

et aux anisotropies du rayonnement fossile. Ce sont des tests assez forts ! À cette aune, la matière sombre chaude est quasiment éliminée, car le scénario qu'elle prévoit (la formation des superamas qui se fragmentent en amas, puis en galaxies...) n'est pas compatible avec ce qui est observé aujourd'hui : le film est inversé.

La matière noire froide résiste quant à elle assez bien. Elle explique à peu près correctement la hiérarchie des structures, et est compatible avec ce que l'on déduit des lentilles gravitationnelles et des anisotropies du fond diffus.

Reste la matière noire tiède, les neutrinos stériles. Elle a été un peu moins étudiée que les autres, mais parmi les variantes du modèle, les plus simples reproduisent les mêmes choses que la matière froide à grande échelle. Seuls des tests à l'échelle subgalactique distingueraient les deux théories, car elles font des prédictions différentes. Les travaux sont en cours. C'est par exemple le comptage de galaxies naines autour des galaxies, ou bien l'étude des courants stellaires que l'on observe dans des galaxies en interaction.

N'y a-t-il pas d'autre option ?

Jean-Pierre Luminet : Elle consiste à ne pas se casser la tête avec des particules de matière noire. On peut alors se tourner vers les théories de la gravitation modifiée, comme l'a fait en 1983 le physicien israélien Mordehai Milgrom avec *Mond* (pour *Modified Newtonian dynamics*). Schématiquement, l'idée consiste à dire que sur de grandes échelles, la gravité selon Newton est atténuée.

Le problème est que *Mond* ne fonctionne pas de la même façon selon les échelles. La théorie souffre d'un vrai problème d'universalité. Par ailleurs, de plus en plus d'observations la mettent en difficulté. On a découvert par exemple des galaxies, comme Dragonfly 44, constituées à 98% de matière noire. *Mond* est incapable de l'expliquer.

Autre possibilité, se tourner vers les fascinantes théories de gravité émergente. Le physicien Erik Verlinde s'est fait connaître depuis quelques années sur ce sujet, mais l'idée en revient au physicien américain Ted Jacobson. Il s'est inspiré dans les années 1990, des travaux de Jacob Bekenstein et Stephen Hawking sur l'entropie des trous noirs pour insister sur le fait qu'il y a une vraie corrélation entre la relativité générale et la thermodynamique. En quelques mots, la

structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués d'où la gravité émergerait : elle ne serait plus une interaction fondamentale. Dans des zones plus ou moins bien intriquées se crée quelque chose qui ressemble à l'énergie sombre répulsive. Et d'interactions avec la matière baryonique, surgirait une force supplémentaire, attractive cette fois, simulant très bien la matière noire non baryonique. La matière noire est devenue un artefact.

Erik Verlinde a commencé à appliquer sa théorie pour expliquer les courbes de rotation des galaxies spirales. Et il y est parvenu ! La prochaine étape consistera à utiliser la théorie pour rendre compte des anisotropies du fond diffus et des lentilles gravitationnelles. Il y a encore beaucoup de travail, mais c'est assez joli, il faut le reconnaître.

Laquelle parmi toutes ces théories aurait votre préférence ?

Jean-Pierre Luminet : Difficile de répondre. Je travaille actuellement à mon prochain livre qui récapitule les différentes approches en gravité quantique et pèse le pour et le contre de chacune. Dès

partie intégrante de la relativité générale et explique correctement les choses. Mais comme dans le cas du modèle standard des particules, les astrophysiciens ont proposé de nombreuses théories, des extensions de la théorie des cordes, des adaptations de la théorie quantique des champs... C'est enthousiasmant, certes, et c'est important d'avoir de l'imagination, mais la physique actuelle ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit de données expérimentales ?

James Peebles, Prix Nobel en 2019, n'est-il pas du même avis que vous ?

Jean-Pierre Luminet : En effet. Il a été l'un des premiers à reconnaître le travail de Georges Lemaître et à ressortir du « placard de la cosmologie » la constante dont on a bien besoin pour expliquer pourquoi la densité de l'Univers est quasiment proche de la densité critique alors que la matière baryonique noire n'en compose que 5%. Dès les années 1980 et la découverte de l'inflation, il a proposé de réintroduire la constante cosmologique. Mais il n'a pas été entendu.

Dans certaines théories, la structure intime de l'espace-temps serait constituée de bits quantiques intriqués

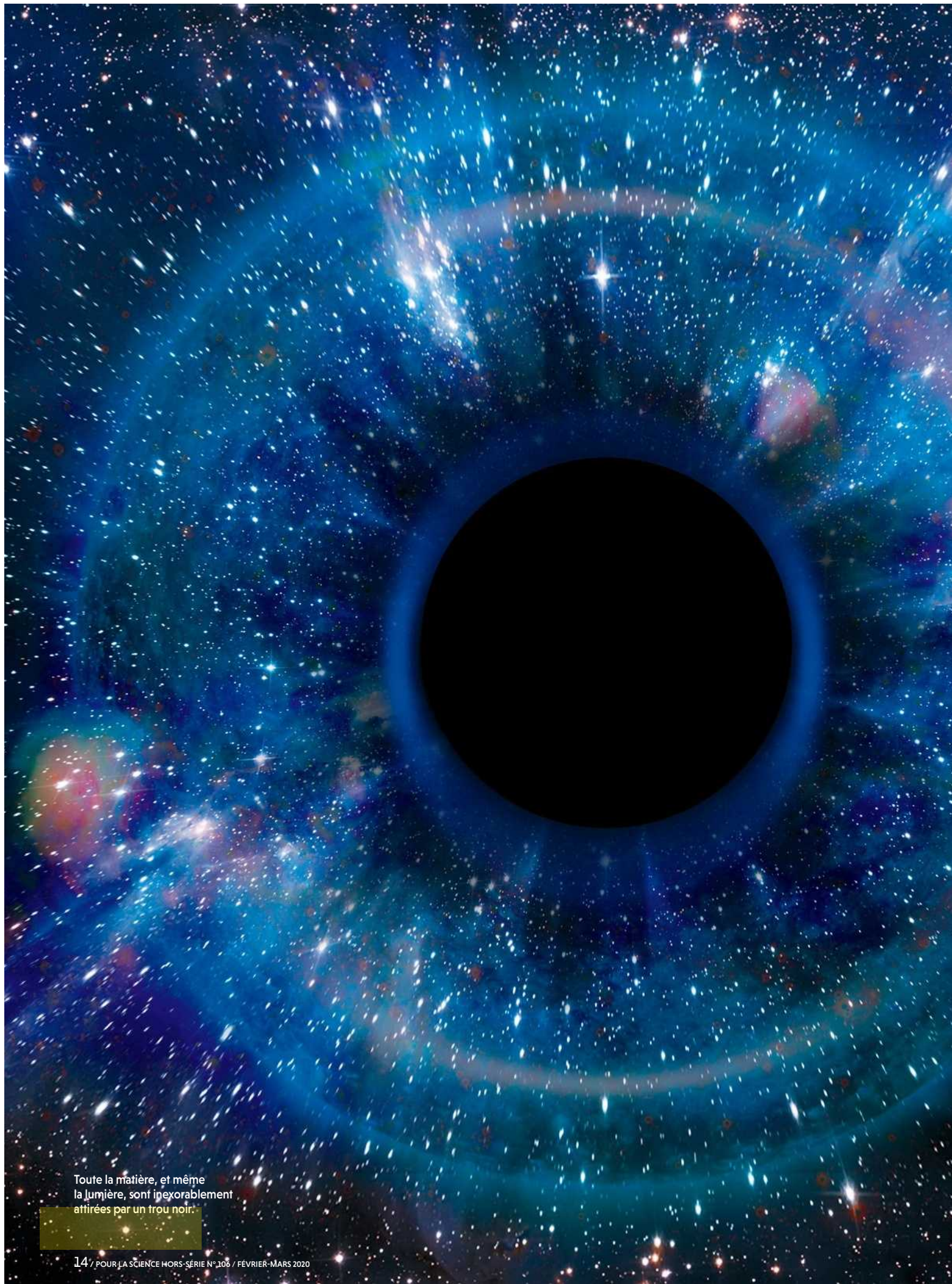
que j'en aborde une nouvelle, je suis séduit. Et puis, je passe à une autre...

Passons pour finir à l'énergie sombre, le fameux Λ . Que peut-on en dire ?

Jean-Pierre Luminet : Elle a été proposée pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, en 1998. Cependant, bien avant d'« inventer » l'énergie sombre, on avait déjà la constante cosmologique, dans la version de Georges Lemaître (voir *Indispensable constante cosmologique*, par J.-P. Luminet, page 92). Je continue à penser qu'elle fait

Par ailleurs, je l'admire beaucoup. C'est vraiment, avec George Ellis, et deux ou trois autres, l'un des vrais grands cosmologistes encore vivants qui maîtrisent à la fois la théorie, les observations... à l'occasion de son Nobel, je lui ai adressé un bref courriel de félicitations. À ma grande surprise, il m'a vite répondu que les messages comme le mien, « venus du passé », étaient jusqu'ici la meilleure chose qu'il retirait de son prix...

PROPOS RECUEILLIS
PAR LOÏC MANGIN.



Toute la matière, et même
la lumière, sont inexorablement
attirées par un trou noir.



© Shutterstock.com/Maxal Tamor

TROUS NOIRS SUPERSTARS

Les trous noirs, ces astres d'une densité folle, sont sous les feux de l'actualité ! D'abord, on a réussi à en prendre un en « photo », malgré son éloignement et sa petitesse. Ensuite, on leur doit les premières ondes gravitationnelles détectées. Cette validation de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein inaugure une façon inédite de scruter et d'étudier l'Univers, indépendante des photons. D'où le rêve enfin accessible de remonter aux tout premiers instants de l'Univers. S'ils ouvrent un nouvel horizon aux cosmologistes, les trous noirs ont-ils en eux-mêmes un avenir ? Ne sont-ils pas le stade ultime de l'évolution d'une étoile par exemple ? Pas sûr. Selon la théorie de la gravité à boucles, ils se transformeraient en... trous blancs. Troublant.

L'ESSENTIEL

● D'un trou noir, on ne peut prendre en photographie que la silhouette se découpant sur un fond lumineux.

● Pour y parvenir, on doit relever plusieurs défis, car un trou noir est très petit et très éloigné.

● L'interférométrie, c'est-à-dire la mise en réseau de télescopes, aide à les relever.

● Ainsi, l'EHT, un télescope virtuel de la taille de la Terre, a obtenu l'image du trou noir M87* en 2019.

L'AUTEUR



ALAIN RIAZUELO
est chargé de recherche
CNRS à l'institut
d'astrophysique de Paris.

L'épopée d'une image historique

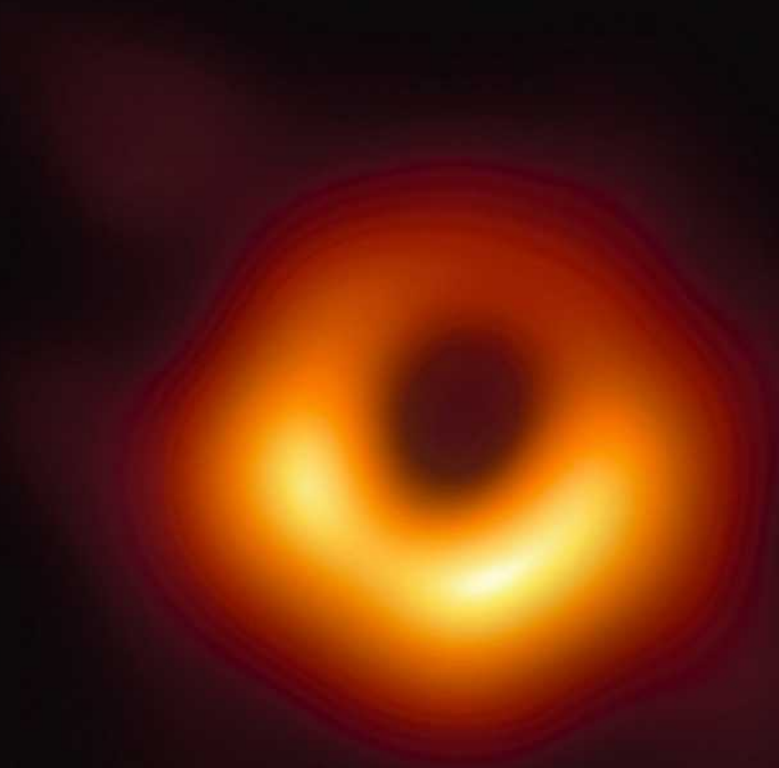
Prendre en photo un trou noir. Ce fut longtemps le but ultime des astronomes, un but finalement atteint en 2019 au prix de nombreux efforts. Retour sur une quête longue d'un quart de siècle.

P

armi vos nombreuses photos de vacances, vous avez nécessairement le cliché d'un ciel nocturne avec la Lune, des étoiles, voire la Voie Lactée pour les plus chanceux. Regardez-les attentivement, scrutez-les et essayez de repérer... un trou noir. Impossible, car d'ordinaire, prendre une image d'un astre, c'est arriver à distinguer sa lumière, parfois très

faible, sur le noir du ciel. Or avec un trou noir, c'est le contraire. Il n'émet pas de lumière, et la seule chose qu'on puisse faire pour le photographier, c'est de voir sa silhouette se découper sur un fond lumineux.

Or ce dernier est fourni par le trou noir lui-même, ou plutôt son environnement immédiat : quand l'astre avale la matière qui l'entoure, celle-ci s'organise sous la forme d'un disque dit « d'accrétion ». Plus la matière du disque est proche du trou noir, plus elle tourne vite autour de celui-ci. Deux anneaux de matière adjacents se frottent ainsi l'un à l'autre en raison de leur vitesse de rotation différente, ce qui chauffe la matière au point de la rendre très lumineuse. C'est elle qui fournit le rayonnement qui permettra de distinguer le trou



La première image jamais obtenue d'un trou noir, celui de la galaxie M87.

noir. Fin de l'histoire? Non, car les trous noirs sont des objets petits, très petits. C'est là que résidait le défi relevé par les astronomes de l'*Event Horizon Telescope* (EHT) en avril 2019.

Quand il ne tourne pas sur lui-même, le rayon d'un trou noir se calcule simplement: trois kilomètres par masse solaire. Un trou noir stellaire typique de dix masses solaires a donc un rayon de 30 kilomètres, ce qui est très petit. Depuis la Terre, aucune image détaillée de la surface d'un astéroïde de cette taille, même situé à «seulement» quelques centaines de millions de kilomètres, n'est possible avec des télescopes au sol. Et les trous noirs sont immensément plus éloignés. Sur les probables dizaines de millions de trous noirs de notre Galaxie, les quelques dizaines

connus sont tous à plusieurs milliers d'années-lumière, soit plusieurs millions de milliards de kilomètres.

UNE MOLÉCULE D'EAU À 30 KILOMÈTRES

Quelques chiffres illustrent la difficulté. Le plus souvent, la taille angulaire d'un objet de rayon R situé à une distance d est donnée par la formule $2R/d$, le résultat étant donné en radians. Pour un trou noir, la formule est légèrement plus favorable. Puisqu'un trou noir dévie la lumière, l'effet de focalisation lui confère (ou plutôt confère à sa silhouette) une taille environ 2,5 fois plus grande. Prenons l'exemple de Cygnus X-1, le plus célèbre des trous noirs stellaires, et le tout >