

2.6.6 Déplacement d'une particule massive au voisinage de l'horizon

L'équation géodésique pour une particule massive implique que :

$$\frac{d^2r}{d\tau^2} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{l^2}{r^3} \left(1 - \frac{3GM}{r}\right)$$

Cette équation ne supposant pas que r est une coordonnée de type spatial, est donc valable quelle que soit la position par rapport au rayon de Schwarzschild.

Lorsqu'une particule venant de loin s'approche de la singularité :

- Pour $r < 3GM$ la quantité entre parenthèses est négative : l'accélération de toute particule en chute libre est constamment négative. Quel que soit son déplacement initial, si elle arrive à une position $r < 3GM$ elle finit par se diriger vers la singularité.
- Pour $r = 2GM$ il ne se passe rien de particulier, la particule continue à se diriger vers l'intérieur ; même une particule subissant une accélération est soumise à cette obligation d'aller vers la singularité. Toutes les lignes d'univers se terminent en $r = 0$.

On peut résumer ce qui précède en affirmant que la surface $r = 2GM$ ne peut être franchie qu'en direction de la singularité : rien de ce qui est à l'intérieur (ni matière ni rayonnement) ne peut en ressortir. Cette situation est résumée par le diagramme de Minkowski ci-dessous, proposé par [B217] page 70.

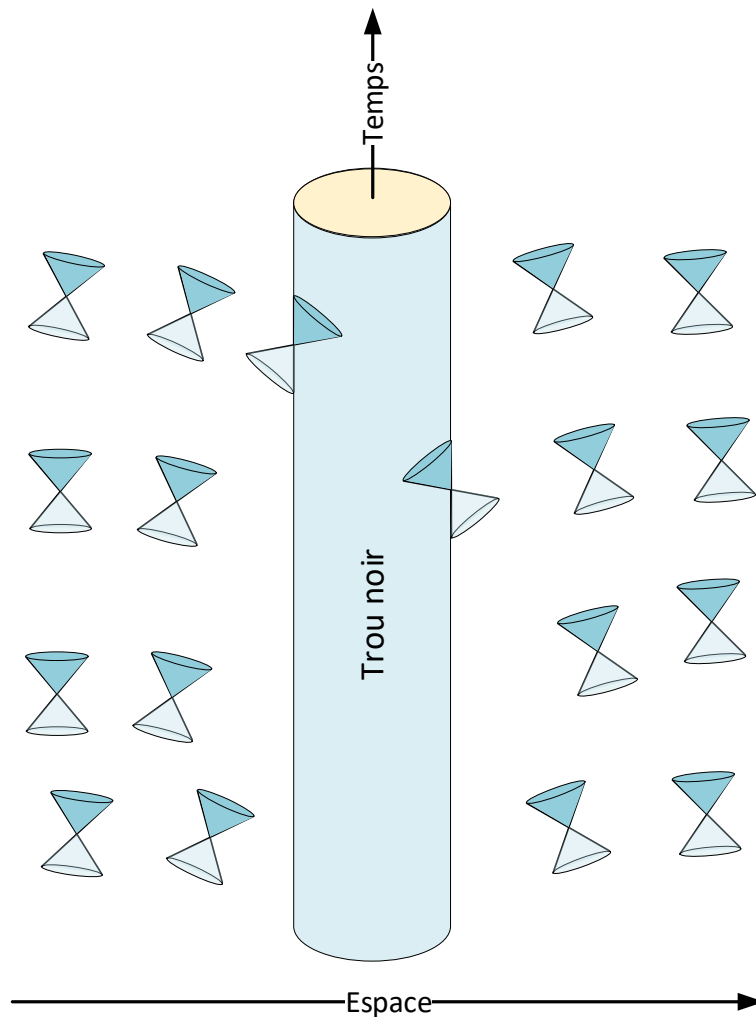


Diagramme de Minkowski : espace-temps voisin du cylindre horizon d'un trou noir ; on a représenté les cônes de lumière d'un certain nombre d'événements.

Dans le voisinage du trou noir, son champ gravitationnel courbe l'espace-temps : plus un point (événement) est proche de l'Horizon des événements, plus l'axe de son cône de lumière est incliné.

Pour les points *sur* l'horizon, la droite de lumière supérieure est tangente au cylindre horizon ; l'évolution d'un objet en ce point, dont la ligne d'univers est nécessairement intérieure au cône, ne peut se faire que vers l'intérieur, en se rapprochant de la singularité. Et pour sortir de l'Horizon des événements, la ligne d'univers devrait passer à l'extérieur du cône, ce qui correspond à une vitesse plus rapide que la lumière : impossible.

Un vaisseau spatial extérieur à l'horizon pourrait s'en éloigner, en consommant suffisamment de carburant ; mais une fois à l'intérieur, sa course vers la singularité est aussi inévitable que le passage du temps dans l'Univers ; il ne peut même pas rester à distance constante de cette singularité. Voilà pourquoi la surface $r = 2GM$ est appelée « Horizon des événements ».

2.6.6.1 Durée maximum de survie après franchissement de l'horizon

Sources : [B4] page 175 et [B190].

Entre deux événements A et B séparés par un intervalle du genre temps, une géodésique est la ligne d'univers de temps propre maximal (voir *Hypothèse géodésique – Temps propre* sous-titre *Une situation surprenante*).

On en déduit que, quoi qu'il fasse pour freiner sa chute, le temps propre le plus long pendant lequel un objet quelconque peut subsister à $r < 2GM$ est *celui où sa trajectoire va tout droit vers la singularité* : une fois franchi le rayon de Schwarzschild, le temps d'existence d'un objet est compté et inévitablement inférieur à πGM car :

$$\Delta\tau = \int_{2GM}^0 \frac{-dr}{\sqrt{\frac{2GM}{r} - 1}} = \pi GM$$

Exemples de temps de survie avant destruction par la singularité ([B173] page 49) :

- Pour un trou noir de masse solaire : environ 10 microsecondes ;
- Pour un trou noir de 1 milliard de masses solaires (situé par exemple au centre d'une galaxie) : 1 milliard de fois plus, soit environ trois heures.

2.6.6.2 Contraintes de déformation d'un objet approchant d'un trou noir

Un homme tombant les pieds en avant vers un trou noir et proche de son Horizon des événements subirait :

- Un étirement dans le sens vertical, l'attraction gravitationnelle étant plus forte sur ses pieds que sur sa tête ;
- Une compression dans le sens horizontal, les directions de la singularité n'étant pas parallèles mais convergeant vers elle.

L'intensité des contraintes correspondantes dépend du rayon de l'horizon, proportionnel à la masse du trou noir. Un trou noir énorme a un horizon si aplati que ces contraintes peuvent être imperceptibles *avant d'atteindre l'horizon* ; car une fois ce dernier franchi, les contraintes augmentent inéluctablement à l'approche de la singularité. Qu'il soit très grand ou minuscule, l'homme sera à la fois décomposé par étirement et écrasé par aplatissement, avant d'être réduit à un point en fusionnant avec le trou noir.

Et pour finir de décrire son triste sort il sera brûlé très fort, car la température près de l'horizon d'un trou noir est extrêmement élevée, bien que, vue de loin, elle soit très basse ; voir le sous-titre *Baisse de fréquence d'un photon qui s'éloigne de l'horizon d'un trou noir* au paragraphe *Température d'un trou noir*.