

Les microtrous noirs

Des trous noirs microscopiques se sont peut-être formés dans les premiers instants de l'Univers, bien avant que naissent les étoiles, et s'évaporerait encore aujourd'hui. Ils offrent une fenêtre inédite sur l'Univers primordial.

Les trous noirs sont le stade ultime de l'effondrement gravitationnel de la matière. Ce sont d'étranges régions de l'espace-temps dont rien ne semble pouvoir s'échapper. Lorsque les réactions thermonucléaires au centre d'une étoile suffisamment massive cessent faute de carburant, le cœur s'effondre brutalement sur lui-même tandis que l'enveloppe explose en supernova. Rien ne peut stopper le processus : un trou noir stellaire est sur le point de naître.

Il existe d'autres types de trous noirs, des millions ou milliards de fois plus massifs, qui se cachent au centre des galaxies et sont à l'origine de processus parmi les plus énergétiques de l'Univers. Le cœur de la Voie lactée, par exemple, abrite un trou noir dont la masse est estimée entre deux et quatre millions de fois celle

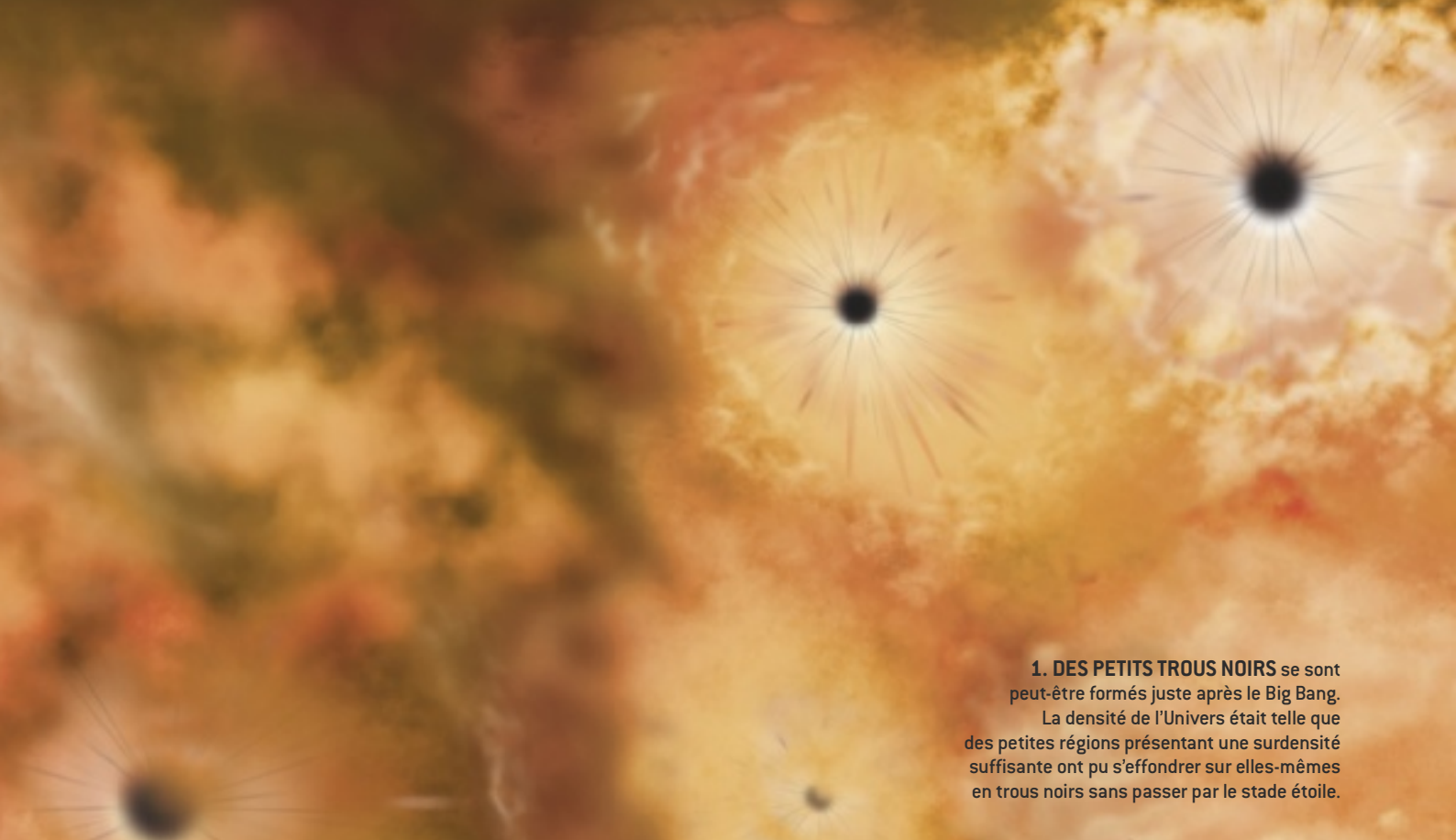
du Soleil. De tels monstres résultent sans doute de l'accrétion progressive de la matière environnante ou de la fusion de trous noirs initialement nés de la mort d'étoiles massives. Ces astres ne sont plus des objets exotiques, mais font partie intégrante du bestiaire céleste de l'astronomie moderne.

Est-ce à dire que les trous noirs descendent tous d'une étoile ? Peut-être pas. D'autres types de trous noirs pourraient s'être formés directement, par simple effondrement gravitationnel du milieu ultradense, lors des premiers instants de l'Univers, sans passer par le stade stellaire : les trous noirs primordiaux.

Objets hypothétiques, les trous noirs primordiaux se situent à la croisée de l'infiniment grand et de l'infiniment petit : mécanique quantique et relativité générale,

cosmologie et physique des particules, gravitation et thermodynamique, sont simultanément nécessaires pour les appréhender. Expériences en laboratoire et observations astronomiques se complètent pour tenter de cerner ces minuscules trous noirs, qui constituent une sonde privilégiée de l'Univers primordial, la gravitation quantique, les effondrements gravitationnels ou la physique des hautes énergies. Comprendre les processus de formation et évaluer leur nombre constituerait une voie d'accès privilégiée aux premiers instants qui ont suivi le Big Bang et permettrait de mesurer des paramètres inaccessibles par ailleurs.

L'histoire des trous noirs primordiaux commence en 1967, au cœur d'une décennie très riche pour l'astrophysique théorique, lorsque le physicien soviétique Yakov Zeldovich imagina que de petits trous noirs ont pu se former dans l'Univers primordial, juste après le Big Bang. Selon lui, la densité très élevée qui régnait alors était favorable à l'apparition de tels objets cosmologiques. Une région de l'espace présentant une surdensité suffisante était susceptible de s'effondrer



1. DES PETITS TROUS NOIRS se sont peut-être formés juste après le Big Bang. La densité de l'Univers était telle que des petites régions présentant une surdensité suffisante ont pu s'effondrer sur elles-mêmes en trous noirs sans passer par le stade étoile.

primordiaux

A. Barrau, A. Gorecki, J. Grain

sous l'effet de sa propre gravité pour former un trou noir, sans que l'existence d'aucune étoile ne soit nécessaire. La taille de ces trous noirs dits primordiaux est limitée par la causalité : dans les premiers instants du cosmos, des points trop distants n'ont pas eu le temps d'interagir, et, *a fortiori*, de s'effondrer. Ainsi, un trou noir formé quelque 10^{-21} seconde après le Big Bang aurait un rayon d'à peine un milliardième de millimètre et une masse maximale de l'ordre de 10^{14} kilogrammes (équivalente à celle d'une boule de plomb de près de trois kilomètres de rayon). Un « poids plume » par rapport aux trous noirs stellaires classiques, de l'ordre de quelques masses solaires !

Des trous pas si noirs

Le fait que des trous noirs de très faible masse puissent exister incita le physicien Stephen Hawking à s'intéresser à leurs propriétés quantiques. Les surprises ne furent pas des moindres ! En 1972, Jacob Bekenstein venait de suggérer que les trous noirs ont une entropie, c'est-à-dire un contenu informationnel, proportion-

nelle à l'aire de leur horizon (la frontière au-delà de laquelle même la lumière ne peut échapper à leur influence gravitationnelle). Plus spectaculaire encore fut la découverte que, contrairement à l'intuition, les trous noirs s'évaporent ! Le mécanisme, proposé par S. Hawking, conjugue mécanique quantique et gravitation. Dans le vide quantique, des paires de particules et d'antiparticules se créent sans cesse et s'annihilent presque aussitôt. Cependant, si cette création se déroule très près de l'horizon d'un trou noir, les deux particules vont être séparées par le gradient considérable du champ gravitationnel, l'une plongeant dans le trou noir et l'autre s'échappant vers l'extérieur. En d'autres termes, un trou noir n'est pas tout à fait noir : il rayonne des particules !

La découverte de ce rayonnement éclairait le problème de l'entropie introduit par J. Bekenstein : l'entropie étant associée à la chaleur, elle-même associée au rayonnement, il est naturel que les trous noirs, qui possèdent une entropie, aient aussi une température non nulle et rayonnent un flux thermique.

L'ESSENTIEL

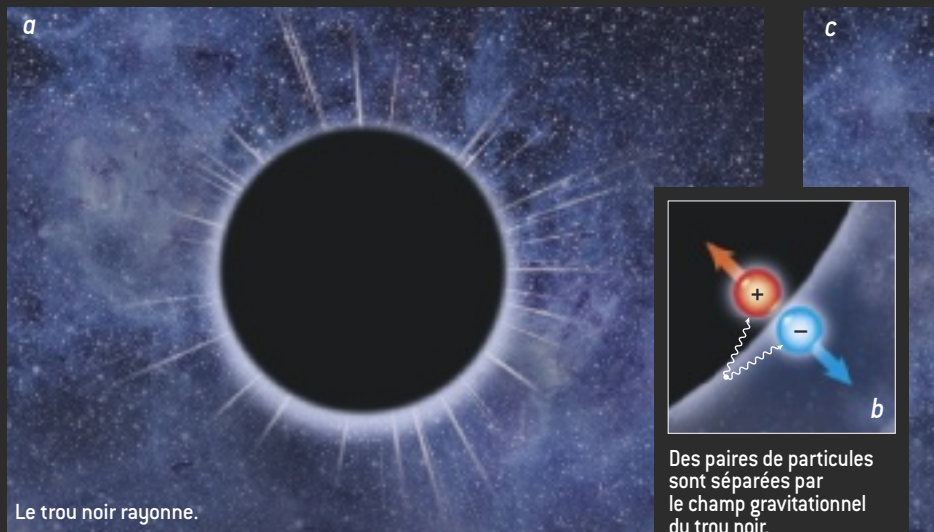
- ✓ Des microtrous noirs, à peine plus lourds qu'une poussière, se sont peut-être formés dans les premiers instants de l'Univers.
- ✓ Les trous noirs s'évaporent en émettant des particules et des antiparticules. Les trous noirs primordiaux les plus massifs s'évaporeront encore à l'heure actuelle.
- ✓ Leur traque – qu'elle soit un succès ou non – apporte d'ores et déjà des indices sur l'Univers primordial.
- ✓ Ils offrent un moyen d'étudier les théories physiques les plus spéculatives.

2. L'ÉVAPORATION DES TROUS NOIRS.

Les trous noirs ne sont pas vraiment noirs.

Dans le vide quantique, des paires de particules et d'antiparticules se créent et s'annihilent sans cesse. Mais près de l'horizon d'un trou noir, une des composantes d'une paire peut être happée par l'astre, tandis que l'autre s'échappe [b].

Résultat : le trou noir paraît émettre des particules [a]. Par ce biais, il perd de l'énergie et donc de la masse, et « s'évapore » petit à petit. Cette évaporation est d'autant plus intense que l'objet est léger [c]. Insignifiante pour un trou noir stellaire, elle permettrait de détecter de petits trous noirs primordiaux encore en train de s'évaporer. Lorsque le trou noir a perdu presque toute sa masse, l'évaporation s'emballe et l'objet disparaît dans une dernière bouffée de particules énergétiques [d].



Les propriétés de la température des trous noirs sont cependant singulières. De façon paradoxale, la température augmente à mesure que le trou noir perd de la masse, et donc de l'énergie. Par ailleurs, la température (et le rayonnement) est quasi nulle pour un trou noir stellaire ou plus massif, tandis qu'elle peut atteindre la valeur la plus élevée possible – la température de Planck, soit 10^{32} kelvins – pour un trou noir de la masse d'une poussière ! Enfin, l'élégante équation qui définit la température, $T = hc^3 / 8\pi kGM$, réunit toutes les constantes fondamentales de la physique (c , la vitesse de la lumière, h , la constante de Planck, G , la constante de gravitation et k la constante de Boltzmann), témoignant de ce que le rayonnement de Hawking est un phénomène à l'intersection de toutes les branches de la physique.

Cette découverte a ouvert la voie à un champ nouveau, la thermodynamique des trous noirs. Elle a également conduit à mettre en lumière une autre énigme : qu'advient-il de l'information ? Si le rayonnement émis perd, comme le suppose Hawking, toute mémoire des objets qui ont participé à la formation et à la croissance du trou noir, l'information qu'ils portent semble irrémédiablement perdue. Or une telle situation contredit les principes fondamentaux de la mécanique quantique ! La théorie des cordes et la gravité quantique à boucles, les deux pistes les plus prometteuses pour réconcilier la relativité générale et la mécanique quantique, permettent

de résoudre en grande partie ces contradictions et de donner du sens à l'information « cachée ». L'étude des microtrous noirs permettra peut-être de les mettre à l'épreuve et, surtout, pose des jalons dans cette quête d'une théorie unifiée.

Les plus massifs s'évaporent encore aujourd'hui

Mais comment les observer ? Alors qu'on peut détecter les trous noirs massifs par l'influence gravitationnelle qu'ils exercent sur leur voisinage, pour mettre en évidence des microtrous noirs, il faut tirer parti du fait qu'ils ne sont précisément... pas noirs ! À notre époque, certains trous noirs primordiaux pourraient encore être en cours d'évaporation. Le rayonnement de Hawking est en effet d'autant plus intense que les trous noirs sont légers. S'il faut un peu plus que l'âge de l'Univers à un trou noir de la masse d'une montagne pour disparaître totalement, quelques secondes seulement suffisent pour qu'un trou noir aussi léger qu'une petite colline s'évanouisse. L'évaporation d'un trou noir primordial d'une masse initiale d'environ 100 milliards de kilogrammes ne serait pas achevée aujourd'hui. Elle pourrait donc être détectée.

L'interaction du trou noir avec les paires de particules et d'antiparticules qui apparaissent au voisinage de son horizon étant essentiellement gravitationnelle,

autant d'antimatière que de matière doit en moyenne être émise par rayonnement de Hawking. L'émission d'une faible quantité de matière par un trou noir passerait totalement inaperçue, mais il en va tout autrement pour une même quantité d'antimatière. Comme elle est en effet très rare dans la galaxie, une surabondance, même minimale, serait aisément mise en évidence.

Dans les années 1980, Jane MacGibbon, à l'Université de Cambridge, a réussi à modéliser le spectre d'émission caractéristique et à prédire avec fiabilité la production de protons et d'antiprotons par les trous noirs primordiaux. Or les antiprotons sont peu nombreux parmi les rayons cosmiques qui sillonnent l'espace interstellaire : tout au plus un pour 10 000 protons. L'existence d'une faible population de trous noirs primordiaux suffirait à dépasser cette limite observationnelle. Il s'agit donc d'un outil de détection très sensible.

Il convient néanmoins de bien caractériser le bruit de fond – les antiprotons émanant de processus plus « classiques ». Ce n'est possible que depuis peu, car cela nécessite une compréhension détaillée de la dynamique galactique, la modélisation de processus de physique nucléaire complexes, et, surtout, beaucoup de données expérimentales qui n'ont été obtenues que récemment.

Plusieurs détecteurs de rayons cosmiques scrutent le domaine d'énergie pertinent pour étudier ce phénomène (de l'ordre du gigaelectronvolt), en particulier



Plus le trou noir perd de la masse, plus le rayonnement est intense.



Le trou noir disparaît dans une bouffée de rayonnement énergétique.

Philippe Mouché

des détecteurs ballons comme BESS ou des observatoires spatiaux tel AMS.

Toutefois, aucune surabondance d'antimatière n'a encore été mise en évidence. La densité de trous noirs primordiaux, s'ils existent, est donc nécessairement dérisoire: elle ne peut excéder quelques milliardièmes de la masse totale de l'Univers. La contribution d'aucune autre forme de matière n'a été contrainte de façon aussi forte jusqu'à présent.

Des contraintes sur les fluctuations à très petite échelle

Ces résultats, pour le moment négatifs, sont néanmoins très intéressants. Ils apportent des informations importantes sur les conditions régnant dans les premiers instants de l'Univers. Même si, en fait, il n'existait pas de trous noirs primordiaux, leur simple absence apporte déjà, par elle-même, une contrainte forte et inédite sur les fluctuations dans l'Univers primordial.

Ces fluctuations jouent un rôle central dans la compréhension de l'histoire de l'Univers. C'est à partir d'elles que ce sont sans doute développées les galaxies qui structurent aujourd'hui le cosmos et leur origine découle des processus quantiques qui ont dû prédominer dans les premiers instants.

Les observables classiques de la cosmologie, tels le fond diffus micro-onde (fossile de la première lumière émise dans

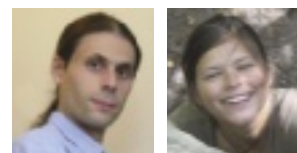
l'Univers) ou les grandes structures (répartition des amas de galaxies) nous renseignent sur les fluctuations à des échelles spatiales importantes (de quelques minutes d'arc à plusieurs degrés).

Les trous noirs primordiaux représentent une sonde complémentaire, à des échelles jusqu'à 10^{50} fois plus petites. Les théoriciens de la gravité ont en effet montré dès les années 1970 que si des fluctuations importantes s'étaient développées aux petites échelles de distance, elles auraient nécessairement entraîné une importante formation de trous noirs. Dans le milieu extrêmement dense qu'a représenté l'Univers primordial, une surdensité notable par rapport à la valeur moyenne dans une région donnée conduit à l'effondrement de celle-ci en un trou noir. L'absence de tels trous noirs impose donc une limite supérieure à l'amplitude des fluctuations à ces minuscules « tailles » caractéristiques.

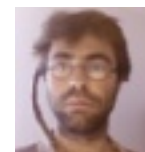
Les fluctuations susceptibles d'avoir engendré des trous noirs primordiaux sont directement liées aux modèles d'inflation cosmologique. Selon ces modèles, l'Univers a connu une phase d'expansion vertigineuse – l'inflation – environ 10^{-35} seconde après le Big Bang. Au cours de cette brève période, le facteur d'échelle de l'Univers – assimilable à sa taille – aurait augmenté de façon vertigineuse, typiquement d'un facteur 10^{26} .

L'inflation, introduite au début des années 1980 par Alexei Starobinski, Alan Guth et Andreï Linde, joue aujourd'hui

LES AUTEURS



Aurélien BARRAU et Alexia GORECKI sont chercheurs au Laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble (CNRS-IN2P3-UJF-INPG).



Julien GRAIN est chercheur au Laboratoire astroparticules et cosmologie (Paris7-CNRS-IN2P3).

✓ BIBLIOGRAPHIE

A. Barrau, J. Grain et S. Alexeyev, *Gauss-Bonnet black holes at the LHC: beyond the dimensionality of space*, Phys. Lett. B, vol. 584, p. 114, 2004.

S. Hawking, *Particle creation by black holes*, Comm. Math. Phys. vol. 43, p. 199, 1975.

J. MacGibbon et B. Webber, *Quark and gluon jet emission from primordial black holes*, Phys. Rev. D, vol. 41, p. 447, 1990.

D. Page, *Particle emission rates from a black hole*, Phys. Rev. D, vol. 14, p. 3260, 1976.

T. Damour, *The entropy of black holes: a primer*, séminaire Poincaré décembre 2004, arXiv:hep-th/0401160

un rôle central en cosmologie et a trouvé une solide assise dans la physique des particules. Elle résout l'essentiel des problèmes qui se posent à grande échelle, par exemple en expliquant pourquoi l'espace a une courbure très faible, pourquoi il est homogène d'un bout à l'autre de la voûte céleste, comment l'information a pu se transmettre entre des régions éloignées, ou encore pourquoi certains objets étranges, mais prévus par les théories d'unification, ne sont pas observés.

Le scénario de l'inflation a été testé grâce à de nombreuses observations cosmologiques, telle la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique. Cette théorie est aujourd'hui compatible avec l'ensemble des données observationnelles. D'autres mécanismes produisant des effets semblables ont été envisagés, mais ils apparaissent moins convaincants. Les observations futures, en particulier celles qui

seront réalisées par le satellite *Planck* qui sera lancé en 2009 par l'Agence spatiale européenne, permettront de tester de façon plus précise les modèles d'inflation et d'ouvrir la voie à une véritable étude quantitative de ces scénarios.

Quels renseignements les trous noirs primordiaux apportent-ils sur l'inflation ? Si cette dernière fait partie intégrante du modèle standard de la cosmologie, il reste très délicat de tester et de caractériser le détail des processus à l'œuvre. Les mesures du fond diffus cosmologique permettent d'avoir une première idée de l'énergie initiale du champ à l'origine de l'inflation (l'inflaton). De façon complémentaire, les trous noirs primordiaux apportent des indices sur d'autres paramètres théoriques fondamentaux (en particulier l'accélération de ce champ) et leur simple absence contraint l'espace des valeurs possibles (quant aux trous noirs primordiaux hypo-

Des microtrous noirs en laboratoire

Bien qu'ils ne soient pas, au sens strict, primordiaux, d'autres microtrous noirs sont aujourd'hui au cœur des spéculations les plus audacieuses : ceux qui pourraient être engendrés par le LHC, le grand collisionneur de hadrons du CERN, à Genève.

Certaines théories prévoient l'existence de dimensions supplémentaires d'espace-temps. La théorie des cordes, par exemple, requiert dix dimensions d'espace pour être cohérente. Il y a une dizaine d'années, Nima Arkani-Hamed et Savas Dimopoulos, de l'Université Stanford, en Californie, et Georgi Dvali, alors à l'Université de Trieste, en Italie, ont compris que ces dimensions supplémentaires pouvaient résoudre le problème de la faiblesse apparente de la gravitation. Si toutes les interactions ont une origine commune, pourquoi l'intensité de la force gravitationnelle est-elle si faible comparée à celle des autres forces fondamentales ? Leur modèle, nommé ADD d'après leurs initiales, suppose l'existence de grandes dimensions spatiales supplémentaires où seule la gravitation se propage. Ainsi, la gravitation ne serait pas réellement plus faible, mais simplement « diluée » dans davantage de dimensions que les autres forces.

L'une des conséquences les plus spectaculaires de ce scénario est que des trous noirs peuvent se former dans les accélérateurs de particules ! La raison est liée à un abaissement de l'échelle de Planck,

L'énergie de Planck, où la gravité devient aussi forte que les autres interactions fondamentales, est supposée être très élevée, autour de 10^{28} électronvolts, soit 15 ordres de grandeur au-dessus de l'énergie du LHC. Cependant, si des dimensions supplémentaires existent, l'énergie de Planck pourrait être beaucoup plus basse, voire plus faible que celle du LHC. Dans ce cas, la formation de trous noirs serait iné-



Des microtrous noirs pourraient être mis en évidence dans le détecteur ATLAS du LHC.

luctable : deux particules se rencontrant frontalement avec une énergie plus élevée que celle de Planck formeraient un trou noir. Les accélérateurs de particules pourraient alors devenir des usines à microtrous noirs !

Cette idée, déjà émise par le physicien Roger Penrose en 1985 et remise au goût du jour par Tom Banks, l'un des acteurs principaux de la théorie des cordes, est

néanmoins à considérer avec précautions. Même s'il existait des dimensions supplémentaires étendues – ce qui n'est corroboré par aucune observation à l'heure actuelle –, rien n'assure que l'énergie de Planck soit abaissée à une valeur assez faible pour être atteinte au LHC. L'idée a pourtant été récemment revisitée par Georgi Dvali : il n'est même pas nécessaire qu'il existe des dimensions supplémentaires pour abaisser l'échelle de Planck de façon notable : il « suffit » qu'il existe de nombreuses familles de particules. La démonstration se fonde évidemment sur... la physique des trous noirs.

Si des microtrous noirs se formaient au LHC, la nouvelle serait à première vue décevante : l'horizon de ces trous noirs masquerait les processus physiques à l'œuvre et marquerait, en un sens, la fin de la physique des particules. Mais, en retour, de nombreuses expériences jusqu'ici hors de portée deviendraient possibles. L'évaporation des microtrous noirs nous renseignerait sur le nombre de dimensions de l'espace-temps. En outre, la nature de leur spectre d'émission garderait une empreinte de la théorie gravitationnelle pertinente à cette échelle. Les spectres observés porteraient la signature de la « nouvelle physique » valide à l'échelle de Planck. La mort de ces trous noirs de laboratoire serait, en somme, une porte ouverte sur la gravité quantique.

thétiquement formés avant l'inflation, ils auraient été si dilués par celle-ci que leur population serait aujourd'hui négligeable).

En outre, bien que les contraintes que ces microtrous noirs font peser sur certains scénarios inflationnaires soient quantitativement assez faibles, le fait qu'ils permettent d'accéder au spectre primordial des fluctuations dans une gamme d'échelle spatiale environ 10^{50} fois plus faible que celles usuellement considérées suffit à les rendre pertinents : très peu de processus physiques peuvent être extrapolés si loin du domaine où ils sont mesurés...

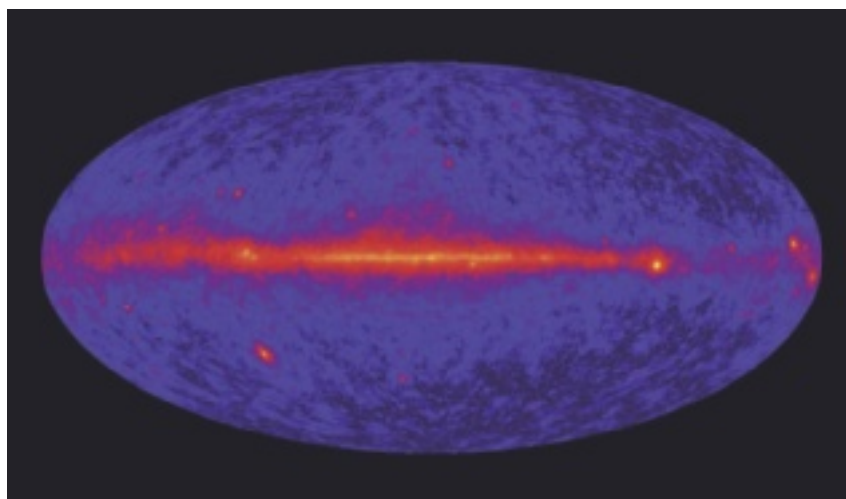
Des conséquences exotiques

Au-delà des fluctuations naturellement engendrées par l'inflation, beaucoup d'autres processus, plus ou moins exotiques, peuvent conduire à la formation de microtrous noirs dans l'Univers primordial. M. Khlopov et A.G. Polnarev, de l'Institut d'ingénierie physique de Moscou, ont suggéré en 1980 que s'il avait existé une phase d'expansion cosmologique durant laquelle les particules étaient non relativistes (phase dite « de poussière »), la production de minitrous noirs s'en serait trouvée décuplée. Dans un tel environnement, en effet, la pression du fluide primordial qui contrecarre l'effondrement en trou noir est moindre, si bien que l'amplitude des fluctuations nécessaire à leur formation devient nettement plus petite.

S. Hawking a également montré à la même époque que les collisions de cordes cosmiques, d'hypothétiques structures macroscopiques filiformes issues de brisures de symétries, ou de bulles de « vrai vide » (c'est-à-dire plus stables que l'Univers environnant et définissant donc un véritable état fondamental), devraient aussi engendrer la formation de microtrous noirs.

De récentes études ont suggéré que ces trous noirs pouvaient aussi affecter la synthèse des éléments chimiques. Des paires de quarks et antiquarks émis lors de l'évaporation de trous noirs primordiaux se fragmenteraient en effet en particules qui diffuseraient sur le plasma chaud d'électrons, de photons et de nucléons. De façon plus étonnante encore, la présence de trous noirs primordiaux pourrait modifier la baryogenèse (l'apparition d'une asymétrie entre matière et antimatière) en replongeant l'Univers dans

une nouvelle époque « relativiste » via l'émission de particules énergétiques. Les grands spécialistes de la relativité générale, John Barrow, de Cambridge, et Bernard Carr, de l'Université de Queen Mary, ont également souligné que l'histoire de la formation des trous noirs primordiaux conserverait la mémoire d'une éventuelle variation dans le temps de la constante de gravitation. Si celle-ci était notablement différente dans l'Univers jeune, comme le prévoient certaines théories d'unification, le taux de formation de trous noirs s'en trouverait modifié.



NSA/DOE/International LAT Team



NSA/ESA

3. LA DÉTECTION DES MICROTRous NOIRS passe par celle de leur rayonnement. Que ce soit en observant les antiprotons (à gauche, le détecteur AMS) ou les photons gamma (ci-dessus, la première vue du ciel en rayons gamma par le satellite Fermi), il est cependant délicat d'extraire leur signal éventuel du bruit de fond cosmique.

De façon plus générale, l'étude des trous noirs primordiaux est liée à la compréhension de nombreux phénomènes de « nouvelle physique » caractérisant les débuts de l'Univers.

Pour l'heure, ces microtrous noirs primordiaux demeurent néanmoins invisibles... La traque, pourtant, ne s'achève pas ici ! Des détecteurs spatiaux de plus en plus performants, tels le spectromètre magnétique *Alpha* AMS-II ou le spectromètre gazeux GAPS, permettront dans la prochaine décennie de rechercher la signature de l'émission éventuelle par les trous noirs non plus seulement de protons et d'antiprotons, mais également d'antinucléons légers (comme l'antidéuteron,

constitué d'un antiproton et d'un antineutron). Ceci permettrait de gagner un ordre de grandeur en sensibilité et conduirait peut-être à une première détection. En effet, les antideutérons issus des processus classiques (interactions des protons du rayonnement cosmique avec les protons du milieu interstellaire) ont des énergies plus grandes que ceux qui seraient émis par les petits trous noirs lors de leur évaporation.

Simultanément, les photons de haute énergie (rayons gamma) forment aussi une signature observationnelle intéressante. Ils proviennent non seulement de l'émission directe par le trou noir, mais également de la désintégration de pions neutres. À la différence des particules chargées, les rayons gamma ne sont pas confinés dans les galaxies par le champ magnétique. Ils permettent donc d'observer des galaxies lointaines et, par conséquent, un volume d'Univers considérable. Moyennant une prise en compte de l'évolution de la densité de trous noirs dans le temps (car l'évaporation modifie le spectre d'émission), et une bonne caractérisation du bruit de fond lié aux galaxies et aux noyaux actifs de galaxies, les rayons gamma offrent des contraintes sur la population des trous noirs primordiaux comparables à celle des antiparticules, mais indépen-

10^{-21} mètre de rayon. Dès lors qu'un trou noir, au cours de son évaporation, devient plus petit que ce seuil, il est une source potentielle de nouvelles particules plus lourdes que celles observables au LHC. De telles particules sont prédites, par exemple, par le modèle supersymétrique qui constitue l'extension la plus naturelle du modèle standard de la physique des hautes énergies.

Une contribution à la matière noire ?

Enfin, les microtrous noirs primordiaux contribuent peut-être pour partie à la matière noire. Cette forme de matière mystérieuse et invisible est environ six fois plus abondante que la matière usuelle – ou baryonique. Des trous noirs primordiaux dont la masse serait assez élevée pour que leur évaporation soit négligeable – de l'ordre de celle d'une minuscule planète – constituent peut-être une fraction de cette matière invisible. Une possibilité plus intéressante encore vient des résidus de l'évaporation de trous noirs primordiaux légers. Ces reliques d'évaporation, à peine plus lourdes qu'une poussière, mais dont la densité avoisinerait 10^{87} tonnes par centimètre cube, pourraient contribuer à la matière noire. La preuve de l'existence de ces résidus serait par ailleurs une avancée majeure dans la compréhension de la gravitation quantique, cadre naturel de la description de la fin de vie de trous noirs à l'échelle de Planck. En effet, tandis que la relativité générale d'Einstein prédit une évaporation complète sans que subsiste la moindre relique, beaucoup de modèles de gravité quantique suggèrent l'existence de ces minuscules « restes » de trous noirs.

Bien qu'ils ne soient pas, au sens strict, primordiaux, d'autres trous noirs de très faible masse, pour lesquels l'évaporation par rayonnement de Hawking est aussi importante, pourraient également être mis en évidence dans les accélérateurs de particules et apporteraient alors des informations cruciales sur la nature de l'espace-temps (voir l'encadré page 48).

Ainsi les trous noirs microscopiques sont-ils des objets au carrefour des théories d'unification de la physique moderne. Quoi qu'il advienne de ces théories, les recherches sur la température, l'entropie, le rayonnement et le couplage des microtrous noirs avec les particules se sont déjà révélées être un moteur puissant pour la physique fondamentale. Mais, par-delà leurs propriétés intrinsèques, les trous noirs primordiaux sont aussi des outils privilégiés pour comprendre les premiers instants de l'Univers et mettre à l'épreuve de nombreux modèles spéculatifs en cosmologie. Leur étude ne fait sans doute que commencer. Quand bien même elle ne conduirait jamais à leur détection, elle accouchera sans doute d'avancées majeures en physique fondamentale. ■

PAR-DELÀ LEURS PROPRIÉTÉS INTRINSÈQUES, les trous noirs primordiaux sont aussi des outils privilégiés pour comprendre les premiers instants de l'Univers.

dantes. Grâce aux futurs satellites, tel *Fermi*, tout juste lancé, des améliorations considérables de sensibilité sont attendues. La quête des microtrous noirs ne fait que commencer !

Par-delà cette dimension cosmologique, les trous noirs primordiaux sont également un moyen privilégié pour étudier la gravitation et la physique des hautes énergies. En particulier, il a récemment été montré que la formation de ces trous noirs pouvait suivre les lois des « phénomènes critiques » en physique statistique. Les effondrements gravitationnels conduisant aux microtrous noirs commencent à être appréhendés dans ce cadre. Cette approche pourrait s'avérer riche de connexions entre différents domaines de recherche encore cloisonnés.

Les trous noirs primordiaux pourraient aussi apporter un éclairage inédit sur les modèles de physique des particules, dès lors que leur température excède les énergies aujourd'hui atteintes par les collisionneurs. L'énergie du grand collisionneur de hadrons LHC, soit 14 téraélectronvolts, équivaut à la température d'un trou noir de 1 000 tonnes et de