

POUR LA SCIENCE Édition française de Scientific American

SCIENCE

HORS-SÉRIE

M 01930 - 106H - F: 7,90 € - RD



FÉVRIER-MARS 2020
N° 106



PROUESSE
**LA PREMIÈRE
PHOTO D'UN
TROU NOIR**

MATIÈRE NOIRE
**TOUS LES
CANDIDATS AU
BANC D'ESSAI**

TROUS BLANCS
**LES SOSIES
DES TROUS
NOIRS**

DÉBAT
**VERS UNE
GRAVITATION
QUANTIQUE**

**« ET SI ON
RÉHABILITAIT
LA CONSTANTE
COSMOLOGIQUE
D'EINSTEIN ? »**

JEAN-PIERRE LUMINET

TROUS NOIRS

MATIÈRE NOIRE

ÉNERGIE SOMBRE

ENQUÊTE SUR L'UNIVERS NOIR

U N



N E M E U R T

J A M A I S.

EN TRIANT VOS JOURNAUX,
MAGAZINES, CARNETS, ENVELOPPES,
PROSPECTUS ET TOUS VOS AUTRES
PAPIERS, VOUS AGISSEZ POUR UN MONDE
PLUS DURABLE. DONNONS ENSEMBLE
UNE NOUVELLE VIE À NOS PRODUITS.

[CONSIGNESDETRI.FR](https://consignesdetri.fr)

CITEO

Le nouveau nom d'Eco-Emballages et Ecofolio

GROUPE POUR LA SCIENCE

Directrice des rédactions: Cécile Lestienne

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Révisseuses: Maud Bruguière, Anne-Rozenn Jouble

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Gondonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

Stagiaire: Lucas Gierczak

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Community manager: Aëla Keryhuël

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Quercel, Ingrid Leroy, Charlotte Calament Véronique Marmont,

Révisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Cheffe de produit: Charline Buché

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Secrétariat général: Nicolas Bréon

Fabrication: Marianne Sigogne et Zoé Farré-Vilalta

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro: William Rowe-Pirra

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements

Pour la Science - 19 rue de l'Industrie - BP 90053

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (16 numéros)

France métropolitaine: 79 euros - Europe: 95 euros

Reste du monde: 114 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Stéphanie Troyard

Tél. 04 88 15 12 48

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Acting editor in chief: Curtis Brainard

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science », doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris.

© Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ».

En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Italie

Taux de fibres recyclées: 0%

«Eutrophisation» ou «Impact sur l'eau»: **Pror U.008kg/tonne**

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.



10-32-2813

/ Certifié PEFC / pefc-france.org



LOÏC MANGIN
Rédacteur en chef adjoint

L'Univers et les toiles noires

Durant toute sa carrière, il n'a eu de cesse d'explorer les rapports entre le noir et la lumière, de transformer avec eux l'espace et le temps et de faire surgir l'une de l'autre à travers des textures, lisses ou fibreuses. Un cosmologiste? Non, un peintre, Pierre Soulages, qui a eu 100 ans le 24 décembre 2019. Il est célèbre pour son outrenoir, son «noir-lumière», inventé en 1979, à partir d'un tableau qu'il pensait raté. Depuis, il peint avec la lumière réfléchie par les différents états de surface du noir de ses toiles.

Mais ses préoccupations sont bien celles des cosmologistes qui aimeraient faire la lumière sur quelques entités ténébreuses de l'Univers, l'énergie sombre, la matière noire et les trous noirs. Ces derniers, les moins obscurs de la trilogie, ont récemment été sous les feux de l'actualité: entre la première image d'un de ces astres et la détection des ondes gravitationnelles que la fusion de deux trous noirs émet, c'est une nouvelle «lumière» qui est portée sur notre Univers.

Les deux autres, la matière noire et l'énergie sombre, sont plus discrètes. Selon le modèle standard de la cosmologie, la première explique la dynamique des galaxies et des structures à plus grande échelle, tandis que la seconde rend compte de l'expansion observée de l'Univers. Qui plus est, elles représentent à elles deux 95% du contenu de l'Univers. Problème: on ne sait pas - encore - en quoi elles consistent.

Ce numéro dresse l'état de l'art sur les moyens déployés pour résoudre ces mystères. Et les astrophysiciens ne ménagent pas leurs efforts! Nouvelles théories, candidats inédits, projets ambitieux de détecteurs... L'Univers devient alors «une peinture» au sens de Soulages, «un tout organisé [...] sur lequel viennent se faire et se défaire les sens qu'on lui prête.»

Au moment où il inventait l'outrenoir, au réveil d'une nuit agitée par le tableau «raté» de la veille, Pierre Soulages a eu cette phrase: «Le noir avait tout envahi, à tel point que c'était comme s'il n'existait plus.» On souhaite la même épiphanie aux cosmologistes!

SOMMAIRE

POUR LA
SCIENCE
HORS-SÉRIE

N° 106

Février-Mars 2020

TROUS NOIRS, MATIÈRE NOIRE
ÉNERGIE SOMBRE

Enquête sur l'Univers noir

Constituez
votre collection
de *Hors-Séries*
Pour la science
Tous les numéros
depuis 1996

pouirlascience.fr

P. 6

Repères

Le côté obscur de l'Univers

P. 10

Avant-propos

JEAN-PIERRE LUMINET

« Je continue à penser que
la constante cosmologique
fait partie intégrante
de la relativité générale
et explique correctement
les choses »



Entretien exclusif avec
l'astrophysicien, romancier,
poète, compositeur...
sur les mystères de l'Univers.



TROUS NOIRS SUPERSTARS

P. 16

L'épopée d'une image historique

Alain Riazuelo

Retour sur une quête longue d'un quart
de siècle: la première photo d'un trou noir.

P. 22

À l'écoute des ondes gravitationnelles

Damir Buskulic et Loïc Villain

Les ondes gravitationnelles ont été détectées
directement pour la première fois fin 2015.

P. 32

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

Olivier Minazzoli

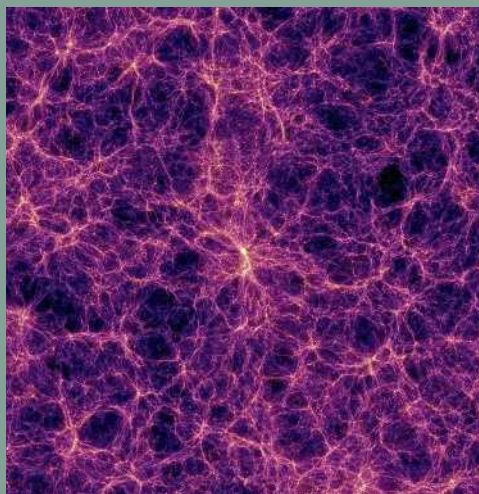
L'analyse des ondes gravitationnelles est
une aubaine pour étudier les trous noirs.

P. 36

Troublants trous blancs

Carlo Rovelli

Les trous blancs? Des sosies inversés des
trous noirs dont ils seraient le destin ultime.



INSAISSISSABLE MATIÈRE NOIRE

P. 46 Entretien

« La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pense. Quelque chose de profond nous échappe »

Benoît Famaey

P. 50

La grande quête inachevée

Alain Riazuelo

Omniprésente, la matière noire résiste pourtant à toute tentative de détection.

P. 56

L'axion, une idée qui a la cote

Leslie Rosenberg

Les axions, produits durant le Big Bang, rendraient compte de la matière noire.

P. 64

La piste des trous noirs

Juan García-Bellido et Sébastien Clesse

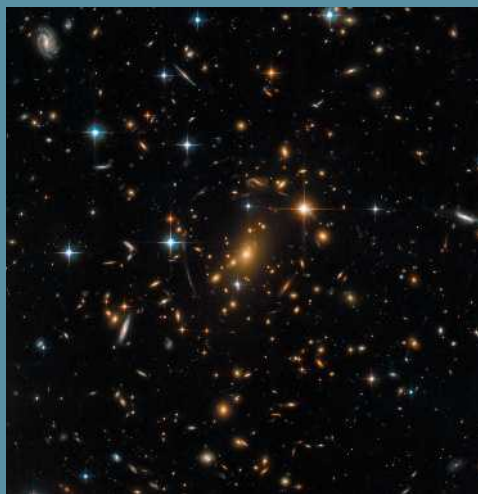
De quoi est faite la masse manquante de l'Univers? Peut-être de trous noirs primordiaux.

P. 72

Et les neutrinos cosmologiques !

Alain Riazuelo

Dans la quête de la matière noire, on néglige les neutrinos nés lors du Big Bang.



LES SOUBRESAUTS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

P. 76

Un problème de vitesse

Natalie Wolchover

Cinq mesures de la vitesse de l'expansion de l'Univers ont été livrées. Toutes différentes!

P. 84

À la poursuite de l'énergie sombre

Joshua Frieman

Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, on sonde les confins du cosmos.

P. 92

Indispensable constante cosmologique

Jean-Pierre Luminet

Pour expliquer l'énergie sombre, la constante cosmologique, introduite par Einstein, suffit.

P. 100

Vers une nouvelle gravitation ?

Cédric Deffayet

Pour expliquer l'expansion de l'Univers, les théoriciens explorent plusieurs voies.

P. 108

À lire en plus



RENDEZ-VOUS

par Loïc Mangin

P. 110

Rebondissements

CRISPR-Cas9: première application en cancérologie • Un jeu de taquin bien taquin • Remonter le cours du plastique • Alzheimer, une nouvelle cause identifiée

P. 114

Données à voir

Les cartes de Robert Szucs révèlent tous les bassins versants du monde, et en couleurs.

P. 116

Les incontournables

Des livres, des expositions, des sites internet, des vidéos, des podcasts... à ne pas manquer.

P. 118

Spécimen

L'infamale génétique du paradis

P. 120

Art & Science

Ibis, les sacrifiés de l'autel

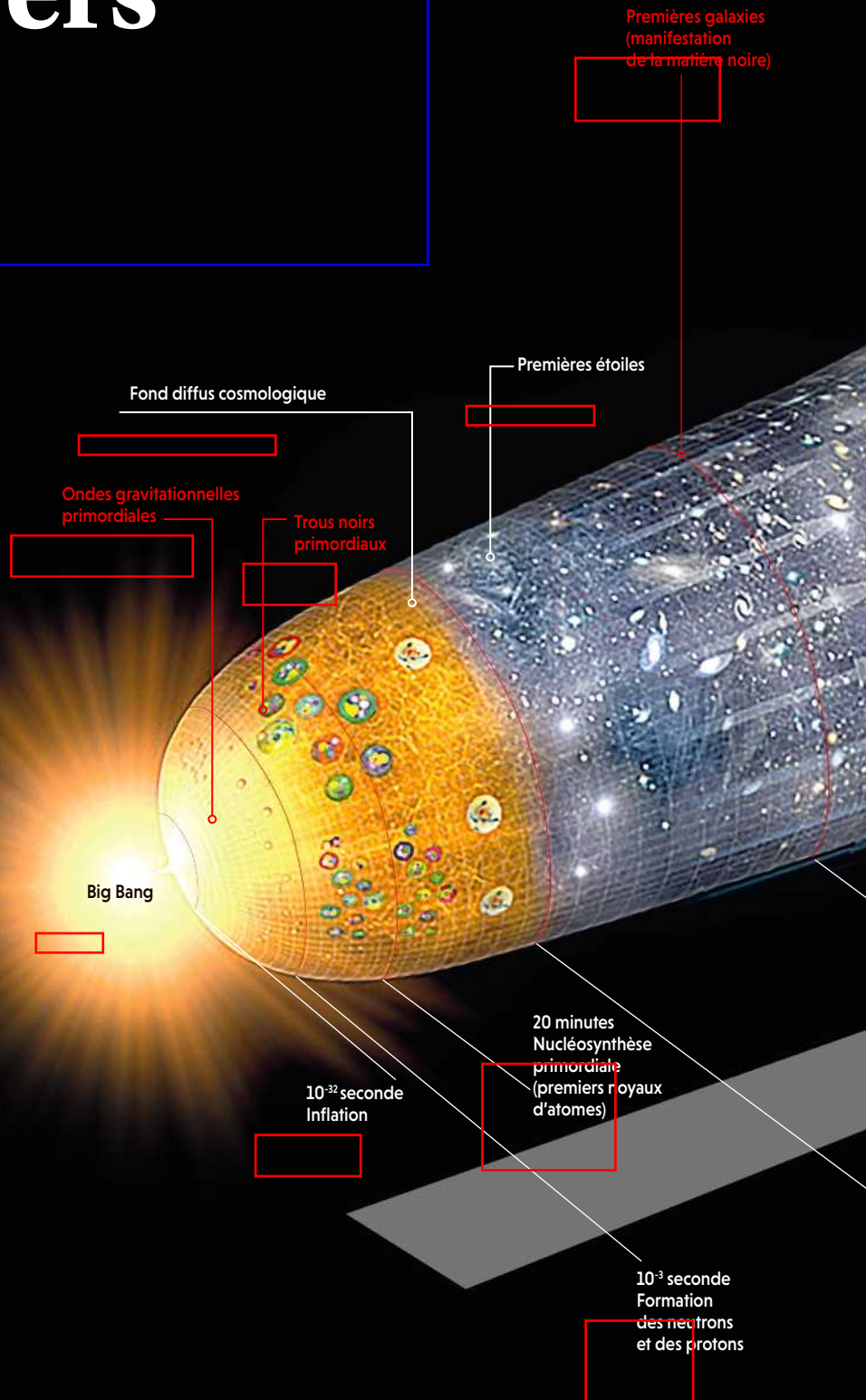
Le côté obscur de l'Univers

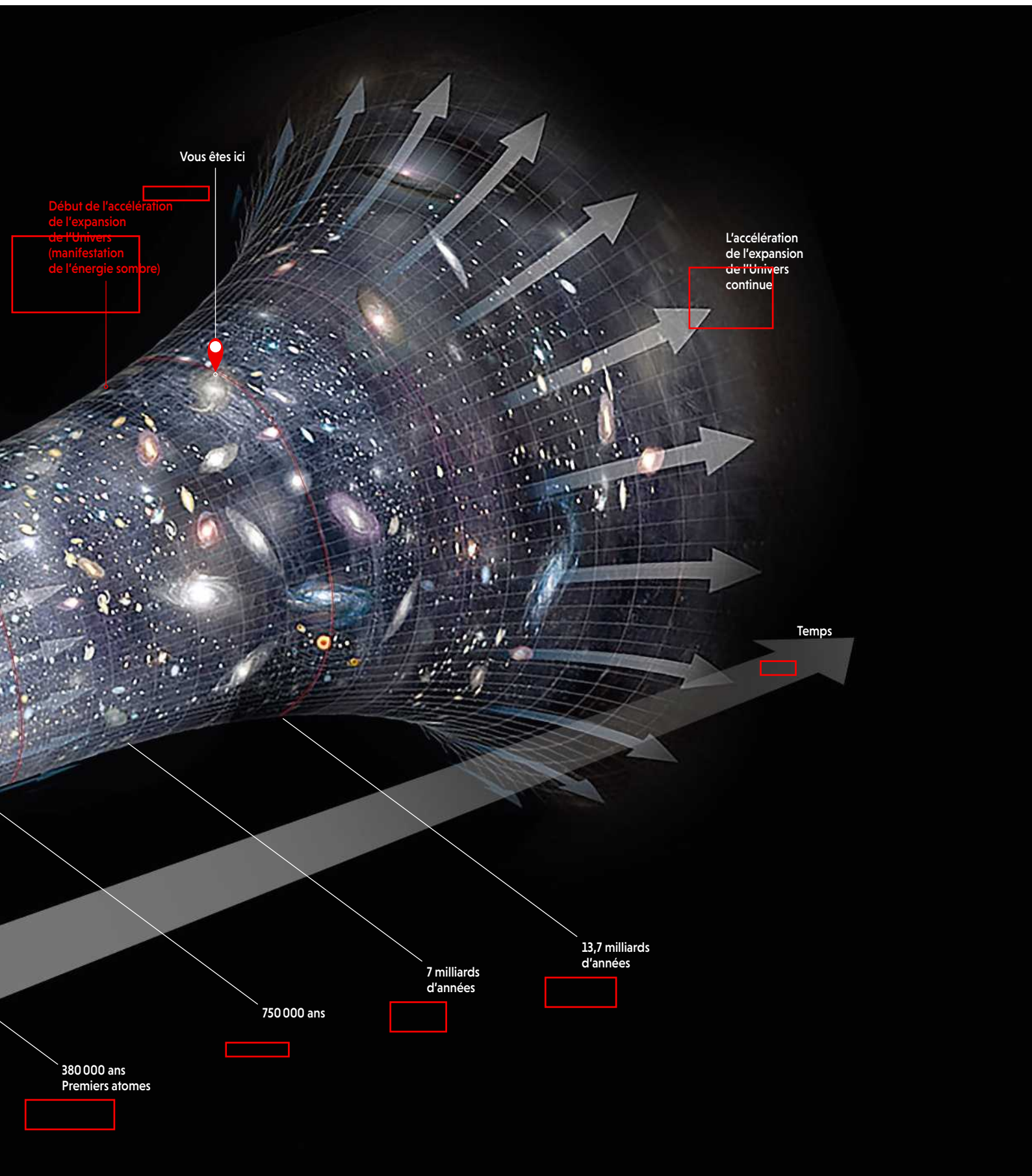
Il y a bien longtemps, dans un Univers lointain, très lointain... il n'y avait même pas de galaxie. Selon le modèle qui prévaut, tout a commencé il y a 13,7 milliards d'années à partir du Big Bang, lorsque l'Univers s'est déployé.

Plusieurs étapes sont marquantes (celles marquées en rouge sont détaillées dans ce numéro) et lors de certaines d'entre elles, se sont manifestées plusieurs entités obscures dont on ignore encore la nature : la matière noire et l'énergie sombre. Lors de l'inflation, aux premiers instants, l'Univers a considérablement grandi ! À cet instant, des ondes gravitationnelles primordiales auraient été émises. Peu après, à l'occasion de fluctuations de la matière, des trous noirs primordiaux se seraient formés. Vers 380 000 ans, neutrons, protons et électrons se sont formés, laissant libres les photons qui constituent aujourd'hui le fond diffus cosmologique.

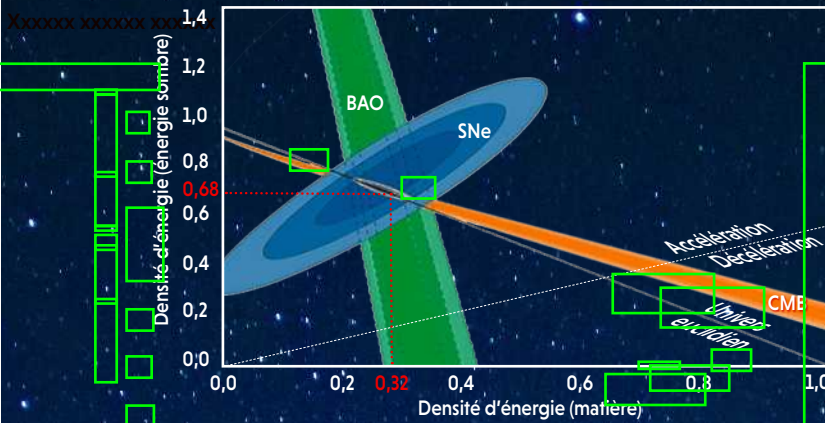
Par la suite, les étoiles, les galaxies, les amas de galaxies et toutes les grandes structures de l'Univers se sont agencés. Sans la matière noire et ses effets gravitationnels, ces éléments n'auraient pas l'allure qu'ils ont.

Simultanément, l'Univers a continué de s'étendre. Cette expansion s'est même accélérée il y a 7 milliards d'années. On attribue ce phénomène à une mystérieuse énergie sombre. ■





LES INGRÉDIENTS DE L'UNIVERS



La composition de l'Univers s'exprime en fonction d'une densité d'énergie critique égale à 1, correspondant à un Univers « plat » (sa géométrie est euclidienne) comme on l'observe à grande échelle. On dispose de trois types d'observations: le fond diffus cosmologique (CMB), les oscillations acoustiques des baryons (BAO) et les supernovæ (SNe). De la zone de compatibilité avec les trois (en gris), on déduit pour l'Univers (en rouge) une répartition d'environ 68 % d'énergie sombre et 32 % de matière (que l'on décompose, à partir d'autres observations, en 27 % de matière noire et 5 % de matière ordinaire).

TOÛTE LA MATIÈRE ET L'ÉNERGIE DE L'UNIVERS

5% : Matière baryonique

Composée d'atomes, la matière baryonique, ou ordinaire, est le matériau de base des galaxies, étoiles, planètes, organismes vivants... C'est tout ce que nous pouvons voir directement.

68% : Énergie sombre

L'essentiel de l'Univers semble constitué d'« énergie sombre ». Elle est responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers, mais sa nature reste inconnue.

27% : Matière non baryonique, ou matière noire

Elle serait formée d'autre chose que les particules connues. Elle interagit très peu, voire jamais, avec la matière ordinaire, si ce n'est par le biais de la gravité.

On distingue selon les modèles trois types de matière noire, en fonction de la vitesse des particules censées la composer (froide, tiède et chaude par ordre croissant de vitesse).

Froide

Tiède

Chaude

Wimps

Les « particules massives interagissant faiblement » ont longtemps été les candidates favorites au titre de matière noire.

Axions

Beaucoup plus légers que les wimps, les axions doivent être beaucoup plus nombreux pour représenter toute la matière noire.

Trous noirs primordiaux

Une population de nombreux trous noirs formés aux premiers instants de l'Univers constitue une autre piste pour la masse cachée de l'Univers.

Autres

Les théoriciens ont envisagé d'autres théories, comme la supersymétrie, qui prévoit l'existence de nouvelles particules, nommées « sparticules ».

Neutrinos stériles

Ce quatrième type de neutrinos s'ajouterait aux trois variétés déjà connues. Ces neutrinos interagiraient encore moins avec la matière ordinaire que les autres.

OFFRE D'ABONNEMENT

1 AN

ABONNEZ-VOUS À
POUR LA
SCIENCE2 FORMULES
AU CHOIXFORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIEFORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr

actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

79€

Au lieu de 114,40€

99€

Au lieu de 174,40€

31 %

de réduction *

43 %

de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90053 - 67402 Illkirch Cedex - email: pouirlascience@aboopress.fr

PAG19STDDOS

OUI, je m'abonne
pour 1 an à
POUR LA
SCIENCE

2 / J'indique mes coordonnées

☐ M. ☐ Mme

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Téléphone:

Email: (indispensable pour la formule intégrale)

.....@.....

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / Je choisis mon mode de règlement

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science☐ Carte bancaire

N° Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Date d'expiration: Clé (Les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire:

1 / Je choisis ma formule (merci de cocher)

☐ FORMULE PAPIER
+ HORS SÉRIE

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

79€

Au lieu de 114,40€

☐ FORMULE
INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

99€

Au lieu de 174,40€

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

JEAN-PIERRE LUMINET



« Je continue à penser que la constante cosmologique fait partie intégrante de la relativité générale et explique correctement les choses »

Le 10 avril 2019 fut publiée la première image d'un trou noir, et elle était conforme à celle que vous aviez simulée quarante ans auparavant. Qu'avez-vous ressenti ?

Jean-Pierre Luminet : J'étais ému. Cependant, je m'y attendais, car depuis quelques mois, j'étais en contact avec Shep Doeleman, qui dirigeait l'*Event Horizon Telescope* (EHT), le réseau de télescopes à l'origine de cette image du trou noir supermassif situé au cœur de la galaxie M87. J'étais confiant, car je pensais bien avoir correctement écrit les équations de la relativité générale. Le seul petit suspense concernait l'angle de vue. En 1979, mes calculs avaient été faits avec les moyens de l'époque et, même si les équations fournissaient tous les angles possibles (polaire, équatorial...), je n'avais publié qu'un dessin, composé de seulement 10000 points,

BIO EXPRESS

3 JUIN 1951

Naissance à Cavaillon.

1979

Première simulation d'un trou noir entouré d'un disque d'accrétion.

1982

Premières modélisations de la rupture explosive d'étoiles par les trous noirs géants.

1995

Publie des articles sur la topologie de l'Univers.

2003

Modèles d'Univers dodécaédrique

2019

Chroniques de l'espace (Cherche-Midi et France Inter).

correspondant à un seul de ces points de vue. Mais on voyait bien l'effet Doppler majeur par lequel une partie du disque est plus brillante que l'autre à cause de la rotation. C'est vraiment une caractéristique essentielle du trou noir.

Et on la voit bien dans l'image de l'EHT ! Quand elle a été publiée, je ne m'occupais plus de ces histoires depuis des années. J'ai donc fouillé et retrouvé d'anciens travaux, notamment ceux effectués au début des années 1990 avec un de mes collaborateurs, Jean-Alain Marck. Il avait fait de superbes simulations numériques, en couleurs, dont certaines ont d'ailleurs été publiées dans un hors-série de *Pour la science*, en... 1997. L'une d'elles et l'image réelle de l'EHT se correspondent comme deux gouttes d'eau !

Je n'ai donc pas été surpris, mais heureux. D'autant que, quand j'ai fait ces calculs en 1978, jamais je n'aurais imaginé voir de mon vivant une image réelle pour laquelle des moyens phénoménaux auraient été déployés – l'EHT étant un télescope virtuel de la taille de la Terre !

Pour la petite histoire, le 10 avril, j'étais en Ouzbékistan. Avec le faible wifi de l'hôtel, j'ai suivi la conférence de presse de l'EHT. C'était un peu frustrant de ne pas pouvoir répondre aux nombreuses sollicitations.

Les trous noirs sont aussi au centre d'une découverte majeure, la détection d'ondes gravitationnelles en septembre 2015. Qu'est-ce que cela vous inspire ?

Jean-Pierre Luminet : Là encore, c'était attendu, puisque parfaitement prévu par la théorie. D'autre part, de nombreux progrès instrumentaux et techniques laissent penser qu'on y arriverait. Mais peut-être pas aussi vite... La détection a eu lieu dès que le niveau de sensibilité nécessaire a été atteint. Et, depuis, les événements s'accumulent. Déjà dix ont été confirmés, et l'on compte une trentaine de candidats en attente de validation.

Est-ce étonnant qu'il y en ait autant ?

Jean-Pierre Luminet : C'est en effet une surprise. Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait. En outre, les estimations de masses données correspondent à des trous noirs plus massifs qu'on ne l'imaginait. Le jour par *Virgo* et *Ligo*. Pour espérer « entendre » par exemple les ondes gravitationnelles dites « primordiales », prédites par certains modèles, les appareils doivent gagner en sensibilité. C'est le sens de *Lisa*, un projet d'interférométrie spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA), une mission phare de l'astrophysique du XXI^e siècle.

On pense alors à la matière noire...

Jean-Pierre Luminet : Les trous noirs sont de fait des candidats naturels pour l'expliquer. Mais il y en a toujours beaucoup trop peu pour rendre compte d'une partie significative de cette matière noire. Même les trous noirs primordiaux, nés peu après le Big Bang, sont insuffisants.

Avec ces ondes gravitationnelles, le plus intéressant est ailleurs : dans la détection de celles nées de la fusion de deux étoiles à neutrons, comme ce fut le cas le 17 août 2017, car on dispose également du signal électromagnétique qui accompagne le phénomène, notamment le sursaut gamma. On peut en suivre la décroissance grâce à tout un arsenal de télescopes dans les longueurs d'onde différentes (voir *À l'écoute des ondes gravitationnelles*, par D. Buskulic, page 22). Tous les modèles de coalescences peuvent alors être testés et contraints.

On entend dire que ces ondes gravitationnelles sont une nouvelle fenêtre sur l'Univers. Qu'en pensez-vous ?

Jean-Pierre Luminet : C'est bien le cas. Avec les ondes gravitationnelles, on est

débarrassé de toute autre forme d'interaction, car l'Univers y est totalement transparent. La totalité de l'Univers devient accessible, même la période datant d'avant le fond diffus cosmologique, c'est-à-dire les 380 000 premières années de l'histoire cosmique pour lesquelles on ne dispose d'aucun signal électromagnétique (l'Univers était opaque).

Reste néanmoins le problème de l'amplitude. Seules les ondes gravitationnelles émises par les systèmes binaires dont nous avons parlé sont détectables à ce jour par *Virgo* et *Ligo*. Pour espérer « entendre » par exemple les ondes gravitationnelles dites « primordiales », prédites par certains modèles, les appareils doivent gagner en sensibilité. C'est le sens de *Lisa*, un projet d'interférométrie spatiale de l'Agence spatiale européenne (ESA), une mission phare de l'astrophysique du XXI^e siècle.

Les fréquences sont aussi un paramètre important. *Lisa* aura accès à des gammes correspondant cette fois à la fusion de deux trous noirs supermassifs, un événement consécutif à la fusion de galaxies.

Autre avantage de *Lisa*, l'anticipation. Avec les détecteurs au sol, on ne recueille le signal que des quarante dernières secondes de la fusion. Le futur dispositif (une constellation de trois satellites formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de kilomètres de côté) détectera quasiment dix ans avant la fusion les trous noirs en orbite et émettant déjà des ondes gravitationnelles. Débarrassée de toutes les complications électromagnétiques, neutriniques... l'astronomie gravitationnelle sera tellement précise qu'elle pourrait prédire à l'heure près, plusieurs années à l'avance, le moment de la fusion!

Il y a beaucoup plus de fusions de trous noirs, et donc de trous noirs, qu'on ne le pensait

Revenons à la matière noire, cette autre entité obscure de l'Univers. Pouvez-vous nous rappeler d'où vient cette idée ?

Jean-Pierre Luminet : Rappelons pour commencer que le modèle standard de la cosmologie est noté Λ CDM. Son écriture même met en avant deux problèmes! Le Λ est associé à celui de l'énergie sombre, nous y reviendrons, tandis que CDM renvoie à la matière noire, car ces lettres signifient *cold dark matter*, soit « matière noire froide ». Ce modèle n'est pas forcément le bon, mais il est celui qui, pour l'instant et vraiment de loin, explique le maximum d'observations.

L'idée de matière noire est née des observations de Fritz Zwicky en 1933. Dans l'amas de Coma, il a constaté que les vitesses de dispersion des galaxies étaient bien trop élevées par rapport à ce que laissait supposer la matière visible. Il devait donc y avoir une « masse manquante », une matière noire. C'est un principe très général! La détection de tout ce qui est noir a procédé de la même façon, par des détectations indirectes. Ce fut aussi le cas pour Neptune, découverte à partir des perturbations d'Uranus.

Puis dans les années 1950, des astrophysiciens se sont intéressés aux courbes de rotation des galaxies spirales. En s'en tenant à la seule matière visible, les vitesses des étoiles au sein d'une galaxie devraient décroître à mesure qu'on s'éloigne du centre. Ce n'est pas le cas! Les vitesses atteignent en fait un plateau. Pour l'expliquer, on a imaginé là aussi une « matière noire » qui dans un vaste halo sphérique autour de la galaxie et y change le potentiel gravitationnel.

Ces deux arguments expérimentaux, déjà assez forts, laissaient soupçonner qu'il y avait au moins de l'ordre de dix fois plus de matière noire que de matière visible. On pensait néanmoins à une matière noire ordinaire, dite « baryonique », semblable à celle qui constitue justement la matière lumineuse.

> Mais des arguments théoriques ont changé la donne ?

Jean-Pierre Luminet : Oui. Grâce à la nucléosynthèse primordiale, on sait désormais que la matière baryonique, plus précisément sa densité, atteint au maximum 5 % de la densité critique (l'ensemble des constituants de l'Univers), cette densité théorique qui ferait que l'Univers serait globalement euclidien (plat), comme le suggèrent les observations.

Un deuxième élément théorique absolument fondamental est venu avec l'idée d'inflation développée dans les années 1980. Selon ce modèle, d'une part l'Univers a enflé considérablement dans ses premiers instants, mais d'autre part, sa densité est très proche de la densité critique. Donc, pas de doute, énormément de choses manquent à l'appel.

Enfin, un troisième élément théorique est apparu avec l'élaboration des théories au-delà du modèle standard des particules. Par exemple, la supersymétrie (SUSY) postule l'existence de partenaires dits « supersymétriques » à toutes les particules déjà connues, des « sparticules », parmi lesquelles se trouvent des candidats pour la matière noire non baryonique. D'autres théories ont vu le jour, chacune venant avec ses particules de matière noire non baryonique, comme les axions (voir *L'axion, une idée qui a la cote*, par L. Rosenberg, page 56). Mais tous ces modèles restent extrêmement spéculatifs et tiennent de moins en moins bien la route.

En fin de compte, quelles sont les hypothèses ?

Jean-Pierre Luminet : On se retrouve avec trois types de matière noire : la chaude, la tiède et la froide, respectivement notées HDM, WDM et CDM. Ce n'est pas une question de température, mais plutôt de vitesse. Les particules de matière noire chaude seraient, comme les neutrinos, des particules animées de vitesses relativistes. La matière noire tiède serait constituée de particules intermédiaires plus lentes, comme les neutrinos stériles. Et la froide, qui a fini par devenir le modèle standard de la cosmologie, serait soit des axions, soit les neutralinos, des particules prédites par la supersymétrie.

En quoi consistent les neutrinos stériles ?

Jean-Pierre Luminet : Le modèle standard au sens strict prédit trois espèces

de neutrinos dont on a découvert en 1998 les oscillations : ils passent d'un type à un autre. Pour ce faire, ils doivent avoir une masse. Cependant, elle est si faible qu'elle interdit aux neutrinos de rendre compte de la matière noire. C'était le sujet d'une de mes premières publications en cosmologie en 1981, peu après celle sur les trous noirs.

Mais les neutrinos ordinaires sont des particules étranges. Normalement, les particules peuvent avoir deux hélicités (une propriété liée au spin), soit droite

contient de nombreux paramètres libres que l'on peut adapter pour la repousser toujours plus loin. Ce que fait David Gross et quelques autres tenants de la supersymétrie, qui ne veulent pas abandonner l'idée, au départ, avouons-le, assez jolie.

Donc David Gross n'honorera jamais son pari ?

Jean-Pierre Luminet : Il y a peu de chances ! Rappelons l'histoire. En 1994, au cours d'un dîner bien arrosé, en

On distingue trois matières noires : la chaude, la tiède et la froide. Ce n'est pas une question de température, mais de vitesse

soit gauche. Pourtant, on ne connaît aucun neutrino droit. L'une des explications possibles est, sur la base des travaux du physicien italien Ettore Majorana, d'imaginer une nouvelle particule, une quatrième espèce de neutrino, dit « stérile » parce que, contrairement aux autres (dits « actifs »), il n'interagirait que via la gravité. En principe, ces neutrinos stériles pourraient être suffisamment massifs pour rendre compte de tout ou partie de la matière noire.

Comment trancher ?

Jean-Pierre Luminet : Deux solutions. Examiner les prédictions astrophysiques liées à chacun des types de matière noire et comparer avec des observations, ou bien détecter les particules associées. Cette dernière option a été peu concluante, malgré tous les efforts déployés (voir *La grande quête inachevée* par A. Riazuelo, page 50). Si la détection a échoué, peut-on fabriquer artificiellement les particules à haute énergie ? Le LHC, et quelques autres accélérateurs, s'y sont essayés, mais en vain, même pour les neutralinos qui, normalement, dans les théories de supersymétrie les plus simples, seraient dans la gamme de masse et d'énergie accessibles. Mais la supersymétrie, comme beaucoup de théories,

Sicile, les physiciens Kenneth Lane et David Gross font un pari sur le LHC, encore au stade de plans. Prouvera-t-il la théorie Susy en détectant une des particules prédites ? Kenneth Lane pense que non. L'enjeu est un repas chez Frédy Girardet, sacré « Cuisinier du siècle » par Gault et Millau, dans son restaurant près de Lausanne.

Aujourd'hui, Frédy Girardet n'officie plus (le restaurant, très réputé, existe toujours), mais le LHC a collecté plus de $1,5 \times 10^{25}$ données (trois fois plus que ne le prévoient les termes du pari) sans donner le moindre signe d'une « sparticule ». Selon Kenneth Lane, il est temps pour David Gross, qui entre-temps a obtenu le prix Nobel de physique en 2004, de payer. Aux dernières nouvelles, le gagnant s'impatience...

Qu'en est-il alors des aspects astrophysiques des différentes théories ?

Jean-Pierre Luminet : En l'absence de particule détectée, les astrophysiciens peuvent tester les conséquences qu'imposent les différentes théories sur la structure et l'évolution de l'Univers. Ils s'intéressent le plus souvent à la formation des grandes structures (étoiles, galaxies, amas de galaxies, superamas...), aux lentilles gravitationnelles

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

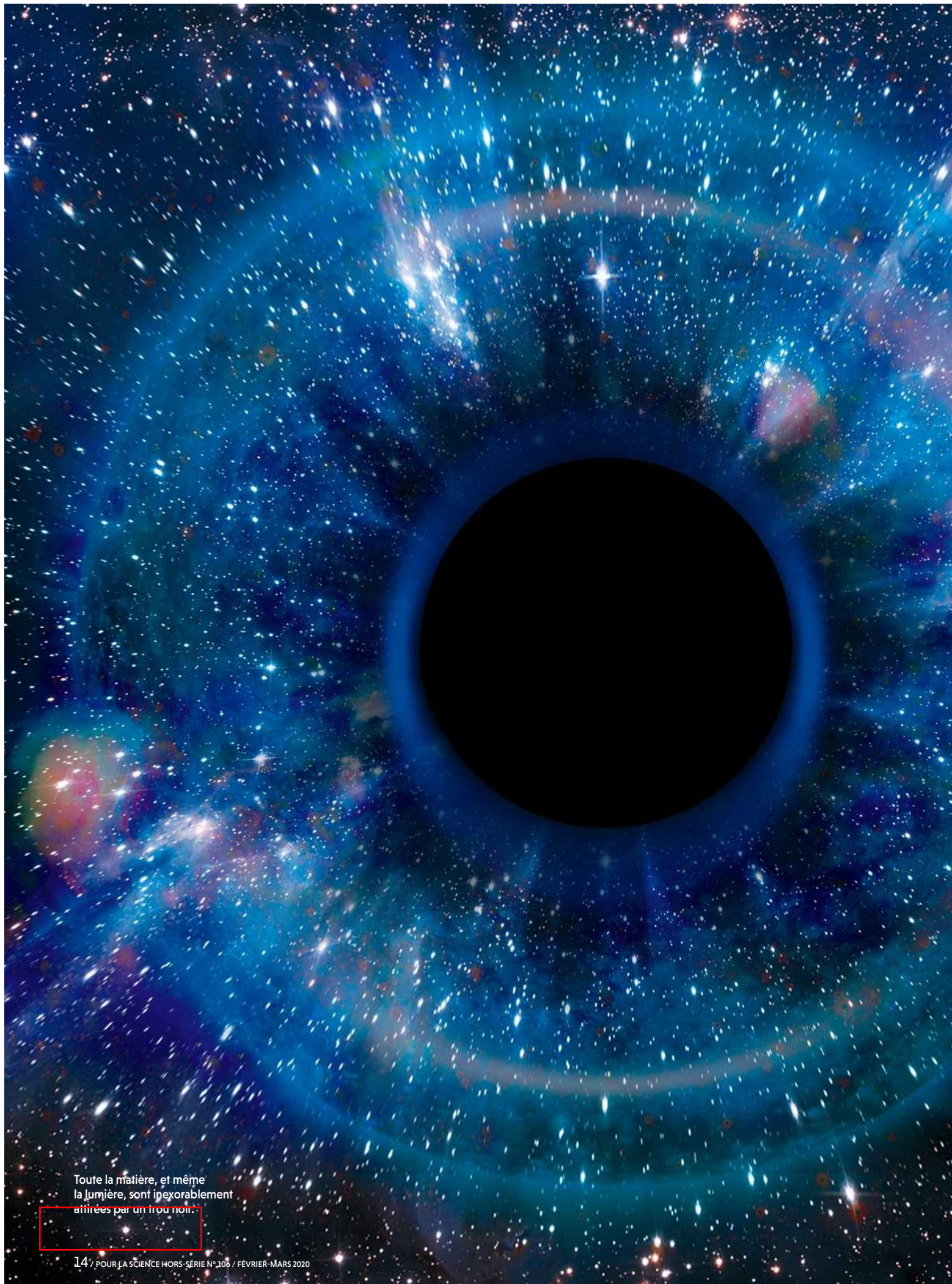
que j'en aborde une nouvelle, je suis séduit. Et puis, je passe à une autre...

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

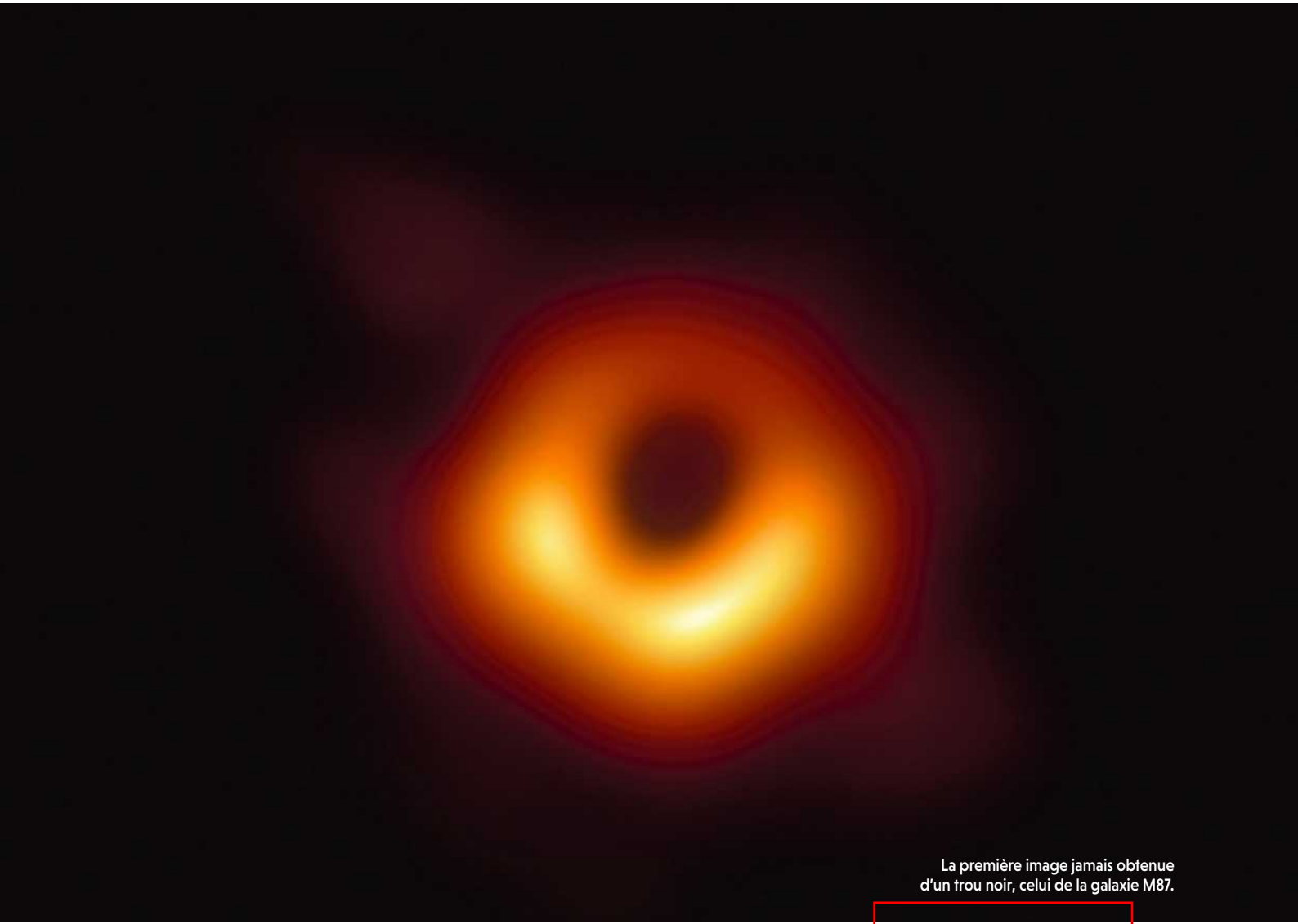
Prendre en photo un trou noir. Ce fut longtemps le but ultime des astronomes, un but finalement atteint en 2019 au prix de nombreux efforts. Retour sur une quête longue d'un quart de siècle.

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 A 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

>

► premier identifié comme tel. D'une masse proche de dix masses solaires, il est situé à 5000 années-lumière du Soleil. Son diamètre angulaire est donc de... 3×10^{-15} radians, soit, pour parler en des unités plus pratiquées dans la communauté astronomique, 0,6 nanoseconde d'angle (rappelons qu'on subdivise un degré en 60 minutes d'angle, elles-mêmes subdivisées en 60 secondes d'angle). Précisons que l'œil humain à une résolution qui au mieux approche 1 minute d'angle, soit 100 milliards de fois trop. Aussi, quelle que soit l'analogie que l'on puisse considérer, un tel diamètre angulaire est ridiculement petit. Il correspond à un unique proton à 25 cm de distance, ou à une molécule d'eau à 30 kilomètres. Inaccessible!

Faute de voir des petits trous noirs, tournons-nous vers les gros, les trous noirs supermassifs. Ils sont beaucoup plus rares, puisqu'on n'en compte qu'un seul par galaxie au sein de laquelle il se trouve invariablement au centre. Mais même de ce côté, le choix reste limité. Il y a certes Sgr A* au cœur de notre propre Galaxie. Sa masse est connue précisément, car on peut suivre mois après mois la trajectoire des étoiles qui orbitent autour. L'une d'elles notamment, baptisée S-2, boucle une révolution autour de lui en une quinzaine d'années. Elle fait l'objet d'un suivi depuis les années 1990, et les astronomes ont pu scruter précisément son orbite, qui permet, *via* des lois établies il y a quatre siècles par Johannes Kepler, de déterminer la masse de ce trou noir à 4,1 millions de masses solaires, un chiffre hélas assez modeste pour un trou noir supermassif.

Placé à environ 26000 années-lumière, ce trou noir occupe une taille bien plus grande que Cygnus X-1, quoiqu'encore très petite: environ 50 microsecondes d'angle, soit la taille apparente d'un objet de 10 centimètres qui se trouverait... sur la Lune. Autrement dit, vous pourriez peut-être voir la silhouette de Sgr A* si vous pouviez discerner les traces de pas de Neil Armstrong depuis la Terre.

Pour se rendre compte de la difficulté de l'entreprise, il est nécessaire de faire un détour par les lois de l'optique. Quand une onde lumineuse traverse une ouverture, l'effet est le même que pour la houle contournant la jetée d'un port: l'onde se déforme. Ce phénomène de diffraction est inévitable, même pour un télescope de très grande taille.

Vous pouvez faire l'expérience de ces déformations chez vous si vous avez des rideaux en tissu fin à vos fenêtres. Une source de lumière quasi ponctuelle située à l'extérieur de la pièce produit un motif en croix à la traversée du voilage, une réminiscence du tissage carré ou rectangulaire. De telles croix apparaissent également dans les clichés

astronomiques (voir la figure page ci-contre): dans un télescope, le miroir secondaire est en général maintenu au-dessus du miroir primaire par quatre supports métalliques qui déforment le front d'onde et favorisent la formation de ces croix caractéristiques sur les images dès que l'objet est brillant.

UN MIROIR DE DEUX KILOMÈTRES DE DIAMÈTRE

Un instrument optique a donc inévitablement une résolution finie. Plus précisément, elle est déterminée par le rapport de la longueur d'onde d'observation au diamètre du télescope. C'est là que le bât blesse. Ce rapport doit être plus petit que la taille angulaire de l'objet dans le ciel. Pour observer Sgr A* dans le domaine visible, la finesse de détail nécessaire serait seulement atteignable par un miroir unique de 2 kilomètres de diamètre. Et plus grand encore, car le centre galactique est opaque à la lumière visible. L'infrarouge proche serait pertinent, mais avec des longueurs d'onde au minimum deux ou trois fois plus grandes que celles de la lumière visible, un miroir devrait être deux à trois fois plus étendu...

Pour contourner cet écueil tout autant technique que financier, les astronomes peuvent compter sur une méthode envisagée dès le début du xx^e siècle par les physiciens américains Albert Michelson et Edward Morley: l'interférométrie. L'idée est de remplacer un unique appareil de (très) grand dia-

**Voir le trou noir
Sgr A* équivaut
à discerner les
traces de pas de Neil
Armstrong sur
la Lune... depuis
la Terre**

mètre par une collection d'instruments plus petits, puis de combiner leur lumière d'une façon astucieuse, afin de créer virtuellement un instrument bien plus grand, dont la taille sera de l'ordre de celle de la zone sur laquelle est réparti le réseau de télescopes.

Sur ce cliché des Pléiades, le phénomène de diffraction (les croix lumineuses) est important. D'autant plus important que l'objet est brillant, il est dû aux limitations inhérentes à tout télescope. On doit en tenir compte pour photographier un trou noir.



Cependant, pour fonctionner, les télescopes doivent être combinés comme s'ils étaient des éléments d'un même miroir, c'est-à-dire comme s'ils recevaient en même temps le même front d'onde. Ce n'est pas le cas pour des instruments dispersés à la surface de la Terre. Pour exploiter leur synergie, il est nécessaire d'introduire des mécanismes de retard afin de parfaitement synchroniser les signaux reçus.

Dans le domaine optique, la solution est particulièrement complexe. Les signaux de chaque télescope sont envoyés sur un dispositif (un banc optique) contenant au moins un miroir mobile qui à chaque instant doit se positionner en un endroit donné, avec une précision comparable à celle de la longueur d'onde, soit ici moins de 1 micromètre...

UN TÉLESCOPE DE LA TAILLE DE LA TERRE

En pratique, cette technique n'est utilisable qu'avec des télescopes séparés au plus d'une ou deux centaines de mètres, soit la distance qui sépare les télescopes du VLT européen au Chili. Au-delà, la technique ne fonctionne plus, rendant l'interférométrie optique inopérante pour ce genre d'observation. C'est encore plus le cas dans le domaine infrarouge, puisque avec des longueurs d'onde plus grandes, la séparation des télescopes

devrait être augmentée en proportion elle aussi afin de conserver la même résolution. C'est un peu inextricable.

Heureusement, les limitations de l'interférométrie peuvent être surmontées en observant à de bien plus grandes longueurs d'onde, pour lesquelles la combinaison des signaux reçus par les différents instruments est plus simple. Mais l'augmentation de la longueur d'onde doit s'accompagner de celle, en proportion, de la distance séparant les instruments. Le projet de l'EHT est né de cette idée, avec l'objectif de photographier Sgr A* avec le plus grand instrument astronomique jamais construit, puisque les instruments utilisés seraient éparpillés... sur toute la surface de la Terre, soit près de 10000 kilomètres (voir la figure page suivante).

Sur de telles distances, la longueur d'onde d'observation peut être 5000 fois plus grande que dans le domaine optique, c'est-à-dire 3 millimètres, soit dans le domaine des ondes radio. Le concept de l'EHT est d'utiliser des radiotélescopes déjà existants, et les faire travailler de concert à une longueur d'onde encore plus petite (1,3 millimètre), indispensable pour distinguer des détails du pourtour de la silhouette du trou noir.

Mais le défi restait considérable: avec des instruments situés sur différents continents, ➤

> pas question de faire interférer en direct les signaux reçus. L'idée consista à enregistrer le signal reçu par chaque instrument, et de les combiner numériquement une fois tous les supports physiques des enregistrements récupérés sur chaque site.

Dès lors, le défi ne relevait plus tant de l'optique que des performances du matériel informatique. À la longueur d'onde d'observation de 1,3 millimètre correspond une fréquence de 230 GHz, et c'est à un débit comparable que le signal doit être enregistré. Il y a une vingtaine d'années, quand les radioastronomes ont sérieusement envisagé un tel défi, les vitesses d'écriture des matériels informatiques alors disponibles étaient environ cent fois trop faibles, rendant l'observation impossible, mais on était en droit d'espérer que la technologie rendrait la chose possible dans dix, quinze, vingt ou trente ans, ce qui fut effectivement le cas.

Mais pour quel résultat envisageable? Avec seulement quelques instruments, l'imagerie est impossible. Disons pour simplifier que les observations interférométriques ne permettent d'acquérir qu'un certain nombre d'éléments d'information sur l'image, un nombre croissant avec le nombre de paires de télescopes du réseau: un s'il y a deux télescopes, trois avec trois télescopes (on peut faire trois paires avec trois éléments pris deux à deux), six avec quatre et ainsi de suite. Pour des étoiles dont on connaît la forme (sphérique, éventuellement aplatie par leur rotation), on peut déterminer le diamètre et éventuellement l'aplatissement, mais guère plus.

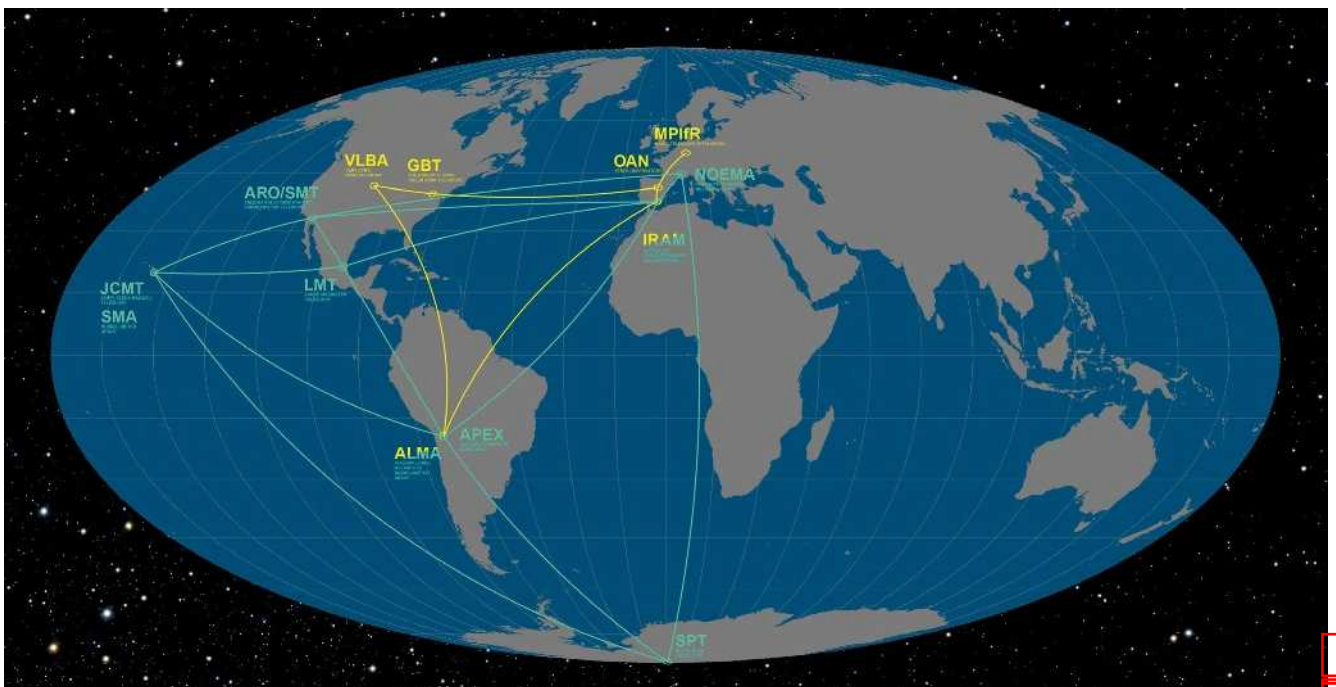
Les télescopes des projets d'interférométrie *Global mm-VLBI Array* (en jaune) et *Event Horizon Telescope* (en bleu) sont répartis sur toute la planète.

Des informations supplémentaires peuvent aussi être obtenues en utilisant la rotation de la Terre: du fait que les instruments, fixes, pointent vers une source dont la position dans le ciel varie revient à imaginer que ce sont des télescopes dont la position varie vus depuis la source. À un instant donné, le nombre d'éléments d'information recueillis est le même, mais ils diffèrent d'un instant à l'autre, permettant de faire de l'imagerie.

LE PÔLE SUD EN RENFORT

Pour autant, l'image que l'on peut espérer fabriquer par cette technique restera bruitée, et ce d'autant plus que le nombre d'instruments utilisés est faible. C'est pourquoi les réseaux interférométriques ont toujours besoin du plus grand nombre d'instruments possibles: 27 pour le *Very Large Array* américain, et 66 pour le réseau *Alma*, au Chili. L'EHT est à un niveau plus modeste, utilisant moins d'une dizaine de sites: en Europe, l'antenne de l'Institut de radioastronomie millimétrique au Pico Veleta, dans le sud de l'Espagne, en Amérique du Sud, notamment le grand observatoire radio *Alma*, au Mexique le *Large Millimeter Telescope*, et plusieurs antennes étatsuniennes, sans oublier le *James Clerk Maxwell Telescope* sur les îles Hawaï.

Il manquait à ce réseau une meilleure couverture dans l'hémisphère Sud, c'est pourquoi fut décidé d'y adjoindre celle du *South Pole Telescope*, situé au pôle Sud. Lors de la campagne d'observations de 2017, huit sites furent impliqués, avec une difficulté organisationnelle (il fallait pouvoir bénéficier des mêmes nuits



d'observation sur chaque site, fortement sollicités par ailleurs), et, surtout, météorologique puisque étaient indispensables des conditions clémentes en la matière simultanément sur chaque site. Certes chaque installation astronomique avait été choisie entre autres pour sa situation avantageuse, mais bénéficier d'une fenêtre météo favorable partout en même temps résulte d'une coïncidence plutôt heureuse... qui du reste ne fut pas complètement répétée lors de la campagne d'observation de l'année suivante.

Au final, les chiffres relatifs à la prise de données donnent un peu le vertige : chaque nuit, pendant plusieurs heures, chaque site enregistra des données à raison de plusieurs gigaoctets par seconde, chaque bit enregistré devant, pour pouvoir être traité ultérieurement, être accompagné de l'heure précise d'enregistrement calée sur des horloges atomiques. En tout, 4 pétaoctets de données (soit 4 millions de gigaoctets) furent précieusement sauvegardées, puis rapatriées au même endroit. La campagne d'observation de 2017 s'intéressa à deux cibles : Sgr A*, dans notre Galaxie et le trou noir géant de la galaxie M87, une des plus grosses galaxies de l'univers local. Situé à 50 millions d'années-lumière du Soleil, soit 2000 fois plus loin que Sgr A*, il est aussi 1500 fois plus massif, donc 1500 fois plus gros.

De ces deux trous noirs, seul celui de M87 donna des résultats exploitables, car ceux de Sgr A* étaient brouillés par la variabilité de l'aspect du disque, fruit de celle du flux de matière sur le trou noir. Ces écarts dépendent de la masse du trou noir. Étant 1500 fois moins massif, Sgr A* est une source qui peut varier sur des échelles de temps de quelques minutes, contre plusieurs jours au pire pour le trou noir de M87 (désormais baptisé M87*).

UN AN DE TRAITEMENT

Au bout de près d'un an de traitement, les données rendirent leur verdict : la silhouette du trou noir se découpe effectivement sur le fond lumineux du disque d'accrétion, légèrement plus brillant d'un côté que de l'autre, comme on s'y attendait, puisque la lumière émise par la partie du disque qui s'approche de nous sera plus intense que celle du côté opposé. En fait, la mesure de ce contraste renseigne sur l'inclinaison sous laquelle est vu ce disque, à savoir une vingtaine de degrés.

Alors bien sûr, puisqu'on se trouve à la limite de résolution des instruments, l'image peut paraître un peu floue pour qui a en tête les images du télescope spatial *Hubble*, mais c'est aussi ce qui fait sa beauté. Elle est belle non pas malgré le fait qu'elle soit floue, mais précisément parce qu'elle est floue, signe des efforts extraordinaires qui ont été consentis pour atteindre un objectif jugé inaccessible il y a seulement quelques décennies.

L'exploit désormais accompli, que peut-on espérer de plus dans le futur ? Tout d'abord étoffer le réseau d'observation, en ajoutant d'autres antennes comme celles du plateau de Bure, en France, et une autre au Groenland,

Les futures campagnes d'observation de M87* devraient permettre de passer de la première image... au premier film

afin d'obtenir une image moins bruitée. Des observations à des longueurs d'onde encore plus basse, en l'occurrence 0,8 millimètre, sont aussi possibles, mais sans garantie de succès, car l'atmosphère terrestre est de moins en moins transparente à mesure que l'on s'enfonce dans le domaine submillimétrique.

DE L'IMAGE AU FILM

Une autre piste concerne la dimension temporelle. Pour l'heure, la physique des disques d'accrétion n'est qu'imparfaitement connue, et si la variabilité du disque est un fait établi, nous l'avons vu, on ne sait pas encore à quelle échelle de temps elle se produit. Les campagnes d'observation futures de M87* devraient permettre d'en savoir plus et de passer de la première image... au premier film.

Enfin, sur le très long terme, on peut imaginer agrandir encore la taille du réseau, en envoyant des radiotélescopes en orbite. C'est dans ce contexte que s'ébauche l'*Event Horizon Imager*, version spatiale de l'EHT. Avec seulement trois radiotélescopes orbitant autour de la Terre à des distances différentes, les instruments bougeront naturellement les uns par rapport aux autres par le jeu de la mécanique céleste. Et l'on espère une résolution de quelques microsecondes d'arc à peine, un chiffre qui fait rêver... à condition de résoudre un nombre considérable de nouveaux problèmes, à commencer par le volume de données à rapatrier depuis l'espace. Impossible ? L'histoire des trous noirs a déjà montré que l'impossible d'un jour ne le reste pas toujours. ■

BIBLIOGRAPHIE

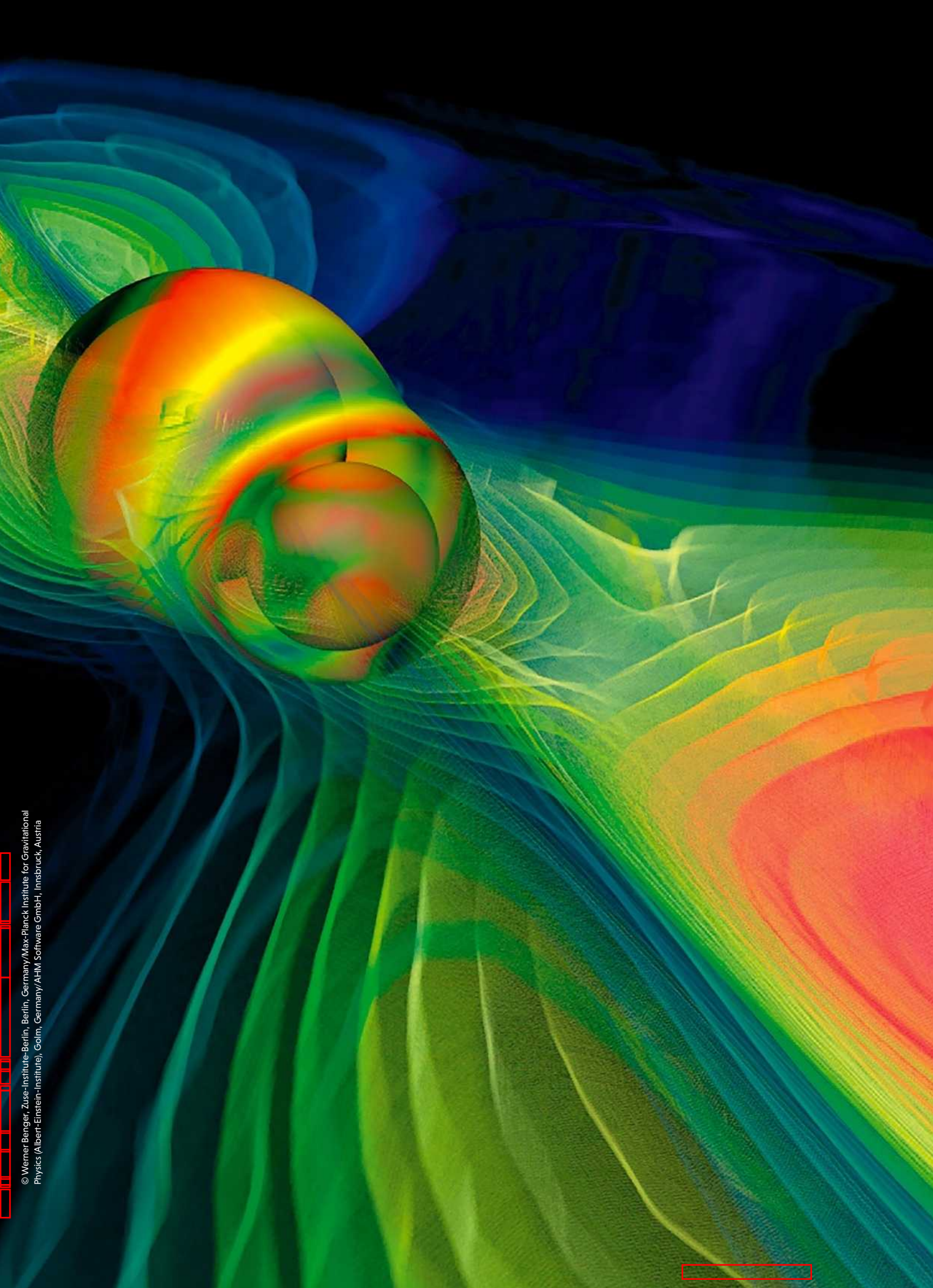
THE EHT COLLABORATION ET AL., First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole, *ApJL*, vol. 875, p. 1. 2019.

A. BRODERICK ET A. LOEB, Portrait d'un trou noir, *Pour la Science*, n° 389, mars 2019.

À l'écoute des ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles prévues par la théorie d'Einstein ont été détectées directement pour la première fois fin 2015, à l'aide de grands interféromètres de plusieurs kilomètres de long. Ces instruments tendent à nouveau l'oreille pour détecter la moindre vibration de l'espace-temps.

Les systèmes binaires comprenant deux objets compacts tels des étoiles à neutrons ou des trous noirs sont des sources intenses d'ondes gravitationnelles, en particulier au moment de la coalescence – la fusion des deux corps –, comme cela est représenté sur cette simulation numérique.



L'ESSENTIEL

● En 1916, Albert Einstein a montré que l'espace-temps peut vibrer et, ainsi, être parcouru par des ondes gravitationnelles.

● Ce phénomène n'a été que lentement accepté par les physiciens, en raison de difficultés conceptuelles.

● Dans un premier temps, des observations ont prouvé, de façon indirecte, que ces ondes existaient.

● Par la suite, des ondes émises par des paires d'objets astrophysiques compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) ont été détectées grâce à des interféromètres géants.

LES AUTEURS



DAMIR BUSKULIC est professeur à l'université Savoie-Mont-Blanc et au Laboratoire d'Annecy de physique des particules, et membre de la collaboration *Virgo*.



LOÏC VILLAIN est maître de conférences à l'université de Tours, chercheur en physique théorique à l'institut Denis-Poisson.

L

e son émis par un instrument de musique est riche en informations. En l'écoulant, on peut déduire la nature de l'instrument (à vent ou à cordes), sa composition (cuivre ou bois)... Toutes ces informations nous parviennent sous la forme d'une onde acoustique, une perturbation de l'air qui se propage de proche en proche et à vitesse finie. Les physiciens s'inspirent de cette idée pour sonder l'Univers. Le milieu qui transporte les ondes n'est alors plus l'air mais l'espace-temps, et les ondes ne sont plus acoustiques, mais gravitationnelles.

En effet, l'une des hypothèses fondatrices de la relativité générale est que l'espace-temps fait preuve d'élasticité. Même vide de matière, il est le siège de vibrations, les ondes gravitationnelles. Ces dernières sont elles aussi riches en informations : d'une part, sur les événements qui les ont produites et, d'autre part, sur les propriétés de l'espace-temps dans lequel elles se propagent. En septembre 2015, leur détection directe a démontré l'existence de ces ondes qui se propagent depuis les confins de l'Univers. L'aboutissement d'une longue épopée.

Albert Einstein émet l'hypothèse des ondes gravitationnelles en 1916. Cette idée rencontre d'abord un certain scepticisme chez les physiciens. Néanmoins, avant même leur détection directe en 2015, la réalité des ondes gravitationnelles ne faisait plus de doute. Elles sont une prédiction de la relativité générale, une théorie confortée par de nombreuses observations et expériences. En outre, plusieurs observations astrophysiques fournissaient des preuves indirectes de leur existence et avaient permis de contraindre certaines de leurs caractéristiques, comme leur vitesse de propagation, celle de la lumière dans le vide.

UNE IDÉE ANCIENNE

L'idée que l'effet de la gravitation se transmet à une vitesse finie n'a pas toujours été une évidence. Elle a été avancée pour la première fois dès 1773 par Pierre-Simon de Laplace, en contradiction avec les principes de la théorie dominante de l'époque, la gravitation de Newton. Il a fallu ensuite attendre plus d'un siècle pour disposer d'une théorie relativiste et cohérente de la gravitation, en accord avec les données observationnelles.

On la doit à Albert Einstein. Il a publié en 1915 les équations de la relativité générale qui étend à tous les observateurs le principe de relativité (selon lequel les lois de la physique ne dépendent pas de l'observateur), tout en offrant une description des phénomènes gravitationnels compatible avec ce principe. L'ingrédient clé de cet exploit scientifique possible n'était rien de moins qu'un renoncement radical aux idées communes sur l'espace et le temps.

De fait, Einstein a supposé que l'espace-temps n'était pas absolu, en ce sens que sa géométrie n'était pas donnée *a priori*. Il a avancé

Einstein a cru un temps avoir prouvé que les ondes gravitationnelles n'existaient pas

Une onde gravitationnelle déforme l'espace-temps sur son passage. Elle étire et comprime l'espace dans des directions perpendiculaires à celle de sa propagation : c'est une onde transversale. Les effets de déformation sont matérialisés ici par huit petites boules initialement disposées en cercle (*plan bleu foncé*). L'onde qui arrive par la gauche sur le cercle le comprime (*plan vert*) suivant l'axe vertical. Puis le cercle retrouve sa forme initiale avant d'être comprimé selon l'axe horizontal.

qu'elle était au contraire déterminée par son contenu énergétique et que la gravitation était une manifestation de sa géométrie courbée, plutôt qu'une force comme les autres.

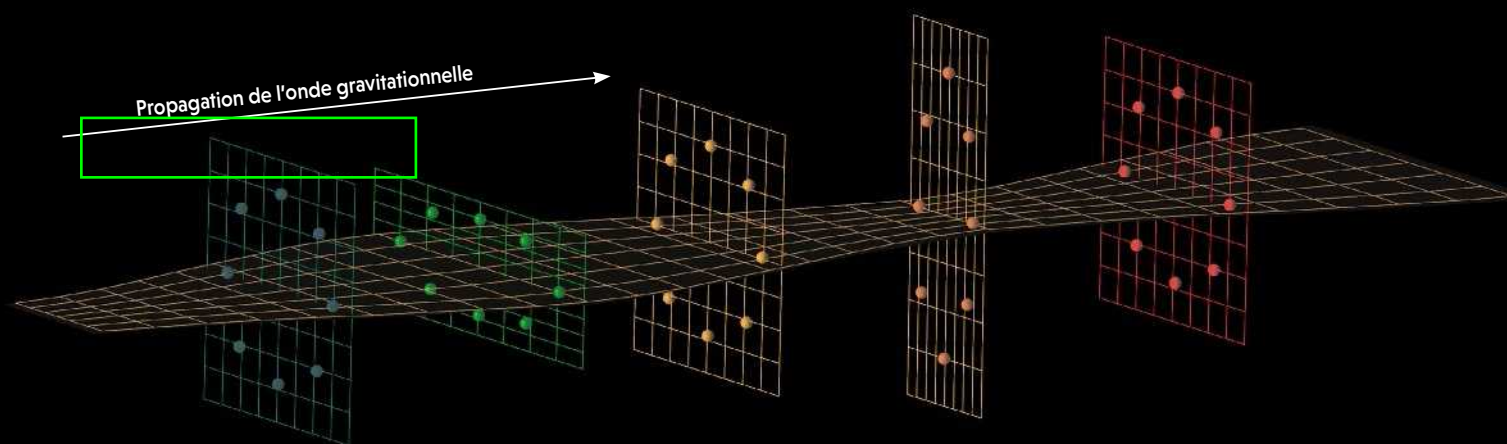
On illustre souvent ce principe par une figure où l'espace est représenté comme une surface déformée par une masse centrale, autour de laquelle un corps plus petit est en orbite. Dans cette interprétation du phénomène, aucune force n'agit sur le corps le plus léger : il obéit au principe d'inertie et va tout droit devant lui. L'espace étant courbe, sa trajectoire l'est aussi et il se retrouve à tourner autour de l'objet le plus massif. Cette schématisation, trompeuse par certains aspects, met néanmoins en avant le fait qu'en physique moderne, l'espace-temps n'est plus considéré comme une scène passive, où se déroulent les phénomènes, mais comme une sorte de continuum souple qui assure la relation entre les autres objets physiques.

En laissant de côté le temps pour simplifier, on peut en quelque sorte visualiser l'espace comme un milieu élastique pouvant se déformer, vibrer et donc être parcouru par des vagues (voir la figure ci-dessous). Dès 1916, Einstein a tenté de vérifier que les équations de sa théorie admettaient une solution représentant la propagation d'ondes. L'élégance mathématique de la relativité générale va cependant de pair avec la complexité de ses équations. L'une des caractéristiques de ces dernières est d'être non linéaires : la réponse d'un système n'est pas directement proportionnelle au stimulus appliqué.

SIX TYPES D'ONDES

Einstein s'intéressa donc pour commencer au cas simplifié où les ondes correspondaient à une petite perturbation de la géométrie initialement « plate » de l'espace-temps. Comme il l'espérait, ses calculs ont fait apparaître plusieurs types de vibrations du champ gravitationnel, qui se propageaient toutes à la vitesse de la lumière. Mais rapidement, le doute surgit quant à la réalité physique de ces solutions.

L'une des sources du scepticisme était liée à la nature duale des ondes gravitationnelles : elles sont géométriques, des vagues de l'espace (-temps), mais elles sont aussi physiques, puisqu'elles caractérisent le champ gravitationnel. Ainsi, on doit pouvoir leur associer certaines grandeurs telles une vitesse, un flux énergétique... Or, parmi les six types d'ondes obtenues par Einstein – six polarisations selon la terminologie moderne –, seuls deux correspondaient à un transfert d'énergie et se propageaient à la vitesse de la lumière. Ces ondes avaient aussi la caractéristique d'être transversales, comme les ondes électromagnétiques, c'est-à-dire qu'elles n'ont un effet que dans le plan



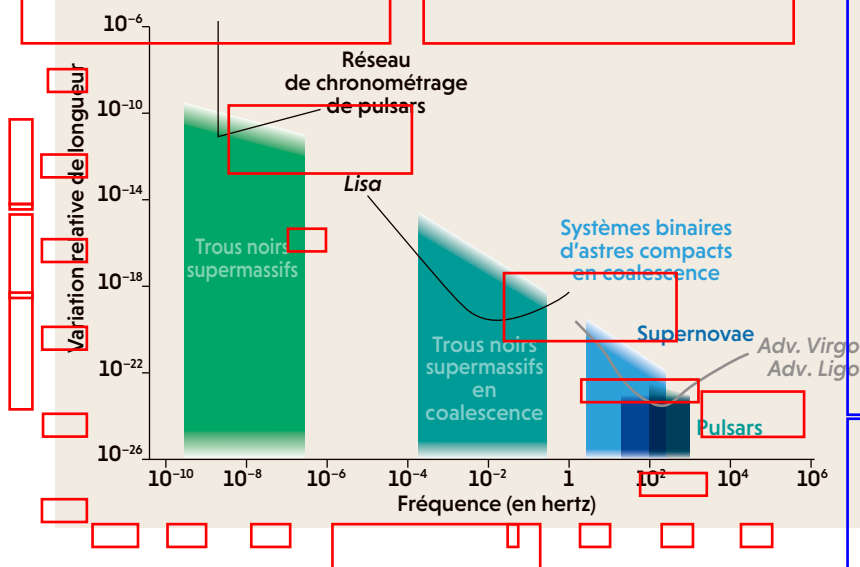
- orthogonal à leur direction de propagation (voir la figure page précédente). À l'inverse, les ondes sonores, longitudinales, compriment l'air dans la direction de leur propagation.

Les quatre autres polarisations obtenues ne transportaient pas d'énergie et se déplaçaient à des vitesses arbitraires. Il s'agissait en réalité d'artefacts mathématiques provenant d'un problème mal maîtrisé à l'époque, la question du choix du système de coordonnées. Notons toutefois que les physiciens travaillent aujourd'hui sur des théories alternatives de la gravitation dans certaines desquelles ces polarisations sont physiques. Leur observation serait révolutionnaire et nous permettrait de tester la physique au-delà de la relativité générale.

DES SOURCES VARIÉES

Un système n'émet d'ondes gravitationnelles que si la répartition de sa masse n'est pas trop symétrique et varie au cours du temps. Par ailleurs, l'amplitude des ondes émises est en général très faible. Elle peut devenir importante pour certains phénomènes astrophysiques (voir la figure) s'ils sont assez proches, tels une étoile qui explose en supernova, un pulsar ou une paire d'objets compacts (trous noirs et étoiles à neutrons) en rotation rapide proche de fusionner. L'amplitude des ondes prévue pour ces systèmes binaires les place dans la gamme accessible par *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*. L'amplitude n'est cependant pas le seul critère à considérer. En effet, chaque source d'ondes gravitationnelles émet à certaines fréquences. Pour des systèmes binaires de trous noirs supermassifs (de 10^6 à 10^9 masses solaires) proches de la coalescence,

cette fréquence est de l'ordre de 0,01 hertz. Cela correspond à des périodes d'environ une minute, difficiles à cerner pour des installations au sol exposées à de nombreuses sources naturelles de bruit. De telles ondes gravitationnelles sont la cible de futurs interféromètres spatiaux, tel le projet *Lisa*. À plus basse fréquence, on trouve les émissions des systèmes binaires de trous noirs supermassifs hors coalescence, que l'on espère détecter en utilisant comme horloges de référence des pulsars dont les mesures seraient perturbées par le passage d'ondes. À des fréquences encore plus basses, on prévoit des ondes gravitationnelles issues de l'Univers primordial. Elles auraient laissé une trace dans le rayonnement de fond diffus cosmologique sous la forme d'un mode de polarisation, mais leur amplitude n'est pas connue.



Les propriétés subtiles des coordonnées, combinées à la non-linéarité des équations, rendent la modélisation de la plupart des situations physiques difficile non seulement dans les calculs, mais aussi dans l'interprétation des résultats obtenus. Vers 1936, Einstein lui-même a cru un temps avoir prouvé, avec Nathan Rosen, son assistant à l'Institut des études avancées à Princeton, que les ondes gravitationnelles n'existaient pas. Une conclusion qui contredisait pourtant tous ses travaux précédents!

Dans la quête des ondes gravitationnelles, le physicien britannique Felix Pirani a franchi une étape cruciale en 1955. Il a montré qu'il était possible de détecter une onde gravitationnelle en mesurant les variations de la distance séparant au moins deux masses-test, autrement dit des corps si peu massifs que leur influence gravitationnelle est négligeable. En effet, même si elle est indétectable par une masse isolée, une onde se manifeste en contractant puis dilatant l'espace entre les deux masses-test.

Le rayonnement gravitationnel est donc détectable, mais que dire des mesures quantitatives? Pour concevoir un détecteur, il est nécessaire de déterminer l'ordre de grandeur de la puissance émise par une source, des variations de distance envisageables lors du passage d'une onde et de la fréquence du signal. À partir des premiers travaux d'Einstein, on peut montrer qu'un être humain rayonne une puissance de l'ordre de 10^{-50} watt en secouant les bras, et que la majorité des systèmes stellaires ne font guère mieux. Ces valeurs semblaient ainsi reléguer les ondes gravitationnelles au rayon des curiosités inobservables.

QUAND L'ESPOIR RENAÎT

L'espoir a été ravivé par plusieurs découvertes inattendues: celle des quasars en 1962 et celle des pulsars en 1967. Ces objets astrophysiques sont respectivement des trous noirs ou des étoiles à neutrons en rotation. Ils sont compacts, ce qui signifie que, par rapport à leur masse, ils ont une taille si petite que la relativité générale doit être prise en compte pour décrire leurs propriétés gravitationnelles. Les physiciens ont montré que si un système compact est animé de mouvements rapides (avec une vitesse proche de celle de la lumière), cohérents et pas trop symétriques, il constitue une bonne source d'ondes gravitationnelles (voir l'encadré ci-contre).

Bien qu'invisible pour les télescopes, la fusion – ou coalescence – de deux trous noirs, appartenant à un système binaire, est ainsi l'un des phénomènes les plus énergétiques qui soient. La puissance gravitationnelle émise par la fusion de deux trous noirs de masse

UNE DÉTECTION HISTORIQUE

Jeudi 11 février 2016. Les équipes des collaborations *Ligo* et *Virgo* organisent une conférence de presse. L'euphorie règne et les sourires rayonnent. C'est qu'elles viennent d'annoncer avoir détecté des ondes gravitationnelles, le 14 septembre 2015 à 11 h 51 (heure de Paris). C'est la première détection directe de ce type. L'événement observé par *Ligo* et noté GW150914 est un système binaire de deux trous noirs de 29 et 36 masses solaires, distant de 1,3 milliard d'années-lumière. Les deux détecteurs de *Ligo* ont enregistré le même signal avec seulement 7 millisecondes d'écart, le temps que l'onde se propage d'un détecteur à l'autre. Cette coïncidence ainsi que la forme du signal sont des indices convaincants que *Ligo* a enregistré une onde gravitationnelle. Les ondes gravitationnelles émises par les trous noirs constituent un signal très particulier : la fréquence et l'amplitude du signal

augmentent à mesure que les astres s'approchent de plus en plus vite en spirale l'un de l'autre. Les deux astres finissent par fusionner en formant un trou noir dont l'« horizon des événements », sa frontière en quelque sorte, est très déformée. Il se stabilise en une fraction de seconde et devient un trou noir en rotation sur lui-même, de forme plus régulière. C'est cette coalescence qui a produit des ondes gravitationnelles suffisamment intenses pour être détectées. L'analyse du signal enregistré indique que la masse du trou noir résultant est 62 fois celle du Soleil. Ainsi, pas moins de 3 masses solaires ont été converties ($E = mc^2$, rappelons-le) en ondes gravitationnelles en moins d'une seconde ! Et juste avant la fusion des deux astres, ces derniers tournaient l'un autour de l'autre à une cadence de 75 tours par seconde, à une vitesse voisine de la moitié de celle de la lumière...

Sean Bailey

expériences *Ligo*, sur deux sites éloignés aux États-Unis, et *Virgo*, au sud de Pise, en Italie, capables de mesurer des variations relatives de distance similaires à la taille d'un atome comparée au diamètre du Système solaire.

Ces détecteurs reposent sur le principe de l'interférométrie. Les masses-test sont des miroirs suspendus aux extrémités de deux bras perpendiculaires où se propage un faisceau laser de grande puissance (jusqu'à 200 watts). La moindre variation de longueur des deux bras influe sur l'intensité de la lumière au point de rencontre des deux faisceaux laser.

DE LA SUPERPOSITION DES ONDES LASER

Plus les miroirs sont éloignés, plus la variation de distance induite par le passage d'une onde gravitationnelle est grande et donc « facile » à mesurer. Ainsi, pour l'expérience franco-italienne *Virgo*, les deux bras perpendiculaires mesurent trois kilomètres de long (voir l'encadré page suivante). Un laser infrarouge émet un faisceau qu'un miroir semi-transparent, la « séparatrice », scinde en deux. Chacun des deux faisceaux entre dans une cavité optique de trois kilomètres avant d'atteindre un miroir (la masse-test) qui le renvoie vers la séparatrice. La lumière fait un grand nombre d'allers et retours dans la cavité avant de sortir, ce qui augmente considérablement la longueur effective des bras du détecteur. Sur la séparatrice, les deux faisceaux se superposent et interfèrent, à cause du caractère ondulatoire de la lumière. Au départ, l'appareil est réglé de sorte que les deux faisceaux interfèrent de façon destructive : les crêtes de l'onde lumineuse d'un des faisceaux correspondent aux creux de l'autre, et inversement. Les deux ondes se compensent et le signal enregistré par le capteur est nul.

Lorsqu'une onde gravitationnelle passe, la longueur du trajet de chaque faisceau varie de façon infime. Cela modifie la position relative des crêtes et des creux des ondes laser. Leur superposition ne s'annule plus totalement et le capteur enregistre un signal. Les chercheurs en déduisent les variations de longueur des bras et concluent sur le passage éventuel d'une onde gravitationnelle. Avec les interféromètres actuels, les plus petites variations de longueur détectables sont de l'ordre de 10^{-20} mètre, un cent millième de la taille d'un proton ! Cependant, de nombreux phénomènes autres que les ondes gravitationnelles peuvent modifier la distance. Les physiciens doivent isoler le signal lié aux ondes gravitationnelles de ce « bruit ».

Les interféromètres fonctionnent indépendamment, mais aussi de concert. L'intérêt est de combiner leurs informations afin de

solaire est d'environ 10^{46} watts, une valeur à comparer à la puissance lumineuse du Soleil, 10^{26} watts. Mais toutes les sources notables d'ondes gravitationnelles, aussi puissantes soient-elles, sont lointaines. En conséquence, les signaux percevables sur Terre sont extraordinairement faibles.

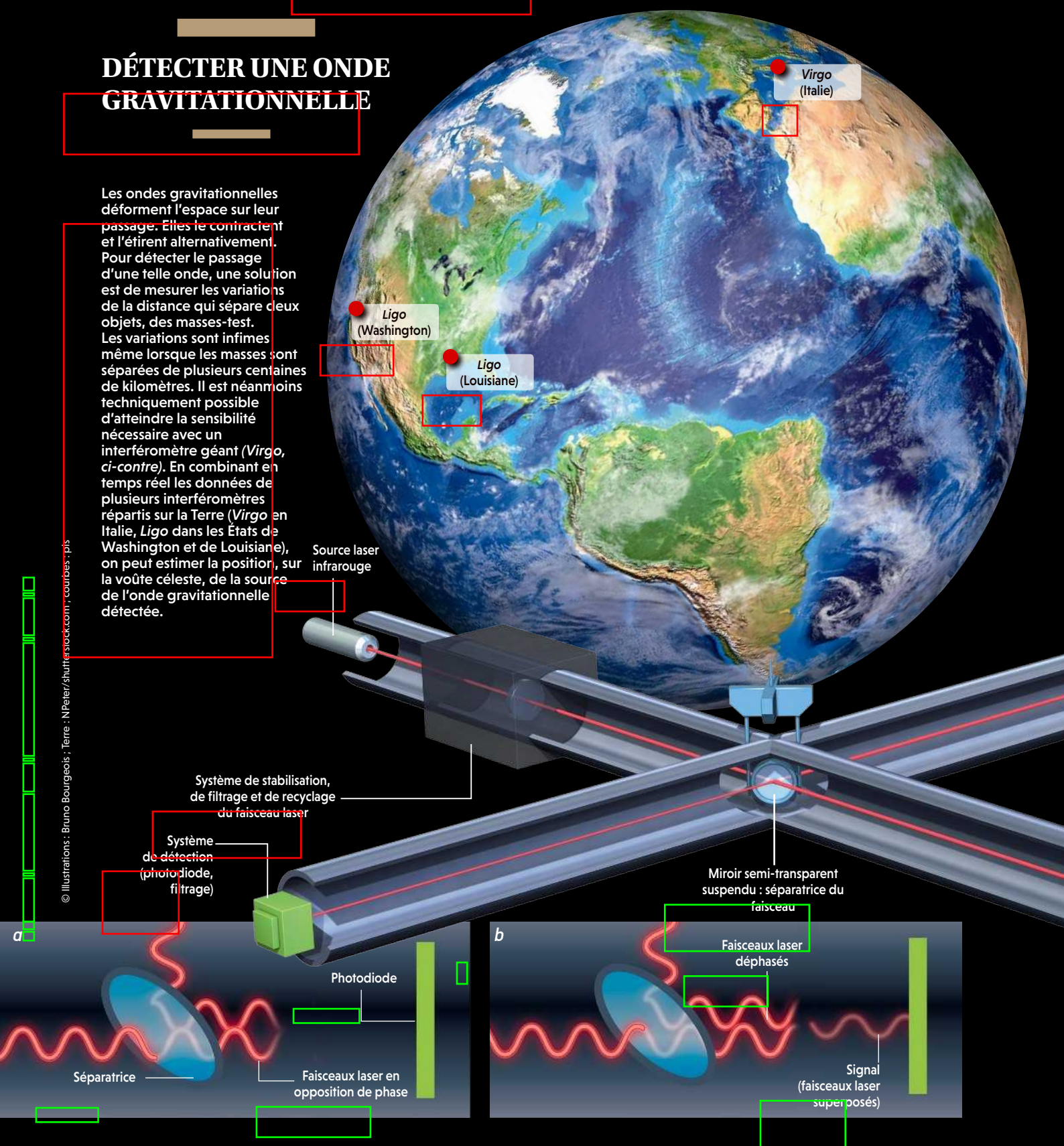
L'existence des ondes gravitationnelles a pour la première fois été prouvée de façon observationnelle par un biais indirect grâce à l'étude du pulsar binaire PSR B1513-16, découvert en 1974 par les Américains Joseph Taylor et Russell Hulse (ce qui leur valut le prix Nobel de physique en 1993). La diminution progressive de la période de révolution du système est liée à une perte d'énergie sous forme d'ondes gravitationnelles. Les calculs, notamment des physiciens français Thibault Damour et Nathalie Deruelle, ont confirmé l'accord entre la relativité générale et les observations.

Il restait ensuite à détecter directement les ondes gravitationnelles, un défi relevé par les

DÉTECTER UNE ONDE GRAVITATIONNELLE

Les ondes gravitationnelles déforment l'espace sur leur passage. Elles le contractent et l'étirent alternativement. Pour détecter le passage d'une telle onde, une solution est de mesurer les variations de la distance qui sépare deux objets, des masses-test. Les variations sont infimes même lorsque les masses sont séparées de plusieurs centaines de kilomètres. Il est néanmoins techniquement possible d'atteindre la sensibilité nécessaire avec un interféromètre géant (*Virgo*, *ci-contre*). En combinant en temps réel les données de plusieurs interféromètres répartis sur la Terre (*Virgo* en Italie, *Ligo* dans les États de Washington et de Louisiane), on peut estimer la position, sur la voûte céleste, de la source de l'onde gravitationnelle détectée.

© Illustrations : Bruno Bourgeois, Terre : N.Peter/shutterstock.com, courbes : pjs



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE L'INTERFÉROMÈTRE

Une source laser émet un faisceau qui est dirigé sur deux chemins perpendiculaires grâce à un miroir semi-transparent, la séparatrice. Les deux faisceaux parcourent des cavités de trois kilomètres de long, à l'extrémité desquelles se trouvent les deux masses-test. Lorsque les faisceaux ont effectué un grand nombre d'allers et retours, ils se rejoignent sur la séparatrice, où ils interfèrent. En

l'absence d'onde gravitationnelle, la longueur des deux trajets est définie de telle sorte que les deux faisceaux sont en opposition de phase, ils interfèrent de façon destructive (a). Si une onde traverse le détecteur, elle contracte ou étire la longueur d'un bras, l'annulation des deux faisceaux n'est alors pas parfaite et un signal est enregistré par la photodiode (b).

À l'écoute des ondes gravitationnelles

Pendule inversé
Pendule avec six étages
d'amortissement

Étage
d'amortissement

Base
du pendule
inversé
Masse-test
avec miroir

Tour de suspension

DES TOURS DE SUSPENSION

De nombreux phénomènes (vibrations sismiques, bruit quantique sur les miroirs...) altèrent le signal. Pour limiter certains de ces bruits de fond, tous les éléments de l'interféromètre sont suspendus à un dispositif installé dans des tours d'une dizaine de mètres de hauteur. Ils comprennent un pendule inversé qui soutient un pendule sur lequel sont fixés six étages de suspension.

Miroirs d'entrée
des cavités

Faisceau laser

CAVITÉ DE TROIS KILOMÈTRES DE LONG
Elle est parcourue de nombreuses fois par le faisceau qui effectue plusieurs allers et retours entre un miroir d'entrée de faible transparence et le miroir de la masse-test. Cela permet d'avoir des distances effectives de plusieurs centaines de kilomètres.

UN SIGNAL D'UN NOUVEAU TYPE

Le 17 août 2017, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* détectaient un signal qui a été l'objet de nombreuses rumeurs. Deux mois plus tard, après l'analyse des données, la confirmation est tombée : les ondes gravitationnelles du 17 août ont été émises par la fusion de deux étoiles à neutrons, un événement noté GW170817. La différence majeure avec la coalescence de deux trous noirs est que dans ce cas, l'émission des ondes gravitationnelles s'accompagne d'une contrepartie électromagnétique, avec des émissions de lumière à différentes longueurs d'onde. Et c'est exactement ce qui a été vu par près de 70 télescopes et observatoires au sol et dans l'espace. Deux éléments suggéraient que cet événement était d'une autre nature que celle des précédentes ondes gravitationnelles observées. La forme du signal des ondes gravitationnelles pour commencer. En effet, lors de la fusion de deux trous noirs, ceux-ci tournent de plus en plus vite l'un autour de l'autre en se rapprochant jusqu'à entrer en collision, tout en faisant vibrer l'espace-temps sous la forme d'ondes



Vue d'artiste de deux étoiles à neutrons lors de la coalescence avec l'émission d'ondes gravitationnelles et sa contrepartie électromagnétique.

gravitationnelles. Mais les interféromètres ne perçoivent que la fin de ce ballet cosmique, un « chirp » bref d'une fraction de seconde. Pour GW170817, le signal a duré près de 100 secondes. Par ailleurs, la présence d'une contrepartie électromagnétique (un sursaut gamma détecté par l'observatoire spatial *Fermi*) plaide pour la coalescence de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir. L'analyse des signaux a tranché en faveur de la première hypothèse. L'étude de la contrepartie électromagnétique a fait l'objet de nombreuses découvertes sur ce qui se passe pendant la

coalescence, à commencer par le sursaut gamma. Les astrophysiciens pensaient que la coalescence de paires d'étoiles à neutrons en produisait, ils en ont désormais la preuve ! Mais une nouvelle question se pose. L'intensité du sursaut est plus faible que ce que les modèles prévoyaient. De nouveaux scénarios sont à l'étude pour expliquer cet écart. Un autre résultat important concerne la matière expulsée au moment de la fusion. Cette matière initialement très chaude se refroidit rapidement en émettant de la lumière dans les différentes longueurs d'onde. On parle de kilonova, un phénomène qui avait été

uniquement prédit par la théorie. Selon les modèles, ce type d'événement est le siège de réactions nucléaires de synthèse d'éléments plus lourds que le fer grâce à l'abondance de neutrons dont regorgent les deux étoiles. Or, de nombreux observatoires ont scruté le rayonnement de GW170817 pendant les heures, les jours voire les semaines après la fusion. L'observatoire *Gemini* américain, le VLT européen et le télescope *Hubble* ont observé dans l'infrarouge des indices de production de plomb, d'or et de platine. On aurait ainsi observé pour la première fois ce qui est probablement l'un des principaux processus de productions d'éléments lourds. Et ce n'est pas tout. Selon une méthode proposée en 1986 par Bernard Schutz, de l'université de Cardiff, en comparant la distance des étoiles à neutrons données par l'onde gravitationnelle au décalage vers le rouge de la contrepartie électromagnétique dû à l'expansion de l'Univers, il est possible de mesurer d'une nouvelle façon le paramètre de Hubble qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers.

Sean Bailly

- > déterminer, par triangulation, la position sur la voûte céleste de la source d'ondes gravitationnelles. Ce fut le cas dès la première détection en 2015. De fait, les données de *Virgo* et de *Ligo* sont distribuées et analysées en commun depuis 2007. Le principe est le même que celui de la détection de l'origine d'un son. L'écart temporel entre les perceptions de chacune de nos deux oreilles renseigne sur la provenance du signal.

PARTAGER, C'EST CONFIRMER

Le partage des données a un second avantage : une onde gravitationnelle devrait être observée dans tous les détecteurs. C'est une bonne façon de confirmer le signal.

Déterminer la position de la source d'une onde gravitationnelle en temps réel permet de transmettre l'information aux télescopes et aux satellites qui observent le ciel dans divers domaines du spectre électromagnétique afin qu'ils pointent dans cette direction et essaient d'observer des phénomènes, par exemple l'émission de rayonnement gamma, en lien avec l'onde gravitationnelle détectée. Cette stratégie fut cruciale lors de la première observation d'une fusion d'étoiles à neutrons en août 2017 (voir l'encadré ci-dessus).

Après une série d'améliorations, les premiers détecteurs *Ligo* et *Virgo* ont changé de nom (pour *Advanced Ligo* et *Advanced Virgo*) et vu leur sensibilité croître au point de

L'interféromètre *Virgo* comprend deux bras qui abritent des faisceaux laser. Lorsqu'une onde gravitationnelle traverse la Terre, elle contracte l'espace dans une direction, puis dans l'autre. La longueur des bras de *Virgo* varie alors de l'ordre d'un cent millièème de la taille d'un proton.



repérer un premier événement gravitationnel dès leur mise en œuvre, en septembre 2015. Cet événement, nommé GW150914 (voir l'encadré page 27), était le résultat de la fusion de deux trous noirs, chacun d'environ 30 fois la masse du Soleil et situés à quelque 1 300 millions d'années-lumière. Cette détection a valu en 2017 le prix Nobel à Rainer Weiss, Barry Barish et Kip Thorne.

Après une nouvelle phase d'amélioration des détecteurs, la deuxième période de prise de données (entre décembre 2016 et août 2017) fut aussi l'occasion d'une première, la détection d'une fusion d'étoiles à neutrons. L'événement, noté GW170817, a été observé conjointement par les trois détecteurs de la collaboration *Ligo-Virgo*. Sollicité immédiatement, un ensemble de télescopes et d'instruments dans une large gamme de longueurs d'onde de la lumière a permis de repérer la galaxie hôte du phénomène et d'identifier celui-ci comme étant une kilonova, un phénomène prédit mais jamais encore observé (voir l'encadré page ci-contre).

LES DÉTECTIONS S'EMBALLENT

La troisième collecte de données a commencé en avril 2019. La sensibilité des détecteurs est telle qu'il y a une alerte par semaine ! Leur certification est en cours, mais on a d'ores et déjà une bonne idée de ce que l'on observe : des fusions de trous noirs, d'étoiles à neutrons ou d'un trou noir et une étoile à neutrons.

La sensibilité est mesurée par la distance maximale d'une source détectable. Cette

distance dépend du type de source, de ses caractéristiques, de l'amplitude de l'onde gravitationnelle émise, de sa durée... Pour donner un exemple, une collision d'étoiles à neutrons dont chacune serait 1,4 fois plus massive que le Soleil émettrait une onde gravitationnelle à la limite de la sensibilité actuelle de *Virgo*, si elle se trouvait à environ 160 millions d'années-lumière. Un pulsar ne se ferait « entendre » qu'à seulement quelques dizaines de milliers d'années-lumière.

AUGMENTER LE VOLUME DE L'UNIVERS SONDÉ

Cette distance maximale étant connue, on doit aussi tenir compte de la rareté des sources astrophysiques, comme les collisions d'étoiles à neutrons. Une sensibilité accrue augmente la probabilité de détection. En d'autres termes, on augmente le volume de l'Univers sondé. À l'horizon 2025, la portée prévue pour les collisions d'étoiles à neutrons devrait se situer aux alentours de 1 000 millions d'années-lumière pour *Ligo* et 600 millions d'années-lumière pour *Virgo*. Parallèlement, de nouveaux détecteurs sont en construction au Japon (*Kagra*) et en Inde (*Ligo India*).

Dans un avenir plus lointain, grâce à des projets ambitieux, tels le télescope *Einstein* doté de faisceaux de 30 kilomètres de long au sol ou *Lisa* et ses bras de deux millions et demi de kilomètres dans l'espace, ce n'est plus quelques instruments de l'Univers que nous entendrons, mais tout un orchestre ! ■

BIBLIOGRAPHIE

N. DERUELLE ET J.-P. LASOTA, *Les Ondes gravitationnelles*, Odile Jacob, 2018.

P. GRANDCLÉMENT, Trous noirs et ondes gravitationnelles, *Dossier Pour la Science*, n° 75, avril-juin 2012.

B. SCHUTZ ET S. VITALE, *Ondes gravitationnelles, la bande-son de l'Univers*, *Pour la Science*, n° 409, novembre 2011.

D. KENNEFICK, *Traveling at the Speed of Thought : Einstein and the Quest for Gravitational Waves*, Princeton University Press, 2007.

M. BARTUSIAK, *Einstein's Unfinished Symphony : Listening to the Sounds of Space-Time*, Berkley Publishing Group, 2003.

L'ESSENTIEL

● Dans le cadre de la relativité générale, les trous noirs sont chauves, c'est-à-dire qu'ils ne sont définis que par leur masse et leur mouvement angulaire.

● La détection et l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs permettent de tester cette hypothèse.

● Cette spectroscopie gravitationnelle est en passe de devenir un nouveau type de tests de la relativité générale.

● Tout écart à la théorie serait le signe d'une nouvelle physique.

L'AUTEUR



OLIVIER MINAZZOLI
Astrophysicien au centre scientifique de Monaco et de l'observatoire de la Côte d'Azur. Membre de la collaboration Virgo.

Une nouvelle fenêtre sur l'Univers

L'analyse du spectre des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs est une aubaine pour étudier ces astres et, plus encore, la relativité générale dans des conditions extrêmes. Une nouvelle science ébouriffante !

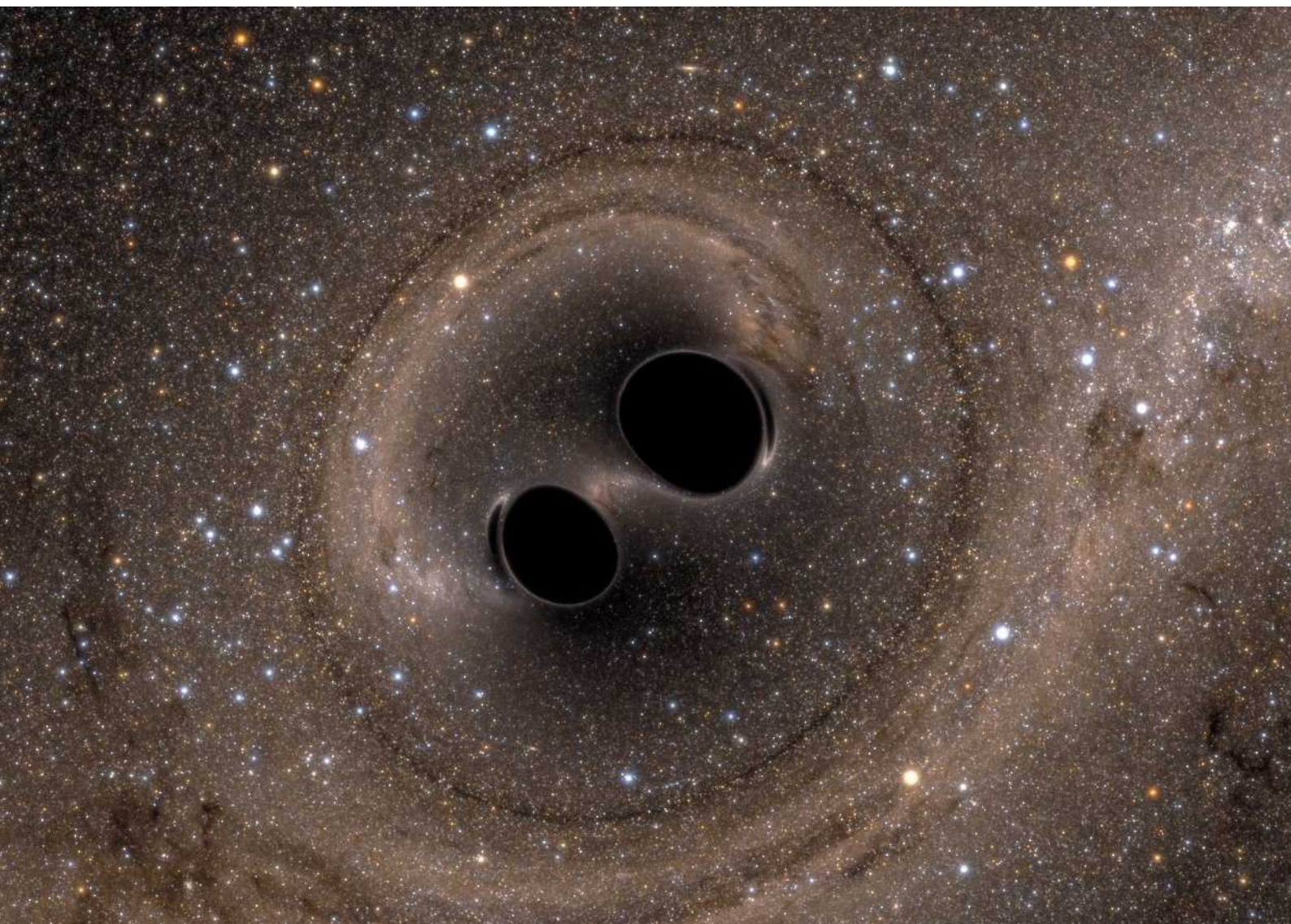
E

n janvier 1971, dans un article de la revue *Physics Today*, les physiciens Remo Ruffini et John Wheeler sont catégoriques : « *Black holes have no hair* », soit, en français « les trous noirs n'ont pas de cheveux ». Ce n'est à l'époque qu'une conjecture. Elle sera démontrée quelques années plus tard et prendra alors le

nom de « théorème de calvitie » des trous noirs (le « *no hair theorem* » en anglais). Les trous noirs auraient donc un système pileux ? Non. Explication.

L'existence des trous noirs, objets prédits par la théorie de la relativité générale depuis des décennies, n'a été confirmée que très récemment (voir *L'épopée d'une image historique*, par A. Riazuelo, page 16). Paradoxalement, dans le cadre de cette théorie, ils seraient aussi les objets macroscopiques les plus simples de la nature, puisqu'ils seraient entièrement décrits par seulement trois paramètres : leur masse, leur moment cinétique (ou « moment angulaire », ce nombre décrivant leur rotation) et leur charge. Plus encore, la charge d'un trou noir astrophysique est très probablement





Avant de fusionner, deux trous noirs se rapprochent inexorablement en spiralant. Cette simulation montre ce que nous verrions depuis un hypothétique vaisseau spatial situé à proximité de l'événement. Les images des étoiles environnantes sont déformées par la gravité des trous noirs.

nulle, puisque l'on ne s'attend pas qu'un trou noir accrete uniquement de la matière chargée positivement (ou négativement). Deux nombres suffiraient donc à caractériser ces astres. C'est remarquable!

QUAND DEUX CHAUVES SE RENCONTRENT

Une telle simplicité ne se trouve le plus souvent que dans le monde microscopique et idéalisé des particules élémentaires, telles que les électrons, mais certainement pas dans le monde des objets macroscopiques. L'origine de la métaphore capillaire est ici: elle signifie en quelque sorte que rien à la surface des trous noirs ne complexifie leur nature fondamentalement simple. Un nouveau moyen de le vérifier, et de pousser la relativité générale dans ses retranchements, s'est récemment offert aux astronomes: l'étude des ondes gravitationnelles nées de la fusion de deux trous noirs.

Lorsque deux trous noirs fusionnent, naît un nouveau trou noir plus massif que chacun des deux trous noirs originels, mais un peu moins massif que la somme des deux masses initiales, car une partie de l'énergie est libérée sous forme d'ondes gravitationnelles en vertu de la célèbre formule $E = mc^2$. Pendant un bref instant, le trou noir nouvellement formé émet de telles ondes, avant de retrouver un état d'équilibre. Ces ondes gravitationnelles consistent en des oscillations amorties dont les fréquences particulières, c'est-à-dire le spectre, dépendent exclusivement de la masse et du moment angulaire du trou noir final, si ce dernier est bel et bien chauve comme le prédit la relativité d'Einstein *via* le théorème de calvitie. De manière générale, même hors contexte gravitationnel, ces oscillations amorties sont nommées «modes quasi normaux». Elles sont typiques d'objets qui, soumis à une perturbation, dissipent l'énergie introduite par

➤ cette perturbation en retournant à l'équilibre, comme un diapason.

En conséquence, de la même manière que la spectroscopie atomique identifie des éléments par l'observation de la lumière émise à certaines fréquences spécifiques (les raies spectrales), la spectroscopie des trous noirs renseigne sur ces derniers par l'observation d'ondes gravitationnelles à des fréquences typiques. En somme, par l'étude du spectre des ondes gravitationnelles émises après la fusion de deux trous noirs, on est potentiellement capable de déduire la masse et le moment angulaire du trou noir final. Comme il est possible d'estimer par ailleurs ses paramètres à partir des propriétés observées des trous noirs initiaux, il est possible de confirmer qu'il est bien chauve. À l'inverse, l'observation d'une violation de cette propriété signifierait que la théorie sous-jacente n'est pas la relativité générale. Ce serait alors une porte ouverte vers une nouvelle physique.

Une subtilité semblait toutefois devoir contrarier ces analyses spectroscopiques. En effet, la relativité générale est une théorie non linéaire dont le comportement lors de la fusion de deux trous noirs ne peut s'approcher qu'au moyen de simulations numériques. Pour avoir des modes quasi normaux, les effets non linéaires doivent être négligeables. Mais on supposait qu'ils étaient importants dans le système durant un certain temps très bref avant et après la fusion. Le trou noir se comporterait donc bien comme une sorte de diapason et se prêterait à l'étude spectroscopique seulement au bout d'un certain temps, bref mais *a priori* inconnu, après la fusion.

Ainsi, les équipes de la collaboration *Ligo-Virgo* ont réalisé un début d'analyse spectroscopique à partir du signal (noté GW150914) des premières ondes gravitationnelles détectées

L'ÉTUDE DU SPECTRE

DES TROUS NOIRS POURRAIT

ÊTRE UTILISÉE POUR TESTER

CERTAINS ASPECTS

DE LA GRAVITATION QUANTIQUE

en 2015, mais en éliminant la première partie par peur des effets non linéaires potentiellement cachés et risquant de biaiser les résultats. L'idée était de maximiser les chances de validité de l'approximation en termes de modes quasi normaux. Cette méthode autorise bien une analyse conduisant à une valeur de la masse du trou noir final, mais elle reste peu précise.

LE PROBLÈME DES EFFETS NON LINÉAIRES

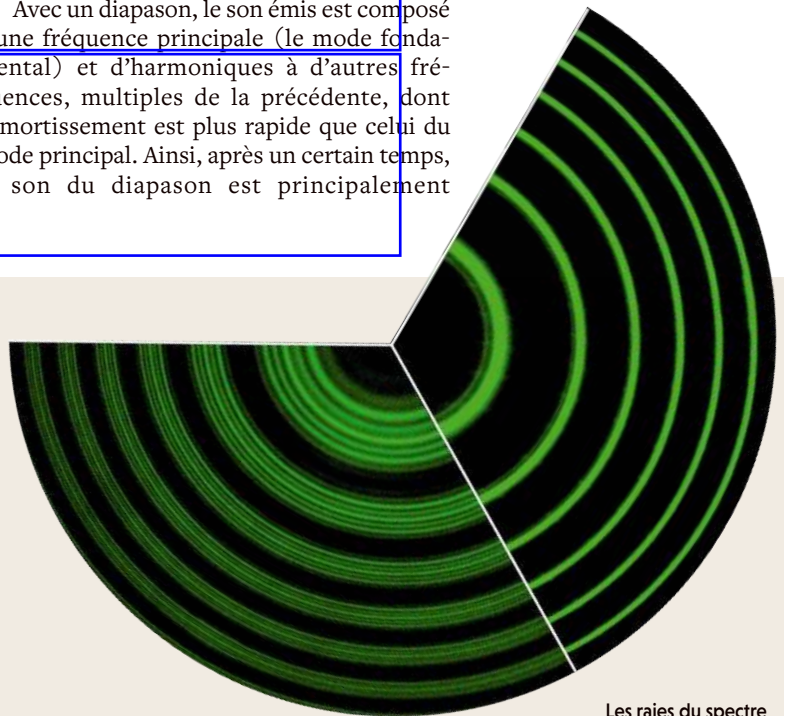
Les travaux de Matthew Giesler, doctorant à l'institut de technologie de Californie (Caltech), et de ses collègues, ont changé la donne. Ils ont montré, à partir de simulations numériques, que le signal dès la fusion pouvait être décrit par des modes quasi normaux, dès lors que l'on ajoute des harmoniques au mode fondamental. En quoi consistent ces harmoniques ?

Avec un diapason, le son émis est composé d'une fréquence principale (le mode fondamental) et d'harmoniques à d'autres fréquences, multiples de la précédente, dont l'amortissement est plus rapide que celui du mode principal. Ainsi, après un certain temps, le son du diapason est principalement

L'EFFET ZEEMAN

En spectroscopie atomique, lorsqu'un atome est soumis à un champ magnétique, de nouvelles raies spectrales apparaissent autour des raies d'émission déjà présentes pour un atome non soumis à un champ extérieur.

Les raies spectrales de l'atome sont en quelque sorte démultipliées. Il s'agit de l'effet Zeeman, qui a valu à son découvreur l'obtention du prix Nobel en 1902. L'effet est similaire pour un trou noir chauve, et donc en rotation, par rapport à un trou noir sans rotation. Les modes fondamentaux sont démultipliés, conduisant à un nouveau spectre particulier qui dépend de l'amplitude de la rotation.



Les raies du spectre du mercure (à droite) sont démultipliées en présence d'un champ magnétique (à gauche).

constitué de la fréquence fondamentale, les harmoniques s'étant évanouies. Transposé aux trous noirs, le comportement est similaire : alors que le mode fondamental perdure, des harmoniques peuvent avoir une contribution non négligeable au début de la phase de vibration du trou noir final, c'est-à-dire juste après la fusion. C'est bien ce qu'ont montré les chercheurs : un signal comportant un mode fondamental et des harmoniques peut tout à fait décrire le signal tel qu'il est prédit par les simulations numériques dès la fusion. En d'autres termes, soit les effets non linéaires sont négligeables, soit ils sont aussi bien décrits par des modes quasi normaux. Quoi qu'il en soit, plus besoin de se donner un laps de temps arbitraire entre la fusion et le début du signal pris en compte dans l'analyse spectroscopique.

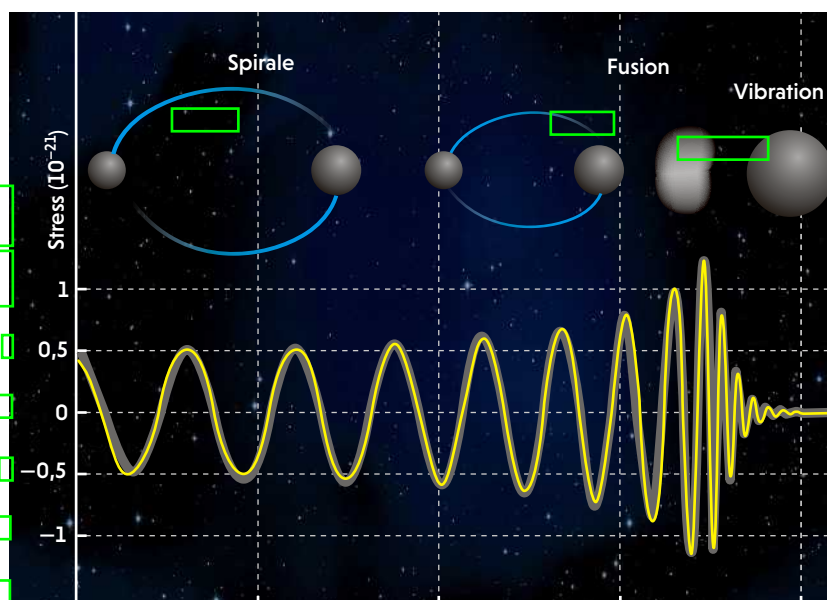
L'équipe de Matthew Giesler a notamment simulé le signal lié à la vibration du trou noir final en y ajoutant le type de bruit qui est attendu pour un signal réel, tel qu'il serait détecté par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*. Ils ont ensuite appliqué leur méthode pour déduire du signal la masse et le moment angulaire du trou noir final, et dont la valeur était donnée par ailleurs par leur simulation numérique. Les deux coïncidaient. Il ne restait donc plus qu'à appliquer la méthode à de vraies données.

UN CHEVEU DANS LA SOUPE ?

C'est ce qu'ils ont fait dans une deuxième étude, cette fois coordonnée par Max Isi, de l'institut de technologie du Massachusetts (MIT). Ils ont appliqué leur méthode au signal du premier événement GW150914 et obtenu des résultats sur les valeurs de la masse et du moment angulaire du trou noir final en accord avec les premières analyses de la collaboration *Ligo-Virgo*, mais avec une incertitude réduite. Ils obtiennent surtout, et pour la première fois, des indices confirmant la présence d'harmoniques du mode fondamental dans le spectre de la phase de vibration de GW150914, ce qui est considéré par beaucoup comme un prérequis pour réellement parler de spectroscopie des trous noirs. En ce sens, leur analyse acterait la première étude spectroscopique d'un trou noir concluante.

Alors, est-il bien chauve ? Dans le cadre de la relativité générale, il est possible d'estimer les paramètres du trou noir final à partir de ceux des trous noirs originels. Or, avant la fusion, lorsque les deux trous noirs orbitent toujours l'un autour de l'autre, le signal gravitationnel détecté renseigne sur les paramètres de ces derniers. On peut alors comparer les estimations des paramètres du trou noir final obtenues à partir soit du signal avant la fusion, soit de celui produit après, lors de la vibration du trou noir final.

Si la théorie de la relativité générale est correcte, les résultats devraient être similaires.



La fusion de deux trous noirs se déroule en trois étapes : la phase spirale, durant laquelle les deux trous noirs originels orbitent l'un autour de l'autre, la phase de fusion et la phase de vibration (ou de désexcitation) du trou noir final. Les ondes gravitationnelles varient au cours de l'événement. Pour la première onde gravitationnelle, nommée GW150914, détectée par les deux interféromètres *Ligo* le 15 septembre 2014, la figure montre un signal reconstruit (en gris) à partir des données comparé à une simulation numérique fondée sur la relativité générale (en jaune).

Plus précisément, puisque l'analyse de la phase de vibration du trou noir final fait l'hypothèse, par construction, que l'objet final est un trou noir « chauve », la cohérence des résultats obtenus séparément à partir des données avant et après la fusion serait une preuve que l'objet final serait, non seulement un trou noir, mais un trou noir chauve. La spectroscopie des trous noirs a donc l'avantage d'offrir aux astronomes un nouveau type de tests de la relativité générale dans des régimes jusque-là inaccessibles.

Les résultats de Max Isi et de ses collègues sur GW150914 sont encore modestes, mais vont dans le bon sens : le spectre du trou noir final est en accord avec l'hypothèse de calvitie à 20% près. Cette valeur, encore assez peu concluante, résulte de la faible intensité du signal pendant la phase de vibration pour l'événement GW150914. Mais ce chiffre devrait s'améliorer avec de nouvelles détectations. À moins que la relativité générale ne soit finalement pas la meilleure description de la nature géométrique de l'espace-temps. Par exemple, Aurélien Barrau et ses collègues ont récemment suggéré que l'étude du spectre des trous noirs pourrait, peut-être, un jour être utilisée pour tester certains aspects, pour le moment hypothétiques, de la gravitation quantique. La spectroscopie des trous noirs aidera à trancher. Tout écart à la calvitie des trous noirs serait un indice d'une nouvelle physique, un cheveu dans la soupe du modèle standard. ■

BIBLIOGRAPHIE

- M. ISI ET AL., Testing the no hair theorem with GW150914, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, art. 111102, 2019.
- R. RUFFINI ET J. WHEELER, Introducing the black hole, *Physics Today*, vol. 24(1), pp. 30-41, 1971.

L'ESSENTIEL

● Comme les trous noirs, les trous blancs sont des solutions des équations de la relativité générale. Alors que rien ne s'échappe d'un trou noir, rien ne pénètre dans un trou blanc.

● Selon la théorie de la gravité quantique à boucles, les trous blancs seraient le destin ultime des trous noirs.

● La matière qui s'est effondrée dans un trou noir ressort de l'astre lorsque celui-ci se transforme en trou blanc.

● S'il n'y a pour l'instant aucune preuve de l'existence des trous blancs, différentes pistes sont explorées en lien avec la matière noire et les rayons cosmiques.

L'AUTEUR



CARLO ROVELLI
professeur à l'université
d'Aix-Marseille, chercheur
au Centre de physique
théorique de Luminy

Troublants trous blancs

Les trous blancs ? Des sosies inversés des trous noirs qui expulsent la matière sans jamais en absorber et seraient le destin ultime de ces astres ultracompacts. Leur détection ouvrirait une voie inédite sur la gravitation quantique.

L

Le 10 avril 2019, l'humanité a admiré pour la première fois une image réelle d'un trou noir : une tache noire entourée d'un anneau brillant. Grâce à ce « cliché » (voir *L'épopée d'une image historique*, par A. Riazuelo, page 16) nous avons maintenant une preuve visible et directe de l'existence de ces objets exotiques et extrêmes.

Si l'existence des trous noirs ne fait aujourd'hui guère de doute, de nombreuses décennies ont été nécessaires pour que les physiciens en soient persuadés. Les trous noirs étaient une sorte de curiosité mathématique, une des solutions possibles des équations de la relativité générale d'Einstein, mais sans

existence réelle dans l'Univers. En 1972, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, futur Prix Nobel, qualifiait encore ces objets de « très hypothétiques ».

Les indices de leur réalité physique ont cependant fini par s'accumuler. Parmi les derniers, les interféromètres *Ligo* et *Virgo* ont détecté des ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, dont la forme correspond exactement à celle produite quand deux trous noirs tombent l'un sur l'autre en spiralant jusqu'à fusionner.

Cette histoire de la reconnaissance des trous noirs comme constituants de l'Univers pourrait bien se répéter avec d'autres objets tout aussi surprenants et exotiques que les trous noirs : les trous blancs. Comme leurs homologues sombres, ces astres correspondent à certaines solutions des équations de la relativité générale. Pour les décrire simplement, ce sont des trous noirs évoluant à l'envers : des trous noirs dont le film de la vie serait projeté en partant de la fin. Malgré cette différence, pour un observateur extérieur à un tel astre, il est difficile de distinguer un trou blanc d'un trou noir. Les deux sont massifs et dotés d'un champ gravitationnel attractif. Ils peuvent donc >



La transformation explosive
de trous noirs en trous blancs
pourrait expliquer certaines
observations astrophysiques.

➤ tous deux soutenir un disque d'accrétion et être entourés d'objets en orbite. Mais si l'on voyait le «trou» expulser une gerbe de matière, on saurait aussitôt qu'il s'agit d'un trou blanc.

La différence serait tout aussi évidente si, d'aventure, un vaisseau spatial s'approchait du bord d'un tel astre. Dans le cas du trou noir, il pourrait y pénétrer, mais il serait alors piégé par le champ gravitationnel intense, incapable d'en ressortir. À l'inverse, avec un trou blanc, le vaisseau serait incapable de pénétrer dans l'astre. Lors de son approche, il rencontrerait un flot de matière sortante et il lui faudrait une énergie infinie pour pénétrer dans le trou blanc.

NÉS D'UN TROU NOIR

Nous savons comment des trous noirs peuvent naître. Par exemple, lorsqu'une étoile très massive arrive en fin de vie, son «carburant» s'épuise et elle s'effondre sous son propre poids. Dans une explosion gigantesque, une supernova, les couches externes de l'astre sont projetées dans le milieu interstellaire, tandis que son cœur se comprime et devient si dense qu'il forme un trou noir. Ce dernier est délimité par un «horizon» qui marque la frontière à partir de laquelle il est impossible de ressortir.

Quant aux trous blancs, à l'inverse, on imaginerait difficilement comment de tels objets pouvaient se former. D'où les doutes sur leur existence. Cependant, un certain nombre de physiciens, dont je fais partie, commencent à prendre au sérieux la possibilité que les trous blancs existent réellement: ils se formeraient à la fin de la vie d'un trou noir. Ce dernier pourrait mourir et se transformer en trou blanc. La matière et l'énergie tombées dans le trou noir réémergeraient alors en sortant du trou blanc.

Cette idée vient naturellement dans le cadre de la théorie sur laquelle je travaille, la «gravitation quantique à boucles». Et elle apporte une réponse à deux questions ouvertes que les physiciens tentent de résoudre depuis des décennies.

La première: que se passe-t-il au centre d'un trou noir? Les observations astronomiques nous révèlent que de grandes quantités de matière tombent en spirale sur un trou noir. Toute cette matière continue sa chute vers le centre de l'astre. Mais après, peut-elle s'y accumuler à l'infini?

Deuxième question: que se passe-t-il quand un trou noir termine sa vie? Dans les années 1970, Stephen Hawking a montré que les trous noirs émettent un rayonnement, dit de Hawking (voir l'encadré ci-contre), ce qui les conduit à perdre lentement leur masse jusqu'à devenir très petits. Que se passe-t-il ensuite? Nul ne le sait.

La relativité générale d'Einstein explique très bien le comportement observé des trous noirs, mais elle est insuffisante pour répondre à ces deux questions. Cette théorie décrit la dynamique de la matière et de l'espace-temps: la matière se déplace en fonction de la géométrie de l'espace-temps, tandis que l'espace-temps se déforme en présence de matière. L'espace-temps n'est donc plus un cadre passif où s'inscrit la réalité: sa géométrie, variable, détermine les mouvements de la matière d'une telle façon qu'on les interprète comme étant dus à une «force gravitationnelle». Par exemple, la géométrie de l'espace-temps autour de nous est courbée par la Terre, et c'est ce qui nous fait tomber vers le bas.

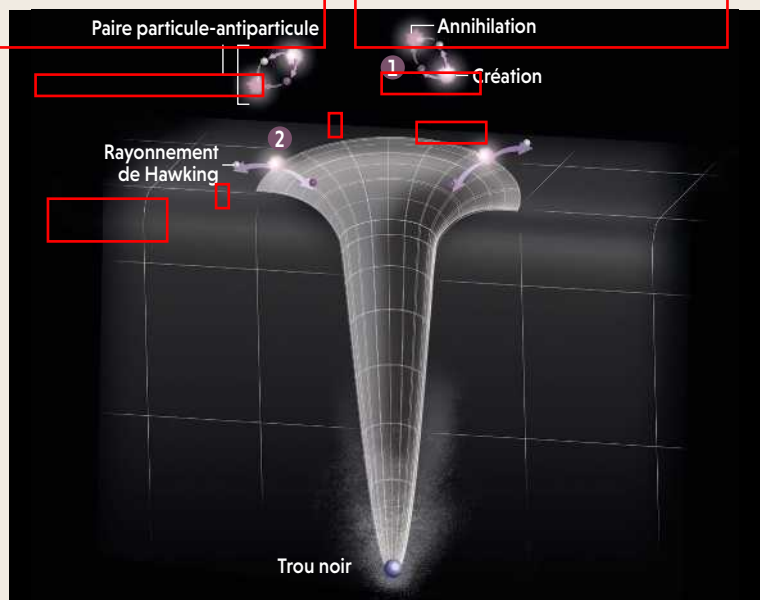
Einstein a écrit les équations finales de sa théorie en 1915. Quelques mois plus tard, à sa grande surprise, le physicien et mathématicien allemand Karl Schwarzschild a trouvé une solution exacte de ces équations. Cette solution décrit la géométrie de l'espace-temps autour d'un corps sphérique, comme une étoile ou la Terre. Mais il a fallu des décennies pour donner une interprétation physique complète de cette solution mathématique. Parce que si la masse du corps est concentrée dans un volume dont le rayon est plus petit qu'une valeur particulière, nommée aujourd'hui rayon de Schwarzschild, des choses très étranges se passent.

La situation s'est clarifiée, notamment grâce au Britannique Arthur Eddington et surtout à l'Américain David Finkelstein: lorsque la masse est concentrée dans le volume défini par le rayon

RAYONNEMENT DE HAWKING

La physique quantique implique que le vide est en fait le siège d'une formidable activité: des paires particule-antiparticule apparaissent spontanément et s'annihilent très vite ①. C'est le principe d'incertitude de Heisenberg qui autorise cette violation temporaire de la conservation de l'énergie. En 1974, Stephen

Hawking a remarqué que si une paire est créée juste au-dessus de l'horizon d'un trou noir, une particule tombe dans le trou noir tandis que l'autre s'échappe; elles ne peuvent donc plus s'annihiler ②. Pour un observateur lointain, le trou noir semble émettre un rayonnement. Le trou noir perd ainsi de la masse: il s'évapore.



de Schwarzschild, on obtient un trou noir. La surface définie par le rayon de Schwarzschild est nommée l'horizon du trou noir et marque la frontière de non-retour pour tout ce qui y tombe. Ces dernières années, nous avons accumulé de nombreuses preuves empiriques que la solution de Schwarzschild décrit bien la réalité.

La solution de Schwarzschild ne dit pas ce qui se passe au centre du trou noir ni dans le futur lointain. La matière qui traverse l'horizon continue de tomber à l'intérieur, vers le centre de l'astre. D'après la relativité générale, elle s'y accumule de sorte que la densité y devient infinie, donnant lieu à une «singularité» qui marquerait la fin de la réalité. Toute chose deviendrait néant et le temps lui-même se figerait.

Cependant, cette prédiction extrême est très certainement erronée. En effet, à l'approche du centre du trou noir, on sort du domaine de validité de la relativité générale. Dans la région centrale, la gravité est si intense que l'on ne peut plus négliger les effets de la physique quantique. Plus précisément, nous devons prendre en compte les effets quantiques sur l'espace-temps. Pour comprendre ce qui se passe au cœur du trou noir, il faut une théorie quantique de la gravitation.

On peut espérer que la prise en compte de la physique quantique dans le voisinage de la singularité fasse disparaître les grandeurs physiques infinies, et donc la singularité. L'application de la physique quantique a souvent résolu des problèmes de ce genre, par exemple pour expliquer la stabilité des atomes et le fait que l'électron ne s'écroule pas sur le noyau.

UN ESPACE-TEMPS TRÈS DISCRET

Que deviendrait la singularité du trou noir dans le cadre d'une théorie quantique de la gravitation? La réponse est loin d'être acquise, car aucune théorie ne fait consensus. Les physiciens théoriciens explorent deux principales pistes. La première est la théorie des cordes, qui suppose que les particules fondamentales ne sont pas des objets ponctuels mais de petites cordes vibrantes. La seconde, qui nous intéresse ici, est la gravité quantique à boucles, qui stipule que l'espace-temps est lui-même soumis aux phénomènes quantiques.

Avec sa théorie de la relativité, Einstein a montré que l'espace-temps n'est pas une scène figée où évolue l'Univers, mais est lui-même un acteur de cette évolution. Non seulement l'espace-temps dicte le mouvement de la matière, mais il réagit à sa présence (en se courbant, se dilatant ou se contractant). La gravité quantique à boucles étend la vision d'Einstein à la réalité quantique du monde: les concepts quantiques qui s'appliquent aux particules s'appliquent aussi à l'espace-temps.

La gravité quantique à boucles a été développée à partir des années 1980. Les physiciens ont d'abord reformulé la relativité générale

HORIZON OU HORIZON DES ÉVÉNEMENTS?

L'horizon des événements définit de façon rigoureuse la frontière d'un trou noir: si elle est franchie, il n'est plus possible d'échapper à la gravité du trou noir et donc d'en ressortir. Cette définition est simple et ne présente pas d'ambiguïté quand il s'agit d'un trou noir statique et sans charge électrique. Il en va autrement quand on considère des trous noirs réalistes, dotés par exemple d'un mouvement de rotation. On peut alors définir plusieurs types d'horizon. Et si l'on parle de trous blancs, la définition doit être inversée, car la frontière à définir correspond à la limite qu'il est impossible de franchir pour pénétrer dans le trou blanc. Dans le cadre de cet article, on a choisi de parler simplement d'horizon, sans préciser.

pour qu'elle ressemble à une théorie de l'électromagnétisme. L'idée est que nous connaissons une procédure qui permet de transformer une théorie classique, comme l'électromagnétisme, en une théorie quantique. Dès lors, les boucles de la nouvelle théorie sont les analogues des «lignes de force», ou lignes de Faraday, des champs électrique et magnétique. Et dans la formulation quantique des lignes de force de la gravitation, on trouve que l'espace y est discrétisé, composé d'éléments individuels, ou *quanta*, minuscules mais de taille finie.

À grande échelle, la trame est tellement serrée que l'espace-temps apparaît comme un continuum, dont l'évolution est décrite par la relativité générale. Mais quand la densité d'énergie devient très élevée, comme au cœur d'un trou noir, on ne peut plus négliger la structure discrète de l'espace-temps et les prédictions de la gravité quantique à boucles diffèrent de celles de la relativité générale classique.

Cet espace-temps discrétisé a un effet direct sur le cœur du trou noir. Il est impossible d'avoir une singularité, un volume infiniment petit où règne une densité infinie. En 2014, j'ai étudié avec Francesca Vidotto, aujourd'hui à l'université de Western Ontario, au Canada, la possibilité que la matière s'effondrant dans un trou noir forme un objet de taille minimale finie, où la densité est extrême mais reste finie: une «étoile de Planck». La gravité quantique exerce une pression suffisante pour empêcher que l'effondrement de la matière se poursuive et forme une singularité. La densité de l'étoile de Planck serait le maximum qu'il est physiquement possible d'atteindre.

Mais que deviendrait ensuite la matière qui continue de tomber dans le trou noir? Elle ne peut faire qu'une chose: rebondir! Ce scénario semble contredire la vision classique d'un trou noir où, par définition, tout objet ne peut que tomber vers le centre. Mais au cœur du trou noir, les effets quantiques ont une influence non seulement sur la matière, mais aussi sur l'espace-temps lui-même. La gravité quantique autorise l'espace-temps du trou noir à rebondir, la géométrie peut changer et donner lieu à une nouvelle région d'espace-temps de caractéristiques différentes de celles du trou noir.

Avec Hal Haggard, du Bard College, aux États-Unis, nous avons montré que, contrairement à ce que l'on pensait auparavant, les équations de la relativité générale d'Einstein sont compatibles avec la possibilité qu'un trou noir devienne un trou blanc dans le futur, en passant par une brève phase quantique. Pour comprendre un peu plus ce qui se passe, prenons la trajectoire d'une balle qui tombe et touche le sol. Le rebond ressemble à la chute, mais visionnée à l'envers. Il en serait de même avec un trou blanc. Cet objet serait bien l'*alter ego* d'un trou noir, mais observé en remontant le temps.

> Dans les années 1930, le physicien irlandais John Lighton Synge a été l'un des premiers à étudier l'intérieur d'un trou noir, même si cette notion n'était pas encore claire à l'époque. Il a montré qu'avec un petit ajustement des équations de la relativité générale, il était possible de prolonger la géométrie d'un trou noir en celle d'un trou blanc. La gravité quantique à boucles confirme que la physique quantique autorise ce petit ajustement.

Où est situé le trou blanc produit par un trou noir? Est-il très éloigné, relié au trou noir par un trou de ver dans le tissu de l'espace-temps, ou même dans un univers différent? Rien d'aussi spectaculaire. Le trou blanc reste au même endroit que le trou noir, tout simplement dans son futur. Il est difficile de se représenter comment l'espace-temps évolue à l'intérieur de l'astre lors de ce changement, mais, vu de l'extérieur, tout est simple: dans la première partie de sa vie, le trou est noir et la matière tombe

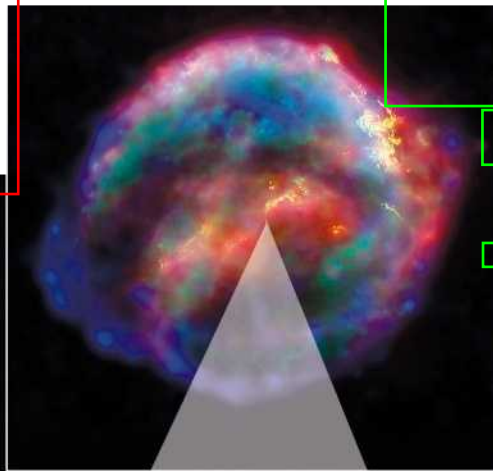
dedans sans pouvoir s'en échapper; puis, dans la seconde partie, après la transition quantique, il est blanc et la matière ne peut qu'en sortir.

Concrètement, pour que cela se produise, il doit y avoir un instant où l'horizon du trou noir devient celui d'un trou blanc. C'est la physique quantique qui permet cette transformation grâce à l'effet tunnel. Ce phénomène correspond à une brève violation des équations classiques de la physique (ici, celles de la relativité générale). Connu depuis les années 1920, l'effet tunnel explique, par exemple, la radioactivité alpha. Dans le noyau atomique, la particule alpha (deux protons et deux neutrons liés) ne peut *a priori* pas s'échapper du fait du potentiel nucléaire dû aux interactions forte et électromagnétique exercées par le noyau. Mais grâce à l'effet tunnel, elle «passe sous le mur du potentiel» et s'extrait du noyau.

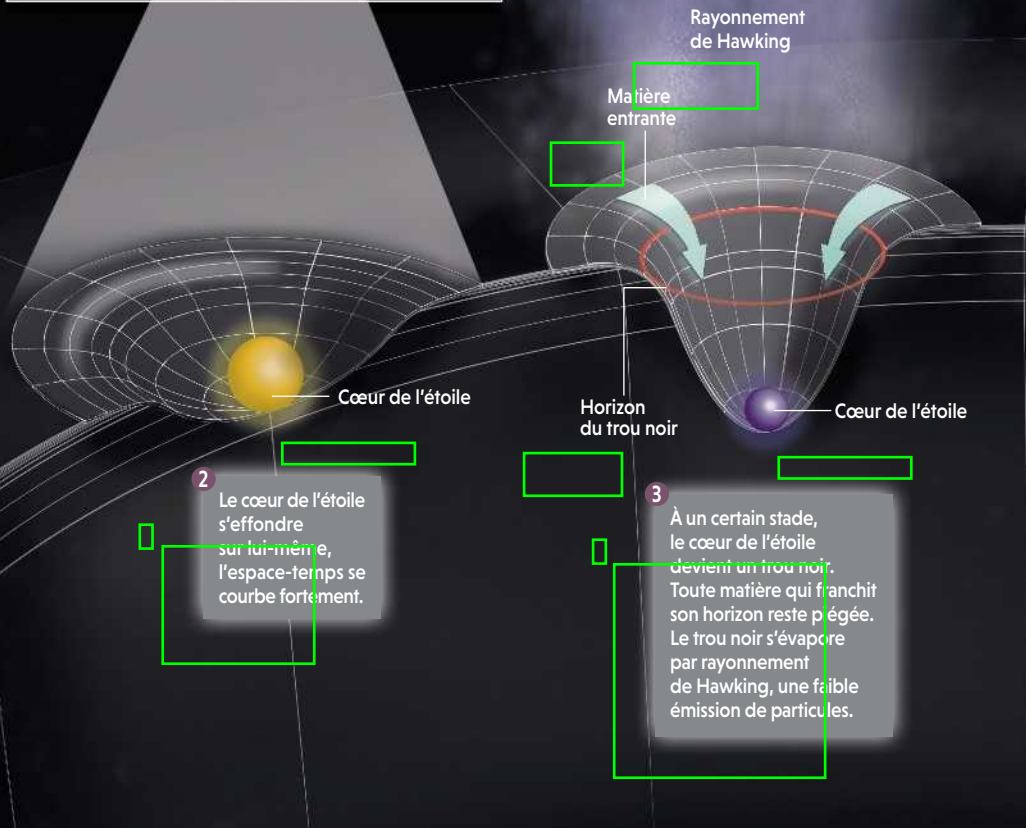
En 2018, grâce à des calculs quantiques détaillés, Marios Christodoulou,

D'UNE ÉTOILE MASSIVE À UN TROU BLANC

Dans le scénario classique, le cœur d'une étoile massive s'effondre sur lui-même et forme un trou noir. La matière s'accumule en un volume infiniment petit: le centre acquiert une densité infinie, et l'on parle donc de singularité. En gravité quantique à boucles, l'aspect discret de l'espace-temps empêche qu'une singularité se forme. La matière s'accumule pour atteindre une densité élevée, mais finie, et forme une «étoile de Planck», cachée sous l'horizon du trou noir. Soumis à des effets quantiques agissant directement sur l'espace-temps, le trou noir peut subir une transformation par effet tunnel, et devenir un trou blanc.



1 En fin de vie, l'étoile massive a épuisé son contenu en éléments légers pour alimenter la fusion thermonucléaire, dont l'énergie libérée contrebalance la gravité de l'astre. L'étoile explose alors en supernova. Ses couches externes forment une nébuleuse planétaire tandis que le cœur s'effondre sur lui-même.



2 Le cœur de l'étoile s'effondre sur lui-même, l'espace-temps se courbe fortement.

3 À un certain stade, le cœur de l'étoile devient un trou noir. Toute matière qui franchit son horizon reste piégée. Le trou noir s'évapore par rayonnement de Hawking, une faible émission de particules.

Fabio D'Ambrosio, Simone Speziale et moi, à Marseille, en collaboration avec Ilya Vilenky, de l'université Florida Atlantic, Eugenio Bianchi, à l'université d'État de Pennsylvanie, et Hal Haggard avons montré que la transition du trou noir au trou blanc par effet tunnel est possible dans le cadre de la gravité quantique à boucles. En même temps, Abhay Ashtekar, de l'université d'État de Pennsylvanie, Xavier Olmedo et Parampreet Singh, de l'université d'État de Louisiane, ont montré que la transition de trou noir à trou blanc est possible au plus près du centre du trou noir. En combinant ces deux résultats avec la solution des équations d'Einstein en dehors de la région où les effets quantiques sur l'espace-temps sont importants, on obtient une description complète de ce qui peut arriver à un trou noir: la conclusion est qu'il meurt et se transforme en trou blanc.

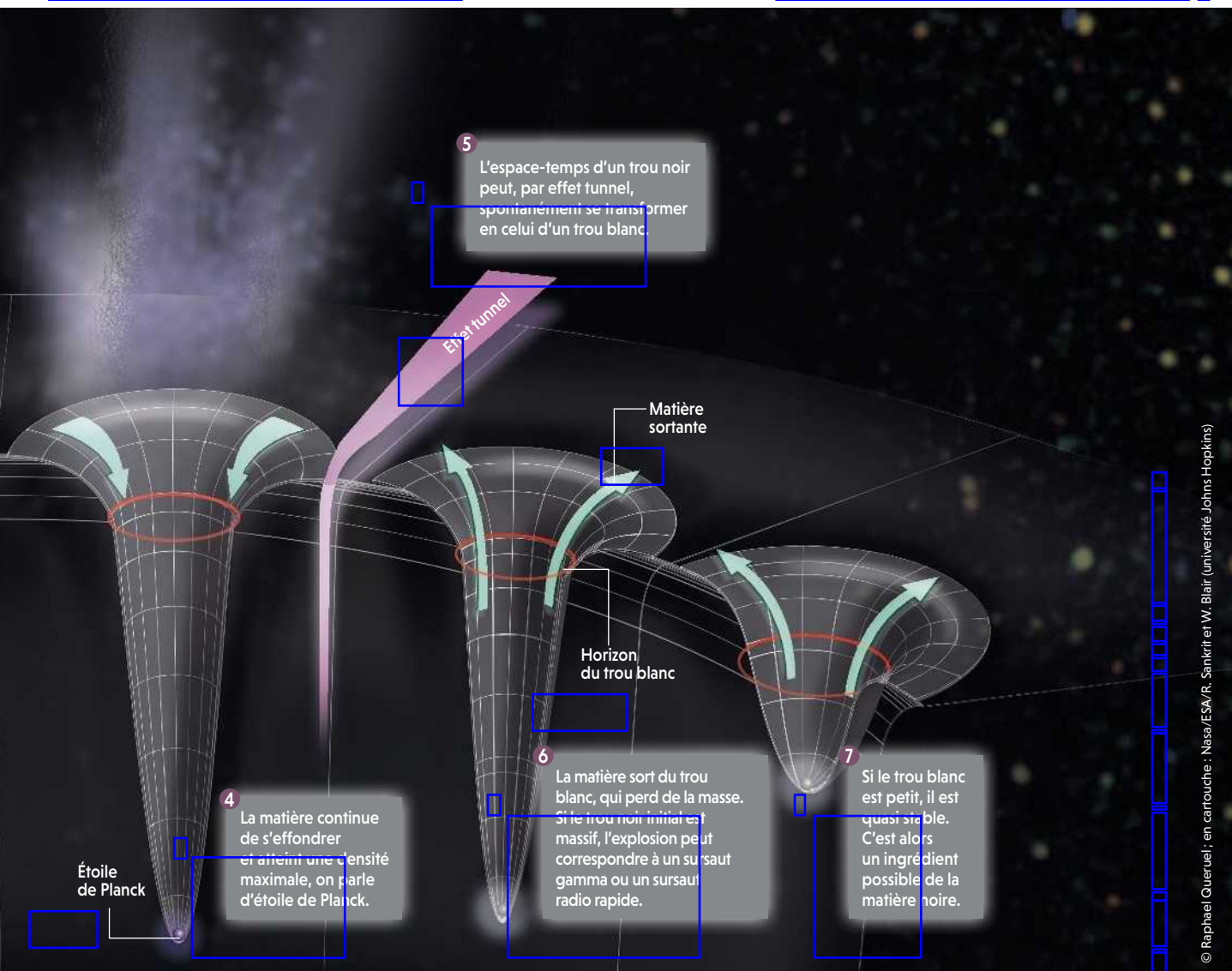
Un phénomène qui dépend de l'effet tunnel prend du temps à se réaliser, car la probabilité

d'occurrence est très faible. Certains éléments radioactifs, en principe instables, ont ainsi des durées de vie qui dépassent des milliers d'années. De la même façon, les trous noirs ne deviennent pas des trous blancs immédiatement. Ils ont une durée de vie très grande, et d'autant plus grande que le trou noir a une masse élevée. En effet, l'effet tunnel étant un phénomène quantique, il a plus de chance de se produire sur de petites échelles, donc sur de petits trous noirs.

AU BOUT DU TUNNEL, DU BLANC

Si les trous noirs étaient décrits uniquement par les lois classiques, ils seraient éternels. Mais rien n'est éternel. Comme nous l'avons déjà évoqué, Stephen Hawking a montré en 1974 que les trous noirs émettent un faible rayonnement. Pour un observateur lointain, le trou noir perd de la masse: il s'évapore.

Plus le trou noir diminue de taille par évaporation, plus la probabilité qu'il devienne un trou



blanc par effet tunnel augmente. À un certain point, cela se produit et l'espace-temps lui-même opère sa transformation par effet tunnel et sa géométrie change. Au lieu de continuer à se comporter comme le voudraient les équations de la relativité générale classique, le trou noir subit la transition et devient un trou blanc. Après, sous cette forme, il recommence à suivre les équations de la relativité générale classique.

UN PARADOXE TOUT RELATIF

Il y a un aspect *a priori* incohérent entre les deux descriptions que j'ai données de la naissance du trou blanc. D'un côté, la transition par effet tunnel prend du temps, et effectivement nous voyons dans le cosmos des trous noirs qui sont âgés de millions d'années, et probablement beaucoup plus pour certains. D'un autre côté, quand une étoile s'effondre pour former un trou noir, la matière se précipite vers le centre en moins d'une milliseconde ; elle atteint le stade de l'étoile de Planck avant de rebondir, également en moins d'une milliseconde. Dans un cas, la transformation est lente, dans l'autre elle est quasi immédiate ! Comment la transformation d'un trou noir en un trou blanc peut-elle être à la fois si lente et si rapide ?

Le paradoxe n'est qu'apparent, car l'ensemble est en fait bien cohérent dans le cadre de la relativité générale, où le temps est très « flexible ». Un

objet massif courbe l'espace-temps de telle façon qu'il ralentit (dilate) le temps. Par exemple, sur Terre, le temps s'écoule plus lentement au niveau de la mer qu'au sommet des montagnes. L'effet est dans ce cas infime, mais il devient beaucoup plus marqué près d'un trou noir. Un intervalle de temps très court à l'intérieur du trou noir est perçu comme très long pour quelqu'un en dehors. Le rebond qui se produit en quelques millisecondes est vu de l'extérieur comme au ralenti. Les trous noirs que nous observons dans le cosmos peuvent donc être des objets en train de s'effondrer et de rebondir, perçus par nous comme dans un film ralenti à l'extrême.

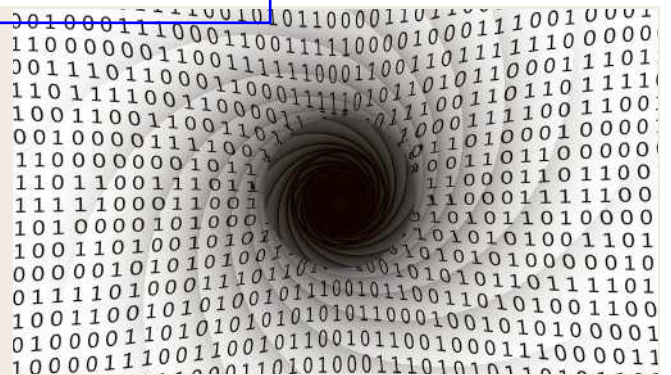
Ce scénario de la transformation d'un trou noir en trou blanc est intéressant à bien des égards. Il offre par exemple une vision cohérente de l'évolution des trous noirs et apporte une réponse au problème de la conservation de l'information (*voir l'encadré page précédente*). Mais cette théorie implique-t-elle que le ciel est truffé de trous blancs et, si oui, peut-on les voir ?

La réponse est : peut-être. Parmi les trous noirs que l'on a détectés, on distingue plusieurs catégories. La première est formée des trous noirs supermassifs (de l'ordre de 1 million de masses solaires) qui se nichent au centre des galaxies spirales. La deuxième est représentée par plusieurs trous noirs détectés grâce à *Ligo* et *Virgo* : ces corps ont une masse supérieure à celle

DANS LE SECRET D'UN TROU NOIR

L'existence des trous noirs, désormais incontestable, pose un problème quand on s'intéresse à la conservation de l'information. Un objet contient de l'information, et lorsqu'il tombe dans un trou noir, il est perdu, *a priori*, à jamais pour le reste de l'Univers car il ne peut pas ressortir. La seule façon d'accéder à cette information est de se jeter aussi dans le trou noir, mais il sera alors impossible de renvoyer l'information vers le reste de l'Univers. Dès lors, les trous noirs semblent être des régions du cosmos où l'information se perd. Mais est-ce vraiment le cas ? Les physiciens ont longtemps débattu de cette question. Le scénario du trou blanc comme destin du trou noir offre une solution simple, puisque tout ce qui tombe dans le trou noir finit par ressortir une fois que celui-ci s'est transformé en trou blanc.

Cette solution est cependant confrontée à un argument qui mérite d'être analysé en détail. Dans les années 1970, Jacob Bekenstein et Stephen Hawking ont montré qu'un trou noir a une entropie proportionnelle à l'aire de son horizon. Cette entropie permet de définir la température du trou noir et implique que celui-ci rayonne, comme tout corps chaud. Or, d'après les travaux de Boltzmann, l'entropie est aussi une mesure de l'information. L'aire d'un trou noir pourrait donc indiquer une quantité maximale d'information qu'il peut stocker. Certains physiciens ont pris au sérieux cette relation entre aire et quantité maximale d'information, et en ont fait un principe absolu, nommé principe holographique. Or, quand le trou noir s'évapore, son aire diminue. Et dès qu'il a perdu environ la moitié de sa masse par évaporation, son horizon est trop petit pour conserver l'information présente à l'intérieur. Il y aurait alors nécessairement une perte d'information.



Lorsque de la matière tombe dans un trou noir, c'est de l'information qui semble perdue pour le reste de l'Univers. Pas nécessairement...

Mais il y a peut-être une erreur dans ce raisonnement, qui confond deux notions d'entropie : celle qui mesure l'information accessible par l'extérieur avant la transition quantique en trou blanc (information qui détermine le comportement thermodynamique du trou noir) et celle qui mesure la totalité de l'information interne. La première est donnée par l'entropie de Bekenstein et Hawking et diminue avec l'évaporation. La seconde reste grande. L'information mesurée par l'entropie de Bekenstein et Hawking n'est pas l'information qui est entrée dans le trou noir, mais seulement l'information qui reste accessible sur sa surface. Alors que le trou noir est créé, la matière à l'intérieur continue de s'effondrer et l'espace s'étire en un long « tube ». Le volume de ce tube augmente, alors même que le rayonnement de Hawking tend à diminuer la surface de l'horizon. Le volume interne du trou noir peut conserver l'information, qui sera intégralement restituée dans l'Univers quand le trou noir deviendra blanc.

des étoiles (plusieurs dizaines de fois celle du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils sont peut-être des trous noirs «primordiaux», nés dans les débuts tumultueux de l'Univers. La troisième catégorie de trous noirs est constituée des restes de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie. Dans les trois cas, les trous noirs sont trop massifs pour se transformer en trous blancs par effet tunnel aujourd'hui.

Seuls des trous noirs vraiment petits ont une chance non négligeable de subir cette transformation quantique. Or de tels astres pourraient bien eux aussi peupler le cosmos. Ils seraient nés peu après le Big Bang, quand l'Univers était très dense, chaud et en expansion rapide. Des fluctuations de densité auraient provoqué des accumulations localisées de matière amenant à la formation de trous noirs de masses très variées. Nous n'avons pas une idée précise du nombre de ces trous noirs apparus dans les premiers instants de l'Univers, d'où la difficulté de faire des prédictions sur les populations de trous blancs.

Autre obstacle: dans le cadre de la gravité quantique à boucles, la durée de vie d'un trou noir dépend du rayonnement de Hawking et de la probabilité de transformation en trou blanc par effet tunnel. Elle n'est pas encore déterminée avec précision. Les calculs sont complexes et nécessitent des approximations pour être menés à leur terme. En l'état, nous pouvons extraire des calculs une borne supérieure sur la durée de vie quand nous prenons juste en compte l'évaporation de Hawking (le trou noir perd alors toute sa masse par cet effet) et une borne inférieure, si l'on prend seulement en compte la probabilité de transformation par l'effet tunnel. Il est alors possible de tirer quelques conclusions.

Si la durée de vie est longue, seuls les plus petits trous noirs primordiaux, de masses comprises entre 10^4 et 10^9 tonnes, sont devenus blancs et seraient observables aujourd'hui. Dans ce cas, la plupart des trous blancs dans le ciel sont de taille minimale (de l'ordre de la longueur de Planck, environ 10^{-35} mètre).

TROUS BLANCS POUR MATIÈRE NOIRE ?

Ce résultat est une possibilité intéressante, dans la mesure où de tels trous blancs sont assez stables: grâce à des effets quantiques qui les empêchent de perdre toute la matière qu'ils contiennent, leur durée de vie est comparable à celle de l'Univers. Ils contribueraient alors à la matière noire, cette composante majeure de l'Univers dont la nature reste à déterminer. La plupart des hypothèses envisagées, les «candidats» à la matière noire, impliquent des modifications des lois de la physique bien établies.

Le scénario de petits trous blancs (et noirs) constituant la matière noire est relativement peu contraint par les observations. Dans la

région entourant le Système solaire, la densité de matière noire serait de 0,01 masse solaire par parsec cube (Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, se trouve à 1,3 parsec). Pour satisfaire à cette valeur, il suffirait d'un trou blanc par 10000 kilomètres cubes.

Si, à l'inverse, la durée de vie des trous noirs est courte, les corps d'origine primordiale se transformant par effet tunnel actuellement auraient une masse comparable à celle d'une petite planète et exploseraient violemment, en expulsant une grande partie de leur masse sous forme de rayonnement. Un tel événement émettrait de grandes quantités de rayons cosmiques, des signaux très brefs dans la gamme des microondes ou des ondes radio. Or plusieurs types de phénomènes astrophysiques transitoires restent mal compris, parmi lesquels les sursauts gamma ou les sursauts radio rapides. Diverses explications ont été proposées, mais il n'est pas impossible qu'une fraction de ces événements proviennent de la transformation d'un trou noir en trou blanc.

Une signature nous permettrait de reconnaître les signaux venant des trous blancs: un décalage vers le rouge «aplatis». Deux phénomènes contribuent à décaler les longueurs d'onde de la lumière d'un astre lointain vers le rouge: l'expansion de l'Univers et le décalage gravitationnel (plus l'astre qui émet le rayonnement est massif, plus sa lumière subit un décalage vers le rouge). Or les premiers trous noirs à devenir blancs étaient plus légers que ceux qui se sont transformés plus tard. En conséquence, leur décalage vers le rouge gravitationnel est moindre, mais l'effet de l'expansion est plus fort. En fin de compte, on observerait un «redshift aplati» que l'on pourra peut-être mettre en évidence grâce à des analyses statistiques, en accumulant de grandes quantités de données sur les rayons cosmiques ou les sursauts radio rapides.

La découverte d'une preuve de l'existence des trous blancs serait une avancée spectaculaire dans notre compréhension du monde. Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action. On ouvrirait ainsi une fenêtre sur l'un des problèmes les plus importants de la physique théorique: comprendre les aspects quantiques de l'espace-temps.

Les idées récentes sur les trous blancs éclairent sous un nouveau jour de nombreux aspects de la physique théorique et de la cosmologie. Pour l'instant, l'hypothèse de la transformation de trous noirs en trous blancs n'a été que peu explorée et de nombreuses questions associées restent ouvertes. Et elles le resteront tant que nous n'aurons pas réussi à identifier un trou blanc. Espérons que cela prendra moins de temps que celui qui a été nécessaire pour nous convaincre de l'existence des trous noirs! ■

BIBLIOGRAPHIE

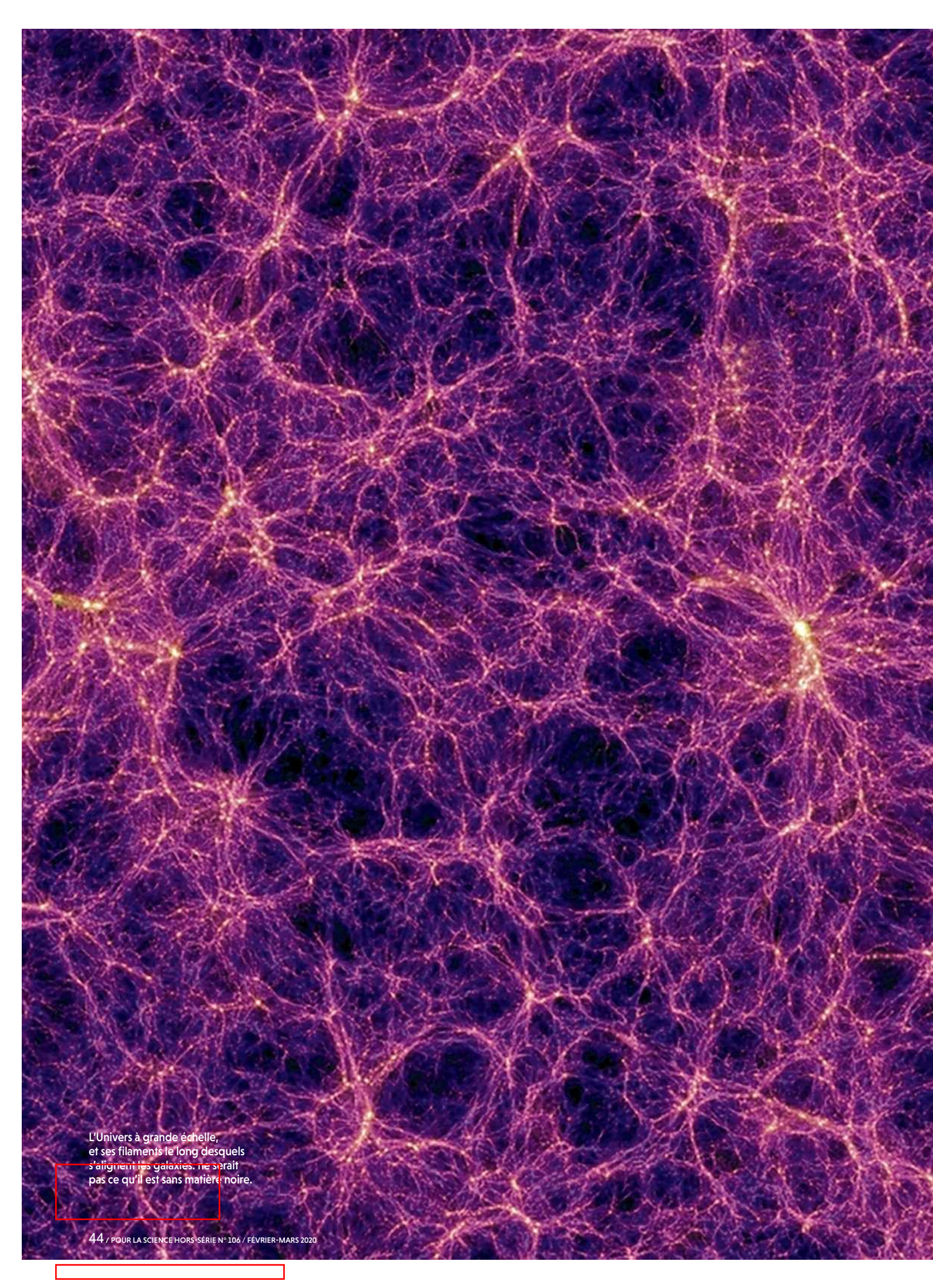
A. ASHTEKAR ET AL., Quantum transfiguration of Kruskal black holes, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, art. 241301, 2018.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Small black/white hole stability and dark matter, *Universe*, vol. 4, art. 127, 2018.

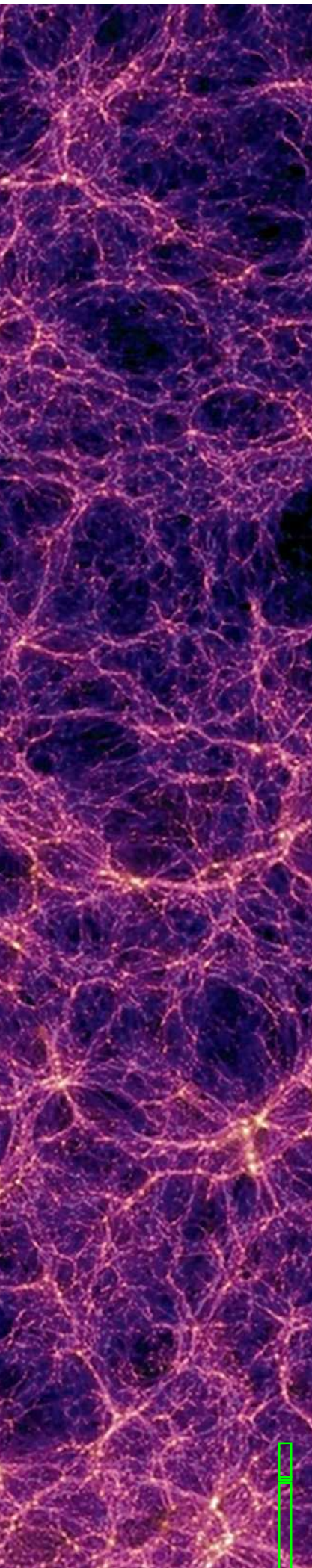
H. M. HAGGARD ET C. ROVELLI, Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling, *Phys. Rev. D*, vol. 92, art. 104020, 2015.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Planck stars, *Int. J. Mod. Phys. D*, vol. 23, art. 1442026, 2014.

M. BOJOWALD, L'Univers rebondissant, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.



L'Univers à grande échelle,
et ses filaments le long desquels
s'alignent les galaxies. ~~ne serait~~
pas ce qu'il est sans matière noire.



© Shutterstock.com/Nasa Images

INSAISSABLE MATIÈRE NOIRE

Mais de quoi est-elle donc constituée ? Axions ? Wimps ? Neutralinos ? Neutrinos stériles ? Trous noirs primordiaux ? Les physiciens rivalisent d'imagination pour proposer des candidats à la matière noire, cette entité inconnue, mais nécessaire pour expliquer la dynamique observée des étoiles dans les galaxies, et celle des galaxies dans les grandes structures de l'Univers. Pour trancher, plusieurs options : produire cette matière noire dans des accélérateurs de particules, la détecter directement ou bien en déduire l'existence à travers des phénomènes astrophysiques. À ce jour, aucun résultat, quelle que soit la piste suivie. Mais il en faut plus pour décourager les cosmologistes qui, sans cesse, repoussent les limites de leurs théories. Ne serait-ce alors pas l'occasion de changer de modèle standard, en cosmologie ou en physique des particules ?

BENOÎT FAMAHEY



La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pense. Quelque chose de profond nous échappe

Pour commencer, pouvez-vous nous rappeler comment le problème de la matière noire est apparu ?

Benoît Famaey : On attribue la découverte des premiers indices à Fritz Zwicky, un astronome suisse émigré aux États-Unis. Au début des années 1930, en étudiant la dynamique des galaxies dans l'amas de Coma, il a constaté que la contribution gravitationnelle de la matière visible était très insuffisante pour expliquer les mouvements de ces galaxies. Il a alors parlé du problème de la masse manquante. Mais à l'époque, les astrophysiciens n'ont pas pris cette idée très au sérieux...

La question est revenue sur le tapis à la fin des années 1970 avec l'avènement de la radioastronomie. Les chercheurs ont commencé à mesurer la vitesse de rotation du gaz dans les galaxies spirales. Les travaux d'Albert Bosma, aux Pays-Bas, et de Vera Rubin, aux États-Unis, ont été pionniers. Ils ont clairement montré que le gaz a une vitesse trop élevée dans les parties externes des galaxies compte

BENOÎT FAMAHEY
est chargé de recherche au CNRS et travaille à l'observatoire astronomique de Strasbourg, où il est responsable de l'équipe Galhecos.

tenu de la distribution de masse de matière ordinaire (dite baryonique) de la galaxie: la force gravitationnelle exercée par la matière ordinaire est insuffisante pour retenir au sein de la galaxie un gaz qui se déplace aussi vite. Le gaz devrait s'échapper, alors que ce n'est pas le cas.

L'explication pouvait-elle encore invoquer de la matière baryonique cachée ?

Benoît Famaey : Tout à fait. À cette époque, on n'avait pas la preuve formelle que la masse manquante n'est pas de la matière baryonique. Même aujourd'hui, si l'on sait détecter les gaz chauds, l'hydrogène moléculaire (H_2) reste très difficile à observer et pourrait contribuer en partie à la masse manquante. Mais nous avons des arguments pour conclure que l'hydrogène moléculaire ne constitue pas une grande part de la masse manquante et qu'il faut chercher ailleurs.

Ainsi, la forme du champ gravitationnel de la Voie lactée, plus précisément le potentiel gravitationnel, qui est directement relié à la distribution de toute la matière qu'elle contient (visible et

invisible), est plutôt sphérique. Or la matière visible de la Voie lactée est répartie dans un disque. L'hydrogène moléculaire a sans doute une distribution aplatie elle aussi, et ce gaz ne peut donc pas conférer au potentiel gravitationnel de la Galaxie sa sphéricité.

Peut-on imaginer d'autres candidats de matière ordinaire pour expliquer la masse manquante ?

Benoît Famaey : Dans les années 1980, les astrophysiciens ont aussi envisagé que la masse manquante corresponde à une importante population de petites étoiles froides et peu lumineuses, des naines brunes, mais aussi des planètes flottantes ou des trous noirs, dont la distribution ne suivrait pas nécessairement celle de la matière visible. Cependant, divers programmes d'observation, tel *Eros* mené par le CEA et le CNRS, ont permis d'écarter cette hypothèse. L'idée d'*Eros* était d'observer les nuages de Magellan et de recenser les effets de microlentille gravitationnelle : lorsqu'une naine brune (de la Voie lactée) passe devant une étoile lointaine (des nuages de Magellan), elle en amplifie la luminosité, comme le prévoit la théorie de la relativité générale. On a observé trop peu de tels effets pour soutenir que les petits objets sombres puissent constituer la masse manquante galactique.

Il restait encore une fenêtre ouverte, pour des trous noirs d'environ 30 masses solaires. La détection, par les interféromètres *Ligo* et *Virgo*, de coalescences de paires de trous noirs dans cette gamme de masse a relancé récemment cette piste. L'un des grands tests sera le recensement des systèmes binaires à grande séparation, où les deux étoiles liées gravitationnellement sont encore loin l'une de l'autre. Si les trous noirs sont assez nombreux pour constituer la masse manquante, ils devraient fréquemment passer à proximité de ces systèmes binaires et les déstabiliser. Les données de *Gaia*, satellite spécialisé dans l'observation des étoiles, nous indiqueront bientôt si c'est le cas.

Comment les astrophysiciens en sont-ils venus à écarter la piste baryonique ?

Benoît Famaey : Grâce aux observations cosmologiques. Pour comprendre, il faut remonter aux débuts de l'Univers, quand il était rempli d'un plasma très chaud de noyaux atomiques et d'électrons. Les photons étaient piégés, car ils interagissaient en permanence avec les particules chargées du plasma. Puis vers 380 000 ans, la

température, qui diminuait avec l'expansion de l'Univers, est devenue assez basse

pour que les noyaux et les électrons se combinent en atomes neutres. Les photons ont alors pu se propager et constituer un rayonnement encore détectable aujourd'hui, le fond diffus cosmologique.

Ce fond diffus est riche d'informations sur l'Univers primordial. Bien que la température associée à ce rayonnement soit globalement homogène sur l'ensemble du ciel, les satellites *WMAP* et *Planck* ont détecté de petites fluctuations thermiques, d'amplitude relative atteignant 10^{-5} . Elles correspondent à des zones plus ou moins denses dans le plasma primordial. Les zones de surdensité ont attiré de plus en plus de matière au cours du temps et ont donné naissance aux grandes structures, les amas et les galaxies.

Cependant, vu la faiblesse des fluctuations initiales, et si l'on ne prend en compte que la matière baryonique, l'effet d'accumulation n'a pas été assez fort et rapide pour produire les grandes structures observées aujourd'hui. Il faut donc ajouter au plasma primordial un autre ingrédient, une composante qui n'interagit pas avec la matière ordinaire autrement que par ses effets gravitationnels, mais qui contribue à augmenter l'efficacité de formation des grandes structures : la matière noire non baryonique.

Un deuxième argument est également lié au fond diffus. Le plasma primordial est le siège d'une compétition entre la matière baryonique, qui tend à s'accumuler dans les zones de surdensité, et les photons, qui s'opposent à ce mouvement par leur pression de radiation. Il s'ensuit des mouvements d'oscillation dans le plasma qui influent sur la taille et les propriétés des fluctuations de température.

Une courbe, dite du spectre de puissance, met en évidence de nombreuses caractéristiques du fond diffus. Cette courbe contient notamment de nombreux pics. Or, en ne considérant que de la matière baryonique, il est impossible de reproduire correctement l'amplitude de ces pics. Il faut supposer qu'une composante supplémentaire dans le plasma primordial aide à engendrer les oscillations par une contribution gravitationnelle, sans interagir avec les baryons. Encore une fois, cela ne peut être que de la matière noire non baryonique.

En quoi consiste-t-elle ?

Benoît Famaey : Les travaux en physique des particules ont suggéré de nombreuses possibilités. Depuis son

élaboration dans les années 1960, le modèle standard de la physique des particules a été expérimentalement très bien confirmé. Mais divers indices suggèrent qu'il n'est qu'une approximation à basse énergie d'un modèle plus fondamental. Et les modèles d'extension du modèle standard s'accompagnent souvent de candidats à la matière noire. Dans le cadre de la supersymétrie, une piste d'extension particulièrement en vogue, il existerait des particules électriquement neutres n'interagissant que rarement avec la matière ordinaire : les « wimps » (acronyme de *weakly interacting massive particles*). L'argument le plus attrayant en faveur de ces candidats est qu'ils seraient produits dans l'Univers primordial dans des proportions qui correspondent à ce qu'on attend pour la matière noire. C'est le « miracle des wimps » !

A-t-on détecté de tels wimps ?

Benoît Famaey : En théorie, il était possible de les produire dans les accélérateurs de particules tels que le LHC, de les détecter directement dans des expériences dédiées ou d'en voir une signature indirecte dans l'étude des rayons cosmiques. Mais toutes les tentatives ont échoué.

Ces résultats négatifs permettent d'éliminer les wimps ayant certaines caractéristiques de masse et de probabilité d'interaction avec la matière ordinaire. Les contraintes les plus sévères proviennent des expériences de détection directe. Il s'agit par exemple de grandes cuves remplies de xénon liquide, où les physiciens cherchent à repérer la trace d'une (rare) collision entre une particule de matière noire et un atome de xénon. Si ces physiciens ne voient rien, ils peuvent alors conclure que la probabilité d'interaction des wimps avec la matière ordinaire est inférieure à une certaine limite.

Ces expériences sont aujourd'hui si sensibles que les limites trouvées nous éloignent de plus en plus des paramètres qui correspondent au miracle des wimps. À tel point que l'enthousiasme des physiciens pour cette hypothèse est en train de diminuer, s'il n'est pas déjà sérieusement entamé. Bien sûr, il y a encore des expériences en cours, car il faut être sûr d'avoir éliminé toutes les possibilités. Et même si l'on ne trouve rien, ces expériences auront permis de tester l'hypothèse des wimps.

On ne peut pas non plus écarter l'hypothèse de particules de matière noire dont la probabilité d'interaction avec la matière ordinaire serait quasi nulle. Mais cette hypothèse est un peu désespérante...

> Qu'en est-il du scénario des wimps pour expliquer la dynamique des galaxies ?

Benoît Famaey : Comme on l'a vu, l'étude des galaxies a donné le premier indice sérieux de l'existence de la matière noire, dès la fin des années 1970. Il est ironique que ce soient les galaxies qui, actuellement, posent le plus de problèmes à l'hypothèse de la matière noire.

Ces difficultés sont liées à la distribution supposée de la matière noire dans une galaxie spirale. Les simulations numériques de formation des galaxies et de leur halo de matière noire montrent que ce dernier présente une densité sphérique et inversement proportionnelle à la distance r au centre de la galaxie, c'est-à-dire un profil de densité en $1/r$. En toute rigueur, la densité ne devient pas infinie au centre: elle est remplacée par un petit cœur de densité constante. En supposant ce halo de matière noire doté d'un petit cœur et d'un profil en $1/r$, on obtient le bon profil de vitesse du gaz dans certaines galaxies.

Mais cette distribution de matière noire ne fonctionne pas pour un grand nombre de galaxies, notamment celles dites à faible brillance de surface. Ces galaxies sont très diffuses et le gaz y prédomine; très peu d'étoiles s'y forment. Pour reproduire la dynamique de ces galaxies, il

noire nécessaire pour obtenir la bonne dynamique de rotation du gaz et la taille du disque de matière baryonique. En d'autres termes, plus la galaxie est diffuse et étendue, plus son cœur de densité constante de matière noire est lui-même étendu. Il semble donc y avoir une relation directe entre la distribution de la matière ordinaire et celle de la matière noire. Or une corrélation aussi forte est difficile à expliquer si la matière noire et la matière baryonique n'interagissent que par la gravitation ou d'autres forces très faibles.

Comment expliquer cette corrélation ?

Benoît Famaey : On peut envisager une rétroaction gravitationnelle de la matière baryonique sur la distribution de matière noire. Par exemple, lorsqu'une étoile massive explose en supernova, elle déplace de grandes quantités de matière. Cela modifie le potentiel gravitationnel localement. La matière noire va alors suivre ce nouveau potentiel. On peut montrer qu'avec une rétroaction efficace, la partie centrale d'une distribution en $1/r$ peut se lisser et donner un cœur de densité constante.

C'est pourquoi la plupart des astrophysiciens ne voient pas dans la corrélation des distributions de matière un danger mortel pour l'hypothèse de la matière noire. Mais dans les galaxies à

galaxies, certains chercheurs, dont moi-même, continuent d'explorer une piste totalement différente, qui consiste à modifier les lois de la gravitation. En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne (on parle de théorie Mond, pour *Modified newtonian dynamics*) pour les plus petites accélérations, bien en dessous de ce qu'on peut mesurer en laboratoire. On a alors deux régimes, le régime normal puis, lorsque l'accélération passe sous un certain seuil, la relation qui relie l'accélération à la force gravitationnelle est modifiée. Ce régime se manifeste sur les parties externes des galaxies comme la nôtre, mais dès le centre des galaxies à faible brillance de surface.

Par cette approche, on reproduit très bien le profil de vitesse au sein des galaxies. Et il n'y a plus de problème de corrélation entre la distribution de la matière ordinaire et le cœur de matière noire, puisqu'il n'y a plus de matière noire.

Comment se comportent ces modèles à plus grande échelle ?

Benoît Famaey : Si on applique la théorie Mond dans les amas de galaxies, le résultat n'est pas aussi satisfaisant. On trouve qu'il manque encore de la masse baryonique pour coller aux observations. Pour rappel, avec une dynamique newtonienne classique, le facteur de masse manquante est d'environ 5, la matière noire représentant cette masse manquante. Dans le cadre de Mond, il reste un facteur 2 environ. Il y a donc une partie de la matière des amas qui nous échappe. En outre, ce facteur 2 se manifeste principalement dans la partie centrale de l'amas. Mordehai Milgrom a proposé qu'il pourrait s'agir de nuages très froids d'hydrogène moléculaire, qui sont très difficiles à détecter.

Mais cette grande quantité d'hydrogène n'entre-t-elle pas en conflit avec les contraintes cosmologiques sur les baryons ?

Benoît Famaey : Eh bien non. En réalité, sur la quantité de matière ordinaire prévue par le modèle cosmologique (notamment la nucléosynthèse primordiale), il reste 30 % de baryons que nous n'avons pas détectés. Dans le scénario standard, on suppose qu'ils se cachent dans le milieu intergalactique. Il y aurait donc largement assez de matière pour compenser la dynamique des amas dans le cadre de la théorie Mond.

L'hypothèse de Mordehai Milgrom reste malgré tout assez alambiquée. Il existe d'autres possibilités, comme des neutrinos

L'enthousiasme des physiciens pour l'hypothèse des wimps est en train de diminuer

faut modifier la distribution de matière noire et supposer que le cœur est très étendu, sur plusieurs kiloparsecs (un kiloparsec correspond à environ 3 200 années-lumière). Or ce n'est pas ce que prévoient les simulations de formation galactique.

Est-ce le seul problème ?

Benoît Famaey : Non, il en existe un autre, plus subtil mais peut-être plus intéressant, avec ces galaxies à faible brillance de surface. C'est d'ailleurs, selon moi, le plus gros souci actuel avec la matière noire. On a remarqué, depuis une quinzaine d'années, une corrélation entre la taille du cœur de densité constante de matière

faible brillance de surface, il y a très peu d'étoiles pour obtenir une rétroaction efficace. Et c'est dans ces galaxies que les cœurs sont les plus étendus. Le vrai problème est la force de cette corrélation, comme si les processus de rétroaction «connaissaient» avec précision l'étendue de la galaxie pour ajuster leur intensité. Et ça, on ne sait pas l'expliquer.

Le bilan des wimps est donc mitigé. Ils sont parfaits pour la cosmologie, mais posent de nombreux problèmes à l'échelle galactique...

Benoît Famaey : Tout à fait. Et c'est pour cette raison qu'à l'échelle des

plus massifs que ceux du modèle standard. Mais ce scénario ne reproduit pas correctement le spectre du fond diffus cosmologique, même en prenant des versions relativistes de Mond telles que le modèle TeVeS proposé en 2004 par Jacob Bekenstein, alors à l'université hébraïque de Jérusalem.

Avec Gary Angus, j'ai aussi examiné des scénarios à neutrinos dits stériles, c'est-à-dire qui n'interagissent par aucune des forces fondamentales, ayant une masse de 10 à 100 électronvolts. Nous obtenons la bonne dynamique dans les amas de galaxies mais, quand nous avons simulé la formation des structures dans ce scénario, nous avons remarqué qu'il se formait trop d'amas très massifs. Dans la théorie Mond, l'efficacité de la formation des amas est déjà grande; en ajoutant les neutrinos stériles, on augmente encore cette efficacité.

L'observation récente de la coalescence de deux étoiles à neutrons a aussi porté un coup dur à l'approche de gravitation modifiée...

Benoît Famaey : Effectivement. Lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, il y a émission d'ondes gravitationnelles et d'ondes électromagnétiques. En août 2017, les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté les ondes gravitationnelles d'un tel événement et le satellite *Fermi* a observé un rayonnement gamma juste 1,7 seconde plus tard, provenant de la même source. Dans le cadre de la relativité générale, les deux types d'ondes se propagent à la même vitesse. On peut donc supposer que la lumière a été émise un peu après.

Mais il existe une autre explication possible au retard, l'effet Shapiro: de la matière sur le trajet ralentirait les ondes gravitationnelles et lumineuses. En relativité générale, l'effet de retard est le même pour les deux types d'ondes. Mais il peut différer dans des théories de gravitation modifiée.

C'est le cas avec le modèle relativiste TeVeS. Sibel Boran, de l'université technique d'Istanbul, et ses collègues ont montré que, pour la coalescence d'étoiles à neutrons détectée en août 2017, le décalage entre l'arrivée des ondes gravitationnelles et le sursaut gamma aurait dû se compter en centaines de jours... Comme il n'était que de 1,7 seconde, on peut dire aujourd'hui que TeVeS est exclu et il en va de même pour de nombreux autres modèles relativistes. Il existe d'autres modèles de gravitation modifiée qui n'ont pas le problème de l'effet Shapiro, mais ils souffrent d'autres difficultés.

Quelles sont donc les perspectives pour expliquer la masse manquante ?

Benoît Famaey : Quand on fait le bilan, on voit que la théorie Mond fonctionne bien à l'échelle des galaxies, et que les wimps conviennent à l'échelle des amas et sont compatibles avec les

La matière noire superfluide est une façon d'obtenir la bonne forme du potentiel galactique, mais peut-on l'obtenir autrement ?

Benoît Famaey : Avec Justin Khoury, nous avons proposé une autre piste, qui n'en est qu'à ses débuts. L'idée est la

En 1983, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a suggéré de modifier la dynamique newtonienne

contraintes cosmologiques. On peut donc envisager des solutions hybrides, comme celles de la matière noire dipolaire de Luc Blanchet, de l'institut d'astrophysique de Paris, ou de la matière noire superfluide de Justin Khoury, de l'université de Pennsylvanie.

En quoi consiste cette dernière ?

Benoît Famaey : Cette matière noire serait composée de particules se comportant comme des wimps dans le plasma primordial et dans les amas. C'est dans le cœur des galaxies que le modèle devient original. Dans ces régions centrales, la densité de matière noire est assez élevée et la température relativement basse. Les particules de matière noire subiraient une transition de phase et se comporteraient comme un condensat de Bose-Einstein (un état de la matière obtenu en laboratoire, où les atomes se retrouvent tous dans le même état quantique).

Justin Khoury a alors supposé que la matière baryonique se comporte comme des impuretés dans le condensat. Et ces impuretés interagissent avec le condensat de la matière noire par des échanges de phonons (des vibrations). On obtient ainsi le couplage qui reproduit précisément les effets de Mond. En dehors de la partie centrale de la galaxie, la densité de matière noire est trop faible pour produire un condensat. On a donc une zone de transition entre les deux régimes, à environ 60-100 kiloparsecs du centre galactique. Ce scénario pourrait donc prévoir des choses intéressantes sur la dynamique des traînes de marée des galaxies satellites de la Voie lactée qui traverseraient cette zone de transition.

suivante. Pour expliquer la corrélation entre le cœur de matière noire et la distribution de matière ordinaire, il faut un couplage entre ces deux composantes de matière. Nous avons donc supposé que, dans les galaxies, les baryons et la matière noire entrent en collision et échangent de l'énergie. C'est le genre d'interaction que l'on cherche dans les expériences de détection directe de wimps et que l'on ne trouve pas. Pour échapper aux contraintes imposées par ces expériences, il faut supposer que la matière noire est composée de particules très légères (du type axions) ou très lourdes (comme des *quarks nuggets*).

Le modèle que nous avons esquissé indique que les collisions sont très rares dans un plasma dense comme celui de l'Univers primordial. Cette matière noire se comporte donc comme les wimps à l'échelle cosmologique. Et nous commençons seulement à explorer ce que ce modèle peut donner à l'échelle d'une galaxie. C'est un programme de recherche qui prendra encore des années.

Finalement, à quoi pourrait ressembler la matière noire ?

Benoît Famaey : Ce qu'on appelle la matière noire pourrait être très différent de ce que l'on pensait jusqu'à présent. Les observations récentes tendent à exclure les scénarios en vogue, tels les wimps et la gravitation modifiée. Quelque chose de très profond et fondamental nous échappe peut-être. Ce qui est certain, c'est qu'il n'y a pas de solution simple à ce jour. ■

**PROPOS RECUEILLIS
PAR SEAN BAILLY**

L'ESSENTIEL

● La matière noire est omniprésente dans l'Univers, mais échappe à toute détection.

● On distingue trois types de méthodes pour y parvenir; la production dans les accélérateurs de particules,

la détection directe et la détection astrophysique.

● À plusieurs reprises, on a cru l'avoir repérée, mais en vain.

● La quête de la matière noire est-elle sans espoir?

L'AUTEUR



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

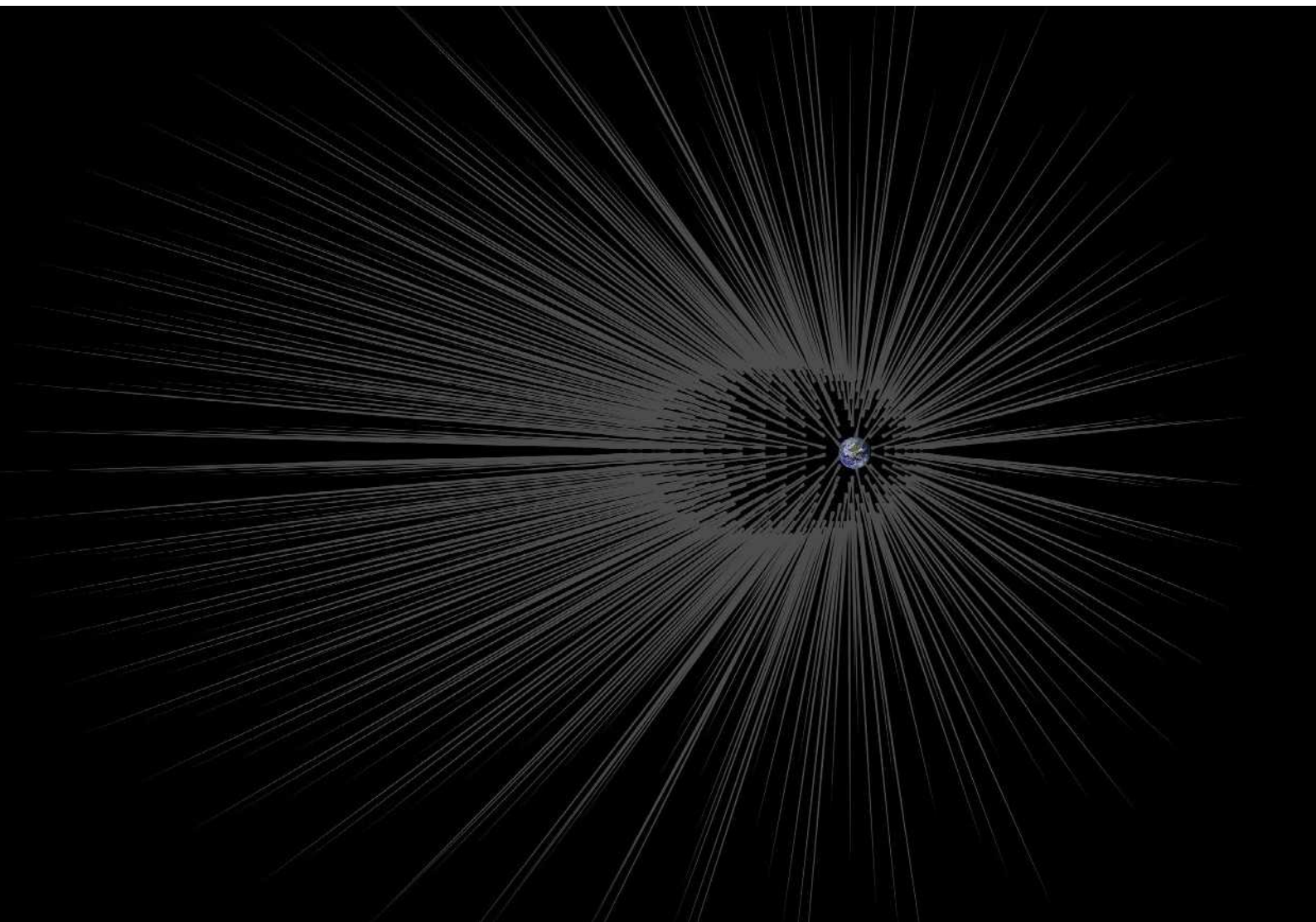
La grande quête inachevée

Évanescence à l'extrême, la matière noire résiste à toute tentative de détection, que ce soit celles des astronomes ou des physiciens des particules. Et pourtant cette matière noire est omniprésente. Peut-on résoudre ce paradoxe ?

Q

uelle que soit la direction vers laquelle vous pointerez votre télescope, vous verrez des galaxies. Et à y observer de plus près le mouvement des étoiles, vous serez convaincu: quelque chose ne tourne pas rond. En effet, l'étude de la dynamique des étoiles dans les galaxies, ou de celle des galaxies dans les amas de galaxies, indique qu'une mystérieuse entité

invisible, la «matière noire», y est omniprésente (voir *Repères*, page 6) pour rendre compte des observations. Elle représenterait même en masse plus de cinq fois plus que la matière ordinaire. On trouve cette matière noire dans le Système solaire (quoiqu'en faibles quantités), dans l'atmosphère terrestre, et même entre vous et ce magazine, qu'il soit sur papier ou sur écran. En fait, à chaque instant, vous êtes traversé par des myriades de ces particules. Mais vous ne le sentez pas, tout simplement parce que la matière noire n'interagit presque jamais avec quoi que ce soit, une propriété indispensable pour expliquer sa distribution. Étrange paradoxe que cette matière que l'on trouve partout... sauf dans les instruments où elle est activement recherchée. Et pourtant,



La matière noire est partout,
Elle traverse la Terre, et donc
nous-mêmes, à tout instant.

ce n'est pas faute d'avoir essayé! Petit panorama de la plus grande quête inachevée de la physique moderne.

TROIS MÉTHODES

Depuis trois ou quatre décennies, astronomes et physiciens des particules ont été amenés à échauffer plusieurs techniques, assez complémentaires, pour mettre en évidence cette matière noire autrement que par ses effets gravitationnels. On peut classer ces méthodes en trois grands groupes: la production dans les accélérateurs de particules, la détection directe, et la détection indirecte (on parle aussi de détection astrophysique).

La première méthode est sans doute la plus naturelle pour les physiciens des particules. Il

s'agit de détecter les particules de matière noire de la même façon que l'ont été la majorité des particules du modèle standard: en les produisant lors de collisions de haute énergie. On peut aussi imaginer détecter les conséquences de leur existence dans ces collisions, par exemple en constatant qu'une partie de l'énergie de la collision a disparu, emportée par une particule invisible. Pendant longtemps, s'est imposé un « candidat naturel » à la matière noire, lié à une hypothèse particulièrement séduisante, la supersymétrie. L'idée principe de cette dernière rappelle celle de l'antimatière, qui à chaque particule connue associe un *alter ego* aux propriétés proches ou opposées. Par exemple, les antiparticules ont la même masse, mais une charge électrique opposée à >

➤ celle de leurs «sœurs». Avec la supersymétrie, c'est la nature de la particule qui change.

Toutes les particules connues se répartissent en deux groupes: les bosons (photon, boson de Higgs...) et les fermions (électrons, neutrinos...). En simplifiant beaucoup, les premiers sont plutôt grégaires, alors que les seconds semblent ne pas vouloir partager des caractéristiques trop semblables avec une particule voisine du même type. La supersymétrie, où le préfixe «super» renvoie à l'idée de «supplémentaire», associe à un fermion du bestiaire des particules connues une particule supersymétrique, une «sparticule», dont la principale différence est qu'elle est un boson, et *vice versa*. Cette hypothèse s'inscrivait dans la lignée de plusieurs découvertes en physique des particules fondées sur des principes de symétrie sous-jacentes.

Dans la version la plus simple du modèle, particules ordinaires et supersymétriques ont des masses identiques. Dans un tel cas, les sparticules auraient alors été facilement fabriquées dans les accélérateurs de particules. D'évidence, ce n'est pas advenu, et l'on en déduit que toutes les sparticules sont dotées d'une masse importante, une propriété qui tombe à point nommé pour la matière noire. En effet, à l'instar de beaucoup de particules ordinaires, une particule supersymétrique peut

d'annihilation massive quand la température de l'Univers diminuait. Mais dans un Univers en expansion, certaines auraient survécu à un tel Armageddon, l'expansion finissant par rendre nulles les chances de rencontre.

L'abondance en masse des particules supersymétriques restantes dépend, dans les cas les plus simples, de deux paramètres: la section efficace et leur masse, qui déterminent respectivement la probabilité d'interaction entre ces particules et l'époque où commence leur annihilation. Miracle! Si on imagine que la section efficace est celle des particules ordinaires les plus évanescences, les neutrinos, et que la masse est d'environ celle du boson de Higgs (de l'ordre d'un téraélectronvolt, ou TeV), alors la masse résiduelle sous la forme de matière noire coïncide avec ce qu'indiquent les observations astronomiques!

ÉLUSIVES MAUVIETTES

La matière noire serait donc, peut-être, composée de ces sparticules massives, regroupées sous le terme de «wimps», acronyme de *weakly interacting massive particles*. C'est aussi un clin d'œil à l'agaçante propriété évasive de ces particules, car le mot anglais *wimp* signifie «mauviette». Les détecter semblait, il y a une quinzaine d'années, n'être qu'une question de temps: la masse de ces wimps ne pouvait être trop élevée, sans quoi leur abondance, prédite par la supersymétrie, aurait été incompatible avec la quantité de matière noire déduite des observations, et les accélérateurs de particules, au premier rang desquels le LHC, allaient finir par les produire.

Cette idée prévalait en septembre 2008 lors de la mise en service du LHC. Où en sommes-nous dix ans plus tard? À l'évidence, le «candidat naturel» a perdu de sa superbe, une issue que quelques cassandres annonçaient depuis longtemps. De fait, les seuls arguments en faveur de la supersymétrie reposaient sur la sémantique utilisée précédemment: il semblait «naturel» qu'une théorie «élégante» fût certainement vraie. Des fondations bien faibles, pour ne pas dire naïves. À l'heure actuelle, le LHC est toujours à la recherche de particules de matière noire. Mais la supersymétrie ne s'étant pas manifestée aux échelles d'énergie du boson de Higgs, la motivation n'y est plus.

Faute d'arriver (pour l'instant?) à fabriquer la matière noire, pourrait-on tenter de détecter des particules existantes avec l'appareillage adéquat? Cette solution serait encore plus simple, car cette matière noire est *a priori* abondante. En imaginant que les particules qui la composent ont une masse comparable à celle d'un proton, alors on en trouve dans l'Univers en moyenne un peu plus d'une par mètre cube. Et au sein d'une galaxie comme la nôtre, sa densité est de plusieurs centaines de milliers

LE FLUX DE NEUTRINOS EN PROVENANCE DU SOLEIL FINIRA PEUT-ÊTRE PAR BROUILLER TOUTE TENTATIVE DE DÉTECTION DE MATIÈRE NOIRE DEPUIS LA TERRE

être instable, mais elle ne peut se désintégrer qu'en particules ordinaires. Cela signifie donc, en l'absence de détection des particules ordinaires issues de sparticules, qu'il existe au moins une particule supersymétrique stable. Dotée d'une masse non nulle, elle pourrait «naturellement» constituer la matière noire.

Cerise sur le gâteau, on peut calculer par des principes très généraux l'abondance envisageable de cette matière noire. De la même façon que les particules ordinaires, les particules supersymétriques coexistaient probablement avec leurs *alter ego* d'antimatière, des «antiparticules», très tôt dans l'histoire de l'Univers, et qu'elles connurent une période



Le détecteur de l'expérience Cresst est enterré sous la chaîne des Apenins, en Italie, dans le laboratoire Gran Sasso. Il guette la matière noire, à l'abri des parasites de la radioactivité naturelle et des rayons cosmiques.

de fois supérieure. Ajoutons que la vitesse de ces particules au sein de notre Galaxie est sans doute comparable à celle des étoiles (quelques centaines de kilomètres par seconde), et l'on obtient qu'à chaque seconde, une section de 1 mètre carré est traversée par 100 milliards de particules de matière noire !

Dès lors, même si la matière noire interagit peu, un détecteur dédié finira bien, s'il est suffisamment gros et opérationnel pendant longtemps, par détecter l'improbable interaction entre l'une de ces particules et un atome du détecteur. Ce principe n'est pas nouveau : c'est celui des détecteurs de neutrinos. En pratique, un tel détecteur est composé d'une vaste cuve remplie d'un liquide et tapissée de photomultiplicateurs qui vont patiemment attendre d'enregistrer un photon né de la collision entre un neutrino et un atome de la cuve. Le choc produit aussi une particule chargée, identifiée par diverses méthodes. La coïncidence des deux événements et leurs propriétés respectives trahissent l'interaction recherchée. Les problématiques pour les neutrinos ou la matière noire sont ainsi assez semblables : les événements rares que l'on cherche à détecter ne doivent pas être pollués par des phénomènes plus communs, mais sans intérêt. Lesquels ?

D'abord, la radioactivité naturelle, c'est-à-dire la désintégration spontanée de certains noyaux atomiques, se traduit parfois par des événements pouvant être confondus avec de possibles signaux de la matière noire. L'autre

source de nuisance vient des rayons cosmiques, ces particules très énergétiques qui heurtent la haute atmosphère en produisant quantité de particules secondaires. Parmi celles-ci, les muons (des cousins éloignés de l'électron) sont particulièrement gênants, car proches de la signature attendue de la matière noire. Produits à plusieurs kilomètres d'altitude, leur durée de vie relativement courte (2 microsecondes) ne devrait en principe pas les autoriser à parcourir plus de 600 mètres et donc d'atteindre le sol. C'est sans compter l'effet de dilatation des durées de la relativité restreinte, selon lequel une particule se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière voit sa durée de vie apparente augmenter pour un observateur immobile, par exemple situé sur Terre. Les muons peuvent donc rejoindre la surface terrestre.

SIX (MILLE) PIEDS SOUS TERRE

Et plus encore... car leur caractéristique la plus nocive est leur fort pouvoir pénétrant. Ils peuvent traverser plus d'un kilomètre de roche avant d'interagir avec la matière. Tout détecteur de matière noire (ou de neutrinos, du reste) se doit d'être enterré afin de s'affranchir des muons. Ces dispositifs sont donc hébergés dans des puits de mine ou des tunnels routiers. Un des hauts lieux de la recherche de matière noire est le laboratoire national du Gran Sasso, en Italie. Il a été aménagé à partir du tunnel autoroutier du même nom, sous environ 1 400 mètres de roches de la chaîne des Apenins.

> Qu'ont révélé ces expériences? Malgré des détecteurs de plus en plus gros, de plus en plus sensibles, avec des durées de fonctionnement de plus en plus longues, tous les espoirs d'une possible détection ont été douchés. Au début des années 2000, l'expérience *Dama* repérait un signal présentant une modulation annuelle, comme ç'aurait pu être le cas si, du fait de son déplacement autour du Soleil, la Terre voyait sa vitesse varier par rapport au courant local de matière noire.

Des années après, c'est l'expérience *Cresst* qui semblait détecter un autre signal du même type, confirmant le résultat d'une autre expérience, *CoGeNT*, mais au final aucun de ces espoirs ne résista à l'épreuve du temps. On ne doit pas en conclure que la matière noire est hors de portée. Peut-être même sa détection sera-t-elle annoncée d'ici un an ou deux, mais le temps commence à presser.

UN DÉTECTEUR SUR MARS OU SUR PLUTON

Car s'il reste encore possible de tenter l'aventure avec des détecteurs plus grands, plus profonds, mieux protégés de la radioactivité ambiante..., un moment viendra où la traque deviendra inutile, car les particules recherchées auront alors des caractéristiques telles qu'on ne pourra pas échapper à une autre source de nuisance que rien ne pourra écarter: les neutrinos issus du Soleil, qui n'ont aucune difficulté à traverser la Terre entière. Quand ce « plancher des neutrinos » sera atteint, il n'y aura guère d'espoir de détecter la matière noire, sauf à imaginer limiter le flux de neutrinos reçus par le détecteur, par exemple en l'enterrant sous la surface de... Mars ou, qui sait, Pluton. Un beau projet... pour le ^{xxi}e siècle!

Faute de pouvoir mettre en évidence la matière noire sur Terre, il reste un dernier atout dans la manche des astrophysiciens: détecter dans le cosmos la trace de cette matière noire au-delà de sa seule présence gravitationnelle. L'idée est de supposer que la matière noire, même si elle est distribuée de façon très diffuse, comporte des zones suffisamment denses et étendues pour que des particules de matière noire puissent parfois interagir. Le centre des galaxies est la cible de choix. À quoi peut ressembler la signature d'une interaction de deux particules de matière noire?

En postulant que la matière noire est composée d'une particule qui est aussi sa propre antiparticule (comme c'est le cas du photon), alors une collision entre deux particules de matière noire produit une paire de photons ou bien une autre paire particule-antiparticule, par exemple un électron et un positon. Dans le premier cas, l'objectif est de chercher un excès de photons. Or comme les particules de



CHERCHER LA MATIÈRE

NOIRE S'APPARENTE AUJOURD'HUI

À CHERCHER UNE AIGUILLE

DANS PLUSIEURS BOTTES DE FOIN

SANS AVOIR D'IDÉE PRÉCISE

SUR LA FORME DE L'AIGUILLE,

NI MÊME S'IL Y EN A VRAIMENT

UNE À TROUVER



On a cru un temps que le télescope spatial ~~XMM-Newton~~ avait détecté de la matière noire via la désintégration de particules la composant. Mais non.

matière noire sont sans doute dotées d'une vitesse faible, on s'attend que leur annihilation mutuelle donne naissance à des photons situés dans une bande d'énergie relativement étroite. C'est à la recherche d'une sorte de raie d'émission plus ou moins marquée que se consacrent de nombreux astrophysiciens, mais là encore, la difficulté est d'extraire un signal de matière noire du «bruit» de haute énergie produit par des processus astrophysiques bien plus conventionnels.

On s'attend que le signal dû à de la matière noire soit relativement homogène en direction du centre galactique, puisque la distribution de matière noire a des chances de l'être également. À l'inverse, une origine astrophysique de photons de haute énergie serait plus probablement un ensemble de sources individualisées comme les pulsars. Distinguer entre ces deux hypothèses nécessite donc de pouvoir cartographier un éventuel excès de photons de haute

énergie avec une bonne résolution angulaire, mais malheureusement les télescopes qui pourraient convenir comptent parmi les plus myopes qui soient, même pour le plus performant d'entre eux, le télescope spatial américain *Fermi*. La recherche d'un excès de photons de haute énergie est à ce jour elle aussi une succession d'espoirs plus ou moins lucides douchés les uns après les autres. Depuis le début des années 2010, plusieurs annonces ont été faites, principalement par l'américain Dan Hooper. Si sa première annonce fut accueillie avec un prudent enthousiasme, son invalidation, suivie de plusieurs autres annonces toutes aussi infondées ont peu à peu convaincu la communauté que Dan Hooper ne voyait probablement que ce qu'il avait envie de voir.

PLUSIEURS ESPOIRS DOUCHÉS

Plus récemment, un autre résultat a été obtenu dans une bande d'énergie jusque-là assez peu explorée, dans le domaine du kiloelectronvolt. Là encore un possible excès à une énergie précise (3,5 keV) avait, pensait-on, été détecté par plusieurs télescopes X, l'europpéen *XMM-Newton* puis le japonais *Hitomi*, entre 2014 et 2016. Était-ce dû à des particules de matière noire de faible masse ou bien à des processus atomiques faisant intervenir du phosphore, du soufre ou du chlore fortement ionisés? Les analyses ont depuis tranché... pas de matière noire.

Qu'en est-il des potentielles paires particule-antiparticule nées de la collision entre deux particules de matière noire? Là encore, n'oublions pas que de l'antimatière peut être produite en faibles quantités par des processus conventionnels. Comme pour la détection de photons énergétiques, celle de l'antimatière ne peut se faire que dans l'espace. En quelques occasions, avec le détecteur PAMELA puis plus récemment avec l'expérience AMS, un début de semblant d'excès d'antimatière sembla se manifester, mais l'information ne fut pas plus confirmée que les autres.

Que penser de tous ces résultats négatifs? Du temps où les wimps apparaissaient, de loin, comme le candidat le plus prometteur, chercher la matière noire s'apparentait à chercher une aiguille dans une botte de foin. Avec la diversification des candidats et des méthodes de détection, il s'agit désormais de chercher une aiguille dans plusieurs bottes de foin, et sans avoir d'idée précise sur la forme, la taille, la composition et la couleur de l'aiguille... et sans même savoir s'il y en a vraiment une à trouver. Une quête vaine et sans espoir? L'optimisme est certainement moins de mise qu'il y a dix ou quinze ans. Que ce soit là un simple passage à vide ou les prémices de l'abandon d'une quête trop ardue pour notre époque reste une question ouverte. ■

BIBLIOGRAPHIE

K. POUNDS ET AL., An ultrafast inflow in the luminous Seyfert PG1211+143, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 481(2), pp. 1832-1838, 2018.

L'ESSENTIEL

Parmi les candidats à la «matière noire», ce composant invisible de l'Univers, l'axion est une particule hypothétique à laquelle les physiciens s'intéressent de plus en plus.

Son existence résoudrait aussi un problème lié à l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux atomiques.

L'expérience ADMX tente de détecter cet axion via les photons microondes issus de leur désintégration.

Ce dispositif a récemment atteint un niveau de sensibilité suffisant pour tester les versions les plus plausibles des axions.

L'AUTEUR



LESLIE ROSENBERG est professeur de physique à l'université de Washington, à Seattle, aux États-Unis.

L'axion, une idée qui a la cote

Imagines pour résoudre un conflit entre la théorie et les expériences en physique des particules, les axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire. Reste à les détecter. C'est le sens de l'expérience ADMX, dont la sensibilité permet désormais de traquer ces particules invisibles.

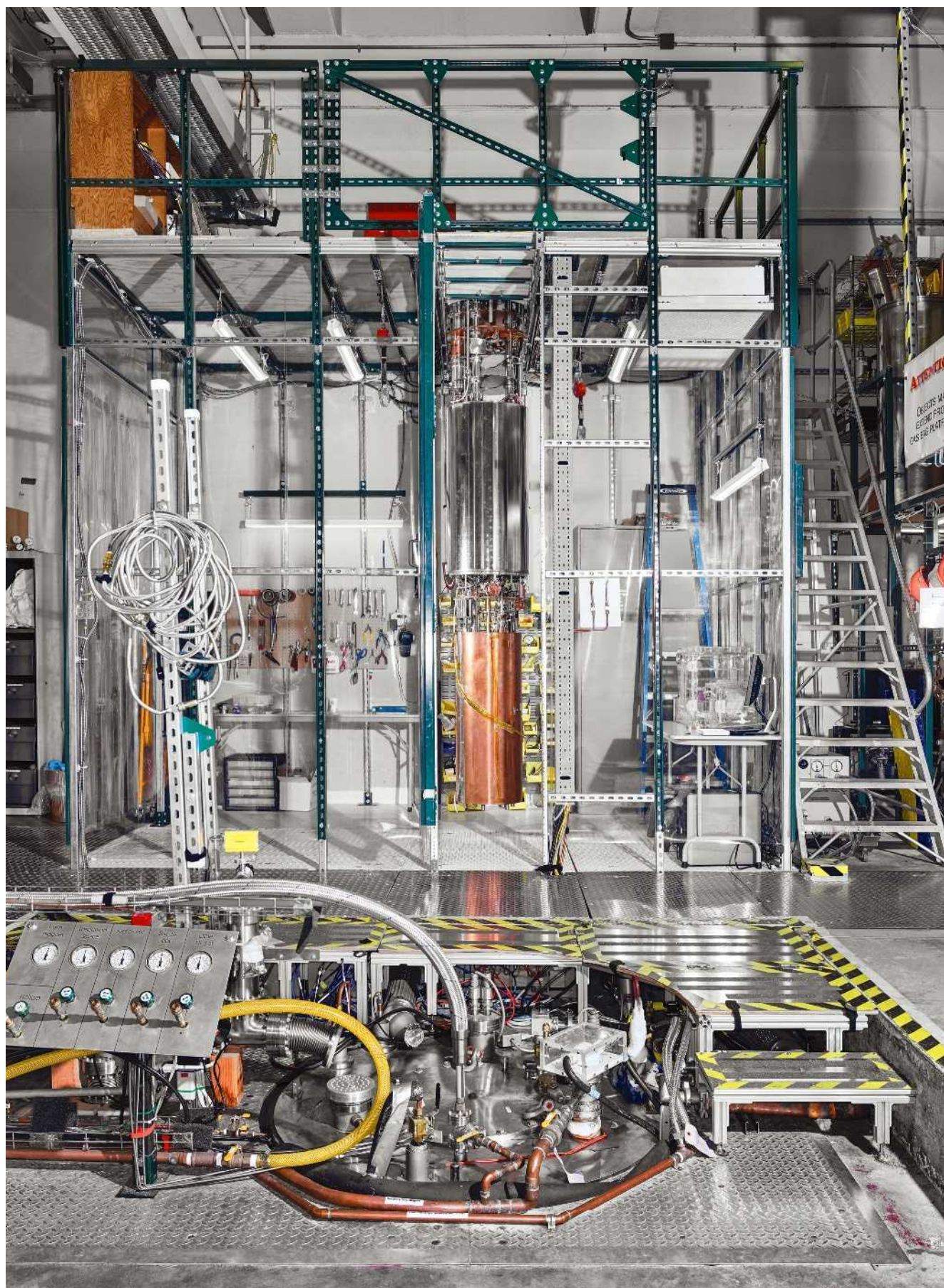
Le cosmos est constitué en majeure partie de quelque chose que nous ne pouvons pas voir. Telle est la conclusion qui s'est imposée aux astronomes depuis les années 1930 et les premières observations d'amas de galaxies dont la cohésion ne pouvait être assurée que par un supplément de matière qui échappait à la détection. L'idée de «matière noire» s'est renforcée à partir des années 1970, quand les astronomes qui étudiaient la rotation des galaxies sont parvenus à la même conclusion.

Désormais, il est quasiment certain que plus de 90% de la matière qui s'aggrave sous l'effet de la gravité est un matériau exotique, probablement des particules vestiges du Big Bang et dont la nature reste à préciser.

Pendant longtemps, les physiciens avaient un candidat favori pour la matière noire: le «wimp» (acronyme de *weakly interacting massive particle*, particule massive interagissant faiblement), qui s'inscrit dans une théorie populaire mais spéculative, celle de la supersymétrie. Cependant, au terme de plusieurs décennies de recherche aucune trace de ces wimps n'a été trouvée. Il est trop tôt pour enterrer les wimps, mais ces résultats négatifs ont incité les physiciens à considérer d'autres candidats au titre de la matière noire.

L'un d'eux est l'axion, une particule hypothétique beaucoup moins massive que le wimp, mais qui interagirait aussi peu avec la matière ordinaire. Si la matière noire est effectivement constituée d'axions, nous baignerions dans un océan de ces particules à raison de dizaines, voire de centaines de billions par centimètre cube. Leur seul effet sur le reste de l'Univers

Le cœur de l'expérience ADMX est à l'abri dans une salle blanche (en arrière-plan), pour le protéger des poussières. Lors d'une prise de données, le dispositif est descendu dans un trou (ici recouvert et au premier plan) pour le protéger des perturbations extérieures.



➤ serait gravitationnel – leur masse cumulée serait assez importante pour expliquer le mouvement des étoiles dans les galaxies ainsi que celui des galaxies dans les amas.

Depuis plus de vingt ans, je participe à la recherche de ces particules dans le cadre de l'expérience ADMX (*Axion dark matter Experiment*) dont le détecteur est sans cesse amélioré. Le dispositif est désormais assez sensible pour être en mesure, d'ici cinq à dix ans, de détecter des axions ou d'exclure les scénarios d'axions les plus plausibles. Mais en quoi consiste plus précisément ces axions ?

UN PROBLÈME DE CP

Dans les années 1980, l'idée des axions a été émise pour répondre à un problème soulevé par la chromodynamique quantique (QCD). La QCD est la théorie de l'interaction forte, qui assure la cohésion des composants du noyau atomique et du noyau lui-même. Les expériences de physique des particules sont en accord remarquable avec les prédictions de cette théorie, sauf en ce qui concerne le « problème de la violation de CP pour l'interaction forte » (CP signifiant « charge-parité »).

Selon la QCD, si vous inversez la charge et la parité d'une particule (c'est-à-dire si vous inversez sa charge électrique et si vous la regardez dans un miroir), elle ne suivrait plus exactement les mêmes lois physiques. Pourtant, rien dans les résultats expérimentaux n'indique que c'est le cas. Ce conflit entre la théorie et les expériences constitue une fissure dans le bel édifice du modèle standard, notre meilleur modèle de la physique des particules. Cette énigme est le « problème CP fort ».

En 1977, alors à l'université Stanford, Helen Quinn et Roberto Peccei se sont rendu compte qu'ils pouvaient aborder le problème CP fort de façon simple et élégante en utilisant l'idée des symétries brisées. Ce concept, l'une des idées récurrentes de la physique, se résume ainsi : les lois de la nature ne sont parfois pas invariantes lorsqu'on applique certaines opérations de symétrie, alors qu'on pense qu'elles devraient l'être. Par exemple, si vous posez un crayon verticalement sur sa pointe, la symétrie de rotation fait qu'il a autant de chances de tomber dans une direction que dans une autre. Mais le crayon finit par tomber dans une direction particulière, et la symétrie est donc « brisée ». Quand une telle brisure se produit dans le contexte de la physique des particules, elle implique l'existence d'une particule qui préserve d'une certaine façon la symétrie sous-jacente, même si elle semble, en surface, avoir été brisée. La symétrie n'est pas nécessairement évidente ; il peut s'agir d'une symétrie mathématique abstraite.

Avec une intuition brillante, Helen Quinn et Roberto Peccei ont appliqué cette idée à

l'interaction forte. Ils ont supposé qu'une symétrie cachée liée à cette force a été brisée.

Si tel était le cas, cela annulerait les effets de la symétrie CP attendus par la théorie et que l'on n'observait pas dans les expériences. Problème résolu. Peu après, grâce à une autre intuition brillante, Steven Weinberg, à l'université du Texas à Austin, et Frank Wilczek, à l'institut de technologie du Massachusetts, ont remarqué que le mécanisme de Peccei-Quinn implique l'existence d'une nouvelle particule : l'axion. D'après une légende, ce nom reprend celui d'une marque de lessive parce que la particule fait disparaître la tache que constitue le problème CP fort. Dès le milieu des années 1980, les physiciens ont suggéré que des axions auraient été produits en grande quantité durant le Big Bang et rendraient compte de la matière noire.

La théorie ne nous renseigne pas sur la masse des axions ni sur leur probabilité d'interagir avec la matière ordinaire. Mais nous savons qu'ils doivent très peu interagir avec la matière ordinaire, parce que les collisionneurs de particules et d'autres expériences n'en ont

LE NOM D'AXION REPREND

CELUI D'UNE LESSIVE

PARCE QUE LA PARTICULE

FAIT DISPARAÎTRE

LA TACHE QUE CONSTITUE

LE PROBLÈME CP FORT

encore jamais repéré. S'ils sont extrêmement inertes, la théorie indique qu'ils sont aussi extrêmement légers.

En 1987, un événement cosmique majeur a fourni aux physiciens des contraintes sur la masse de l'axion : la supernova qui a explosé dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la nôtre. Presque toute l'énergie de l'effondrement gravitationnel de l'étoile sur elle-même s'est échappée sous forme de neutrinos, dont certains ont été détectés. Si les axions avaient une masse d'au moins quelques milliélectronvolts, en unités d'énergie (un peu plus d'un milliardième de la masse de l'électron), ils auraient été produits en grandes quantités lors de l'explosion et auraient modifié le temps mis par les neutrinos pour s'échapper de l'astre. Mais puisque

les observatoires et les détecteurs de neutrinos n'ont enregistré aucune distorsion de ce genre, nous savons que les axions doivent être de masse inférieure.

Des axions aussi légers ont des interactions extrêmement faibles avec la matière ordinaire et la lumière. Par exemple, une particule relativement banale, le pion neutre, est instable et se désintègre en deux photons en environ 10^{-16} seconde. Un axion léger pourrait subsister 10^{45} ans avant de se désintégrer en deux photons, une durée bien supérieure à l'âge de l'Univers (un écart d'environ 35 ordres de grandeur). L'axion serait, parmi toutes les particules connues, celle qui interagit le moins avec les autres (et de loin).

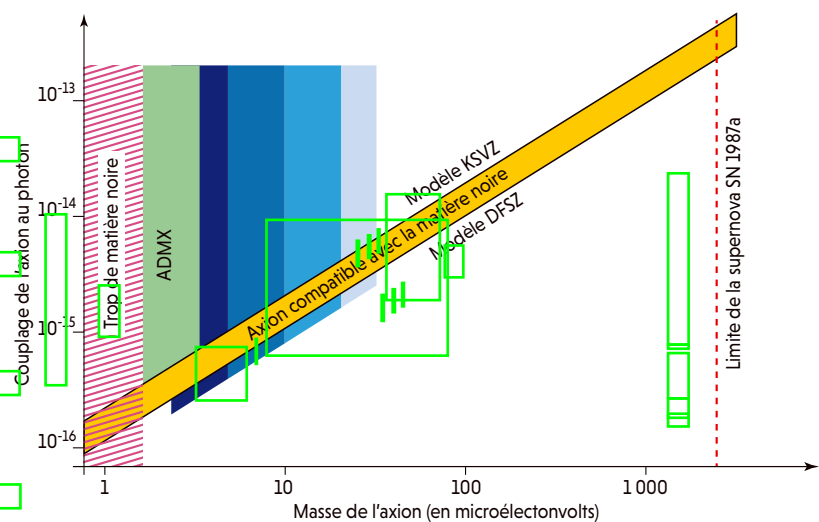
DES AXIONS INVISIBLES

Cependant, d'autres problèmes émergent si la masse de l'axion est trop faible. L'analyse des processus qui décrivent la production des axions pendant le Big Bang montre que plus la masse de l'axion est faible, plus le nombre d'axions produit est grand et, surtout, plus la densité en axions qui en résulte est grande. Ainsi, pour des masses d'axions inférieures à un certain seuil, le Big Bang aurait produit beaucoup plus d'axions qu'il n'en faut pour rendre compte de la matière noire. Certes, d'importantes incertitudes pèsent sur le mécanisme de production des axions et les théoriciens ont proposé des astuces pour contourner le problème. Mais il est de plus en plus improbable que les axions aient une masse très inférieure à un microélectronvolt.

En résumé, les axions ne peuvent pas être trop lourds, sinon nous les aurions déjà détectés dans les collisionneurs de particules ou au travers de leurs effets sur l'évolution des autres étoiles. Et ils ne peuvent pas non plus être trop légers, sinon il y aurait trop de matière noire. On peut estimer que la plage raisonnable pour la masse de l'axion se situe entre un microélectronvolt et un milliélectronvolt.

Si le modèle d'axions initialement proposé par Steven Weinberg et Frank Wilczek a rapidement été exclu par diverses contraintes expérimentales, deux autres modèles ont été proposés, nommés Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov (KSVZ) et Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky (DFSZ) du nom des physiciens qui les ont développés. Dans ces modèles, l'interaction des axions avec la matière est encore plus rare que dans le modèle initial. Ainsi, dans la gamme de masses des axions intéressante pour la matière noire, la probabilité d'interaction est si faible que l'on parle d'« axions invisibles ».

Alors comment détecter les axions ? Quand Helen Quinn et Roberto Peccei ont théorisé l'existence de ces particules, des physiciens se sont mis à les rechercher dans les collisions des



On synthétise les diverses contraintes pesant sur l'axion en représentant le couplage de l'axion au photon en fonction de la masse de l'axion. La zone colorée en jaune correspond aux conditions pour lesquelles l'axion est un bon candidat au titre de matière noire. Si la masse de l'axion est très faible, trop de ces particules sont produites durant le Big Bang et on obtient trop de matière noire. Au-delà de 1000 microélectronvolts, certaines observations astrophysiques restreignent aussi les caractéristiques de l'axion. L'expérience ADMX explore une partie des masses possibles pour l'axion (en vert). Les futures améliorations permettront d'aller plus loin (en bleu).

accélérateurs de particules. Mais les propriétés mêmes qui font de l'axion un candidat intéressant au titre de matière noire (ses faibles interactions avec la matière ordinaire et le rayonnement) signifiaient qu'il était insaisissable et que sa recherche semblait vaine. Il était frustrant de savoir que nous baignons peut-être dans un océan de particules impossibles à mettre en évidence en laboratoire.

Pierre Sikivie, de l'université de Floride, a alors proposé de changer d'approche : au lieu d'essayer de créer les axions dans des accélérateurs, nous pourrions tenter de détecter les axions cosmiques. L'idée était d'utiliser une cavité cylindrique vide de tout sauf des axions cosmiques censés inonder l'espace. Un champ magnétique intense régnant dans l'enceinte inciterait des axions à se transformer en photons faciles à détecter. Une telle réaction se produirait avec une probabilité d'autant plus grande que la fréquence de résonance de la cavité (qui dépend de ses dimensions, des matériaux...) est proche de la fréquence du photon produit par l'axion.

Comme la masse des axions est petite, et que ceux qui environnent se déplacent à des vitesses comparables au reste de la Voie lactée, leur énergie est minuscule. Dès lors, la fréquence du photon produit se situerait dans la gamme des microondes. Mais pour la définir exactement, il faut connaître la masse de l'axion... C'est pourquoi les expérimentateurs devront changer en permanence la fréquence résonante de la cavité expérimentale afin de « balayer » la plage possible, dans l'espoir de tomber sur la fréquence qui correspond à la masse de l'axion.

Le signal résultant serait très faible, peut-être 10^{-21} watt ou moins, et accompagné d'un bruit à peu près du même ordre de grandeur. Mais des détecteurs de microondes très sensibles, collectant un signal sur un temps assez long, devraient être à la hauteur de la tâche. ➤

> Les premières tentatives de mise en application de l'idée de Pierre Sikivie, comme l'expérience Rochester-Brookhaven-Fermilab et un projet à l'université de Floride, étaient vouées à l'échec du fait d'une sensibilité insuffisante. Elles ont néanmoins permis de développer le matériel utilisé depuis dans toutes les expériences portant sur les axions.

NAISSANCE D'UN PROGRAMME

À Chicago, avec Karl von Bibber, alors au laboratoire Lawrence Livermore, et avec David Tanner, de l'université de Floride, nous avons imaginé pousser plus loin ces premières expériences. Nous voulions d'abord construire une grande cavité où règne un champ magnétique intense pour augmenter la sensibilité. Il nous fallait ensuite de meilleurs amplificateurs de microondes : ils seraient la clé pour détecter le signal microonde extrêmement faible attendu des axions. Mais ceux disponibles à l'époque produisaient beaucoup trop de bruit. Nous rêvions d'amplificateurs limités uniquement par le bruit inévitable d'origine quantique. Mais ils n'existaient pas encore dans la gamme de fréquences qui nous intéressait.

C'est ainsi que le programme ADMX a vu le jour : nous commencerions avec un gros aimant, les meilleurs amplificateurs microondes disponibles et de l'hélium pour refroidir le dispositif à 4,2 kelvins afin de réduire le bruit. À moyen terme, nous nous concentrerions sur le développement d'amplificateurs microondes à limitation quantique. À long terme, nous ajouterions un « réfrigérateur à dilution », afin de refroidir la cavité et les amplificateurs à des températures d'environ 100 millikelvins, réduisant encore plus le bruit. C'était un programme ambitieux, dont chaque phase durerait une dizaine d'années.

En 1993, alors au MIT, nous avons mis sur pied une collaboration pour démarrer officiellement l'expérience. Le laboratoire Lawrence Livermore a fourni un gros aimant supraconducteur et le site de l'expérience. Notre collègue Wolfgang Stoeffl s'est chargé de la conception du système cryogénique initial, un dispositif que nous utilisons en grande partie encore aujourd'hui. David Tanner a conçu et développé les entrailles de l'expérience en s'inspirant du projet initial de l'université de Floride, et notre groupe du MIT a construit un détecteur de microondes ultrasensible. En 1998, nous avons publié les résultats initiaux de cette « phase zéro » d'ADMX, la première expérience sensible aux axions ayant une masse compatible avec le scénario de la matière noire. Nous n'avions pas trouvé ces particules si fugaces, mais nous partions sur de bonnes bases.

Pendant ce temps, nous avons continué à avancer dans la quête d'un amplificateur qui serait sensible au minuscule signal attendu des

axions. C'est à cette époque que j'ai assisté à une présentation de John Clarke, un spécialiste des dispositifs quantiques à l'université de Californie à Berkeley. Il travaillait sur des magnétomètres ultrasensibles, les squids (acronyme de *superconducting quantum-interference devices*), qui utilisent l'effet tunnel (un phénomène quantique par lequel une particule peut franchir une barrière de potentiel) et la supraconductivité (dans un matériau supraconducteur, la résistance électrique est nulle et le courant circule sans pertes). Si un photon passe à proximité d'un squid, son faible champ magnétique perturbe l'effet tunnel du détecteur de façon mesurable. Ces dispositifs sont extrêmement sensibles, mais ils n'existaient pas encore pour les signaux microondes. Grâce à une géométrie astucieuse, John Clarke a résolu le problème.

AVEC L'EXPÉRIENCE ADMX, NOUS SONDEONS DésORMAIS LES MASSES LES PLUS PLAUSIBLES POUR L'AXION

C'était prometteur, mais il restait des obstacles. Les minuscules champs magnétiques du squid allaient être perdus dans le champ plus intense régnant au sein de la cavité. Le département américain de l'Énergie, lors d'une évaluation de notre expérience, a souligné que l'utilisation des squids était « à haut risque ». Nous avons décidé de diviser ADMX en deux phases : la « phase 1a » démontrerait que les squids fonctionnent correctement dans le fort champ magnétique de l'expérience. Une « phase 1b » ultérieure ajouterait alors le réfrigérateur à dilution dont nous avons besoin pour atteindre les basses températures requises.

Nous avons lancé la phase 1a en développant un système qui protège le squid du champ énorme régnant dans la cavité. Pour ce faire, nous avons utilisé une série de boucliers gigognes et d'aimants entourant le squid, destinée à annuler (ou « compenser ») le champ magnétique principal. Au milieu des années 2000, nous avons démontré que le système fonctionnait, et nous avons commencé à travailler sur le réfrigérateur à dilution, le cœur de la phase 1b.

Le département américain de l'Énergie et la Fondation américaine pour la science (NSF) ont mené une vaste réflexion sur le développement de détecteurs de matière noire dits de deuxième génération et notés « Gen 2 » ayant des sensibilités améliorées par rapport à celles

des expériences existantes. La plupart de leurs projets visaient les wimps, mais ils s'intéressaient aussi aux axions. Nos plans pour la phase 1b d'ADMX s'inséraient étroitement dans ce programme, et c'est ainsi que ADMX Gen 2 est née.

L'expérience a été déplacée à l'université de Washington, à Seattle, sur un site plus moderne. Ainsi, ADMX Gen 2 est entrée en service en 2016 et devrait durer jusqu'en 2021. Elle intègre le réfrigérateur à dilution qui, en diminuant le bruit, nous a fait gagner en sensibilité. Elle a plus que doublé le taux d'acquisition de données et l'ajout de nouveaux éléments a aussi contribué à améliorer la sensibilité de l'expérience. Le dispositif est en passe d'effectuer une recherche des axions pour des masses comprises entre 1 et 40 microélectronvolts.

En 2018, ADMX a publié un résultat intéressant. Jusque-là, l'expérience était capable d'exclure des axions de quelques microélectronvolts, mais elle n'était sensible qu'à des probabilités d'interaction de l'axion et du photon correspondant au modèle KSVZ, pour lequel le couplage de l'axion aux photons est 2,7 fois plus intense que dans le modèle DFSZ. Cependant, grâce aux améliorations du dispositif, pour la première fois, les chercheurs ont pu exclure des axions du modèle DFSZ pour des masses comprises entre 2,66 et 2,81 microélectronvolts. Cet intervalle de masse semble modeste, mais il illustre les capacités d'ADMX et nous encourage à poursuivre.

LE PROBLÈME DE LA MONTRE

L'expérience ADMX est constituée de nombreux systèmes complexes qui doivent fonctionner de concert, mais la plupart de ses éléments sont maintenant au point et leur fiabilité est confirmée. Au-delà de l'aspect technique de l'expérience, la collaboration a aussi connu des changements, elle s'est élargie et inclut désormais des physiciens de nombreux laboratoires et universités. Et une nouvelle équipe de direction d'ADMX a émergé, avec comme porte-parole Gray Rybka, de l'université de Washington, et Gianpaolo Carosi, du laboratoire Lawrence Livermore.

Nous sondons désormais la plage de masses les plus plausibles pour les axions candidats à la matière noire, mais la nature peut toujours nous surprendre. Rechercher dans une plage de masses légèrement plus faibles n'est pas très compliqué; en revanche, adapter notre expérience pour rechercher des masses supérieures reste un défi.

Quand la masse des axions augmente, la fréquence de résonance de la cavité doit aussi augmenter. Cela implique de diminuer le diamètre de la cavité, ce qui réduit d'autant le volume dans lequel on peut rechercher les axions. Nous

LE DISPOSITIF ADMX

Si les axions sont partout autour de nous, l'expérience ADMX (*Axion Dark Matter eXperiment*) pourrait les mettre en évidence quand, exceptionnellement, l'un d'eux se désintègre en photon microonde. L'expérience met en jeu un champ magnétique intense et une cavité radiofréquence qui, quand elle est réglée sur la même fréquence que les photons produits, favoriserait leur transformation. En 2016, le projet est entré dans une nouvelle phase et a commencé sa recherche la plus sensible à ce jour.

AIMANT DE COMPENSATION

Cet aimant plus petit annule, ou «compense», le champ magnétique de l'aimant principal au voisinage de l'amplificateur à squid, qui doit détecter le minuscule champ magnétique dû aux photons.

AMPLIFICATEUR À SQUID

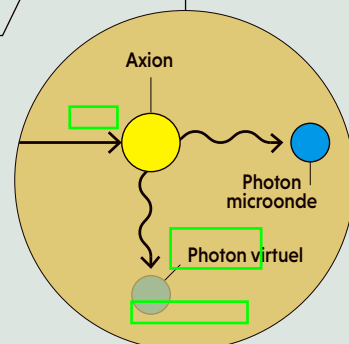
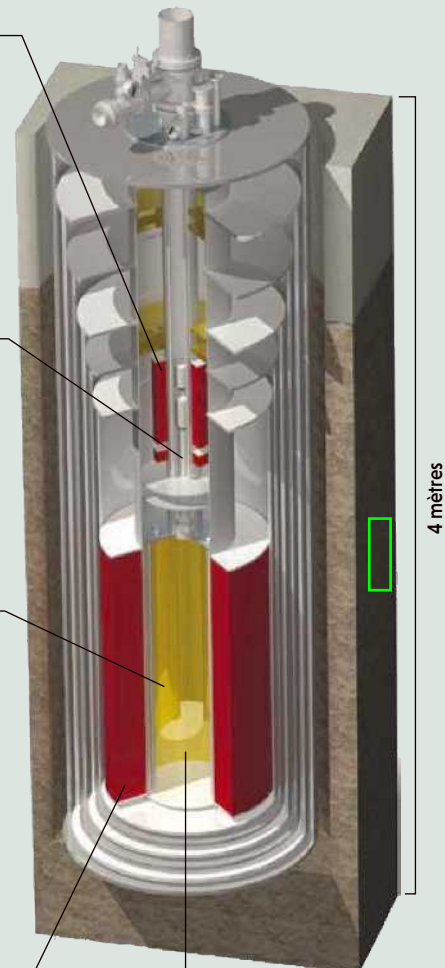
Ce magnétomètre utilise des effets quantiques pour détecter et amplifier le minuscule signal créé quand un axion se désintègre en un photon.

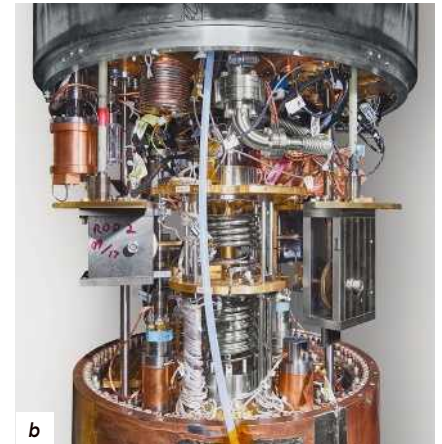
CAVITÉ À MICROONDES

Cœur de l'expérience, cette cavité vide de matière ordinaire est le lieu où les chercheurs s'attendent à ce que les axions ambiants, qui devraient être présents partout dans l'espace si ce sont bien eux qui constituent la matière noire, se transforment en photons microondes. L'axion interagit avec le champ magnétique de la cavité par l'intermédiaire d'un photon dit «virtuel» et se désintègre en un photon microonde.

AIMANT DE 8 TESLAS

L'aimant principal de l'expérience emplit la cavité d'un champ magnétique qui stimule la désintégration des axions en photons.





Les scientifiques installent des détecteurs dans le dispositif expérimental d'ADMX (a). La cavité entourée de cuivre est surmontée d'un réservoir d'hélium liquide et de l'électronique de l'expérience (b).

pourrions entasser un grand nombre de cavités à l'intérieur d'un unique gros aimant pour conserver un volume appréciable, mais nous serions confrontés au « problème de la montre suisse »: la complexité d'un tel système devient très difficile à gérer. Nous pourrions aussi nous contenter d'une petite cavité, à condition d'augmenter l'intensité du champ magnétique pour compenser. Cette solution, coûteuse, est actuellement à l'étude. Il est possible que d'ici cinq à dix ans, une intensité accrue du champ magnétique (jusqu'à 32, voire 40 teslas) élargisse la plage des masses de notre recherche.

Pour des masses de l'axion beaucoup plus grandes (proches de un milliélectronvolt), les astrophysiciens auraient les moyens de contribuer à la traque. Si de tels axions existent et forment des halos de matière noire autour des galaxies, les radiotélescopes pourraient détecter des raies d'émission très faibles.

LE FUTUR DE L'AXION

À terme, ADMX et d'autres projets parviendront à explorer l'intégralité de la fenêtre théorique des masses possibles de l'axion candidat à la matière noire. Le fait que la plage des masses plausibles soit limitée et entièrement accessible par des expériences fait de l'axion un candidat attrayant, par rapport à d'autres possibilités impossibles à tester complètement.

Tandis que nos travaux expérimentaux se poursuivent, les théoriciens font eux aussi des

progrès. Des modèles cosmologiques complexes simulés sur des supercalculateurs sont en passe de produire des prédictions plus fiables pour la masse de l'axion. Il est possible, par exemple, que les axions se soient accumulés au cours de l'histoire de l'Univers, sous l'effet de la gravité, selon une distribution différente de celle des wimps. Cela aurait des conséquences sur l'histoire de la formation des grandes structures cosmiques. Des programmes d'observations astrophysiques à venir, comme le LSST (*Large synoptic survey telescope*, grand télescope d'étude synoptique) opérationnel en 2020, établiront des cartes de la structure à grande échelle de l'Univers avec une précision suffisante pour permettre aux chercheurs de faire le tri entre les divers candidats à la matière noire.

Une autre possibilité serait que les axions prédits par la QCD ne soient que la manifestation d'une théorie plus fondamentale œuvrant aux échelles énergétiques les plus hautes. L'une de ces théories en lice, la théorie des cordes, prédit des axions de masse beaucoup plus petite que celles qu'explore l'expérience ADMX.

Il y a vingt ans, le consensus confortable était que la matière noire était constituée de wimps. Ces dernières années, les axions ont gagné en crédibilité. Dans un avenir pas trop lointain, nous devrions savoir si, oui ou non, ils sont la solution au mystère de la face invisible du cosmos. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. BOUTAN ET AL., Piezoelectrically tuned multimode cavity search for Axion dark matter, *Phys Rev Lett.*, vol. 121(26), art. 261302, 2018.

N. DU ET AL., Search for invisible axion dark matter with the Axion dark matter Experiment, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 120, art. 151301, 2018.

P. SIKIVIE, Axions, domain walls, and the early Universe, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 48, pp. 1156-1159, 1982.

POUR LA SCIENCE HORS-SERIE

Edition française de Scientific American

COMPLÉTEZ VOTRE COLLECTION DÈS MAINTENANT!



RETROUVEZ L'ENSEMBLE DES ANCIENS NUMÉROS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR/HORS-SERIE.HTML

À retourner accompagné de votre règlement à :

Pour la Science – Service VPC – 19 rue de l'Industrie – BP 90053 – 67402 Illkirch Cedex – email : pourlascience@abopress.fr



OUI, je commande des numéros de Pour la Science Hors-série, au tarif unitaire de 10,90 €.

1 / JE REPORTE CI-DESSOUS LES RÉFÉRENCES à 5 chiffres correspondant aux numéros commandés :

1^{re} réf. x 10,90 € = €

2^e réf. x 10,90 € = €

3^e réf. x 10,90 € = €

4^e réf. x 10,90 € = €

5^e réf. x 10,90 € = €

6^e réf. x 10,90 € = €

TOTAL À RÉGLER €

Offre valable jusqu'au 31/12/2019 en France Métropolitaine. Pour une livraison à l'étranger, merci de consulter boutique.pourlascience.fr

Les informations que nous collectons dans ce bon de commande nous servent à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utilisons pour gérer votre compte, à l'élaboration de nos catalogues, commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante : <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit « RGPD ») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pourlascience.fr.

Groupe Pour la Science – Siège social : 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris Cedex 14 – Sarl au capital de 32000 € – RCS Paris B 311 797 393 – Siret : 311 797 393 000 23 – APE 5814 Z

2 / J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal Ville :

Téléphone

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3 / JE CHOISIS MON MODE DE RÈGLEMENT

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Carte bancaire

N°

Date d'expiration

Clé (les 3 chiffres au dos de votre CB)

Signature obligatoire :



PLUS SIMPLE, PLUS RAPIDE
ABONNEZ-VOUS SUR BOUTIQUE.POURLASCIENCE.FR

L'ESSENTIEL

● La nature de l'hypothétique matière noire qui assure, par sa masse, la cohésion gravitationnelle des galaxies reste inconnue.

● Des trous noirs dits «primordiaux», formés peu de temps après le Big Bang,

constituent un candidat au titre de matière noire.

● Les détecteurs d'ondes gravitationnelles ont mis en évidence des trous noirs dont les caractéristiques s'accordent avec cette hypothèse.

LES AUTEURS



JUAN GARCÍA-BELLIDO est physicien théoricien et professeur à l'institut de physique théorique de Madrid, en Espagne.



SÉBASTIEN CLESSE est chargé de recherche FNRS à l'université de Namur et à l'université catholique de Louvain, en Belgique.

La piste des trous noirs

De quoi est faite la masse manquante de l'Univers ?

Des observations récentes soutiennent l'hypothèse des trous noirs primordiaux, des objets nés moins d'une seconde après le Big Bang, bien avant les étoiles.



Vue d'artiste d'une coalescence de deux trous noirs. Les observations des interféromètres *Ligo* et *Virgo* suggèrent que ces trous noirs pourraient être primordiaux et constituer une part importante de la matière noire.

© Ligo/Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet)

I

l y a plus d'un milliard d'années, dans l'Univers lointain. Deux trous noirs tournent l'un autour de l'autre et se rapprochent progressivement. Cette spirale mortelle se soldera par une collision d'une extrême violence, la fusion des deux astres. Le choc a secoué la trame de l'espace-temps, émettant des perturbations qui se sont propagées à la vitesse de la lumière dans toutes les directions. Et en septembre 2015, elles ont atteint la Terre et fait vibrer les interféromètres laser géants du complexe de détection *Ligo*, aux États-Unis. C'était la première fois que les physiciens détectaient directement des ondes gravitationnelles !

À partir du signal capté par *Ligo*, les physiciens ont calculé que chacun des deux trous noirs impliqués dans la fusion était environ trente fois plus massif que le Soleil, soit le double ou le triple de la masse des trous noirs ordinaires, qui naissent de l'explosion en supernova d'étoiles massives. Dès lors, difficile d'imaginer que les deux trous noirs aient pu se former ainsi. De plus, même en admettant qu'ils sont nés de façon indépendante lors de la mort d'étoiles massives, comment ont-ils pu se rencontrer dans l'immensité du cosmos et former un système binaire ?

LE MYSTÈRE S'ÉCLAIRCIT

Répondre à cette question pourrait bien aider à résoudre l'un des mystères de l'Univers : la nature de la matière noire, qui représente 85 % de la matière de l'Univers. Cette matière noire a été imaginée pour expliquer la cohésion des galaxies et des amas galactiques. Car il semble que les galaxies tournent trop vite pour être maintenues gravitationnellement par la seule masse de la matière visible que nous observons dans ces galaxies. La matière noire apporterait le supplément d'attraction empêchant les galaxies en rotation d'éjecter le gaz et les étoiles de leurs régions les plus externes. Le problème est que l'on ignore tout de la nature de cette matière noire...

Les observations de *Ligo* suscitent un regain d'intérêt pour l'une des nombreuses pistes envisagées par les physiciens, celle des trous noirs « primordiaux », des trous noirs antérieurs à la formation des étoiles elles-mêmes et dont le ➤

➤ mécanisme de formation, plus exotique, ne fait donc intervenir aucune étoile.

Bien que ces hypothétiques trous noirs primordiaux n'aient jamais été observés, certains modèles théoriques suggèrent qu'ils se seraient formés en grand nombre dans le plasma dense et brûlant qui remplissait le cosmos moins d'une seconde après le Big Bang.

Les deux trous noirs massifs à l'origine des ondes gravitationnelles détectées par *Ligo* seraient-ils de tels trous noirs primordiaux ? Les futures observations de *Ligo* et d'autres observatoires, tel *Virgo*, en Italie, mettront bientôt cette idée à l'épreuve. Notre compréhension de l'Univers pourrait alors connaître une révolution. Au-delà de la détection des ondes gravitationnelles, ce serait quelque chose d'encore plus extraordinaire !

LA MARCHÉ DES MACHOS

De prime abord, les trous noirs sont de bons candidats à la matière noire puisqu'ils n'émettent pas de lumière. De fait, ils appartiennent à une classe de candidats proposés dans les années 1980 et nommés « machos » (acronyme de *massive compact halo objects*). En plus des trous noirs, les machos incluent aussi les planètes et les naines brunes (étoiles trop peu massives pour déclencher les réactions de fusion de l'hydrogène). Présents à la fois dans les halos sphériques entourant les galaxies et à proximité du centre lumineux de chaque galaxie, les machos produiraient le surplus d'attraction gravitationnelle requis pour expliquer le mouvement du gaz et des étoiles.

Quelle que soit sa nature, machos ou autres, la matière noire se manifeste à différentes échelles dans l'Univers. Elle influe sur la dynamique des galaxies et des amas de galaxies, mais elle a aussi contribué à la naissance de ces structures. Elle a déterminé où et à quelle vitesse grandissent les galaxies ainsi que les amas et superamas de galaxies. Ces objets se sont en effet formés à partir de l'accumulation de gaz vers le centre de grands nuages de matière noire. Les cosmologistes ont cartographié avec précision la distribution spatiale de ces grumeaux de matière au moyen des relevés de galaxies. Et ils ont relié l'émergence de ces structures aux minuscules variations de température du fond diffus cosmologique, la lueur résiduelle du Big Bang qui imprègne tout l'Univers et dont les caractéristiques ont été mesurées avec précision.

Par ailleurs, la matière noire se manifeste aussi par des effets dérivés de la relativité générale. La masse diffuse de la matière noire des galaxies et des amas galactiques contribue à courber l'espace et à dévier la lumière des objets lointains, un phénomène de lentille gravitationnelle que les astronomes observent partout dans le ciel.

Si la plupart des physiciens sont convaincus que la matière noire existe bel et bien, l'hypothèse des machos est tombée en disgrâce il y a près d'une décennie, leur recherche expérimentale indirecte ayant fait chou blanc. En particulier, les astronomes les ont recherchés par le biais des effets de microlentille, une variante des lentilles gravitationnelles où un trou noir, une naine brune ou même une simple planète passe devant une étoile lointaine et amplifie momentanément la lumière de cet astre distant.

Aucun des programmes d'observation par microlentilles portant sur des millions d'étoiles des Grand et Petit Nuages de Magellan, les principales galaxies satellites de la Voie lactée, n'ont pu prouver que les machos constituaient une grande portion du halo galactique. Plus précisément, les physiciens ont exclu les machos de masses inférieures à 10 masses solaires comme constituants principaux de la matière noire. Et tandis que ces relevés étaient effectués, les scientifiques ont développé des arguments en faveur d'une autre hypothèse, les « wimps » (*weakly interacting massive particles* ou « particules massives interagissant faiblement »).

De prime abord, les trous noirs sont de bons candidats à la matière noire

Ces particules sont prédites de façon naturelle dans des extensions du modèle standard de la physique des particules, mais elles restent au moins aussi insaisissables que les machos. À ce jour, aucune détection n'a été confirmée, en dépit de décennies de recherche au moyen d'accélérateurs de particules, de détecteurs souterrains et de télescopes spatiaux. Les résultats négatifs s'accumulant pour les wimps, des chercheurs ont commencé à reconsidérer l'hypothèse des machos, en se concentrant en particulier sur les trous noirs primordiaux. Mais si ces objets peuplent en grand nombre l'Univers, il fallait expliquer comment ils ont pu échapper si longtemps à la détection.

Dès les années 1970, les physiciens Stephen Hawking, Bernard Carr et George Chapline ont ➤

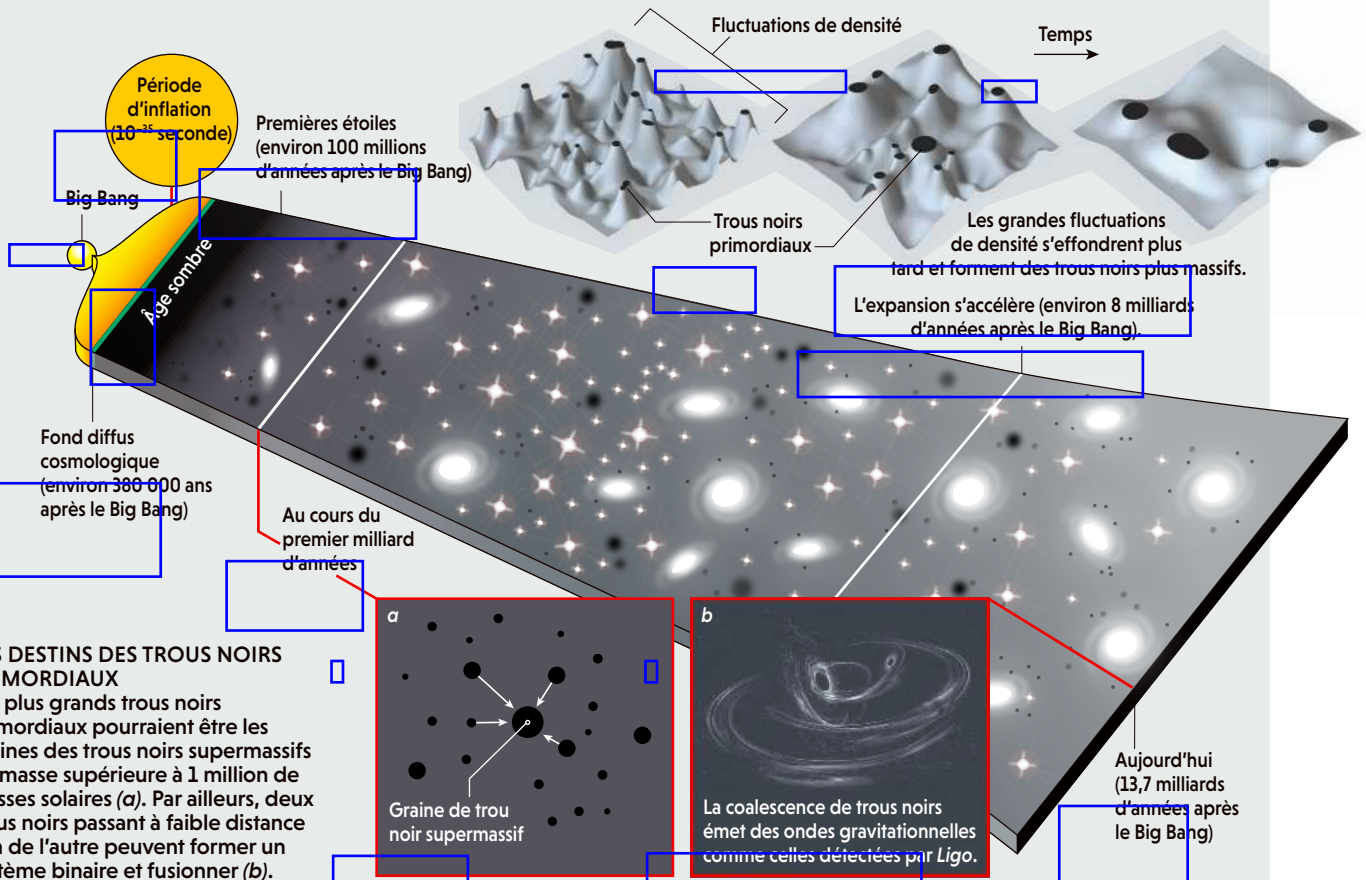
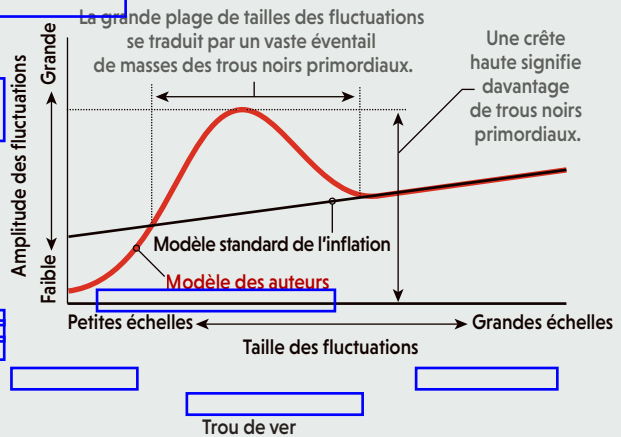
LES TROUS NOIRS NÉS DU BIG BANG

Les premiers trous noirs de l'Univers sont peut-être apparus aux premiers instants du temps cosmique, quand tout n'était encore qu'un épais plasma bouillonnant de particules élémentaires. Dans les années 1970, des physiciens

théoriciens ont suggéré que des régions un peu plus denses de ce plasma pouvaient s'effondrer sous l'effet de leur propre gravité moins d'une seconde après le Big Bang, formant les trous noirs dits primordiaux, qui allaient dès lors

façonner la structure de l'Univers en expansion. Puisqu'ils n'émettent aucune lumière, les trous noirs primordiaux sont des candidats naturels (quoique difficiles à détecter) à la matière noire.

LES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX se forment regroupés dans des amas. L'inflation (la phase d'expansion accélérée de l'Univers moins d'une seconde après le Big Bang) aurait amplifié, jusqu'à des échelles immenses, les fluctuations quantiques qui apparaissent spontanément dans le cosmos. Ces fluctuations ont ensuite donné naissance à de vastes zones présentant une surdensité de matière. Ces régions se sont effondrées sous leur propre gravité pour donner naissance aux trous noirs primordiaux. Le modèle inflationnaire des auteurs prédit les caractéristiques des fluctuations amplifiées et des zones de surdensité (voir ci-contre). Ils montrent que les trous noirs primordiaux se forment regroupés en amas. Et la masse de chacun de ces trous noirs primordiaux serait comprise entre 0,01 et 10 000 masses solaires. Environ 500 000 ans après le Big Bang, un amas pouvait s'étendre sur des centaines d'années-lumière et contenir des millions de trous noirs primordiaux. En fusionnant, en s'éparpillant et en se nourrissant de gaz ordinaire et de poussière, les trous noirs primordiaux de ces amas ont orchestré la croissance des galaxies et des amas galactiques.



COMMENT TESTER L'HYPOTHÈSE DES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX ?

DIFFÉRENTES STRATÉGIES D'OBSERVATION SONT POSSIBLES.

1. Détection de nouvelles ondes gravitationnelles

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles tels que *Ligo* (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*), aux États-Unis, et *Virgo*, en Italie, ont montré leur efficacité pour détecter des fusions de trous noirs. Le nombre étonnamment grand de fusions de trous noirs massifs détectées suggère que ces objets pourraient avoir une origine primordiale, mais cela n'est pas une preuve suffisante que les trous noirs primordiaux constituent la matière noire. Une telle preuve ne pourrait être obtenue qu'avec la corroboration d'autres observations. La détection d'un trou noir de masse inférieure à la limite dite de Chandrasekhar (1,45 masse solaire), au-dessous de laquelle les étoiles ne peuvent pas produire de trou noir, serait la manifestation indéniable d'une origine primordiale. Et justement, *Ligo* pourrait très bientôt atteindre la sensibilité nécessaire pour détecter un tel trou noir si son compagnon est plus massif (plus de 10 masses solaires). Enfin, à l'échelle cosmologique, des systèmes binaires de trous noirs abondants devraient produire un fond diffus d'ondes gravitationnelles, qui pourrait être détecté par le futur observatoire spatial *Lisa* (*Laser interferometer space antenna*) et par d'autres expériences fondées sur l'observation des pulsars.

2. Découverte de nouvelles galaxies naines de luminosité ultrafaible

En 2015, des astronomes travaillant sur les données de la collaboration DES (*Dark energy survey*, «relevé de l'énergie sombre») ont découvert des dizaines de galaxies naines de luminosité ultrafaible dans le halo galactique. Cette découverte suggère qu'il pourrait y avoir en orbite autour de la Voie lactée des centaines de ces galaxies naines dominées par la matière



L'interféromètre laser géant, *Virgo*, en Italie, a détecté ses premières ondes gravitationnelles issues de la coalescence de trous noirs à l'été 2017. Il fonctionne de concert avec *Ligo*, aux États-Unis.

noire. Elles sont susceptibles d'être détectées en grand nombre par de futurs observatoires spatiaux, comme la mission *Euclid* de l'Agence spatiale européenne (ESA) et le télescope *WFIRST* (*Wide-field infrared survey telescope*, «télescope de relevé infrarouge à grand champ») de la Nasa. Si la matière noire est constituée de trous noirs primordiaux, la plupart d'entre eux pourraient se trouver dans ces galaxies naines, voire dans des amas plus petits et plus denses.

3. Mesure des variations de position des étoiles

La mission en cours *Gaia*, de l'ESA, mesure la position et la vitesse d'environ un milliard d'étoiles de la Voie lactée avec une précision inégalée. Ces mesures pourraient révéler la présence de nombreux trous noirs massifs isolés par le biais de minuscules perturbations que ces objets exercent sur le mouvement des étoiles voisines. Par ailleurs, les populations d'étoiles binaires à grande séparation (c'est-à-dire assez éloignées l'une de l'autre) devraient être moins nombreuses que prévu, car les trous noirs qui s'en approchent les détruiraient.

4. Cartographie de l'hydrogène neutre cosmique

Avant et pendant la formation des premières étoiles, l'Univers était

essentiellement composé d'hydrogène neutre, qui émet un rayonnement caractéristique, à une longueur d'onde radio de 21 centimètres. Dès 2020, le radiotélescope SKA (*Square kilometre array*) – qui devrait être le plus grand jamais construit – commencera à réaliser une carte du ciel entier à cette longueur d'onde. L'accrétion de matière par les trous noirs primordiaux produit un rayonnement X intense, ionisant l'hydrogène neutre environnant et imprimant des signatures sur cette carte du ciel à 21 centimètres. Le SKA devrait ainsi détecter la présence de trous noirs primordiaux massifs.

5. Exploration des distorsions du fond diffus cosmologique

Les rayons X issus des trous noirs primordiaux qui se gavent de gaz et de poussière dans l'Univers primordial devraient également induire des distorsions dans le spectre du fond diffus cosmologique. L'importance de cet effet est encore controversée, en particulier dans les modèles où les trous noirs primordiaux sont regroupés en amas denses. Leurs signatures sur le fond diffus cosmologique pourraient néanmoins être détectées par de futurs instruments et ainsi contraindre fortement les modèles de matière noire correspondant à des trous noirs primordiaux.

EN SE GAVANT
DE MATIÈRE,
LES TROUS NOIRS
PRIMORDIAUX
ÉMETTENT
DES RAYONS X

► suggéré que des trous noirs étaient apparus dans les premiers instants de l'Univers. Ils ont surtout considéré le cas de trous noirs de masse inférieure à celle d'une montagne. Ces trous noirs, parce qu'ils étaient petits, auraient subi un important phénomène d'évaporation par un processus quantique nommé rayonnement de Hawking (car Stephen Hawking en a prédit l'existence). Près de 13,8 milliards d'années plus tard (l'âge de l'Univers), ils auraient complètement disparu, ne laissant derrière eux que du rayonnement. Ils ne peuvent donc constituer actuellement la matière noire. Stephen Hawking et ses collègues ont aussi envisagé la possibilité de trous noirs primordiaux massifs, dont l'évaporation peut être négligée. Ils seraient donc encore présents dans l'Univers et pourraient constituer la matière manquante du cosmos.

L'idée que les trous noirs primordiaux massifs contribuent à la matière noire, voire représentent sa composante majeure, a été davantage développée dans les années 1990. Ce scénario s'appuyait sur les théories de l'inflation cosmique, idée proposée par le physicien américain Alan Guth au début des années 1980. L'inflation est une phase d'expansion prodigieuse qui aurait immédiatement suivi le Big Bang. Selon cette idée, en 10^{-35} seconde, tous points distants de moins d'un rayon atomique se sont retrouvés éloignés de quatre années-lumière, une dis-

alors comme de la matière noire et domineraient le contenu en matière de l'Univers actuel. Ce modèle prévoit une population de trous noirs dont la masse est déterminée par la quantité d'énergie présente au sein de la région qui s'effondre. De nombreux autres groupes de cosmologistes ont alors commencé à explorer ces idées avec différents modèles d'inflation.

En 2015, nous avons proposé un scénario, dans la continuité de celui de 1996, où les régions de surdensité s'effondrent à proximité les unes des autres, ce qui engendre des amas de trous noirs de masse variant dans une gamme allant de 0,01 à 10000 masses solaires. En moins de 500000 ans après le Big Bang, chaque amas aurait alors contenu des millions de trous noirs primordiaux dans un volume de quelques centaines d'années-lumière de diamètre seulement.

Grâce à ces amas, il est possible d'expliquer les détections de *Ligo* qui laissent penser que la rencontre et la fusion de deux trous noirs massifs ne sont pas si rares. Dans un tel amas, la densité de trous noirs est assez élevée pour que, de temps en temps, les trajectoires de deux trous noirs primordiaux se croisent et que ces objets deviennent gravitationnellement liés. Ils se mettent alors à décrire une spirale en se rapprochant l'un de l'autre sur une durée allant jusqu'à quelques millions d'années, qui s'achève avec leur coalescence.

En janvier 2015, dans le cadre de notre modèle, nous avons suggéré que *Ligo* pourrait détecter les ondes gravitationnelles produites par ces fusions de trous noirs primordiaux. Or, plus tard cette même année, *Ligo* a effectivement détecté une fusion de trous noirs dans la bonne gamme de masses. En mars 2016, en même temps que des chercheurs de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, nous avons estimé le taux d'événements de fusion au sein des amas de trous noirs primordiaux. Si ces trous noirs forment la matière noire (ou une fraction importante de celle-ci), ces taux coïncident avec les limites expérimentales calculées à partir des données de *Ligo*.

Depuis 2016, *Ligo* ainsi que l'interféromètre *Virgo*, opérationnel depuis l'été 2017 dans sa version améliorée, ont détecté huit nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles, émises lors de la fusion de deux trous noirs massifs (voir la figure page 71). Les masses des astres, de une à quelques dizaines de masses solaires, renforcent l'idée d'une origine primordiale. Par ailleurs, dans un cas, les axes de rotation des trous noirs progéniteurs suggèrent que le système binaire se soit formé par capture plutôt que par l'évolution d'un système de deux étoiles préexistantes nées dans un même nuage de gaz. Or le scénario de la capture est privilégié dans le cas des trous noirs primordiaux. Ces détections suggèrent que les trous noirs binaires seraient aussi beaucoup plus fréquents qu'on ne s'y attendait, ►

UNE GRANDE POPULATION DE TROUS NOIRS S'EST FORMÉE MOINS D'UNE SECONDE APRÈS L'INFLATION

tance comparable à celle qui sépare le Soleil de ses voisines stellaires les plus proches.

De même, des fluctuations quantiques infimes, qui apparaissent spontanément dans l'espace, ont été amplifiées à des échelles macroscopiques par la rapide expansion. Elles ont ensemencé l'Univers de régions présentant des surdensités de matière et d'énergie, à partir desquelles toutes les structures cosmiques ultérieures émergeront. Aussi surprenante que puisse paraître l'idée de l'inflation, les astrophysiciens observent ces fluctuations amplifiées dans le fond diffus cosmologique.

En 1996, l'un de nous (Juan García-Bellido), avec Andrei Linde, de l'université Stanford, et David Wands, de l'université de Portsmouth, au Royaume-Uni, a découvert un processus par lequel l'inflation amplifiait les fluctuations quantiques de façon à produire naturellement des régions très denses qui s'effondrent en formant une grande population de trous noirs moins d'une seconde après le Big Bang (voir l'encadré page 67). De tels trous noirs se comporteraient

> conformément à notre scénario des trous noirs primordiaux massifs.

Pour l'instant, les données sont encore peu nombreuses. Si *Ligo* et *Virgo* ont effectivement détecté la fusion de certains membres d'une population cachée de trous noirs primordiaux massifs, nous devrions nous attendre à en détecter beaucoup d'autres dans les années à venir. Il sera possible d'établir une analyse statistique des masses et des autres caractéristiques (tels l'axe et la vitesse de rotation) des trous noirs progéniteurs de coalescences. Des données cruciales pour tester leur possible origine primordiale.

ÉCHAPPER AUX MACHOS

Un atout de notre modèle est qu'il échappe aux contraintes sur les machos établies par les relevés observationnels de microlentilles. Ces contraintes excluaient que les trous noirs de moins de 10 masses solaires constituent le principal ingrédient de la matière noire. Or, dans notre scénario, les trous noirs primordiaux couvrent une large gamme de masses et seule une petite fraction d'entre eux seraient visibles dans ces observations de microlentilles, l'essentiel restant invisible. En outre, si les trous noirs primordiaux sont effectivement regroupés en amas, la probabilité qu'un amas se trouve le long de la ligne de visée des relevés d'observations de microlentilles tombe à moins de 1/1000.

Pour détecter ces amas, il faudrait étendre la recherche des événements de microlentilles à d'autres régions du ciel, en traquant par exemple la lumière amplifiée des étoiles de la galaxie d'Andromède, voisine de la Voie lactée, ou même de quasars dans de lointaines galaxies. Les astronomes sonderaient ainsi un volume beaucoup plus important du halo galactique à la recherche des trous noirs primordiaux qui s'y cachent. Des observations récentes suggèrent que les machos de masse comprise entre un dixième de masse solaire et quelques masses solaires pourraient tout de même représenter environ 20% de la masse d'un halo de galaxie typique. Cette valeur concorde avec la gamme de masses de trous noirs primordiaux de notre scénario.

Pour résumer, la possibilité que la matière noire soit principalement constituée de trous noirs primordiaux n'est pas exclue. Par ailleurs, ce type de scénario pourrait résoudre plusieurs autres énigmes cosmiques liées à la matière noire et à la formation des galaxies.

Les amas de trous noirs primordiaux pourraient régler le problème dit des galaxies naines, à savoir le manque apparent de petites galaxies satellites qui devraient théoriquement se former autour des galaxies massives telles que la Voie lactée. Des modélisations récentes de la distribution cosmique de matière noire reproduisent avec précision la structure à grande échelle de l'Univers observé: les amas de galaxies se forment dans d'immenses filaments de matière

noire entourant de grandes régions vides de matière. Mais à plus petite échelle, ces simulations prédisent l'existence de nombreux minihalos de matière noire en orbite autour des galaxies massives. Chacun de ces minihalos devrait abriter une galaxie naine, et il devrait y en avoir des centaines entourant la Voie lactée.

Or les astronomes ont trouvé beaucoup moins de galaxies naines que prévu. Plusieurs explications sont possibles: par exemple, elles seraient bien présentes, mais difficiles à détecter car trop peu lumineuses; ou les simulations surestimeraient le nombre de ces galaxies naines, car elles ne reproduiraient pas correctement l'influence de la matière ordinaire sur la formation des galaxies naines.

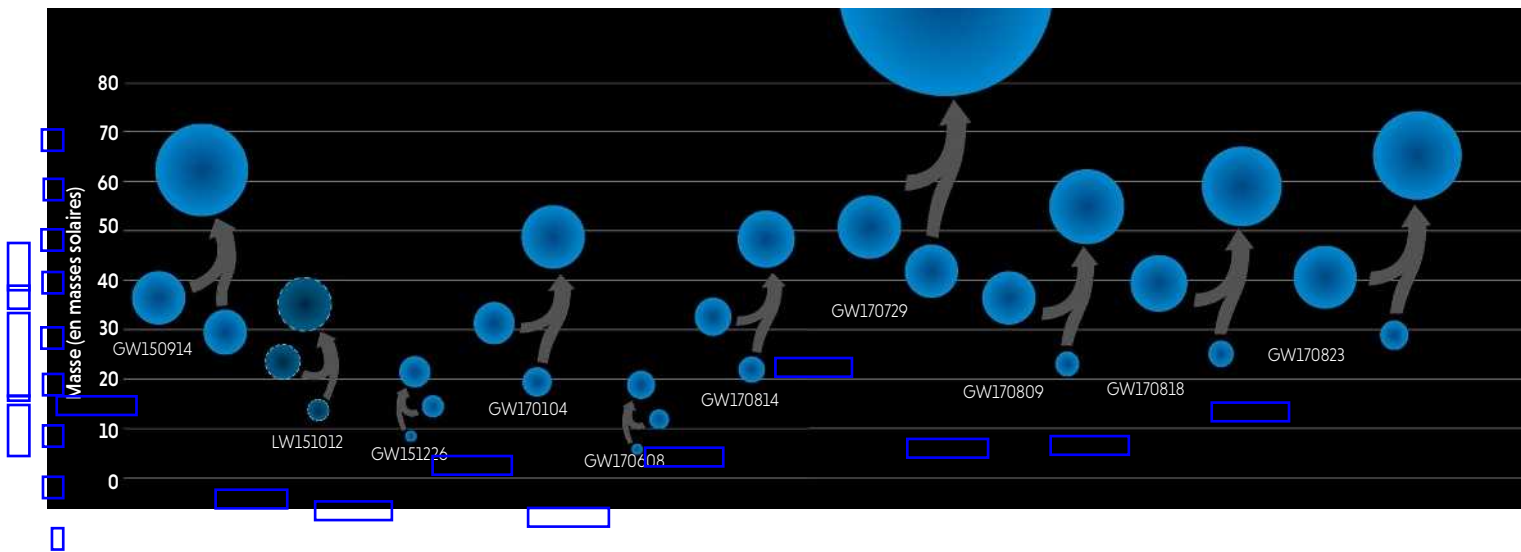
Si les trous noirs primordiaux en amas constituaient l'essentiel de la matière noire, ils seraient très nombreux dans les minihalos entourant la Voie lactée. Ils engloutiraient alors une fraction de la matière ordinaire et réduiraient ainsi la formation d'étoiles dans les minihalos. De plus, même si ces minihalos formaient beaucoup d'étoiles, ces astres pourraient facilement être éjectés par des rencontres rapprochées avec des trous noirs primordiaux massifs. Ces deux effets réduiraient fortement la brillance des galaxies satellites et les rendraient

**Les signaux
détectés par Ligo
et Virgo sont sans
doute ceux
de la fusion
de trous noirs
primordiaux**

très difficiles à détecter sans l'aide de caméras à grand champ d'une extrême sensibilité.

Heureusement, de telles caméras existent aujourd'hui, et les astronomes ont ainsi découvert des dizaines de galaxies naines extrêmement peu lumineuses autour de la Voie lactée. Ces objets semblent héberger jusqu'à des centaines de fois plus de matière noire que d'étoiles lumineuses, et notre modèle prédit qu'il devrait y en avoir des milliers supplémentaires en orbite autour de la Voie lactée.

Les simulations de formation des galaxies prédisent aussi une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les naines et les



Les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté neuf coalescences de trous noirs (et peut-être une dixième, en pointillé, ainsi que près de 30 autres candidats en cours d'analyse). La masse des trous noirs progéniteurs est de l'ordre de la dizaine de fois celle du Soleil, ce qui suggère que ces corps ont une origine primordiale plutôt que stellaire.

massives. De tels objets seraient assez gros pour former facilement des étoiles et seraient aisément visibles. Pourtant, ils n'ont pas été trouvés par les astronomes qui fouillent les environs de la Voie lactée. Ce problème a une solution semblable à celle des galaxies naines manquantes : les trous noirs primordiaux massifs présents au cœur des galaxies de taille intermédiaire bloqueraient la formation des étoiles en raison de l'accrétion du gaz et éjecteraient les astres formés. Ces galaxies intermédiaires seraient donc invisibles pour la plupart des relevés.

L'ÉNIGME DES SUPERMASSIFS

Les trous noirs primordiaux résoudraient également la question de l'origine des trous noirs supermassifs. Ces monstres pèsent des millions, voire des milliards, de masses solaires. On les trouve au centre des quasars et des galaxies massives très tôt dans l'histoire de l'Univers, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. Pourtant, si ces trous noirs supermassifs se sont formés et ont grossi à partir de trous noirs nés de l'explosion des premières étoiles de l'Univers et à la suite de leurs fusions successives, ils n'ont pas pu acquérir une masse aussi gigantesque en un temps si court.

Dans notre scénario, même si la plupart des trous noirs primordiaux ne dépassent pas quelques dizaines de masses solaires, il en reste une petite fraction qui sont beaucoup plus lourds, entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers de masses solaires. Nés moins d'une seconde après le Big Bang, ces objets monstrueux agiraient comme des graines pour la formation des premières galaxies et quasars, et l'accrétion de matière ainsi que l'absorption de trous noirs moins massifs permettraient d'atteindre rapidement les caractéristiques des trous noirs supermassifs.

Ces trous noirs primordiaux pourraient aussi rendre compte de l'existence de trous noirs de taille intermédiaire (entre 1 000 et

1 million de masses solaires) dont on soupçonne l'existence au centre des galaxies naines et des amas globulaires d'étoiles. Ainsi, les trous noirs primordiaux pourraient être le chaînon manquant entre les trous noirs classiques de masse stellaire et les trous noirs supermassifs.

Les preuves observationnelles de ce scénario s'accumulent : des détections récentes de sources de rayons X étonnamment abondantes dans l'Univers primordial s'expliqueraient par de grandes quantités de trous noirs primordiaux produisant des rayons X tandis qu'ils se gavent de gaz, moins d'un milliard d'années après le Big Bang.

Ainsi, les trous noirs primordiaux massifs sont des candidats prometteurs pour la matière noire et apportent des réponses à de nombreux autres problèmes qui tracassent les cosmologistes. Mais il est trop tôt pour conclure. D'autres hypothèses sont encore en lice, et de nouvelles observations fort attendues pourraient en éliminer certaines. Dans les années à venir, plusieurs observations pourraient mettre à l'épreuve le scénario des trous noirs primordiaux (voir l'encadré page 68). Elles incluent la détection des galaxies naines d'ultrafaible luminosité, l'influence des trous noirs primordiaux massifs sur la position des étoiles dans la Voie lactée, la cartographie de l'hydrogène neutre au cours de la première époque de formation stellaire et l'étude des distorsions du fond diffus cosmologique.

Outre ces expériences, nous disposons désormais avec les interféromètres laser géants (*Virgo*, *Ligo*, mais aussi ceux en construction, *Kagra*, au Japon, *Ligo India*, en Inde, et le projet européen du télescope *Einstein*) d'un nouvel outil pour démêler les énigmes cosmiques. L'ensemble de toutes ces observations pourrait confirmer l'existence de trous noirs primordiaux et leur possible lien avec la matière manquante de l'Univers. D'ici à quelques années, nous leverons peut-être le voile sur le mystère de la matière noire. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. ABBOTT ET AL., Cosmological constraints from multiple probes in the dark energy survey, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122(17), art. 171301, 2019.

S. CLESSE ET J. GARCÍA-BELLIDO, The clustering of massive primordial black holes as dark matter : measuring their mass distribution with Advanced Ligo, *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, pp. 142-147, 2017.

S. CLESSE ET J. GARCÍA-BELLIDO, Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies, *Phys. Rev. D*, vol. 92, art. 023524, 2015.

L'ESSENTIEL

- La matière noire ne cesse d'échapper aux investigations des astronomes.

- Une partie de ce composant essentiel de l'Univers est pourtant connue: ce sont les neutrinos nés lors du Big Bang.

- Leur contribution à la matière est de mieux en mieux cernée grâce à diverses expériences, comme *Katrin*.

- Mais leur détection relève peut-être du rêve inaccessible...

L'AUTEUR



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

Et les neutrinos cosmologiques!

Dans leur quête de la matière noire, les astronomes négligent la contribution des neutrinos nés lors du Big Bang. Ces particules constituent pourtant une part non négligeable de cette composante mystérieuse de l'Univers. Arrivera-t-on un jour à les détecter ?

A

ux premiers instants de l'Univers, l'harmonie régnait. Toutes les particules élémentaires interagissaient dans un bel équilibre et il y avait autant de particules de matière que d'antimatière, et d'un type de particule à l'autre, les proportions étaient fixées, dans un rapport souvent proche de 1. Puis la température baissa... Particules et antiparticules s'annihilèrent, ne laissant qu'un minuscule excès de matière dont nous sommes issus.

Mais une espèce résista, les neutrinos dits «cosmologiques», car nés du Big Bang, et leur *alter ego*, les antineutrinos. Pourquoi? Car leurs interactions cessèrent avant que leur énergie, devenue trop basse, ne les oblige à s'annihiler comme le firent les autres particules. On compte ainsi de nos jours plus d'un milliard de neutrinos et autant d'antineutrinos pour un seul proton. Les neutrinos dominent (en nombre) la matière!

Ces chiffres sont confirmés par l'étude de la nucléosynthèse primordiale: quand quelques



minutes après le Big Bang la température de l'Univers est descendue en dessous de quelques milliards de degrés, protons et neutrons ont pu se combiner pour former des noyaux d'hélium, dont l'abondance dépend directement de la dynamique de l'expansion, elle-même dictée, via les lois de la gravitation, par l'abondance des espèces présentes, donc, entre autres, celles des neutrinos cosmologiques. Leur existence, et leur abondance précise ne font donc guère de doute.

Mais toutes les propriétés des neutrinos, notamment leur masse éventuelle, sont mal connues, en raison de leurs très faibles interactions avec la matière. À la fin des années 1990 fut découverte l'oscillation des neutrinos, c'est-à-dire le fait qu'un neutrino d'un certain type (il en existe trois) peut se transformer en un neutrino d'un autre type. Or ce phénomène n'est possible que si les neutrinos ont une masse. En conséquence, les neutrinos constituent une forme de matière «noire», c'est-à-dire, sans interaction notable avec la matière autrement que via la force de gravitation. Dans les années 1990, à partir des travaux de James Peebles récemment nobélisé pour l'ensemble de son œuvre, on comprit que les neutrinos ne pouvaient constituer le gros de cette matière noire. En effet, leur masse est si faible qu'ils se comportent pendant des milliers d'années comme des particules de masse nulle et se déplacent

BIBLIOGRAPHIE

M. AKER ET AL., An improved upper limit on the neutrino mass from a direct kinematic method by KATRIN, *Phys. Rev. Letter*, à paraître, 2019. arxiv.org/abs/1909.06048

alors à une vitesse proche de celle de la lumière. Dès lors, cela retarde de beaucoup leur capacité à amorcer la formation de structures dans l'Univers: par le passé, peu après le Big Bang, une concentration locale de neutrinos cosmologiques ne pouvait durer, car ils s'échappaient bien avant que le champ de gravité exercé par l'«amas» n'attire à lui des quantités notables de matière. Les neutrinos constituent ainsi un exemple de matière noire dite «chaude»: pendant longtemps, leur vitesse élevée leur a interdit de participer à la formation des grandes structures. À l'inverse, de nos jours, au moins deux des trois types de neutrinos ont une vitesse faible, et participent à la formation des grandes structures de l'Univers.

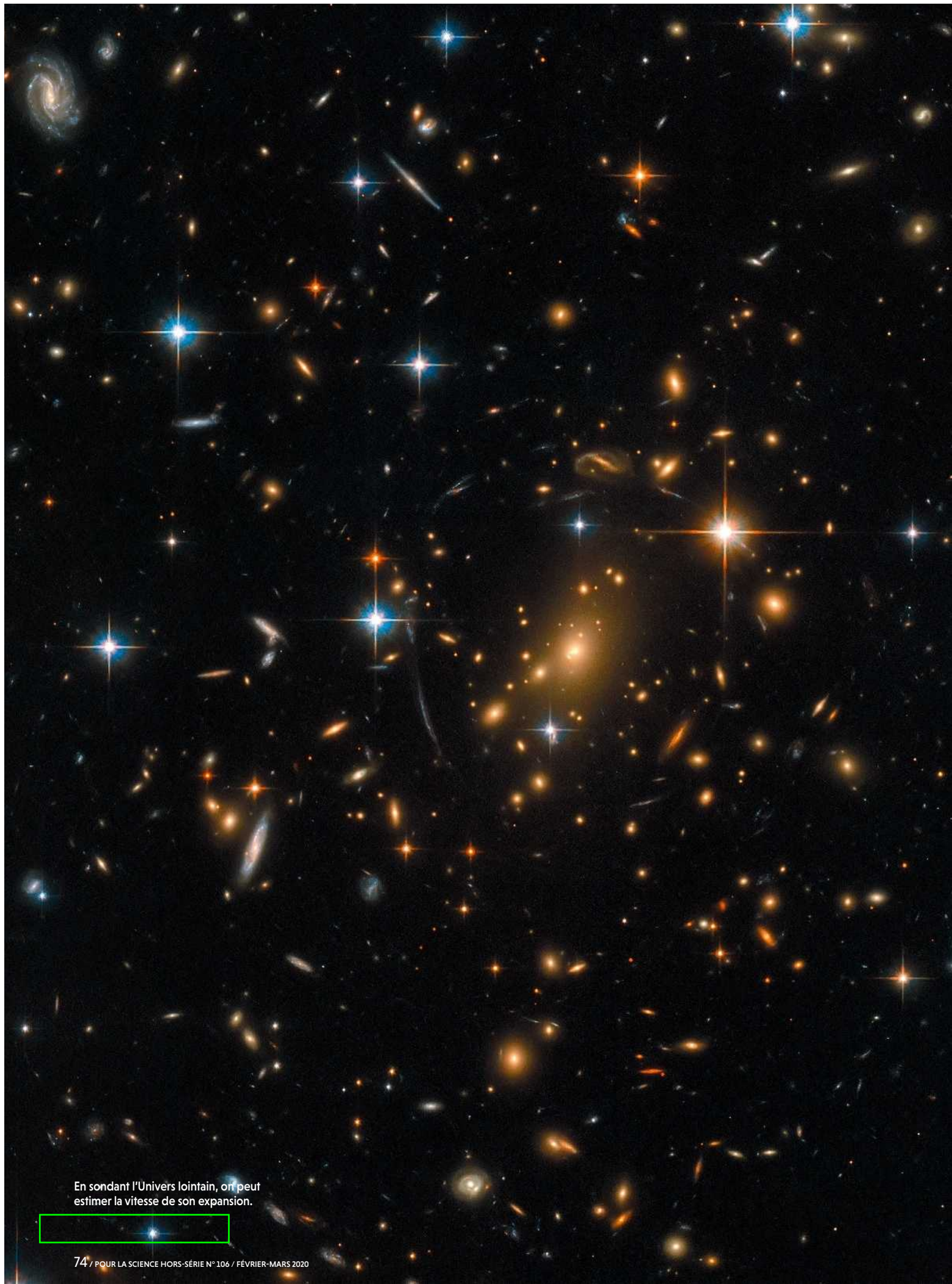
LA BORNE DE KATRIN

Les neutrinos ne forment donc qu'une partie relativement modeste de la matière noire. Peut-on l'estimer? Les oscillations des neutrinos indiquent que la masse des trois types est au moins supérieure à 0,057 électronvolt (eV), ce qui leur confère une contribution d'au moins 0,13% dans le budget énergétique total de l'Univers (là où la matière ordinaire compte pour environ 4% et la matière noire 25%, l'énergie sombre correspondant au reste). On peut aussi en fixer une limite supérieure: la somme des masses des trois neutrinos doit être assez inférieure à 10 eV sans quoi il n'y aurait pas assez de l'autre matière noire, dite «froide» pour former les galaxies et amas de galaxies observés. Une étude plus fine de la formation des grandes structures limite même leur masse à 0,3 eV, un chiffre en accord avec les résultats récents de l'expérience *Katrin*, qui a fixé de façon directe une limite supérieure à la masse de l'antineutrino électronique à 1,1 eV, soit $1,96 \times 10^{-33}$ gramme.

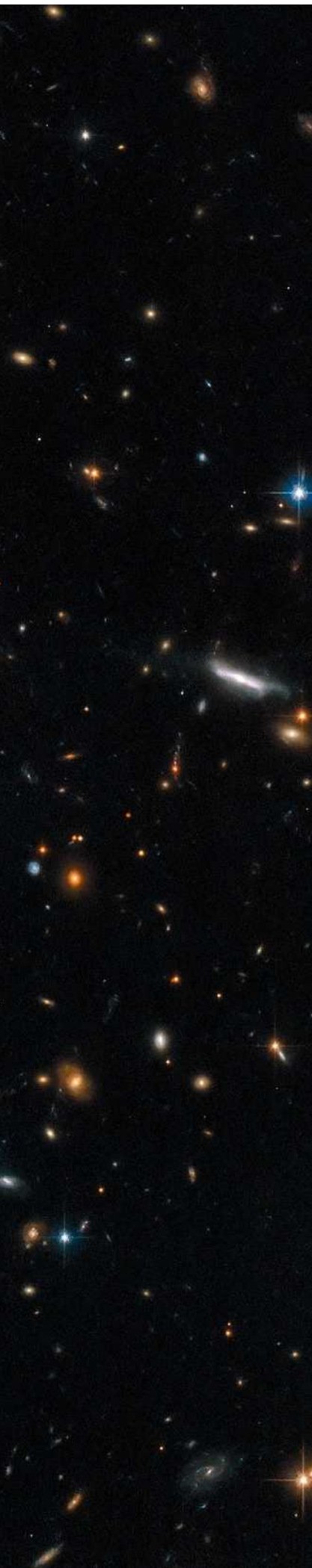
L'influence des neutrinos cosmologiques sur la formation des grandes structures étant faible, voire négligeable, on pourrait penser qu'ils ne méritent guère d'attention. On peut néanmoins en tirer deux leçons importantes. D'abord, rien ne garantit que la matière noire restante soit d'une seule forme: identifier l'une d'elles ne marquera peut-être pas la fin de l'histoire. Pire: même quand les neutrinos sont dotés d'une énergie importante (c'est le cas des «neutrinos solaires» produits par notre étoile), ils interagissent vraiment très peu avec la matière. Ces interactions baissent avec l'énergie. Or les neutrinos issus du Big Bang ont une énergie des millions de fois inférieure à celle des neutrinos solaires. Leur détection directe semble soudain hors de portée des rêves les plus fous des physiciens. Conclusion, le cosmos contient des particules qui nous échapperont peut-être à jamais. En d'autres termes, la quête d'une matière noire n'a aucune garantie d'aboutir. Un scénario cauchemardesque! ■

L'expérience *Katrin*, installée à Karlsruhe, en Allemagne (ici, en cours d'acheminement) consiste en une «balance» de 200 tonnes: elle a révélé que le neutrino ne pèse pas plus de $1,96 \times 10^{-33}$ gramme.





En sondant l'Univers lointain, on peut
estimer la vitesse de son expansion.



LES SOUBRESAITS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

Depuis le début du xx^e siècle, on sait que l'Univers est en expansion, ce qui est conforme à la relativité générale. Mais en 1998, les astrophysiciens ont découvert que cette expansion accélère. Pour expliquer ce phénomène, ils ont invoqué une mystérieuse énergie sombre répulsive. De quoi est-elle constituée ? Pour répondre, il est nécessaire de bien cartographier l'Univers, un défi auquel s'attellent de nombreux projets. Mais les premiers résultats ne font pas consensus...

Cependant, a-t-on vraiment besoin de cette énergie sombre ? La constante cosmologique, introduite puis reniée par Albert Einstein, ne suffirait-elle pas à expliquer cette accélération ? Ou bien – pour à l'inverse s'affranchir de l'héritage du grand physicien –, ne serait-il pas temps de modifier la théorie de la gravitation ?

LES SOUBRESAITS DE L'ÉNERGIE SOMBRE

L'ESSENTIEL

- Depuis la découverte de l'énergie sombre en 1998, on cherche à connaître la vitesse de l'expansion de l'Univers.
- Les méthodes sont diverses, de plus en plus nombreuses et les mesures se succèdent, mais sans parvenir à un accord.
- Un fossé sépare les méthodes fondées sur l'Univers primordial et sur celui que l'on observe aujourd'hui.
- Et c'est tout le modèle standard de la cosmologie qui pourrait être remis en cause.

L'AUTRICE

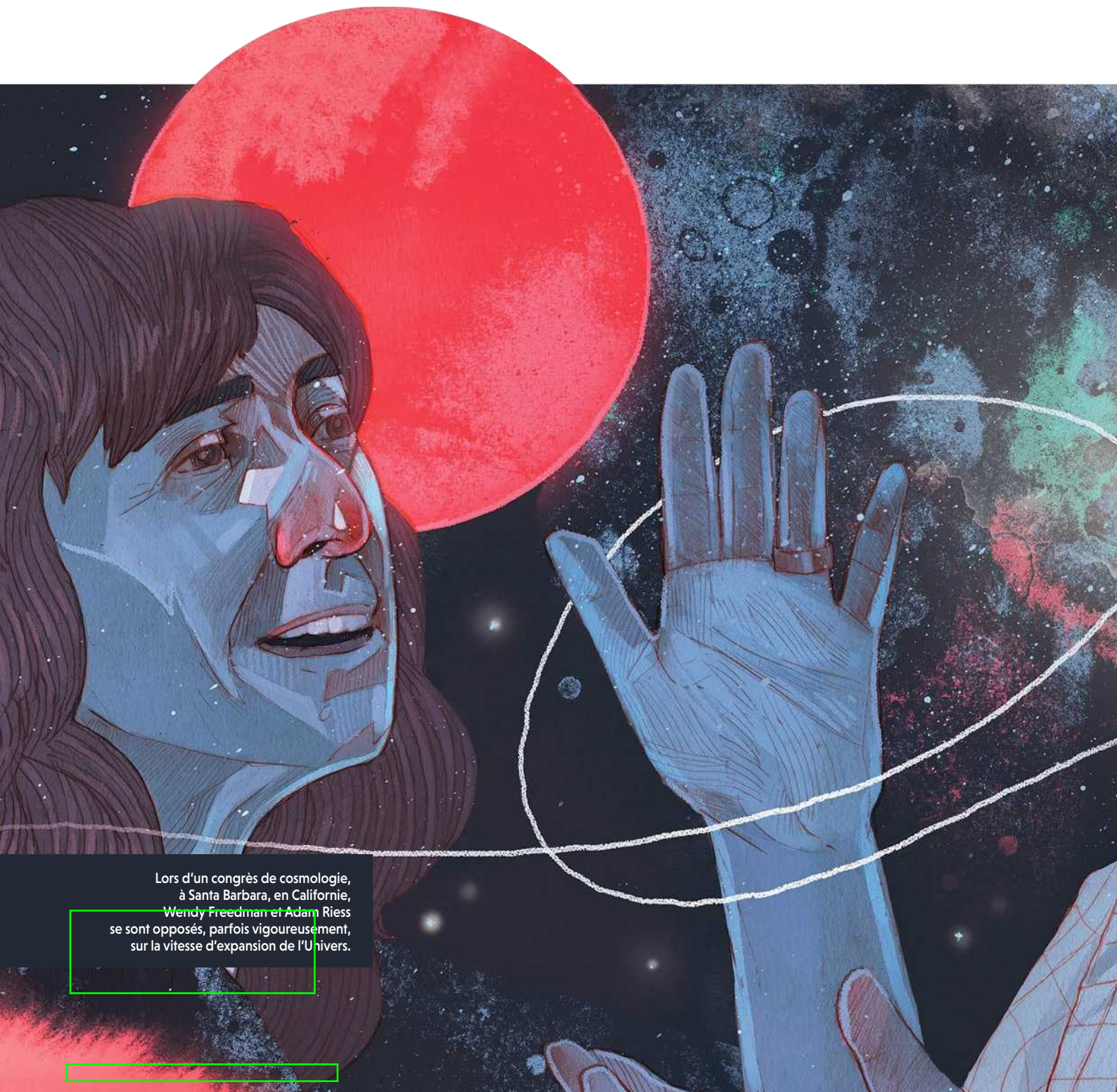


NATALIE WOLCHOVER
diplômée en physique
de l'université Tufts
et journaliste
au magazine Quanta



Quanta
magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par *Quanta Magazine*, une publication en ligne indépendante soutenue par la Simons Foundation afin de favoriser la diffusion des sciences: <http://bit.ly/QM-Cosmo-Dbt>



Lors d'un congrès de cosmologie, à Santa Barbara, en Californie, Wendy Freedman et Adam Riess se sont opposés, parfois vigoureusement, sur la vitesse d'expansion de l'Univers.

Un problème de vitesse



Lors d'un congrès de cosmologie, les plus grands astrophysiciens ont présenté pas moins de cinq nouvelles mesures de la vitesse de l'expansion de l'Univers. Toutes différentes! Comment s'y retrouver?

E

n 1998, deux équipes de cosmologistes scrutent des supernovæ lointaines et constatent qu'elles s'éloignent de la Terre de plus en plus vite. Une conclusion s'impose: contrairement à ce que l'on pensait, l'expansion de l'Univers accélère. Pour l'expliquer, on invoqua alors une «énergie sombre» répulsive qui représenterait deux tiers de tout ce que l'Univers contient! Outre l'accélération de l'expansion cosmique, ce nouvel ingrédient a eu pour effet l'attribution du prix Nobel de physique 2011 à ses découvreurs Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess. Et de soulever d'innombrables questions!

© Patryk Hardziej for Quanta Magazine

➤ Pour quelques éléments de réponse, retrouvons-nous ce lundi matin ensoleillé du mois de juillet 2019, à Santa Barbara, Californie. Là, des cosmologistes parmi les plus éminents se sont réunis pour discuter d'un problème épineux, et crucial. Vêtu d'une chemisette à carreaux, Adam Riess, désormais cinquantenaire, s'avance sur la scène, devant une salle pleine à craquer, pour son discours d'ouverture. Il y rend publics ses derniers résultats selon lesquels l'Univers s'étend actuellement trop vite, en tout cas plus vite que ne le prévoient les théories fondées sur ce que l'on sait des premiers jours de l'Univers. «Si le présent et le passé de l'Univers sont en désaccord, ne devrions-nous pas envisager une nouvelle physique?» déclare-t-il.

L'enjeu? Rien de moins que le modèle standard de la cosmologie, dominant depuis la découverte de l'énergie sombre. Ce modèle, noté Λ CDM, décrit toute la matière et l'énergie visible de l'Univers, ainsi que l'énergie sombre, représentée par la lettre grecque Λ , et la matière noire dite «froide», notée CDM, pour *cold dark matter*, par opposition aux matières noires chaude HDM et tiède WDM (voir l'entretien avec Jean-Pierre Luminet, page 10). Le modèle décrit également l'évolution de chacun de ces composants sous l'influence de la gravitation telle que prévue par la relativité générale d'Albert Einstein.

Le modèle Λ CDM rend parfaitement compte des caractéristiques de la jeunesse de l'Univers, des informations déduites de l'étude du «fond diffus cosmique», un rayonnement électromagnétique (dans le domaine des microondes), émis lorsque l'Univers n'était âgé que de 380 000 ans, au moment de la formation des premiers atomes. Depuis la première carte de ce rayonnement fossile, établie par le télescope spatial *Planck* en 2013, les astrophysiciens ont reconstitué avec précision l'Univers primordial et ont déroulé le film de son évolution jusqu'à aujourd'hui, afin notamment de prédire le taux actuel d'expansion cosmique, c'est-à-dire la constante de Hubble, ou H_0 .

Selon les données de *Planck*, l'Univers s'étend à raison de 67,4 kilomètres par seconde par mégaparsec, un mégaparsec valant 3,26 millions d'années-lumière. En d'autres termes, lorsque vous regardez dans le cosmos, pour chaque mégaparsec de distance parcourue, l'espace devrait reculer plus vite de 67,4 kilomètres par seconde. Les mesures d'autres caractéristiques de l'Univers primordial, comme les «oscillations acoustiques des baryons», fournissent exactement la même valeur: $H_0 = 67,4$. Mais d'autres observations sont en désaccord.

En effet, peu avant la conférence, l'équipe H0LiCOW a publié une nouvelle mesure de

la constante. À la lumière de six quasars lointains et de leurs images à travers des lentilles gravitationnelles, l'équipe a déterminé que H_0 était égale à 73,3 kilomètres par seconde par mégaparsec, une valeur significativement supérieure à celle de *Planck*. Mais, plus important, cette nouvelle mesure était proche de celle obtenue par l'équipe d'Adam Riess, surnommée SHOES, sur la base de l'étude des Céphéides, des étoiles à luminosité pulsante situées dans le Grand Nuage de Magellan, une galaxie naine voisine de la Voie lactée. La mesure la plus récente, datant de mars 2019, fixait H_0 à 74,0, une valeur comprise dans la marge d'erreur de l'équipe H0LiCOW. «Mon cœur s'est mis à palpiter», se souvient Adam Riess, en apprenant les résultats de l'équipe H0LiCOW, deux semaines avant le congrès de Santa Barbara.

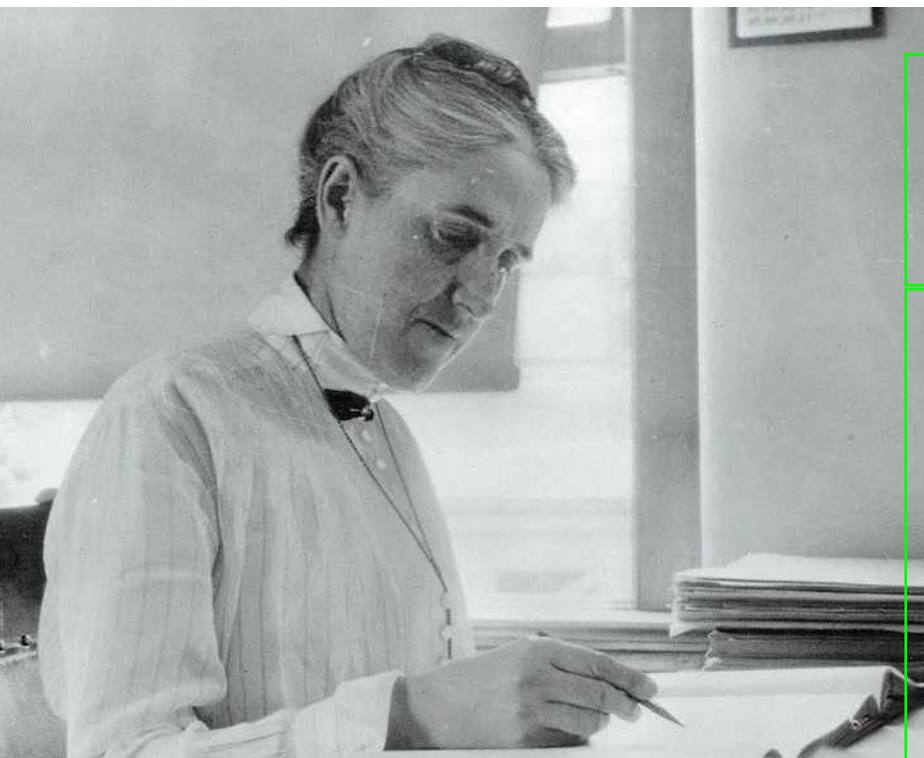
TENSION, CRISE OU PROBLÈME

Six ans durant, l'équipe SHOES a contesté, en vain, les valeurs de H_0 déterminées à partir de l'Univers primordial. Désormais, les mesures combinées des équipes SHOES et H0LiCOW ont franchi un seuil statistique, dit des «cinq sigma», de fiabilité. C'est la porte ouverte à une nouvelle approche de la physique. Si la constante de Hubble n'est pas égale à 67, mais plutôt à 73 ou 74, on en déduit qu'il manque quelque chose au modèle Λ CDM, un facteur qui accélère encore plus qu'attendu l'expansion cosmique. Ajouté aux ingrédients déjà connus (matière baryonique, matière

Cette tension est peut-être l'élément que beaucoup attendaient pour ébranler le modèle Λ CDM

noire et énergie sombre), ce composant supplémentaire enrichirait la cosmologie avec une approche inédite, obligeant à dépasser le modèle Λ CDM.

Durant son discours, Adam Riess s'est exprimé sur le «gouffre» qui sépare 67 et 73:



Henrietta Swan Leavitt à son bureau de l'observatoire de l'université Harvard. Elle a découvert comment les étoiles céphéides, à la luminosité oscillante, pouvaient aider à déterminer la vitesse d'expansion de l'Univers.

«Cet écart semble robuste. Lorsque j'évoquais la situation, je parlais d'une simple *tension*, mais on peut désormais parler de *problème*.» Invité à prendre la parole, David Gross, physicien des particules et lui aussi lauréat du prix Nobel, a surenchéri en voyant plutôt une *crise*. «Alors, nous sommes en *crise*», a confirmé Adam Riess.

Pour les cosmologistes, une crise représente l'occasion de découvrir quelque chose d'important. Lloyd Knox, membre de l'équipe Planck, s'exprimant après Adam Riess, s'est voulu optimiste: «Cette tension à propos de la constante de Hubble est peut-être l'élément que beaucoup d'entre nous attendaient pour ébranler le modèle Λ CDM.»

En fin de journée, de nombreux participants se sont entassés dans un car en direction de l'hôtel. Entre océan et montagnes, nous roulions au milieu des palmiers. Wendy Freedman, pionnière de la constante de Hubble, était installée au second rang. Aujourd'hui âgée de 62 ans, cette femme dirigeait l'équipe qui a obtenu la première mesure de H_0 en 2001: 72 avec une précision de 10%. Elle semblait moins atteinte par la contradiction apparente, contrairement à la plupart des autres conférenciers, qui semblaient ne plus tenir en place. «Il nous reste encore du travail», a-t-elle lâché, mâchant presque ses mots.

Wendy Freedman a passé des décennies à améliorer les mesures de H_0 en utilisant la méthode de l'«échelle de distance cosmique»: l'idée consiste à prendre un ensemble d'objets situés à des distances connues (ils forment les

barreaux de l'échelle) et à en étudier l'éloignement pour mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers. Elle a calibré autant que possible cette échelle à l'aide des céphéides. Mais elle s'inquiète de potentielles sources d'erreur. «Elle sait dans quels placards sont cachés les squelettes», explique Barry Madore, son mari et proche collaborateur.

Pour calibrer une nouvelle échelle de distance cosmique, le couple et leurs collègues du *Carnegie-Chicago Hubble Program* (CCHP) ont utilisé le «sommet de la branche des géantes rouges» (noté TRGB pour *tip of the red giant branch*). Ce «sommet» correspond à un point de bascule des étoiles comme notre Soleil en fin de vie. Gonflées et rouges, elles deviennent de plus en plus lumineuses jusqu'à atteindre un bref pic de luminosité dû à l'embrasement soudain de l'hélium contenu dans leur cœur (on parle de «flash de l'hélium»). Dès 1993, Wendy Freedman, Barry Madore et Myung Gyoon Lee ont compris que ce moment décisif des géantes rouges en fait des «chandelles standard» idéales pour évaluer les distances cosmiques, car la luminosité est indépendante de la masse de l'étoile. La cosmologiste a mis son idée en application, et tandis que nous descendions du car, je lui ai demandé quand aurait lieu sa conférence. «C'est la seconde après le déjeuner, demain», m'a-t-elle répondu. «Soyez là», a insisté Barry Madore, avec un regard pétillant...

QUAND L'UNIVERS SE JOUE DE NOUS

De retour dans ma chambre d'hôtel, un coup d'œil sur les réseaux sociaux me montra que tout avait changé. Les travaux du CCHP venaient d'être publiés. Grâce au TRGB, ils avaient fixé la constante de Hubble à 69,8... soit une valeur nettement inférieure à celle (74,0) de l'équipe SH0ES, obtenue en utilisant des céphéides, et à celle (73,3) de H0LICOW, à partir des quasars, mais supérieure à celle (67,4) calculée par l'équipe Planck. «En fait, l'Univers se joue de nous, n'est-ce pas?» a tweeté un astrophysicien.

Dan Scolnic, un jeune membre à lunettes de l'équipe SH0ES basé à l'Université Duke, en Caroline du Nord, s'est réuni avec Adam Riess et deux autres membres de l'équipe pour «essayer de comprendre ce que contenait l'article. Adam et moi sommes ensuite allés dîner dans un état de perplexité certain, car jusqu'à présent, les céphéides et le TRGB s'accordaient plutôt bien.»

Le changement clé apporté par Wendy Freedman fut vite identifié: il s'agissait d'une nouvelle façon d'estimer les effets de la poussière cosmique lors de la mesure de la luminosité intrinsèque des géantes rouges. «Nous avons une quantité de questions à propos de

► cette nouvelle méthode», explique Dan Scolnic. Comme d'autres participants disséminés dans l'hôtel, ils attendaient avec impatience la conférence de Wendy Freedman du lendemain.

POUR UNE BONNE ÉCHELLE DE DISTANCE...

Tension, problème, crise... – L'atmosphère autour de la constante de Hubble est passablement agitée depuis quatre-vingt-dix ans, depuis que l'astronome américain Edwin Hubble a démontré que l'espace et tout ce qu'il contient s'éloigne de nous (Hubble lui-même refusa d'accepter sa propre conclusion). L'expansion cosmique, l'une des plus grandes découvertes cosmologiques de tous les temps, implique que l'Univers a un âge fini.

Le rapport entre la vitesse de récession d'un objet et sa distance nous donne la constante de Hubble. Cependant, s'il est simple grâce à l'effet Doppler de déterminer à quelle vitesse une étoile ou une galaxie s'éloigne, il est bien plus difficile de déterminer la distance à laquelle se situe une lueur de la taille d'une tête d'épingle dans le ciel nocturne.

On doit à Henrietta Leavitt, de l'observatoire de l'université Harvard, la découverte en 1908 d'une caractéristique essentielle des céphéides: la fréquence de leurs oscillations est proportionnelle à leur luminosité. En d'autres termes, les céphéides grandes et lumineuses varient plus lentement que leurs équivalentes petites et plus ternes. Ainsi, à partir des pulsations d'une céphéide lointaine, on peut déduire sa luminosité intrinsèque. En comparant cette dernière à la faiblesse de l'éclat de l'étoile tel que nous le percevons, on détermine sa distance, et par extension celle de la galaxie dans laquelle elle se trouve.

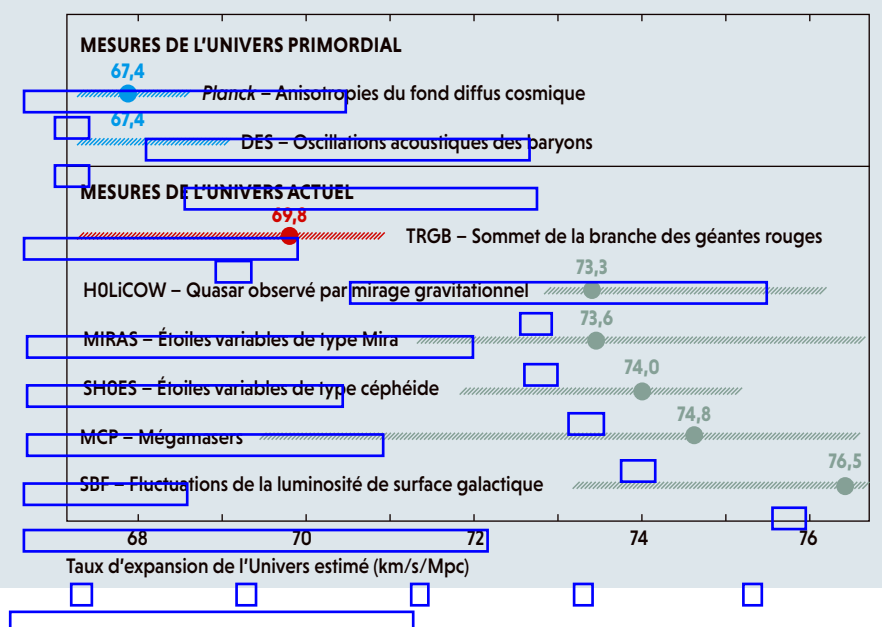
Dans les années 1920, Edwin Hubble a utilisé des céphéides et la loi de Leavitt pour déduire qu'Andromède et d'autres nébuleuses spirales sont en fait des galaxies distinctes, situées bien au-delà de notre Voie lactée. L'Univers ne se résumait plus à notre seule galaxie! Edwin Hubble a ensuite utilisé les céphéides pour estimer les distances des galaxies voisines qui, mises relation avec leurs vitesses, ont révélé le phénomène d'expansion cosmique.

La valeur calculée par Hubble était de... 500 kilomètres par seconde par mégaparsec. Elle a diminué à mesure que les cosmologistes utilisaient les céphéides pour calibrer des échelles de distance cosmique de plus en plus précises. Dans les années 1970, Allan Sandage, le protégé d'Edwin Hubble, a proposé une valeur de H_0 avoisinant 50. Ses rivaux avançaient le double, à partir d'observations astronomiques différentes. Le débat virulent opposant les deux camps faisait rage au début des années 1980 quand Wendy Freedman, alors jeune postdoctorante canadienne aux observatoires Carnegie, à Pasadena, en Californie, où exerçait également Allan Sandage, a commencé à améliorer les échelles de distance cosmique.

Pour élaborer un tel balisage de l'Univers, la première opération consiste à calibrer la distance d'étoiles dont la luminosité est connue, comme les céphéides. Grâce à ces «chandelles standard», on évalue les distances de céphéides plus ternes situées dans des galaxies plus lointaines. On accède alors aux distances des «supernovæ de type Ia» de ces mêmes galaxies, ces explosions stellaires prévisibles étant des chandelles standard plus lumineuses, mais plus rares. De là, on mesure les distances de centaines de supernovæ plus

LA CONTROVERSE DE LA CONSTANTE

Le taux d'expansion actuel de l'Univers, c'est-à-dire la constante de Hubble (H_0), dépend des lois et des ingrédients fondamentaux de l'Univers. Mais lorsque les cosmologistes calculent sa valeur à partir de données issues de l'Univers primordial, ils obtiennent des valeurs (en bleu) bien inférieures à celles (en gris) déterminées par l'observation d'objets lointains actuels. Qui plus est, une nouvelle mesure livre une valeur intermédiaire (en rouge), complicant encore davantage le débat.



lointaines, situées dans des galaxies qui se déplacent librement dans le flux de Hubble, c'est-à-dire le courant de l'expansion cosmique. Le rapport entre la vitesse et la distance de ces supernovæ fournit H_0 . Cependant, l'aspect terne d'une chandelle standard n'est pas nécessairement dû à l'éloignement de l'astre. La poussière cosmique peut aussi être en cause, faisant paraître des étoiles plus lointaines qu'elles ne le sont vraiment.

À l'inverse, la proximité d'autres étoiles peut rendre artificiellement des supernovæ plus lumineuses, et donc plus proches. De plus, même les chandelles standard connaissent des variations inhérentes dues à leur âge ou à leur métallicité (leur contenu en atomes plus lourds que l'hélium), lesquelles doivent être corrigées. Wendy Freedman a mis au point de nouvelles méthodes pour prendre en compte de nombreuses sources d'erreurs systématiques. Ses premières valeurs de H_0 , supérieures à celles d'Allan Sandage, ont fortement déplu à son aîné. « Pour lui, je n'étais qu'une jeune parvenue, » s'est-elle confiée en 2017.

JUSQU'À SON DERNIER JOUR...

Malgré cela, elle a assemblé et dirigé, dans les années 1990, le *Hubble Space Telescope Key Project*, un nouveau projet de mesure des distances des céphéides et des supernovæ avec une plus grande précision. La valeur de H_0 égale à 72 (avec une marge d'erreur de 10%), qu'elle et son équipe ont publiée en 2001, a coupé la poire en deux dans le débat de 50 contre 100.

Deux ans plus tard, Wendy Freedman était nommée directrice des observatoires Carnegie, devenant ainsi la supérieure hiérarchique d'Allan Sandage. Elle a fait preuve d'élégance et il s'est adouci. Mais « jusqu'à son dernier jour en 2010, précise-t-elle, il est demeuré partisan d'une valeur faible de la constante de Hubble. »

Quelques années après le 72 de Wendy Freedman, Adam Riess, professeur à l'université Johns-Hopkins, est entré dans la course aux échelles de distance cosmique. Son projet : déterminer la valeur de H_0 avec une marge de seulement 1%, dans l'espoir de mieux comprendre l'énergie noire qu'il avait codécouverte. Depuis, son équipe a régulièrement resserré les barreaux de l'échelle, en particulier le premier et le plus important : l'échelon de calibration. Comme le formule Adam Riess : « À quelle distance se trouvent toutes choses ? Une fois cette question résolue, la vie devient plus simple ; vous mesurez des choses relatives. » Son équipe utilise actuellement cinq façons indépendantes de mesurer les distances de leurs céphéides étalons. « Elles s'accordent toutes plutôt bien, ce qui nous met en confiance », explique-t-il. À mesure qu'ils collectaient des données et amélioraient leurs analyses, la marge d'erreur autour de H_0

s'est réduite à 5% en 2009, puis 3,3%, 2,4% et enfin 1,9% en mars 2019.

Pendant ce temps, depuis 2013, avec des versions de plus en plus précises du fond diffus cosmologique, la collaboration Planck améliore sa valeur de H_0 . Dans sa dernière publication, en 2018, elle avance une valeur de la constante égale à 67,4 avec une marge d'erreur de 1%. Des mesures indépendantes devenaient urgentes.

Tommaso Treu, l'un des fondateurs de l'équipe H0LiCOW et professeur à l'université de Californie, à Los Angeles, rêvait depuis l'époque où il étudiait à Pise de mesurer la constante de Hubble en utilisant la méthode de *time-delay cosmography*, une méthode sans échelle de distance cosmique. À la place, elle détermine directement la distance des quasars – des galaxies lointaines et très énergétiques aux noyaux particulièrement brillants – en mesurant minutieusement le délai entre les différentes images d'un quasar (on parle de fantômes) qui se forment par des effets de lentille gravitationnelle.

Tandis que Tommaso Treu et ses collègues collectaient des données sur les quasars, Wendy Freedman et son équipe se tournaient vers le sommet de la branche des géantes rouges. Alors que les céphéides sont jeunes et nichées dans les centres poussiéreux et encombrés du centre des galaxies, les géantes rouges sont vieilles et résident plutôt dans les bordures extérieures plus clairsemées des galaxies. En utilisant le télescope spatial *Hubble*, le CCHP est parvenu à étendre leur échelle de distance aux supernovæ du flux de Hubble et à mesurer H_0 . « À un certain niveau, on se dit : "Bon, je vais tomber d'un côté, ou de l'autre, du débat ?" » m'a confié Wendy Freedman. « Mais finalement, avec notre 69,8, nous avons atterri au milieu, et c'est une situation intéressante ! »

COINCÉ AU MILIEU

Mon voisin dans le car, le matin suivant la publication de Wendy Freedman, était Francis-Yan Cyr-Racine, théoricien à l'université du Nouveau Mexique. Plus tôt en 2019, avec Lisa Randall, de l'université Harvard, et d'autres, il a proposé une solution inédite au problème de la constante de Hubble. Leur idée – un nouveau champ d'énergie répulsive de courte durée dans l'Univers primordial – accélérerait l'expansion cosmique, ce qui ferait correspondre les prédictions et les observations. La communauté des experts estime cette solution, et bien d'autres encore, comme relativement artificielles.

Lorsque j'ai mentionné la publication de Wendy Freedman, Francis-Yan Cyr-Racine n'a pas semblé surpris. « La bonne valeur est probablement 70 », m'a-t-il dit, signifiant que les estimations basées sur l'Univers primordial et

les observations actuelles vont probablement finir par converger au milieu, et que le modèle Λ CDM sera validé (il a plus tard précisé qu'il plaisait à moitié).

Dans la salle du séminaire, Barry Madore s'est assis près de moi et d'un autre journaliste et nous a demandé: «Alors, de quel côté va pencher la balance?» Vers le milieu, semblerait-il. «Vous connaissez cette chanson, "Stuck in the middle with you"?» a-t-il demandé. «On y entend "Des clowns à ma gauche, des plaisantins à ma droite. Et me voici, coincé au milieu avec vous."»

LA CONSTANTE IVRE

Juste avant le déjeuner, nouveau rebondissement. Mark Reid, du Centre Harvard-Smithsonian d'astrophysique a présenté ses récentes mesures de masers (des effets proches du laser dans les galaxies) à partir desquelles il a obtenu une valeur de H_0 égale à 74,8, plus ou moins 3,1. Adam Riess a photographié la présentation. Dan Scolnic s'est quant à lui exprimé lors d'un tweet: «C'en est trop pour cette semaine. Rentre chez toi, H_0 , tu es ivre.»

À la pause de midi, Adam Riess semblait dépassé par toutes ces nouvelles mesures. Pendant plusieurs années, son équipe et lui sortaient du lot en s'écartant de la valeur de la constante de Hubble fixée par l'équipe Planck. «À cette époque, il y avait une tension et une divergence, et nous avons essuyé des coups durs», a-t-il confié. Mais en deux semaines, son isolement n'était plus qu'un souvenir, puisque trois nouvelles valeurs venaient semer la zizanie. Selon lui «la tension grandit, car personne ne propose de valeur inférieure à celle de Planck. Pourquoi aucune équipe n'a trouvé une valeur de 62 ou de 65?».

Quant à cette fameuse valeur de 69,8 du CCHP, Adam Riess avait quelques questions concernant la méthode de Wendy Freedman pour calibrer le premier barreau de son échelle de distance avec le TRGB dans le Grand Nuage de Magellan. «Le Grand Nuage de Magellan n'est pas une galaxie, c'est un nuage poussiéreux et amorphe, explique-t-il. C'est là toute l'ironie. Ils ont choisi d'utiliser le TRGB pour échapper au problème de la poussière,» mais ils doivent bien les calibrer quelque part – «autrement dit, ils doivent choisir des géantes rouges dont on connaît la distance par quelque autre méthode. Et le seul endroit où ils ont fait ça, c'est dans le Grand Nuage de Magellan.»

Une heure plus tard, Wendy Freedman, l'air serein, a présenté son argumentaire. «Si nous plaçons tous nos œufs dans le panier des céphéides, nous ne découvrirons jamais les inconnues inconnues», a-t-elle commenté.

Elle a alors expliqué qu'elle et ses collègues ont utilisé les géantes rouges du Grand Nuage de Magellan comme étalon parce que la distance du nuage a été mesurée avec une précision extrême

par diverses méthodes. Par ailleurs, ils ont employé une nouvelle approche pour corriger l'effet de la poussière sur la luminosité, une approche qui a recours aux étoiles elles-mêmes, en exploitant leurs changements de luminosité en fonction de la couleur. Elle a ainsi remarqué que ses paires de géantes rouges et de supernovæ, sur le second barreau de son échelle de distance, faisaient montre de moins de variations que les paires de céphéides et de supernovæ d'Adam Riess, suggérant ainsi que sa mesure de la poussière était potentiellement plus précise.

**Des clowns
à ma gauche,
des plaisantins
à ma droite.
Et me voici
coincé au milieu**

Durant la discussion, Wendy Freedman a également souligné que de meilleures mesures étaient encore nécessaires pour écarter de potentielles erreurs systématiques. «Je pense que nous en sommes à ce stade que », a-t-elle précisé.»

De là, la discussion s'est changée en toute verbale entre Wendy Freedman et Adam Riess. «Wendy, pour répondre à votre question, a lancé Adam Riess alors qu'aucune question n'avait été posée, il y a eu cinq résultats indépendants présentés jusqu'à maintenant. Ce rêve d'enfin y parvenir... est justement en train de se produire.»

LA PIÈCE OÙ TOUT SE JOUE

Dan Scolnic, le collaborateur d'Adam Riess et membre de l'équipe SHOES, m'a proposé de le rejoindre dehors. Nous nous sommes assis au Soleil. «Voilà une journée comme je n'en avais jamais connu», m'a-t-il confié.

Avec l'arrivée du TRGB de Wendy Freedman et des masers de Mark Reid, les résultats pourtant récents de HOLICOW lui paraissaient déjà anciens. «Cela fait trois nouvelles fracassantes en une seule semaine. Et je ne sais pas vraiment sur quel pied nous dansons, à présent.» Même si la divergence est réelle, «il n'existe pas de bonne version capable de tout expliquer, ni du côté théorique, ni du côté des observations. C'est ce

qui rend l'ensemble si déroutant. C'est comme dans la chanson de la comédie musicale *Hamilton*, a-t-il poursuivi avant de réciter les paroles: "C'est dans cette pièce que tout se joue", en ce moment même. Wendy Freedman est alors apparue. «Hey, Wendy, l'a interpellée Dan. Je disais à l'instant: n'a-t-on pas la sensation qu'il s'agit là de "la pièce où tout se joue"? En tant qu'enfant, n'aurais-tu pas voulu être dans cette pièce?»

UN PSYCHODRAME POUR PAS GRAND CHOSE

«N'est-ce pas là que nous voulons être aujourd'hui? a-t-elle répondu. Nous travaillons sur des données extraordinaires, qui nous apprennent comment l'Univers évolue.» Et Dan Scolnic de rajouter: «Et les nombres sont très proches; nous débattons de quelques points de pourcentage seulement. Quand on considère tout le psychodrame déclenché, c'est amusant qu'il ne soit question que de 3 kilomètres par seconde par mégaparsec.»

«Vous avez la bonne attitude», a acquiescé Wendy Freedman. Alors que l'heure du dîner approchait, tous les deux sont partis trouver un moyen de regagner le bâtiment, dont les portes étaient fermées à cette heure de la soirée.

Le troisième jour est venu avec deux nouvelles mesures de la constante de Hubble: une échelle de distance cosmique étalonnée à partir d'étoiles variables (dites de «type Mira») comme les céphéides, a donné une valeur de 73,6, et les fluctuations de luminosité de surface galactique 76,5, plus ou moins 4 pour les deux. Adam Riess a encore pris des photographies et, à la fin de la journée, un graphique reprenant toutes les mesures existantes avait été établi (voir l'encadré page 80).

Les deux prédictions faites à partir de l'Univers primordial couvraient la partie gauche du graphique, avec des barres d'erreurs serrées autour de 67,4. Et cinq mesures de l'Univers actuel occupaient la partie droite, gravitant autour de 73 et 74. Puis, au milieu, se trouvait la mesure de Wendy Freedman, égale à 69,8, un véritable bâton dans les roues des autres équipes, la douloureuse suggestion conciliatrice selon laquelle toutes les mesures pourraient, *in fine*, se rejoindre, nous laissant face aux mystères du modèle Λ CDM, sans rien de neuf à dire sur la nature. Cela étant, toutes les mesures de H_0 de l'Univers actuel, même celle de Wendy Freedman, sont supérieures à 67,4. Or, des mesures erronées auraient dû tomber tant en dessous qu'au-dessus de cette barre. La divergence est-elle réelle...

Dernier intervenant, Francis-Yan Cyr-Racine, a réalisé un sondage pour déterminer comment nommer cette contradiction. La plupart des participants ont voté pour les termes «tension» et «problème». Graeme Addison, expert en oscillations acoustiques des baryons,

a dit dans un courriel après la conférence: «Mon impression est que la divergence de Hubble est un véritable problème, et qu'il nous manque des éléments physiques importants, quelque part. Mais les solutions proposées jusqu'à maintenant ne sont pas très convaincantes.»

En revanche, pour Graeme Addison, la cohérence des résultats des équipes H0LiCOW et SH0ES est particulièrement convaincante. Et, bien que l'article de Wendy Freedman suggère que «les incertitudes associées aux céphéides de l'équipe SH0ES ont été sous-estimées», il pense que des questions se posent aussi sur la calibration des géantes rouges dans le Grand Nuage de Magellan. Wendy Freedman estime avoir amélioré la mesure de la poussière, mais Adam Riess et ses collègues le contestent.

Le lundi 5 août 2019, dans un article publié sur arxiv.org, Adam Riess et ses collaborateurs prétendent que la calibration de Wendy Freedman repose sur les données télescopiques à faible résolution. Selon eux, en remplaçant ces données par d'autres de meilleure résolution, la valeur estimée de H_0 augmenterait de 69,8 à 72,4, et serait alors compatible (dans la marge d'erreur) avec les mesures de H0LiCOW, de SH0ES et des autres équipes. «Il semble y avoir de sérieux défauts dans leurs interprétations de notre méthode de calibration», a répondu Wendy Freedman. Avec ses collègues, elle a refait son analyse en utilisant les données plus récentes et, précise-t-elle dans un courriel, «nous ne trouvons pas le résultat revendiqué par Adam Riess et ses coauteurs.»

DE NOUVELLES CHANDELLES

Si les quatre nouvelles mesures de H_0 à droite du graphique n'effacent pas la valeur de Wendy Freedman dans l'esprit de plusieurs astrophysiciens, c'est en partie à cause de son humeur égale en toutes circonstances. Et, surtout, «elle est particulièrement bien respectée, et a la réputation d'effectuer un travail méticuleux et approfondi», estime Daniel Holz, un astrophysicien de Chicago qui utilise les collisions d'étoiles à neutrons comme des «chandelles standard», une nouvelle technique prometteuse pour mesurer H_0 .

D'ici à deux ou trois ans, le télescope spatial *Gaia* devrait fournir de nouvelles données permettant de mieux calibrer les céphéides et les géantes rouges, géométriquement cette fois, en fonction de leur parallaxe, c'est-à-dire de la distance les séparant selon différents points d'observation dans le ciel. Le télescope spatial *James-Webb*, le successeur de *Hubble*, fournira également de nouvelles données plus fiables lorsqu'il sera lancé en 2021. Les cosmologistes connaîtront la valeur exacte de H_0 probablement au cours des dix prochaines années. Ils pourront alors résoudre la tension, le problème ou la crise. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. CHEN ET AL., A SHARP view of H0LiCOW: H_0 from three time delay gravitational lens systems with adaptive optics imaging, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 490(2), pp. 1743-1773, 2019.

W. FREEDMAN ET AL., The Carnegie-Chicago Hubble program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch, *The Astrophysical Journal*, vol. 882(1), 2019.

P. AGRAWAL ET AL., Rock'n'Roll Solutions to the Hubble tension, arxiv.org/abs/1904.01016

A. RIESS ET AL., Large Magellanic Cloud cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond Λ CDM, *The Astrophysical Journal*, vol. 876(1), 2019.

Planck Collaboration, Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters, arxiv.org/abs/1807.06209

À la poursuite de l'énergie sombre

Pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers, les physiciens invoquent une énergie sombre répulsive. Les scientifiques espèrent en savoir plus en sondant les confins du cosmos.



Le télescope *Mayall*, installé sur le pic Kitt, en Arizona, accueille l'instrument DESI dédié à l'observation des galaxies et des quasars afin de mieux comprendre l'énergie sombre.

L'ESSENTIEL

● L'expansion de l'Univers accélère, et on ignore pourquoi. L'une des hypothèses est l'existence d'une «énergie sombre».

● Plusieurs projets, comme DES, DESI et bientôt LSST et *Euclid*, visent à résoudre ce mystère en étudiant l'histoire de l'expansion cosmique.

● En en connaissant les détails fins, on pourra contraindre les différents modèles d'énergie sombre, voire en éliminer certains.

L'AUTEUR



JOSHUA FRIEMAN est cosmologiste, directeur de recherche au Fermilab, aux États-Unis, professeur d'astronomie et d'astrophysique à l'institut Kavli de physique cosmologique, à l'université de Chicago et directeur du programme DES.

I

ly a près d'un siècle, Edwin Hubble a découvert que l'Univers est en expansion: presque toutes les galaxies s'éloignent de la Voie lactée, et plus elles sont distantes, plus elles s'éloignent vite. Cette découverte fondamentale a été suivie en 1998 d'une autre, encore plus surprenante: cette expansion est de plus en plus rapide. Mais pourquoi donc accélère-t-elle? C'est l'une des plus grandes énigmes de la science moderne.

Pour expliquer l'accélération cosmique, les cosmologistes ont proposé deux solutions. La première est qu'Albert Einstein n'avait pas eu le dernier mot sur la gravitation: bien que la gravité ait un effet attractif sur Terre et dans le Système solaire, peut-être agit-elle différemment, à grande échelle, devenant une force répulsive quand les distances en jeu deviennent gigantesques. Dès lors, il faudrait modifier la théorie de la gravitation pour les échelles cosmiques (voir l'entretien avec B. Famaey, page 46).

La seconde idée est que l'Univers est empli de quelque chose d'invisible, une «énergie sombre», qui contre la force de gravité et prend le dessus aux plus grandes échelles. Des mesures cosmiques indiquent que l'énergie sombre, si elle existe, constituerait aujourd'hui 70% de la masse de

l'Univers (voir *Repères*, page 6). Le reste de la masse de l'Univers est partagé entre 25% de matière noire et 5% de matière ordinaire (celle des étoiles, des planètes, de vous...).

L'hypothèse de l'énergie sombre a reçu davantage d'attention que l'idée d'une gravité modifiée aux grandes échelles parce qu'elle explique mieux la formation des galaxies et des grandes structures de l'Univers et parce qu'elle est compatible avec toutes les mesures dont nous disposons.

Mais comment peut-on savoir avec certitude si l'énergie sombre est responsable de l'accélération cosmique? Et si c'est bien l'énergie sombre, quelle en est exactement la nature? Pour répondre à ces questions, avec quelque 300 autres physiciens et astronomes des États-Unis, d'Espagne, du Royaume-Uni, du Brésil, d'Allemagne et de Suisse, nous avons lancé il y a quelques années le projet d'observation astronomique DES (pour *Dark energy survey*, soit «relevé de l'énergie sombre»). D'autres projets affichant le même objectif ont été depuis initiés (voir l'encadré page 90).

UNE MÉGARÉSOLUTION

Grâce à ce relevé, nous espérons reconstruire l'évolution de l'expansion cosmique au cours des quelque 14 milliards d'années de l'histoire de l'Univers. Et nous pourrions étudier la croissance des grandes structures (les vastes conglomerats de galaxies qui occupent l'Univers) afin de, peut-être, trancher entre les différentes hypothèses quant à l'expansion de l'Univers.

La collaboration DES a construit la *Dark Energy Camera*, le cœur du projet, et nous l'avons installé sur le télescope de quatre mètres *Victor Blanco* à l'Observatoire interaméricain du Cerro Tololo, installé sur les hauteurs des Andes chiliennes.

La caméra est conçue pour étudier avec rapidité de nombreux objets: des galaxies, des amas de galaxies et des supernovæ. Grâce à

➤ cinq grandes lentilles, cette caméra ultrasensible et dotée d'une résolution de 570 mégapixels a un très grand champ, qui lui permet de photographier de larges bandes du ciel en une pose.

La caméra a pris ses premiers clichés du ciel nocturne en septembre 2012 et le DES a officiellement entamé son relevé d'une large bande du ciel austral un an plus tard. Le relevé a collecté les données d'août à février de chaque année pendant cinq ans (soit un total de 758 nuits d'observation) et a produit une carte en haute résolution d'environ 200 millions de galaxies réparties sur un huitième du ciel (environ 5 000 degrés carrés d'angle solide, la Lune en couvrant par comparaison 0,2), ainsi qu'un catalogue de supernovæ. Les données sont en cours d'analyse.

L'un des objectifs du projet est de recueillir des indices afin de départager les hypothèses sur l'origine de l'accélération de l'expansion cosmique: gravité modifiée ou énergie sombre, chacune existant sous différentes formes, ou scénarios. Pour le cas de l'énergie sombre, les physiciens mettront à l'épreuve deux idées: l'énergie du vide et la quintessence.

UN PROBLÈME DE TAILLE

La première est assez paradoxale. Supposez que vous vidiez une boîte de tout son contenu (atomes, rayonnement, matière noire...) et que rien ne puisse y pénétrer par les parois. L'intérieur de la boîte serait un vide parfait. D'après la physique classique, le vide n'a pas d'énergie. Mais la théorie quantique dit que même l'espace vide est porteur d'une certaine forme d'énergie. En effet, la théorie autorise l'apparition spontanée de paires particule-antiparticule qui, après un bref instant, s'annihilent. Ainsi, le vide de la boîte n'est pas «vide»: il est à tout instant peuplé de ces particules, dites virtuelles, porteuses d'une énergie dont la forme correspond à celle requise pour constituer l'énergie sombre et entraîner l'accélération de l'expansion de l'Univers.

La seule difficulté avec cette idée est que, selon la physique quantique, la valeur de l'énergie du vide serait 122 ordres de grandeur (10^{122} fois) supérieure à ce qu'elle devrait être si elle constituait l'énergie sombre. Si les physiciens ne peuvent ignorer ce problème, ils utilisent malgré tout l'idée de l'énergie du vide pour mettre à l'épreuve les données observationnelles sur l'Univers.

Pour régler ce problème d'ordre de grandeur, les chercheurs ont proposé d'autres explications que l'énergie du vide. Une piste est celle d'un champ quantique, nommé quintessence, présent en tout point de l'espace. Ce champ a de nombreux points communs avec le champ de Higgs, associé au boson de Higgs, la particule découverte en 2012 au LHC, au Cern. La particule associée à la quintessence aurait, comme le boson de Higgs, un spin (moment cinétique intrinsèque) nul, mais elle serait plus légère d'environ 44 ordres de grandeur.

Le comportement de la particule de quintessence peut être comparé à celui d'une balle qui roule sur la pente d'une colline. L'énergie de cette balle est à la fois cinétique (en raison de son mouvement) et potentielle (à cause de la hauteur de la colline qu'elle dévale); plus la balle se trouve en hauteur, plus son énergie potentielle est grande. Quand elle descend, son énergie potentielle diminue, et son énergie cinétique augmente. Si la particule de quintessence est extrêmement légère, alors elle descendrait

Les physiciens utilisent l'idée de l'énergie du vide pour mettre à l'épreuve leurs observations de l'Univers

très lentement aujourd'hui, avec relativement peu d'énergie cinétique par rapport à son énergie potentielle. Dans ce cas, les cosmologistes ont montré que son effet sur l'expansion cosmique serait similaire, à quelques détails près, à celui de l'énergie du vide et conduirait à une accélération.

Ce sont justement les détails, par lesquels se distinguent les différents scénarios, que les physiciens du projet DES veulent mettre en évidence pour déterminer quelle explication est correcte. Pour trancher entre les causes possibles de l'accélération cosmique, les chercheurs explorent quatre phénomènes sensibles, de façon différente, au rythme d'expansion de l'Univers. Comme les quatre phénomènes faisant office de sondes ne seraient pas tous affectés de la même façon selon le scénario considéré, il serait possible d'écarter les mauvaises pistes.

Ces quatre phénomènes sont les supernovæ, les traces des ondes acoustiques primordiales, les lentilles gravitationnelles et les amas de galaxies. Collectivement, ils nous renseignent sur la vitesse à laquelle l'Univers s'est dilaté et sur la quantité de matière qui s'est agrégée pour former les grandes structures aux différentes époques de l'histoire cosmique.

Dans l'Univers primordial, la densité de matière était assez importante pour former les grandes structures. Environ 7 milliards d'années après

le Big Bang, la matière s'est tant diluée que le responsable de l'expansion cosmique accélérée a commencé à faire son œuvre et à empêcher la formation de grandes structures de se poursuivre.

Les supernovæ ont eu un rôle primordial dans la découverte de l'expansion accélérée de l'Univers. Il s'agissait plus précisément de supernovæ de type Ia. Ces explosions stellaires se produisent quand une petite étoile dense, une naine blanche, accumule de la matière et atteint une masse limite. Ces supernovæ ont une caractéristique très utile: la variation au cours du temps de la luminosité est la même pour toutes.

Pour un observateur sur Terre, toute différence dans la courbe de luminosité est ainsi uniquement due à la distance de la supernova: plus elles sont pâles, plus elles sont lointaines. Il est donc possible de déterminer la distance de la supernova. C'est pourquoi on parle de «chandelle standard». Nous savons par exemple qu'une supernova de type Ia 100 fois plus pâle qu'une autre est 10 fois plus lointaine.

LES CHANDELLES DE L'UNIVERS

Le relevé DES examine à intervalles de quelques nuits les mêmes régions du ciel afin de mesurer les distances précises de quelques milliers de supernovæ Ia dans l'Univers proche et lointain. Cela représente près de 100 fois plus d'objets qu'on n'en a utilisés en 1998 pour mettre en évidence la dynamique accélérée de l'Univers.

Mais la distance est insuffisante pour déterminer le rythme d'expansion cosmique. Nous utilisons d'autres télescopes pour mesurer le décalage spectral des émissions électromagnétiques de ces supernovæ. En effet, lorsqu'un objet s'éloigne d'un observateur, la longueur d'onde lumineuse mesurée par ce dernier est supérieure à la longueur d'onde émise: c'est l'effet Doppler.

Le spectre d'émission apparaît donc décalé vers le rouge. Dans le cas des supernovæ, ce décalage est dû à l'expansion de l'Univers entre le moment de l'émission de l'onde et sa réception par nos télescopes. En combinant nos données sur la distance à laquelle se trouvent les supernovæ et leur vitesse d'éloignement, nous pourrions reconstruire avec précision l'histoire des dix derniers milliards d'années d'expansion de l'Univers.

Une telle mesure aide à départager les théories de l'accélération cosmique parce que chacune d'elles prédit une expansion au déroulement légèrement différent. Si par exemple c'est la quintessence qui est à l'œuvre, l'expansion accélérée aurait débuté un peu plus tardivement que dans le scénario de l'énergie du vide et elle se serait intensifiée plus progressivement. Ainsi, les supernovæ présentant un décalage vers le rouge donné sembleront plus brillantes (car plus proches) si l'énergie sombre est sous la forme de quintessence plutôt que d'énergie du vide. Et dans l'hypothèse où la gravité ne se comporte pas, aux grandes distances, conformément à la théorie de la relativité générale, le motif pour les supernovæ lointaines sera encore différent.

Ces mesures doivent être précises pour départager les modèles, car les différences qu'ils prévoient restent assez faibles. Par conséquent, nous souhaitons connaître la relation entre distance et décalage vers le rouge avec une précision de l'ordre de 1%, un exploit accessible pour la *Dark Energy Camera*.

UN ÉTALON DE DISTANCE

Le relevé DES traque aussi un vestige des conditions régnant dans l'Univers primordial pour étudier l'histoire de son expansion: les oscillations acoustiques des baryons (les baryons sont la famille de particules à laquelle appartiennent les protons et les neutrons, qui composent les noyaux atomiques). L'Univers jeune était rempli d'un plasma de matière ionisée (noyaux atomiques et électrons) et de photons en interaction. Deux forces s'opposaient. La gravité tendait à agglomérer la matière dans des zones de surdensité, tandis que la lumière prisonnière exerçait une pression qui s'y opposait. Cette concurrence a engendré dans le plasma des vibrations, comparables à des ondes sonores. Celles-ci ont formé des zones plus ou moins denses de matière qui suivent une distribution particulière, que l'on nomme oscillations acoustiques des baryons.

Vers 380 000 ans après le Big Bang, la matière s'est assez refroidie pour que les noyaux atomiques et les électrons se combinent et forment des atomes neutres. La lumière interagissant alors peu avec la matière, l'opposition des forces a pris fin. La distance parcourue par les ondes acoustiques jusqu'à cet instant fatidique correspond aujourd'hui à une échelle d'environ 480 millions d'années-lumière. Les astronomes la retrouvent imprimée dans la répartition spatiale des galaxies sous la forme d'une

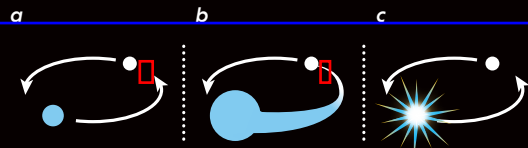
La caméra du projet LSST avec ses 3,2 milliards de pixels de résolution est le plus gros appareil photo jamais construit.



QUATRE MÉTHODES POUR ÉTUDIER L'ACCÉLÉRATION COSMIQUE

La vitesse d'expansion de l'Univers augmente depuis sept milliards d'années. Le relevé DES (*Dark energy survey*) vise à comprendre la cause de ce phénomène par l'examen de quatre types de signaux. Les deux présentés ci-dessous à gauche permettent de mesurer des distances indiquant quelle était la taille de l'Univers et à quel rythme il se dilatait à différentes époques. Les deux de droite permettent de cartographier l'hétérogénéité de la matière dans l'espace, afin d'évaluer la compétition entre la gravitation et la

force responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers. Certains motifs d'expansion et de structuration de la toile cosmique au fil du temps suggèrent que l'accélération découle d'une « énergie sombre », une composante hypothétique de l'Univers. Une autre piste pour expliquer l'accélération, en lien avec certaines observations, est d'envisager une modification des lois de la gravitation aux échelles cosmiques.



La luminosité apparente des supernovæ dépend de leur distance à la Terre.

LUMINOSITÉ DES SUPERNOVÆ DE TYPE IA

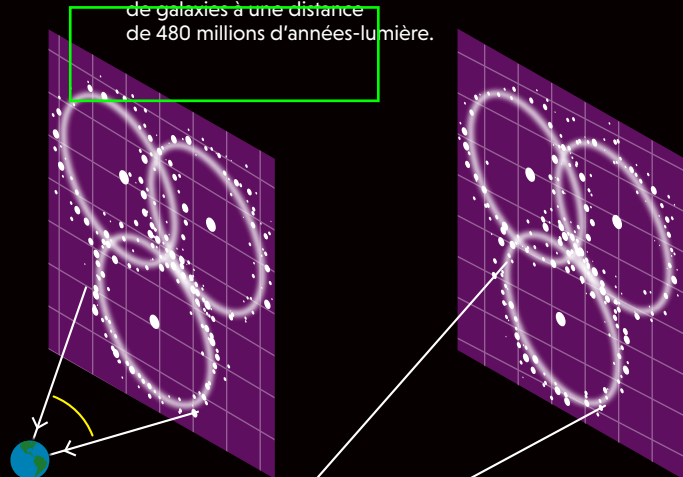
Ces explosions stellaires sont le fait d'un type particulier d'étoiles denses, les naines blanches. Selon un scénario possible, la naine blanche forme un système binaire avec une étoile compagne (a), dont elle absorbe de la matière (b) jusqu'à atteindre une certaine limite de masse, déclenchant une supernova (c). Comme toutes les supernovæ de type Ia produisent presque la même quantité de matériau radioactif, leur luminosité intrinsèque (qui dépend de ce matériau) est pratiquement toujours la même. Par conséquent, leur luminosité apparente ne dépend que de leur distance et révèle donc leur éloignement. La comparaison des distances des supernovæ avec leur décalage vers le rouge (qui indique la vitesse à laquelle elles s'éloignent de nous) révèle la vitesse d'expansion de l'Univers aux différentes époques cosmiques.

SIGNATURES DES ONDES ACOUSTIQUES

Les ondes de densité émises dans l'Univers primordial se sont propagées dans l'espace à une vitesse proche de celle de la lumière jusqu'à ce que le cosmos soit suffisamment refroidi pour former des atomes. La distance couverte par les ondes jusqu'à ce point (qui correspond à 480 millions d'années-lumière aujourd'hui) a pour conséquence qu'il est légèrement plus probable pour deux galaxies de s'être formées dans des régions de surdensité séparées par cette distance. Statistiquement, on observe une légère surpopulation de galaxies dans une zone en forme d'anneau d'un rayon de 480 millions d'années-lumière autour d'une galaxie donnée. Puisque les astronomes connaissent le rayon absolu de l'anneau, ils peuvent mesurer l'angle que l'anneau couvre sur le ciel pour en déduire la distance des galaxies : plus elles sont lointaines, plus l'angle est petit. Ces distances, ensuite comparées aux décalages vers le rouge des galaxies, permettent d'établir l'histoire de l'expansion de l'Univers.

Les ondes acoustiques se propagent sur 480 millions d'années-lumière dans l'Univers primordial.

Autour d'une galaxie donnée, on observe un léger excès de galaxies à une distance de 480 millions d'années-lumière.

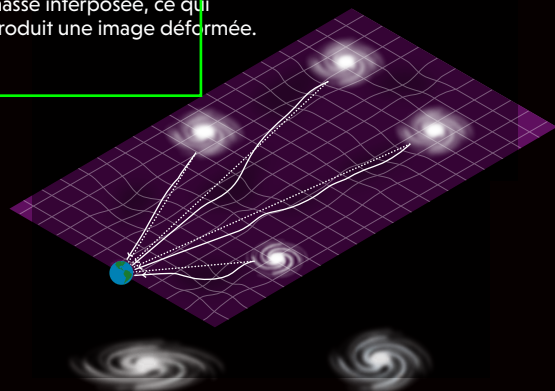


Les anneaux de galaxies plus lointains couvrent un angle plus petit sur le ciel.

LES LENTILLES GRAVITATIONNELLES

La lumière des galaxies lointaines est déviée quand elle passe à côté d'objets massifs (comme les amas de galaxies) lors de son trajet vers l'observateur. À cause de cet effet dit de lentille gravitationnelle, l'image des galaxies lointaines apparaît déformée au télescope. En mesurant les légères distorsions de nombreuses galaxies, on peut déduire une carte de la répartition de la masse dans l'Univers. Cela révèle l'hétérogénéité de la matière aux différentes époques cosmiques.

La courbe continue indique la trajectoire réelle de la lumière, qui est déviée par la masse interposée, ce qui produit une image déformée.



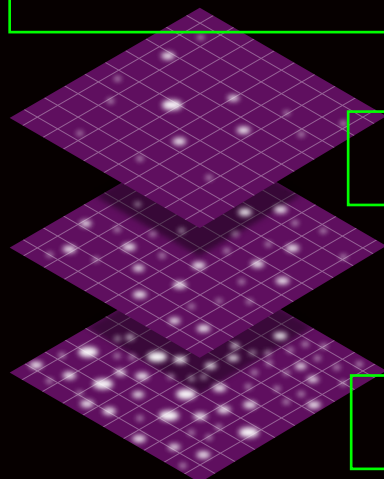
Galaxie déformée vue au télescope

LES AMAS DE GALAXIES

Au cours du temps, la gravité rassemble les galaxies en amas, malgré l'effet opposé de l'énergie sombre. Le relevé DES traquera des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous pour comparer le nombre d'amas observés dans un passé récent et plus ancien. Cela nous renseignera sur le rythme auquel les galaxies se sont regroupées.

Peu d'amas observés à grande distance, c'est-à-dire il y a longtemps

Plus près de nous (passé récent), les amas sont plus nombreux



- > légère tendance statistique des galaxies à être séparées de cette distance typique plutôt que d'une autre.

Cette échelle des oscillations acoustiques des baryons fournit un étalon de distance qui peut être mesuré à différentes époques dans l'histoire de l'Univers. Le relevé DES s'attache à déterminer cette caractéristique des oscillations acoustiques des baryons à partir de son catalogue de galaxies. Ces informations sur les distances seront associées à leurs décalages vers le rouge, de la même façon que pour les supernovæ. Les galaxies présentant un même décalage vers le rouge seraient plus proches si la quintessence, qui a entraîné un début d'accélération plus tardif, est en jeu, en comparaison avec le scénario où l'énergie du vide serait responsable et où l'accélération aurait commencé plus tôt.

DES GALAXIES DÉFORMÉES

Quant à la méthode des lentilles gravitationnelles, elle repose sur une propriété de la lumière prédite par la théorie de la relativité générale d'Einstein. Lors de leur trajet jusqu'à nous, les rayons lumineux en provenance de lointaines galaxies sont courbés par le champ gravitationnel de la matière à proximité de laquelle ils passent. Cette courbure induit une distorsion des images des galaxies : c'est l'effet de lentille gravitationnelle. Quand la courbure est importante, les images résultantes sont spectaculaires : des galaxies lointaines prennent l'apparence d'arcs de lumière longs et fins, et l'on peut même voir plusieurs images d'une même galaxie. Mais les rayons lumineux de la plupart des galaxies ne sont que légèrement courbés, et ces très petites distorsions ne sont pas détectables à l'œil nu : c'est le régime des lentilles gravitationnelles faibles.

Cet effet est sensible à toute la matière présente, donc principalement à la matière noire, et est un peu moins sensible à la matière ordinaire, composée de baryons. Cette approche est donc très complémentaire de celle fondée sur les oscillations acoustiques de baryons.

En mesurant les formes de nombreuses galaxies sur une petite portion du ciel, on détermine dans quelle mesure les images ont été déformées et on établit ainsi une carte de la matière interposée. En répétant cette opération dans différentes parties du ciel, on met en évidence la répartition générale hétérogène de la matière dans l'Univers. L'évolution de cette granulosité au fil du temps, parce qu'elle reflète la compétition entre la gravité et l'énergie sombre, peut aider à déterminer l'origine de l'accélération de l'Univers.

Le relevé DES mesurera la forme des 200 millions de galaxies recensées pour observer cet effet, couvrant ainsi 20 fois plus de galaxies et une plus grande portion du ciel que les précédentes études de lentilles gravitationnelles faibles. La carte obtenue pour diverses régions et à différentes distances de la Terre (donc à différentes époques cosmiques) dépendrait des facteurs en jeu dans l'expansion de l'Univers. Les simulations montrent que la quintessence entrave plus la formation de grandes structures que l'énergie du vide, par exemple. Connaissant le degré d'hétérogénéité actuel, il s'ensuit que l'Univers jeune devait contenir plus d'hétérogénéité dans l'hypothèse de la quintessence que dans celle de l'énergie du vide.

LES OBSERVATOIRES DE L'UNIVERS LOINTAIN

Les années à venir promettent de resserrer l'état autour de la nature de la matière noire et de l'énergie sombre.

Nous entrons dans l'ère des grands sondages de galaxies qui vont révolutionner notre vision de l'Univers tant le nombre d'objets observés va augmenter et profiter de l'amélioration des techniques de traitement des données.

D'abord, dans la lignée du projet DES à qui il succédera, le *Large synoptic survey telescope* (LSST) entamera ses observations en 2022. Ce télescope, installé au Chili sur la montagne du Cerro Pachón, est doté d'un miroir primaire de 8,40 mètres associé à une caméra de 3,2 milliards de pixels, ce qui en fera le plus gros appareil photo jamais construit. Le LSST prendra des photos du ciel à une cadence infernale : un champ d'observation équivalent à 40 pleines lunes en un temps de pose de 15 secondes, produisant un cliché de tout le ciel austral en un peu plus de trois jours ! En dix ans, LSST observera ainsi près de 800 fois la voûte céleste. Cette stratégie d'observation est optimisée pour la détection des phénomènes transitoires et les objets variables. En particulier le LSST observera 300 000 supernovæ de type Ia et 10 milliards de galaxies, soit 100 fois plus d'objets que dans le relevé DES. Les supernovæ permettront de mesurer la vitesse d'expansion de l'Univers en remontant le temps jusqu'à 8 milliards d'années, tandis que la forme des galaxies sera étudiée pour en déduire la distribution de matière noire dans l'Univers.

La difficulté à laquelle les cosmologistes sont confrontés lors des analyses cosmologiques est l'estimation de la distance des objets. En effet nous ne mesurons pas directement les distances des galaxies ou des supernovæ, mais leur décalage spectral. Dans le cas du LSST, ce décalage spectral est mesuré grâce à six bandes photométriques, c'est-à-dire une observation du ciel dans six couleurs, amenant à une précision de l'ordre de 1 % caractéristique des sondages photométriques. De façon complémentaire aux relevés photométriques, comme DES et LSST, vont se déployer les grands relevés spectroscopiques de galaxies comme *Dark energy spectroscopic instrument* (DESI) et *Euclid*. Les sondages spectroscopiques ont la particularité de pouvoir mesurer l'ensemble du spectre des galaxies observées, ce qui fournit une précision sur les mesures de distances de l'ordre de 1 % ; c'est dix fois mieux. Mais le prix à payer est cher, avec des durées d'observation de plusieurs minutes, et donc un nombre d'objets observés plus faible.

Ainsi le DESI, installé sur le télescope Mayall de 4 mètres, sur le pic Kitt, en Arizona, est conçu pour mesurer le spectre de 5 000 objets célestes simultanément toutes les 20 minutes. En cinq années d'observation, DESI mesurera la position et la distance de 35 millions de galaxies et de 2,4 millions de quasars, soit 15 fois plus que les meilleurs instruments actuels. Ces observations couvriront soit un tiers du ciel, et seront réalisées grâce à des spectrographes qui enregistrent les spectres dans l'ultraviolet,

le visible et l'infrarouge à la fois, permettant de sonder l'Univers jusqu'à 11,5 milliards d'années. L'instrument DESI a ouvert pour la première ses 5 000 « yeux » à fibre optique à l'automne 2019 pour sa campagne de caractérisation, et démarrera ses observations scientifiques à partir de mi-2020.

Dans le même registre, l'Agence spatiale européenne (ESA) a sélectionné en 2011 la mission spatiale *Euclid*. Avec un lancement prévu en 2022, le satellite *Euclid* sera mis en orbite à 1,5 million de kilomètres de la Terre, pour une campagne d'observation d'au moins six ans. *Euclid* est doté d'un miroir de 1,2 mètre et de deux instruments, une caméra (VIS) de 600 millions de pixels observant dans le domaine visible et pour laquelle l'observation de milliards de galaxies est attendue, et un spectro-imageur dans l'infrarouge (NISP) qui fournira le spectre de près de 50 millions de galaxies. Avec un temps de pose de 15 minutes, la stratégie d'observation est optimisée pour observer chaque recoin d'une région du ciel (presque la moitié) en une seule fois, exception faite de quelques régions particulières, où le satellite fera une quarantaine de relevés.

L'excellente précision sur la mesure des distances permettra à DESI et à *Euclid* de dresser la carte en trois dimensions la plus dense et la plus détaillée de l'Univers sur la plus grande étendue jamais observée. En analysant soigneusement l'espacement entre galaxies, et en comparant à l'échelle des oscillations acoustiques des baryons, cette carte renseignera sur l'histoire de l'expansion cosmique et l'évolution de l'énergie sombre. Mais la mesure très précise du décalage spectral des galaxies procure aussi une estimation du mouvement propre des galaxies qui résulte de l'attraction gravitationnelle des structures à grande échelle avoisinantes. L'étude de ces mouvements cohérents des galaxies vers des régions plus denses de matière est un outil fabuleux pour tester les prédictions de la relativité générale d'Albert Einstein. La mise à l'épreuve de cette théorie sur ces échelles colossales est essentielle car elle pourrait révéler des explications alternatives à l'énergie sombre.

Ces trois projets futurs, LSST, DESI et *Euclid*, sont tous très ambitieux, et posent des questions au-delà de l'énergie sombre, comme la masse des neutrinos, les propriétés et la démographie des galaxies et des amas de galaxies, ou encore la physique stellaire. La France est très engagée dans la construction de ces instruments, notamment la caméra et le changeur de filtres de LSST, la réalisation et la caractérisation des dix spectrographes de DESI et les deux instruments d'*Euclid*, le VIS et le NISP.

Ces trois projets ont aussi un défi de taille : l'énorme quantité de données à traiter. Par exemple LSST produira plus de 200 pétaoctets de données sur dix ans (à comparer aux 25 pétaoctets traités par an au LHC). Ces données, ainsi que celles d'*Euclid*, seront en partie hébergées en France au Centre de calcul de Lyon (CC-IN2P3). Les techniques de traitement des données requièrent également la production de simulations numériques gigantesques, et l'application de méthodes d'apprentissage automatique.

Le CNRS, le CEA et de nombreuses universités françaises sont engagés plus que jamais dans la course à la compréhension du côté sombre de l'Univers. L'enjeu sera aussi de combiner les observations de ces différents instruments pour confronter de façon robuste les observations aux prédictions théoriques.

STÉPHANIE ESCOFFIER

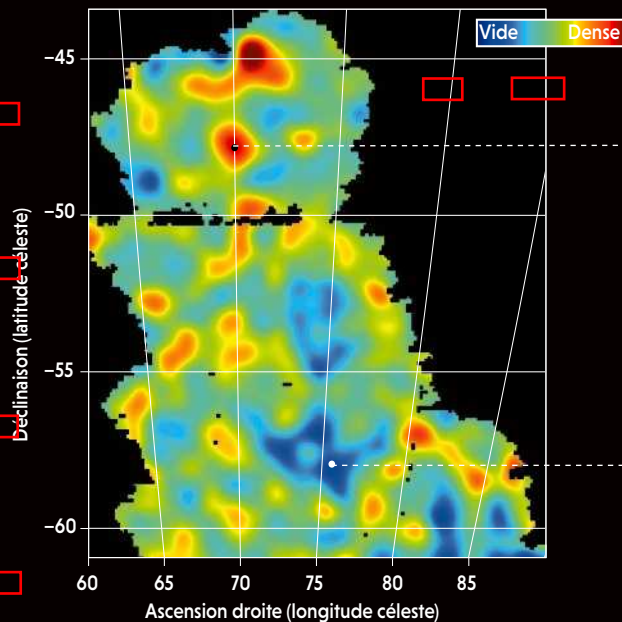
Cosmologiste, directrice de recherche CNRS au Centre de physique des particules de Marseille

Le futur satellite *Euclid* sera lancé en 2022 pour dresser la carte tridimensionnelle de l'Univers avec une précision jamais atteinte jusque-là.



CARTOGRAPHIE DE LA MATIÈRE COSMIQUE

La carte ci-contre montre la répartition à grande échelle de la matière sur environ 139 degrés carrés du ciel, une zone correspondant à 650 fois la taille angulaire de la pleine lune. Les régions en rouge sont des zones où la densité de matière est supérieure à la moyenne, tandis que le bleu représente des zones moins denses. Cette carte résulte des données du relevé DES sur les lentilles gravitationnelles faibles (la légère déformation de l'image d'une galaxie provoquée par la déviation des rayons lumineux lors de leur passage à proximité d'objets massifs tels que des amas de galaxies, contenant de la matière ordinaire et de la matière noire). Les photographies en médaillon, prises par l'instrument *Dark Energy Camera*, montrent une région de surdensité (avec un grand nombre de galaxies brillantes) et une zone où apparaissent relativement peu de galaxies, conformément à la densité comparativement faible de la région.



BIBLIOGRAPHIE

T. ABBOTT ET AL., Cosmological constraints from multiple probes in the Dark Energy Survey, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 122(17), art. 171301, 2019.

S. ALAM ET AL., The clustering of galaxies in the completed SDSS-III baryon oscillation spectroscopic survey: Cosmological analysis of the DR12 galaxy sample, <https://arxiv.org/abs/1607.03155>, 2016.

K. BECHTOL ET AL., Eight new Milky Way companions discovered in first-year Dark Energy Survey data, *Astrophysical Journal*, vol. 807, art. 50, 2015.

C. CHANG ET AL., Wide-field weak lensing mass maps from Dark Energy Survey science verification data, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 051301, 2015.

➤ Enfin, DES traquera les amas de galaxies pour reconstituer d'une autre façon l'évolution de l'hétérogénéité cosmique. Les amas, dont les masses peuvent atteindre plus de 10^{15} fois celle du Soleil, sont les plus gros objets de l'Univers liés par la gravitation. Des dizaines de milliers d'amas situés jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de nous seront pris en compte.

Les cosmologistes compareront alors le nombre d'amas présents près de la Terre (correspondant à l'époque récente) et loin dans le passé. Comme pour les effets de l'hétérogénéité de la matière mis en évidence par les lentilles gravitationnelles faibles, nous nous attendons à voir davantage d'amas dans l'Univers jeune si c'est la quintessence, plutôt que l'énergie du vide, qui est à l'œuvre. Et nous devrions observer une tendance fort différente et plus compliquée dans l'hypothèse d'une gravité modifiée.

UN AVANT-GOÛT PROMETTEUR

Le relevé s'est achevé en janvier 2019. L'analyse des données est en cours. Des résultats préliminaires ont été publiés en mai 2019, incluant l'analyse de 207 supernovæ de type Ia confirmées spectroscopiquement. D'abord, l'étude confirme l'existence d'une énergie sombre. Elle donne également une mesure de la constante de Hubble H_0 (67,8 kilomètres par seconde par mégaparsec) compatible avec les mesures du

fonds diffus cosmologique, en plein débat sur un apparent désaccord de la valeur de cette constante déduite des mesures des céphéides (voir *Un problème de vitesse*, par N. Wolchover, page 78). Or la constante de Hubble n'est autre que le taux d'expansion actuel de notre Univers, son inverse nous renseignant sur son âge. Autre enseignement de l'étude, l'Univers serait géométriquement euclidien, c'est-à-dire « plat ».

L'ensemble concourt à valider le principe du DES et plaide pour un renforcement des investigations de ce type. C'est exactement ce qu'entendent faire les projets DESI, déjà en cours, ainsi que LSST et *Euclid* prévus en 2022.

DES a également obtenu des résultats intéressants d'une tout autre nature, telle la découverte à confirmer de 16 galaxies naines ultrapâles dans le voisinage de la Voie lactée. Ces galaxies très proches ne contiennent, pour certaines, pas plus de quelques dizaines d'étoiles et sont parmi les objets les plus riches en matière noire que l'on connaisse. Peu lumineuses, leur détection est difficile, mais elles sont cruciales pour comprendre la formation des galaxies telles que la Voie lactée.

Que ce soit DES, DESI, LSST ou *Euclid*, la course à l'énergie sombre n'a jamais été aussi effrénée. Qui l'emportera? L'énergie du vide? La quintessence? La gravité modifiée? Ou bien une tout autre forme d'énergie sombre surgie du diable vauvert? ■

L'ESSENTIEL

● Depuis 1998, on sait que l'expansion de l'Univers s'accélère.

● Pour en rendre compte, les physiciens ont imaginé une «énergie sombre» dotée d'une force répulsive à grande échelle.

● Pourtant, la constante cosmologique, un terme introduit dans les équations

de la relativité générale par Albert Einstein, explique naturellement le phénomène.

● Cette constante avait été abandonnée par la communauté scientifique, à l'exception notable de Georges Lemaître, qui l'a défendue toute sa vie durant. Ne serait-il pas temps de la réhabiliter?

L'AUTEUR



JEAN-PIERRE LUMINET
directeur de recherche au CNRS, membre du Laboratoire d'astrophysique de Marseille (LAM), du Centre de physique théorique de Marseille (CPT) et du laboratoire Univers et théories (Luth) de l'observatoire de Paris.

Indispensable constante cosmologique

Pour expliquer l'énergie sombre et l'accélération de l'expansion de l'Univers, les physiciens rivalisent de nouvelles théories. Mais ce n'est pas nécessaire : la constante cosmologique, introduite puis reniée par Albert Einstein, suffit amplement à résoudre le mystère.

D

epuis 1927 et l'article fondateur de la cosmologie relativiste moderne de l'astronome et chanoine belge Georges Lemaître, théorie et observations se sont accordées pour prouver que l'Univers se dilate, la plupart des astronomes considérant que cette expansion, sous l'influence de la gravité, devait évoluer en ralentissant. C'est donc confiantes que, sur la

base des données recueillies par les grands télescopes, deux équipes indépendantes conduites par Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess se sont lancées dans la cartographie de l'Univers, pensant mesurer avec une précision encore jamais atteinte les signes de ce ralentissement.

À leur grande surprise, ils ont constaté que, certes, l'expansion de l'Univers a bien été freinée dans les premiers milliards d'années par la gravité, mais qu'elle s'est accélérée au bout de 7 milliards d'années. L'explication la plus naturelle d'une telle accélération est d'invoquer l'existence d'une force répulsive à grande échelle, capable de contrer la force d'attraction des masses célestes : c'est l'«énergie sombre».



Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine satellite de notre Voie Lactée renfermant de nombreux amas d'étoiles (dans le médaillon). La luminosité de certaines d'entre elles, nommées Céphéides, pulsent à un rythme régulier. En les étudiant, on peut calculer avec précision la vitesse à laquelle l'univers s'étend.

La découverte, confirmée depuis par d'autres méthodes, vaudra le prix Nobel de physique 2011 aux astronomes. Mais la publication des résultats, en 1998, a déjà donné lieu aux habituels effets d'annonce dans la presse sur le modèle de: « Notre modèle de l'Univers remis en question. » Le Forum économique de Davos a même consacré en janvier 2000 une session au sujet, devant une assistance qui n'y comprenait goutte. Invité comme intervenant avec deux cosmologistes américains, j'ai tenté de tempérer l'emballement médiatique en expliquant que l'accélération de l'expansion cosmique ne nécessitait pas forcément une remise en question des modèles généraux de Big Bang. Je crois n'avoir eu aucun succès: il

n'était pas évident, devant une assistance en attente de scoop, d'expliquer qu'un physicien belge, le même Georges Lemaître cité plus haut, en langue française et avec soixante ans d'avance, avait déjà donné tous les tenants et aboutissants de la répulsion cosmique en invoquant une constante cosmologique.

De fait, ce terme figurant dès 1917 dans les équations originales d'Einstein sous la forme de la lettre grecque λ a été ensuite abandonné par le courant dominant de la cosmologie anglo-saxonne. Pourtant, il explique tout naturellement et de la façon la plus élégante qui soit le phénomène de la répulsion cosmique sans faire intervenir de mystère particulier. L'affaire mérite de plus amples détails, et les objections

LES DESTINS DE L'UNIVERS

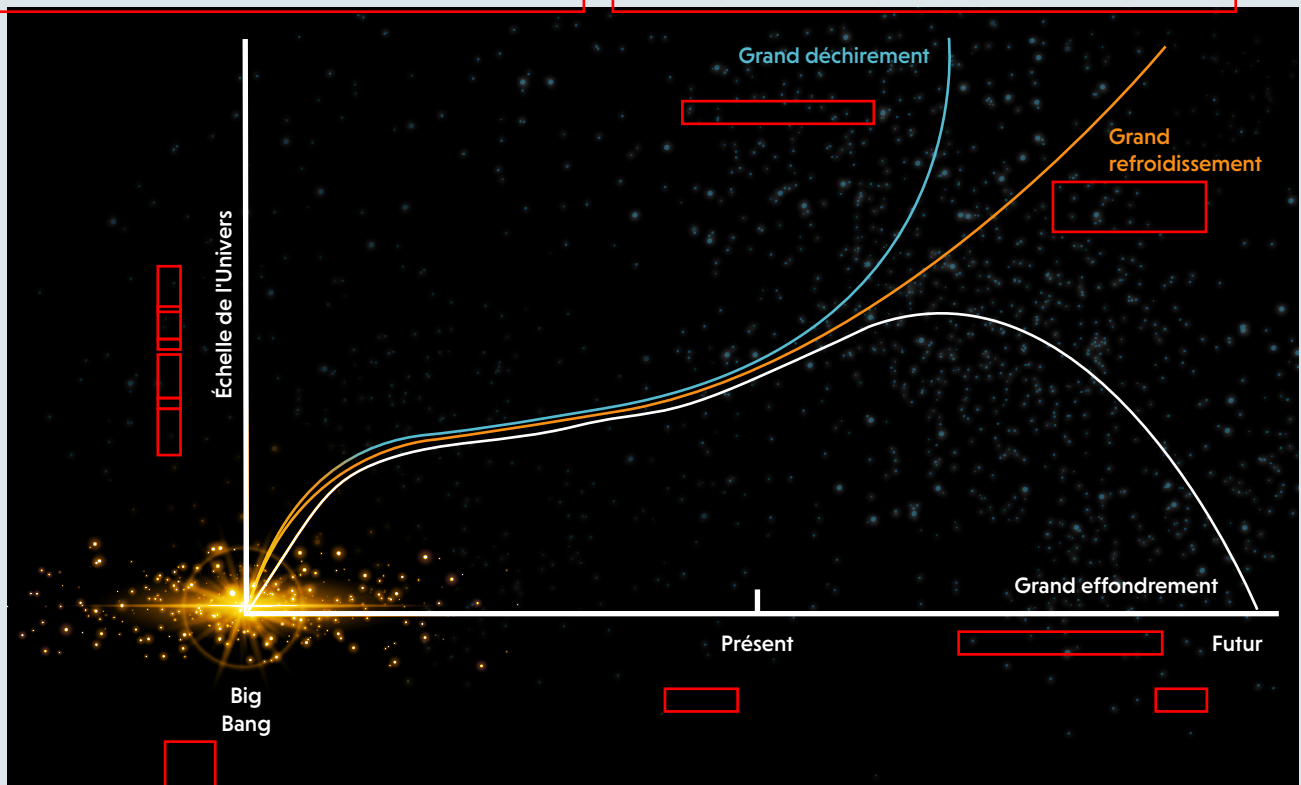
L'évolution de l'Univers dépend de façon cruciale de la densité totale de matière et d'énergie qu'il contient. Lorsque les astrophysiciens font l'inventaire de toutes les formes de matière et d'énergie, ils se heurtent à un certain nombre de complications. Différentes formes d'énergie ont en effet tour à tour dominé le cours de l'évolution cosmique et en ont imposé la dynamique, c'est-à-dire la variation au cours du temps du facteur d'échelle spatiale R , que l'on peut par exemple identifier au rayon de l'Univers observable. On distingue quatre phases. La première, encore hypothétique, est la très brève période d'inflation, où R aurait été en expansion exponentielle. C'est durant cette période que la matière aurait été créée. Dans une seconde phase, la radiation a dominé, mais comme la densité d'énergie diminue comme R^{-4} tandis que R augmente, elle a été supplantée dans une troisième phase par la matière dont la densité diminue seulement comme R^{-3} . Pour des raisons semblables, dans une quatrième phase l'énergie sombre a pris le relais voici 7 milliards d'années et domine l'Univers actuel. Son effet est d'accélérer l'expansion, moins rapidement cependant que durant l'inflation. Nul ne sait où elle nous conduira, puisqu'on ignore sa vraie nature et que l'on ne connaît pas sa loi de variation au cours du temps. On peut néanmoins esquisser trois scénarios.

Une énergie sombre constante (*en orange*) dominera de plus en plus la balance énergétique de l'Univers, et l'expansion observée de l'espace continuera à accélérer jusqu'à devenir exponentielle. Les structures qui ne sont pas déjà reliées gravitationnellement vont se briser et leurs parties vont s'éloigner les unes des autres à des vitesses apparentes supérieures à celle de la lumière. L'accélération nous empêchera finalement d'observer des portions importantes de l'Univers qui est aujourd'hui visible. Néanmoins, les structures liées gravitationnellement, comme les galaxies et les systèmes

planétaires, le resteront. Ainsi, le système solaire ou la Voie lactée demeureront essentiellement identiques à ce qu'ils sont maintenant, alors que le reste de l'Univers semblera s'enfuir loin de nous. Ce scénario dit du « Big Chill » (« Grand Refroidissement ») est, dans l'état actuel de nos connaissances, le plus plausible.

Avec une densité d'énergie sombre diminuant (*en blanc*) dans le futur (c'est le modèle de quintessence), la matière peut redevenir dominante. L'horizon cosmique grandira, nous révélant une part toujours plus grande de l'Univers. La gravité attractive l'emportera à nouveau et l'expansion non seulement cessera d'accélérer, mais s'inversera et l'Univers se contractera dans son ensemble pour disparaître dans un « Big Crunch » (« Grand Effondrement ») pouvant survenir dans 18 milliards d'années.

Si l'énergie sombre augmente (*en bleu*) au cours du temps, ou si elle est dominée par l'énergie fantôme fortement répulsive, l'espace se dilatera à un rythme sans cesse accru, et l'accélération sera elle-même accélérée. En ce cas, l'issue sera un « Big Rip » (« Grand Déchirement »), advenant lorsque l'accélération deviendra infinie au bout d'un temps fini. Toute la matière de l'Univers, même les atomes, sera déchirée par la dilatation de l'espace. D'après le scénario le plus extrême, cet événement se produira dans « à peine » 22 milliards d'années. D'abord les galaxies seront séparées les unes des autres et les amas se dissoudront. Environ 60 millions d'années avant le Big Rip, la gravité sera trop faible pour maintenir la cohésion de notre galaxie, qui se dispersera ; trois mois avant, le système solaire sera déchiré ; dans les dernières minutes, étoiles et planètes seront déchiquetées, et 10^{-19} seconde avant, les atomes et les noyaux seront eux-mêmes détruits, laissant un Univers vide et sans aucune structure.



➤ récurrentes que l'on oppose à l'identification de l'énergie noire à la constante cosmologique, quelques éclaircissements.

En 1917, Albert Einstein souhaite logiquement utiliser sa nouvelle théorie de la relativité générale pour décrire la structure de l'Univers dans son ensemble. La conception qui prévaut alors est que l'Univers doit être statique, c'est-à-dire invariable dans le temps. Einstein s'attend à ce que sa théorie appuie cette opinion. Ce n'est pas le cas. Le modèle d'Univers qu'il élabore en premier lieu n'a pas un rayon de courbure constant : la force attractive inexorable de la gravité, agissant sur chaque corps céleste, a tendance à le déstabiliser et à le faire s'effondrer sur lui-même. Or notre Univers ne s'effondre pas.

LA PLUS GROSSE BÉVUE D'EINSTEIN ?

Pour Einstein, le seul remède à ce problème consiste à ajouter un terme *ad hoc* mais mathématiquement cohérent dans ses équations d'origine. Cet ajout correspond à une sorte d'«antigravité», qui agit comme une force de répulsion ne se faisant sentir qu'à l'échelle cosmique. Grâce à cette astuce mathématique, le modèle d'Einstein reste permanent et invariable (voir la figure 97). Einstein représente ce terme par la lettre grecque Λ et le nomme «constante cosmologique». Il s'agit bien d'une constante, puisqu'elle doit garder exactement la même valeur dans l'espace et dans le temps. Formellement, elle peut prendre *a priori* n'importe quelle valeur, mais celle qui est sélectionnée par Einstein aboutit à un modèle d'Univers statique.

La même année, l'astrophysicien néerlandais Willem de Sitter bâtit un autre modèle d'Univers relativiste statique, très différent de celui d'Einstein (il suppose que la densité de matière reste nulle au cours du temps), mais incluant lui aussi une constante cosmologique, dont l'effet ici est d'induire, en l'absence de matière et donc de gravité, une courbure de l'espace-temps. Le rôle de la constante s'éclaire alors d'un jour nouveau. Dans le modèle de Sitter, les lignes d'Univers (les trajectoires d'espace-temps) suivies par les galaxies se séparent rapidement les unes des autres au cours du temps, comme si l'espace était en dilatation générale : cela signifie qu'en l'absence de matière la constante cosmologique a une influence certaine sur la structure de l'Univers. Aux yeux d'Einstein, la solution de Sitter se réduit toutefois à une simple curiosité mathématique, dans la mesure où l'Univers réel contient bel et bien de la matière.

Un premier coup de théâtre se produit en 1922, lorsque le mathématicien russe Alexandre Friedmann étudie les modèles

cosmologiques relativistes sans préjuger du caractère statique de l'Univers. Il découvre des solutions simples et exactes faisant des modèles statiques d'Einstein et de Sitter des cas très particuliers de solutions plus générales, lesquelles sont dynamiques.

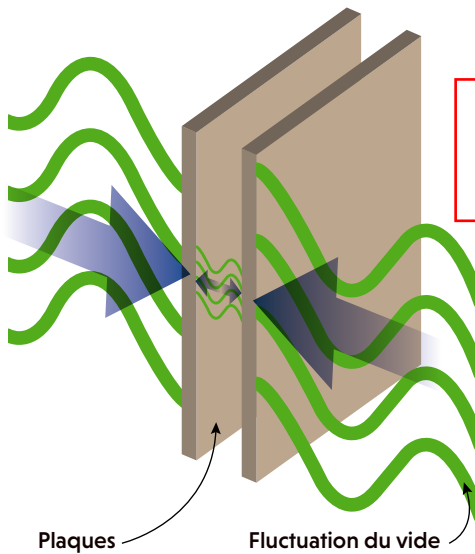
Peu après, les observations astronomiques effectuées aux États-Unis par Vesto Slipher et mises en forme en 1929 par Edwin Hubble (qui en tirera seul toute la gloire) confirment que les galaxies ont effectivement tendance à se séparer au cours du temps. De façon concomitante, le théoricien britannique Arthur Eddington réexamine le modèle statique d'Einstein et démontre que, tel un stylo posé sur sa pointe, il est instable : à la moindre perturbation, il devrait entrer en expansion ou en contraction.

Ces faits nouveaux concourent à faire admettre que le modèle cosmologique d'Einstein n'est pas un bon modèle d'Univers et, concomitamment, à remettre en cause la constante cosmologique. Puisqu'elle ne remplit plus sa fonction première, à savoir stabiliser le rayon d'Univers, à quoi bon la garder ? Einstein est le premier à faire son autocritique. Après quelques réticences, il finit par admettre la pertinence des solutions dynamiques de Friedmann et dans la nouvelle solution qu'il élabore en 1932 avec de Sitter, la constante cosmologique a disparu !

L'HOMME QUI A DIT NON

À première vue, le débat paraît clos. Pourtant, un homme n'est pas d'accord. Il s'appelle Georges Lemaître. Il a commencé ses recherches cosmologiques en 1925 et il a compris le rôle dynamique joué par la constante cosmologique dans le modèle de Sitter. En 1927, il retrouve les solutions plus générales découvertes par Friedmann et fait pour la première fois le lien entre l'expansion de l'espace et la fuite apparente des galaxies. C'est lui le véritable père de la cosmologie moderne et des fameux modèles de Big Bang !

Pour Lemaître, la constante cosmologique est un ingrédient essentiel de la théorie relativiste, une nécessité à la fois logique et observationnelle. Il développe une argumentation prémonitoire en trois points. D'abord, la constante cosmologique est nécessaire pour obtenir une échelle de temps d'évolution largement supérieure à la durée des âges géologiques. Les modèles de Big Bang sans constante cosmologique prédisent en effet que l'âge théorique de l'Univers, calculé à partir de son taux d'expansion, est plus court que celui des étoiles, voire celui de notre planète... Ensuite, l'instabilité de l'équilibre entre l'attraction gravitationnelle et la répulsion cosmique est une façon de comprendre comment les étoiles et les galaxies ont pu se former durant un laps de temps d'environ ➤



Deux surfaces parfaitement conductrices séparées par du vide s'attirent. Cet « effet Casimir » résulte des fluctuations quantiques spontanées du champ électromagnétique dans le vide.

d'abandonner toute recherche en cosmologie à partir de 1933 comme la conséquence d'une blessure d'amour-propre!

Toujours est-il que le désaveu du père de la relativité pèsera de tout son poids, et le reste de la communauté des cosmologistes le suivra: malgré les puissants arguments de Lemaître en sa faveur, la constante cosmologique va rester au placard pendant soixante ans, d'autant qu'avant 1998 aucune observation astronomique directe n'est venue appuyer son existence.

LES VERTUS DE L'ÉNERGIE DU VIDE

L'idée de constante cosmologique a aussi pâti de son interprétation en termes d'énergie du vide. En 1934, à une époque où la théorie quantique est encore balbutiante, Lemaître est le premier à prendre en compte l'énergie du vide et à lui associer une pression négative pour interpréter la constante cosmologique. Mais sa contribution va rester complètement ignorée.

Il faut attendre la fin des années 1940, époque où la majorité des astronomes rejette l'idée d'une constante cosmologique, pour que des physiciens théoriciens commencent à explorer les propriétés du vide. Ils commencent à comprendre que la notion d'espace vide est plus subtile qu'ils ne le pensaient. L'espace n'est pas un réceptacle passif empli de matière et de rayonnement, c'est une entité physique et dynamique qui a une « chair ». Et cette chair, c'est l'énergie du vide. Des physiciens comme Paul Dirac, Enrico Fermi et Richard Feynman font l'hypothèse que ce que nous appelons « espace vide » est, en vertu du principe de Heisenberg, empli de « particules virtuelles », ne se manifestant en tant que réalité matérielle que de façon éphémère. Le vide quantique joue le rôle d'une banque auprès de laquelle on peut emprunter de l'énergie pour créer pendant un temps très court une particule et une antiparticule (de telle sorte qu'elles sont inobservables). La quantité d'énergie que l'on peut emprunter est inversement proportionnelle à la durée de l'emprunt.

Les fluctuations quantiques du vide électromagnétique ont même des manifestations macroscopiques, prévues en 1948 par le physicien néerlandais Hendrik Casimir, qui montra qu'elles induisaient une force d'attraction entre deux plaques conductrices parallèles (voir la figure ci-contre).

Le vide n'est donc pas le néant, il est potentiellement bourré d'énergie. Appliquant ce concept à la cosmologie, le Russe Iakov Zeldovitch redémontre en 1967, sans jamais avoir lu Lemaître, que le terme Λ équivaut à un champ d'énergie latent dans l'espace vide. La constante cosmologique est en quelque sorte une « dynamite » du vide.

1 milliard d'années après le Big Bang. Enfin, l'énergie contenue dans l'Univers n'est définie qu'à une constante additive près, car la relativité générale ne fournit pas de méthode d'ajustement lors d'un changement arbitraire du niveau zéro de l'énergie. Selon Lemaître, la constante cosmologique permet de faire cet ajustement. Dès 1934 il entrevoit ainsi le lien entre la constante cosmologique et la mécanique quantique.

Aux yeux de Lemaître, la constante cosmologique est donc parée de toutes les vertus. Il ne parviendra pourtant jamais à convaincre Einstein, lequel ira jusqu'à dire qu'avec l'introduction de la constante cosmologique il avait commis la plus grosse bêtise de sa vie.

On interprète souvent cette curieuse déclaration par le fait que le père de la relativité générale aurait été mécontent d'avoir gâché la beauté de sa théorie en introduisant un terme superflu. C'est faux, car dès 1916 Einstein avait envisagé l'existence de ce terme hors du contexte cosmologique. Dans une note de bas de page, il remarquait que ses équations du champ gravitationnel n'étaient pas les plus générales possible et qu'il existait un terme additionnel compatible avec la structure de sa théorie. Par ailleurs, le mathématicien français Élie Cartan a démontré en 1922 que la forme la plus générale des équations de la relativité générale doit nécessairement comprendre une constante d'intégration identique à la constante cosmologique, et Einstein connaissait ce résultat. Non, la vraie bêtise commise par Einstein a été de donner au terme cosmologique une valeur très particulière pour forcer son modèle d'Univers à demeurer statique. Ce faisant, il est passé à côté de la découverte capitale de la cosmologie du xx^e siècle: l'expansion de l'Univers. Einstein en était parfaitement conscient, et l'on peut interpréter sa surprenante décision

Le vide n'est donc pas le néant, il est potentiellement bourré d'énergie

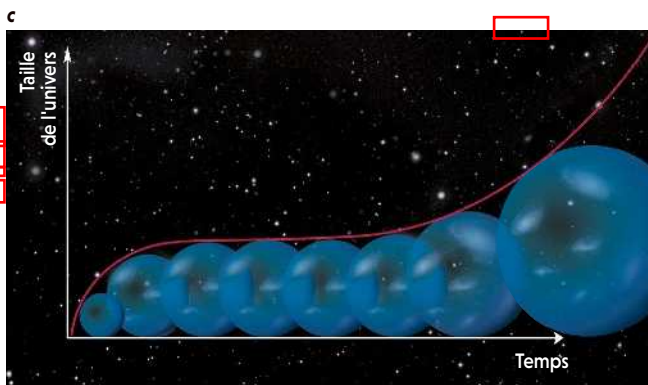
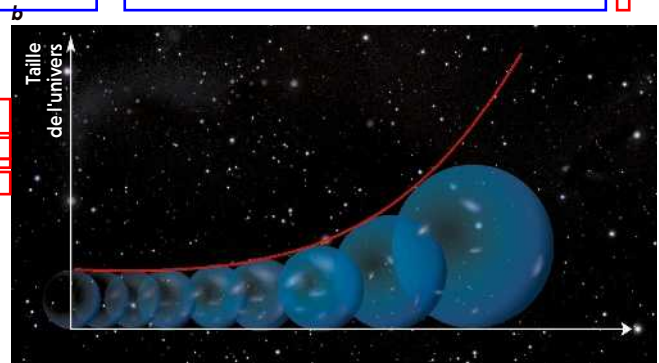
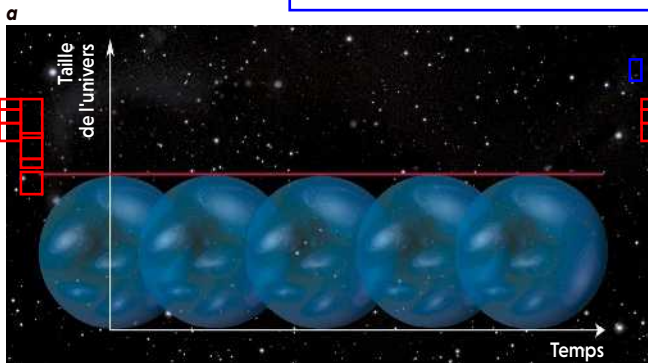
Forts de ces acquis théoriques, les cosmologistes Alan Guth et Andrei Linde proposent en 1979 que l'énergie du vide a provoqué une phase d'« inflation » dans l'Univers très primordial: sur un très court laps de temps compris entre 10^{-36} et 10^{-34} seconde après le Big Bang, notre Univers aurait subi une croissance exponentielle, son expansion s'étant fortement accélérée sur cette période.

Les modèles d'inflation sont assez vite acceptés, mais les astronomes continuent à ignorer la constante cosmologique, considérée comme inadéquate pour décrire l'Univers actuel. Seul le cosmologiste d'origine

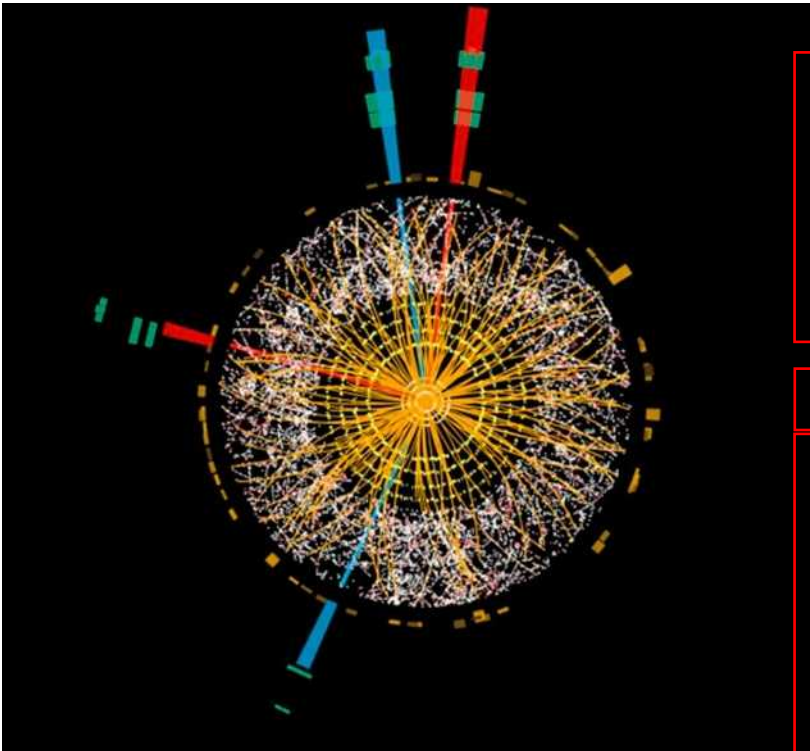
canadienne James Peebles, récompensé en 2019 par le prix Nobel, propose au début des années 1980 la réintroduction de la constante cosmologique dans les modèles de Big Bang. Le développement de la théorie de l'inflation implique en effet que la géométrie de l'espace observable doive être très proche d'une géométrie de courbure nulle. Or, il n'y a pas assez de matière dans l'Univers pour aboutir à une telle géométrie. Peebles invoque donc une valeur élevée de la constante cosmologique pour combler le déficit.

LES MAUVAIS CALCULS DE L'ÉNERGIE DU VIDE

Les physiciens qui travaillent sur le concept d'énergie du vide ont en vue un projet plus grandiose: l'unification des interactions fondamentales. Dans ce dessein, ils sont obligés d'ajouter des termes dans leurs équations, qui représentent des champs naturels entièrement nouveaux. Le concept de champ a été inventé au XIX^e siècle par les mathématiciens pour exprimer comment une quantité donnée peut varier d'un point à l'autre de l'espace. Les physiciens ont aussitôt adopté cette idée pour décrire quantitativement comment des forces, comme la gravité et l'électromagnétisme, changent en fonction de l'éloignement par rapport à une source. Par exemple le champ de Higgs, dont le boson médiateur (*voir la figure page suivante*) a été mis expérimentalement en évidence au Cern en 2012, découle de la théorie électrofaible



Dans le modèle d'Univers statique (a) conçu par Albert Einstein, l'introduction d'une constante cosmologique contrebalance la tendance à l'effondrement dû à la gravité. Georges Lemaître élabore d'autres modèles, dynamiques. Dans celui de 1927, dit « de l'Univers en expansion éternelle » (b), la constante cosmologique engendre une force répulsive qui accélère l'expansion. Le commencement est repoussé à l'infini vers le passé où il se raccorde au modèle statique d'Einstein. Dans le modèle de l'Univers hésitant (c), datant de 1931, l'Univers à un début, le Big Bang, puis connaît une phase où son expansion est ralentie par la gravitation. Après une phase de quasi-équilibre, la constante cosmologique prend le dessus: l'expansion s'accélère.



➤ introduite par Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg pour unifier les interactions électromagnétique et nucléaire faible.

Mais il y a un prix à payer pour l'introduction de nouveaux champs quantiques : ils confèrent à l'état de vide une énorme énergie latente, qui se comporte exactement comme la constante λ des modèles cosmologiques. Comme l'avait prophétisé Lemaître, voici donc ce terme si controversé brillamment ressuscité par la théorie quantique ! Il ne reste plus qu'à calculer sa valeur dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Et là, catastrophe ! Plusieurs manières de calculer sont possibles, mais la valeur obtenue dans la plupart des cas est 10^{122} fois supérieure à celle prescrite par l'observation astronomique, un écart si faramineux, qualifié de « pire prédiction de toute la physique », que notre esprit a des difficultés à le saisir. Avec une énergie du vide aussi grande, toute la matière de l'Univers serait instantanément dispersée, et les galaxies ne se seraient jamais formées.

On conçoit qu'il soit déplaisant, aux yeux des physiciens théoriciens, que leurs meilleurs modèles d'unification, censés faire des prédictions ultra-précises dans le domaine des particules élémentaires, conduisent à une conséquence cosmologique aussi aberrante. C'est un exemple extrême du problème de base qui affecte le modèle standard de la physique des particules : on ne comprend pas pourquoi les quelque trente paramètres libres dont il dépend pour écrire les lois de la physique ont telle ou telle valeur.

Le boson de Higgs a été découvert en 2012 au Cern par le détecteur Atlas. Il est ici traqué par sa désintégration en quatre particules (les faisceaux bleus et rouges). Il est le médiateur d'un champ quantique (le champ de Higgs) qui contraint la valeur de l'énergie du vide, possible cause de l'expansion accélérée de l'Univers.

Pour la constante cosmologique, les physiciens ont donc tout tenté pour réduire l'écart en inventant des théories « au-delà du modèle standard ». La plus étudiée est la supersymétrie (Susy), ainsi nommée car elle suppose une symétrie entre les fermions (particules qui constituent la matière) et les bosons (qui véhiculent les interactions). Mais rien à faire, elle échoue complètement à résoudre le problème.

UNE CONSTANTE QUI NE L'EST PAS

Pour sauver la mise, les physiciens des hautes énergies ont alors imaginé que la constante cosmologique n'était peut-être pas vraiment constante. Par exemple, Robert Caldwell et ses collaborateurs ont proposé en 1998 l'existence d'une nouvelle entité qui imbiberait complètement l'espace, un peu comme le faisait l'éther chez Aristote, un cinquième élément nommé « quintessence ». Le terme a été repris par les chercheurs pour l'appliquer à ce nouveau champ d'énergie hypothétique. Celui-ci, auquel on attribue une variation excessivement lente, peut encore être représenté dans les modèles d'Univers à l'aide du terme cosmologique, lequel cesse alors d'être défini comme une constante. Il peut toujours s'interpréter comme ce qui reste dans l'Univers lorsqu'on en retire toute la matière et tout le rayonnement. En ce sens, la quintessence correspond à une certaine forme de vide, mais plus flexible que la constante cosmologique car variable au cours du temps. La valeur de ce champ, extrêmement élevée dans l'Univers très primordial (donc en accord avec les calculs des physiciens des hautes énergies), tomberait très bas au cours de l'évolution cosmique, conformément à la valeur aujourd'hui mesurée par les astronomes.

Une autre approche est celle de la théorie des cordes, extension de la supersymétrie destinée à inclure une description de la gravité. L'une de ses propositions les plus étonnantes concerne les multivers. Ses partisans les plus fervents (et médiatisés) comme Leonard Susskind, Brian Greene ou Max Tegmark espèrent convertir un échec explicatif en un tour de passe-passe extravagant : si l'on ne comprend pas les valeurs que prennent les constantes fondamentales dans notre Univers, il suffit de présumer que notre Univers appartient à un ensemble quasi infini et inobservable d'Univers, chacun d'eux étant muni de paramètres aléatoirement distribués. Dans le « paysage » du multivers, la constante cosmologique est extraordinairement grande dans la plupart des cas, mais il y a forcément un Univers très improbable où elle est strictement nulle, un autre tout aussi improbable où elle a la « bonne valeur » – celle de notre Univers, bien entendu.

La théorie M, extension de la théorie des cordes proposée par Edward Witten, promet encore davantage. Selon ses partisans, dans le monde multidimensionnel des «branes» issu de la théorie, l'énergie sombre mesurée dans notre Univers-brane pourrait être importée à partir des dimensions supplémentaires de la «matrice» dans laquelle nous serions immergés. D'autres chercheurs voient l'origine de la répulsion cosmique dans d'éventuelles interactions entre branes – ce qui revient à éliminer toute énergie sombre. Ceci n'éclaire en rien le problème, si l'on se souvient que la théorie M est bien plus mystérieuse que l'énergie sombre, qui elle au moins a des effets observables sur la vitesse d'expansion cosmique!

l'explication la plus simple qu'elle est la bonne. Alors, si ce n'est pas la constante cosmologique associée au vide quantique qui provoque l'accélération observée de l'expansion cosmique, quelle en est la cause? Le problème soulevé est celui de la compatibilité entre la description classique de l'espace, du temps et de la gravitation avec celle, quantique, de la matière: la nature encore mystérieuse de l'énergie sombre suggère qu'il manque quelque chose d'essentiel dans notre compréhension de l'Univers physique. À ce titre, son élucidation peut servir de guide sur la façon de mettre au point une bonne théorie de la gravitation quantique.

TRAQUER L'ÉNERGIE SOMBRE

Peut-on dès lors imaginer des dispositifs expérimentaux susceptibles de mieux contraindre les différents modèles d'énergie sombre? Celle-ci est caractérisée par une pression négative. Cette dernière équivaut en fait à une tension, tout comme les objets élastiques, ressorts et feuilles de caoutchouc, ont eux aussi, quand ils sont tendus, une pression négative dirigée vers l'intérieur.

On montre que, lorsque la pression est inférieure à un tiers de la densité d'énergie, la force gravitationnelle change de signe et devient répulsive. Le paramètre clé est l'équation d'état, qui explicite le rapport entre la pression p de l'énergie sombre et sa densité d'énergie ρ sous la forme $p = w \rho c^2$, où w est un paramètre dépendant de la nature de l'énergie. Pour obtenir une énergie répulsive, w doit être négatif et inférieur à $-1/3$.

Comme l'avait vu Lemaître dès 1934, la constante cosmologique ou le vide quantique sont caractérisés par $w = -1$, ils sont donc fortement répulsifs. D'autres formes d'énergie sombre, comme les modèles de quintessence, ont des w compris entre -1 et $-1/3$. La forme la plus extrême d'énergie répulsive, dite «énergie fantôme», est caractérisée par $w < -1$. La flexibilité théorique permet en outre à l'équation d'état de varier arbitrairement au cours du temps.

Les astronomes ont mis en place d'ambitieux programmes d'observations susceptibles (voir *À la poursuite de l'énergie sombre*, par J. Frieman, page 84) de contraindre les valeurs possibles de w et ce faisant les différents modèles d'énergie sombre. L'enjeu est capital pour la cosmologie puisque le futur à très long terme de notre Univers en dépend entièrement (voir l'encadré, page 94). Si le paramètre w s'avère très proche de -1 , la théorie de la relativité générale et sa constante cosmologique rendront bien compte du taux d'expansion de l'Univers et de la présence de l'énergie noire. En revanche, une valeur significativement différente impliquerait soit l'existence d'une autre forme d'énergie sombre soit la nécessité de réviser la théorie de la relativité générale... ■

La physique ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données?

On le voit, aucune de ces nouvelles théories, aussi fascinantes soient-elles, ne résout mieux les difficultés que leurs versions antérieures à plus basse énergie. Comme elles, elle les repousse chaque fois un peu plus loin, éloignant d'autant le fantôme qu'elles suscitent: celui d'une physique totalement unifiée qui serait proche de son achèvement.

À ce stade, on peut se demander si la découverte de l'accélération cosmique devait forcément conduire à tant de contorsions théoriques. D'un côté, on peut penser qu'il faut davantage d'imagination et de créativité pour sortir la physique théorique de ce que l'on croit être une impasse. De l'autre, on peut se demander si justement la physique actuelle ne souffre pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données expérimentales.

Et entre ces deux positions, rappelons que le phénomène de l'accélération cosmique peut être simplement décrit par la constante cosmologique classique des équations d'Einstein, sans faire appel à une nouvelle physique. Cependant, ce n'est pas parce que c'est

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. LUMINET, *L'Invention du Big Bang*, Le Seuil/Points Sciences, 2^e éd., 2014.

J.-P. LUMINET, *L'Univers chiffonné*, 2^e éd., Folio Essais, 2005.

L'ESSENTIEL

● En 1998, les cosmologistes ont découvert que l'expansion de l'Univers accélère.

● Ce phénomène s'expliquerait par une « énergie sombre », qui représenterait 70 pour cent de la densité d'énergie de l'Univers.

● L'énergie sombre pourrait correspondre à une constante cosmologique liée aux fluctuations quantiques du vide.

● D'autres pistes sont explorées, comme la « quintessence » ou des modifications des lois de la gravitation.

L'AUTEUR



CÉDRIC DEFFAYET est directeur de recherche au CNRS et travaille à l'Institut d'astrophysique de Paris et à l'Institut des hautes études scientifiques.

Vers une nouvelle gravitation ?

L'expansion de l'Univers accélère. Pour expliquer ce phénomène constaté récemment, les théoriciens explorent plusieurs voies, comme l'existence d'une mystérieuse « énergie sombre » ou de nouvelles lois de la gravitation.

S

ouvenez-vous. La dernière fois que vous avez admiré un ciel étoilé, ne vous êtes-vous pas demandé à quelle distance se trouvent les étoiles ? Les Grecs se posaient déjà de la question. Aristarque de Samos tenta, par exemple, d'estimer la distance à l'étoile la plus proche, le Soleil. Son calcul était faussé par le manque de précision des instruments de l'époque. Au cours des siècles suivants, les astronomes ont amélioré les techniques. L'invention de la lunette astronomique a étendu le champ





d'investigation à un domaine jusqu'alors invivable. Les techniques géométriques, telle que l'utilisation de la parallaxe (on déduit la distance d'un objet à partir de son déplacement par rapport à un fond fixe quand on l'observe de deux positions différentes), ont par la suite trouvé leurs limites. De nouvelles méthodes ont été mises au point et les astrophysiciens utilisent aujourd'hui des étoiles telles que les céphéides ou les supernovæ de type Ia – des astres en train d'exploser –, pour déterminer les distances dans l'Univers.

Alors que ces chercheurs cartographiaient le cosmos, les théoriciens ont développé une description géométrique de l'Univers. Le modèle standard cosmologique, le modèle du Big Bang, décrit avec succès les grandes lignes de l'histoire de l'Univers. Il repose sur la théorie de la relativité générale élaborée par Albert Einstein il y a près de cent ans. La «force de gravitation» y est décrite de façon géométrique dans un espace-temps courbe. Plus précisément, le mouvement d'un objet en chute libre est interprété dans la théorie d'Einstein comme un trajet qui suit le plus court chemin dans un espace-temps courbe. La géométrie de l'espace-temps définit les trajectoires des objets et, en retour, le contenu matériel de l'Univers déforme l'espace-temps. Géométrie de l'espace-temps et contenu matériel sont intimement liés dans les équations de la relativité générale.

En combinant l'observation précise de la lumière émise par les galaxies lointaines avec des mesures de distance, les cosmologistes ont découvert que l'Univers est en expansion. Les galaxies semblent s'éloigner les unes des autres, car l'espace-temps qui les contient s'étire. Plus étonnant, en observant des supernovæ très éloignées, les scientifiques ont découvert que l'expansion se fait à un rythme qui s'accélère.

Quelle est l'origine de ce phénomène? Une explication possible est la présence dans l'Univers d'une «énergie sombre», dont la nature reste inconnue, mais dont on peut déduire certaines

caractéristiques des observations astrophysiques. C'est cette question qui nous intéresse ici.

Avant d'aborder la question de la nature de l'énergie sombre, voyons comment les cosmologistes ont eu l'idée de son existence et comment ils ont estimé son abondance dans l'Univers. Toute substance influe sur les propriétés géométriques de l'espace-temps. Or l'analyse du fond diffus cosmologique – un rayonnement électromagnétique émis alors que l'Univers était âgé de 380 000 ans – indique que l'Univers suit une géométrie proche de celle d'Euclide aux grandes échelles. Une telle propriété n'est possible que si le contenu de l'Univers présente une certaine densité moyenne d'énergie, dite «densité d'énergie critique».

UN PROBLÈME DE CONTENU

Par ailleurs, les astrophysiciens déduisent le contenu en matière ordinaire (dite «baryonique» et qui compose les planètes, les étoiles...) de l'étude de la formation des noyaux atomiques légers dans les premières minutes de l'Univers. Cette matière ne représente que 5% de la densité d'énergie critique (*voir Repères, page 6*). Ainsi, 95% du contenu de l'Univers est sous une forme inconnue.

Ce contenu mystérieux se manifeste néanmoins de façon indirecte par son influence gravitationnelle sur la matière baryonique. Les cosmologistes le séparent en deux composantes selon son comportement, soit aujourd'hui environ 25% de matière noire et 70% d'énergie sombre. Cette composition est maintenant confirmée par de nombreuses observations.

La présence de matière noire a d'abord été mise en évidence quand on a comparé la quantité de matière baryonique présente dans certaines galaxies à la quantité de matière nécessaire pour expliquer les mouvements dus aux forces gravitationnelles au sein de ces mêmes galaxies. Constatant que la matière >

► baryonique ne suffisait pas à expliquer ces mouvements, les astrophysiciens ont conjecturé la présence d'une nouvelle forme de matière aux propriétés gravitationnelles analogues à celles de la matière ordinaire, mais n'interagissant pas avec elle: la matière noire.

La force gravitationnelle exercée par la matière noire est attractive. Elle tend donc à freiner le mouvement relatif de deux corps libres de toute force autre que gravitationnelle, qui s'éloigneraient. On suppose que la matière noire est composée de particules, et de nombreuses expériences visent à les détecter et ainsi à déterminer la nature de la matière noire.

MESURER L'EXPANSION

La composante de l'Univers qui nous intéresse ici est l'énergie sombre, dont les propriétés gravitationnelles sont plus exotiques que celles de la matière (baryonique et noire). L'idée de son existence est due à Einstein en 1917, mais elle ne fut prise au sérieux que lorsqu'on a cherché à mesurer les variations de la vitesse d'expansion de l'Univers, dans les années 1990.

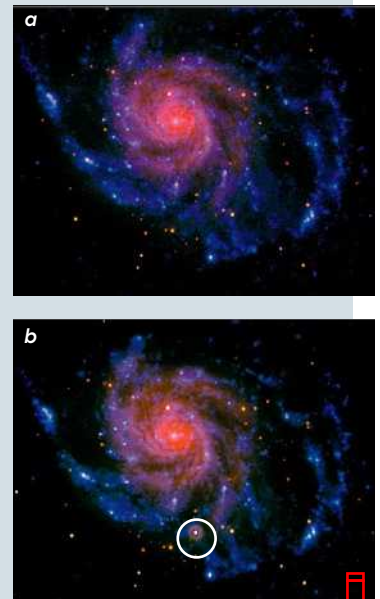
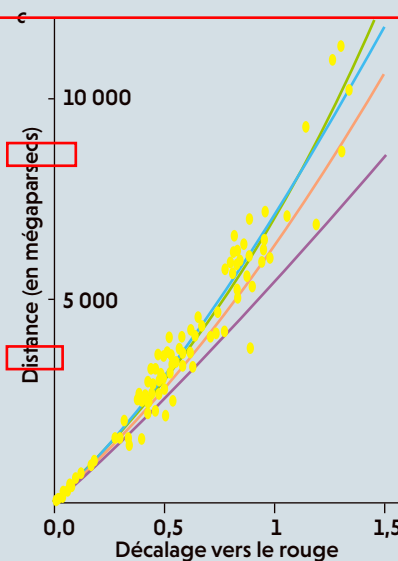
La dynamique de l'Univers aux grandes échelles a été découverte dans les années 1920, quand on a observé que le spectre de la lumière provenant de galaxies lointaines était systématiquement décalé vers le rouge. Cette observation peut être interprétée par l'effet Doppler: la longueur d'onde d'un signal électromagnétique s'étire quand l'émetteur s'éloigne du récepteur. L'astronome Edwin Hubble a établi une relation de proportionnalité, la «loi de Hubble», entre la vitesse de fuite et la distance des galaxies. Un objet deux fois plus distant qu'un autre fuit ainsi à une vitesse deux fois plus élevée.

Dans le cadre de la relativité générale, les observations de Hubble ont été interprétées comme une expansion de l'Univers: c'est l'espace, dans lequel sont situées les galaxies, qui s'étire et donne l'impression que les objets s'éloignent les uns des autres. Le coefficient de proportionnalité de la loi de Hubble est la constante de Hubble. Elle a été déterminée avec une précision de l'ordre de 1% et vaut environ 21 kilomètres par seconde et par million d'années-lumière. Ainsi, une galaxie distante de 100 millions d'années-lumière et emportée par

LES CHANDELLES STANDARD

Les supernovæ de type Ia sont qualifiées de chandelles standard cosmologiques, car lorsque ces étoiles explosent, elles émettent toujours la même quantité de lumière (en fait, il existe des variations qui sont corrélées à d'autres paramètres mesurables tels que la durée de l'explosion et dont tiennent compte les observateurs pour étalonner cette quantité de lumière). De fait, elles servent de référence pour mesurer les distances dans l'Univers. L'émission de lumière est considérable: une supernova peut devenir plus brillante que la galaxie qui l'abrite (a et b). Il est ainsi possible d'observer ces explosions dans des objets très lointains. Comme la quantité de lumière émise est connue, on peut, en observant une supernova, en déduire sa distance. On mesure aussi le décalage vers le rouge de son spectre lumineux, dont on déduit la vitesse à laquelle la supernova s'éloigne, ce qui correspond à la vitesse d'expansion de l'Univers. En réalisant cette mesure pour un grand nombre de supernovæ situées à différentes

distances, on détermine la dynamique d'expansion de l'Univers. Les mesures publiées en 1998 ont montré que l'expansion s'est accélérée depuis quelques milliards d'années (c). Les supernovæ les plus proches de nous n'ont subi qu'une faible variation de vitesse de l'expansion (leur distance et leur vitesse suivent une loi linéaire, la loi de Hubble). En revanche, pour les supernovæ lointaines (donc plus anciennes), la vitesse s'écarte de la loi linéaire et est plus faible: l'expansion était donc plus lente dans le passé.



Les mesures de la distance et de la vitesse d'éloignement (reliée au décalage vers le rouge du spectre) des supernovæ proches (telles SN 2011fe dans la galaxie M101 avant, a, et pendant l'explosion, b) vérifient la loi de Hubble linéaire (c). Les variations de la vitesse d'expansion se manifestent pour les supernovæ lointaines (les courbes correspondent à différents modèles cosmologiques).

L'addition d'une constante cosmologique ajoute un nouveau contenu à l'Univers

l'expansion de l'Univers s'éloigne de nous à la vitesse de 2100 kilomètres par seconde, soit près de 8 millions de kilomètres par heure.

En accord avec le principe copernicien (ou principe cosmologique), qui postule qu'il n'existe pas de lieu privilégié dans l'Univers, un observateur qui scruterait le cosmos aujourd'hui depuis une autre galaxie que la nôtre obtiendrait les mêmes résultats; en particulier, il mesurerait la même valeur pour la constante de Hubble.

Cependant, le principe cosmologique n'implique pas qu'un observateur ayant mesuré la constante de Hubble dans le passé obtienne le même résultat. En effet, la constante a pu varier au cours du temps. Mesurer cette variation consiste précisément à estimer l'accélération ou la décélération de l'expansion de l'Univers. Jusqu'en 1998, le consensus chez les cosmologistes était que l'expansion devait ralentir. En effet, la matière ordinaire et la matière noire s'opposent à l'expansion, un peu comme l'attraction gravitationnelle exercée par le Soleil tend à ralentir le mouvement de fuite d'une comète.

Dans les années 1990, deux équipes ont entrepris de mesurer les variations de vitesse de l'expansion entre aujourd'hui et il y a plusieurs milliards d'années (voir *À la poursuite de l'énergie sombre*, par J. Frieman, page 84). Les premiers résultats ont été publiés en 1998 et ce fut une surprise: l'expansion de l'Univers accélère. Par ailleurs, ce phénomène a débuté relativement récemment dans l'histoire cosmique, quand l'Univers était environ deux fois plus jeune qu'aujourd'hui.

Si ce résultat n'était pas celui attendu, il n'est cependant pas difficile à reproduire dans le cadre de la relativité générale: il suffit de donner une valeur non nulle à la « constante cosmologique » (voir *Indispensable constante cosmologique*, par J.-P. Luminet, page 92). Elle a été introduite par Einstein dans ses équations de la relativité générale – avant la découverte

de l'expansion cosmique – pour que ces équations correspondent à un univers statique. Il suffisait d'ajuster la valeur de cette constante pour contrebalancer l'effet attractif de la matière.

Mais que représente physiquement cette constante cosmologique? L'ajout de ce terme dans les équations d'Einstein est l'équivalent mathématique de l'addition d'un nouveau contenu dans l'Univers, dont les propriétés sont très différentes de celles de la matière ordinaire. Par exemple, ce nouveau contenu a une densité d'énergie constante au cours de l'histoire cosmique, alors que celle de la matière ordinaire diminue avec l'expansion de l'espace-temps. La densité d'énergie associée à la constante cosmologique ne varie pas, ce qui signifie que, dans un volume d'Univers dilaté par l'expansion cosmique, il y a une création continue d'énergie.

UNE PRESSION NÉGATIVE

Une autre propriété étrange de la constante cosmologique est qu'une pression négative lui est associée. De façon générale, la pression est définie comme une force agissant sur une surface. Par exemple, la pression cinétique d'un fluide est due aux chocs des molécules sur les parois du récipient. Le fluide exerce une poussée sur les parois et la pression est positive. Une pression négative peut apparaître sur les parois d'un récipient, par exemple si la pression extérieure est plus élevée que celle à l'intérieur.

Comment la pression d'une composante de l'Univers agit-elle sur la dynamique de celui-ci? La pression positive de la matière est interprétée comme un surplus d'énergie cinétique qui s'ajoute au bilan de la densité d'énergie de l'Univers. Elle tend donc à ralentir l'expansion. En revanche, un fluide présentant une pression négative, comme celui associé à la constante cosmologique, a une contribution opposée et crée une sorte de force répulsive: la vitesse d'expansion de l'Univers augmente au lieu de diminuer.

La constante cosmologique est donc associée à une pression négative et à une densité d'énergie constante, dont la valeur est estimée grâce aux observations astrophysiques. Elle est très faible: l'énergie contenue dans un volume équivalent à celui d'une piscine olympique pourrait alimenter une ampoule de 1 watt pendant moins d'un millionième de seconde.

Compte tenu de ces propriétés, la nature de l'énergie noire est énigmatique. Une possibilité émerge naturellement dans le cadre de la théorie quantique des champs, qui décrit les interactions fondamentales en combinant la notion de champ – tel le champ électromagnétique – et les règles de la physique quantique. Ainsi, le modèle standard de la physique des particules est formulé dans le cadre d'une théorie quantique des champs. Il est testé notamment dans les accélérateurs de particules tels que le LHC au Cern; les

- observations s'accordent avec une grande précision aux calculs théoriques du modèle.

Dans le cadre de la théorie quantique des champs, on montre que, même en l'absence de matière, tout volume d'Univers doit contenir une certaine énergie (on parle d'énergie du vide) et une pression, dues aux fluctuations quantiques du vide et qui sont compatibles avec les caractéristiques de la constante cosmologique.

UN PROBLÈME DE 120 ORDRES DE GRANDEUR

L'énergie du vide pourrait donc résoudre la question de la nature de l'énergie sombre, mais la valeur que l'on calcule pour la densité d'énergie du vide et celle requise pour l'énergie sombre de la cosmologie sont incompatibles. Une estimation simple indique que l'énergie du vide dans un volume égal à celui d'une piscine olympique devrait suffire à pourvoir aux besoins énergétiques de l'humanité pendant 10^{97} ans! Ce résultat est supérieur de plus de 120 ordres de grandeur à ce qui est nécessaire selon les observations cosmologiques.

Comment résoudre ce problème? En réalité, les physiciens ne savent pas calculer rigoureusement la valeur de l'énergie du vide dans le cadre de la théorie quantique des champs. Par ailleurs, il est possible d'obtenir une valeur en accord avec les observations cosmologiques en la fixant «à la main», par l'ajustement de certains paramètres. Mais aucun principe connu ne justifie ce qui apparaît alors comme un tour de passe-passe et qui nécessite un ajustement extrêmement fin des paramètres (à plus de 120 décimales près si l'on considère le calcul simple mentionné plus haut). C'est ce que l'on nomme le premier problème de la constante cosmologique.

Un second problème apparaît lorsqu'on constate que la densité d'énergie associée à la constante cosmologique dans l'Univers aujourd'hui est du même ordre que celle de la matière (ordinaire et noire), alors même que le rapport de ces deux densités d'énergie a changé au cours de l'histoire cosmique. Il semble donc que l'humanité soit apparue à un moment particulier de l'histoire de l'Univers, celui où ces deux densités d'énergie sont proches. Certains chercheurs s'efforcent d'expliquer cette «coïncidence cosmique» qui traduit aussi le fait que l'accélération cosmique n'a débuté que récemment dans l'histoire de l'Univers.

Plusieurs approches ont été suivies pour tenter de résoudre les problèmes posés par la constante cosmologique. Mais avant d'en décrire certaines, précisons qu'aucune n'est unanimement partagée.

Le premier problème de la constante cosmologique a été énoncé bien avant la découverte de l'accélération de l'expansion cosmique, et à une époque où l'on penchait pour une décélération de l'expansion cosmique, avec une constante

cosmologique nulle. La densité d'énergie du vide calculée devait donc être nulle, ce que contredisait l'estimation évoquée précédemment. Pour y remédier, une idée était d'introduire une nouvelle symétrie en théorie quantique des champs, qui impose que cette valeur soit nulle sans avoir à faire des ajustements artificiels. Notons que si une telle symétrie existait, elle pourrait aussi conduire à une faible valeur qui suffirait à expliquer l'expansion accélérée de l'Univers. Il suffit pour cela de supposer que la symétrie est légèrement brisée dans l'Univers.

Une telle symétrie est par exemple la «supersymétrie», qui stipule que chaque particule du modèle standard a un «superpartenaire». Ces particules appariées ont la même masse mais des spins différents et leurs contributions à l'énergie du vide s'annulent mutuellement. Ainsi, l'énergie totale du vide serait nulle. Malheureusement, l'Univers ne semble pas supersymétrique, puisque l'électron, par exemple, n'a pas de superpartenaire de même masse. Si la supersymétrie existe, elle est nécessairement brisée et les superpartenaires ont alors une masse plus élevée. Cependant, le degré de brisure requis par la physique des particules est trop important pour résoudre le problème de l'énergie du vide. Notons en revanche que la supersymétrie, brisée, pourrait apporter une solution au problème de

Avec l'inflation éternelle, des bulles d'univers peuvent apparaître aléatoirement

la matière noire. Les particules supersymétriques sont activement recherchées, en particulier au LHC, mais aucune n'a été découverte pour le moment, ce qui met de nombreux modèles de matière noire sous tension.

Les théoriciens ne parviennent pas à résoudre les problèmes soulevés par la constante cosmologique, une situation d'autant plus frustrante que les observations indiquent une valeur non nulle de cette constante. D'autres pistes sont cependant explorées, à la recherche



La théorie du multivers suppose que des bulles-univers ont des constantes fondamentales différentes, fixées aléatoirement lors de leur formation. Dans ce cadre, certains physiciens ont recours au principe anthropique pour expliquer la valeur de l'énergie du vide : la bulle-univers dans laquelle nous sommes a les bons paramètres pour que la vie se soit développée.

d'autres contenus matériels qui produiraient une expansion cosmique accélérée. On désigne ainsi sous le terme générique de « quintessence » de tels composants matériels. Par exemple, l'existence d'un champ « scalaire » (c'est-à-dire dont le spin est nul, tel le champ de Higgs associé au boson de Higgs) peut conduire à une accélération de l'expansion cosmique.

Les modèles de quintessence sont compatibles avec les observations, mais l'évolution temporelle de la quintessence diffère légèrement de celle de la constante cosmologique. De futurs programmes d'observation affineront les diverses mesures astrophysiques pour trancher entre la constante cosmologique et les champs scalaires. On attend beaucoup en particulier de l'observatoire spatial européen *Euclid*, qui doit être lancé en 2022.

Un paramètre que l'on cherche ainsi à mesurer avec toujours plus de précision est le rapport entre la densité de l'énergie sombre et sa pression (dans des unités choisies pour rendre ce rapport adimensionnel). Ce paramètre, nommé paramètre d'état de l'énergie sombre et noté en général w , est égal à -1 pour une constante cosmologique. Il diffère en général de -1 pour un modèle de quintessence. Lorsque c'est le cas, la densité d'énergie associée n'est plus constante, mais varie au cours de l'histoire cosmique. C'est cette variation dans le temps que les cosmologistes veulent mettre en évidence.

Les modèles de quintessence ne parviennent en général pas à expliquer le premier problème de la constante cosmologique. Mais certains

pourraient apporter un éclairage intéressant sur le second problème *via*, par exemple, un couplage entre le champ scalaire et la matière ordinaire ou noire, et qui expliquerait le fait que les densités d'énergie de quintessence et de matière sont du même ordre de grandeur aujourd'hui. Grâce à un tel couplage, la densité d'énergie de la quintessence est corrélée lors de l'histoire cosmique avec celle de la matière.

L'APPROCHE ANTHROPIQUE

Une autre voie qui a le mérite de résoudre les deux problèmes à la fois est une approche anthropique conçue en particulier par l'Américain Steven Weinberg (Prix Nobel de physique en 1979). D'après cette idée, la valeur de la constante cosmologique est fixée librement au début de l'histoire de l'Univers. En imaginant tous les univers possibles, seuls ceux où cette valeur est proche ou inférieure à celle observée aujourd'hui permettent le développement de la vie telle que nous la connaissons. En effet, dans un univers où la constante cosmologique serait très supérieure à celle que nous inférons aujourd'hui, l'accélération de l'expansion cosmique aurait commencé trop tôt pour que se forment des structures telles que des étoiles ou des galaxies riches en éléments chimiques complexes. Dans un tel univers, la vie telle que nous l'observons n'aurait pas pu apparaître. Comme nous existons, il est normal d'observer une faible valeur (éventuellement nulle) de la constante cosmologique.

Depuis l'idée de Steven Weinberg, la théorie des supercordes et certains modèles d'inflation cosmique (nommés « inflation éternelle ») ont renforcé cette explication anthropique en fournissant un cadre théorique expliquant comment la valeur de la constante cosmologique pourrait avoir été « tirée au sort » dans les premiers instants de l'Univers. En effet, la théorie des supercordes conduit à penser que les valeurs de certains paramètres qui nous apparaissent comme des constantes de la nature peuvent varier dans l'Univers très primordial et se fixer parmi un très grand nombre de possibilités. Chaque combinaison donne un univers aux propriétés physiques différentes.

Par ailleurs, dans les scénarios d'inflation éternelle, qui peuvent également être incorporés dans certains modèles issus des supercordes, des bulles d'univers où les constantes de la nature prennent des valeurs différentes peuvent apparaître aléatoirement. Elles sont d'abord microscopiques, puis enflent jusqu'à devenir des univers séparés causalement les uns des autres. Chaque univers possède alors son propre jeu de paramètres et seuls certains sont compatibles avec la vie (voir la figure ci-dessus).

Aussi élégantes qu'elles soient, ces idées ne font pas consensus, pour plusieurs raisons. D'une part, la règle du jeu n'est pas claire : ➤

➤ comment séparer les paramètres que l'on est autorisé à faire varier, et pour lesquels on peut éventuellement donner une explication anthropique, des autres paramètres pour lesquels il pourrait exister une autre explication? Doit-on aussi faire varier la forme des lois physiques? D'autre part, personne ne sait comment calculer avec rigueur des probabilités d'apparition de la vie en tenant compte de l'ensemble des univers possibles. Enfin, on ne voit pas bien comment on pourrait réfuter une telle explication. Il se pourrait cependant que cela soit en effet la bonne réponse.

Les modèles de constante cosmologique et de quintessence supposent que les lois de la gravitation, aux plus grandes échelles, sont bien décrites par la relativité générale. Mais peut-être la gravitation suit-elle d'autres lois aux échelles cosmologiques?

Les physiciens ont souvent rencontré des situations où l'existence de constituants «sombres» était conjecturée à partir de leur influence gravitationnelle. Cela a conduit à la détection de nouveaux objets ou à la modification de la théorie de la gravitation. Au XIX^e siècle, par exemple, la planète Neptune a été découverte grâce aux calculs de l'astronome Urbain Le Verrier, qui avait supposé sa présence pour expliquer des anomalies dans la trajectoire d'Uranus.

Le Verrier tenta de renouveler son exploit pour expliquer certaines caractéristiques du mouvement de Mercure. Ce fut un échec, et les anomalies de la trajectoire de la planète furent expliquées par une nouvelle théorie de la gravitation: la relativité générale d'Einstein. La cosmologie actuelle est face à un dilemme analogue: sauver les lois de la gravitation par l'introduction de composants sombres (matière noire et énergie sombre) ou bien tenter de modifier ces lois pour expliquer les observations.

MODIFIER LA GRAVITATION...

Par exemple, Mordehai Milgrom, de l'institut Weizmann, en Israël, a proposé en 1983 un cadre théorique assez séduisant pour éviter l'hypothèse de la matière noire. Les lois de la gravitation sont modifiées quand l'accélération d'un corps est plus faible qu'une valeur critique. Mais le modèle a ses propres difficultés.

Pour ma part, alors que je travaillais à l'université de New York en 2001, j'ai remarqué que le modèle dit «DGP», proposé peu de temps auparavant par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati, également à l'université de New York, fournit une alternative intéressante à l'idée d'énergie sombre. Dans ce modèle, qui suppose en particulier l'existence de dimensions d'espace supplémentaires, la gravitation d'Einstein est modifiée à très grande distance et une accélération cosmique peut apparaître sans qu'il y ait besoin d'une constante cosmologique non nulle (voir l'encadré page ci-contre).

Ce modèle a suscité un regain d'intérêt pour la recherche d'une «gravité massive» où le graviton, l'hypothétique particule médiatrice de la force gravitationnelle, a une masse non nulle. La relativité générale implique que le graviton est de masse nulle. L'interaction a alors une portée infinie et se propage à la vitesse de la lumière. Dans le cas du modèle DGP, le graviton est la seule particule capable de se propager dans la dimension supplémentaire. De façon générale, des particules qui évoluent dans une dimension supplémentaire sont perçues comme un ensemble de particules massives par un observateur qui n'a pas accès à cette dimension. Les gravitons massifs du modèle DGP conduisent à grande distance à une déviation par rapport à la théorie d'Einstein.

On peut d'ailleurs remarquer qu'Einstein liait (à tort) l'introduction de la constante cosmologique et un potentiel gravitationnel semblable à celui créé par un graviton massif. Il existe donc un lien historique entre la constante cosmologique et la gravité massive. Le modèle DGP et sa cosmologie fournirent le premier cadre proposant explicitement un lien entre accélération cosmique et modification à grande distance de la gravitation. Cependant, ce modèle n'est pas pleinement satisfaisant, puisqu'il rencontre des difficultés théoriques et observationnelles. Il a néanmoins attiré l'attention de certains physiciens qui s'en sont inspirés.

Le modèle DGP conduit à une théorie où le graviton serait de masse non nulle

En particulier, il a conduit à tenter de construire une théorie relativiste de la gravitation où le graviton serait de masse non nulle. L'une des motivations est que cette masse, qui peut jouer un rôle analogue à celui de la constante cosmologique, peut être «protégée» par une symétrie et donc avoir une valeur naturellement petite, ce qui évite tout écart par rapport à la relativité générale sur de faibles distances.

LE MODÈLE DGP

Les modèles d'univers dotés de dimensions supplémentaires peuvent offrir des solutions au problème de l'expansion accélérée de l'Univers. Celui développé par Gia Dvali, Gregory Gabadadze et Massimo Porrati modifie les lois de la gravitation. Ces trois physiciens de l'université de New York ont construit un modèle d'univers, noté DGP, qui ajoute une unique dimension d'espace aux quatre dimensions de l'espace-temps usuel.

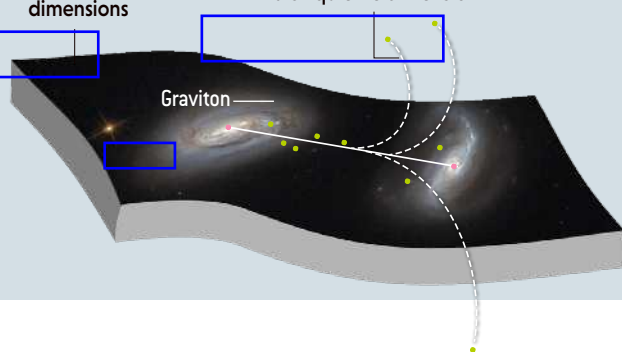
Dans la plupart des modèles, les dimensions supplémentaires sont compactifiées : elles sont si petites qu'elles ne sont pas discernables. Dans le modèle DGP, la cinquième dimension s'étend à l'infini, mais seuls les gravitons – les particules qui véhiculent l'interaction gravitationnelle – peuvent s'y propager. Les autres particules ne peuvent échapper à l'espace-temps usuel et, ainsi, la dimension supplémentaire échappe à nos sens

mais peut être révélée via son effet sur la gravitation.

Les implications cosmologiques sont importantes. À petite échelle, la probabilité que les gravitons s'échappent est faible. Ainsi, les équations de la relativité générale reproduisent correctement les lois de la gravitation. À plus grande échelle, une certaine quantité de gravitons fuient dans la cinquième dimension (voir la figure). À de telles distances, les équations de la relativité générale ne décrivent donc plus correctement les interactions gravitationnelles. L'effet gravitationnel de la matière à grande échelle, qui est surestimé si l'on suppose que la relativité générale est valide sur de telles distances, donne l'impression que l'Univers a une vitesse d'expansion qui augmente. Ce résultat a trouvé de nombreux échos chez les cosmologistes, mais le modèle DGP présente plusieurs difficultés théoriques et expérimentales.

Univers à quatre dimensions

Graviton s'échappant dans la cinquième dimension



montré que le problème du modèle venait du traitement linéaire. Il a suggéré qu'un traitement non linéaire pouvait résoudre le problème observationnel, mais d'autres difficultés théoriques ont surgi ensuite.

... AVEC UN GRAVITON MASSIF

Après le modèle DGP, un premier progrès important a été fait en 2009-2010 où j'ai pu montrer, en collaboration avec Eugeny Babichev et Riad Ziour, que les idées de Vainshtein fonctionnaient bien comme prévu. À peu près en même temps, en se fondant sur les travaux liés au modèle DGP, Claudia de Rham, alors à l'université de Genève, G. Gabadadze et Andrew Tolley, de l'université Case Western Reserve, aux États-Unis, ont construit un modèle à graviton massif qui semble dénué des problèmes de ses prédécesseurs. Ce modèle est toujours à l'étude, en particulier ses conséquences cosmologiques.

Il faut souligner qu'il est très difficile de modifier la relativité générale à grande distance tout en restant en accord avec les différents tests de cette théorie, et il est encore plus difficile de trouver une théorie qui reproduise les différentes propriétés observables de l'énergie sombre et, plus encore, de la matière noire.

Pour l'instant, aucune des approches mentionnées, ainsi que d'autres que nous n'avons pas évoquées (comme celles qui consistent à renoncer en partie au principe cosmologique, ou à tenter d'expliquer l'accélération cosmique par l'effet des hétérogénéités de matière), ne fait l'unanimité, d'autant que le modèle de la constante cosmologique a la vertu de la simplicité et est bien compatible avec les données. Mais les problèmes qu'il pose, on l'a vu, ont engendré bien des travaux qui ont eu aussi le mérite de pousser à mieux comprendre le modèle cosmologique standard.

Les données à venir, notamment celles des grands programmes d'observation tels que *Euclid*, devraient permettre d'invalider un certain nombre d'approches et de mieux comprendre les propriétés mystérieuses de l'énergie sombre et de la gravitation aux très grandes distances. D'ores et déjà, nombre de modèles de gravitation modifiée ont pu être exclus grâce à l'observation des ondes gravitationnelles par la collaboration *Ligo-Virgo* en 2015. En particulier, une contrainte très forte est venue de l'observation d'une fusion d'étoiles à neutrons à la fois par le canal des ondes gravitationnelles et par le canal des ondes électromagnétiques. Cette observation, lors de l'été 2017, a montré que la vitesse de propagation des ondes gravitationnelles ne pouvait pas différer beaucoup de celle de la lumière contrairement à ce qui était prévu par un certain nombre de modèles. Cette faculté d'exclure des modèles de gravité modifiée par des observations n'est pas la moindre de leur vertu. ■

BIBLIOGRAPHIE

C. DE RHAM ET AL., Resummation of massive gravity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, 231101, 2011.

G. BÖRNER, L'énergie sombre et ses alternatives, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

C. DEFFAYET ET AL., Accelerated universe from gravity leaking to extra dimensions, *Phys. Rev. D*, vol. 65, 044023, 2002.

G. DVALI ET AL., 4D gravity on a brane in 5D Minkowski space, *Phys. Lett. B*, vol. 485, n° 1-3, pp. 208-214, 2000.

Construire une théorie relativiste de la gravitation intégrant un seul graviton massif (et non une infinité comme dans le modèle DGP) et dépourvue de problème grave est longtemps resté un défi. Les premiers essais sont même antérieurs à DGP et datent de 1939, avec Markus Fierz et Wolfgang Pauli. Ces physiciens suisses ont introduit une masse pour le graviton de la relativité générale de façon perturbative, c'est-à-dire en ajoutant des termes linéaires de faibles valeurs. Mais en 1970, les physiciens Hendrik van Dam, Martinus Veltman et, indépendamment, Vladimir Zakharov ont montré que le modèle de Fierz et Pauli ne redonnait pas les équations de la relativité générale lorsqu'on faisait tendre la masse du graviton vers zéro. La théorie restait cohérente, mais elle s'accompagnait d'effets mesurables qui n'ont pas été observés. Deux ans plus tard, Arkady Vainshtein a



Petite excursion dans le cosmos

NEIL DEGRASSE TYSON
ÉDITIONS BELIN, 2017
(160 PAGES, 14,90 EUROS)

Vérifiez bien vos poches. Vous n'avez rien oublié? Alors c'est parti pour une petite excursion dans le cosmos afin de comprendre les mystères de l'Univers...

Dans son style caractéristique, mélange d'érudition, d'humour et d'intelligence, la star de l'astrophysique sait mettre à la portée du plus grand nombre l'essentiel des grands mystères du cosmos, du Big Bang aux trous noirs, des quarks à la mécanique quantique. Un livre indispensable pour acquérir le b.a.-ba de toutes les découvertes qui fondent notre compréhension actuelle de l'Univers.



Chroniques de l'espace

JEAN-PIERRE LUMINET
LE CHERCHE-MIDI / FRANCE INTER, 2019
(180 PAGES, 14,80 EUROS)

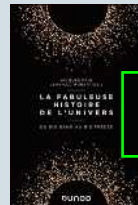
Il y a cinquante ans, un homme a marché sur la Lune. L'auteur a commémoré cette prouesse par des chroniques sur France Inter tout l'été 2019. Elles sont désormais éditées. Jean-Pierre Luminet y retrace la fabuleuse épopée de l'exploration spatiale et nous invite également à voyager dans le futur et dans tout l'Univers. Le message est important : le véritable, grand et noble objectif de l'exploration spatiale n'est pas de conquérir, mais de comprendre. Et en comprenant ce qui nous est étranger et si lointain, nous nous comprenons mieux nous-mêmes, en vue de construire un monde meilleur.



L'insoutenable gravité de l'univers

GABRIEL CHARDIN
LE POMMIER, 2018
(464 PAGES, 25,00 EUROS)

Plus d'un siècle après la construction par Einstein de la théorie de la relativité générale, la gravitation reste une énigme. Alors que c'est la force la plus immédiate à nos sens! La découverte des ondes gravitationnelles, témoins des premiers instants de l'Univers, constitue une nouveauté forte, mais les résultats obtenus sont difficiles à expliquer par le modèle cosmologique standard, censé décrire l'Univers de la façon la plus précise possible... Et s'il fallait carrément changer de modèle d'Univers pour résoudre l'énigme?



La fabuleuse histoire de l'univers

JACQUES PAUL ET JEAN-LUC ROBERT-ESILI
DUNOD, 2019
(336 PAGES, 19,90 EUROS)

D'où viennent les étoiles et les planètes? Qu'est-ce que l'horizon d'un trou noir? L'Univers est-il infini? Depuis que nous avons conscience du monde, nos regards sont tournés vers le ciel, cherchant des réponses. Du début de son expansion, il y a 13,8 milliards d'années, au froid absolu de ses derniers instants, les auteurs racontent la fabuleuse l'histoire de notre Univers. Plongez dans ce livre et laissez-vous guider à la découverte des mystères du Cosmos ainsi que des efforts de l'humanité pour l'explorer.



JEUNESSE

Atlas des aventures spatiales

STUDIO MUTI
LA MARTINIÈRE JEUNESSE, 2019
(56 PAGES, 14,50 EUROS)

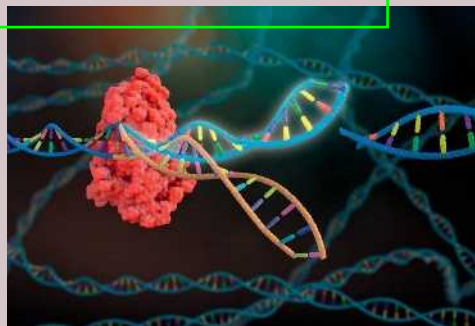
Partez pour un incroyable voyage dans l'espace. Après l'exploration du Soleil et de la Lune, traversez le système solaire et notre galaxie, apprenez les origines de l'Univers et du temps lui-même. Cet ouvrage invite les lecteurs à imaginer ce que pourrait devenir le tourisme spatial, explore des concepts tels que la gravité, la vitesse de la lumière et la relativité. L'atlas est en lien avec une application gratuite qui contient plus de cinquante vidéos de la Nasa, de l'ESA et de l'ESO pour plonger le lecteur au cœur de l'espace.

RENDEZ-VOUS

P. 110

REBONDISSEMENTS

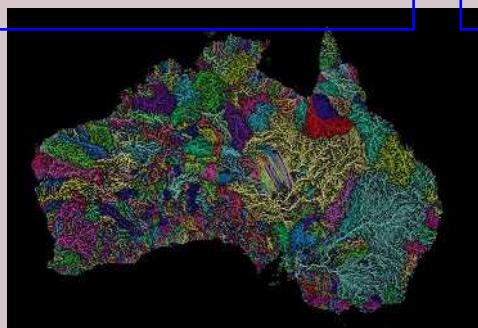
DES ACTUALITÉS SUR
DES SUJETS ABORDÉS
DANS LES HORS-SÉRIES PRÉCÉDENTS



P. 114

DONNÉES À VOIR

DES INFORMATIONS
SE COMPRENNENT MIEUX
LORSQU'ELLES SONT MISES EN IMAGES



P. 116

LES INCONTOURNABLES

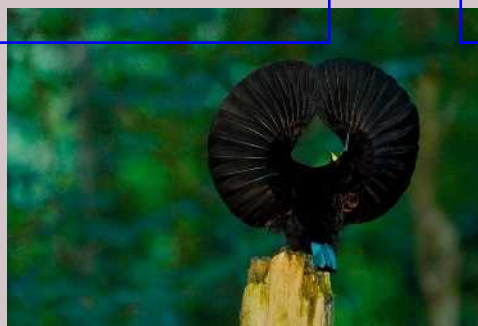
DES LIVRES, DES EXPOSITIONS,
DES SITES INTERNET, DES VIDÉOS,
DES PODCASTS... À NE PAS MANQUER



P. 118

SPÉCIMEN

UN ANIMAL ÉTONNANT CHOISI
PARMI CEUX PRÉSENTÉS SUR
LE BLOG «BEST OF BESTIOLES»



P. 120

ART & SCIENCE

COMMENT UN ŒIL SCIENTIFIQUE
OFFRE UN ÉCLAIRAGE INÉDIT
SUR UNE ŒUVRE D'ART



HORS-SÉRIE N° 105 : GÉNÉTIQUE

CRISPR-Cas9 : première application en cancérologie

L'outil d'édition du génome permet désormais d'améliorer l'efficacité du système immunitaire de malades atteints d'un cancer. Le début d'une révolution ?

L'outil CRISPR-Cas9, dérivé d'un système de défense bactérien, rend possible n'importe quelle manipulation génétique, avec une facilité déconcertante.

Le Hors-Série n° 105 : « Qui sommes-nous ? Les nouvelles réponses de la génétique » détaillait les espoirs mais aussi les craintes suscitées par cette révolution technologique. Dans le domaine du cancer notamment, on imagine moult applications : les résultats des premières commencent à arriver. Ainsi, le 7 décembre, Edward Stadtmauer, du centre Abramson de cancérologie de l'université de Pennsylvanie, aux États-Unis, a présenté à Orlando, lors d'un congrès d'hématologie, les résultats qu'il a obtenu avec ses collègues de l'institut d'immunothérapie contre le cancer Parker et de la société Tmunity Therapeutics.

Ils ont utilisé CRISPR-Cas9 pour améliorer l'efficacité des cellules immunitaires de trois patients atteints d'un cancer (un myélome multiple pour deux d'entre eux et un sarcome pour l'autre). Plus précisément, la technique employée s'apparente à celle des CAR T cells : l'idée est de prélever des lymphocytes T des malades, puis, en laboratoire, de les doter via une manipulation génétique, d'un récepteur capable reconnaître une cible, en l'occurrence des protéines exprimées à la surface de cellules cancéreuses. Les lymphocytes modifiés sont

ensuite réinjectés aux patients chez qui ils aident à éliminer les tumeurs.

Les travaux présentés à Orlando s'écartent de ce principe à plusieurs niveaux. D'abord, les lymphocytes T ont été modifiés grâce à CRISPR-Cas9, et non pas aux techniques classiques d'édition des gènes. Ensuite, les chercheurs n'ont pas cherché à développer un récepteur particulier. Ils ont plutôt choisi d'éteindre les gènes, d'une part, d'un récepteur naturel des lymphocytes T afin d'optimiser le ciblage des cellules cancéreuses et, d'autre part, de la protéine PD-1, un récepteur qu'activent les cellules cancéreuses pour bloquer le système immunitaire et l'empêcher de reconnaître les cellules anormales.

Les lymphocytes T ainsi transformés par CRISPR-Cas9 sont plus à même de remplir leur fonction : éliminer les cellules tumorales. Les premiers essais de phase I ont montré qu'aucun effet secondaire n'était à déplorer et invitent les chercheurs à persévérer dans cette voie prometteuse.

C'est sans doute l'un des premiers pas (d'autres ont été franchis en Chine, notamment avec des travaux en cours contre le cancer du poumon) d'une conquête de la cancérologie par CRISPR-Cas9. ■

LE COMMUNIQUÉ : [HTTP://BIT.LY/PENN-CRISPR](http://bit.ly/penn-crispr)



Grâce à CRISPR-Cas9, on peut modifier des lymphocytes T de façon à les rendre plus efficaces contre le cancer.

Les gènes inconnus d'Ouganda

Les études de génomique humaine, par exemple celles décrites dans le Hors-Série n° 105 : « Qui sommes-nous ? »

Les nouvelles réponses de la génétique souffrent d'un biais. Elles se fondent sur un échantillon peu représentatif de la population mondiale, le plus souvent issu des seuls pays dits « occidentaux ». C'est passer à côté d'une riche diversité, comme le montrent les travaux de Deepti Gurdasani, de l'université Queen Mary, à Londres, et de ses collègues. Ils ont analysé l'ADN de plus de 6 000 individus vivant dans des communautés rurales du sud de l'Ouganda. Quelque 29 % des variants génétiques qu'ils y ont découverts étaient inconnus. Parmi les nouveaux variants identifiés, certains confèrent une protection contre le paludisme : ce faisant, ils modifient un marqueur sanguin utilisé mondialement pour diagnostiquer le diabète. Les tests seraient donc moins fiables pour les porteurs de ce variant. Un plaidoyer pour une recherche génétique ne négligeant personne !

D. GURDASANI ET AL., CELL, VOL. 179 (4), PP. 984-1002, 2019

Une mémoire dynamique

La mémoire à long terme est l'une des nombreuses mémoires dont nous disposons. Elles étaient décrites dans le Hors-Série n° 102 : « Les mutations de notre mémoire ». Comment fonctionne-t-elle ? Yi Zhong, de l'université Tsinghua, à Pékin, en Chine, et ses collègues ont élucidé un mécanisme du maintien des souvenirs. Ils ont montré qu'il s'agit d'un processus dynamique fondé sur un équilibre entre un renforcement et un affaiblissement d'un souvenir. Deux gènes clés ont été identifiés : Rac1 participe à l'oubli tandis que alpha2-chimaerin, en inhibant le précédent, a l'effet inverse. Une conclusion s'impose : rien n'est jamais inscrit à jamais dans notre mémoire.

L. LV ET AL., NATURE COMMUNICATIONS, VOL. 10, ART. 5313, 2019

Un jeu de taquin bien taquin

Les nombres se nichent partout, et notamment dans de nombreux jeux, les articles du *Hors-Série* n° 103: «L'ordre caché des nombres» en faisaient la démonstration. Ainsi en va-t-il du jeu de taquin, constitué de 15 petits carreaux numérotés qui, en les faisant glisser dans un cadre prévu pour 16, doivent être remis dans l'ordre. Depuis son invention, en 1870, aux États-Unis, il a fait l'objet de nombreuses études mathématiques, parfois dans une version généralisée (de $n \times n$ cases, plutôt que 4×4), pour par exemple minimiser le nombre de déplacements nécessaires à sa résolution à partir des plus de 10^{13} dispositions solubles pour $n = 4$ (il en existe autant d'insolubles).

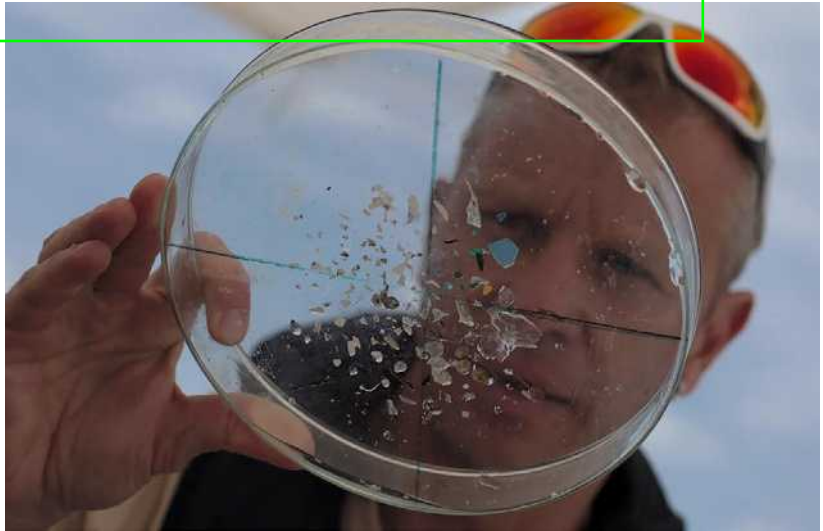
Yang Chu et Robert Hough, de l'université de Stony Brook, dans l'État de New York, ont pris le problème à l'envers: combien de déplacements faut-il pour donner à un jeu ordonné une configuration aléatoire? Le mathématicien et magicien américain Persi Diaconis avait conjecturé en 1988 qu'il fallait n^3 déplacements. Rendre aléatoire un jeu de taquin se fait pas à pas, l'ordre disparaissant progressivement. Pour étudier un tel phénomène, où un état du jeu donné ne dépend que du précédent, l'outil mathématique adapté est la chaîne de Markov. Plus précisément, les mathématiciens se sont intéressés aux matrices de transition qui rendent compte, dans les chaînes de Markov, de la probabilité de passer d'une configuration à une autre. En les analysant, ils ont montré que le nombre de déplacements nécessaires à «randomiser» un jeu est de n^4 , lorsque par «aléatoire», on entend la définition suivante: chaque carreau numéroté a autant de chances de se retrouver à un emplacement donné que les autres. C'est encore plus ($n^4 \log n$) avec une définition plus stricte. Dans tous les cas, c'est plus long que ne le prévoyait Persi Diaconis.

À quoi bon s'adonner à de tels travaux anodins? C'est que des processus similaires au brouillage du jeu de taquin sont à l'œuvre dans des phénomènes importants, comme la fonte des glaces, l'apparition de mutations dans l'ADN... mais je vous taquine! ■

LA PUBLICATION DE Y. CHU ET R. HOUGH:
[HTTPS://ARXIV.ORG/ABS/1908.07106](https://arxiv.org/abs/1908.07106)

Remonter le cours du plastique

La fondation Tara Océan a étudié les neuf principaux fleuves d'Europe: tous sont contaminés par le plastique qui se déverse ensuite dans les océans.



La pollution par le plastique des océans dans les fleuves qui s'y déversent.

Le *Hors-Série* n° 104: «Océans. Le dernier continent à explorer» alertait sur la pollution des mers par le plastique, qui ne cesse de s'intensifier. Les fleuves ne sont pas en reste, la dernière expédition de la fondation Tara Océan, coordonnée par le CNRS, vient de le montrer. La goélette Tara a sillonné pendant six mois les façades maritimes européennes permettant à son équipage d'analyser quelque 2 700 échantillons prélevés en 45 sites dans 9 fleuves importants. Les résultats sont sans appel: les microplastiques sont omniprésents, pas un des échantillons n'en était exempt! C'est une mauvaise nouvelle tant ces débris ont un impact important sur toute la chaîne alimentaire.

On retrouve des microbilles en provenance de certains cosmétiques et dentifrices... ainsi que des fragments de quelques millimètres nés de la décomposition de déchets plastiques sous l'effet du soleil et du brassage mécanique par l'eau. C'est un premier enseignement, car on imaginait que cette transformation avait lieu en mer. Elle est plus précoce que prévue.

Autre nouvelle d'importance, nombre de ces microplastiques captent et concentrent les polluants qu'ils rencontrent dans l'eau. Ainsi, ils ne sont pas simplement une source de substances toxiques, quand ils les relarguent une fois immergés, mais aussi un véhicule emportant vers les océans des composés néfastes présents dans les fleuves (pesticides, hydrocarbures, métaux lourds...).

Les analyses vont se poursuivre afin de remonter les voies principales de pollution, et éventuellement, les contrer. Les mécanismes de la fragmentation seront aussi explorés. Par ailleurs, des travaux de séquençage s'attacheront à identifier la «plastisphère», c'est-à-dire l'ensemble des microorganismes qui colonisent ces minuscules bouts de plastiques. En fin de compte, les microplastiques forment un triple polluant: le plastique en lui-même, les composés toxiques charriés et les microorganismes parfois toxiques embarqués.

Pour rappel, chaque année, 8 millions de tonnes de plastiques sont rejetées en mer, dont 80% proviennent des terres. ■

LE COMMUNIQUÉ DE TARA: [HTTP://BIT.LY/TARA-MIC](http://bit.ly/tara-mic)

HORS-SÉRIE N° 102 : MÉMOIRE

Alzheimer, une nouvelle cause identifiée

Les particules fines émises par les voitures et les usines augmenteraient le risque de développer la maladie d'Alzheimer.

Les médecins n'ont cessé de comprendre les causes de la maladie d'Alzheimer et le *Hors-Série* n° 102 : «Les mutations de notre mémoire» relate par le détail leurs efforts. Diana Younan, de l'université de Californie du Sud, à Los Angeles, et ses collègues ont exploré une piste inédite : l'influence des particules fines présentes dans l'atmosphère.

Près de 1000 femmes, âgées de 73 à 87 ans, suivies par imagerie médicale (IRM) dans le cadre d'études au long cours (inscrites dans le programme Women's Health Initiative) ont été sollicitées. À partir des données de l'Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative (qui collecte en grand nombre d'informations relatives à la maladie), un algorithme d'apprentissage automatique a attribué à chacune des participantes, sur la base de ses IRM, une «note» évaluant son profil Alzheimer, soit une estimation du risque de développer la maladie. Par ailleurs, à partir des témoignages (lieux de vie, déménagements...) et de données publiques, les chercheurs ont reconstitué l'environnement atmosphérique des femmes afin de déterminer une concentration moyenne (sur trois ans) de particules fines auxquelles elles ont été exposées.

Rappelons que les particules sont dites fines lorsque leur diamètre est inférieur à 2,5

micromètres (soit 1/30^e de la largeur d'un cheveu humain). Elles sont émises principalement par les gaz d'échappement des voitures et des usines. Ces polluants sont connus pour favoriser l'asthme, les maladies cardiovasculaires, les maladies pulmonaires...

L'équipe de Diana Younan montre que plus la concentration de particules fines subies est élevée, plus la mémoire immédiate et les processus d'apprentissage des femmes suivies sont altérés. Le risque de maladie d'Alzheimer augmente également, et ce, même en écartant l'effet d'autres facteurs, comme le tabagisme, les niveaux de revenus et d'éducation, les antécédents d'accidents vasculaires cérébraux. L'exposition aux particules fines favorise bel et bien, en elle-même, le déclin cognitif. Elles pénétreraient dans le cerveau, en franchissant la barrière hématoencéphalique et provoqueraient une atrophie de la matière grise (le cœur des neurones du cerveau).

Selon Andrew Petkus, l'un des auteurs de l'étude, ces résultats apportent une nouvelle pièce au puzzle que constitue la maladie d'Alzheimer, en identifiant un nouveau facteur de risque. Protégez-vous, respirez de l'air pur! ■

D. YOUNAN ET AL., *BRAIN*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2019

Alerte pollution! Les particules fines endommagent le cerveau et nuisent à la mémoire, voire favorisent le développement de la maladie d'Alzheimer.

La troisième somme de trois cubes de 3

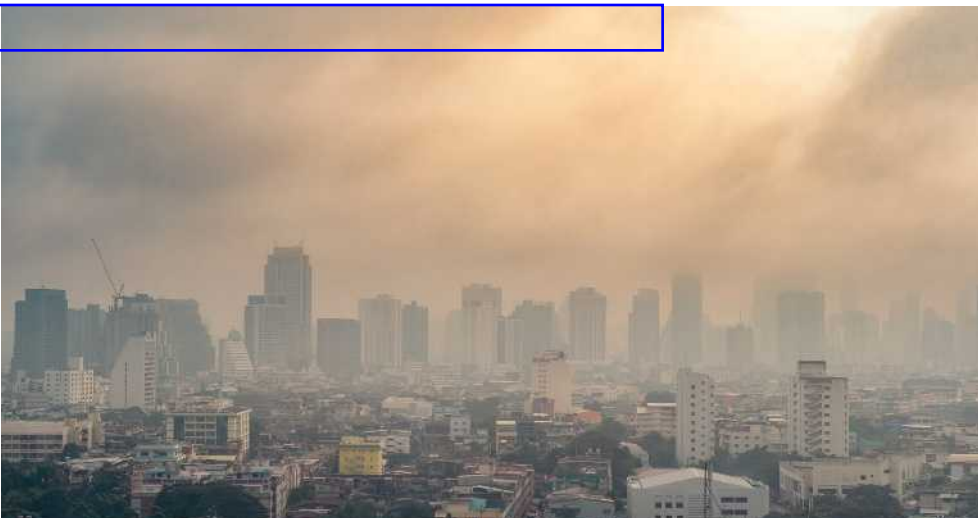
Un simple nombre, voire un chiffre est capable de mettre en émoi la communauté des mathématiciens, plusieurs exemples figuraient dans le *Hors-Série* n° 103 : «L'ordre caché des nombres». Un exemple ? 3 ! Oui, 3. Les mathématiciens Andrew Booker et Andrew Sutherland viennent de découvrir une nouvelle façon de l'exprimer comme la somme de trois cubes. Les deux premières sont simples : $3 = 1^3 + 1^3 + 1^3 = 43 + 43 + (-5)^3$. La troisième l'est un peu moins... car elle recourt à des nombres de 19 à 21 chiffres ! Les techniques employées avaient récemment fait leurs preuves avec 33 et 42, les deux seuls nombres inférieurs à 100 pour lesquels on ne connaissait pas la somme de trois cubes correspondante. Peut-être y en a-t-il une quatrième, à vous de jouer !

LA VIDÉO OÙ LES RÉSULTATS SONT PRÉSENTÉS : [YOUTUBE/GXH7ZAEM7KO](https://youtu.be/GXH7ZAEM7KO)

Des antibiotiques à la mer

Les océans sont une source inépuisable de composés, le *Hors-Série* n° 104 : «Océans. Le dernier continent à explorer» en apportait la preuve. Les résultats de Christian Jogler, de l'université Radboud, à Nijmegen, aux Pays-Bas le confirment. Avec ses collègues, ils se sont intéressés aux planctomycètes, des bactéries aquatiques, dont ils ont réussi à cultiver 79 souches, déjà une prouesse en soi. Premier résultat, plusieurs mécanismes de division identifiés sont inédits. En outre, parmi les composés fabriqués par ces microorganismes, plusieurs sont dotés de propriétés antibactériennes. Les planctomycètes gagnent à être connus !

S. WIEGAND ET AL., *NATURE MICROBIOL.*, PRÉPUBLICATION EN LIGNE, 2019



ABONNEZ-VOUS À POUR LA SCIENCE

OFFRE D'ABONNEMENT

DURÉE
LIBRE

2 FORMULES
AU CHOIX

FORMULE
PAPIER
+ HORS-SÉRIE

FORMULE
INTÉGRALE

Le magazine papier 12 numéros par an

Le magazine en version numérique 12 numéros par an

Le hors-série papier 4 numéros par an

Le hors-série en version numérique 4 numéros par an

Accès à pouirlascience.fr
actus, dossiers, archives depuis 1996

VOTRE TARIF D'ABONNEMENT

6,50€
PAR MOIS

8,20€
PAR MOIS

31 %
de réduction *

43 %
de réduction *

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à :

Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90053 - 67402 Illkirch Cedex - email: pouirlascience@abopress.fr

PAG19STDOS

☒ **OUI, je m'abonne à Pour la Science en prélèvement automatique**

1/ Je choisis ma formule (merci de cocher) et je complète l'autorisation de prélèvement ci-dessous.

☐ FORMULE
PAPIER +
HORS SÉRIE

- 12 n° du magazine papier
- 4 Hors-série papier

6,50€
PAR MOIS
-31 %
PPV6E50

☐ FORMULE
INTÉGRALE

- 12 n° du magazine (papier et numérique)
- 4 Hors-série (papier et numérique)
- Accès illimité aux contenus en ligne

8,20€
PAR MOIS
-43 %
IPV8E20

2/ Mes coordonnées

Nom:

Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Tél.:

E-mail:@.....

(indispensable pour la formule intégrale)

J'accepte de recevoir les offres de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON

3/ Mandat de prélèvement SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom: Prénom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque)

IBAN:

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Établissement teneur du compte

Nom:

Adresse:

Code postal: Ville:

Date et signature

Organisme Créancier: Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

* Réduction par rapport au prix de vente en kiosque et l'accès aux archives numériques. Durée d'abonnement: 1 an. Délai de livraison: dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre valable jusqu'au 31/03/2021 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site <https://boutique.pouirlascience.fr>. Photos non contractuelles.

Les informations que nous collectons dans ce bulletin d'abonnement nous aident à personnaliser et à améliorer les services que nous vous proposons. Nous les utiliserons pour gérer votre accès à l'intégralité de nos services, traiter vos commandes et paiements, et vous faire part notamment par newsletters de nos offres commerciales moyennant le respect de vos choix en la matière. Le responsable du traitement est la société Pour la Science. Vos données personnelles ne seront pas conservées au-delà de la durée nécessaire à la finalité de leur traitement. Pour la Science ne commercialise ni ne loue vos données à caractère personnel à des tiers. Les données collectées sont exclusivement destinées à Pour la Science. Nous vous invitons à prendre connaissance de notre charte de protection des données personnelles à l'adresse suivante: <https://rebrand.ly/charte-donnees-pls>. Conformément à la réglementation applicable (et notamment au Règlement 2016/679/UE dit «RGPD») vous disposez des droits d'accès, de rectification, d'opposition, d'effacement, à la portabilité et à la limitation de vos données personnelles. Pour exercer ces droits (ou nous poser toute question concernant le traitement de vos données personnelles), vous pouvez nous contacter par courriel à l'adresse protection-donnees@pouirlascience.fr.

Groupe Pour la Science - Siège social: 170 bis, boulevard du Montparnasse, CS20012, 75680 Paris cedex 14 - Sarl au capital de 32 000€ - RCS Paris B 311 797 393 - Siret: 311 797 393 000 23 - APE 5814 Z

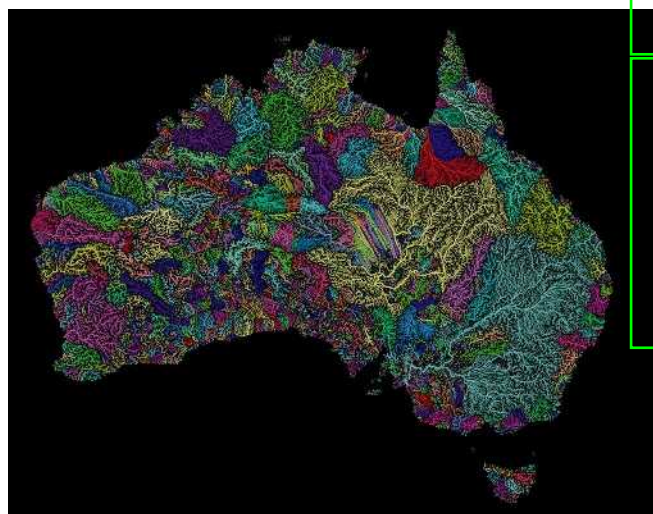
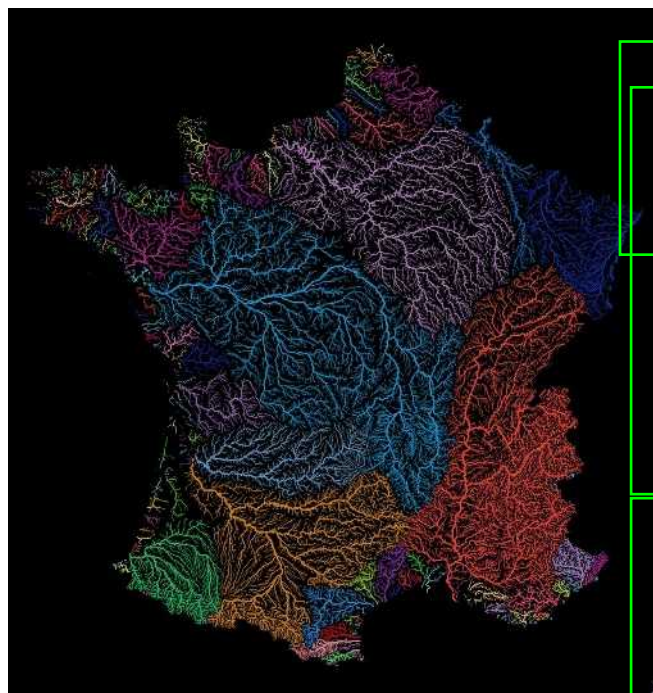
4/ MERCI DE JOINDRE IMPÉRATIVEMENT UN RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire



Là où se jette le Rognon...

Les cartes de Robert Szucs révèlent tous les bassins versants du monde, et en couleurs.



Sauriez-vous situer le Rognon, l'Œil, le Torse, le Gland... sur la carte de France ? Plus dur encore, de quel cours d'eau ces rivières sont-elles l'affluent (les réponses sont à la fin de cet article) ? Difficile, tant les cours d'eau sont nombreux. Selon Carthage, une base de données tenue par l'IGN, ils sont plus de 125 000 à couler en France métropolitaine ! Parmi eux, 74 fleuves, 416 rivières, 1288 torrents... Robert Szucs, géographe d'origine hongroise installé à Birmingham, en Grande-Bretagne, nous aide à nous y retrouver. À l'aide d'un ensemble d'outils (GIS) spécialisés dans la visualisation de données géographiques, et d'informations recueillies auprès de multiples agences, gouvernementales ou non, il a dressé les cartes de tous les bassins versants du monde. Chacun a une couleur dédiée et l'épaisseur des cours d'eau rend compte de leur débit. Le résultat est plutôt spectaculaire !

Sur la carte de France (*ci-contre*), on reconnaît les fleuves principaux et leurs affluents : la Loire, en bleu clair, la Seine, en violet, le Rhône, en rouge... De même, en Afrique (*page ci-contre*), on repère les bassins très étendus du Nil (*en rouge*), du Congo (*en bleu clair*), du Niger (*en violet*)... On peut néanmoins s'étonner de voir des cours d'eau représentés dans le désert du Sahara. C'est que les cartes tiennent également compte des ruissellements temporaires alimentés par des pluies certes très rares, mais pas inexistantes.

La remarque vaut également pour l'Australie (*ci-contre, en bas*), un pays dont 70% du territoire est aride. Au centre de cette île, un motif attire l'attention, les stries longitudinales parallèles enveloppées par le bassin du lac Eyre (*en jaune*), un système hydrologique alimentant ce lac situé 16 mètres en dessous du niveau marin. Ces bandes correspondent aux cours d'eau temporaires qui parcourent, après de fortes précipitations, les plaines séparant les longs chapelets de dunes de sable rouge du désert de Simpson. Vous auriez pu briller lors du dernier Réveillon (un affluent de l'Yerres, dans l'Essonne). ■

Le site de Robert Szucs :
www.grasshoppergeography.com

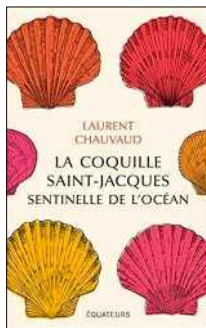
Réponses : Le Rognon se jette dans la Marne, l'Œil dans l'Aunance (un affluent du Cher), le Torse dans l'Arc (lui se jette dans l'étang de Berre), les Glands (il y en a trois) dans le Doubs, l'Oise et le Rhône.

À LIRE



Tibet, minéral animal
VINCENT MUNIER ET SYLVAIN TESSON
KOBALANN, 2018
(240 PAGES, 65 EUROS)

En 2010, l'écrivain-voyageur Sylvain Tesson a reçu le prix Renaudot pour son dernier livre *La Panthère des neiges*, paru aux éditions Gallimard. Les médias s'en sont fait un large écho. Il y raconte le mois passé sur les hauts plateaux du Tibet où, dans le froid intense et le silence immanent, il a attendu de voir l'une des espèces les plus rares du monde (il reste 4000 à 5000 spécimens dans le monde), celle qui a donné son nom à l'ouvrage récompensé. Une leçon d'attention à la beauté du monde. Il n'était pas seul, car, on le sait moins, l'initiative de ce voyage revient au photographe animalier Vincent Munier, un habitué des contrées glacées, qui a d'ailleurs plusieurs périples au Tibet à son actif pour immortaliser le félin. Les images rapportées (prises entre 2011 et 2017) figurent dans un magnifique livre de photos (les textes sont de... Sylvain Tesson) où transparaît la dureté minérale de l'environnement, la solitude face aux éléments... et le miracle de la rencontre quand la panthère, le « fantôme des montagnes », daigne passer devant l'objectif. On croise d'autres habitants, comme les pikas, les renards du Tibet, quelques yacks sauvages, les chats de Pallas... Mais en parcourant le livre, le lecteur est comme les auteurs, à l'affût de la panthère : au détour de quelle page surgira-t-elle ? Et puis, soudain, « Pleine face, Grand vent, Présence pure : Souveraineté de l'être. »



La Coquille Saint-Jacques, sentinelle de l'océan
LAURENT CHAUVAUD
LES ÉQUATEURS, 2019
(144 PAGES, 15 EUROS)

Avez-vous déjà assisté à la poursuite d'une coquille Saint-Jacques par une étoile de mer qui aimerait en faire son déjeuner (et on la comprend!) ? C'est l'un des épisodes dignes des meilleurs films d'action, que l'on peut lire dans ce « tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la coquille Saint-Jacques sans jamais oser le demander ». On y apprend par exemple tout du chant du mollusque, un merveilleux indicateur de la qualité de l'eau. On découvre également que la Saint-Jacques est un enregistreur hors pair des conditions environnementales (pollution, température, luminosité...) du passé. Comment ? Parce que la coquille croît quotidiennement d'une microstrie, celle-ci étant le reflet du milieu au moment de sa formation, un peu à la façon des cernes d'un arbre, mais à une échelle plus fine. Celle que nous mangeons, la *Pecten maximus*, vit environ cinq ans, ce qui ne fait guère remonter dans le temps, mais des cousines, comme la palourde noire de Saint-Pierre-et-Miquelon *Arctica Islandica*, ont une durée de vie cent fois, plus longue. Un almanach d'un demi-siècle ! L'auteur, chercheur à l'Institut universitaire européen de la mer, à Plouzané, près de Brest, nous embarque pour un tour du monde de la coquille Saint-Jacques (du pôle Sud au pôle Nord en passant par le Maroc, Ouessant, la Norvège ou encore la Nouvelle-Calédonie) et retrace avec humour vingt-cinq années de recherches riches en découvertes. Vous ne regarderez plus votre carpaccio de Saint-Jacques à l'huile d'argan (avec des zestes de combava) de la même façon !

À ENTENDRE



Le champ des possibles

Le constat est implacable. Notre planète se réchauffe, l'acidité des océans augmente, la sécheresse sévit par-ci, les pluies torrentielles par-là, les forêts prennent feu, les ouragans battent tous leurs records, les glaciers disparaissent, la biodiversité recule... Mais a-t-on vraiment pris la mesure des enjeux ? En 2015, à l'occasion de la COP21, les pays du monde entier avaient reconnu la responsabilité humaine dans ce changement climatique et proposé de limiter le réchauffement « nettement en dessous » de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Pour y parvenir, chaque pays avait présenté des transitions énergétiques ambitieuses. Mais quatre ans plus tard, les transports, l'habitat, l'activité industrielle et agricole émettent toujours plus de gaz à effet de serre, et l'objectif semble hors d'atteinte. Avec le colloque « Face au changement climatique, le champ des possibles », l'Académie des sciences propose au public de venir pendant deux jours (les 28 et 29 janvier 2020) débattre des problèmes scientifiques, sociaux et politiques que le dérèglement climatique pose à nos sociétés avec les plus grands spécialistes (Valérie Masson-Delmotte, Hervé Le Treut, Olivier Boucher, Pierre Léna...). Ce colloque coïncidera avec la présentation des recommandations de la Convention citoyenne pour le climat. Les choses commenceront peut-être à bouger...

Inscriptions et programme :
www.academie-sciences.fr

À VOIR

Une dérive en VR

~~Pressentie dès le XVI^e siècle~~, la dérive des continents ne s'est imposée que dans les années 1960. Nous savons tous désormais que les continents formèrent un jour un supercontinent, que l'Inde traversa les mers avant de percuter l'Eurasie... mais dans le détail? Une vidéo signée Algol montre en 11 minutes l'histoire tectonique de la Terre depuis 4,27 milliards d'années, le moment où les plaques ont commencé à se déplacer. La reconstitution se fonde sur de nombreuses études paléomagnétiques. La proposition est immersive, car la vidéo interactive est en mode 360°. Le plein écran s'impose, l'idéal étant même un casque de réalité virtuelle pour profiter au mieux de ce voyage dans le temps.

<https://youtu.be/UgRHZsjDPUU>

À ÉCOUTER

Le mal de Terre

Que ressentez-vous face au réchauffement climatique et à la dégradation de l'environnement? Si cela vous angoisse, vous souffrez d'écoanxiété. Si plus largement vous êtes en colère, vous avez un sentiment d'impuissance, de perte de sens... alors pas de doute sur le diagnostic: vous êtes atteint de «solastalgie». Selon Alice Desbiolles, médecin spécialisée en santé environnementale, et invitée de Mathieu Vidard dans cette émission de *La Terre au carré*, sur France Inter, il s'agit d'une nostalgie face à une nature évanescence et dégradée auprès de laquelle on ne parvient plus à trouver de réconfort. Grâce à ce podcast, vous en saurez beaucoup plus, et notamment sur la façon lutter contre ce nouveau «mal de Terre».

<http://bit.ly/FI-Tac-Solas>



À VISITER

Loup y es-tu ? Que fais-tu ?

Comment le loup est-il devenu le symbole de nos peurs les plus archaïques? Est-il condamné à rester le «grand méchant loup» de notre enfance? Une exposition répond en images.

Le 20 novembre 2019, un loup gris (*Canis lupus lupus*) aurait été aperçu dans les vignes, en Charente-Maritime. Pas de doute, depuis son retour en France au début des années 1990, via l'Italie et les Alpes, le canidé est parti à la conquête de l'Ouest. La reprise de cette information dans les grands quotidiens nationaux montre bien à quel point le sujet est important. C'est que rarement un animal aura autant déchaîné les passions! Le loup hante l'imaginaire humain depuis l'Antiquité et son statut, sa réputation ont connu bien des soubresauts! Aux côtés du renard, de l'ours et du corbeau, il compte parmi les animaux les plus chargés de significations. Parfois admiré, le plus souvent craint, détesté voire ridiculisé (on pense à Ysengrin dans le *Roman de Renart*), le loup a suscité tous les sentiments possibles.

Le musée de l'image, à Épinal, dans les Vosges, propose une exposition qui retrace cette histoire culturelle du loup. En préambule du parcours, une longue liste d'expressions mettant en scène l'animal («avoir une faim de loup», «se jeter dans la gueule du loup», «hurler avec les loups»...) rappelle combien il hante nos esprits. Ensuite, à travers estampes populaires françaises (les fameuses images d'Épinal) et autres œuvres issues notamment de la culture savante, les visiteurs sont invités à découvrir les nombreux regards qui ont été portés sur le loup. Au gré des tableaux, des sculptures, des spécimens naturalisés, des documents d'archives, des extraits sonores, d'ouvrages illustrés... la construction du mythe devient transparente et l'on comprend pourquoi le loup est devenu aussi sulfureux, chargé des pires symboles.

Mais les temps changent et l'exposition le rappelle. Peut-être à cause de sa longue absence du territoire national (il a été éradiqué dans les années 1930), le loup connaît un regain d'affection (sauf auprès de certains éleveurs). C'est surtout vrai depuis que l'être humain, conscient de la dégradation de l'environnement, tente par tous les moyens de retrouver le côté sauvage et naturel qui sommeille en lui. Le loup deviendra-t-il un frère plutôt qu'un ennemi? La route est encore longue pour que l'homme ne soit plus un loup pour... le loup. À noter, dans le cadre de la programmation culturelle associée à l'exposition, la conférence de Michel Pastoureau: «La Peur du loup!», le jeudi 30 janvier 2020 à 18 heures.

Exposition «Loup! Qui es-tu?»,
Musée de l'image, Épinal, jusqu'au 31 mai 2020.
Pour en savoir plus: www.museedelimage.fr



L'inférieure génétique du paradis

Les paradisiers arborent des plumages exubérants qu'exhibent les mâles lors de complexes parades nuptiales. Étonnamment, les premiers spécimens rapportés en Europe par l'expédition de Magellan étaient sans pattes (une habitude des commerçants locaux): on en déduisit que ces oiseaux passaient leur vie dans les airs et se nourrissaient de rosée, les femelles pondant et incubant leurs œufs sur le dos des mâles!

Aussi fascinants soient-ils, on ignorait tout de la génétique sous-jacente à la radiation évolutive de ces oiseaux, favorisée par la multiplicité des habitats présents en Nouvelle-Guinée, l'île où l'on trouve l'essentiel des quarante et une espèces (seize genres) connues. Stefan Prost, du musée suédois d'histoire naturelle, à Stockholm, et ses collègues ont comblé cette lacune.

Parmi les nombreux résultats obtenus à partir du séquençage du génome de plusieurs espèces, le plus remarquable est l'identification de nouvelles familles de rétrotransposons. Ces fragments d'ADN mobiles issus d'anciennes infections virales auraient joué un rôle central dans l'essor et la diversification de ces oiseaux en chamboulant régulièrement leur génome. De cet enfer génétique est né un foisonnement de paradis! ■

IBIS, LES SACRIFIÉS DE L'AUTEL

Contrairement à ce que prétendent certains écrits, les ibis sacrés, que l'on trouve en grand nombre sous forme de momies en Égypte, n'étaient pas élevés en batterie.

L

es murs de plusieurs temples, les rouleaux de papyrus ainsi que la statuaire sont formels, les Égyptiens vouaient un culte à l'ibis, plus précisément à l'ibis sacré *Threskiornis aethiopicus*, au plumage noir et blanc. De fait, l'oiseau était le symbole du dieu Thot (parfois aussi représenté sous la forme d'un babouin hamadryas, *Papio hamadryas*), détenteur d'un savoir infini, parfois surnommé le « seigneur du temps » et maître des écrits. Connaissant la propension des Égyptiens à l'embaumement, il n'est guère étonnant de trouver des momies d'ibis sacré dans les tombeaux. Mais tout de même ! Entre 1931 et 1954, Sami Gabra, de l'université du Caire, a découvert des millions de momies d'ibis (et de babouins) à Tounah el-Gebel, la nécropole de la ville d'Hermopolis Magna, en Moyenne-Égypte. De même, à Abydos, dans le sud du pays, et à Saqqarah, près du Caire, ce sont des millions d'autres ibis embaumés qui ont été retrouvés. Les Égyptiens élevaient-ils en batterie ces volatiles de façon à en disposer en grand nombre au moment de les sacrifier sur l'autel du dieu Thot ? C'est une hypothèse mentionnée dans certains écrits, notamment ceux de Hor de Sebennytos, un prêtre et scribe du I^{er} siècle avant notre ère.

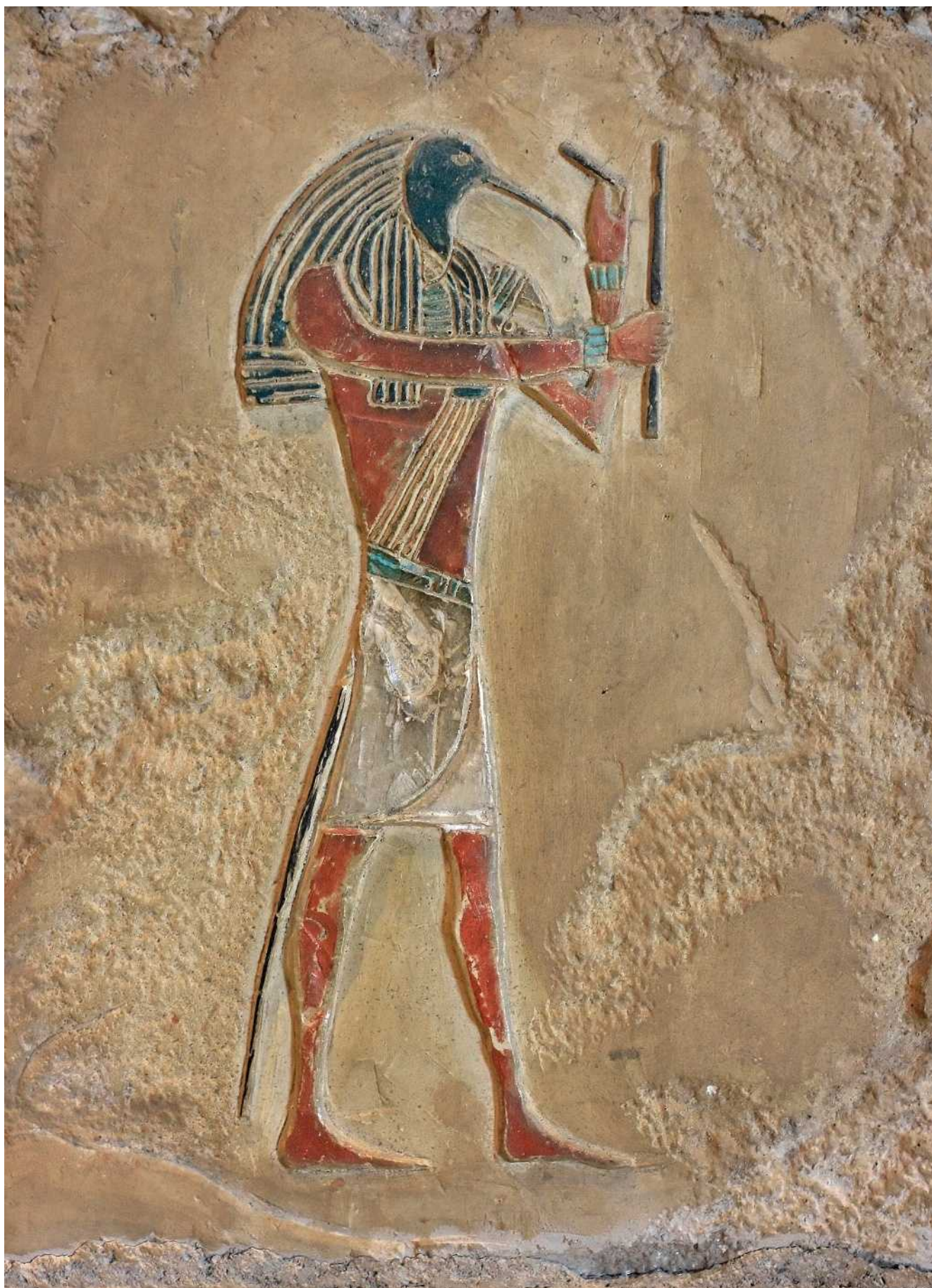
Sally Wasef, de l'université Griffith, à Brisbane, en Australie a voulu en avoir le cœur net. Avec ses collègues, elle a reçu l'accord des autorités égyptiennes pour prélever des échantillons sur 16 momies d'ibis de divers sites (Saqqarah, Tounah el-Gebel, Abydos...), datées d'environ 2500 ans. Ils se sont intéressés au génome mitochondrial (mieux préservé que l'ADN du noyau), transmis uniquement

par la mère, et l'ont comparé à celui de 26 ibis actuels sauvages capturés de la Gambie à l'Afrique du Sud en passant par le Kenya, le Gabon, le Malawi...

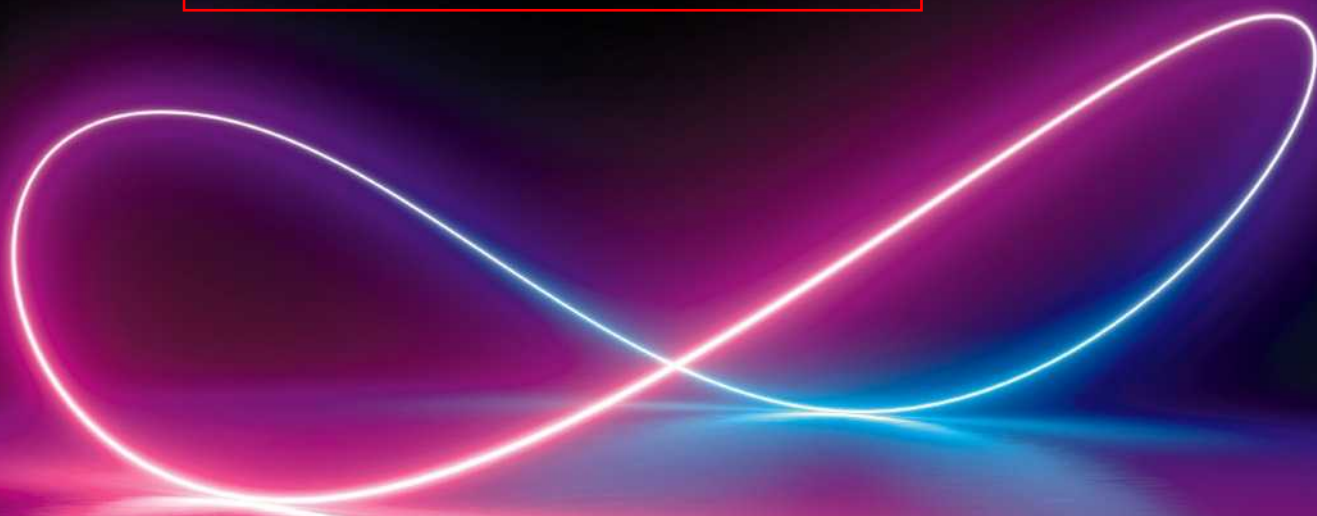
Résultat ? La diversité génétique et les niveaux de mutations sont du même ordre chez les deux « populations », contredisant l'idée d'un élevage intensif d'ibis par les Égyptiens de l'époque pharaonique. En effet, une telle pratique, à partir de quelques couples parentaux, aurait conduit à une certaine similarité génomique due à une consanguinité élevée : les mitochondries, et donc leur ADN, seraient très semblables, car issues de peu de mères originelles. Selon les généticiens, le scénario le plus probable est que des ibis sacrés sauvages étaient élevés, pour de courtes périodes, dans les habitats naturels, près des temples, où les oiseaux étaient nourris, ou dans de petites fermes avant d'être tués et momifiés.

Aujourd'hui, l'ibis sacré a disparu d'Égypte. Étonnamment, une population de plusieurs milliers d'individus prospère... en Bretagne, notamment dans le golfe du Morbihan, depuis le début des années 1990. Les pionniers se seraient échappés du parc animalier et botanique de Branféré, situé au Guerno. Ils y sont tranquilles, car on ne connaît aucun exemple de momie d'ibis dans un tombeau celte ! ■

S. Wasef et al., Mitogenomic diversity in sacred ibis summies sheds light on early Egyptian practices, *Plos One*, vol. 14(11), e0223964, 2019.



**PROCHAIN
HORS-SÉRIE**
**en kiosque
le 8 avril 2020**



Le monde quantique à portée de main

Les physiciens comprennent et maîtrisent de mieux en mieux
la physique quantique et ses étranges propriétés.
Celles-ci ne sont plus cantonnées au monde microscopique.
Et l'on imagine pour bientôt l'application ultime de ces progrès :
l'ordinateur quantique.



BRAINCAST

La voix des neurones

Le podcast de *Cerveau & Psycho*

**en partenariat avec l'Institut du Cerveau
et de la Moelle épinière**

www.cerveauetpsycho.fr/sr/braincast/

| À partir du 2 décembre 2019

1^{er} épisode

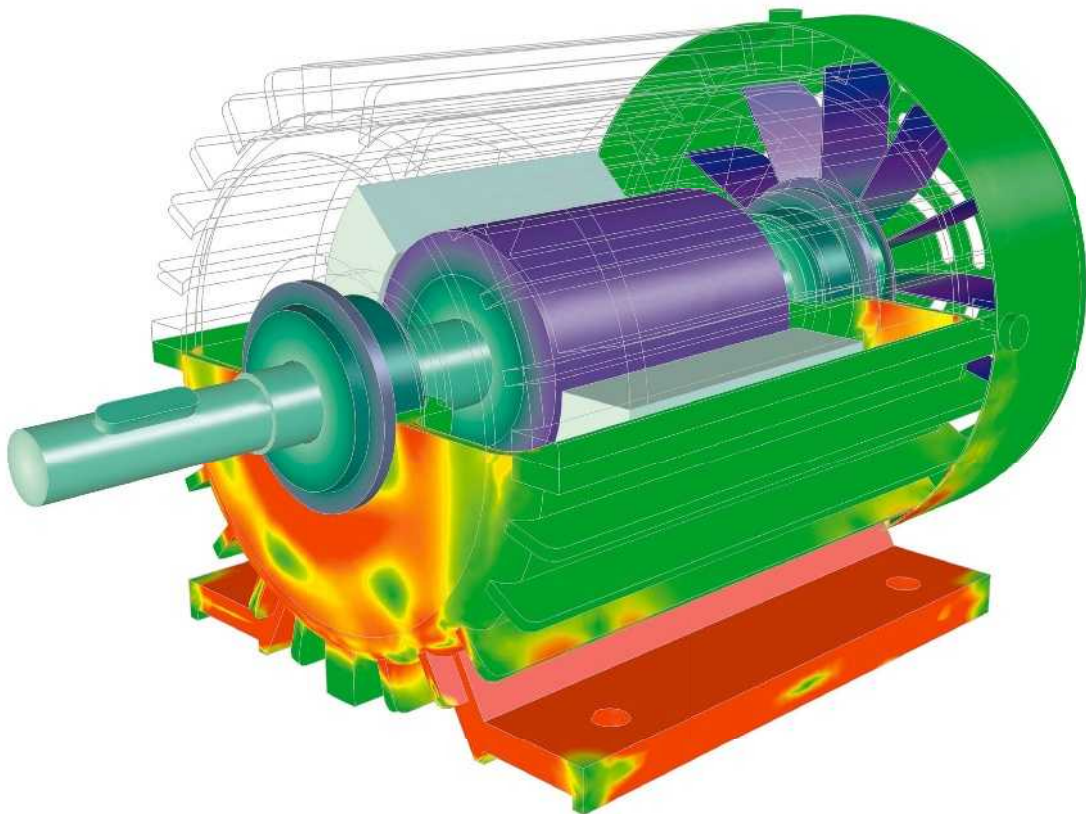
avec le Pr **Yves Agid**
interviewé par Sébastien Bohler

Neurologue et chercheur
en neurosciences,
spécialiste des maladies
neurodégénératives



**Cerveau
& Psycho**

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor