



<v Les physiciens Germain Rousseaux, Jeff Steinhauer et Ulf Leonhardt traquent les trous noirs dans... l'eau, les atomes et la lumière!

REPÈRES En alliant mécanique quantique et relativité générale, le physicien Stephen Hawking est, dans les années 1970, parvenu à un résultat stupéfiant : les trous noirs, à qui rien ni personne ne peut échapper, émettent néanmoins une radiation. Trop peu intense, cette "radiation Hawking" est indétectable à partir d'un trou noir astrophysique. Mais plusieurs groupes de physiciens seraient sur le point de la débusquer en laboratoire.

Trous noirs

Ils les recréent en laboratoire

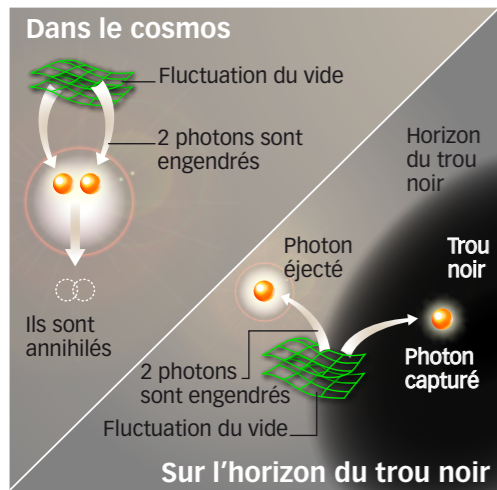
Par Mathieu Grousseau



Il y a dix-huit mois, l'hypothèse selon laquelle des mini-trous noirs pourraient être engendrés par le nouvel accélérateur de particules géant du Cern, à la frontière franco-suisse, provoquait l'émoi. N'était-il pas irresponsable de risquer de créer un de ces astres si denses que rien ne peut échapper à leur gravité, au point que même la lumière, une fois entraînée dans leur giron, n'a plus aucune chance de s'en extraire? Le monde ne risquait-il pas d'être englouti dans cette expérience hors norme? A Genève, l'hypothèse fut considérée... sans déclencher la moindre panique. Car aux dires des spécialistes, elle s'avère très hautement improbable. Pourtant, loin du

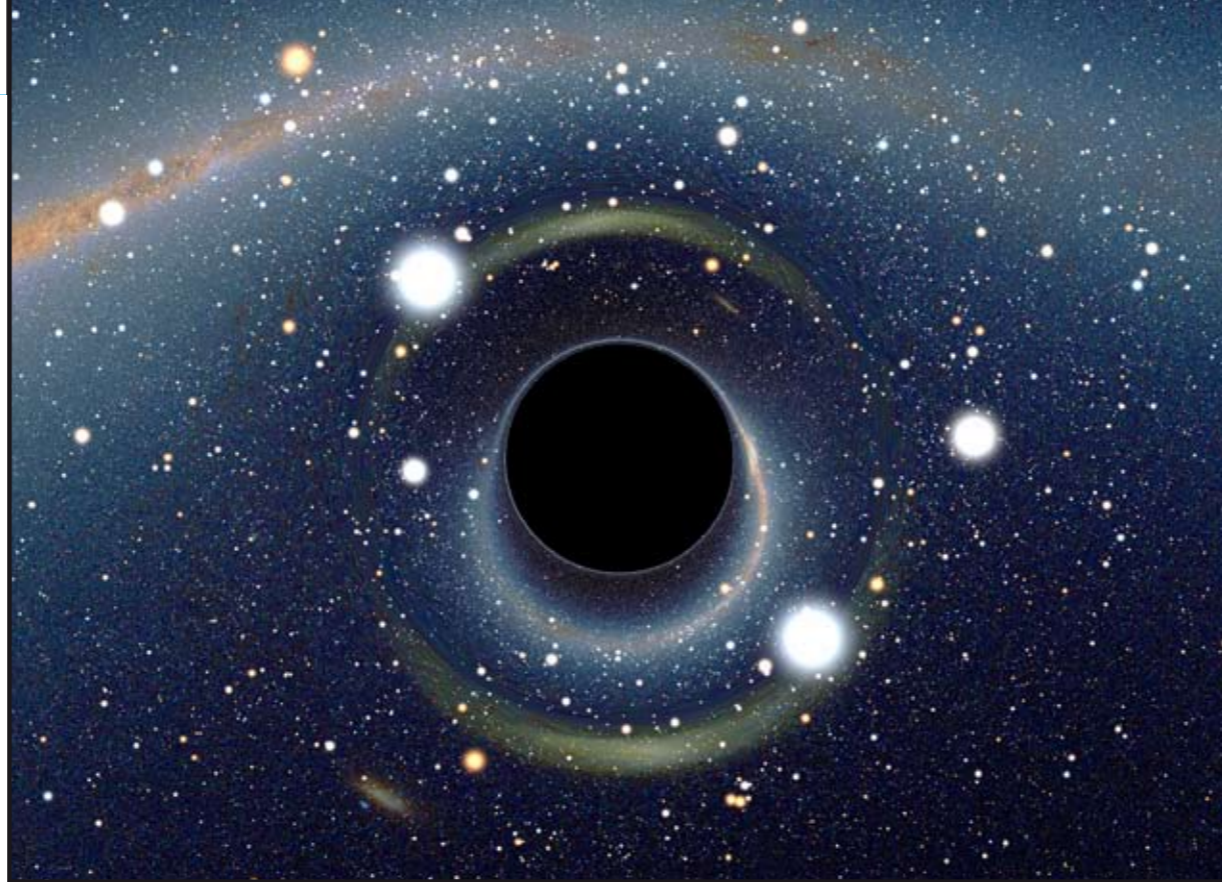
fracas de la Big Science expérimentée au Cern, d'autres physiciens ont réellement entrepris d'étudier, entre les quatre murs de leur laboratoire, la possibilité de faire surgir ces fascinants monstres astrophysiques.

Et d'aucuns sont déjà parvenus à en créer! Ces scientifiques seraient même sur le point de mettre en évidence l'une de leurs plus étonnantes propriétés: la radiation Hawking. Prédit dans les années 1970 par le célèbre physicien britannique, ce rayonnement prêté aux trous noirs est actuellement l'une des deux seules prédictions que la théorie quantique (qui s'applique dans le monde infiniment petit des particules) parvient →



Des photons peuvent échapper à l'attraction d'un trou noir

Dans le cosmos, les photons engendrés naturellement par les fluctuations du vide sont annihilés. Au contraire, lorsqu'une paire de photons émerge sur l'horizon d'un trou noir, l'un est happé par le trou noir (modélisé ci-contre), l'autre est éjecté vers l'extérieur, constituant une radiation. Prédite par Hawking, celle-ci reste à démontrer.



« Ici, un laser devrait permettre d'obtenir une forme de trou noir dans des atomes froids. »

LES TROUS NOIRS ÉTUDIÉS...

DANS LES ATOMES

Depuis 1995, les physiciens désireux d'explorer les phénomènes quantiques disposent d'un précieux terrain d'expérience : les condensats de Bose-Einstein. Imaginé par Einstein soixante-dix ans plus tôt, cet état singulier de la matière est formé par une collection d'atomes refroidis à des températures proches du zéro absolu, dans lequel les atomes perdent leur individualité : ils ne forment plus qu'un seul objet quantique. Et selon Renaud Parentani, « ils offrent une vraie opportunité de tester expérimentalement les propriétés de la radiation Hawking! »

En 2009, Jeff Steinhauer et son équipe, à l'Institut de technologie d'Israël, ont franchi une étape cruciale dans cette direction : ils ont réussi à créer un analogue de trou noir. Comment ? En « poussant » violemment les atomes formant un condensat avec une impulsion laser. Au point que leur vitesse dépasse la vitesse du son dans ledit condensat. Comme le précise le scientifique, « cela a entraîné la formation d'un horizon pour ondes acoustiques ». En effet, une onde incidente pénétrant dans le condensat dans le sens opposé à son déplacement n'a plus la moindre chance de le traverser et d'en ressortir. Elle est prisonnière, à l'instar de tout ce qu'engloutissent les véritables trous noirs. Les physiciens israéliens ont-ils pour autant

détecté l'émission tant espérée de quanta de sons, nés des fluctuations quantiques spontanées du condensat, au niveau de l'horizon – autrement dit, l'équivalent de la radiation Hawking dans leur système ? Pas encore. Car d'après les calculs, la température, actuellement 0,3 nanokelvin, y est encore dix fois trop élevée pour que la radiation puisse être détectée. Reste donc aux expérimentateurs à imaginer comment contourner le problème afin que se trahisse la fameuse radiation. Les choses pourraient bientôt s'accélérer, puisque le titulaire du prix Nobel 2001, Eric Cornell, premier physicien à avoir produit un condensat de Bose-Einstein avec Carl Wieman, à l'université du Colorado, pourrait se lancer dans la course. Avec, qui sait, un second Nobel à la clé!

→ à porter dans le cadre de la relativité générale (où évoluent les astres). A dire vrai, on ne parle pas là de trous noirs gravitationnels, susceptibles d'avaler la Terre en un instant. Mais de ce que les scientifiques appellent des « analogues ». Soit des systèmes physiques *a priori* très différents de l'objet initial à étudier, mais dont les

Tout commence en 1973. A la suite de discussions avec John Wheeler, son directeur de thèse, Jacob Bekenstein, alors à Princeton, met en lumière un mystérieux phénomène. En appliquant les lois de la thermodynamique à l'étude des trous noirs, il arrive à la conclusion que ceux-ci ont une température. Or, c'est un phénomène bien connu des

quantique dans la physique des trous noirs qui, jusqu'alors, s'est contentée du cadre classique de la relativité générale. Plus précisément, il montre que même en l'absence de toute onde lumineuse incidente, les fluctuations quantiques du vide peuvent faire surgir du néant une paire de photons (des grains de lumière) à cheval sur l'horizon d'un trou noir, cette frontière au-delà de laquelle tout ce qui est entré dans le giron de l'astre est irrémédiablement perdu pour le reste de l'Univers. Or, dans ce cas, alors que l'un des photons émis en direction du trou noir tombera irrémédiablement dans l'abîme, l'autre, émis vers l'extérieur échappera à l'attraction de l'astre, constituant la fameuse radiation.

La prédiction de Hawking fait la joie des théoriciens. De fait, son expression mathématique emprunte aux deux grandes théories de la physique et, de ce fait, mêle les quatre constantes fondamentales : *c*, la vitesse de la lumière ; *h*, la constante de Planck de la

mécanique quantique ; *G*, la constante de la gravitation ; et *k*, la constante de Boltzmann de la thermodynamique. Hélas, ils déchantent rapidement. Car d'après les observations indirectes recueillies sur les trous noirs qui peuplent notre univers, il apparaît que ces derniers devraient émettre une radiation Hawking d'une si faible intensité qu'elle restera à jamais noyée dans le bruit de fond cosmique. Autrement dit, personne ne pourra jamais la détecter. Et donc la valider au-delà de la théorie...

IMAGINER DES ANALOGUES

C'était sans compter sur ces fameux « analogues » ! Bill Unruh, de l'université de Colombie-Britannique, à Vancouver, remarque en effet en 1981 que les ingrédients nécessaires à l'apparition de la radiation Hawking ne sont pas l'apanage de la gravitation. Ces ingrédients sont : un espace-temps déformé au point de délimiter un horizon dont rien ne peut s'échapper →

Dans quelle expérience se manifestera en premier la radiation de Hawking ?

propriétés sont régies par les mêmes équations exactement. Décevant ? Pas si l'on considère que ces analogues sont l'unique chance d'observer la radiation Hawking. Alors même que, comme l'indique Renaud Parentani du Laboratoire de physique théorique, à Orsay, « la non-existence de la radiation Hawking, parce qu'elle se fonde à la fois sur la mécanique quantique, la relativité générale et la thermodynamique, remettrait en cause notre compréhension de pans entiers de la physique ».

physiciens, tout corps pourvu d'une température émet un rayonnement électromagnétique dit thermique. Le résultat ne manque pas d'étonner, puisque les trous noirs sont censés ne rien régurgiter de ce qu'ils avalent, pas même le moindre grain de lumière.

Quelques années plus tard, à Cambridge, Stephen Hawking, dans un premier temps farouchement opposé aux conclusions de Bekenstein, comprend que cette bizarrerie nécessite l'introduction d'une dose de mécanique

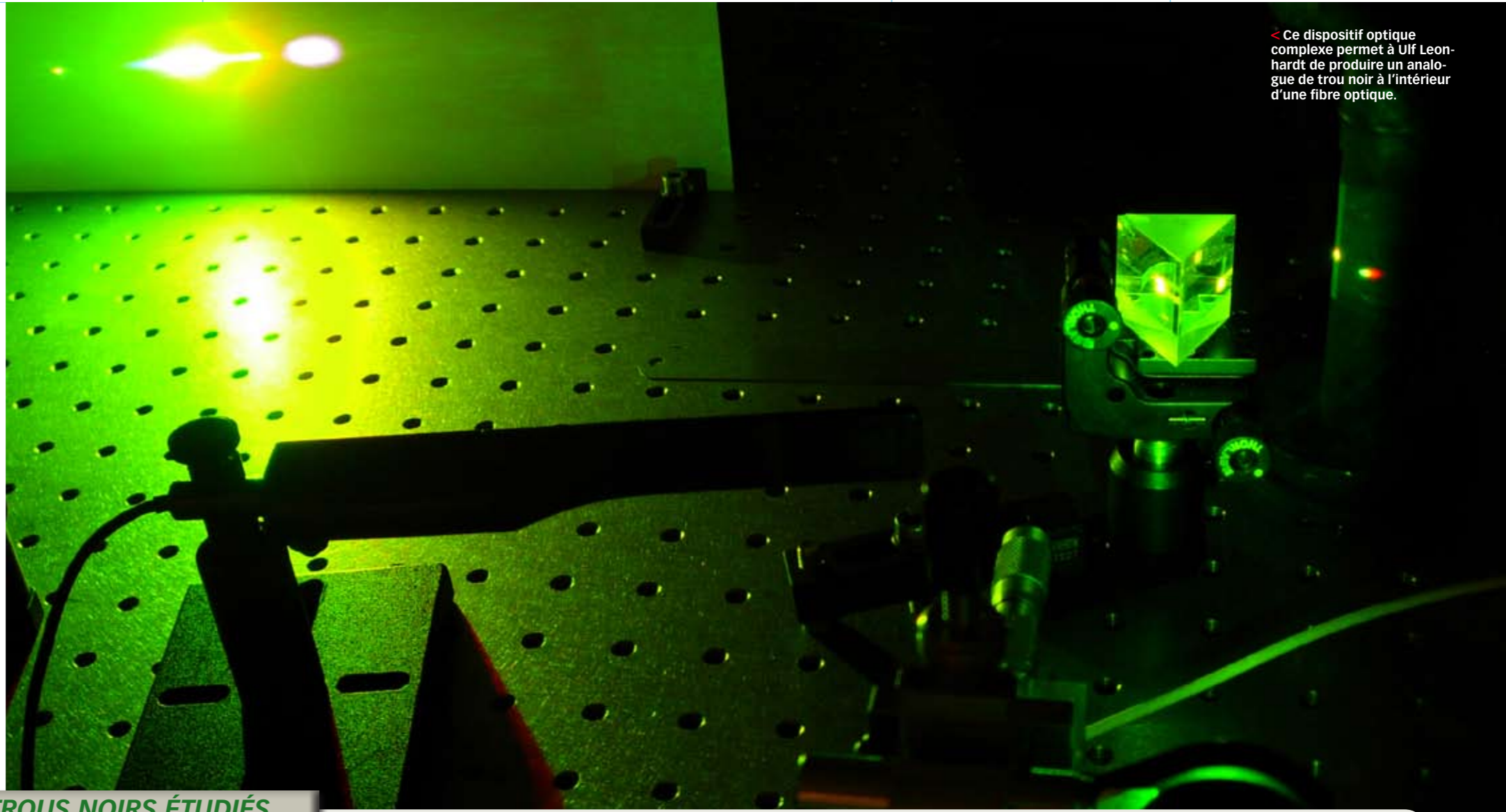
→ (ce qui, dans le cas des trous noirs, est le fruit de la gravitation), et la prise en compte des propriétés quantiques du milieu dans lequel ces trous noirs évoluent. Soit, dans le cas astrophysique, celles du vide.

En pratique, Unruh imagine, en guise d'« espace-temps » courbe, un fluide compressible animé d'un mouvement accéléré. Fluide qui, du fait de ce mouvement, entraverait les évolutions d'une onde acoustique se propageant en sens contraire... au point de la retenir dans une région limitée de l'espace, autrement dit un trou noir ou encore son exact opposé: un trou blanc! À l'inverse de son insatiable cousin, celui-ci agit comme un mur infranchissable, il est incapable d'avalé quoi que ce soit. Ce qui ne change rien à l'affaire: «*Conceptuellement, un trou blanc n'est rien d'autre qu'un trou noir dès lors que le temps s'écoule à l'envers*», explique Renaud Parentani. L'horizon devrait donc aussi être le siège d'une émission de quantas lumineux présentant toutes les propriétés de la radiation Hawking.

DE LA PENSÉE À LA RÉALISATION

Ensuite, même s'il ne s'agit que d'une expérience de pensée, Unruh tire les conséquences d'un traitement quantique de cette situation. Il montre alors que l'horizon qu'il a défini émet spontanément des quantas acoustiques même en l'absence de toute onde acoustique initiale. C'est donc bien une radiation Hawking qui apparaît théoriquement ici! «*Du point de vue de leur description mathématique, les deux situations présentent une analogie profonde*, explique Bill Unruh. *Ça a été une surprise pour moi, parce que jusqu'ici, je pensais que la gravitation offrait un cadre exclusif pour la radiation Hawking.*»

Reste qu'à l'époque, l'analogie proposée par Unruh n'est qu'une →



< Ce dispositif optique complexe permet à Ulf Leonhardt de produire un analogue de trou noir à l'intérieur d'une fibre optique.

LES TROUS NOIRS ÉTUDIÉS...

DANS LA LUMIÈRE

A priori, rien de commun entre un trou noir et... une fibre optique. Si ce n'est qu'avec ce type de matériau, Ulf Leonhardt, à l'université de Saint Andrews, en Ecosse, espère être le premier à observer un analogue de la radiation Hawking émise par un

monstre astrophysique. Et, il faut l'admettre, ce spécialiste de l'optique non linéaire est bien parti. En 2008, il est en effet parvenu à créer l'équivalent de l'horizon d'un trou noir au sein d'une fibre optique. «*L'idée d'un tel analogue m'est venue en*

2000, précise-t-il. Mais ce n'est que quatre ans plus tard que j'ai trouvé le moyen de la mettre en pratique.» Pour engendrer un «espace-temps» courbe, Ulf Leonhardt a joué sur une propriété bien connue des opticiens: le fait qu'une impulsion

lumineuse, lors de sa propagation au sein d'un milieu matériel, en modifie localement l'indice de réfraction. Restait à trouver une configuration permettant d'engendrer une «déformation» suffisante pour qu'un rayon de lumière voie sa course ralentie, voire arrêtée net, comme dans un trou noir. Pour ce faire, le

scientifique allemand a envoyé une première impulsion lumineuse dans une fibre optique. Puis, une fraction de seconde plus tard, il a lancé à ses trousses une seconde impulsion, dont la longueur d'onde a été choisie de telle sorte qu'elle voyage plus vite que la première. Ainsi, on s'attend à ce que la seconde impulsion

rattrape la première. Or, il n'en est rien. En effet, la première impulsion modifiant l'indice de réfraction de la fibre sur son passage, elle ralentit la seconde dès lors que cette dernière la talonne d'un peu trop près, lui interdisant de la pénétrer. On obtient donc un trou blanc, tel celui de l'expérience de pensée d'Unruh (voir

article). Alors à quand sa détection de la fameuse radiation? Ulf Leonhardt s'avance: «*Un étudiant vient d'arriver dans notre laboratoire pour travailler sur la question. Je ne sais pas exactement à quelle distance nous nous trouvons du but, mais nous ne sommes plus très loin.*» Les paris sont lancés!

L'EXPÉRIENCE

CRÉATION DU TROU NOIR: par modification de l'indice de réfraction d'une fibre optique

QUI: Ulf Leonhardt, à l'université de Saint-Andrews (Ecosse)

NATURE DE LA RADIATION HAWKING ATTENDUE: optique (ou lumineuse)

SIGNE PARTICULIER: Ulf Leonhardt est mondialement reconnu pour ses travaux sur les matériaux, notamment les «capes» d'invisibilité

C. KUKLEWICZ

→ expérience de pensée qui semble difficilement réalisable. Parce que les communautés des théoriciens de la gravitation et des expérimentateurs de la matière condensée sont beaucoup trop éloignées pour que des projets communs émergent. Mais les choses évoluent. Au point que depuis 2008, plusieurs colloques ont été organisés afin de rapprocher les différentes communautés. Si bien que ces dernières années, en Israël, en Ecosse, à Vancouver ou encore à Nice, plusieurs groupes (voir pp. 101, 103 et 105.) sont parvenus à reproduire l'équivalent de l'horizon d'un trou noir sur leur paillasse, dans différents systèmes physiques!

MULTIPLICATION DES POSSIBILITÉS

Pour l'heure, personne n'a encore annoncé l'observation de la mystérieuse radiation. Mais c'est probablement pour bientôt. "On assiste à une multiplication des possibilités, indique Renaud Parentani. C'est désormais aux expérimentateurs de faire leur travail!" Certes, quelle que soit l'issue de ces expériences, elles ne seront jamais que des analogues, sans possibilité d'approcher ce Graal de la physique où mécanique quantique et relativité générale se rejoignent. Pour autant, elles offriront sans doute la seule possibilité d'étudier en détail l'une des prédictions les plus étonnantes de la physique. Et en la confirmant, elle évitera de plonger la physique dans une douloureuse remise en question. La radiation Hawking se manifesterait-elle en premier dans les atomes, dans la lumière, ou tout simplement dans l'eau? Petit tour d'horizon des expériences les plus prometteuses. ■

> C'est dans un canal à houle, à Sofia-Antipolis, que l'équipe de Germain Rousseaux tente de simuler une radiation Hawking macroscopique.



LES TROUS NOIRS ÉTUDIÉS...

DANS L'EAU

Pour le profane, c'est l'endroit le plus inattendu pour observer des trous noirs: une piscine! Mais pas pour Germain Rousseaux, du Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné, à Nice. Ni pour le théoricien inventeur des analogues de trous noirs lui-même, Bill Unruh. Tous deux se sont lancés dans l'expérience, l'un en France, l'autre au Canada. De fait, si la radiation Hawking résulte de l'émission spontanée de quantas de lumière, ce phénomène quantique possède une contrepartie classique a priori détectable dans un bon vieux système macroscopique! Exactement comme dans le cas du rayon laser! Comme l'a expliqué Einstein, ce rayon de lumière est un effet purement quantique: il résulte de l'émission de photons par des atomes lorsqu'ils se désexcitent. Quand l'émission est

spontanée, laissée au gré des soubresauts quantiques désordonnés des atomes, le processus ne donne lieu à aucune manifestation macroscopique particulière. Mais lorsque l'on stimule l'émission en excitant les atomes avec des photons identiques à ceux qu'ils émettent spontanément, le résultat est précisément l'effet laser, c'est-à-dire une émission de photons dits "cohérents". Or, cet effet est non seulement visible à l'œil nu, mais sa propagation est aussi parfaitement interprétable dans le cadre des équations de l'optique classique. La physique quantique n'est ici nécessaire que pour comprendre l'origine du phénomène, pas sa manifestation. De même, la radiation Hawking possède une face classique, potentiellement détectable dans un écoulement d'eau tout ce qu'il y a de plus classique. Précisément, il s'agit là encore de créer un horizon, qui cette fois résulte d'un courant dont la vitesse est supérieure à celle de vagues se propageant en sens inverse, créant une zone interdite pour ces dernières. Dans un tel système, dont la taille et la température empêchent définitivement la manifestation de tout effet

quantique, il est hors de question de détecter une radiation Hawking spontanée. Mais en ajustant correctement les propriétés de l'onde incidente, à l'aide d'équations hydrodynamiques extrêmement sophistiquées, il est en principe possible de stimuler une radiation Hawking macroscopique, qui prendra la forme de vaguelettes émises au niveau de l'horizon, dans le sens de l'écoulement. A ce jour, Germain Rousseaux et son équipe ont déjà mené deux campagnes de mesures. "Nous avons enregistré des phénomènes qui vont dans le bon sens, explique-t-il. Mais ça n'est que très récemment que nous avons développé la théorie permettant de les interpréter sans ambiguïté. Ce travail est en cours." De son côté, Bill Unruh ne s'étend pas sur l'état d'avancement de ses expériences, réalisées dans les immenses bassins à vagues de l'industrie maritime, florissante dans les environs de Vancouver. Tout juste concède-t-il: "Les expériences que Germain Rousseaux et moi-même réalisons sont les meilleures chances de détection de la contrepartie classique de la radiation Hawking." A suivre...

L'EXPÉRIENCE

CRÉATION DU TROU NOIR: par un courant hydrodynamique

QUI: Germain Rousseaux, au Laboratoire Jean-Alexandre Dieudonné, à Nice. Et Bill Unruh, à l'université de Colombie-Britannique

NATURE DE LA RADIATION HAWKING ATTENDUE: vaguelettes à la surface de l'eau

SIGNE PARTICULIER: la radiation Hawking est ici quasiment visible à l'œil nu

O. MONGE/MYOP

> EN SAVOIR PLUS

Le site de l'expérience d'Ulf Leonhardt: www.st-andrews.ac.uk/~ulf/fibre.html

