe du trou noir du centre galactique est donc envisageable dans les années qui viennent. Le trou noir super-massif situé au centre de la galaxie M87 est environ 2 000 fois plus éloigné (18,7 Mpc) mais estimé près de 1 000 fois plus massif. Ce trou noir pourrait ainsi devenir le second trou noir imagé après celui de la Voie Lactée.

### **Exemples de trous noirs stellaires**

Cygnus X-1, détecté en 1965, est le premier objet astrophysique identifié comme pouvant être la manifestation d'un trou noir. C'est un système binaire qui serait constitué d'un trou noir en rotation et d'une étoile géante. Les systèmes binaires stellaires qui contiennent un trou noir avec un disque d'accrétion formant des jets sont appelés micro-quasars, en référence à leurs parents extragalactiques : les quasars. Les deux classes d'objets partagent en fait les mêmes processus physiques. Parmi les micro-quasars les plus étudiés, on notera GRS 1915+105, découvert en 1994 pour avoir des jets supraluminiques. Un autre cas de tels jets fut détecté dans le système GRO J1655-40. Mais, sa distance est sujette à controverse et ses jets pourraient ne pas être supraluminiques. Notons aussi le micro-quasar très spécial SS 433, qui a des jets persistants en précession et où la matière se déplace par paquets à des vitesses de quelques fractions de la vitesse de la lumière.

### **Exemples de trous noirs super-massifs**

Les candidats aux trous noirs super-massifs ont premièrement été les noyaux actifs de galaxie et les quasars découverts par les radioastronomes dans les années 1960. Cependant, les observations les plus convaincantes de l'existence de trous noirs super-massifs sont celles des orbites des étoiles autour du centre galactique appelé Sagittarius A\*. L'orbite de ces étoiles et les vitesses atteintes ont permis aujourd'hui d'exclure tout autre type d'objet qu'un trou noir super-massif, de l'ordre de 4 millions de masses solaires à cet endroit de la galaxie. Par la suite, des trous noirs super-massifs ont été détectés dans de nombreuses autres galaxies. En février 2005, une étoile géante bleue, appelée SDSS J090745.0+024507 fut observée quittant notre galaxie avec une vitesse deux fois supérieure à la vitesse de libération de la Voie lactée, soit 0,0022 fois la vitesse de la lumière. Quand on remonte la trajectoire de cette étoile, on voit qu'elle croise le voisinage immédiat du centre galactique. Sa vitesse et sa trajectoire confortent donc également l'idée de la présence d'un trou noir super-massif à cet endroit dont l'influence gravitationnelle aurait provoqué l'éjection de cette étoile de la Voie Lactée. En novembre 2004, une équipe d'astronomes a rapporté la découverte du premier trou noir de masse intermédiaire dans notre galaxie et orbitant à seulement trois années-lumière du centre galactique. Ce trou noir aurait une masse d'environ 1 300 masses solaires et se

trouve dans un amas de seulement sept étoiles. Cet amas est probablement le résidu d'un amas massif d'étoiles qui a été dénudé par la présence du trou noir central. Cette observation conforte l'idée que les trous noirs super-massifs grandissent en absorbant des étoiles et autres trous noirs, qui pourra être confirmée par l'observation directe des ondes gravitationnelles émises par ce processus, par l'intermédiaire de l'interféromètre spatial LISA. En juin 2004, des astronomes ont trouvé un trou noir super-massif, appelé Q0906+6930, au centre d'une galaxie lointaine d'environ 12,7 milliards d'années-lumière, c'est-à-dire lorsque l'univers était encore très jeune. Cette observation montre que la formation des trous noirs super-massifs dans les galaxies est un phénomène relativement rapide. En 2012, le plus gros trou noir de l'histoire a été découvert dans la galaxie NGC 1277 situé à 220 millions d'années-lumière dans la constellation de Persée. Il aurait une masse de 17 milliards de masses solaires et représente 14 % de la masse de sa propre galaxie (contre 0,1 pour les autres en moyenne).

## **Trous noirs et physique fondamentale**

### **Théorèmes sur les singularités**

Une question cruciale à propos des trous noirs est de savoir sous quelles conditions ils peuvent se former. Si les conditions nécessaires à leur formation sont extrêmement spécifiques, les chances que les trous noirs soient nombreux peuvent être faibles. Un ensemble de théorèmes mathématiques dus à Stephen Hawking et Roger Penrose a montré qu'il n'en était rien : la formation des trous noirs peut se produire dans une variété de conditions extrêmement génériques. Pour des raisons évidentes, ces travaux ont été nommés théorèmes sur les singularités. Ces théorèmes datent du début des années 1970, époque où il n'y avait guère de confirmation observationnelle de l'existence des trous noirs. Les observations ultérieures ont effectivement confirmé que les trous noirs étaient des objets très fréquents dans l'univers.

### **Singularités nues et censure cosmique**

Au centre d'un trou noir se situe une singularité gravitationnelle. Pour tout type de trou noir, cette singularité est « cachée » du monde extérieur par l'horizon des événements. Cette situation s'avère très heureuse : la physique actuelle ne sait certes pas décrire une singularité gravitationnelle mais cela a peu d'importance, car celle-là étant à l'intérieur de la zone délimitée par l'horizon, elle n'influe pas sur les événements du monde extérieur. Il se trouve cependant qu'il existe des solutions mathématiques aux équations de la relativité générale dans lesquelles une singularité existe sans être entourée d'un horizon. C'est par exemple le cas pour les solutions de Kerr ou de Reissner-Nordström, quand la charge ou le moment cinétique dépasse une certaine valeur critique. Dans ce cas, on ne parle plus de trou noir (il n'y a plus d'horizon donc plus de « trou ») mais de singularité nue. De telles configurations sont extrêmement difficiles à étudier en pratique car la prédiction du comportement de la singularité reste toujours impossible ; mais cette fois, il influence l'univers dans lequel nous vivons. L'existence de singularités nues a donc pour conséquence l'impossibilité d'une évolution déterministe de l'univers dans l'état des connaissances actuelles. Pourtant, les trous noirs de Kerr ou de Reissner-Nordström (ainsi que le cas général de Kerr-Newman) ne peuvent pas arriver à leurs valeurs critiques respectives par apport externe de moment cinétique ou de charges électriques. En effet, plus on se rapprocherait de la valeur critique d'un trou noir de Kerr, moins un objet externe pourrait augmenter son moment cinétique. De façon comparable, à l'approche de la charge maximale d'un trou noir de Reissner-Nordström, les charges électriques de même signe que celle du trou noir projetées vers celui-ci y parviendraient de plus en plus difficilement en raison de la répulsion électrostatique exercée par le trou noir. Pour amener les charges à pénétrer dans le trou noir, il faudrait les y projeter à une vitesse relativiste (à cause de la répulsion électrique), ce qui contribuerait à leur conférer une énergie croissante devenant bien supérieure à leur énergie de masse (au repos). D'où une contribution à la masse du trou noir, suffisante pour compenser l'augmentation de charge du trou noir. Finalement, le rapport charge/masse du trou noir « saturerait » juste en dessous de la valeur critique. Ces éléments, ainsi que des considérations plus fondamentales, ont conduit le mathématicien anglais Roger Penrose à formuler en 1969 l'hypothèse dite de la censure cosmique, stipulant qu'aucun processus physique ne pouvait permettre l'apparition de singularités nues dans l'univers. Cette hypothèse, qui possède plusieurs formulations possibles, a été l'objet d'un pari entre Stephen Hawking d'une part et Kip Thorne et John Preskill d'autre part, ces derniers ayant parié que des singularités nues pouvaient exister.

En 1991, Stuart L. Shapiro et Saul A. Teukolsky montrèrent sur foi de simulations numériques que des singularités nues pouvaient se former dans l'univers. Quelques années plus tard, Matthew Choptuik mit en évidence un ensemble important de situations à partir desquelles la formation de singularités nues était possible. Ces configurations demeurent cependant extrêmement particulières, et nécessitent un ajustement fin des conditions initiales pour mener à la formation des singularités nues. Leur formation est donc *possible*, mais en pratique extrêmement *improbable*. En 1997, Stephen Hawking reconnut qu'il avait perdu son pari avec Kip Thorne et John Preskill. Un autre pari a depuis été lancé, où des conditions plus restrictives sur les conditions initiales pouvant mener à des singularités nues ont été rajoutées.

## Entropie

En 1971, le physicien britannique Stephen Hawking montra que la surface totale des horizons des événements de n'importe quel trou noir classique ne peut jamais décroître. Cette propriété est tout à fait semblable à la deuxième loi de la thermodynamique, avec la surface jouant le rôle de l'entropie. Dans le cadre de la physique classique, on pourrait violer cette loi de la thermodynamique en envoyant de la matière dans un trou noir, ce qui la ferait disparaître de notre univers, avec la conséquence d'un décroissement de l'entropie totale de l'univers. Pour éviter de violer cette loi, le physicien Jacob Bekenstein proposa qu'un trou noir possède une entropie (sans en préciser la nature exacte) et qu'elle soit proportionnelle à la surface de son horizon. Bekenstein pensait alors que les trous noirs n'émettent pas de radiation et que le lien avec la thermodynamique n'était qu'une simple analogie et pas une description physique des propriétés du trou noir. Néanmoins, Hawking a peu après démontré par un calcul de théorie quantique des champs que le résultat sur l'entropie des trous noirs est bien plus qu'une simple analogie et qu'il est possible de définir rigoureusement une température associée au rayonnement des trous noirs (voir ci-dessous). Utilisant les équations de la thermodynamique des trous noirs, il apparaît que l'entropie d'un trou noir est proportionnelle à la surface de son horizon. C'est un résultat universel qui peut être appliqué dans un autre contexte aux modèles cosmologiques comportant eux aussi un horizon comme l'univers de de Sitter.

L'interprétation microscopique de cette entropie reste en revanche un problème ouvert, auquel la théorie des cordes a cependant réussi à apporter des éléments de réponse partiels. Il a été ensuite montré que les trous noirs sont des objets à entropie maximale, c'est-à-dire que l'entropie maximale d'une région de l'espace délimitée par une surface donnée est égale à celle du trou noir de même surface. Ce constat a amené les physiciens Gerard 't Hooft et ensuite Leonard Susskind à proposer un ensemble d'idées, appelé principe holographique, basé sur le fait que la description de la surface d'une région permet de reconstituer toute l'information relative à son contenu, de la même façon qu'un hologramme code des informations relatives à un volume sur une simple surface, permettant ainsi de donner un effet de relief à partir d'une surface. La découverte de l'entropie des trous noirs a ainsi permis le développement d'une analogie extrêmement profonde entre trous noirs et thermodynamique, la thermodynamique des trous noirs, qui pourrait aider dans la compréhension d'une théorie de la gravité quantique.

## Évaporation et radiation de Hawking

En 1974, Stephen Hawking appliqua la théorie quantique des champs à l'espace-temps courbé de la relativité générale, et découvrit que contrairement à ce que prédisait la mécanique classique, les trous noirs pouvaient effectivement émettre une radiation (proche d'une radiation thermique) aujourd'hui appelée rayonnement de Hawking : les trous noirs ne sont donc pas complètement « noirs ». La radiation de Hawking correspond en fait à un spectre de corps noir. On peut donc y associer la « température » du trou noir, qui est inversement proportionnelle à sa taille. De ce fait, plus le trou noir est important, plus sa température est basse. Un trou noir de la masse de la planète Mercure aurait une température égale à celle du rayonnement de fond diffus cosmologique (à peu près 2,73 kelvins). Si le trou noir est plus massif, il sera donc plus froid que la température du fond et accroîtra son énergie plus vite qu'il n'en perdra *via* la radiation de Hawking, devenant ainsi encore plus froid. Un trou noir stellaire a ainsi une température de quelques microkelvins, ce qui rend la détection directe de son évaporation totalement impossible à envisager. Cependant, pour des trous noirs moins massifs, la température est plus élevée et la perte d'énergie associée lui permet de voir sa masse varier sur des échelles cosmologiques. Ainsi, un trou noir de quelques millions de tonnes s'évaporerait-il en une durée inférieure à celle de l'âge de l'Univers. Alors que le trou noir s'évapore, le trou noir devient plus petit, donc plus chaud. Certains astrophysiciens ont

proposé que l'évaporation complète de trous noirs produirait un flash de rayons gamma. Ceci serait une signature de l'existence de trous noirs de très faible masse. Il s'agirait alors de trous noirs primordiaux. La recherche actuelle explore cette possibilité avec les données du satellite européen INTEGRAL.

### **Paradoxe de l'information**

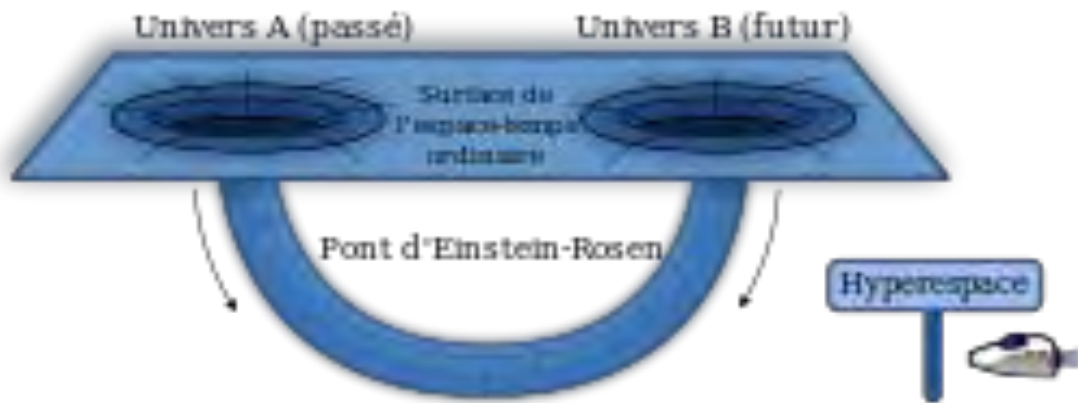
Une question de physique fondamentale encore irrésolue au début du XXI<sup>e</sup> siècle est le fameux paradoxe de l'information. En effet, en raison du théorème de calvitie déjà cité, il n'est pas possible de déterminer *a posteriori* ce qui est entré dans le trou noir. Cependant, vue d'un observateur éloigné, l'information n'est jamais complètement détruite puisque la matière tombant dans le trou noir ne disparaît qu'après un temps infiniment long. Alors, l'information qui a formé le trou noir est-elle perdue ou pas ? Des considérations générales sur ce que devrait être une théorie de la gravité quantique suggèrent qu'il ne peut y avoir qu'une quantité finie et limitée d'entropie (c'est-à-dire une quantité maximale et finie d'information) associée à l'espace près de l'horizon du trou noir. Mais la variation de l'entropie de l'horizon plus celle de la radiation Hawking est toujours suffisante pour prendre en compte toute l'entropie de la matière et de l'énergie tombant dans le trou noir... Mais restent de nombreuses questions. En particulier au niveau quantique, est-ce que l'état quantique de la radiation de Hawking est déterminé de manière unique par l'histoire de ce qui est tombé dans le trou noir ? De même, est-ce que l'histoire de ce qui est tombé est déterminée de manière unique par l'état quantique du trou noir et de sa radiation ? En d'autres termes, est-ce que les trous noirs sont, ou ne sont pas, déterministes ? Cette propriété est bien sûr conservée dans la relativité générale comme dans la physique classique, mais pas dans la mécanique quantique.

Pendant de longues années, Stephen Hawking a maintenu sa position originelle de 1975 voulant que la radiation de Hawking soit entièrement thermique, et donc complètement aléatoire, représentant ainsi une nouvelle source d'information non-déterministe. Cependant, le 21 juillet 2004, il présenta un nouvel argument, allant à l'opposé de sa première position. Dans ses nouveaux calculs, l'entropie associée à un trou noir serait effectivement inaccessible à un observateur extérieur. De plus, dans l'absence de cette information, il est impossible de relier de manière univoque l'information de la radiation de Hawking (contenue dans ses corrélations internes) à l'état initial du système. Cependant, si le trou noir s'évapore complètement, cette identification univoque peut être faite et l'unitarité est préservée (l'information est donc conservée). Il n'est pas clair que la communauté scientifique spécialisée soit absolument convaincue par les arguments présentés par Hawking. Mais Hawking lui-même fut suffisamment convaincu pour régler le pari qu'il avait fait en 1997 avec le physicien John Preskill de Caltech, provoquant ainsi un énorme intérêt des médias. En juillet 2005, l'annonce de Hawking a donné lieu à une publication dans la revue *Physical Review* et fut débattue par la suite au sein de la communauté scientifique sans qu'un consensus net ne se dégage quant à la validité de l'approche proposée par Hawking.

### **Trous noirs et trous de ver**

La relativité générale indique qu'il existerait des configurations dans lesquelles deux trous noirs sont reliés l'un à l'autre. Une telle configuration est habituellement appelée trou de ver ou plus rarement pont d'Einstein-Rosen. De telles configurations ont beaucoup inspiré les auteurs de science-fiction (voir par exemple les références de la section médias) car elles proposent un moyen de voyager très rapidement sur de grandes distances, voire voyager dans le temps. En pratique, de telles configurations, si elles sont autorisées par la relativité générale, semblent totalement irréalisables dans un contexte astrophysique car aucun processus connu ne semble permettre la formation de tels objets.





*Schéma d'un trou de ver*

### Propositions alternatives aux trous noirs

La démonstration de l'existence des trous noirs stellaires s'appuie sur l'existence d'une limite supérieure pour la masse des étoiles à neutrons. La valeur de cette limite dépend fortement des hypothèses faites concernant les propriétés de la matière dense. La découverte de nouvelles phases exotiques de la matière pourrait repousser cette limite. Une phase constituée de quarks libres (non liés pour former des protons et neutrons par exemple) à haute densité pourrait permettre l'existence d'étoiles à quarks tandis que des modèles de supersymétrie prévoient l'existence d'étoiles Q. Certaines extensions du modèle standard postulent l'existence de préons qui constitueraient les blocs élémentaires des quarks et des leptons, lesquels pourraient hypothétiquement former des étoiles à préons. Ces modèles hypothétiques pourraient expliquer un certain nombre d'observations de candidats trous noirs stellaires. Cependant, il peut être montré à partir d'arguments généraux en relativité générale que tous ces objets auraient une masse maximale. Étant donné que la densité moyenne d'un trou noir à l'intérieur de son rayon de Schwarzschild est inversement proportionnelle au carré de sa masse, les trous noirs supermassifs sont beaucoup moins denses que les trous noirs stellaires (la masse volumique d'un trou noir de  $10^8$  masses solaires est comparable à celle de l'eau; un trou noir de dix milliards ( $10^{10}$ ) de masses solaires serait moins dense que l'air). En conséquence, la physique de la matière formant un trou noir supermassif est bien mieux comprise et les explications alternatives possibles pour l'observation des trous noirs supermassifs sont beaucoup plus ordinaires. Par exemple, un trou noir supermassif pourrait être modélisé par un grand amas d'objets très sombres. Cependant, ces alternatives ne sont généralement pas assez stables pour expliquer les candidats trous noirs supermassifs. Les éléments de preuve en faveur des trous noirs stellaires et supermassifs impliquent que, pour que les trous noirs ne se forment pas, la relativité générale doit échouer comme théorie de la gravité, peut-être à cause de l'apparition de corrections quantiques. Une caractéristique très attendue d'une théorie de la gravité quantique serait l'absence de singularités ou d'horizons des événements (et donc l'absence de trous noirs). Ces dernières années, une grande attention a été portée au modèle des « fuzzballs » (littéralement « balles (ou pelotes) chevelues ») développé en théorie des cordes. Basée sur des calculs dans des situations spécifiques en théorie des cordes, la proposition suggère que de façon générale les états individuels d'une solution trou noir ne doit pas avoir d'horizon des événements ni de singularité mais que pour un observateur classique/semi-classique la moyenne statistique de ces états apparaît comme un trou noir ordinaire en relativité générale.

De nombreuses autres alternatives (étoiles noires, étoiles sombres, étoiles à énergie noire, objets en effondrement éternel, étoiles exotiques [étoiles électrofaibles, étoiles à préons, étoiles à bosons], etc.) ont également été proposées, tous ces objets restant néanmoins purement théoriques en l'état actuel de nos connaissances.

**La fusion intervenue entre deux trous noirs a provoqué des ondes gravitationnelles dans l'Univers, ondes qui ont été décelées et mesurées en 2016 par les 2 interféromètres LIGO (USA), vérifiant ainsi l'hypothèse émise par Albert Einstein cent ans plus tôt (en 1916) de l'existence de telles ondes.**

# Un deuxième trou noir géant, 100.000 fois plus gros que le Soleil, détecté dans la Voie lactée - (Juillet 2017)

Environ 100.000 fois plus massif que le soleil, ce trou noir ferait potentiellement partie de la catégorie des 'intermédiaires'. Des astronomes ont découvert des preuves de l'existence d'un énorme trou noir, près de 100.000 fois plus massif que le Soleil, qui serait dissimulé dans un nuage de gaz situé à proximité du centre de notre galaxie, la Voie lactée.

Il y a du nouveau dans la Voie lactée. Des astronomes japonais pensent avoir fait une découverte de taille dans notre galaxie : un énorme trou noir 100.000 fois plus gros que le Soleil qui se cacherait dans un nuage à proximité du cœur de la Voie lactée. Si cette nouvelle se confirme, ce fameux trou noir serait alors la deuxième plus grande masse céleste de ce type à être repérée dans la galaxie. La première se nomme Sagittaire A\*. Il s'agit d'un trou noir supermassif dont la masse est estimée à quatre millions de fois celle du Soleil. A côté de lui, le deuxième trou noir détecté serait ainsi décrit comme "intermédiaire", une dénomination qui vaut pour les objets célestes compris entre 100 et un million de masses solaires.

C'est grâce au radiotélescope Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) situé au Chili que sa présence a été mise en évidence. Des molécules soumises à d'immenses forces Au cours de leurs recherches, les scientifiques japonais ont orienté le radiotélescope vers le nuage de gaz nommé CO-0.40-0.22. Situé à environ 200 années-lumière du centre de la Voie lactée, cette structure est large de 150 milliards de kilomètres et animée par des mouvements qui intriguent les scientifiques. En effet, contrairement aux autres nuages interstellaires, les gaz de ce nuage se déplacent à des vitesses très différentes. En collectant des données, ALMA a permis de découvrir que les molécules du nuage elliptique semblent voir leur trajectoire modifiée par d'immenses forces gravitationnelles. Des forces qui pourraient bien suggérer la présence d'un trou noir inférieur à 1,4 milliards de kilomètres de large, comme l'explique l'équipe dirigée par l'astrophysicien Tomoharu Oka dans l'étude publiée par la revue Nature Astronomy.

Cette hypothèse a par la suite été appuyée par une seconde constatation. Grâce aux données, les chercheurs ont pu non seulement confirmer la distribution des vitesses dans le nuage mais aussi observer que le spectre des ondes radio de cette région était très similaire à celui que Sagittarius A\* produit mais dans une version 500 fois plus faible. "C'est la première détection d'un candidat à un 'trou noir intermédiaire' dans la Voie lactée", s'est réjoui le professeur Oka de l'Université Keio de Tokyo. Une découverte d'autant plus importante qu'elle pourrait grandement éclairer d'autres mystères qui entourent les trous noirs, les objets les plus massifs de l'Univers. Des trous noirs intermédiaires à l'origine de la formation des supermassifs ? En effet, il existe plusieurs types de trous noirs dans l'Univers. Certains sont appelés "stellaires" et se trouvent par dizaine de millions au sein de la galaxie. D'autres sont considérés comme des trous noirs "intermédiaires". Enfin, il y a également les trous noirs dits "supermassifs" qui sont généralement retrouvés au centre des galaxies. Comme leur nom l'indique, ces trous noirs affichent des masses gigantesques qui peuvent aller de plusieurs millions à plusieurs milliards de fois celle du Soleil. Et c'est justement-là que la potentielle découverte dévoile son importance. L'origine des trous noirs supermassifs reste encore un grand mystère. Comment ces monstres atteignent-ils de telles tailles ? Une théorie suggère que les "intermédiaires" pourraient jouer un rôle dans la création de ces immenses objets célestes. "Nous savons que de petits trous noirs se forment lorsque des étoiles meurent, ce qui les rend assez fréquents", a expliqué à The Guardian, Brooke Simmons, un astrophysicien de l'Université de Californie à San Diego (États-Unis) non impliqué dans les recherches. "Nous pensons que certains de ces trous noirs sont de véritables graines à partir desquelles les trous noirs supermassifs bien plus grands peuvent évoluer et devenir au moins un million de fois plus massifs", a-t-il poursuivi. Si aucune preuve ne permet de confirmer cette théorie pour le moment, la découverte d'un potentiel trou noir intermédiaire permet de l'appuyer. Une galaxie naine avalée par la Voie lactée ?

Mais Oka et son équipe vont plus loin dans leurs hypothèses. D'après eux, CO-0.40-0.22 pourrait avoir été le noyau d'une galaxie naine qui aurait lentement été avalée par la Voie lactée. Cette théorie coïncide avec des données suggérant que les grandes galaxies et leurs trous noirs supermassifs grandissent en cannibalisant leurs voisins plus petits. C'est d'ailleurs déjà le cas de la Voie lactée que les scientifiques suspectent d'être en train d'absorber plusieurs galaxies naines voisines comme la galaxie naine du Grand Chien ou potentiellement les Nuages de Magellan. Si cette théorie semble convaincre plusieurs spécialistes, reste maintenant à la démontrer. Pour en savoir plus, les astronomes japonais espèrent maintenant continuer à observer le nuage dans différentes longueurs d'onde ainsi que d'autres nuages moléculaires compacts qui pourraient cacher d'autres trous noirs de masse intermédiaire.