

Stephen Hawking était un de vos proches collègues, mais aussi le physicien le plus connu du grand public, élevé au rang de mythe de son vivant. Que penser de cette notoriété ?

Hawking n'était peut-être pas «le nouvel Einstein» que les médias ont voulu présenter, mais n'allons pas déboulonner des statues pour autant ! Il reste avant tout un scientifique remarquable. Qu'il ait pu, sa vie durant, se maintenir aux frontières du savoir tout en affrontant sa terrible maladie m'a toujours laissé admiratif. C'était une personnalité riche, un amoureux de la musique et un homme plein d'humour.

Un autre trait de sa personnalité m'a frappé un soir qu'il m'avait invité à dîner à Cambridge. Je m'attendais à une tablée de physiciens, mais nous étions seuls et il voulait simplement jouer avec moi à un jeu – Othello – dont il a dû m'expliquer les règles. Au bout d'un moment, je commençais à comprendre et à gagner, ce qui manifestement le chiffonnait. Une minute avant minuit, l'heure à laquelle je devais partir, je jouai un coup gagnant qui mettait fin à la partie. Mais comme je me levais, à minuit et une minute, Stephen produisit discrètement un autre coup, qui l'aurait fait gagner s'il n'avait pas déjà perdu... Hawking jouait toujours pour gagner ! C'est aussi cette volonté qui lui a permis de tenir si merveilleusement face à sa maladie. Mais il n'écrasait pas les autres. Il n'a jamais joué les vedettes parmi les autres scientifiques, même si sa célébrité l'amusait. En fait, il a tenté d'en faire quelque chose d'utile, pour la défense de la vie animale ou sous la forme d'une fondation à Cambridge. C'était fondamentalement un type bien.

Stephen Hawking a fait une entrée remarquée dans le monde de la physique théorique en 1966, avec sa thèse qui prolongeait les travaux du physicien et mathématicien britannique Roger Penrose visant à prouver que les singularités sont inévitables en relativité générale. Que reste-t-il de ce travail ?

Les travaux de Penrose, puis de Stephen Hawking à cette époque, restent très importants. Penrose avait inauguré des méthodes mathématiques qui prenaient en considération les propriétés globales de l'espace-temps de la relativité générale sans qu'il y ait besoin de résoudre les équations d'Einstein. Il s'en était servi pour démontrer l'existence de lignes d'univers qui n'ont pas de futur. Qu'est-ce qu'une ligne d'univers ? En quelque sorte la ligne de vie d'un objet dans l'espace-temps. Penrose avait montré que celle d'une particule tombant dans un trou noir s'arrête en un temps fini selon son horloge. Il y a donc bel et bien quelque chose de singulier à cet endroit. L'espace-temps n'est pas complet : des points en sont ôtés, ainsi que toutes les lignes qui en partent vers le futur. Hawking s'est servi de ce résultat pour montrer qu'il en va de même

de la singularité cosmologique au début de l'Univers : des lignes d'univers n'ont pas de passé au-delà d'un certain point.

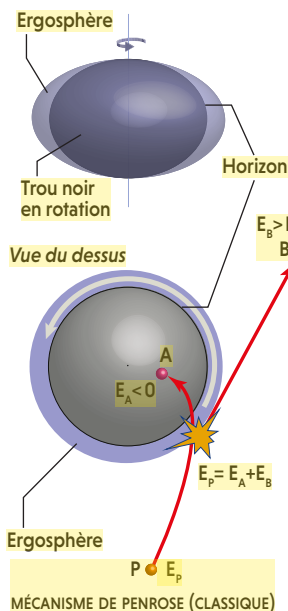
Certes, ces méthodes générales ne permettaient pas de savoir ce qui se passe exactement. Le temps existe-t-il encore au niveau du Big Bang ? N'y a-t-il effectivement plus d'espace ? À quoi correspondent les points singuliers de l'espace-temps de Penrose dans l'Univers ? On ne sait toujours pas répondre à ces questions. Néanmoins, ces résultats, aujourd'hui nommés théorème de Penrose-Hawking, ont marqué un tournant. En 1963, les Russes Isaak Khalatnikov et Evgueni Lifchitz venaient de poser le problème de la nature de la singularité cosmologique. En relativité générale, nous faisons nos calculs dans le cadre d'hypothèses simplificatrices, en supposant par exemple que l'Univers est homogène et isotrope, c'est-à-dire très symétrique. Khalatnikov et Lifchitz s'interrogeaient : est-ce à cause de ces hypothèses qu'une singularité apparaît au départ de l'Univers ? Si les choses étaient moins symétriques, cet artefact disparaîtrait-il ? Ils n'avaient pas résolu le problème. Le théorème de Hawking les a obligés à revoir leur travail puisqu'il annonçait que la singularité est, de façon très générale, obligatoire.

En collaboration avec Volodia Belinski, ils ont finalement trouvé une solution aux équations d'Einstein qui montre précisément ce qui se passe lorsque l'Univers n'est ni homogène ni isotrope : quand on s'approche du Big Bang, la géométrie au voisinage de chaque point de l'Univers oscille violemment et de façon chaotique, de plus en plus vite, de sorte qu'une infinité d'oscillations nous séparent du moment singulier, au temps $t = 0$, où toutes les distances sont réduites à zéro. Là encore, il n'est pas prouvé que c'est ainsi que fonctionne l'Univers réel. Cette question est toujours à l'étude. Mais Hawking a contribué à convaincre la communauté scientifique de l'existence d'une singularité à l'origine de l'Univers, sans pouvoir cependant préciser sa nature.

Les hypothèses qu'il a faites pour cela sont-elles toujours d'actualité ?

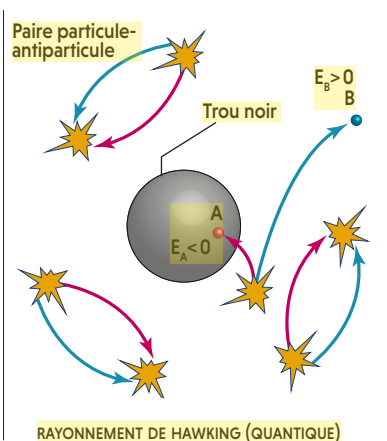
Hawking a utilisé ce qu'on appelle des conditions fortes sur l'énergie. Ce sont des hypothèses que l'on ajoute aux équations d'Einstein et qui postulent, par exemple, que la densité de masse (ou, cela revient au même, d'énergie) est positive et très supérieure à toute pression ou tension présente dans la matière. Il y a différents choix possibles. Stephen était jeune et, surtout à l'époque, très ambitieux. Il voulait un théorème ! Il a donc pris toutes les hypothèses nécessaires pour que son résultat soit obligatoire. Il faut aussi comprendre que ces conditions sur l'énergie paraissaient parfaitement naturelles à l'époque, car les observations cosmologiques semblaient aller dans ce sens.

DU MÉCANISME DE PENROSE À L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS

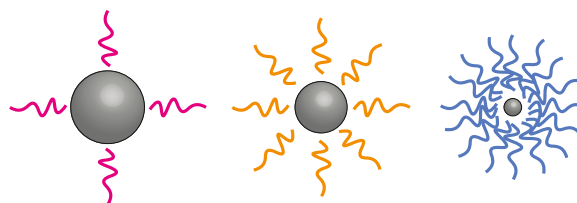


Un trou noir en rotation est entouré d'une région, l'ergosphère, où l'espace-temps est entraîné par le mouvement du trou noir au point qu'une particule qui y pénètre ne peut rester immobile par rapport aux étoiles lointaines (ci-dessous à gauche). Roger Penrose démontra qu'il est possible d'ajuster la trajectoire d'une particule P qui se désintègre en deux particules A et B à l'intérieur de l'ergosphère pour que la partie A (qui tombe sur l'horizon) ait, du point de vue d'un observateur lointain, une énergie négative. Dès lors, la particule B qui s'échappe à l'infini a une énergie E_B supérieure à l'énergie initiale E_P : de l'énergie a donc été extraite du trou noir.

Le rayonnement de Hawking repose sur une comptabilité comparable, concernant cette fois les paires de particule-antiparticule



qui apparaissent et s'annihilent mutuellement dans le vide quantique : près de l'horizon, ces paires peuvent produire l'émission d'une particule d'énergie positive et l'absorption d'une particule d'énergie négative (au centre). Le bilan est alors que le trou noir rayonne en perdant de la masse-énergie. Ce rayonnement est d'autant plus fort que la gravité de surface (inversement proportionnelle au rayon de courbure de l'horizon) est grande (à droite). L'introduction de ce mécanisme quantique implique que l'horizon du trou noir ne croît pas indéfiniment, comme l'avait d'abord décrit Hawking dans un cadre théorique classique, mais recule à mesure qu'il s'évapore et que toute son énergie, y compris la masse-énergie classiquement « irréductible » (qui est la seule qui existe pour un trou noir non tournant) soit finalement extraite par évaporation quantique.



> Certes, depuis, des contre-exemples à cette hypothèse du théorème de Hawking sont apparus. Notamment, la découverte en 1998 que l'expansion de l'Univers s'accélère a nécessité d'introduire une nouvelle hypothèse : une forme énigmatique d'énergie, dite sombre, qui serait responsable de cette accélération. Or l'énergie sombre n'obéit pas aux conditions fortes sur l'énergie de Hawking. Néanmoins, même si son théorème n'est valide que sous certaines hypothèses, il montre clairement à quel endroit il faut chercher. Il montre que la question de la singularité cosmologique ne dépend pas des symétries du problème, alors que les conditions sur l'énergie, elles, comptent beaucoup. C'est une preuve de l'importance du théorème de Hawking.

À partir de 1970 commence le « renouveau de la relativité générale », auquel vous avez vous-même contribué, notamment autour de l'étude théorique des trous noirs. Comment Hawking s'est-il attaqué à ces questions ?

Ce renouveau a eu lieu au départ exclusivement à Cambridge, en Angleterre, et à Princeton, aux États-Unis, et je n'y étais pas ! J'étais encore étudiant et en France, où certains scientifiques ne croyaient pas du tout aux trous

noirs ! J'ai travaillé sur la question parce que je suis allé à Princeton à partir de 1974 et que je me suis retrouvé dans le bain.

Le premier résultat important du côté classique (c'est-à-dire non quantique) date d'un peu avant et vient encore de Penrose. En 1969, il étudia ce qui se passe quand une particule se désintègre en deux particules à l'approche de l'horizon d'un trou noir qui tourne sur lui-même, un trou noir de Kerr. Il montra qu'on peut ajuster les trajectoires pour qu'une particule tombe sur l'horizon et que l'autre s'échappe à l'infini avec une énergie supérieure à celle de la particule initiale (voir l'encadré ci-dessus). Autrement dit, vous avez extrait de l'énergie du trou noir. C'était la première indication que l'on pouvait extraire de l'énergie d'un trou noir tournant.

Ce processus a été immédiatement étudié en détail à Princeton par le jeune Demetrios Christodoulou (18 ans à l'époque !) et son mentor Remo Ruffini. Ils démontrèrent qu'il y avait quelque chose d'irréversible chez les trous noirs : vous pouvez extraire une partie de leur masse-énergie, mais pas tout. Il restera toujours une « masse irréductible » qui, elle, ne peut qu'augmenter, comme une sorte d'entropie (l'entropie étant ce qui mesure le « désordre » d'un système