

2.6.7 Thermodynamique des trous noirs

En concluant que rien, ni matière ni rayonnement, ne peut sortir de la sphère horizon d'un trou noir, la Relativité générale n'avait pas pris en compte la Mécanique quantique : nous verrons dans *Evaporation des trous noirs (rayonnement de Hawking)* que ceux-ci s'évaporent !

2.6.7.1 Les découvertes surprenantes de Stephen Hawking

Dans les années 1970, Stephen Hawking a découvert que la physique des trous noirs présentait des phénomènes qui pourraient être vus par des observateurs lointains malgré l'Horizon des événements.

Il a d'abord démontré, de manière générale, que l'aire A de la sphère horizon d'un trou noir ne peut qu'augmenter au cours du temps, phénomène analogue à l'entropie toujours croissante d'un système isolé. Il a donc spéculé qu'*un trou noir peut avoir une entropie proportionnelle à l'aire A .*

La thermodynamique montre qu'un objet qui a une entropie S et une énergie interne U a une température absolue T telle que :

$$\frac{1}{T} = \frac{\partial S}{\partial U}, \text{ où } U = M \text{ pour un trou noir de masse } M.$$

Hawking en a déduit en 1974 qu'*un trou noir doit rayonner des photons*, exactement comme un corps noir à la température T , contrairement à l'affirmation de la Relativité générale que rien ne peut en sortir [B194].

2.6.7.2 Les particules d'énergie négative à l'infini

Nous avons vu, au paragraphe *Energie et quantité de mouvement relativistes, et leur conservation*, qu'à l'infini les particules de masse non nulle peuvent avoir une énergie relativiste par unité de masse e *négative* à l'intérieur de la sphère horizon :

$$e = \left(1 - \frac{2GM}{r}\right) \frac{dt}{dr} < 0 \text{ si } r < 2GM$$

Dans la sphère horizon d'un trou noir (lorsque $r < 2GM$), la coordonnée t est une coordonnée spatiale : dt/dr peut donc avoir un signe quelconque. Une particule d'énergie positive e à l'extérieur de la sphère horizon peut donc avoir une énergie négative à l'intérieur (où elle est tombée) parce qu'elle a cédé son énergie à une autre particule : voir ci-dessus l'exemple *Processus d'extraction d'énergie d'un trou noir de Penrose*.

Les fluctuations quantiques peuvent rayonner de l'énergie à partir d'un trou noir

Lire ici les paragraphes :

- *Fluctuations quantiques* avec ses sous-titres *Un vide plein d'énergie* et *Le vide de la physique quantique*.
- *Rayonnement du corps noir* (en annexe).

Une particule générée par une fluctuation quantique a une énergie E , son antiparticule ayant une énergie négative $-E$ (exception : un photon est sa propre antiparticule) ; les deux particules se recombinent après un temps très court Δt ,

conformément au principe d'incertitude de Heisenberg qui veut que Δt soit de l'ordre de \hbar/E .

N'étant pas soumise à la contrainte d'impossibilité de sortir de la sphère horizon du trou noir, une fluctuation quantique peut produire sa paire de particules très près de la surface de cette sphère, la particule d'énergie positive apparaissant à l'extérieur de cette sphère et pouvant éventuellement s'échapper à l'infini. Cette particule emporte alors de l'énergie prélevée sur le trou noir, qui ainsi « s'évapore » parce que son énergie décroît de la valeur de la particule d'énergie négative restée dedans.

La *Théorie quantique des champs* permet de prévoir la distribution de l'énergie des particules ainsi émises par un trou noir. Pour une particule atteignant l'infini, on trouve une énergie : $E_\infty \sim \hbar/4GM$. La masse m d'une particule issue de la fluctuation doit donc être inférieure à $\hbar/4GM$ pour atteindre l'infini au lieu de retomber dans le trou noir ; c'est extrêmement peu probable, puisque pour un trou noir de masse égale à celle du Soleil $\hbar/4GM \sim 6 \cdot 10^{-47}$ kg, environ 10^{17} fois moins que la masse de l'électron : les trous noirs ne rayonnent donc pratiquement pas de particules ayant une masse, mais seulement des photons d'énergie voisine de $\hbar/4GM$ produits par paires lors d'une fluctuation ; de tels photons peuvent avoir une énergie arbitrairement basse.

2.6.7.3 Température d'un trou noir

Un trou noir rayonne des photons comme un corps noir et a une température basse

Les calculs de *Théorie quantique des champs* de Hawking montrent que le spectre des photons émis est le même que la distribution du rayonnement d'un corps noir à la température T . L'énergie d'un photon émis est $k_b T = \hbar/(16\pi^2 GM)$ en unités du système RG, où h est la constante de Planck et k_b est la constante de Boltzmann. Donc :

$$T = \frac{h}{16\pi^2 k_B GM} \text{ (en unités RG)} \quad \text{ou} \quad T = \frac{hc^3}{16\pi^2 k_B GM} \text{ (en unités SI)}$$

Ainsi, un trou noir de masse solaire ($2 \cdot 10^{30}$ kg) a une température très basse, de l'ordre de 62 milliardièmes de degré Kelvin, extrêmement proche du zéro absolu.

Quand l'ajout d'énergie fait baisser la température

Plus un trou noir est lourd, plus sa température est basse : en alourdissant un trou noir, c'est-à-dire en lui ajoutant de l'énergie, sa température baisse alors que pour un objet ordinaire elle augmenterait ! Inversement, plus un trou noir est léger, plus sa température est élevée – et même extrêmement élevée pour un trou noir minuscule ($\sim 10^{32}$ degrés K pour un trou noir de la masse de Planck $2.177 \cdot 10^{-8}$ kg).

Le trou noir n'est pas le seul astre à se comporter ainsi : d'autres objets célestes liés gravitationnellement (étoiles, amas stellaires, etc.) se comportent de la même façon.

Il est remarquable qu'un trou noir stellaire est beaucoup plus froid que le rayonnement du fond diffus cosmologique (2.73°K aujourd'hui, où il a eu 13.8 milliards d'années d'expansion depuis le Big Bang pour se refroidir). Un trou noir peut donc absorber ce rayonnement, ce qui augmentera sa masse et fera donc baisser encore plus sa température.

Si un trou noir était assez petit pour que sa température soit supérieure à celle du fond diffus cosmologique, il émettrait plus d'énergie qu'il n'en reçoit, ce qui diminuerait encore plus sa masse et le ferait rayonner encore plus fort.

« Un trou noir ne peut donc jamais être en équilibre thermique stable avec un réservoir d'énergie à température constante ».

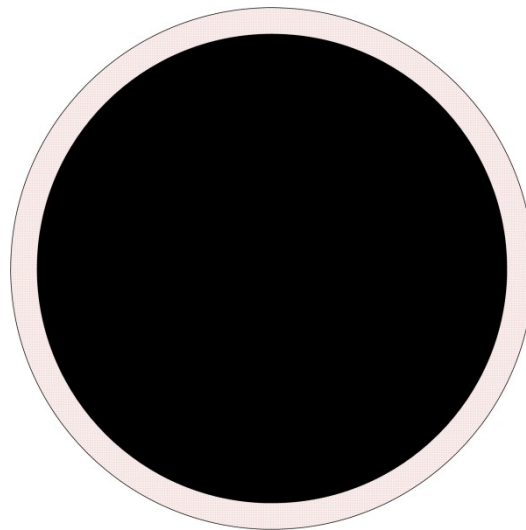
2.6.7.4 Baisse de fréquence d'un photon qui s'éloigne de « l'horizon étiré »

Source : [B173] page 221

Un photon né à l'extérieur de l'horizon d'un trou noir et s'éloignant de celui-ci passe d'une région de champ gravitationnel intense à une région où il est faible. Il perd alors de l'énergie, sa longueur d'onde augmentant. C'est ainsi qu'un photon de fréquence radio (faible énergie), reçu loin de l'horizon, avait une fréquence énorme de rayon gamma (très haute énergie) près de son horizon.

La région proche de l'horizon d'un trou noir est donc très chaude, puisque les photons y ont une haute énergie ; les astrophysiciens l'appellent « horizon étiré ».

L'existence de cette couche ne contredit pas le fait que l'horizon d'un trou noir vu de loin paraît extrêmement froid.



Horizon étiré entourant l'Horizon des événements

2.6.7.5 Processus d'évaporation à partir de l'Horizon étiré

De temps en temps une fluctuation quantique dans l'Horizon étiré en éjecte un atome vers l'espace, tandis qu'une particule d'énergie négative se forme sous l'Horizon des événements et tombe dans la singularité, faisant perdre de la masse à celle-ci.

Il n'y a pas, dans l'Univers actuel, de trou noir en train de s'évaporer

D'après le deuxième principe de la *thermodynamique*, un transfert de chaleur (c'est-à-dire d'énergie électromagnétique rayonnée) ne peut se faire que d'un corps chaud vers un corps froid. Or ce qu'il y a de plus froid dans l'Univers est le *fond diffus cosmologique*, rayonnement à 2.7°K, et ce rayonnement est des millions de fois plus chaud que le trou noir naturel le plus chaud (c'est-à-dire de masse minimum), qui est plus lourd que le Soleil. Au contraire, même : tous les trous noirs sont en train de grossir, donc de se refroidir encore plus.

Si l'expansion de l'Univers se poursuit au rythme prévisible, sa température baissera assez, *dans un milliard de siècles*, pour que les trous noirs puissent commencer à rayonner leur énergie ; et nous allons voir que même alors leur perte d'énergie sera extrêmement lente.

2.6.7.6 Durée de vie d'un trou noir avant évaporation explosive complète

L'énergie rayonnée par unité de temps d'un trou noir est donnée par la formule de Stefan-Boltzmann :

$$\frac{dE}{dt} = A\sigma T^4, \text{ où :}$$

- A est l'aire de la surface rayonnante en m^2 ;
- σ est la constante de Stefan-Boltzmann ;
- T est la température absolue en degrés K.

Au fur et à mesure que le trou noir émet de l'énergie sa masse diminue, ce qui augmente sa température et accélère le rayonnement. On démontre qu'un trou noir de masse M , isolé dans le vide au zéro absolu, a ainsi une durée de vie de :

$$\tau_{vie} = 2.095 \cdot 10^{67} \text{ ans} \times \left(\frac{M}{M_{soleil}}\right)^3$$

- Un trou noir de masse solaire survivrait donc pendant un temps d'environ $2 \cdot 10^{67}$ ans après que la température de l'Univers soit descendue sous les 60nK (nanokelvins de 10^{-9} °K) : la température de l'Univers baisse continuellement du fait de l'expansion.
- Un trou noir de 1 kg (si on savait en fabriquer un, ou s'il résultait de l'évaporation d'un trou noir plus gros) ne survivrait que 0.083 seconde avant de s'évaporer en libérant une énergie comparable à celle d'une grosse bombe thermonucléaire.

La fin de l'évaporation d'un trou noir est donc toujours explosive, quelle qu'ait été sa masse initiale.