

TPE :

LES
TROUS
NOIRS

Jonathan FREUNDLICH

et

Olivier BILIS-HOHNADDEL

Année 2002-2003

Plan:

I) La théorie des trous noirs

1. La lumière subit la force de gravitation
 - 1.1. L'équivalence masse-énergie
 - 1.2. La courbure de l'espace-temps
2. Les vitesses critiques
 - 2.1. La vitesse de satellisation
 - 2.2. La vitesse de libération
3. Le trou noir, généralités
 - 3.1. Age
 - 3.2. Formation
 - 3.3. Caractéristiques

II) Les différents types de trous noirs

1. Préliminaires
 - 1.1 L'espace-temps
 - 1.2 La solution de Schwarzschild
 - 1.3 La singularité de Schwarzschild
 - 1.4 L'horizon du trou noir
2. Le trou noir de Schwarzschild
 - 2.1. Propriétés générales
 - 2.2. La formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel
 - 2.3. Le diagramme de KruskalAutres représentations
3. Le trou noir chargé électriquement
 - 3.1. Le trou noir de Reissner-Nordstron
 - 3.2. Le trou noir de Kerr-Newman
 - 3.3. L'insignifiance de la charge
4. Le trou noir de Kerr
 - 4.1. L'espace-temps de Kerr
 - 4.2. La structure
 - 4.3. La singularité
 - 4.4. Le diagramme de Penrose
 - 4.5. Le principe de censure cosmique

III) Comment les découvre-t-on ?

1. Grâce aux rayons X
2. Grâce à l'activité électrique

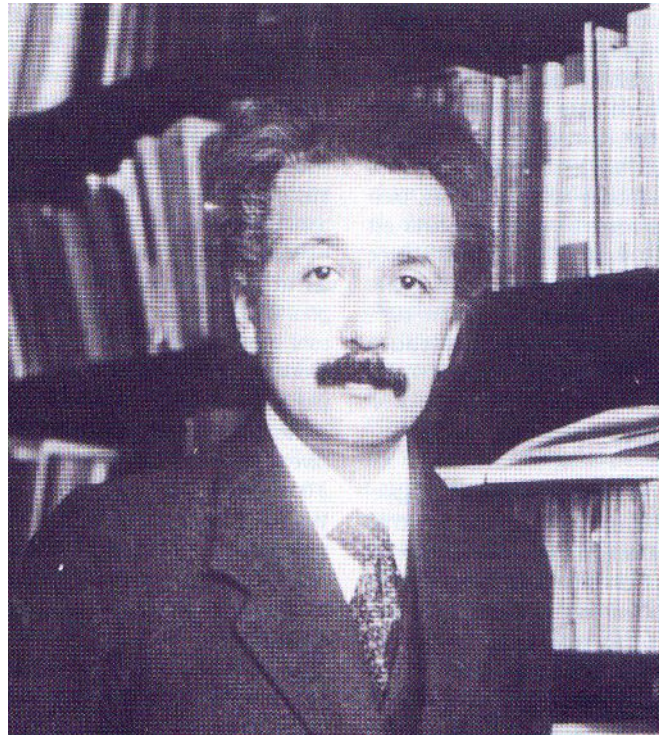
Avant-propos :

L'histoire de l'Univers et de ses évolutions ramène sans cesse à l'interrogation fondamentale sur notre propre histoire et la compréhension de notre environnement. Les astrophysiciens ont le privilège redoutable d'avoir la plus large vision de l'univers; les détecteurs de particules servent aujourd'hui à étudier les astres lointains au même titre que les grands télescopes, et de l'infiniment petit à l'infiniment grand, dans l'espace et dans le temps, l'Univers ne cesse de nous surprendre en dévoilant peu à peu la diversité de ses structures, dont la plus fascinante est sans doute le trou noir.

L'« invention » des trous noirs est sans conteste l'une des aventures intellectuelles de Temps modernes. Le vocable même de trou noir revêt une connotation magique : il existerait dans l'Univers des astres que l'on ne pourrait voir, capables d'absorber toute matière environnante; des mondes clos totalement coupés du notre, ouvrant sur des puits sans fond où tout corps, toute matière sont inexorablement broyés ...Les propriétés des trous noirs sont si étranges qu'elles ont longuement nui à la crédibilité du concept, tout en faisant la joie des amateurs de sensationnel.

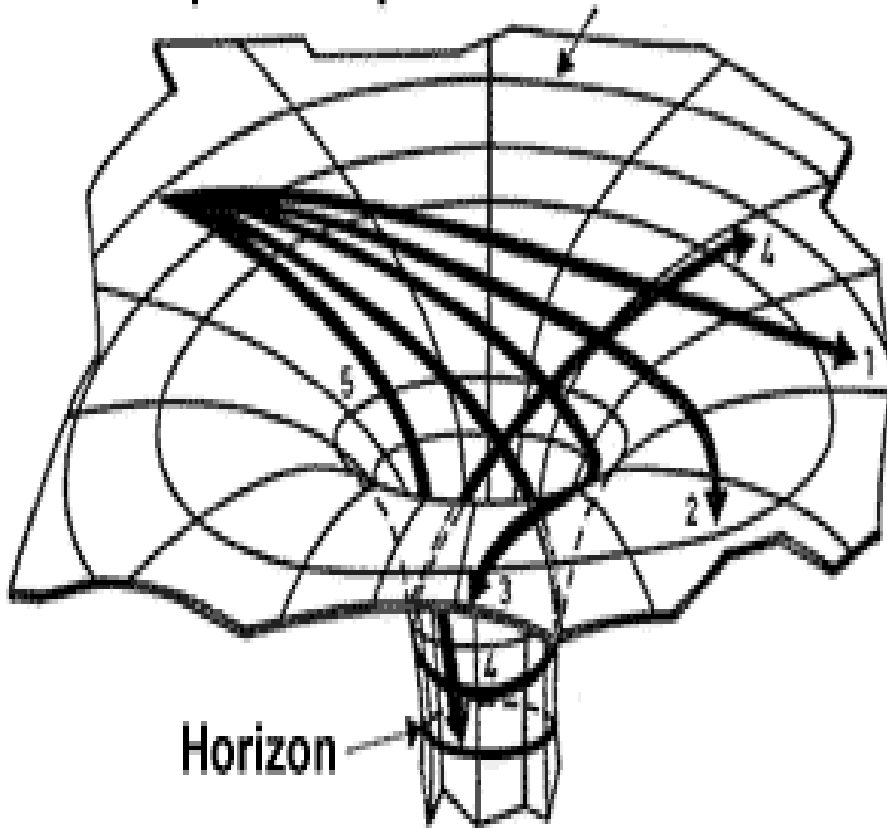
Dans ce travail, nous nous proposons d'étudier certains aspects de ces astres passionnants qui ouvriraient sur d'autres mondes et temps...

"The most beautiful thing we can experience is the mysterious. It is the source of all true art and science. He to whom this emotion is a stranger, who can no longer pause to wonder and stand rapt in awe, is as good as dead: his eyes are closed." Albert Einstein



I) La théorie des trous noirs

Espace-temps extérieur au trou noir



1 .La lumière subit la force de gravitation

1.1. L'équivalence masse-énergie

Tout d'abord, nous savons, depuis qu'un illustre savant vit une pomme tomber, que tous les objets dotés d'une masse subissent la force de gravitation .Celle-ci est d'ailleurs la plus visible dans nos actes quotidiens et elle régit l'univers .Cependant on peut se demander si cette force agit sur la lumière .Deux hypothèses sur la nature de la lumière se sont affrontées : revêt-elle un caractère corpusculaire ou ondulatoire ? Dans la représentation ondulatoire, l'onde lumineuse n'est pas affectée par la gravitation .En revanche, si nous partons du principe que la lumière est composée de corpuscules, elle subit cette force ... Alors que tout au long du XIXème siècle, la théorie ondulatoire triompha, Einstein nous apprend dans *La théorie de la relativité restreinte*, publiée en 1905, que la lumière subit cette force . Nous en venons alors à parler de l'équivalence masse-énergie.

Selon Einstein, l'énergie totale d'un corps en mouvement comprend non seulement son énergie cinétique, mais encore une énergie associée à sa masse au repos :

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{cin}} + E_0$$

avec E_{tot} : énergie totale, E_{cin} : énergie cinétique, E_0 : énergie de repos

$$E_0 = mc^2$$

avec c : célérité de la lumière

L'existence de cette énergie de repos nous montre que la masse m et l'énergie E constituent deux aspects différents d'une même propriété physique .Ainsi, on comprend que la lumière, puisqu'elle possède une énergie par définition, subit la force de gravitation.

1.2. La courbure de l'espace-temps

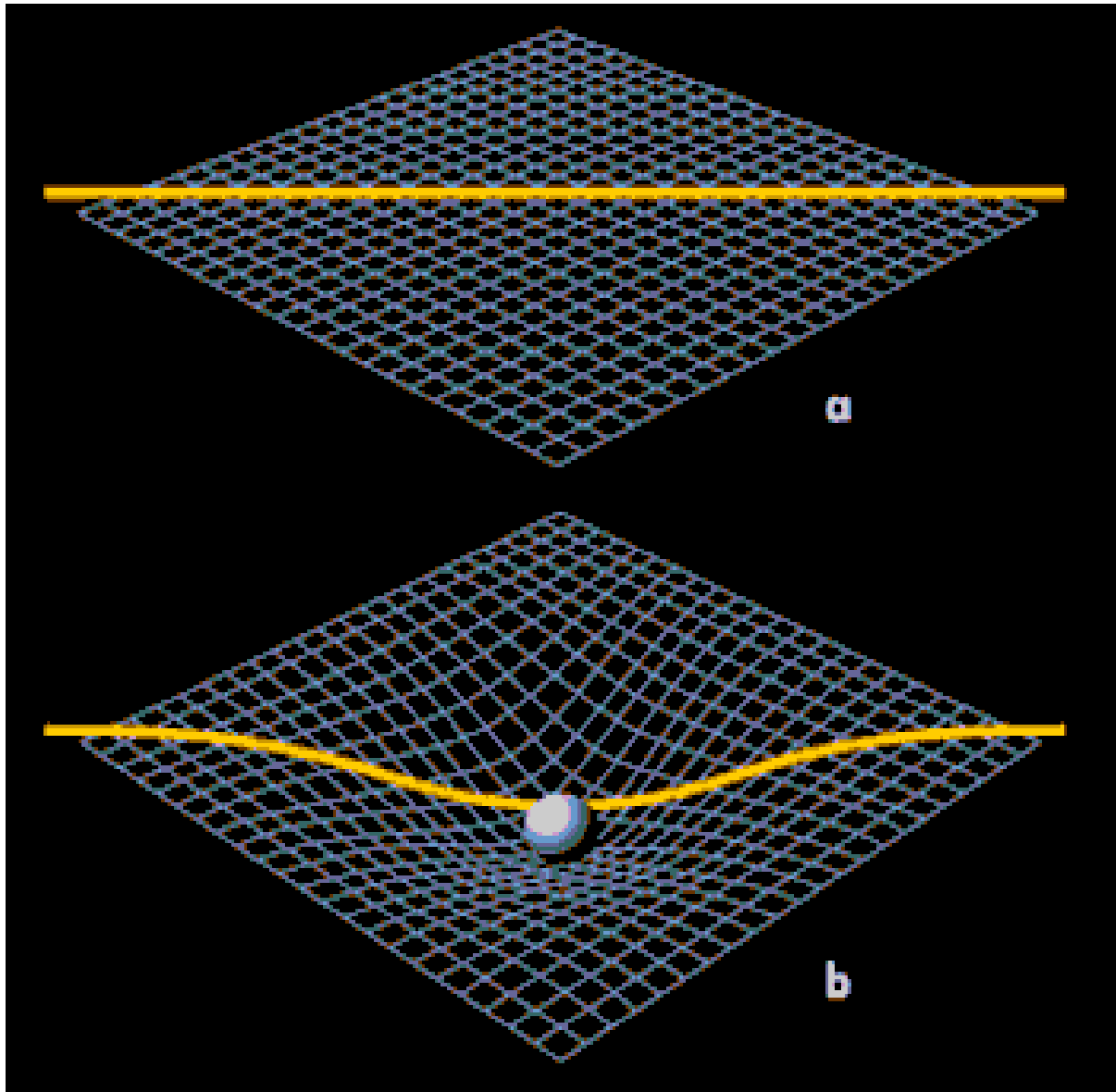
Achevée en 1915, *La théorie de la relativité générale* évoque le sujet de la courbure de l'espace-temps qui explique d'une autre manière la déviation de la lumière .Il en ressort que l'espace-temps est influencé par les masses qui s'y trouvent et qui le courbent .

En ne donnant que deux dimensions à l'espace-temps, on peut le représenter comme la surface molle d'un bloc de mousse .La présence d'une masse M va créer un creux ou un puits gravitationnel d'autant plus profond que la masse est grande, c'est-à-dire qu'elle va localement courber l'espace-temps .Si une particule de masse m se déplace librement dans l'espace-temps, elle suit une géodésique.

Sans la présence de M , l'espace-temps n'est pas courbé, c'est-à-dire qu'il est euclidien et que les géodésiques y sont des droites .On retrouve alors la première loi de Newton qui prédit que m reste indéfiniment en mouvement rectiligne uniforme .

En présence de la masse M qui courbe l'espace-temps, la particule libre m passant au voisinage du creux peut, selon sa vitesse, être déviée légèrement, ou bien se mettre à orbiter autour de M , ou encore tomber sur M après une trajectoire en forme de spirale .Toutes les trajectoires de m dans le champ de gravitation de M sont donc expliquées sans faire appel à aucune force ou action à distance, mais uniquement par une courbure de l'espace-temps.

On comprend que si la lumière passe à proximité de M , elle aussi suit une géodésique et est par conséquent déviée de sa trajectoire rectiligne.



- **figure a** : espace-temps euclidien ou "plat" en l'absence de masses

- **figure b** : espace-temps courbé au voisinage d'une masse formant un "creux" dans l'espace-temps

2. Les vitesses critiques

2.1. La vitesse de satellisation

En lançant un corps du haut d'une colline avec des vitesses horizontales toujours plus grandes, on obtient des trajectoires balistiques qui font retomber l'objet toujours plus loin. Si l'on atteint une certaine vitesse critique, appelée vitesse de satellisation ou première vitesse cosmique V_1 , le corps ne retombe plus mais il se met en orbite circulaire juste au-dessus de la surface de la terre.

Cette première vitesse cosmique s'écrit (dans le cas de la Terre) :

$$V_1 = ((G.MT)/RT)^{1/2}$$

avec G : constante de gravitation, M : masse de l'astre central, R : rayon de l'astre

Pour la Terre, le calcul montre que cette vitesse vaut 7,9 km/s.

Il faut remarquer que la masse m du véhicule n'influence pas la vitesse de satellisation.

2.2. La vitesse de libération

Il existe une autre vitesse critique que l'on appelle vitesse de libération ou seconde vitesse cosmique V_2 . Imaginons qu'on lance un objet verticalement vers le haut. Plus la vitesse initiale est grande, plus il va monter avant de retomber. A partir d'une certaine vitesse V_2 , l'objet ne retombe plus et échappe définitivement à l'attraction de la pesanteur. On peut montrer que cette vitesse s'exprime par la relation :

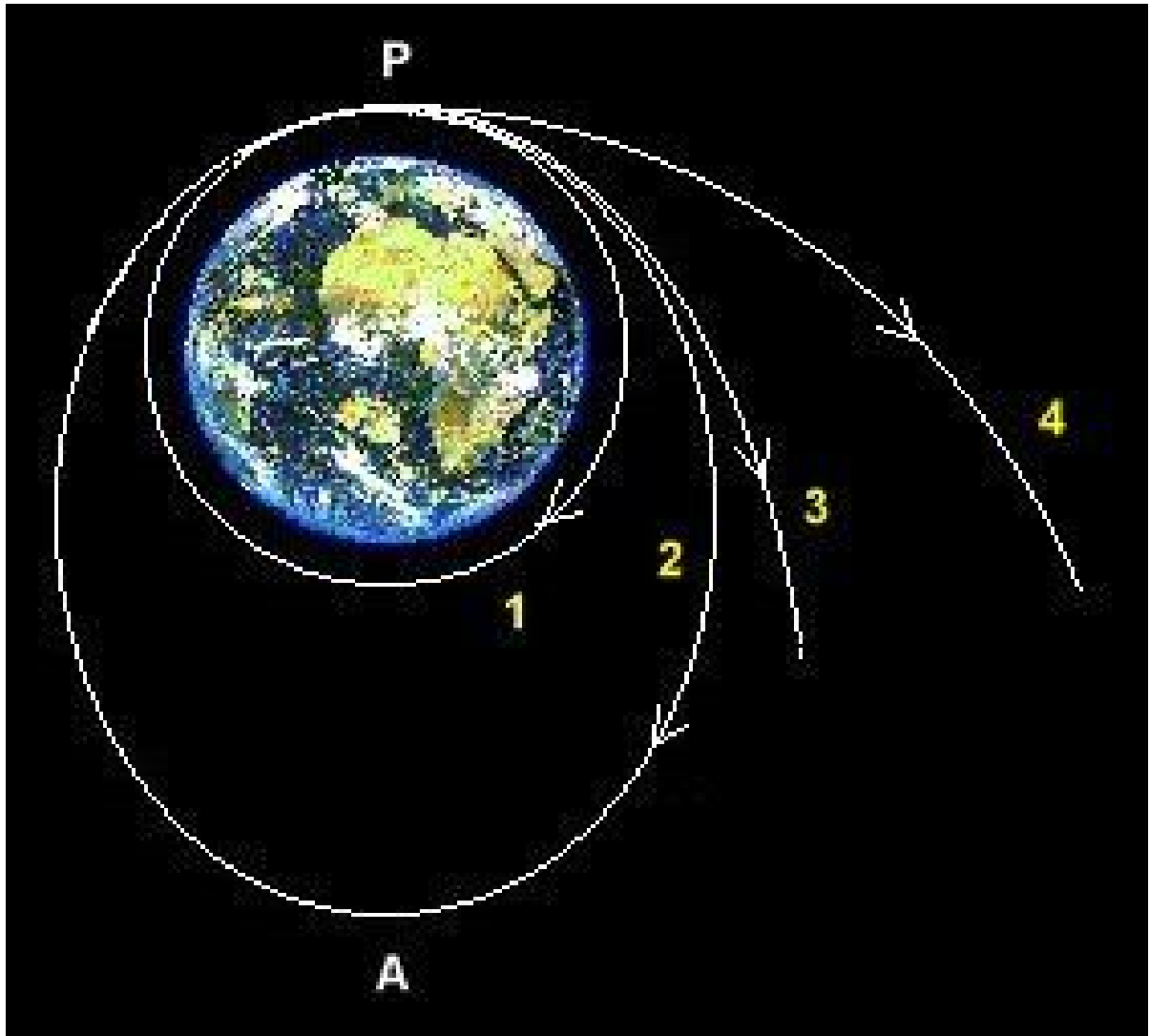
$$V_2 = V_1 \cdot (2)^{1/2}$$

(remarque : pour la Terre, cette vitesse vaut 11,2 km/s)

On peut aussi comprendre cette notion de vitesse de libération en se représentant une bille située au fond d'un bol aux bords évasés. Si on lui donne une vitesse inférieure à V_2 , la bille va monter contre la paroi du bol et redescendre ; mais si on lui donne une vitesse égale ou supérieure à V_2 , elle va monter jusqu'au bord du bol et ne jamais redescendre.

Cette vitesse de libération peut aussi s'exprimer :

$$v_2 = (2 G M / r)^{1/2}$$



Ce document expose les trajectoires décrites par un véhicule en fonction de sa vitesse.

Cas 0 : La vitesse communiquée au véhicule spatial placé au point P est trop faible, il retombe sur Terre.

Cas 1 : La vitesse communiquée est égale à V_1 , le véhicule décrit une trajectoire circulaire.

Cas 2 : La vitesse communiquée est très légèrement supérieure à V_1 , le véhicule décrit une trajectoire elliptique.

Cas 3, 4 : La vitesse communiquée est égale ou supérieure à V_2 , la trajectoire devient une parabole voire une hyperbole.

Existe-t-il un astre duquel la lumière, elle-même, ne pourrait pas s'échapper ?

3. Le trou noir, généralités

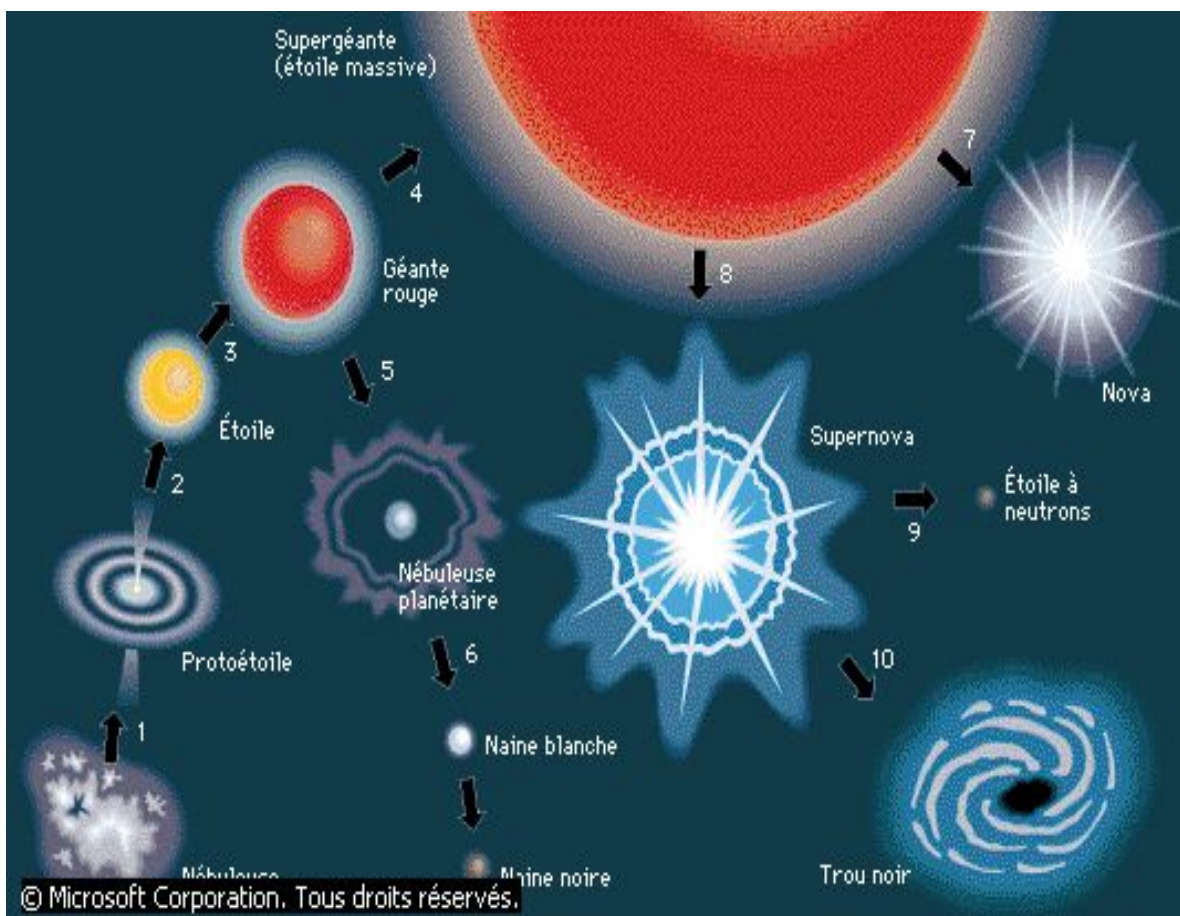
Tout d'abord, le trou noir est un astre de masse et de rayon tels que sa vitesse de libération devienne égale ou supérieure à la vitesse de la lumière. Cette dernière subissant les effets de la gravitation (vu dans le 1.), elle ne peut pas sortir de cet astre dont la gravitation est trop forte pour la laisser s'échapper. On peut se demander alors quand cet astre s'est formé, comment, et quelle est en est sa nature.

3.1. Age

Les recherches ont montré que la masse de ces trous noirs est proportionnelle à la masse de la galaxie hôte. Les galaxies les plus grosses contiendraient donc les trous noirs les plus gros, ce qui suggère que le développement du trou noir est lié à la formation de la galaxie. Pour les chercheurs, cette découverte confirme l'idée selon laquelle pratiquement toutes les grandes galaxies contiennent en leur centre des trous noirs super massifs.

De plus, les trous noirs pourraient avoir été, dans l'Univers primordial, des objets extrêmement brillants comme le sont les quasars (acronyme de *quasi stellar objects*, « objets quasi stellaires », émettant des quantités énormes d'énergie). Les quasars semblent avoir été beaucoup plus nombreux quand l'Univers était plus jeune et sont probablement à l'origine de la luminosité du cœur des galaxies. Ils seraient la manifestation des étoiles émettant de grandes quantités d'énergie avant d'être avalées par les trous noirs, au centre des galaxies.

3.2. Formation



Lorsque les gaz et les poussières interstellaires d'une nébuleuse se contractent (1), il se forme une protoétoile qui laisse échapper des jets de matière. Celle-ci continue à se condenser par gravitation, tout en s'échauffant. Lorsque la température au centre de la protoétoile atteint 10 millions de degrés, des réactions nucléaires se produisent (2) : une étoile est née. Puis l'enveloppe de l'astre subit une expansion et un

échauffement (3), ce qui conduit à la formation d'une géante rouge, de diamètre égal à 10 à 100 fois celui du Soleil. L'évolution de la géante rouge dépend de sa masse. Si celle-ci est inférieure à 1,4 fois celle du Soleil, l'astre devient instable : il éjecte ses couches extérieures dans l'espace (5), créant une nébuleuse planétaire. Puis l'étoile se contracte à nouveau (6) : il se forme une naine blanche, astre de la taille de la Terre. Cette petite étoile se refroidit, donnant naissance à une naine noire, trop froide pour briller. Si la géante rouge est une étoile massive, elle fabrique des éléments lourds, tels que le fer ; elle grossit (4) et devient une supergéante. Puis elle explose et sa matière est libérée dans l'espace. Si c'est l'astre entier qui explose (8), il évolue vers une supernova ; si c'est seulement la partie externe qui est impliquée (7), il y a formation d'une nova. Selon sa masse, la supernova donne naissance à une étoile à neutron (9) ou à un trou noir (10), lorsque le cœur de l'astre qui a explosé présente une masse suffisamment élevée. Mais quelle différence y a-t-il entre une étoile à neutron et un trou noir ?

A l'identique des trous noirs, les étoiles à neutrons sont des étoiles effondrées sur elles-mêmes, mais trop petites pour former un trou noir. Ce qui différencie ces deux types d'objets, c'est la force gravitationnelle qui, dans le cas des étoiles à neutrons, n'est pas suffisante pour venir à bout de la répulsion entre les neutrons. Cependant, elles atteignent des densités colossales tout en gardant un rayon mesurable.

Les trous noirs peuvent se former au stade final de l'évolution d'une étoile massive, cette dernière ayant brûlé tout son combustible nucléaire. Le trou noir apparaîtrait à la suite de la contraction gravitationnelle de la masse de l'étoile lorsque cette masse atteint plusieurs fois celle du Soleil. En effet, dans ce cas, l'étoile s'effondre indéfiniment sur elle-même, aucune pression ne pouvant enrayer cette évolution. Le trou noir obtenu est alors extrêmement dense. On distingue deux classes de trous noirs : les trous noirs supermassifs qui peuvent atteindre des masses de plusieurs millions de fois celle de notre soleil et qui se trouvent au cœur des galaxies, et les trous noirs, plus petits, de la masse d'une grosse étoile.

3.3. Caractéristiques

Le Trou noir est donc un objet astrophysique massif provenant de l'effondrement d'une étoile à neutrons. Les forces gravitationnelles sont si fortes dans un trou noir qu'elles l'emportent sur la pression de dégénérescence du neutron, et la matière s'effondre en un point, appelé la singularité de Schwarzschild, théoriquement de rayon nul et de densité infinie. Même la lumière ne peut s'échapper de l'attraction gravitationnelle en dessous du rayon de Schwarzschild. De plus, la notion classique d'espace-temps n'a plus de signification à proximité d'un 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.

Un trou noir possède seulement trois caractéristiques: sa masse **M**, son moment angulaire **L**, et sa charge **Q**.

La masse **M** est mesurable en plaçant des satellites en orbite autour de lui et en mesurant sa période orbitale. La densité d'un trou noir est très importante.

La charge **Q**

Le moment angulaire **L** définit la rotation du trou noir, $L = mrv^2$, ou $L = mr^2\omega$, avec **m** sa masse, **r** son rayon, **v** sa vitesse à un moment précis et ω sa vitesse angulaire ($v = r\omega$).

On définit ainsi quatre catégories de trous noirs. Le trou noir de Schwarzschild n'est pas chargé et possède un moment angulaire nul, le trou noir de Kerr n'est pas chargé mais est en rotation, le trou noir de Reissner- Nordström est chargé électriquement mais de moment angulaire nul, et le trou noir de Kerr-Newman est à la fois chargé et en rotation. Ce sont des modèles.

Tableau montrant les différents types de trous noirs

Type de trou noir	masse	Moment angulaire	Charge
<u>Trou noir de Kerr</u>	$M > 0$	$J > 0$	$Q = 0$
<u>Trou noir de Kerr-Newman</u>	$M > 0$	$J > 0$	$Q \neq 0$
<u>Trou noir de Reissner-Nordström</u>	$M > 0$	$J = 0$	$Q \neq 0$
<u>Trou noir de Schwarzschild</u>	$M > 0$	$J = 0$	$Q = 0$

II) Les différents types de trous noirs



1. Préliminaires

Peu après la parution des articles d'Einstein sur la Relativité Générale, l'astrophysicien Karl Schwarzschild découvre la solution qui décrit **le champ gravitationnel d'une masse sphérique entourée de vide**. Einstein, à qui Schwarzschild a envoyé son manuscrit est très impressionné et lui répond: «Je ne m'attendais pas à ce qu'une solution exacte du problème puisse être formulée. Votre traitement analytique me paraît splendide.» L'intérêt de la géométrie d'espace-temps découverte par Schwarzschild décrit remarquablement bien le champ gravitationnel régnant dans le Système solaire, le soleil étant pratiquement sphérique et l'ensemble de la matière qui lui fait cortège ayant par rapport à lui une masse si faible qu'on peut l'assimiler à du vide. Les mouvements des rayons lumineux, des planètes, des comètes et de tous les corps en chute libre vers le soleil suivent donc des géodésiques de l'espace temps courbe de Schwarzschild. Ces mouvements peuvent être calculés avec précision et s'accordent avec les valeurs observées de la déviation des rayons lumineux frôlant le soleil et de l'avance du périhélie¹ des planètes, ce que la force d'attraction de Newton était incapable d'expliquer.

1.1. L'espace-temps

Dans l'espace temps newtonien absolu, l'élément de distance infinitésimal s'écrit simplement à l'aide du théorème de Pythagore. Ainsi l'élément de distance euclidien, nommé ds^2 , se traduit par:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

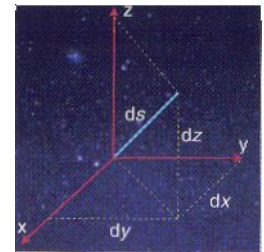
Où x , y , et z sont les coordonnées de l'espace et d un petit élément.

L'élément linéaire d'espace-temps, qui exprime la structure locale de l'espace-temps, n'est rien d'autre qu'une généralisation de ce théorème dans l'espace-temps à quatre dimensions, il s'écrit:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2) \quad \text{où } t \text{ représente le temps et } c \text{ la vitesse de la lumière dans le vide:}$$

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$

Cette expression est due au mathématicien Hermann Minkowski, les géodésiques de l'espace-temps sont les trajectoires possibles. Lorsque la longueur propre est nulle ($ds = 0$), les courbes sont les trajectoires des corpuscules lumineux (photons), lorsque la longueur propre est positive ($ds > 0$), alors les courbes sont les trajectoires des corpuscules matériels.



1.2. La solution de Schwarzschild

La solution générale de Schwarzschild décrit le champ gravitationnel produit par une distribution sphérique de matière, c'est à dire la géométrie d'espace-temps engendrée par une masse sphérique entourée de vide. On utilise pour des raisons de commodité les coordonnées cylindriques r , θ , et ϕ , l'élément de temps propre représente une nouvelle forme du théorème de Pythagore adaptée à la géométrie sphérique. L'élément de temps propre de la solution de Schwarzschild s'écrit:

$$ds^2 = (1 - 2GM/(rc^2)) c^2 dt^2 - dr^2 / (1 - 2GM/(rc^2)) - r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi)$$

où M représente la masse centrale et G la constante de gravitation universelle:

$$G = 6.67259 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$$

Lorsque $M = 0$, on a:

$$ds^2 = (1 - 0) c^2 dt^2 - dr^2 / (1 - 0) - r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dr^2 - r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dr^2 + r^2 d\theta + r^2 \sin^2 \theta d\phi)$$

...

$$ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$$

Ce qui revient alors à l'espace temps de Minkowski de la Relativité restreinte. La solution de Schwarzschild est indépendante de la nature de l'astre qui l'engendre, ce qui la rend d'un intérêt universel. On peut en effet voir qu'elle ne dépend que d'un seul facteur caractérisant l'astre, la masse.

¹ Le périhélie est le point de l'orbite d'une planète le plus proche du Soleil.

1.3. La singularité de Schwarzschild

Le terme $(1 - 2 GM/(rc^2))$ est appelé Potentiel de Gravitation.

L'expression $ds^2 = (1 - 2 GM/(rc^2)) c^2 dt^2 - dr^2 / (1 - 2 GM/(rc^2)) - r^2 (d\theta + \sin^2 \theta d\phi)$ définissant l'espace-temps de Schwarzschild n'a aucun sens pour $r = 0$, mais aussi pour $(1 - 2 GM/(rc^2)) = 0$, c'est à dire pour un Potentiel de gravitation nul, ce qui pose de gros problèmes d'interprétation, puisque cela n'est possible normalement que lorsque r tend vers l'infini (positivement, c'est une distance).

Le terme en $1 - 2 GM/(rc^2)$ a donc, outre la singularité en $r = 0$ (à l'origine), une singularité lorsque $2 GM/(rc^2) = 1$ (équivalent à $1 - 2 GM/(rc^2) = 0$) que l'on baptise la **Singularité de Schwarzschild**, sphère de rayon $r = 2 GM/c^2$.

1.4. L'horizon du Trou noir

Lorsque qu'on approche de cette distance critique, le comportement de la géométrie devient déroutant. Cette distance est le Rayon de Schwarzschild, il s'agit en fait de la taille critique d'un astre en dessous de laquelle la vitesse de libération atteindrait la vitesse de la lumière ($c = 299\,792\,458$ m/s), ce qui signifie que sa gravité est si forte que même la lumière ne peut s'en échapper. En dessous de ce rayon critique, la lumière venant de l'astre ne peut plus parvenir à un observateur extérieur, l'astre devient alors invisible pour l'observateur. Cette singularité relance donc les spéculations oubliées sur les astres invisibles de Laplace et Michell, ce dernier ayant déjà dérivé le Rayon de Schwarzschild en 1783, dans le contexte de la gravité newtonienne et de la théorie corpusculaire de la lumière. Il dérivait le rayon critique en fixant la vitesse v égale à celle de la vitesse de la lumière c dans la formule newtonienne $v^2 / 2 = GM / r$ pour la vitesse de libération à la surface d'une étoile de masse M et de rayon r . La vitesse de libération étant alors $v = (2 GM / r)^{1/2}$. C'est donc en combinant l'idée d'une vitesse finie de la lumière et l'idée de vitesse de libération provenant de Newton, que John Michell et Pierre Simon Laplace supposèrent l'existence d'astres invisibles, appelés par la suite « Trous Noirs » du terme angle-saxon « Black Hole », utilisé pour la première fois le 26 décembre 1967 lors d'une conférence donnée à New York par John Archibald Wheeler². Ce « Cercle Magique » restera néanmoins longtemps considéré comme une incohérence de la Relativité générale, ce qui freinera le développement de la théorie des trous noirs - dont l'existence est presque uniquement théorique.

La sphère de rayon égal au rayon de Schwarzschild est aussi appelée l'Horizon du Trou noir, comme un observateur extérieur ne peut rien voir au-delà de l'horizon³. Ce rayon est égal à 3 km pour la masse du Soleil, et atteint 3 millions de km pour un million de masses solaires, se réduisant à 1cm pour la masse de la Terre.

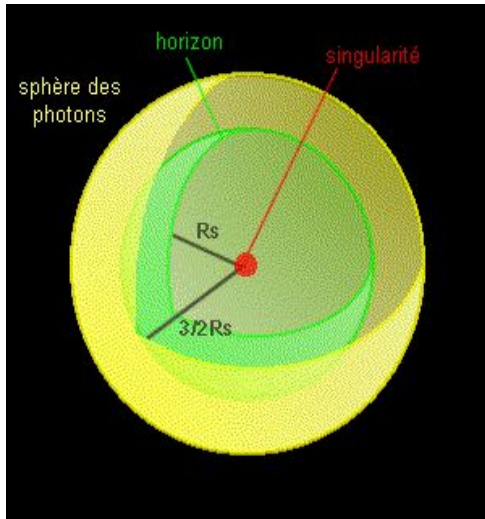
² En Français, l'appellation fut longtemps « astre occlus », mais le terme de John Wheeler s'imposa par la suite, peut être par sa simplicité, ou par la fascination et le questionnement que ce terme engendre.

³ Ici horizon signifie sphère au-delà de laquelle la lumière ne nous provient pas, c'est à dire que l'on ne voit pas ce qui se trouve au-delà de celle-ci. L'horizon terrestre est une frontière d'espace délimitée par la courbure de notre planète au-delà de laquelle le navigateur ne voit pas. L'horizon terrestre est relatif, alors que l'horizon du trou noir est absolu, c'est une frontière indépendante de l'observateur.

2. Trou noir de Schwarzschild

2.1. Propriétés générales

Le trou noir de Schwarzschild est le modèle le plus simple, idéalisé et qui n'existe donc pas dans l'univers. Il permet néanmoins d'aborder le concept de trou noir de manière plus facile. Ce modèle provient directement de la solution de Schwarzschild, d'où son nom.



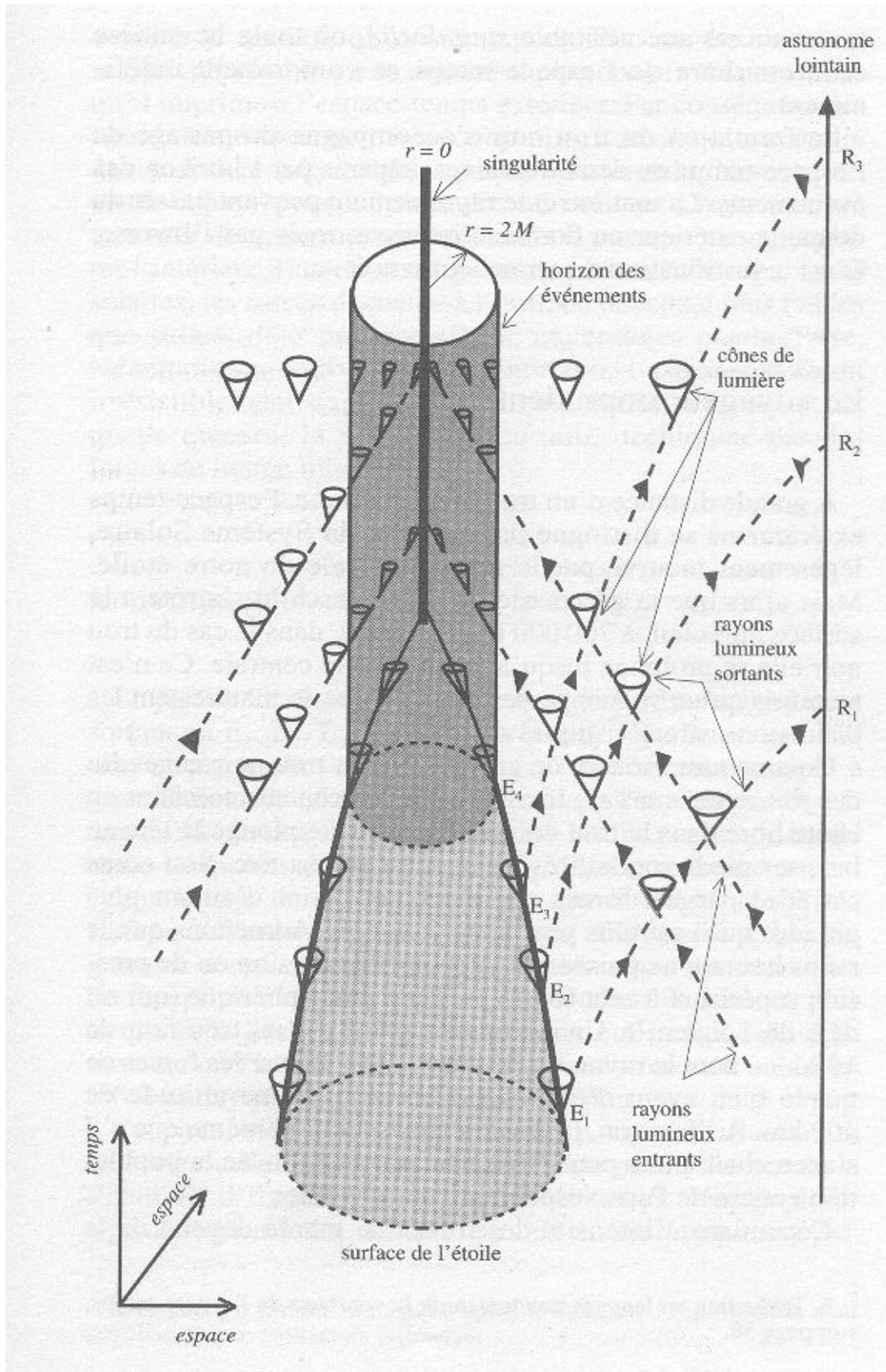
Le schéma de gauche montre une vue générale d'un trou noir de Schwarzschild.

On peut voir la sphère de photons, située à $3/2$ fois le rayon de Schwarzschild. Autour d'un trou noir, la gravité est telle qu'il existe une altitude où la vitesse de satellisation est égale à la vitesse de la lumière, il s'agit de la sphère des photons, seuls ces éléments pouvant aller à la vitesse de la lumière et donc être en orbite à cette altitude autour du trou noir, même si les orbites sont très instables.

L'horizon des événements est cet horizon absolu défini par le rayon de Schwarzschild qui est une frontière de l'espace-temps, indépendante de tout observateur. Cet horizon partage les événements en deux catégories. L'extérieur de l'horizon est l'univers dans lequel nous évoluons, il est possible de communiquer par des rayons lumineux à des distances arbitrairement grandes. À l'intérieur de l'horizon, les rayons lumineux sont focalisés vers la singularité. Au moment du franchissement de l'horizon, on peut dire qu'il y a permutation

de l'espace et du temps, ce qui signifie que rien ne peut rester immobile à l'intérieur de la singularité et tout objet se dirige irrémédiablement vers la singularité, qu'il ne peut éviter puisqu'elle fait partie de son futur. La matière et le rayonnement peuvent passer du domaine extérieur au domaine intérieur, mais pas inversement, d'où vient le terme de «trou noir», puisque la lumière ne peut sortir de l'espace-temps intérieur à l'horizon des événements.

2.2. La Formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel



La formation d'un trou noir par effondrement gravitationnel

Le diagramme d'espace-temps permet d'embrasser d'un coup d'oeil l'histoire complète de l'effondrement d'une étoile sphérique, depuis sa contraction initiale jusqu'à la formation d'un trou noir et d'une singularité. Deux dimensions spatiales sont tracées horizontalement, le temps est tracé verticalement, l'évolution temporelle se lisant de bas en haut. Le centre de l'étoile est en $r = 0$. La surface de l'étoile à un instant donné, normalement une sphère, se réduit ici à un cercle puisqu'une dimension spatiale a été supprimée. La courbure de l'espace-temps est visualisée par les cônes de lumière, engendrés par les trajectoires des rayons lumineux. Loin du champ gravitationnel central, la courbure est si faible que les cônes de lumière restent droits. Près du champ gravitationnel, les cônes sont déformés et déviés par la courbure. Sur la surface critique de rayon $r = 2GM/c^2$ (ou $r = 2M$ approximativement), les cônes ont basculé de 45° et l'un de leurs cotés devient vertical, de sorte que les directions de propagation permises des particules et des ondes électromagnétiques sont orientées vers l'intérieur de cette surface. Il s'agit de l'horizon des événements, frontière du trou noir proprement dit (zone grise). Au-delà, la matière de l'étoile continue à s'effondrer jusqu'à une singularité de volume nul et de densité infinie en $r = 0$. Une fois le trou noir formé et après que toute la matière de l'étoile a disparu dans la singularité, la géométrie de l'espace-temps lui-même continue à s'effondrer vers la singularité, comme l'indique les cônes de lumière.

Ce diagramme d'espace-temps représente la géométrie de Schwarzschild autour d'une étoile sphérique en contraction gravitationnelle (effondrement) conduisant à la formation d'un trou noir. La courbure de l'espace-temps est visualisée au moyen des cônes de lumière. Les diagonales d'un cône de lumière représentent les trajectoires des rayons lumineux, les trajectoires des corps matériels se situent donc à l'intérieur des cônes, et les trajectoires extérieures ne sont pas possibles dans le cadre de la Relativité Restreinte, car il faudrait alors que les particules aillent plus vite que la vitesse de la lumière. En l'absence de gravitation, tous les cônes sont parallèles entre eux, les cônes sont inclinés à 45° et leur ouverture est de 90° , lorsque les unités de longueur et de temps sont correctement choisies. Loin de la région en effondrement, l'espace-temps est pratiquement plat et les cônes de lumière sont droits, car le champ gravitationnel créé par la masse centrale se dissipe à mesure que l'on s'éloigne, ainsi que la courbure de l'espace-temps. On dit que l'espace-temps de Schwarzschild est asymptotiquement plat pour dire qu'à très grande distance de la masse il se fonde dans l'espace-temps de Minkowski. La courbure de l'espace-temps s'accroît lorsque l'on approche de la source du champ gravitationnel, ce qui fait que les cônes de lumière se ferment et s'inclinent vers l'intérieur de la région en effondrement. Les rayons lumineux s'échappent alors de moins en moins du champ gravitationnel, et lorsque les cônes ont basculé de 45° et que l'un de leurs cotés devient vertical, l'emprisonnement à l'intérieur du «trou noir» est définitif, ce qui correspond à l'horizon des événements, à $r = 2GM/c^2$. A partir de là, l'inclinaison des cônes ne cesse d'augmenter, leur ouverture se réduit et les trajectoires des particules matérielles, définies à l'intérieur des cotés des cônes de lumière, convergent inexorablement vers la singularité $r = 0$, où toute la matière et la courbure de l'espace-temps se compriment indéfiniment.

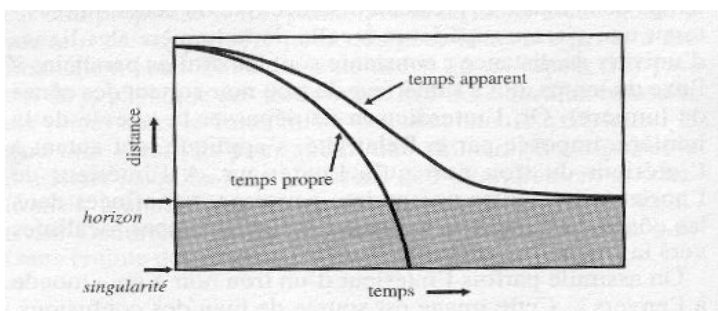
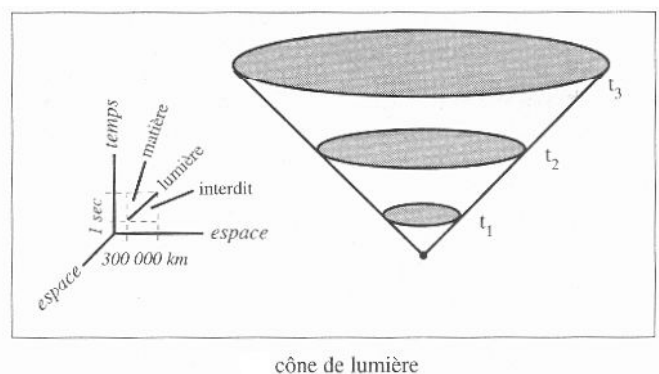
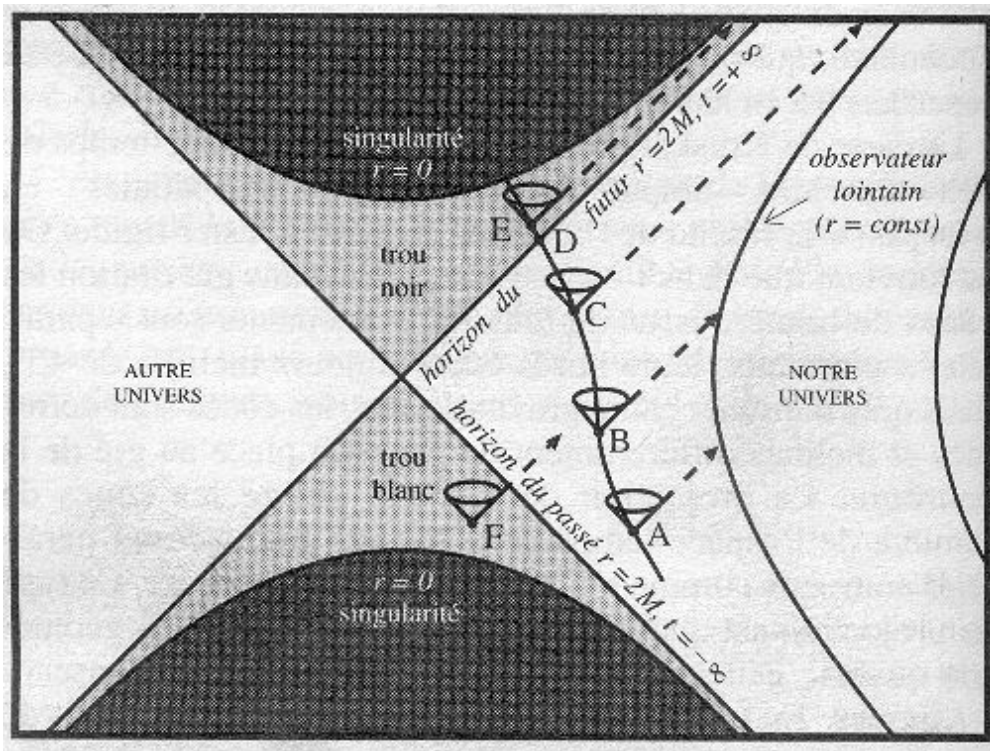


Figure 29 : Les deux temps du trou noir. Un intervalle de temps propre fini s'écoule entre le moment où un corps tombe en chute libre vers le trou noir et le moment où il atteint la singularité centrale. Pourtant, l'approche du trou noir vue par un observateur extérieur prend un temps apparent infini ; la traversée de l'horizon n'a jamais lieu.



La représentation du cône de lumière. Un éclair lumineux est émis en un point donné. Le front de l'onde lumineuse est une sphère en expansion à la vitesse de $300\,000\text{ km/s}$, représentée en A) à trois instants successifs. La représentation du cône de lumière B) résume toute l'histoire du front d'onde en un seul diagramme d'espace-temps. Lorsqu'une dimension spatiale est supprimée, une sphère est représentée par un cercle (une ellipse en projection). L'expansion des cercles de lumière engendre un cône dont l'origine est au point d'émission. En convenant que sur le diagramme d'espace-temps l'unité de distance est $300\,000\text{ km}$ et l'unité de temps 1 seconde, les rayons lumineux engendrent des droites inclinées à 45° .

2.3. Diagramme de Kruskal



Exploration d'un trou noir sphérique par la carte de Kruskal.

L'horizon des événements est représenté par les deux bissectrices du plan. Il est caractérisé par la distance constante $r = 2GM/c^2$ (ou $r = 2M$ approximativement) et un temps apparent infini (futur et passé). L'espace-temps extérieur à l'horizon est la région blanche, dédoublée en « notre univers » et un « autre » univers. L'espace-temps intérieur est la zone grise. Les régions noires situées au-delà de la singularité n'appartiennent pas à l'espace-temps et n'ont donc aucune signification.

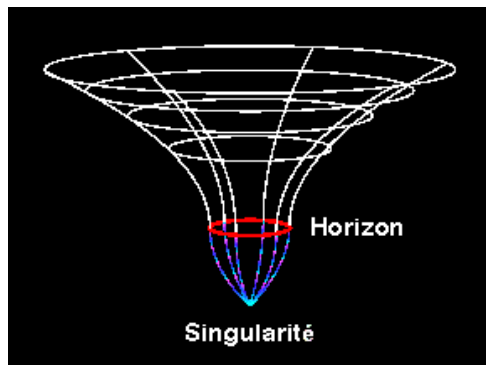
Les rayons lumineux voyagent le long des droites inclinées à 45° , les corps matériels voyagent le long des courbes s'écartant de moins de 45° de la verticale. Les observateurs situés à distance fixe du trou noir – sur une orbite circulaire – voyagent sur un arc d'hyperbole asymptote à l'horizon des événements. La courbe ABCDE est la trajectoire d'un vaisseau plongeant dans le trou noir. Il quitte une orbite circulaire en A, traverse l'horizon des événements en D et atteint la singularité. Un observateur lointain reçoit les signaux lumineux émis en A, B, C avec un retard sans cesse croissant. Le rayon émis en E est emprisonné dans le trou noir et retombe dans la singularité.

Un rayon lumineux émis en F peut sortir de l'horizon du passé pour émerger dans l'univers extérieur, signifiant que l'intérieur de l'horizon du passé est un « trou blanc ». Il est toutefois impossible de passer de notre univers – région de droite – à l'autre univers – région de gauche – sans rencontrer la singularité : la gorge de Schwarzschild est bouchée !

Le diagramme de Kruskal illustre ce qui se passe à l'intérieur même d'un trou noir. C'est un diagramme d'espace-temps très élaboré, il permet de représenter sur un plan les régions centrales de l'espace-temps du trou noir de Schwarzschild. La carte de Kruskal déforme l'espace-temps de façon à ce que les cônes de lumière restent parallèles entre eux, comme s'il n'y avait pas de courbure due au champ gravitationnel. Comme cette représentation conserve les angles, elle est qualifiée de conforme, même si elle introduit de nombreuses distorsions de l'espace-temps. Ainsi, les droites à temps apparent constant sont des droites passant par l'origine, alors que les trajectoires à distance constante du centre du trou noir deviennent des hyperboles. L'horizon des événements joue les deux rôles en étant à la fois à distance constante de la singularité et à temps apparent infini. Il est représenté par les deux bissectrices du plan, inclinées à 45° , ce qui peut s'interpréter comme une « hyperbole dégénérée » réduites à ses asymptotes. De plus l'horizon des événements est alors un cône de lumière qui se décompose en un horizon du passé et un horizon du futur. La singularité est aussi constituée de deux arcs

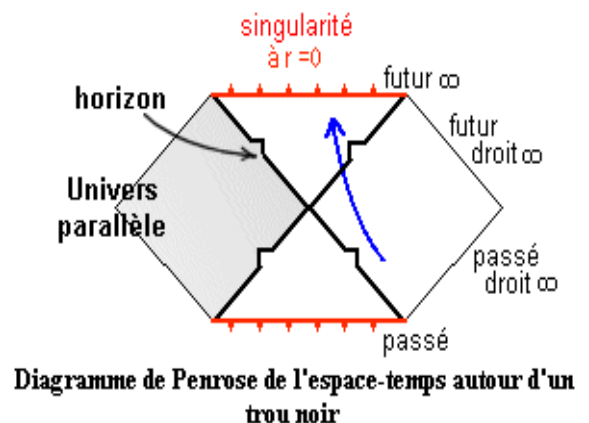
d'hyperbole, l'un dans le passé, l'autre dans le futur. Au-delà de ces courbes la carte de Kruskal n'a plus aucune signification. Lorsqu'on observe la trajectoire d'un vaisseau spatial en chute libre plongeant dans le trou noir (courbe ABCDE). Les signaux électromagnétiques émis par le vaisseau voyagent à 45° vers un observateur lointain situé à une distance constante du trou noir (même si la courbe le représentant n'est pas une droite, c'est une des particularités de la carte de Kruskal). L'observateur reçoit les signaux émis en A, B et C avec un décalage de plus en plus grand à mesure que le vaisseau se rapproche de l'horizon. Au passage de l'horizon, le décalage devient infini, pour un observateur lointain se produit le phénomène de gel du temps. Ainsi, pour un observateur extérieur, le temps apparent d'un objet distant en chute libre en direction du trou noir ralentit, jusqu'à atteindre un décalage infini entre l'émission du signal par l'objet et la réception par l'observateur lointain lorsque l'objet atteint l'horizon du trou noir. Ce phénomène a pour conséquence de ralentir la fréquence des ondes lumineuses émises par l'objet subissant le champ gravitationnel du trou noir, le spectre d'émission se décale vers les grandes longueurs d'ondes. Ce décalage est appelé redshift gravitationnel. Comme l'énergie d'un photon est proportionnelle à sa fréquence (L'énergie du photon au repos est définie par l'expression $E = h \cdot \nu$ avec h constante de Planck: $h = 6.6262 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ et ν la fréquence du rayonnement), on peut interpréter le redshift gravitationnel comme la perte d'énergie subie par le photon pour s'extraire du champ gravitationnel.

2.4. Autres représentations



Le diagramme de gauche illustre la géométrie d'espace-temps de Schwarzschild autour d'un trou noir, qui est une représentation à deux dimensions d'une géométrie spatiale à trois dimensions. Ce diagramme illustre la distorsion de l'espace et du temps engendré par un trou noir, ainsi que le fait que sa forme est proche de celle d'un tourbillon marin, duquel on ne peut plus sortir un fois un certain rayon passé.

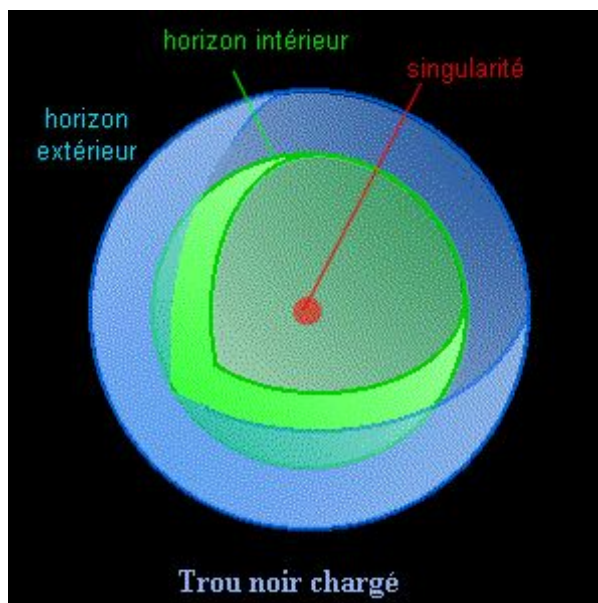
On peut aussi représenter l'espace-temps autour d'un trou noir à l'aide d'un diagramme espace-temps de Penrose, en utilisant le système de coordonnées de Kruskal. Les diagonales épaisses représentent l'horizon du trou noir. Si quelque chose traverse celui-ci selon la trajectoire fléchée, il ne peut plus revenir en arrière, et n'a d'autre choix que de heurter la singularité. Sur le diagramme de Penrose, on peut observer qu'il apparaît sur la partie gauche du diagramme une région symétrique de notre univers, que l'on peut appeler un univers parallèle. Ces deux univers ne peuvent avoir aucun contact, sauf à l'intérieur de l'horizon du trou noir et qu'il existe une autre singularité vers le passé : c'est un trou blanc, parfois appelé fontaine blanche, où rien ne peut rentrer. A l'inverse du trou noir, il n'est possible que d'en sortir, puisqu'on ne peut pas remonter le temps. Mais son existence est encore moins sûre que celle des trous noirs, ce n'est qu'une hypothèse, dont nous ne parlerons pas plus.



3. Le trou noir chargé électriquement

Les trous noirs formés par effondrement gravitationnel sont issus d'astres possédant en général un champ magnétique, les trous noirs peuvent de plus attirer des particules chargées, comme les protons et les électrons, qui composent en partie le milieu interstellaire. Les trous noirs peuvent donc posséder des propriétés électromagnétiques. Lorsque le trou noir possède une charge électrique, la solution de Schwarzschild n'est plus valable. H. Reissner, en 1916, et indépendamment G. Nordström en 1918 découvrirent une solution exacte des équations d'Einstein décrivant le champ gravitationnel issu d'une masse électrisée, ajoutant aux équations de Schwarzschild le paramètre de la charge électrique.

3.1. Le trou noir de Reissner-Nordstrom



Un trou noir chargé et statique est un **trou noir de Reissner-Nordström**. Seule la charge électrique définit et résume toutes les propriétés électromagnétiques de l'astre, comme celui-ci s'est considérablement simplifié durant l'effondrement. Il ne possède qu'une charge électrique globale, non localisée sur l'horizon, qui ne modifie pas sa forme. La singularité est alors abritée sous un deuxième horizon des événements interne, de surface sphérique. Un signal émis par la singularité ne peut sortir de l'horizon interne. Il y a donc deux horizons distincts, lorsque le trou noir est chargé, l'horizon des événements se rétrécit et il en apparaît un second juste au-dessus de la singularité. Plus le trou noir est chargé, plus les deux horizons se rapprochent. La conséquence la plus importante de ceci, c'est que la permutation de l'espace et du temps qui apparaît à la traversée de l'horizon a cette fois lieu deux fois : dans la sphère délimitée par l'horizon intérieur (parfois appelé horizon de Cauchy), l'espace et le temps ont repris leur rôle habituel, et il devient

possible d'éviter la singularité, qui est dite de type temporelle. Si le trou noir est suffisamment chargé, les deux horizons disparaissent : on a alors une singularité nue. De nombreux physiciens pensent que ceci n'est pas possible, l'univers s'appliquant une autocensure dont nous parlerons plus loin.

3.2. Le trou noir de Kerr-Newman

Le trou noir à l'équilibre le plus général, masse électrisée en rotation, a été calculé en 1965 et porte le nom de Kerr-Newman. Cette solution présente *l'état final unique et naturel de l'effondrement gravitationnel en dessous d'un horizon*. L'émission d'ondes gravitationnelles accompagnant la formation d'un trou noir balaie la complexité structurelle de la matière pour ne lui laisser que sa masse, son moment angulaire et sa charge électrique. Les interactions nucléaires à courte portée, structurant les noyaux, ne jouent aucun rôle dans la formation d'un trou noir. Pour un trou noir général de Kerr-Newman de masse donnée, les paramètres de charge électrique et de moment angulaire ne peuvent pas être normalement grand, ils sont contraints par une relation assurant l'existence même de l'horizon des événements. Autrement, le trou noir céderait la place à une singularité nue, capable d'influencer l'Univers à des distances considérables et l'on pense qu'une telle situation est censurée *par la nature même des choses*, c'est le principe de censure cosmique.

3.3. L'insignifiance de la charge

Le trou noir chargé est étudié comme un modèle, mais il apparaît peu probable qu'il en existe réellement dans l'univers. En effet, les forces électromagnétiques sont bien plus importantes que les forces gravitationnelles. Le trou noir électrique va donc attirer exclusivement des particules de charge contraire à la sienne et dans un temps très bref, le trou noir va capturer toutes les particules de charge contraire disponibles et se neutraliser presque entièrement. Il existe une charge maximale pour un trou noir électrique, au-delà de laquelle l'horizon des événements est détruit par les forces de répulsion électrostatiques colossales s'exerçant sur lui, mais en réalité elle ne peut normalement pas être plus grande que le milliardième du milliardième de cette charge maximale. C'est si peu que le rôle astrophysique de la charge électrique des trous noirs peut être ignorée.

4. Le trou noir de Kerr

C'est le modèle le plus réaliste, dans la mesure où l'étoile qui a donné naissance au trou noir était en rotation. Il doit son nom au mathématicien néo-zélandais Roy Kerr, qui le premier, en 1962, a réussi la résolution des équations de la Relativité Générale au voisinage d'une masse en rotation.

4.1. L'espace-temps de Kerr

Lorsque l'on prend en compte la rotation de l'astre autour duquel on veut décrire la géométrie, la métrique de l'espace-temps s'exprime sous la forme

$$ds^2 = dt^2 - \frac{\rho^2}{\Delta} dr^2 - \rho^2 d\theta^2 - (r^2 + a^2) \sin^2 \theta d\varphi^2 - \frac{2Mr}{\rho^2} (dt - a \sin^2 \theta d\varphi)^2$$

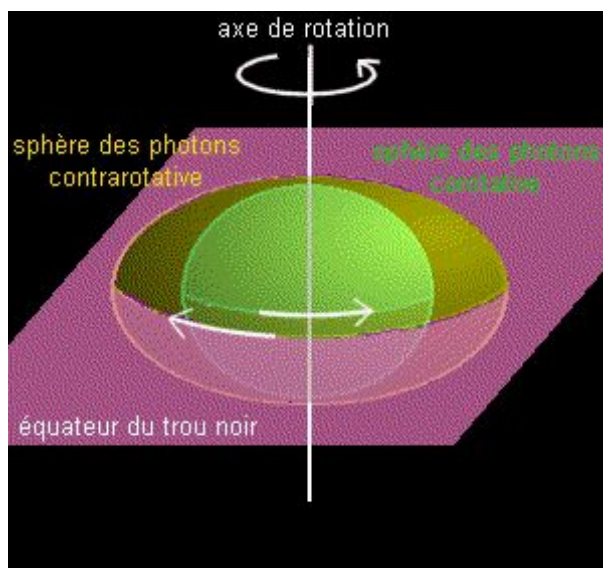
avec $\rho^2 = r^2 + a^2 \cos^2 \theta$; $\Delta = r^2 - 2Mr + a^2$, r, θ, ϕ sont les coordonnées polaires. Si J est le moment cinétique et M la masse, alors a est le paramètre de rotation J/M.

Il apparaît alors un terme oblique en $dt d\varphi$, responsable de l'effet d'entraînement de l'espace temps environnant (effet Lense-Thirring).

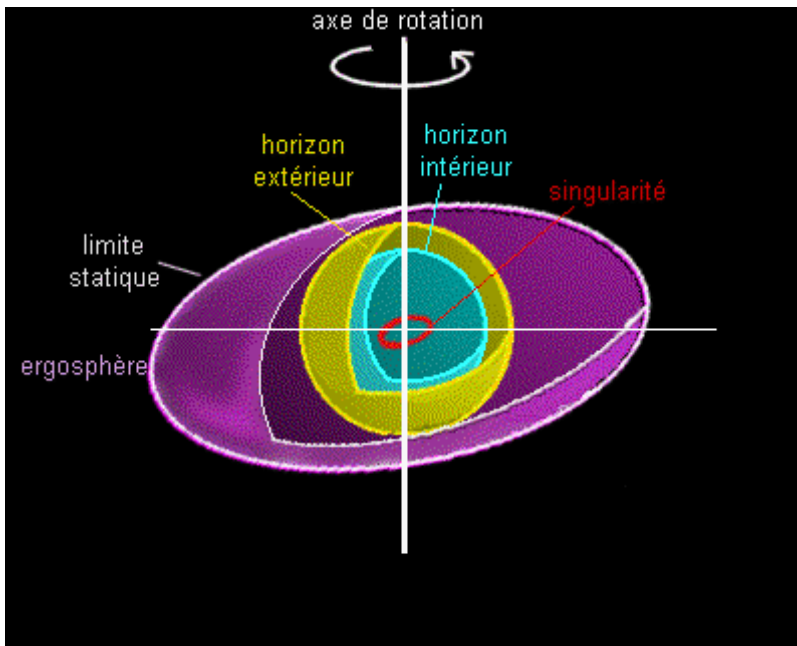
Si $a = 0$ (pas de rotation), on retrouve alors la métrique de Schwarzschild.

La résolution de celles-ci fait apparaître un phénomène étrange : aux alentours d'un objet massif en rotation, l'espace-temps lui-même, déformé par la masse, est entraîné en rotation.

4.2. La structure



La première particularité de ce modèle de trou noir, qui semble être le plus réaliste est l'existence de deux sphères de photons, sachant que dans la géométrie de Kerr, ce que l'on appelle une sphère est en fait un ellipsoïde. Selon que les photons du plan équatorial orbitent dans le sens de rotation du trou noir ou non, ils doivent se trouver sur l'une ou l'autre sphère. Aux pôles du trou noir, les deux sphères sont confondues. Les ellipsoïdes sont aplatis aux pôles et s'y rejoignent, le plan de rotation des photons est quelconque par rapport à l'axe de rotation, même si l'orbite de ceux-ci se situe entre les deux sphères. La sphère extérieure est contrarotative : les photons y circulent en sens inverse de la rotation du trou noir à l'équateur et entre les deux sphères, on a *une mer de photons* qui orbitent autour du trou noir. Plus le trou noir tourne vite sur lui-même, plus les deux sphères sont séparées.



La structure interne d'un trou noir en rotation est beaucoup plus complexe que celle d'un trou noir statique comme le trou noir de Schwarzschild. Ainsi il existe, comme pour les trous noirs possédant une charge électrique, un deuxième horizon des événements, interne à la frontière proprement dite du trou noir. Cette surface enveloppe la singularité et protège la région située entre l'horizon interne et l'horizon externe des signaux émis par la singularité. La limite statique est un ellipsoïde à l'intérieur duquel rien, pas même la lumière, ne peut rester immobile, étant entraîné par l'espace-temps dans le sens de rotation du trou noir. La zone entre la limite statique et l'horizon extérieur s'appelle ergosphère et aux pôles du trou noir, la limite statique rejoint l'horizon

extérieur. Dans un [trou noir de Schwarzschild](#), c'est l'horizon qui représente la limite statique, puisqu'une fois celui-ci franchi, on ne peut qu'aller vers la singularité.

Avec la métrique de Kerr, on peut calculer les rayons caractéristiques du trou noir, si M est sa masse, et a son paramètre de rotation :

L'horizon intérieur : $r_i = M - \sqrt{M^2 - a^2}$

L'horizon extérieur : $r_o = M + \sqrt{M^2 - a^2}$

La limite statique : $r_s = M + \sqrt{M^2 - a^2 \cos^2 \theta}$

On peut observer la dépendance de la taille de la limite statique par rapport à l'angle θ avec le plan équatorial.

Les deux horizons des événements sont identiques à ceux d'un trou noir chargé et provoquent le même effet : la permutation de l'espace et du temps a lieu deux fois, et la singularité est du type temporelle, donc évitable. Plus le trou noir tourne vite sur lui-même (plus son moment angulaire est grand), et plus les deux horizons se rapprochent.

4.3. La singularité

Mais la particularité la plus importante est la singularité elle-même. Elle est donc évitable et sa forme est celle d'un anneau, couché dans le plan équatorial. Cet anneau n'est plus un nœud d'espace-temps inexorable vers lequel toute la matière doit converger. Il devient alors possible de voyager à l'intérieur du trou noir en rotation en évitant la singularité, soit en le survolant, soit en passant au travers. De plus, si on l'approche autrement que par son équateur, l'anneau est répulsif. Ceci peut paraître surprenant, mais c'est le résultat des équations de la métrique de Kerr. Il devient donc théoriquement possible de quitter le trou noir. Mais ce serait pour se retrouver soit dans ce qu'on nomme "l'espace négatif" en traversant la singularité, soit dans un autre univers.

4.4. Le principe de censure cosmique

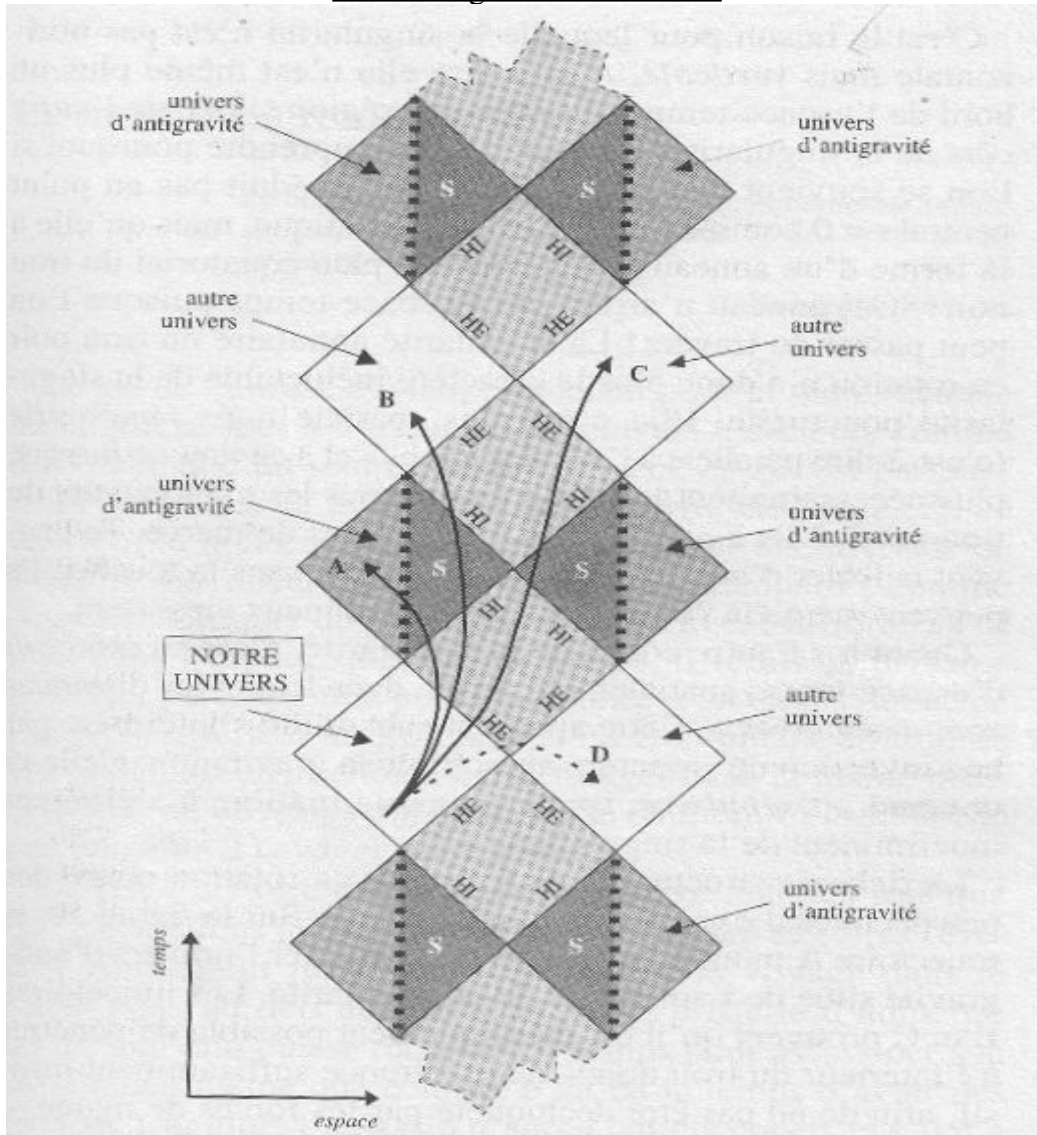
Nous avons vu que plus la rotation du trou noir est rapide, plus les deux horizons se rapprochent. Si celui-ci tourne suffisamment vite, les deux horizons cessent simplement d'exister, et la singularité se retrouve "nue". Le principe de censure cosmique, énoncé par le physicien Roger Penrose, pourrait s'appliquer dans ce cas.

Les horizons du trou noir ayant comme rayons $r = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}$

si a devient supérieur à M , cette formule n'a plus de sens.

En effet, derrière un horizon des événements, la singularité est isolée de notre univers. Si elle est nue, cette région qui enfonce les lois physiques connues, est libre d'interagir avec le reste de l'univers. Une singularité non entourée d'un horizon des événements devient alors le passé de certains points de l'espace-temps. La présence de courbes fermées du genre temps n'est plus impossible, situation qui autorise une violation de la causalité. En particulier, un observateur orbitant autour de celle-ci pourrait remonter le temps, et violer ainsi le principe de causalité.

4.4. Le diagramme de Penrose



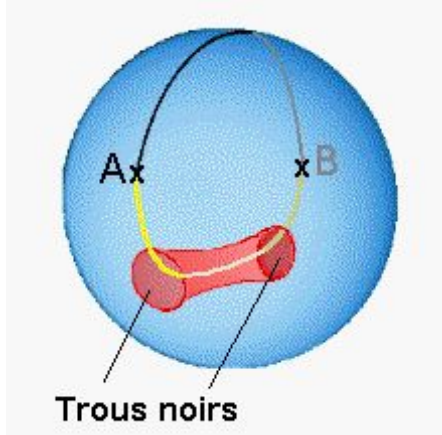
Carte de Penrose d'un trou noir en rotation. Le diagramme se répète indéfiniment dans le passé et le futur. Les univers extérieurs au trou noir sont les carrés blancs, les univers intérieurs sont les carrés tranchés. L'horizon des événements externe – véritable frontière du trou noir – est noté HE, l'horizon des événements interne est noté HI, la singularité est notée S.

Les univers intérieurs se subdivisent en plusieurs domaines. La zone gris clair est comprise entre les deux horizons HE et HI. La direction d'espace et la direction du temps sont échangées : il est impossible d'y garder une position fixe. La zone gris sombre est comprise entre l'horizon interne HI et la singularité S ; les directions d'espace et de temps sont les mêmes que dans l'univers extérieur au trou noir. La zone gris médium est située « de l'autre côté » de la singularité. Elle s'étend à l'infini spatial mais, les distances y étant « négatives », elle s'interprète comme un univers d'antigravité. La singularité est orientée verticalement et en traits discontinus, signifiant qu'elle peut être évitée et que l'on peut passer au travers.

Pour naviguer dans l'espace-temps du trou noir en rotation, la seule règle est de ne pas s'écarter de plus de 45 degrés de la verticale. Diverses trajectoires partant de l'univers extérieur (« notre » univers) et traversant le trou noir sont montrées. La trajectoire A passe à travers la singularité annulaire et explore l'univers d'antigravité. Les trajectoires B et C traversent quatre horizons des événements et ressortent du trou noir dans un autre univers. La trajectoire D est interdite car elle voyage plus vite que la lumière.

Il est mathématiquement permis d'identifier les « autres » univers avec notre univers, mais l'opération donne lieu à des paradoxes temporels.

Le diagramme de Penrose appliqué à l'espace-temps de Kerr est surprenant et étonnement plus varié que celui du trou noir statique. Il est constitué de blocs se répétant indéfiniment du passé au futur, ce qui met en évidence une *infinité d'univers extérieurs* au trou noir et un *infinité d'univers intérieurs*. Le diagramme de Penrose montre bien que la singularité est du genre temporelle, donc évitable. Les trajectoires B et C d'un observateur partant du passé de notre univers peut traverser l'horizon extérieur, puis l'horizon intérieur du trou noir. En évitant la singularité, il peut retraverser les horizons et réapparaître dans un autre univers. Il lui est même possible (trajectoire A) de traverser la singularité pour se retrouver dans "l'espace négatif", ou *univers d'antigravité*. Les univers extérieurs sont bordés par l'infini spatial et l'horizon des événements. Les univers intérieurs contiennent chacun une singularité et se subdivisent en plusieurs régions. Chaque fois qu'un horizon est franchi, la direction d'espace et de la direction de temps sont inversées. Ainsi, pour voyager de l'univers



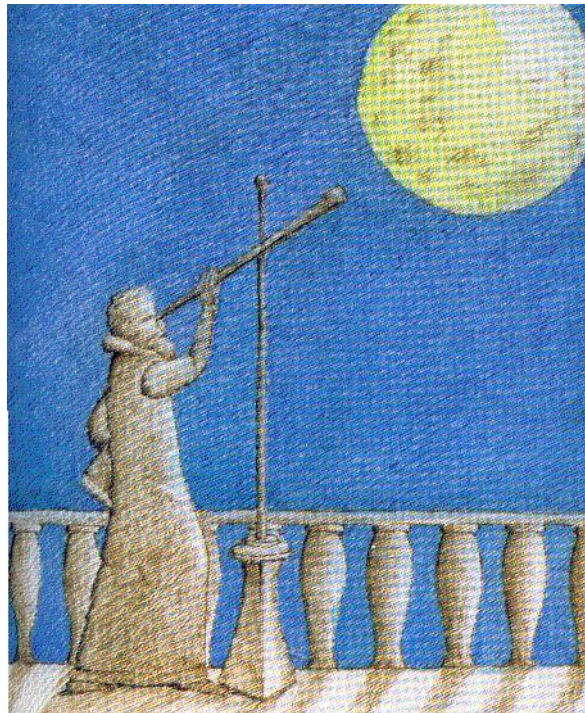
extérieur à la singularité, un astronaute doit subir deux échanges consécutifs. A l'intérieur de l'horizon des événements interne, tout près de la singularité, les directions d'espace et de temps sont donc exactement les mêmes qu'à l'extérieur du trou noir. C'est pourquoi la singularité est verticale et non horizontale. Elle n'est même pas un bord de l'espace-temps et il existe une région située de l'autre côté de la singularité, morceau d'espace-temps spatialement infini, dans lequel les distances sont négatives, et où la gravitation deviendrait *répulsive*, forçant la matière à s'éloigner de la singularité indéfiniment. L'anneau de la singularité n'arrête donc pas l'espace-temps, comme la singularité du trou noir de Schwarzschild. Il semble donc possible de passer d'univers en univers et il en existe une infinité. Ces autres univers peuvent aussi être en fait qu'une autre partie de notre propre univers, ce qui peut se produire dans l'hypothèse où notre univers est replié sur lui-même. Si on imagine

l'univers comme étant la surface d'une sphère (qui n'a pas de bord), on voit que pour aller de A à B, dans le dessin de gauche, il y a deux chemins possibles : le chemin habituel en noir et la traversée par le trou noir en jaune : c'est un pont Einstein-Rosen et la traversée a lieu à la fois dans l'espace et dans le temps.

Dans la zone entre les deux horizons, la lumière va se trouver infiniment décalée vers le bleu, de la même façon qu'avant l'horizon extérieur elle était infiniment décalée vers le rouge pour l'observateur : on peut considérer que le [redshift gravitationnel](#) à l'approche de l'horizon correspond à un transfert de l'énergie des photons en énergie gravitationnelle. De l'autre côté de l'horizon, c'est le transfert inverse qui se produit.

La richesse structurelle du trou noir en rotation ouvre des perspectives nouvelles d'explorations passionnantes. La carte de Penrose montre la possibilité d'explorer l'univers d'antigravité situé de l'autre côté de la singularité. Les trajectoires prouvent qu'il est théoriquement possible de pénétrer à l'intérieur du trou noir et d'en ressortir en débouchant dans d'autres univers extérieurs. De plus ce diagramme fait apparaître un trou noir permettant a priori le passage d'une position donnée et d'un temps donné à la même position mais en un temps différent, passé ou futur, comme deux événements de l'espace-temps peuvent différer aussi bien dans l'espace que dans le temps. Ce qui remet d'actualité les théories sur les voyages temporels, qui gêneraient tout de même le principe de causalité (cause/conséquence).

III) Comment les décèle-t-on ?



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 les effets électriques et l'attraction gravitationnelle qu'il exerce sur les astres environnants.

1. Par les effets lumineux

1.1. Le trou noir glorieux

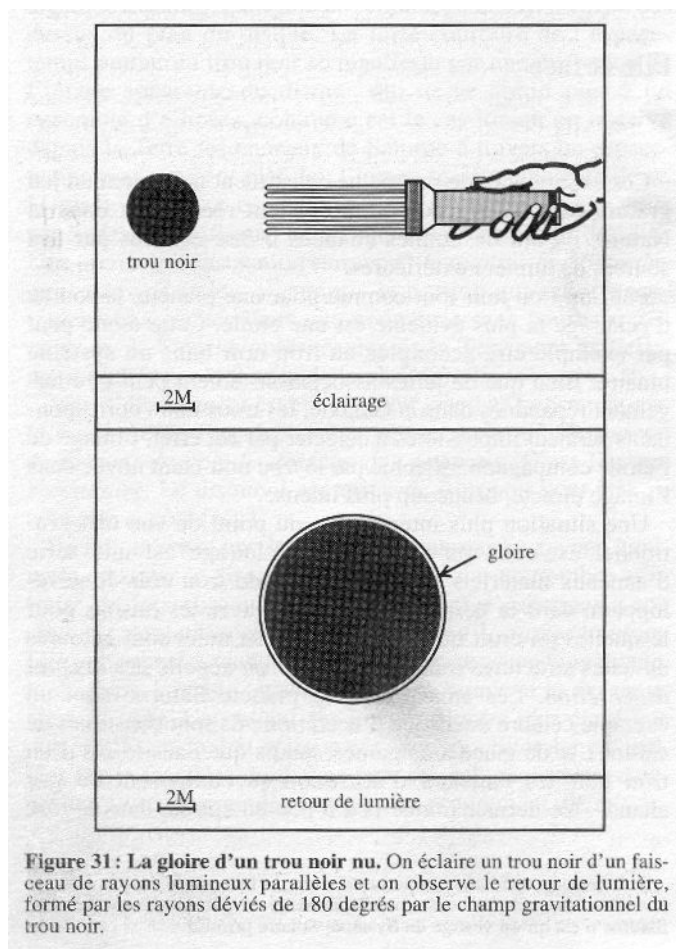
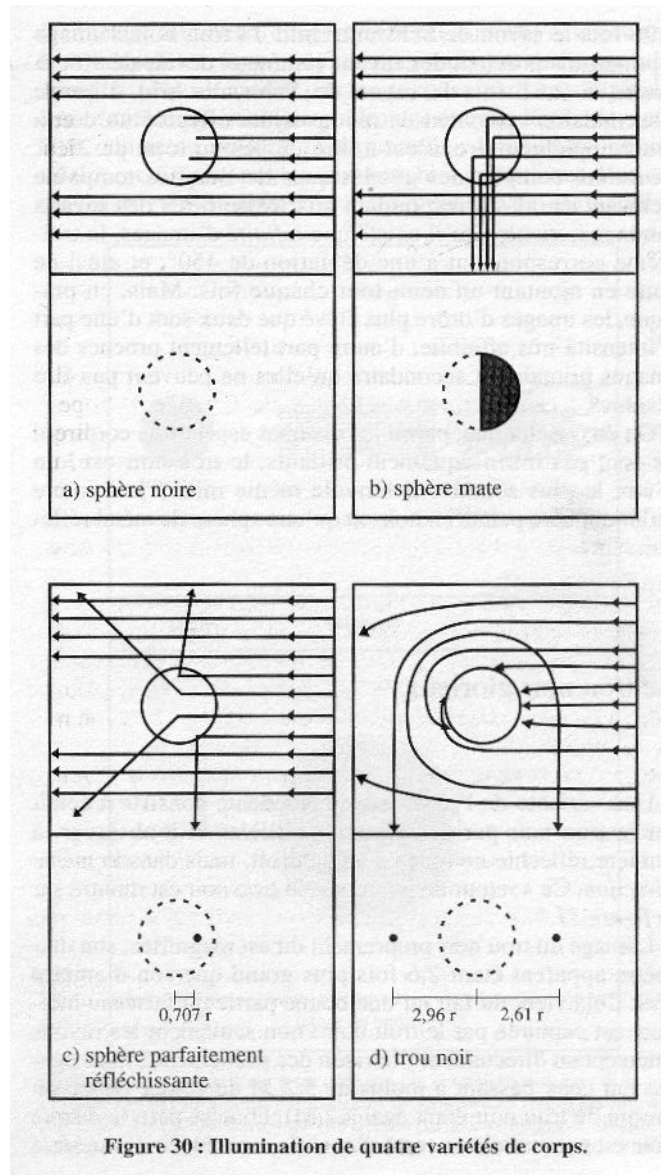


Figure 31 : La gloire d'un trou noir nu. On éclaire un trou noir d'un faisceau de rayons lumineux parallèles et on observe le retour de lumière, formé par les rayons déviés de 180 degrés par le champ gravitationnel du trou noir.

Une des expériences pour la détection des trous noirs consiste à éclairer les trous noirs par des rayons parallèles et à observer la lumière réfléchi non pas à angle droit comme le ferait une astre comme la lune (d'où l' image de la demi-lune), mais dans la même direction .Ce «retour de lumière» du trou noir est montré sur la figure ci-contre. L' image du trou noir proprement dit est magnifié, son diamètre apparent étant 2,6 fois plus important que son diamètre réel .Cela vient du fait qu' une bonne partie du faisceau incident est capturée par le trou noir :non seulement les rayons interceptant directement l' horizon des évènements mais également ceux passant à moins de 5,2 M du centre (le rayon propre du trou noir étant $2GM/c^2$) .De plus, le disque noir est entouré d' une sorte d' auréole constituée d' anneaux lumineux concentriques .L' image évoque alors « l' effet de gloire » bien connu en optique traditionnelle : lorsque la lumière solaire est diffusée par les innombrables gouttelettes d' eau du brouillard, il est parfois possible d' apercevoir en réflexion l' ombre de sa propre tête entourée d' anneaux brillants centrés sur la ligne de visée .Dans le cas du trou noir glorieux, seul l' anneau extérieur serait visible, la résolution n' étant pas suffisante pour distinguer les retours de lumière d' ordre plus élevés .

1.2. Par éclairage parrallèle

Le document suivant expose la particularité de la lumière provenant d' un trou noir lorsque celui-ci est éclairé par des rayons lumineux parrallèles .



L'image reçue du trou noir est alors facilement identifiable. C'est le champ gravitationnel du trou noir qui dévie les rayons lumineux.

2. Par l'image du disque d'accrétion

Il existe une série d'anneaux matériels en orbite autour du trou noir que l'on appelle disques d'accrétion, constitués de gaz chauds, qui tombent peu à peu en spirale dans le trou noir. Lors de cette chute, se produit une élévation de la température du gaz et d'une émission de rayonnement.

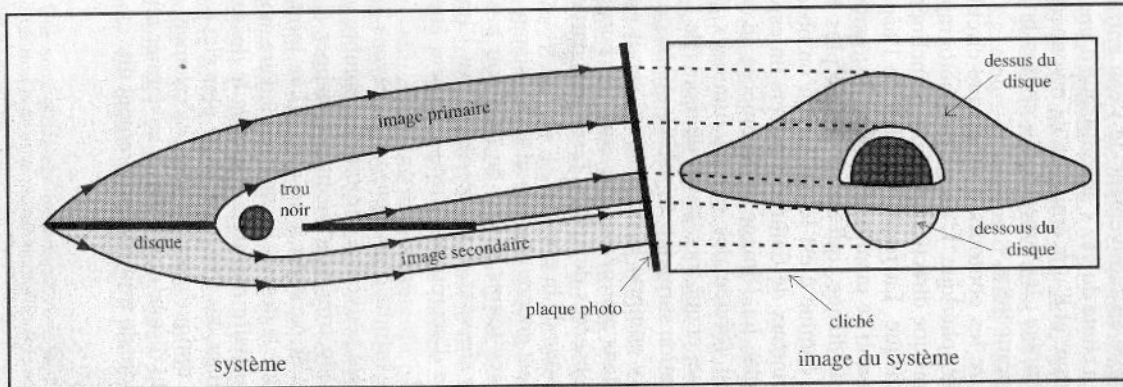


Figure 32 : Distorsions optiques au voisinage d'un trou noir. On imagine qu'un trou noir est entouré d'un disque brillant. Le système est observé à grande distance dans une direction de 10 degrés par rapport au plan du disque. Les rayons lumineux sont reçus sur une plaque photographique. A cause de la courbure de l'espace-temps au voisinage du trou noir, l'image du système est très différente des ellipses que l'on observerait si un astre ordinaire se trouvait à la place du trou noir. La lumière émise par le dessus du disque forme l'image directe et présente une distorsion notable qui permet d'en voir la totalité. Le dessous du disque est également visible sous forme d'une image indirecte, engendrée par des rayons lumineux fortement infléchis.

L'image est photographiée à grande distance, dans une direction légèrement inclinée au-dessus du plan du disque. La forte courbure de l'espace-temps autour du trou noir se manifeste par une distorsion de l'image apparente du disque, qui se décompose en deux. L'image primaire est formée des rayons lumineux émis par le dessus du disque et qui sont déviés de moins de 180 degrés. La totalité du dessus des anneaux est visible, y compris la portion qui serait «normalement» cachée dans une géométrie sans courbure. L'image secondaire permet également de voir le dessous des anneaux, ce qui est surprenant.

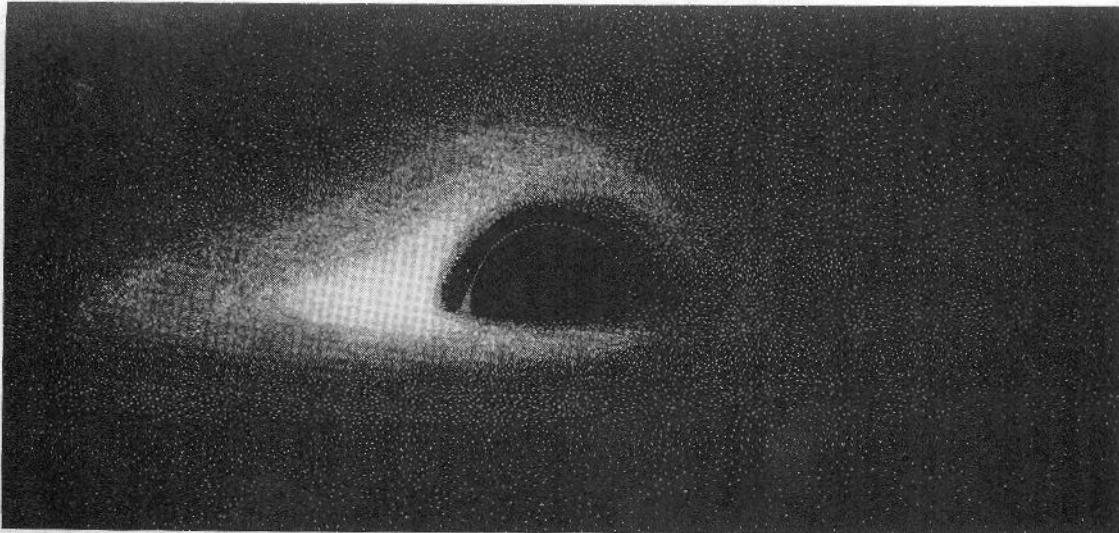


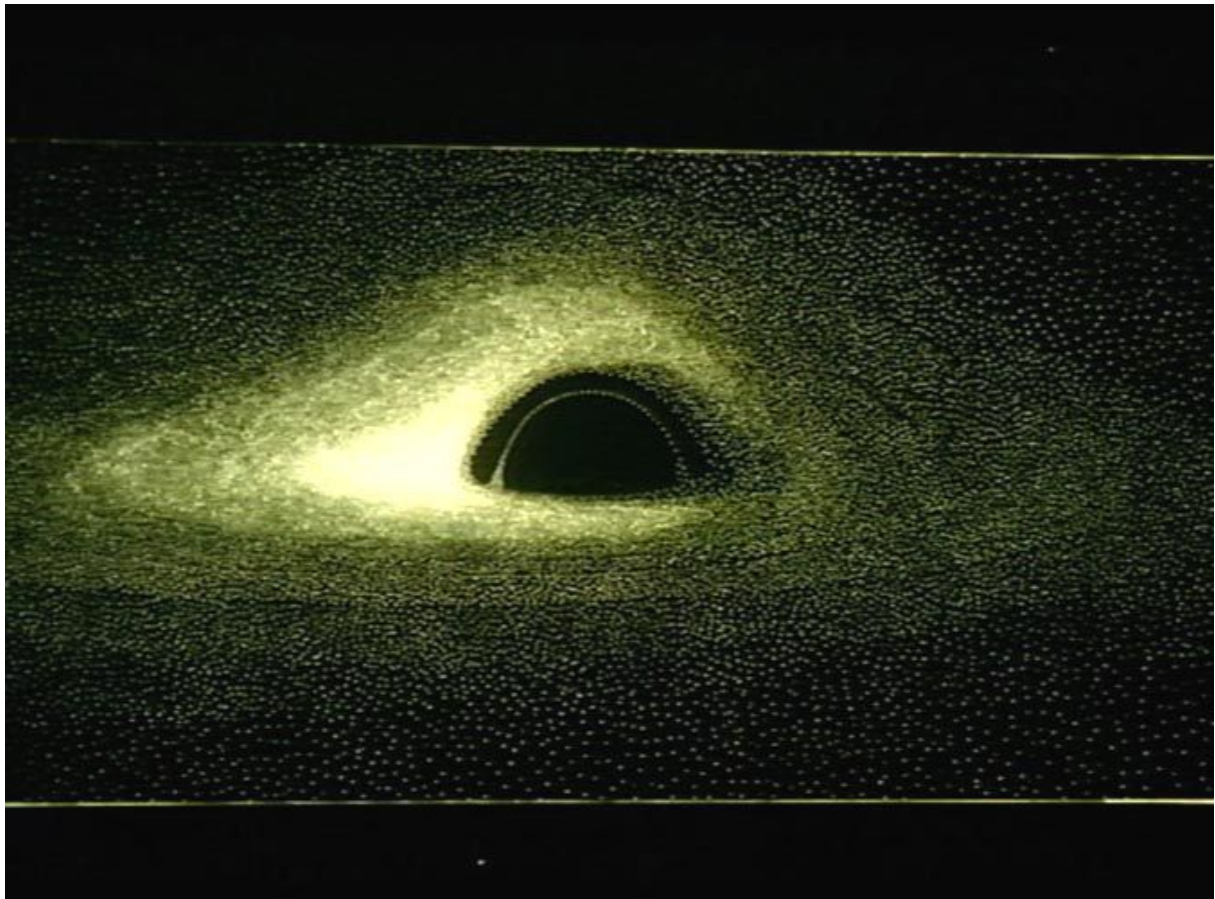
Figure 33 : Apparence lointaine d'un trou noir sphérique entouré d'un disque d'accrétion. L'image a été calculée sur ordinateur. Comme sur la figure précédente, le système est vu de très loin dans une direction inclinée de 10 degrés au-dessus du plan du disque. L'image est réaliste en ce sens qu'elle tient compte des propriétés physiques du disque gazeux.

Les figures précédentes montrent l'effet du disque d'accrétion qui permet de «voir» le trou noir, ou plutôt ce qui l'entoure.

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.

Ainsi, en 1994, le télescope spatial Hubble découvrit l'existence d'un trou noir au centre de la galaxie M87. L'accélération élevée des gaz dans cette région indique en effet la présence d'un corps ou d'un groupe de corps dont la masse totale est comprise entre 2,5 millions et 3,5 milliards de fois la masse du Soleil.

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 significative de la masse totale de l'Univers. Hawking a également supposé que les trous noirs forment des «couloirs d'échappement» vers d'autres univers distincts du nôtre.



2. Par l'attraction gravitationnelle

La densité du trou noir est calculée indirectement en mesurant la vitesse de la matière en orbite autour de l'objet dense. Plus cet objet est dense, plus son champ gravitationnel est intense et plus la matière en orbite tourne vite.

Ces astres, de la taille d'une petite lune, pèsent le poids de plusieurs soleils. Résultat : une telle masse contenue dans un si petit volume ne peut que courber l'espace-temps. Le champ gravitationnel créé aux abords de ces astres est donc énorme, plusieurs milliers de fois celui du soleil.

Il en résulte des phénomènes de grande ampleur, tels qu'une superbe distorsion du temps, surtout lorsque deux trous noirs entrent en collision, ce que l'on essaie de détecter. Ainsi, bien que les astronomes n'aient encore jamais détecté d'ondes gravitationnelles directement, la théorie de la *Relativité* d'Einstein prédit que les cataclysmes violents, comme les collisions de trous noirs, entraînent une vibration de la trame de l'espace-temps. Lorsque elles atteignent la Terre, ces ondulations sont tellement faibles que leur superposition au bruit ambiant est comparable en proportion à l'ajout d'un seul grain de sable sur l'ensemble des plages de Normandie. Six interféromètres ultra-précis ont été construits à fin de détecter ces signaux. Il y en a trois aux États-Unis, deux en Europe et un au Japon. Pour certains, les observations ont commencé en mai 2002, mais la sensibilité nécessaire est bien difficile à atteindre. Ils fonctionnent grâce à l'émission de rayons laser dans des cylindres de plusieurs kilomètres. Ces rayons dont la vitesse est celle de la lumière sont réfléchis par des miroirs et l'intervalle entre l'émission et la réception est calculé de manière extrêmement précise. Une distorsion de l'espace-temps liée aux ondes gravitationnelles produites par la collision des trous noirs entraîne une variation infinitésimale du temps de réflexion du rayon laser due à la distorsion de l'espace au niveau de la longueur des cylindres. Ces calculs sont néanmoins très difficiles puisque le passage d'un camion aux alentours de l'observatoire les fausserait.

Le trou noir est donc un astre tellement massif que la lumière elle-même est retenue par son champ gravitationnel, il se forme par l'effondrement d'un astre de densité immense. Grâce à la théorie de la Relativité d'Einstein et à l'astrophysicien Karl Schwarzschild, il a put devenir une théorie complexe. Ses trois seules particularités sont la masse, la charge et le moment angulaire. On essaye, maintenant que leur existence est devenu une certitude, d'observer ces astres si étranges qui modifient tellement l'espace-temps autour d'eux.

Après avoir été une aventure intellectuelle, les trous symboliseront peut être dans les siècles futurs l'aventure tout court aux yeux des navigateurs cosmiques qui, semblables aux marins de l'Antiquité, craindront de parvenir au bord du monde et là de s'engouffrer dans le vide et l'inconnu.

Les trous noirs seraient des portes vers d'autres univers, permettant alors de voyager dans un infini encore plus grand que celui de notre univers, de rejoindre un lieu de notre univers en un temps inimaginable ment court, de voyager dans le temps, car désormais le temps et l'espace sont deux dimensions pouvant avoir les mêmes particularités. L'étude de ces astres passionnants permettrait même de relier les deux grandes théories physiques de notre temps, la Relativité Générale et la Mécanique Quantique et d'arriver enfin à une Théorie de l'Univers révolutionnaire.

Glossaire :

- Géodésique : Les géodésiques sont les lignes de plus court trajet, c'est à dire les trajectoires de l'espace-temps les plus rapides.
- Nova (*pluriel novæ*) : Etoile qui, augmentant brusquement d'éclat, semble constituer une étoile nouvelle.
- Nébuleuse : Amas peu homogène, nuage concentré de matière interstellaire.
- Protoétoile : Matière interstellaire qui se condense pour former une étoile.
- Stellaire : (*latin stella*) Relatif aux étoiles.
- Temps propre : Temps d'un objet dans son référentiel. Dans le cadre de la Relativité Restreinte et Générale, il n'existe pas de temps absolu, le temps propre est alors différent du temps apparent.
- Elément de distance : Longueur dans l'espace ou dans l'espace-temps.
- Potentiel de Gravitation : chaque masse produit un potentiel de gravitation, plus on est proche de cette masse, plus le potentiel est important.
- Equation de champ : Elle définit la géométrie de l'espace-temps en un endroit donné.

Sources :

- Les Trous Noirs, Jean Pierre Luminet aux éditions Belfond
- Dossier Pour la Science La Gravitation L'Univers sous Influence
- Science et Vie Les Trous Noirs (hors série)
- Encyclopédie Encarta
- Encyclopédie Universalis
- www.astrosurf.com
- cosmology.berkeley.edu
- scienceworld.wolfram.com
- www-th.phys.rug.nl
- casa.colorado.edu