

Les particules subatomiques, les protons par exemple, ont 10^{39} fois la taille de leur rayon de Schwarzschild. Décidément non, la gravitation ne joue aucun rôle dans le monde des particules élémentaires!

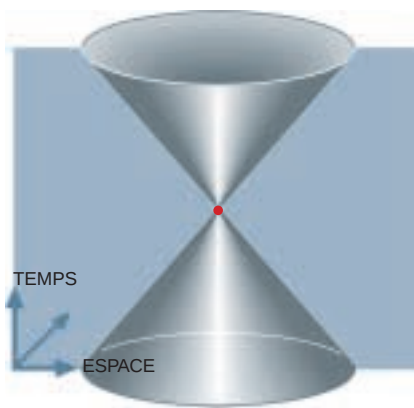
Il en va tout autrement pour une étoile à neutrons, dont la masse se compare à celle du Soleil. Son rayon égal à une dizaine de kilomètres seulement n'est que trois fois supérieur à la valeur de son rayon de Schwarzschild. C'est pourquoi la relativité générale est essentielle dans la description de la structure d'une telle étoile. Lorsqu'elle a épuisé son carburant nucléaire, une étoile à neutrons de masse suffisamment grande s'effondre sous son propre poids et disparaît finalement derrière son horizon de Schwarzschild, dans la singularité qu'elle crée. Pour un observateur situé à la surface, l'ensemble ne dure que le temps d'une chute libre, c'est-à-dire quelques secondes. En revanche, un observateur éloigné voit la surface stellaire se contracter de plus en plus lentement : elle n'atteint pas l'horizon en un temps fini. Pour lui, l'image se fige au rayon de Schwarzschild. Cette évolution s'explique par la propagation des ondes lumineuses près des horizons.

Si un cosmonaute suicidaire décidait de se laisser tomber dans un trou noir en émettant des éclairs lumineux à intervalles réguliers, un observateur détecterait des impulsions de plus en plus espacées dans le temps ; le dernier flash, émis de l'horizon, ne parviendrait jamais à l'observateur (voir la figure 5). Ce décalage temporel est accompagné d'un autre phénomène : la longueur d'onde de la lumière émise est fortement décalée vers le rouge (c'est-à-dire qu'elle est décalée vers de plus grandes longueurs d'onde). Cet étirement de longueur d'onde croît exponentiellement à mesure que la source se rapproche de l'horizon de Schwarzschild. La luminosité reçue s'atténue rapidement, et l'étoile devient vite invisible.

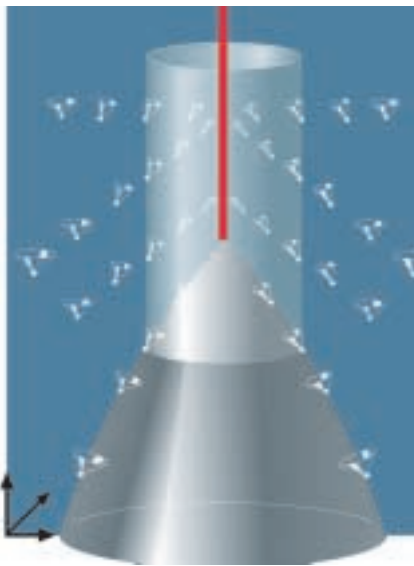
La solution de Schwarzschild ne dépend que de la masse du trou noir considéré. Elle n'est pas valable lorsque l'objet effondré tourne sur lui-même. Or, la plupart des étoiles tournent sur elles-mêmes, phénomène qui ne disparaît pas lors de l'effondrement. Dans ce cas de figure, les configurations possibles d'espace-temps et d'horizons se multiplient par rapport au cas simple de Schwarzschild. La situation devient encore plus complexe quand le trou

noir porte une charge électrique. Pour le monde extérieur, un trou noir est complètement défini par sa masse, son moment cinétique et sa charge.

Quoique, par définition, les trous noirs n'émettent aucun rayonnement,



4. À PARTIR DU POINT de l'espace-temps marqué en rouge, seules les régions contenues à l'intérieur du cône de lumière sont accessibles. Le cône lui-même représente la zone de l'espace-temps que peut atteindre un signal lumineux (et l'information qu'il transporte) depuis le même point.



5. REPRÉSENTATION de l'effondrement gravitationnel d'un astre dans l'espace-temps à trois dimensions (deux d'espace et une de temps). Le temps s'écoule vers le haut, de sorte que les états successifs de l'astre sont représentés par chacune des coupes horizontales. L'astre s'effondre régulièrement (surface quasi conique), jusqu'à ce que son champ de gravité superficiel empêche tout rayon lumineux d'échapper et qu'apparaisse ainsi un horizon des événements (cylindre grisé). L'effondrement se termine en singularité (ligne rouge), c'est-à-dire par un état infiniment dense et infiniment petit. Les petits cônes de lumière illustrent la propagation de signaux lumineux en différents points de l'espace-temps. Plus un point est proche de la singularité, plus la lumière est déviée vers elle et plus son cône de lumière est resserré.

et qu'ils ne soient pas observables directement, ils peuvent, dans certaines circonstances, révéler leur présence : quand ils engloutissent la matière qui passe à proximité. Les masses ainsi aspirées ne se précipitent pas sur le trou noir en ligne droite, mais en spirale. Elles s'accumulent d'abord dans un anneau aplati, le «disque d'accrétion». Ce faisant, elles s'échauffent tant qu'elles deviennent des sources intenses de rayons X, que les astronomes enregistrent grâce à des instruments placés à bord de satellites.

Un certain nombre de sources X compactes, susceptibles d'abriter des trous noirs ont déjà été localisées. Certaines font partie de systèmes stellaires binaires (deux étoiles qui tournent l'une autour de l'autre) et gravitent autour d'un astre visible, directement observable (voir la figure 6). La mesure des paramètres dynamiques des orbites du système indique la masse de l'émetteur des rayons X. Quand cette dernière est supérieure à la masse maximale compatible avec une étoile à neutrons, il peut s'agir d'un trou noir. La source Cygnus X-1, dans la constellation du Cygne, est le trou noir probable le plus connu.

Un trou noir déniché au cœur de notre Galaxie

Les astronomes ont aussi découvert, à l'intérieur de galaxies actives (en évolution rapide) et de quasars (les noyaux très lumineux de galaxies lointaines), des concentrations surprenantes de masse et d'énergie, qui évoquent la présence de trous noirs gigantesques. Ainsi, au centre de la galaxie Messier 87, une masse de gaz tourne à une vitesse d'environ 750 kilomètres par seconde ; elle serait piégée par un trou noir qui contiendrait près d'un milliard de fois la masse solaire! Un trou noir a même pu être déniché au cœur de notre propre Galaxie, la Voie lactée. Des mesures des longueurs d'onde infrarouges, qui traversent les écrans de poussière interstellaire masquant le centre galactique, ont montré que les mouvements des étoiles d'une région de 0,3 année-lumière de rayon résultent de la présence d'une masse d'environ trois millions de masses solaires. Cette masse ne saurait être ni un amas d'étoiles ni une unique étoile immense, car tous les modèles le prouvent, de tels objets se seraient transformés en trou noir en moins d'un million d'années.

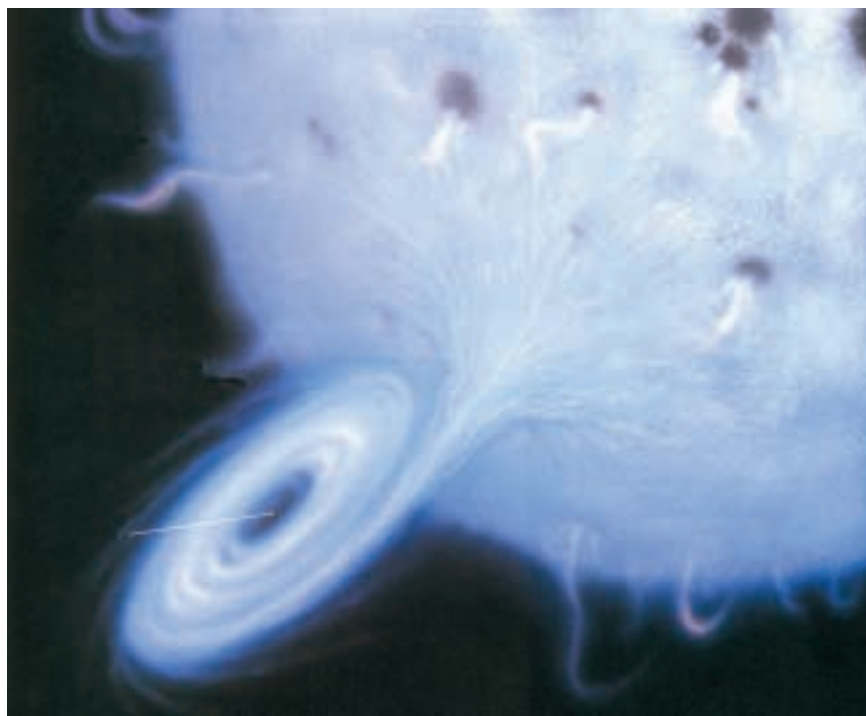
Quand une étoile s'effondre pour donner un trou noir, c'est-à-dire une

singularité, ni la physique classique ni la relativité générale ne suffisent à la décrire. Il faudrait faire appel à une théorie plus générale englobant la physique quantique et la relativité générale. Cet édifice théorique unifié porte déjà un nom, la «gravitation quantique». Toutefois, malgré l'activité intense des théoriciens, elle reste à construire!

Pour certains théoriciens, la gravitation quantique naîtra de la «théorie des cordes». Les briques élémentaires de cette théorie sont des «cordes» ou des membranes aux dimensions subatomiques dont les vibrations auraient engendré le monde à partir du vide quantique. Les vibrations de ces cordes ne se conçoivent que dans des espaces à plus de dix dimensions, dont six se trouveraient confinées, enroulées dans d'infimes domaines. Si une corde s'approchait d'une singularité – lors d'un effondrement gravitationnel, par exemple – les dimensions enroulées réapparaîtraient, et se déploieraient à l'endroit de la singularité.

Trous noirs, pas si noirs

Plutôt que d'attendre l'avènement d'une théorie unifiée, certains physiciens ont une démarche plus modeste. Ils cherchent les relations entre gravitation et comportement quantique, en adoptant un point de vue pratique : ils étudient les champs quantiques dans le cadre d'un espace-temps fixé *a priori*. En 1974, Stephen Hawking fit de cette façon une découverte théorique étonnante : les trous noirs ne seraient pas si noirs que cela! Ils émettent un rayonnement, comme si une température bien définie régnait au rayon de Schwarzschild. S. Hawking étudiait le comportement du vide dans l'espace-temps d'un trou noir, c'est-à-dire les manifestations quantiques d'un état exempt de matière, quand il fit sa découverte. Dans ce vide naissent et disparaissent perpétuellement des paires de particules et d'antiparticules virtuelles. Près de l'horizon, il arrive parfois qu'une antiparticule ou qu'une particule tombe dans le trou noir, disparaissant ainsi sans retour. Puisqu'elle n'a plus de partenaire avec qui s'annihiler, la particule appariée acquiert alors une existence réelle. Il arrive qu'elle puisse s'éloigner du trou noir. Pour un observateur extérieur, le flux des particules qui s'échappent ainsi équivaut à un rayonnement thermique.



6. À LA FIN DE LEUR EXISTENCE, certaines étoiles peuvent donner naissance à des trous noirs. Si ces objets compacts font partie d'un système double, leur attraction gravitationnelle immense leur permet d'arracher du gaz à la surface de leur compagnon. Le gaz s'accumule en tournoyant dans un disque d'accrétion avant de disparaître finalement dans le trou noir.

Selon S. Hawking, le rayonnement extirpe lentement de l'énergie, donc de la masse, au trou noir, lequel s'ameuise. Toutefois, le temps nécessaire pour annihiler ainsi un trou noir de la masse du Soleil dépasserait l'âge de l'Univers de plusieurs ordres de grandeur. Que resterait-il au final? Du rayonnement ou une sorte de cicatrice dans la structure de l'espace-temps? Ces questions restent ouvertes, car nous ignorons comment l'énergie émise rétroagit sur le trou noir.

Notre conception moderne du cosmos repose fondamentalement sur deux observations importantes : l'astronome américain Edwin Hubble découvrit, à la fin des années 1920, que la distance entre la Voie lactée et pratiquement toutes les galaxies augmente, et ce d'autant plus vite que ces galaxies sont éloignées. Ses deux compatriotes Arno Penzias et Robert Wilson détectèrent en 1964 un rayonnement cosmique dans le domaine spectral des micro-ondes, qui correspond à une température de 2,7 kelvins.

Un observateur situé n'importe où dans l'Univers observerait que les galaxies s'éloignent les unes des autres. Il ne s'agit pas là de simples mouvements d'éloignement dans un espace statique, mais plutôt d'une expansion de l'espace-temps, lequel entraîne la

matière avec lui. Si l'on remonte le temps par le calcul pour retracer l'expansion de l'Univers, on constate qu'il y a 15 milliards d'années toute la matière était extrêmement concentrée et dense. L'Univers a traversé dans ses tout premiers instants une phase durant laquelle toute la matière qui nous entoure aujourd'hui sous forme d'étoiles et de galaxies était dissoute dans un mélange chaud, dense et quasi uniforme de rayonnement et de matière. Le rayonnement cosmique omniprésent existe depuis le moment, où lumière et matière se sont découplées, quelque 300 000 ans après le Big Bang. Au fur et à mesure de l'expansion ultérieure, il s'est refroidi pour atteindre, aujourd'hui, la valeur de 2,7 kelvins.

Modèles de Big Bang

L'Univers en expansion est bien décrit par des modèles simples : des solutions particulières des équations de la gravitation d'Einstein. Il existe, en fait, toute une série de modèles compatibles avec les données astronomiques observées. Les astrophysiciens résument cette famille de théories par l'expression «modèle de Big Bang standard». Ce modèle standard est caractérisé par plusieurs propriétés qui sont communes à toutes les théories déjà évoquées. Après une phase d'expansion violente,