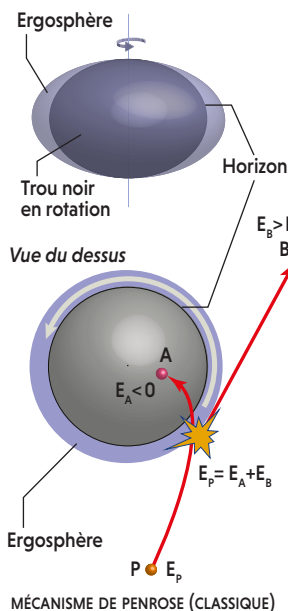
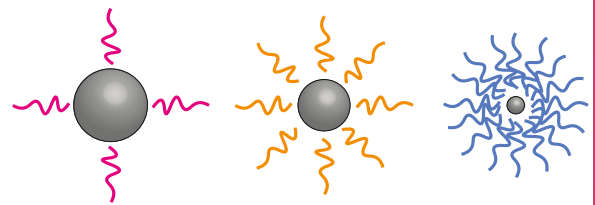
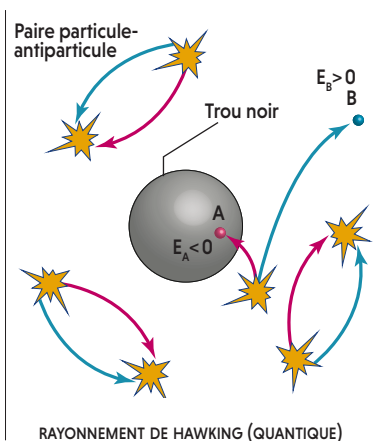


DU MÉCANISME DE PENROSE À L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS



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

physique, l'information qui s'y trouve cachée, et, selon le deuxième principe de la thermodynamique, celle d'un système isolé ne peut diminuer) – bien qu'à l'époque, je ne crois pas que qui que ce soit l'ait formulé ainsi. Hawking généralisa ensuite leur résultat en démontrant que l'aire de l'horizon d'un trou noir (égale dans les cas considérés ici au carré de la masse irréductible) ne peut qu'augmenter au cours du temps: même en cas de fusion de deux trous noirs, l'aire finale est supérieure ou égale à la somme des aires des deux trous noirs initiaux.

D'où est finalement venue l'idée d'entropie des trous noirs?

C'est Jacob Bekenstein qui, en 1972, sous l'impulsion de son mentor John Wheeler, a franchi le pas. Bekenstein était en thèse à Princeton et Wheeler lui avait demandé de réfléchir au problème suivant: si j'ai une tasse de thé bouillant et que je la jette dans un trou noir, que devient l'entropie de l'eau chaude? En reprenant les travaux de Christodoulou, Ruffini et Hawking, Bekenstein affirma que l'aire d'un trou noir était effectivement une mesure de son entropie. Pour cela, il suivit deux lignes de calcul différentes. D'une part, il montra que lorsque le trou noir absorbe une particule, son aire augmente d'une certaine quantité en même temps que de l'information est perdue derrière l'horizon – le «bit» d'information qui vous dit en quelque sorte si la particule existe encore ou pas. C'est cohérent avec le fait que l'entropie est une mesure de l'information cachée dans un système.

D'autre part, il considéra une petite boîte remplie d'un gaz chaud. L'entropie du gaz est grande, car du fait de sa température, le mouvement des molécules de gaz est très désordonné. Aussi, quand la boîte tombe dans un trou noir, l'entropie de l'Univers devrait diminuer, puisque le gaz ne reviendra pas. Or on s'attend à ce qu'elle augmente. Il fallait donc que le trou noir ait lui-même une entropie, qui augmenterait quand le gaz y tomberait. Et, par conséquent, une température non nulle. En d'autres termes, les trous noirs étaient d'une certaine façon «chauds» et devaient donc produire un rayonnement! C'était une idée violemment nouvelle et iconoclaste.

Comment cette idée a-t-elle été reçue?

Cette année-là, tous ces gens se sont rencontrés en France, à l'école d'été des Houches, en août 1972. Bekenstein était là en tant qu'étudiant. Les orateurs étaient Brandon Carter, Hawking, Ruffini et d'autres. Lors de cette session, Hawking, Carter et James Bardeen ont certes montré que la physique des trous noirs présente une série d'analogies avec la thermodynamique classique, mais pour eux ce n'étaient que des analogies. Ils étaient convaincus que, sur le fond, Bekenstein avait tort. Il faut dire aussi qu'à cette époque, en Union soviétique, les

Russes avaient commencé à produire des résultats nouveaux en introduisant la mécanique quantique dans l'étude des trous noirs.

Iakov Zeldovitch, notamment, avait eu l'idée nouvelle que les trous noirs en rotation, les trous noirs de Kerr, devaient rayonner des particules quantiques et il l'avait démontré avec son étudiant Alexei Starobinski. Il se trouve qu'Hawking est allé à Moscou la même année et qu'il a discuté du sujet avec Zeldovitch. C'est sûrement là qu'il a compris l'intérêt d'étudier les trous noirs d'un point de vue quantique. Il s'est dit en substance: «Je vais appliquer les méthodes de Zeldovitch, mais sur un trou noir de Schwarzschild, un trou



En 1974, il a fait sa plus grande découverte: l'évaporation quantique des trous noirs



noir qui ne tourne pas, et comme il ne rayonnera pas, cela démontrera que les idées de Bekenstein sont fausses.» Mais il a en fait prouvé le contraire! En 1974, il a fait sa plus grande découverte, celle qui restera comme un résultat essentiel de la physique théorique: l'évaporation quantique des trous noirs, qui rayonnent comme des corps incandescents dont la température est proportionnelle à leur gravité de surface (et donc inversement proportionnelle à leur masse).

Ici encore, il est remarquable que ces résultats soulèvent des questions auxquelles on ne sait toujours pas répondre. L'entropie est définie en physique comme le nombre d'états microscopiques possibles – ou plutôt le logarithme de ce nombre – pour un état macroscopique donné (par exemple le nombre de façons d'interchanger les positions et les vitesses des molécules dans une bonbonne d'air à une pression de 1 atmosphère [atm] et à 20 °C tout en ayant toujours une bonbonne d'air à 1 atm et à 20 °C). Mais dans le cas où l'état macroscopique est un trou noir, quels sont ces états microscopiques que l'on est censé compter? Où sont-ils? À quoi ressemblent-ils? On ne le sait toujours pas...

Ce qui nous amène à la très médiatisée « guerre des trous noirs » avec Leonard Susskind...

Oui, c'est surtout Susskind, à Stanford, qui a voulu jouer avec l'idée de «sa guerre contre »

Stephen». Mais le problème est important et il faut reconnaître que là encore, c'est Stephen qui a mis le doigt dessus. Quand un trou noir finit de s'évaporer complètement, il s'est transformé en chaleur, en désordre, et l'information quantique contenue dans l'état des particules qui l'avaient constitué au départ est définitivement perdue. Elle a été détruite, ce qu'en principe la mécanique quantique interdit. Pendant des années, Hawking a affirmé qu'il fallait changer la mécanique quantique, mais en 2004, il a reconnu que c'était probablement faux. Des travaux en théorie des cordes, notamment du Néerlandais Gerard 't Hooft et de l'Argentin Juan Martín Maldacena, suggéraient en effet que l'information quantique était conservée.

Aujourd'hui, tout le monde est à peu près convaincu que c'est bien le cas, mais les preuves sont très indirectes et des chercheurs travaillent encore dessus. Des pistes d'explications impliquant des structures très modifiées à l'horizon des trous noirs sont avancées, mais elles ont à mon avis très peu de chances d'être vraies et n'expliquent pas vraiment comment l'évaporation d'un trou noir respecte l'information quantique. C'est caractéristique de tout problème vraiment profond. Longtemps après qu'on l'a posé, il vous survit. C'est le mérite de Stephen d'avoir montré qu'il y avait un problème là où tout le monde pensait qu'il n'y en avait pas.

Dans les années 1980, Stephen Hawking s'est intéressé au problème de l'inflation du très jeune cosmos...

Il a contribué dans ce cadre à des résultats pratiques très importants, même si on sait aujourd'hui que les mêmes calculs avaient été faits quelques années avant en Union soviétique par Gennady Chibisov et Viatcheslav Mukhanov. À son initiative, en 1982, des discussions ont commencé sur les fluctuations du fond de rayonnement cosmologique au sortir de l'inflation – l'image de l'Univers tel qu'il était 300 000 ans après le Big Bang et qui nous parvient sous la forme de microondes. En effet, on pense qu'au tout début de son histoire, l'Univers a connu une phase d'expansion extrêmement rapide qui a amplifié les fluctuations microscopiques du vide quantique. Ce sont ces fluctuations étirées jusqu'à une taille cosmique qui sont à l'origine des petites inhomogénéités du gaz chaud dont le fond cosmologique est l'image. Ces inhomogénéités sont à leur tour les germes qui ont donné, en se condensant, les grandes structures de l'univers actuel, les galaxies et les amas de galaxies.

Avec des gens comme Paul Steinhardt, Michael Turner, Alan Guth, le groupe réuni à Cambridge a compris comment estimer l'amplitude de ces fluctuations dans tous les modèles d'inflation. Stephen a montré dans un article très clair que tout cela est calculable. Ces calculs ont permis de comparer les modèles

aux observations lorsque les mesures du rayonnement cosmologique ont été assez précises pour montrer ces fluctuations.

Dans le même temps, Hawking a poursuivi un effort plus purement théorique en posant son hypothèse « d'Univers sans bord ».

A-t-il des successeurs sur ce chemin ?

Là encore, Hawking a posé une très bonne question qui, comme les précédentes, lui survit. Toute l'histoire de la physique jusqu'à aujourd'hui consiste à découvrir des lois dynamiques qui donnent l'évolution d'un système, par exemple de l'Univers, à partir d'un état

Il a montré qu'il y avait un problème là où personne n'en attendait

initial. Si je connais son état à un instant t_0 , je peux calculer son état à un autre instant t . Hawking s'est demandé, étant donné la présence de cette étrange singularité au début du cosmos, s'il ne manquait pas quelque chose. Ne faudrait-il pas poser, à côté des lois de la physique, une hypothèse de plus, un autre genre de loi qu'on ne peut pas déduire des lois dynamiques et qui stipulerait quel doit être l'état quantique initial de l'Univers ?

La solution « sans bord » qu'il a développée avec Jim Hartle était une proposition dans ce sens. Ils ont utilisé une technique de théorie quantique des champs – qui combine mécanique quantique et relativité restreinte – connue depuis les années 1960 et utilisée pour calculer l'état fondamental d'un système quantique simple. Le résultat n'est pas très probant, les calculs ne sont pas bien définis, mais même si au niveau technique la solution proposée par Hawking n'est plus d'actualité, la question fondamentale qu'il a posée reste. On peut dire qu'il a rendu crédible toute la discipline de la cosmologie quantique.

Tout au long de sa carrière, il a soulevé des problèmes auxquels il a apporté des contributions importantes et qui, à chaque fois, sont restés des problèmes ouverts. C'est un hommage à sa perspicacité et la preuve que ce sont des problèmes importants ! Stephen Hawking est un sphinx qui nous a légué toutes ces énigmes, ce qui est la marque des grands scientifiques. ■

PROPOS RECUEILLIS PAR RENÉ CUILIERIER