

Sommes-nous dans un trou noir ?¹

Gaston Fischer, Peseux / Suisse, gfischer (at) vtx.ch

Introduction

Lorsqu'on parle de "trous noirs" on insiste généralement sur le fait qu'aucune information ne peut en sortir et sans qu'on s'en rende compte, on sous-entend souvent que rien ne peut trahir leur présence; cela, bien sûr, est totalement faux. D'abord, un trou noir se manifeste par sa gravité; ainsi, il est fort probable que certains partenaires d'étoiles doubles sont en fait des trous noirs. Ensuite, un trou noir situé au cœur d'une masse de gaz va attirer ce gaz et fortement l'accélérer; cela produira une émission de lumière, soit parce que les molécules neutres du gaz s'entrechoquent, soit parce que les parties ionisées émettent de la radiation de freinage et de la radiation de Cherenkov.

S'il est vrai qu'un trou noir, s'il existe effectivement, ne pourra pas passer inaperçu, il est tout aussi vrai que les signes par lesquels il se manifeste ne permettent pas, en général, d'affirmer que seul un trou noir aurait pu les produire. Ceci explique pourquoi certains cosmologistes refusent, aujourd'hui encore, d'accepter la réalité des trous noirs. Après la réparation du télescope spatial de Hubble on a pourtant mis en évidence, par effet Doppler, une concentration de quelques 2 milliards de masses solaires à l'intérieur d'un rayon de seulement 60 années-lumière au cœur de la galaxie **M87**, distante de quelques 70 millions d'années-lumière. Bien que ce petit volume central soit très brillant, il ne contient de loin pas un nombre suffisant d'étoiles lumineuses pour expliquer une telle masse. La présence d'un trou noir, qu'on soupçonnait d'ailleurs depuis longtemps au cœur de nombreuses galaxies, y compris la nôtre, est la seule façon de comprendre ces observations d'effet Doppler (voir Collins, 1994).

Un observateur extérieur est donc manifestement sensible à la présence d'un trou noir. Par contre, un observateur situé à l'intérieur d'un trou noir ne pourra jamais rien percevoir du monde extérieur à ce trou. Nous reviendrons sur ce point plus bas.

Qu'est-ce qu'un trou noir ?

Un trou noir particulier est caractérisé par sa masse M et c'est cette masse qui détermine ce qu'on peut appeler la grandeur r_s du trou, c.-à-d. son rayon de Schwarzschild (1916). Ce rayon est une grandeur critique, en ce sens que seuls des signaux émis depuis des points plus éloignés du centre que r_s peuvent se propager vers l'extérieur. Pour un trou qui ne tourne pas, r_s est donné par

$$r_s = 2GM/c^2 \quad , \quad (1)$$

où G est la constante de la gravitation et c la vitesse de la lumière. Pour un trou noir en rotation rapide, les forces centrifuges viennent s'opposer aux forces gravitationnelles et cela diminue un peu la grandeur de r_s . Dans ce qui suit nous négligeons de telles rotations.

Puisque aucune information ne peut nous parvenir depuis l'intérieur de la sphère de rayon r_s , il sera difficile de parler avec assurance de la structure interne des trous noirs. Cela a tout de même été tenté par des spécialistes (voir Thorne, 1994). Ici nous allons nous intéresser aux

¹ Une première version de cet article paru dans **ORION**, Revue de la Société Astronomique de Suisse, no. 275, août 1996, pp. 185-187.

très grands trous, pour lesquels de simples arguments de densité vont nous permettre de jeter quelque lumière sur le sujet. Dans ce but, nous faisons d'abord la supposition un peu osée, que la masse est répartie de façon uniforme à l'intérieur de la sphère de rayon r_s , avec une densité dont la moyenne serait ρ_m . De la relation (1) on obtient alors immédiatement que

$$\rho_m = 3c^2 / 8\pi G r_s^2 \quad . \quad (2)$$

Ce qui ne peut manquer de frapper dans cette équation, est que la densité moyenne d'un trou noir diminue comme le carré du rayon, soit comme $1/r_s^2$. Les petits trous auront donc forcément une densité absolument énorme : indépendamment de la façon exacte dont la masse y est effectivement distribuée, elle sera du type des plus fortes densités permises par la nature, peut-être même en violation des lois de la physique que nous connaissons. Pour les très grands trous, par contre, nous verrons que la densité moyenne requise devient incroyablement faible et que la distribution de masse pourra y devenir très inhomogène, avec d'immenses espaces d'un vide presque parfait.

Une propriété très intéressante des petits trous a été révélée par Hawking (1974) et fournit un superbe exemple d'effet de quantification gravitationnelle. En effet, s'il est vrai qu'aucun signal porteur d'information ne peut s'échapper de ces trous, des particules telles que des neutrinos et des photons peuvent en sortir par l'effet tunnel quantique bien connu. Si ces trous ne sont pas entourés d'une importante concentration de gaz, ce qui leur permettrait de croître par absorption, ils perdront leur masse par évaporation. Cette évaporation ira en s'accroissant à mesure que le trou devient plus petit, comme conséquence de l'augmentation de sa densité interne, et se terminera par une véritable explosion. Un petit trou aura donc une durée de vie qui dépend de sa masse initiale, et bien sûr, aussi de son environnement gazeux. Hawking (1974) a postulé que de tels petits trous ont probablement été créés en grand nombre lors du "big bang", mais tous ceux dont la masse initiale était inférieure à 10^{12} kg ont explosé depuis longtemps. Par contre, ceux dont la masse est de l'ordre de celle du Soleil ($\approx 2 \cdot 10^{30}$ kg), ou même simplement de la Terre ($\approx 6 \cdot 10^{24}$ kg), ont une durée de vie bien supérieure à l'âge de l'Univers. D'un point de vue astronomique les explosions de trous noirs sont de petits événements; ils libéreraient pourtant une énergie d'environ un million de mégatonnes de TNT au cours du seul dernier dixième de seconde avant leur totale disparition.

Il est peu probable que nous puissions maintenant encore assister à l'explosion d'un trou noir, car ceux dont la durée de vie initiale aurait été à peu près égale à l'âge actuel de l'Univers ont probablement tous été entourés de suffisamment de gaz. Au lieu de disparaître par évaporation ils se sont au contraire stabilisés par accrétion de matière. Au-dessous d'une certaine masse, par contre, les petits trous finissent toujours par disparaître.

Pour les grands trous noirs il est intéressant de passer à la limite d'un rayon de Schwarzschild r_s égal au rayon de notre horizon observable R . Pour notre propos il suffira d'admettre que l'expansion de l'Univers suit une loi de Hubble indépendante du temps, soit

$$v = H \cdot d \quad , \quad (3)$$

où H est la constante de Hubble. Si $d = R$, on a bien sûr $v = c$, de sorte que notre rayon observable est simplement

$$R = c / H \quad . \quad (4)$$

Avec $R = r_s$ la relation (2) devient alors

$$\rho_m = 3H^2/8\pi G = \rho_c \quad . \quad (5)$$

Comme on le voit, la densité d'un trou noir aux dimensions de l'horizon visible est exactement égale à celle admise pour la densité critique de l'Univers, densité pour laquelle l'expansion de l'Univers finira par s'arrêter au bout d'un temps infiniment long. Cette densité est extrêmement faible, de l'ordre de 10^{-26} kg/m^3 (en général exprimée $\rho_c \approx 10^{-29} \text{ g/cm}^3$, avec un facteur d'incertitude qui va d'environ 0.5 à 2). Comme on le sait, cette densité est environ cent fois plus grande que celle qu'on déduit de la masse visible ou lumineuse de l'Univers, mais bien des arguments font penser que la densité de l'Univers est effectivement égale à cette densité critique.

En conclusion

Il est donc raisonnable de considérer qu'en étant dans l'Univers, nous sommes en fait dans un trou noir. Cela est équivalent avec l'affirmation selon laquelle il nous est impossible de savoir ce qui se trouve au-delà de l'horizon visible, puisque cet horizon est un rayon de Schwarzschild. Il vaut la peine d'insister sur le fait que cette présentation d'un horizon limite ne fait pas explicitement appel au fait que la vitesse de la lumière est finie et que nous ne pouvons donc pas espérer voir au-delà d'une distance donnée par le produit de cette vitesse et de l'âge de l'Univers. L'autre point intéressant, déjà mentionné, est qu'à l'intérieur des grands trous noirs la distribution de masse peut être très inhomogène, avec de grandes régions où la densité de matière n'est peut-être que de l'ordre du vide intergalactique, soit 10^{-29} – 10^{-30} kg/m^3 (environ un centième à un dixième de nucléon par m^3 !). Dans d'autres régions, la densité de masse pourrait être très grande. En effet, on ne peut pas exclure qu'à l'intérieur d'un tel trou noir aux immenses dimensions, ne s'en trouve de nombreux petits, certains comme partenaires d'étoiles doubles ou au coeurs de galaxies, comme nous l'avons vu pour celui de **M87**.

Références

Collins, G. P. (1994). Repaired Hubble sees strong evidence of a supermassive black hole in M87. *Physics Today*, August, Vol. 47, pp. 17-20.

Hawking, S. W. (1974). Black hole explosions ? *Nature*, 1 March, Vol. **248**, pp. 30-31.

Schwarzschild, K. (1916). On the gravitational field of a point mass according to Einstein's theory. *Sitzber. Preuss. Akad. Wiss., Physik-Math. Kl.*, Vol. **189**, pp.189-196. (translated by Helga and Roger Stuewer).

Thorne, Kip S. (1994). *Black Holes and Time Warps, Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W. W. Norton & Co., Inc. (en particulier Chapter 13).