

Les trous noirs acoustiques

RENAUD PARENTANI

La propagation du son dans un fluide en mouvement étant analogue à celle de la lumière dans un espace-temps courbe, les physiciens conçoivent des «trous noirs acoustiques» dont les propriétés sont très semblables à celles des trous noirs de l'Univers.

Au début du XX^e siècle, notre conception du monde physique a été bouleversée par l'avènement de trois théories : la relativité restreinte, la relativité générale et la mécanique quantique. La première de ces théories est caractérisée par l'abandon de la conception galiléenne de l'espace et du temps au profit d'une géométrie quadri-dimensionnelle, l'espace-temps, où le temps et les trois dimensions d'espace forment un tout. En adoptant cette théorie, Einstein rejeta également l'idée selon laquelle la lumière proviendrait des vibrations d'un hypothétique substrat matériel nommé éther, une idée qui avait prévalu tout au long du XIX^e siècle. Selon la conception relativiste du monde physique, les ondes lumineuses se déplacent dans le vide sans nul besoin d'un substrat et avec une vitesse constante. Cette propriété de la lumière reste intacte lorsqu'on adopte la relativité générale ou la mécanique quantique.

Durant le XX^e siècle, les physiciens ont développé ces trois théories et les ont comparées aux données expérimentales. Cette entreprise fut globalement couronnée de succès puisque la totalité des phénomènes observés en laboratoire sont maintenant décrits de manière cohérente. Pourtant, une ombre persiste : contrairement à la relativité restreinte, la relativité générale fait mauvais ménage avec la mécanique quantique. Depuis 70 ans, toutes les tentatives de faire fusionner ces deux théories ont échoué et l'on ne dispose toujours pas d'une théorie quantique de la gravitation. Heureusement, les effets de cette théorie ne devraient se manifester qu'aux très petites distances (de l'ordre 10^{-35} mètre), bien en deçà de la résolution actuelle des expériences (voir l'encadré page 43). Toutefois, il faudrait disposer d'une théorie quantique de la gravitation pour étudier les phénomènes quantiques propres aux trous

noirs, car ils font appel aux propriétés de l'espace-temps aux très courtes échelles. Ainsi, l'étude des propriétés quantiques des trous noirs joue le rôle d'aiguillon auprès des physiciens qui essaient d'unifier la relativité générale et la mécanique quantique. Face à la persistance des difficultés, certains d'entre eux ont décidé d'exploiter les analogies qui existent entre la propagation de la lumière et celle, mieux maîtrisée, du son dans un fluide. Leurs travaux suggèrent qu'aux très petites distances, l'espace-temps pourrait se comporter comme un fluide matériel. Si cela se révélait correct, ce serait un amusant retournement de situation, car la notion d'éther serait en quelque sorte réhabilitée, 100 ans après son abandon.

Avant de montrer le bon usage, tant théorique qu'expérimental, que l'on peut faire de ces analogies, expliquons pourquoi l'étude des trous noirs nous entraîne vers la gravitation quantique.

La lumière et l'espace-temps courbe

La relativité générale est fondée sur deux hypothèses. Tout d'abord, on postule que les objets matériels et la lumière se déplacent dans un espace-temps courbe à quatre dimensions (trois dimensions spatiales et une dimension de temps). Ensuite, on suppose que la courbure de l'espace-temps est déterminée par la répartition de la matière et de l'énergie. À cause de cette courbure, la lumière ne se déplace plus en ligne droite comme c'est le cas dans un espace plat (ou euclidien), mais le long de courbes nommées géodésiques. Ainsi, au voisinage d'un astre massif, les rayons lumineux suivent des trajectoires incurvées. En 1919, ceci fut vérifié pour la première fois par l'astronome Arthur Eddington qui constata, lors d'une éclipse



1. DANS UN FLUIDE EN MOUVEMENT, les ondes sonores sont entraînées par le courant et suivent des trajectoires courbes, comme les rayons lumineux au voisinage d'un astre massif. Ainsi, on pourrait construire des trous « noirs acoustiques » analogues à ceux de la relativité générale. Dans un tourbillon tel que celui-ci, on obtiendrait une situation semblable à celle d'un trou noir en rotation.

Kelvin Murray/Stone-Gettyimages

de Soleil, que les étoiles situées près du disque solaire apparaissaient déplacées de leur position habituelle. Ces déviations découlent du fait que les géodésiques suivies par les rayons lumineux sont déformées par la courbure de l'espace-temps engendrée par la masse du Soleil (voir la figure 2).

De même, l'étude des trous noirs repose sur l'examen de la déformation des géodésiques qui s'aventurent dans leur voisinage. Quant à l'origine de ces astres dans notre Univers, disons simplement que l'évolution des étoiles plus massives que le Soleil conduit souvent à la formation de trous noirs : lorsqu'une étoile a épuisé son combustible, la matière qui la compose s'effondre sur elle-même sous l'effet de son propre poids et se concentre, selon la relativité générale, en un point de densité infinie, une singularité. L'espace-temps qui entoure cette singularité est donc vide, exempt de matière. Sa propriété la plus remarquable est d'être divisé en deux régions distinctes : une région interne où tous les rayons lumineux sont inexorablement attirés vers la singularité, et une région externe d'où certains rayons lumineux peuvent s'échapper et atteindre un observateur lointain. La surface qui sépare ces deux régions est nommée horizon. En vertu du caractère limite de la vitesse de la lumière, l'horizon constitue la frontière au-delà de laquelle aucun signal ne peut atteindre un observateur lointain. Pour autant, l'horizon ne constitue

pas un obstacle matériel ; rien ne vous empêche de le franchir pour entrer dans la région interne (il vous suffit de vous laisser attirer par le trou noir). Toutefois, lorsque vous l'aurez franchi, vous ne pourrez plus communiquer vos observations à l'extérieur. On peut visualiser cette séparation de l'espace en deux régions par le tracé de l'ensemble des rayons lumineux «tirés» du trou noir vers un observateur lointain (voir la figure 3).

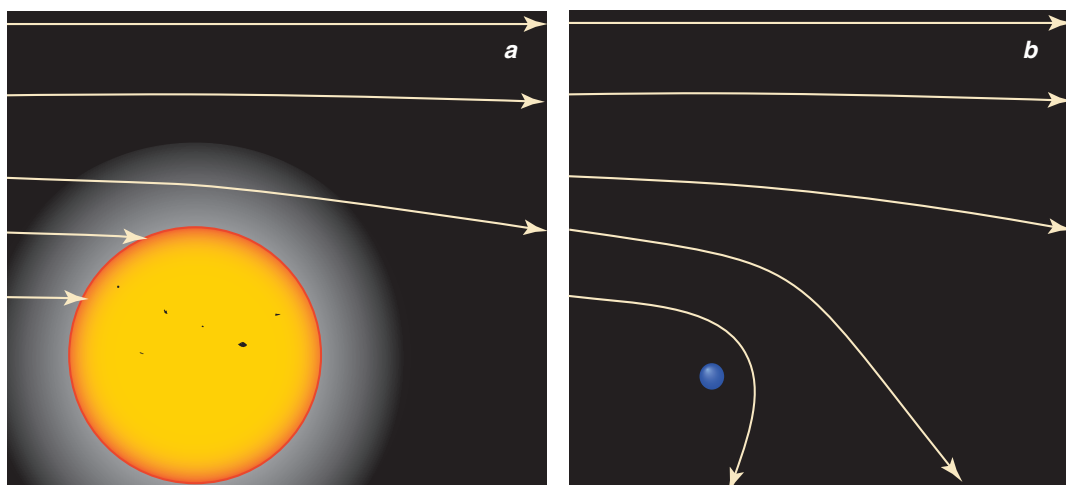
Le rayonnement des trous noirs

Lorsque l'on étudie les propriétés du rayonnement émis par un trou noir, on obtient des résultats très différents selon que l'on utilise la description classique ou quantique de la lumière. La description classique de la lumière date du milieu du XIX^e siècle. Dans ce cadre, la lumière est décrite par des ondes électromagnétiques et les rayons lumineux (les lignes qui sont en tout point perpendiculaires aux fronts d'onde) suivent des géodésiques de l'espace-temps : ce sont des droites si l'espace-temps est plat et des courbes s'il ne l'est pas. Bien qu'elle soit en bon accord avec de nombreux résultats expérimentaux, cette description a dû être abandonnée parce qu'elle est incapable de rendre compte des propriétés corpusculaires de la lumière. Au début du XX^e siècle, une seconde description, dite quantique, a vu le jour pour pallier cette difficulté. Dans ce

nouveau cadre, les flux lumineux sont constitués de «grains» de lumière nommés photons. Il faut souligner que cette nouvelle description est en parfait accord avec tous les résultats expérimentaux. Notons également que les descriptions classique et quantique coïncident lorsque les propriétés corpusculaires de la lumière ne sont pas essentielles, ce qui est le cas, en général, pour les phénomènes macroscopiques.

Les trous noirs étant des objets très massifs – donc macroscopiques – il est raisonnable de penser que la théorie classique de la lumière décrit correctement les rayonnements lumineux qu'ils émettent. Dans ce cadre, la lumière émise vers un observateur lointain d'un point situé au voisinage d'un trou noir est «rougie», sa longueur d'onde augmente – sa fréquence est réduite – d'un facteur d'autant plus grand qu'elle a été émise près de l'horizon. De manière concomitante, plus une onde est émise près de cette frontière fatidique, plus elle met de temps pour parvenir à un observateur lointain. À la limite, un rayon lumineux tiré d'un point situé exactement sur l'horizon met un temps infini pour atteindre l'observateur. Cette dilatation des longueurs d'onde et des durées au voisinage d'un astre massif est l'une des conséquences de la relativité générale (ce phénomène a même pu être mesuré dans le champ de gravitation de la Terre). Ce qui fait la spécificité des trous noirs, c'est que ces effets tendent vers l'infini lorsque l'onde lumineuse est émise de l'horizon. Ainsi, lors de la phase finale de l'effondrement gravitationnel, l'horizon se forme et l'astre devient noir, car les ondes lumineuses qui essaient de s'en échapper sont rougies au point de perdre toute leur énergie. Par la suite, puisque rien ne peut s'échapper de l'astre qui s'est effondré, il reste inévitablement noir.

Ces propriétés classiques faisaient l'objet de nombreuses études au début des années 1970 et toutes confirmaient qu'un trou noir peut absorber de la matière et du rayonnement, mais ne peut rien émettre. On imagine maintenant l'effet de surprise que causa, en 1974, l'article de S. Hawking où il démontrait que lorsqu'on utilise la description quantique de la lumière, les trous noirs émettent un rayonnement thermique constant. Après avoir suscité un certain scepticisme, ce résultat



2. LA DÉVIATION DES RAYONS LUMINEUX par le Soleil (a) est d'autant plus grande que le rayon passe près de sa surface. Autour d'un trou noir de une masse solaire (b), pour une même distance au centre de l'astre, l'angle de déviation est identique à celui induit par le Soleil. Toutefois, le rayon de l'horizon du trou noir étant très petit (environ six kilomètres au lieu de 700 000 kilomètres pour le Soleil), les rayons peuvent pénétrer dans des régions où la courbure est supérieure, ce qui conduit à de plus grandes déviations. Les rayons qui rasant l'horizon s'enroulent irrémédiablement vers le centre du trou noir.

étonnant a été admis par les physiciens et, depuis, il joue un rôle central dans les recherches consacrées à la gravité quantique.

En effet, le rayonnement des trous noirs est d'origine purement quantique. Il provient du fait que le vide est le siège de fluctuations : des paires de photons y apparaissent et disparaissent en permanence. En vertu des relations d'indétermination d'Heisenberg, la durée de vie de ces photons est d'autant plus courte que leur énergie est grande. Ces photons sont dits «virtuels», car, dans un espace-temps plat, le bilan des fluctuations est nul. En revanche, lorsque ces fluctuations ont lieu dans un espace-temps qui se modifie au cours du temps, elles sont amplifiées et cela se traduit par la production nette d'un flux de photons : de «virtuels» certains photons deviennent «réels». Ainsi, le rayonnement découvert par S. Hawking est l'écho de la formation de l'horizon du trou noir. Toutefois, ce rayonnement a une propriété remarquable : son intensité et sa température sont constantes. Comment se fait-il que des photons continuent à nous arriver des années après que l'effondrement gravitationnel a eu lieu ?

En 1974, cette question a beaucoup gêné S. Hawking au point qu'il retarda la publication de sa découverte. La raison est la suivante. Comme nous l'avons déjà remarqué, plus un photon atteint un observateur lointain longtemps après l'effondrement, plus ce photon a été émis près de l'horizon et plus il a subi un fort rougissement. Ainsi, à mesure que le temps s'écoule, les photons du rayonnement de Hawking proviennent de régions de plus en plus proches de l'horizon et l'énergie qu'ils possédaient au moment de leur production est de plus en plus élevée (si ce n'était pas le cas, la température du rayonnement diminuerait très rapidement). Pour expliquer le caractère constant de ce rayonnement, il nous faut donc faire appel à l'émission de photons de plus en plus énergétiques. Le problème c'est que l'on touche à un domaine de la physique encore inconnu.

En effet, dans le domaine des très hautes énergies, qui correspond à celui des très hautes fréquences ou des très petites distances, il existe une limite, nommée «échelle de Planck», à partir de laquelle les lois de la physique connue perdent leur validité (voir l'encadré page 43). Ainsi, l'horizon d'un trou noir agit

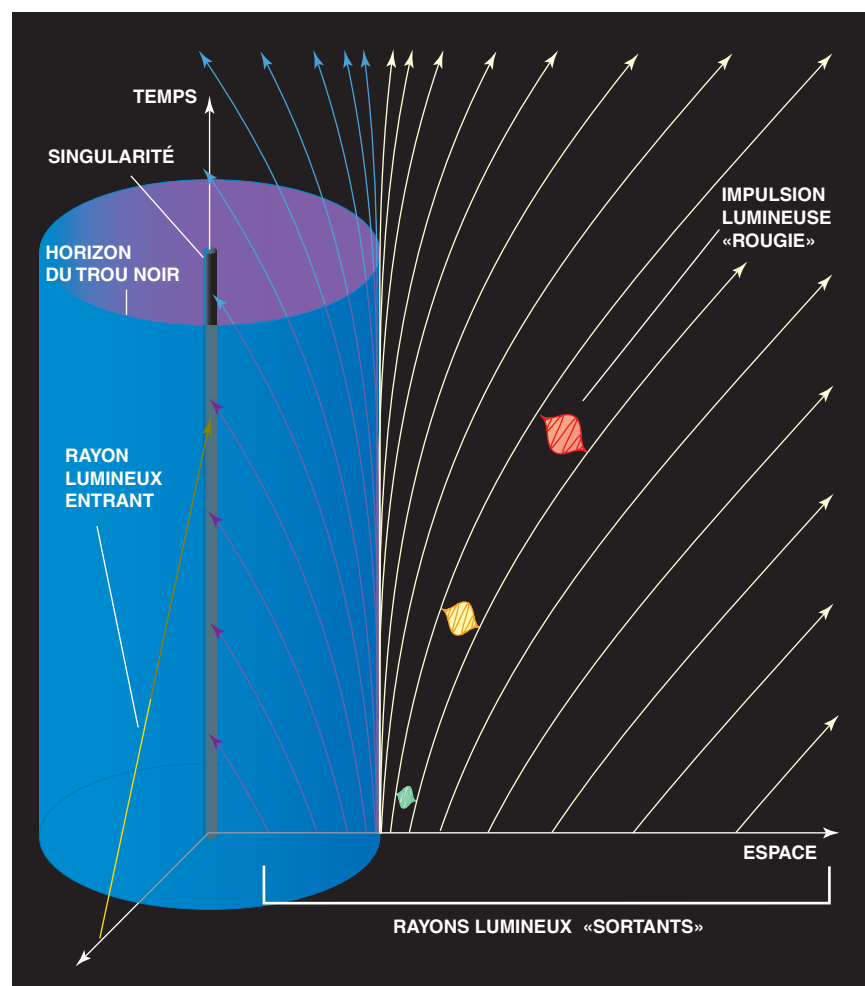
comme un fantastique microscope qui nous met en contact avec une physique encore à découvrir. Cependant, si le rayonnement de Hawking trouve son origine en dehors de la physique connue, ne convient-il pas de se montrer prudent quant à l'exactitude des propriétés qu'on lui attribue ? Ces dernières ne dépendraient-elles pas, de manière implicite, d'hypothèses infondées ?

Pendant plus de dix ans, ces questions ont été ignorées, car elles semblaient insolubles. Cependant, au début des années 1990, plusieurs physiciens, dont Ted Jacobson, de l'Université du Maryland, les soulevèrent à nouveau. Pour contourner les difficultés, T. Jacobson reprit une idée de William Unruh, de l'Université de Vancouver. En 1981, ce dernier avait montré l'existence d'une profonde analogie entre la pro-

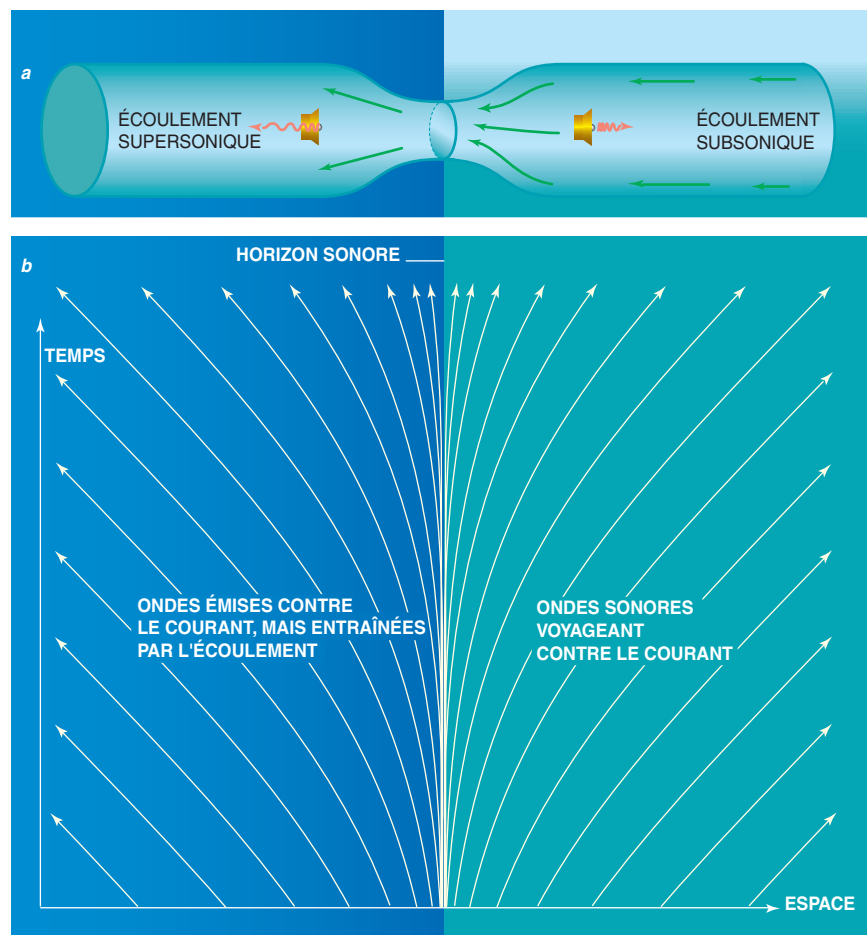
pagation des ondes sonores dans un fluide en mouvement et celle de la lumière dans un espace-temps courbe. En outre, W. Unruh avait proposé d'utiliser cette analogie pour attaquer le problème des très hautes énergies à l'origine du rayonnement de Hawking. En 1995, stimulé par la nouvelle vague de questions, il reprit son idée vieille de 14 ans et en démontra l'utilité. Examinons en quoi elle consiste.

Ondes sonores et phonons

Dans un fluide au repos, à cause de l'agitation thermique, la densité des molécules fluctue de manière désordonnée autour d'une valeur moyenne. En plus de ces fluctuations désordonnées, il existe des fluctuations ordonnées qui impliquent un très grand nombre de



3. L'ESPACE-TEMPS AUTOUR D'UN TROU NOIR : on a représenté les rayons lumineux émis vers un observateur lointain. Loin du trou noir, ce sont des droites inclinées à 45 degrés (les unités de temps et de longueur sont telles que la vitesse de la lumière est égale à un). Près du trou noir, ils sont incurvés et illustrent la courbure de l'espace-temps. Lorsqu'ils sont émis de l'extérieur de l'horizon, ils parviennent à s'échapper, alors que s'ils sont émis de l'intérieur, ils tombent tous vers la singularité, au centre du trou noir. En s'éloignant de l'horizon, les ondes lumineuses subissent un effet de rougissement gravitationnel. Le rougissement tend vers l'infini lorsque l'onde est émise de l'horizon. Cela se traduit par l'extrême empilement des géodésiques sur cette frontière.



4. DANS CETTE TUYÈRE DE LAVAL (a), le fluide s'écoule de droite à gauche. La vitesse du fluide augmente lorsqu'on s'approche de l'étranglement : elle est inférieure à celle du son dans le fluide en amont de l'étranglement et supérieure en aval. Au point le plus étroit, elle dépasse la vitesse du son. Dans cet écoulement, les trajectoires suivies par les phonons ont des propriétés semblables à celles des photons autour d'un trou noir gravitationnel. On le vérifie en dessinant ces trajectoires (b). À droite, dans la région subsonique, les ondes qui sont émises à contre-courant parviennent à s'échapper (à remonter le courant) tandis qu'elles sont entraînées vers l'aval quand elles sont émises de la région supersonique.

Observer le rayonnement de Hawking

Serait-il possible de mettre au point des expériences où l'on mesurerait le rayonnement émis par un trou noir acoustique ? Cette question est encore débattue. De même que la température du rayonnement des trous noirs gravitationnels est très faible, celle des trous noirs acoustiques (déterminée par la vitesse du son et par l'accélération avec laquelle les trajectoires s'éloignent de l'horizon) serait de l'ordre de 10^{-6} kelvin, trop basse pour être facilement détectable.

Pour vaincre cette difficulté, il faudra choisir avec soin le type de trou noir acoustique que l'on utilisera. Dans cet article, nous n'avons détaillé que le cas le plus simple. Toutefois, il semble plus prometteur de réaliser un couple de trous noirs qui résulte d'un double franchissement de la vitesse du son. La vitesse du fluide est d'abord augmentée comme nous l'avons décrit, puis diminuée pour retrouver un écoulement subsonique. L'horizon associé à ce deuxième franchissement se comporte comme le symétrique dans le temps de l'horizon d'un trou noir : on parle de «trou blanc», car, au lieu de s'éloigner de ce second horizon, les géodésiques y convergent. Ce type d'horizon est inaccessible pour les trous noirs gravitationnels (s'il existe, il est caché à l'intérieur de l'horizon noir), mais pas pour les trous noirs acoustiques. Steven Corley et Ted Jacobson ont montré que cette configuration à deux horizons conduit, dans certains cas, à un effet laser qui amplifie le rayonnement de Hawking et le rend donc plus facilement détectable.

Par ailleurs, les physiciens devront choisir avec soin le fluide qui sert de substrat aux phonons. Certains physiciens mettent leurs espoirs dans les condensats de Bose-Einstein dont les ondes sonores ont des propriétés quantiques bien définies ; d'autres voudraient simuler un trou noir optique, en utilisant un gaz très froid dans lequel la vitesse de la lumière est ramenée à quelques mètres par seconde. Cependant, à notre connaissance, toutes ces options butent encore sur des limitations intrinsèques ou techniques. Quoiqu'il en soit, les efforts redoublent pour débusquer une stratégie gagnante...

molécules sur des distances beaucoup plus grandes que la distance intermoléculaire : ce sont les ondes sonores. Elles présentent de nombreuses analogies avec les ondes lumineuses. Comme ces dernières, les ondes sonores sont caractérisées par une longueur d'onde, une fréquence et une vitesse de propagation constante (voir le tableau page 45). En général pourtant, ce parallélisme ne se prolonge pas au niveau quantique. En effet, dans les fluides ordinaires, les mouvements désordonnés d'origine thermique préviennent l'apparition de phénomènes quantiques. Toutefois, dans certains fluides refroidis à une température si basse que les fluctuations thermiques deviennent négligeables, l'ensemble des molécules est régi par la mécanique quantique. Dans ce type de fluide, les ondes sonores «héritent» des propriétés quantiques des molécules parmi lesquelles elles voyagent. Tout se passe alors comme si les ondes sonores étaient constituées de particules – des «grains de son» –, que l'on nomme phonons pour souligner l'analogie avec les photons. Ainsi, pour ces fluides, la description des ondes sonores, qu'elle soit classique ou quantique, est analogue à celle de la lumière. Intéressons-nous maintenant à la propagation des ondes sonores.

Tant qu'un fluide est au repos, les phonons s'y déplacent en ligne droite, comme les ondes lumineuses dans une géométrie plane. Dans le cas où l'écoulement du fluide est uniforme, la propagation des ondes sonores reste rectiligne. Le seul changement notable est que les ondes subissent un effet Doppler : lorsqu'une onde se propage à contre-courant, sa fréquence est plus faible qu'elle ne l'était dans le cas du fluide au repos. Inversement, la fréquence d'une onde est plus grande lorsqu'elle se propage dans le sens du courant. Ces effets Doppler ne dépendent que du mouvement relatif du fluide par rapport au laboratoire où l'on effectue les mesures. Ainsi, un observateur accompagnant le mouvement du fluide ne constaterait pas ces effets, car pour lui tout se passerait comme si le fluide était au repos.

En revanche, lorsque l'écoulement n'est pas uniforme (c'est le cas, par exemple, d'un fluide qui accélère dans une tuyère), les ondes sonores ne voyagent plus à une vitesse constante et leur fréquence dépend de l'endroit où on les mesure. De plus, leurs trajectoires dans l'espace-temps sont

courbes. Dans ce cas, on constate qu'il n'existe plus de référentiel qui permettrait d'annuler les effets Doppler en tout point de l'écoulement et de considérer que tout se passe comme si le fluide était au repos. W. Unruh a montré que cette impossibilité provient du fait que les phonons voyagent effectivement dans une «géométrie acoustique» courbe. Celle-ci caractérise les trajectoires suivies par les phonons exactement comme la géométrie de l'espace-temps le fait pour les photons. La différence avec la relativité générale tient à ce que la géométrie acoustique est déterminée par le mouvement du fluide et non par la répartition de la matière. Cette correspondance étant acquise, est-il possible de choisir un écoulement qui donne lieu à une géométrie acoustique semblable à la géométrie autour d'un trou noir? La réponse est oui.

Les trous noirs acoustiques

Pour fabriquer un trou noir acoustique, il «suffit» d'utiliser une tuyère de Laval (voir la figure 4). Il s'agit d'un dispositif composé d'une conduite cylindrique présentant un étranglement conçu pour accélérer le fluide à une vitesse supersonique tout en s'assurant que l'écoulement reste régulier. Ainsi, la vitesse du courant dans la tuyère atteint puis dépasse la vitesse du son dans le fluide sans provoquer de déflagration sonore comme cela se produit généralement lors du franchissement du mur du son. La géométrie acoustique associée à cet écoulement est très semblable à celle d'un trou noir. On le vérifie en analysant les trajectoires suivies par les ondes sonores (voir la figure 4). Dans la région où l'écoulement est supersonique, les ondes sonores qui se propagent à contre-courant sont inexorablement entraînées vers l'aval, comme le sont les ondes lumineuses dans la région interne d'un trou noir. La frontière de cette région, la section de la tuyère où le fluide franchit la vitesse du son, joue le même rôle que l'horizon du trou noir : elle sépare les ondes en deux classes, celles qui peuvent remonter vers l'amont, et celles qui ne le peuvent pas. En outre, dans la région subsonique, les ondes qui remontent le courant perdent de l'énergie en s'éloignant de l'horizon, comme le font les photons soumis au rougissement gravitationnel. Ainsi, on

retrouve les principales propriétés qui caractérisent l'horizon d'un trou noir.

L'étude des trous noirs acoustiques se révèle être bien davantage qu'une amusante analogie, et ceci pour deux raisons. Tout d'abord, on espère réaliser des expériences en laboratoire qui mettraient en évidence le rayonnement de Hawking (voir l'encadré page 42), c'est-à-dire des expériences où serait détecté un flux thermique de phonons provenant de fluctuations quantiques au voisinage d'un horizon acoustique. Rappelons qu'en ce qui concerne les trous noirs que l'on observe dans l'Univers, leur rayonnement de Hawking a une température si basse (un dix-millionième de kelvin) qu'il est indétectable et le restera. Par conséquent, il est très important de pouvoir vérifier expérimentalement cette prédiction de la mécanique quantique dans un espace-temps courbe.

De surcroît, cette analogie a d'ores et déjà éclairé les physiciens quant au rôle des fréquences très élevées que l'on trouve à l'origine du rayonnement de Hawking. Comme nous l'avons souligné, en vertu des effets de rougissement qui tendent vers l'infini au voisinage de l'horizon, les photons que nous recevons sont les

témoins d'une physique qui nous est inconnue. La comparaison entre phonons et photons va nous aider à savoir si les propriétés de ce rayonnement dépendent ou non de cette physique inconnue. Voici comment.

Les propriétés des phonons de petite longueur d'onde (donc de haute fréquence et de haute énergie) sont bien connues et diffèrent notablement de celles des photons. Lorsque la longueur d'onde d'un phonon s'approche de la distance intermoléculaire (de l'ordre de quelque 10^{-10} mètre), ses propriétés changent radicalement. De manière imagée, on peut dire que le phonon devient sensible au caractère granulaire de la matière qui compose le fluide, ou, si l'on veut, à la «granulation de l'espace-temps» où il voyage. La conséquence de cette sensibilité est que les phonons de fréquences différentes se propagent à des vitesses différentes.

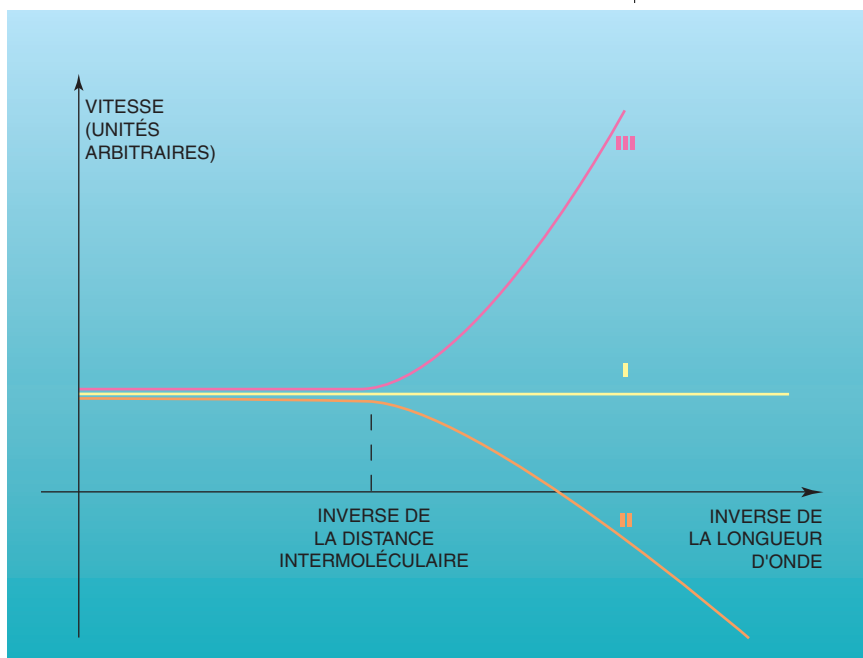
Les physiciens nomment relation de dispersion la loi qui donne la vitesse d'une onde en fonction de sa fréquence ou de l'inverse de sa longueur d'onde. Dans la nature, trois cas se présentent (voir la figure 5). Le premier cas, que nous qualifierons de type I, caractérise la propagation de la lumière dans le vide : il n'y a pas

Qu'est-ce que l'échelle de Planck?

Par son comportement très régulier, la nature nous révèle l'existence de constantes fondamentales qui relient certaines quantités physiques dans un rapport constant. Ainsi, les trois théories qui fondent la physique du XX^e siècle se caractérisent chacune par leur constante fondamentale. La relativité restreinte stipule que la fréquence f d'une onde lumineuse dans le vide est reliée à sa longueur d'onde λ par la relation : $f\lambda = c$, où c est la vitesse de la lumière. La relativité générale, quant à elle, relie la masse d'un objet à la courbure de l'espace-temps qui l'entoure. Ainsi, le rayon de l'horizon d'un trou noir de masse M est donné par la formule $R = 2GM/c^2$, où G est la constante de gravitation de Newton. Enfin, la mécanique quantique relie la fréquence d'un photon à son énergie en stipulant qu'une onde lumineuse de fréquence f est formée de photons dont l'énergie est $E = hf$, où h est la constante de Planck.

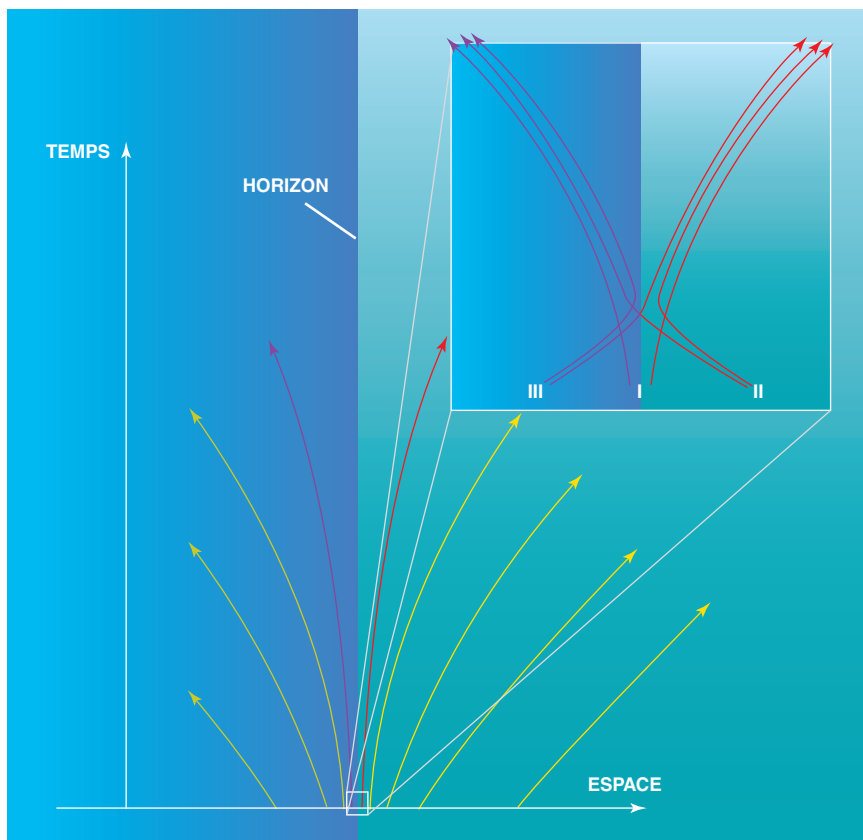
Dès que Planck découvrit cette relation, il remarqua que les constantes c , G , et h définissent un système d'unités fondamentales. La longueur de Planck vaut $l_p = \sqrt{Gh/c^3}$ soit environ 2×10^{-35} mètre. On en déduit, grâce à la relation $f_p = l_p/c$, que la fréquence de Planck vaut environ 10^{43} hertz et que l'énergie de Planck, $E_p = hf_p$, vaut 10^{28} électronvolts. Pour des phénomènes caractérisés par ces échelles, les effets quantiques de la gravitation ne peuvent être négligés.

Que se passe-t-il dans ce cas? La situation n'est pas claire. D'une part, on manque de données expérimentales, car ces énergies sont hors de portée : les plus hautes énergies actuellement atteintes sont de l'ordre de 10^{12} électronvolts, c'est-à-dire 16 ordres de grandeurs au-dessous de l'échelle de Planck. Pour cette raison, les effets gravitationnels quantiques n'ont pas encore été observés. D'autre part, pour explorer théoriquement ces échelles, il faudrait disposer d'une théorie quantique de la gravitation. Hélas, la relativité générale et la mécanique quantique ne sont pas compatibles en l'état. C'est dans ce contexte incertain que la physique quantique des trous noirs prend tout son intérêt puisqu'elle fait appel à de très courtes échelles, plus petites que la longueur de Planck.



5. LA RELATION DE DISPERSION caractérise la variation de la vitesse d'une onde en fonction de l'inverse de sa longueur d'onde. Le cas I, caractérise la propagation de la lumière dans le vide : il n'y a pas de dispersion et la vitesse des ondes est constante, pour autant que nous le sachions. Les ondes sonores ne conservent pas ce comportement lorsque leur longueur d'onde s'approche de la distance intermoléculaire du fluide où elles se propagent. Soit la vitesse des ondes décroît pour s'annuler et devenir négative – les ondes rebroussement chemin – (cas II), soit la vitesse s'accroît (cas III).

de dispersion et la vitesse de l'onde est constante. Les deux autres cas caractérisent la propagation de phonons. Dans le cas II, leur vitesse diminue avec la fréquence (au point de s'annuler et de changer de signe), tandis que dans le cas III, leur vitesse augmente avec la fréquence. Ayant à notre disposition ces trois comportements différents, on peut comparer le rôle des photons de hautes fréquences dans le rayonnement des trous noirs gravitationnels et celui des phonons de hautes fréquences dans les trous noirs acoustiques. Les propriétés de ces rayonnements sont-elles différentes? Autrement dit, le rayonnement produit par les fluctuations quantiques au voisinage d'un horizon porte-t-il la trace de la relation de dispersion (de type I, II, ou III) à laquelle obéissent les particules qui le constituent?



6. LES PHOTONS ET LES PHONONS ont des comportements semblables dans un espace-temps qui comporte un horizon. Toutefois, lorsque l'on compare les trajectoires qu'ils adoptent très près de l'horizon, des différences apparaissent. Le cas I correspond aux photons. Leurs trajectoires se rapprochent infiniment près de l'horizon, ce qui donne lieu à des fréquences qui tendent vers l'infini. Les cas II et III correspondent aux deux relations de dispersion des phonons. Les trajectoires qui en résultent tiennent compte du fait que la vitesse des phonons dépend de leur fréquence et que cette fréquence varie quand ils s'approchent ou s'éloignent de l'horizon. Dans le cas II, des phonons émis dans la région subsonique ralentissent, puis rebroussement chemin près de la frontière. Dans le cas III, certains phonons émis dans la région supersonique accélèrent au voisinage de l'horizon et parviennent à le franchir. Cependant, lorsqu'ils s'éloignent de l'horizon, ces trois types de particules adoptent les mêmes trajectoires. Ainsi, un observateur lointain ne pourra pas déterminer les conditions microscopiques de leur production près de l'horizon, car, avant de lui parvenir, les particules auront «oublié» leur origine.

Un oubli «miraculeux»

La réponse est non. Ceci est remarquable, car, au moment où les particules ont été créées près de l'horizon, leurs trajectoires dépendaient fortement de la relation de dispersion (voir la figure 6). En effet, en se rapprochant de l'horizon, la fréquence des particules augmente très fortement. Si elles obéissent à une relation de dispersion de type II ou de type III, leurs vitesses varient également. Ainsi, dans le cas II, les phonons reçus par un observateur lointain ralentissent en s'approchant de l'horizon, puis rebroussement chemin. Dans le cas III, au contraire, ils proviennent de l'autre côté de l'horizon! Toutefois, dans ces deux cas, lorsqu'ils s'éloignent de l'horizon, les phonons subissent un «rougissement» qui les ramène dans le domaine de fréquence où la dispersion ne se fait plus sentir. Ils retrouvent alors un comportement semblable à celui des photons. Ainsi, en s'éloignant du trou noir acoustique, on assiste à un effacement des propriétés microscopiques du rayonnement quantique. Nous pouvons raisonnablement penser que cet effacement a également lieu pour les trous noirs gravitationnels. Grâce à ce résultat, on peut accorder une plus grande confiance aux propriétés du flux de Hawking bien que l'on ignore tout de la physique au-delà de l'échelle de Planck.

Outre ce résultat important, l'examen des trajectoires des phonons au

	ORIGINE	DESCRIPTION CLASSIQUE	DESCRIPTION QUANTIQUE	VITESSE DE PROPAGATION	ORIGINE DE LA COURBURE	LIMITATION AUX COURTES LONGUEURS D'ONDE
SON	MOUVEMENT COLLECTIF DES MOLÉCULES	ONDE SONORE	PHONON	ENVIRON 300 MÈTRES PAR SECONDE	ÉCOULEMENT DU FLUIDE	DUE À LA GRANULATION DU MILIEU POUR DES LONGUEURS DE L'ORDRE DE LA DISTANCE INTERMOLECULAIRE (10^{-10} MÈTRE)
LUMIÈRE	ÉLECTRO-MAGNÉTISME	ONDE ÉLECTRO-MAGNÉTIQUE	PHOTON	300 000 KILOMÈTRES PAR SECONDE	PRÉSENCE DE MATIÈRE ET D'ÉNERGIE	DUE AUX EFFETS INCONNUS DE LA GRAVITATION QUANTIQUE À L'ÉCHELLE DE PLANCK (10^{-35} MÈTRE)

7. COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS des ondes sonores et des ondes lumineuses.

voisinage de l'horizon montre qu'ils ne subissent pas un effet Doppler infini, quelle que soit leur relation de dispersion. Le seul cas où, pour expliquer le rayonnement de Hawking, on doit faire appel à des particules qui sont créées infiniment près de l'horizon est celui de la dispersion exactement nulle, c'est-à-dire dans le cas 1 (voir la figure 6). Ce comportement pathologique est celui des photons, en vertu même du principe de relativité qui stipule que leur vitesse est indépendante de la fréquence. Par conséquent, pour éliminer cette pathologie, il semble qu'il faille renoncer au principe de relativité, tout au moins au voisinage de l'horizon d'un trou noir.

L'éther et la gravitation quantique

Cette dernière remarque peut servir de fil conducteur pour tenter de marier la théorie de la gravitation (la relativité générale) et la mécanique quantique. En effet, il faut souligner le fait que, jusqu'à présent, les effets de la gravité quantique ont été négligés : si la lumière a bien été traitée de façon quantique, le champ de gravitation qui caractérise la géométrie de l'espace-temps a, lui, été traité de manière classique. Dans cette approximation dite «semi-classique», on n'a pas tenu compte des déformations que les photons impriment, du fait de leur propre énergie, à l'espace-temps où ils voyagent. Cette approximation n'est plus valable pour des photons dont l'énergie approche l'échelle de Planck et encore moins pour des photons dont les énergies tendent vers l'infini, comme ceux que l'on trouve à l'origine du rayonnement des trous noirs.

Toute l'expérience des physiciens tend à montrer que de tels infinis n'apparaissent pas dans la réalité. Ils n'apparaissent dans les théories que parce qu'on a utilisé des hypothèses par trop simplificatrices. Dans tous les cas connus, il existe un mécanisme jusque-là négligé qui élimine le comportement pathologique. Si l'on se fie à cette expérience, on devrait assister à une disparition des photons de très haute énergie lorsqu'on prendra en compte les effets de la gravité quantique. Par conséquent, il faudra que le comportement des photons de haute énergie diffère de celui des photons de basses énergies qui, lui, est correctement décrit par l'approximation semi-classique. Ce changement de comportement aux hautes fréquences rappelle celui que présentent les phonons lorsque leur longueur d'onde est du même ordre de grandeur que la distance intermoléculaire du fluide où ils se propagent. Tout se passera alors comme si les photons voyageaient dans un espace-temps granulé. L'échelle de cette granulation sera proche de l'échelle de Planck et elle fixera la frontière entre le comportement des ondes lumineuses de haute et de basse énergie.

Si la théorie quantique de la gravitation revient à considérer l'espace-

temps comme un milieu granulé, l'analogie entre la physique de l'espace-temps et l'hydrodynamique se révélera plus pertinente encore qu'on ne le pensait. Cela constituera un amusant retournement de situation car, en adoptant la relativité restreinte, Einstein avait pensé débarrasser la physique de la notion d'éther, l'hypothétique substrat qui devait baigner tout l'espace-temps et dont les vibrations étaient censées donner lieu à la lumière (en stricte analogie avec les ondes sonores). Cependant, en se débarrassant de l'éther, on perd la possibilité de distinguer le comportement des hautes et des basses énergies puisque le principe fondamental de la relativité – l'invariance de la vitesse de la lumière – implique que les propriétés des photons sont indépendantes de l'échelle de longueur considérée. Einstein pouvait-il imaginer que le difficile mariage de la relativité générale et de la mécanique quantique conduirait à ce retournement de situation ?

Lors d'un congrès Solvay où les partisans de la mécanique quantique triomphaient, il aurait glissé à son ami Paul Ehrenfest : «Je ris seulement de leur naïveté. Qui sait qui devra rire dans quelques années.» Croyait-il si bien dire ?

Renaud PARENTANI enseigne à l'Université de Tours, et mène ses recherches au sein du Laboratoire de mathématiques et physique théorique.

Einstein, Le livre du centenaire, sous la direction de A.P. French, Hier & demain, 1979.

Les trous noirs, dossier hors-série de *Pour la Science*, juillet 1997.

W.G. UNRUH, *Experimental black hole eva-*

poration, in *Physical Review Letters*, vol. 46, pp. 1351-1353, 1981.

W.G. UNRUH, *Sonic analog of black holes and the effect of high frequencies on black hole evaporation*, in *Physical Review D*, vol. 51, pp. 2827-2838, 1995.

S. CORLEY ET T. JACOBSON, *Black hole lasers*, in *Physical Review D*, vol. 59, pp. 124 011-124 017, 1997.