

# Les trous noirs défient la physique

Les astres effondrés et les trous noirs sont le reflet de l'Univers entier : leur étude renseigne sur l'histoire du cosmos et poussent dans leurs derniers retranchements les lois de la physique. Ces objets théoriques sont désormais les plus à même d'expliquer nombre de phénomènes extrêmes.

**D**e l'infiniment petit à l'infiniment grand, dans l'espace et dans le temps, le cosmos ne cesse de nous surprendre en dévoilant la diversité de ses structures. Des planètes jusqu'aux grandes structures, en passant par les étoiles et les galaxies, la gravitation gouverne l'organisation de l'Univers, dictant ses mouvements, son évolution, son devenir. C'est pourquoi, bien que ce numéro concerne des situations extrêmes où la gravité donne sa pleine mesure, il cache un foisonnement de sujets touchant à l'ensemble de l'astronomie et de la physique. C'est bien tout l'Univers qui est vu à travers le filtre des astres effondrés dont il est question, et particulièrement les trous noirs : évolution stellaire et galactique, cosmologie, relativité générale et mécanique quantique, physique des hautes énergies, théories nouvelles de l'espace-temps. Mais avec des objets aussi exotiques, on s'interroge : sont-ils issus d'une spéculation pure ou correspondent-ils à une réalité physique ? Ce Dossier répond.

La première partie introduit les arcanes de l'évolution stellaire. Les états d'équilibre que nous observons, celui du Soleil et de la plupart des astres, ne sont que provisoires. Les modèles développés au XX<sup>e</sup> siècle fournissent un schéma général de l'évolution des étoiles : l'effondrement du cœur en un résidu compact et l'expulsion des couches externes. Cependant, les modalités varient selon la masse.

Environ 90 pour cent des étoiles, dont le Soleil, ont une masse inférieure à dix masses solaires. Elles engendrent des « naines blanches », des corps de la taille de la Terre, mais un million de fois plus denses, tandis que les couches gazeuses externes se dissolvent lentement en « nébuleuses planétaires »

(voir *La fin extraordinaire des étoiles ordinaires*, par B. Balick, page 8).

Au-dessus de dix masses solaires, les étoiles (9,9 pour cent) explosent en « supernovae » (voir *Les supernovae : des explosions énigmatiques*, page 20). Leur cœur se contracte en une boule de 15 kilomètres de rayon, une « étoile à neutrons » dont la densité est comparable à celle des noyaux atomiques (voir *Les étoiles à neutrons*, par J. Novak, page 22). La pression qui règne en leur cœur est toutefois si élevée que les lois ordinaires de la physique à haute densité sont mises à rude épreuve ; les astrophysiciens spéculent alors sur l'existence d'étoiles « étranges » constituées de quarks, proches en taille et en masse des étoiles à neutrons, mais dont les propriétés observationnelles seraient difficiles à distinguer (voir *Les étoiles étranges*, par M. Oertel, page 28).

Enfin, quand l'étoile est au départ 30 fois plus massive que le Soleil, elle explose en « hypernova » se manifestant à nous sous la forme d'un puissant sursaut gamma, tandis que son noyau est condamné à s'effondrer en un trou noir. Ces objets sont ainsi une conséquence inéluctable de l'attraction gravitationnelle.

## Des objets exotiques et simples

Certes, les étoiles très massives sont rares : une sur 1 000 en moyenne. Notre Galaxie abritant environ 100 milliards d'étoiles, on peut s'attendre à ce qu'elle ait déjà engendré une dizaine de millions de trous noirs stellaires, dont seule une poignée serait observable. Gibier précieux, la chasse peut commencer ! Mais avant, on doit en comprendre les propriétés. C'est le thème de la deuxième partie de ce numéro.

## Jean-Pierre LUMINET

est directeur de recherche CNRS (LUTH)  
à l'Observatoire de Paris-Meudon.



Shutterstock/sdecoret

Imaginé dès la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle dans le cadre de la gravitation newtonienne sous forme d'astres suffisamment massifs pour emprisonner la lumière – donc invisibles –, les trous noirs n'ont reçu une assise théorique solide qu'avec la relativité générale. Cette théorie a révélé que l'Univers n'est pas un cadre immuable où se déroulent des phénomènes mus par des forces; c'est une structure à quatre dimensions, déformée, courbée par les masses qui s'y incrustent.

Les équations d'Einstein indiquent comment le degré de courbure de l'espace-temps dépend de la concentration de matière (incluant toutes les formes d'énergie). Les trous noirs naissent alors du couplage entre matière et géométrie: ils rassemblent tellement d'énergie dans une région confinée qu'ils creusent un « puits ». Toute particule, tout rayon lumineux pénétrant dans une zone critique définie par son bord (immatériel) sont irrémédiablement capturés.

Les propriétés des trous noirs sont si étranges qu'elles ont longtemps nui à la crédibilité du concept. C'est que les trous noirs touchent aux fondements mêmes de nos conceptions sur l'espace et le temps. Qu'en est-il de leurs caractéristiques réelles? Des microscopiques trous noirs (qui se seraient formés lors du Big Bang) aux géants en passant par les stellaires et les intermédiaires, ces objets dévoilent une panoplie de propriétés extravagantes.

Ce n'est pas le moindre des paris que de tenter d'expliquer leurs comportements subtils et souvent paradoxaux. Ces objets apparemment complexes sont en fait aussi simples que des particules élémentaires; quasi ponctuels, ils sont pourtant susceptibles d'une description thermodynamique; masses compactes qui ne devraient que croître, ils peuvent néanmoins s'évaporer (voir *Les prédictions*

*de Stephen Hawking*, par R. Parentani, page 42). Ce phénomène d'« évaporation quantique » suscite d'ailleurs beaucoup d'interrogations, ce qui reflète notre incompréhension de la gravité quantique et montre les différentes options qui s'offrent aux théoriciens. Les trous noirs jouent ainsi un rôle essentiel pour dépasser les frontières de la physique.

La courbure de l'espace-temps imprimée par un trou noir est responsable de spectaculaires distorsions. Les équations de la relativité générale autorisent le

## Les propriétés extravagantes des trous noirs sont si étranges qu'elles ont longtemps nui à la crédibilité du concept.

calcul de la propagation des rayons lumineux dans le champ gravitationnel des trous noirs. Par cette méthode, on obtient d'étonnantes images, idéalisées, des déformations optiques dues à un trou noir qui multiplie les images d'une source unique (voir *Trous noirs et trous de ver*, par A. Riazuelo, page 50).

Plus réaliste, l'entreprise de détection des ondes gravitationnelles a mis en évidence la difficulté de capter le signal gravitationnel émis lors de la formation d'un trou noir dans une explosion d'hypernova, ou lors de la coalescence de deux trous noirs (voir *Trous noirs et ondes gravitationnelles*, par Ph. Grandclément, page 58). Néanmoins, l'astronomie gravitationnelle sera l'une des clés pour ouvrir à l'observation des régions de l'espace-temps inaccessibles par ailleurs.

Les trous noirs sont une belle construction théorique, et la question qui intéresse au premier chef les astronomes est donc de savoir où et comment

les observer. C'est l'objet de la troisième partie, dédiée à l'astrophysique la plus concrète. Grâce à l'astrophysique «relativiste» (c'est-à-dire en champ gravitationnel fort), on sait que, par le mécanisme de l'effondrement gravitationnel, des trous noirs de toute taille et de toute masse peuvent se former. Les trous noirs peuvent se manifester à nous par des effets qui, bien qu'indirects, n'en sont pas moins accessibles à l'observation : leur quête n'est donc pas absurde. Un trou noir isolé est, par sa définition même, condamné à l'invisibilité, mais un trou noir «naturel» est rarement nu. Lorsqu'il baigne dans un environnement riche en gaz et en étoiles, il draine la matière ambiante dont il se nourrit. Or la matière avalée signale sa disparition par une émission de rayonnement électromagnétique. C'est ce dernier que les astronomes s'évertuent à détecter.

## Les trous noirs satisfont le principe de simplicité selon lequel le physicien doit privilégier la plus simple des hypothèses.

Par exemple, un trou noir de masse stellaire faisant partie d'un système binaire peut aspirer l'enveloppe gazeuse de son étoile compagne. Avant de disparaître, le gaz est chauffé violemment, émettant une luminosité caractéristique dans la gamme des rayonnements à haute énergie. Des télescopes à rayons X embarqués sur satellite recherchent de tels trous noirs stellaires dans les systèmes d'étoiles doubles à luminosité fortement variable. Ils ont découvert dans notre Galaxie des centaines de «sources X binaires». Certaines sont erratiques, c'est-à-dire qu'elles émettent des sursauts sporadiques de rayons X durant quelques secondes.

### Une vingtaine de candidats

Pour interpréter ces phénomènes, on a développé des modèles de «disques d'accrétion», où un gaz chaud tombe en spirale dans le trou noir. La chute s'accompagne d'une élévation de sa température et d'une émission de rayonnement. On estime que les sursauts de luminosité proviennent des régions internes du disque d'accrétion, qui sont très chaudes et agitées de turbulences. Une vingtaine de tels «candidats» trous noirs ont été repérés dans la Voie lactée.

Outre les trous noirs stellaires, la théorie de l'effondrement gravitationnel autorise l'existence de trous noirs «intermédiaires», «massifs» et «supermassifs» de respectivement mille, un million et un milliard, voire plus, de masses solaires. Trois mécanismes ont été proposés pour expliquer ces géants. Il peut s'agir de trous noirs primordiaux, formés par condensation de gros grumeaux dans la pâte de l'Univers primitif il y a 13 milliards d'années (voir *Les trous noirs primordiaux*, page 56).

Un autre processus est fondé sur la tendance au grossissement irréversible des trous noirs. Le troisième mécanisme est l'effondrement gravitationnel direct d'un amas d'étoiles.

Où chercher ces trous noirs géants? Là où il y a le plus de matière! Les trous noirs intermédiaires sont à traquer du côté des plus gros amas globulaires, denses concentrations d'étoiles peuplant le halo des galaxies (voir *Les trous noirs de masse intermédiaire*, par J. Laval, page 102). Les trous noirs massifs et supermassifs ne pourraient eux se former qu'au centre même des galaxies (voir *Les trous noirs supermassifs*, par K. Weaver, page 112); il y en aurait donc un par galaxie, voire deux si de grosses galaxies ont fusionné par le passé.

Le centre de notre Galaxie abrite Sgr A\*, une radiosource remarquable par sa compacité et entourée d'un amas serré d'étoiles dont les vitesses sont anormalement élevées. Un trou noir de quatre millions de masses solaires accélérant ces étoiles est aujourd'hui la seule hypothèse compatible avec les observations.

L'idée des trous noirs géants avait d'abord été invoquée dans les années 1960 pour expliquer l'activité intense des noyaux actifs de galaxies. De fait, leur luminosité, jusqu'à un million de milliards de fois celle du Soleil, leur volume, inférieur à celui de notre Système solaire et leur masse, entre dix et cent millions de masses solaires ne s'expliquent que par l'existence d'un trou noir géant en état de forte accrétion en leur centre.

On a compris récemment que tous les noyaux de galaxies peuvent abriter un trou noir massif, dont l'activité serait contrôlée par la quantité de carburant gazeux disponible. L'observation des galaxies «normales» (leur noyau est moins lumineux que le reste) révèle en effet maintes caractéristiques communes aux noyaux actifs. Le trou noir galactique ou ceux des galaxies proches seraient en quelque sorte des versions «miniaturisées» des phénomènes cataclysmiques qui se déroulent au cœur des galaxies plus lointaines et suractives.

Longtemps jugés comme une simple invention théorique, les trous noirs sont aujourd'hui largement adoptés pour expliquer les sources X binaires massives, les sursauts gamma, les noyaux de galaxies et autres phénomènes énergétiques. Permettant de construire les modèles les plus plausibles, ils satisfont le principe de simplicité selon lequel, parmi diverses hypothèses rendant compte des mêmes faits, le physicien doit préférer la plus simple. Pour que cette idée s'instaure, l'image du trou noir en tant qu'obscur gouffre passif a dû changer. La conjugaison des recherches théoriques et observationnelles a permis cette évolution, depuis l'image du trou noir nu, parfaitement passif et invisible, jusqu'à celle du trou noir qui, convenablement vêtu de gaz et d'étoiles, est la clé des phénomènes les plus lumineux de l'Univers. ■

### livres

J.-P. LUMINET, *Le destin de l'Univers: trous noirs et énergie sombre*, Fayard 2010.