

PROPOS RECUEILLIS PAR VAHÉ TER MINASSIAN

Auteur de nombreux ouvrages dont l'un, *Le Destin de l'Univers* (Fayard, 2006), est consacré aux trous noirs, Jean-Pierre Luminet est directeur de recherche au CNRS au Laboratoire d'astrophysique de Marseille et à l'Observatoire de Paris. À l'occasion du centenaire de la théorie de la relativité générale, il revient sur l'héritage d'Albert Einstein, avec notamment l'étude des trous noirs.

L'un des apports les plus spectaculaires de la théorie de la relativité générale d'Einstein est qu'elle prévoit l'existence dans l'Univers d'objets appelés « trous noirs ». Comment se forment-ils ?

Essentiellement par « effondrement gravitationnel ». L'un des apports de la théorie d'Einstein est d'avoir démontré que des corps aussi massifs que des étoiles peuvent, dans certaines conditions, se contracter sous l'effet de leur propre attraction gravitationnelle. Si, dans la plupart des cas, les lois de la physique quantique imposent une limite à cette compression, il existe un seuil au-delà duquel ce phénomène de concentration de la matière stellaire ne peut plus être stoppé. L'astre s'effondre sur lui-même jusqu'à délimiter une région de l'espace dont plus rien, ni la matière ni la lumière, ne peut sortir : un trou noir.

Un tel objet n'est pas, comme on le pensait dans les années 1920, réduit à un point ou à une singularité perdue dans l'immensité du cosmos. Il définit une portion de l'espace de forme sphérique – qui peut être légèrement aplatie au niveau des « pôles » si le trou noir tourne sur lui-même – appelée « horizon des événements », où tout ce qui se passe est, par nature, invisible, indétectable et donc imperceptible pour un observateur extérieur.

De quoi peut être fait l'intérieur d'un tel objet ?

Si l'on applique les équations de la relativité au cas le plus simple d'un trou noir ne tournant pas sur lui-même, puis qu'on procède à des extrapolations, on aboutit à la conclusion que son centre est occupé par une « singularité », un point vers lequel toute matière ou particule de lumière ayant franchi l'« horizon des événements » se dirigera inexorablement.

Toutefois, cette hypothèse n'a plus le vent en poupe. D'abord parce que, dans la nature, un trou noir tourne sur lui-même, transformant dans les calculs la singularité centrale en un « anneau » « évitable ». Ensuite parce que, très probablement, les lois classiques de la relativité générale sont impuissantes à décrire complètement ce type d'astres. Avant de réussir à comprendre pleinement les trous noirs, il faudra sans doute en passer par d'autres théories, comme celle de la gravitation quantique, un domaine encore en développement. Dans ce nouveau paradigme, les trous noirs existent, ont toujours un « horizon des événements », mais ils n'ont pas de singularité centrale. Ils donnent naissance à des « trous de ver » qui les relient à d'autres points de l'Univers, ou ils « rebondissent », parfois en libérant leur énergie sous forme d'une titanesque explosion !

Quels phénomènes astrophysiques peuvent donner naissance à un trou noir ?

La recette d'un trou noir implique une brusque contraction de la matière. Où cela pourrait-il se produire ? D'abord, on l'a vu, au cœur de certaines étoiles en fin de vie, ayant épuisé le cycle de leurs réactions thermonucléaires. Précisément, dans ceux de ces astres dont la masse correspond à de trois à cent fois celle du Soleil. Les trous noirs générés de cette façon sont dits de type « stellaire ». Ils se comptent par millions dans la Voie lactée.

On sait aussi que le centre de presque toutes les galaxies est occupé par un trou noir « massif » ou « super massif », dont la masse varie entre 1 million et plusieurs milliards de fois la masse solaire. L'origine de ces « poids lourds » est controversée. Ils pourraient avoir été créés, sur de longues périodes, par la fusion, les uns avec les autres, de trous noirs stellaires, ou être le résultat de l'effondrement sur eux-mêmes de gigantesques amas d'étoiles. Une autre possibilité serait qu'ils aient été créés, au cours du Big Bang, par des fluctuations de densité du « plasma » chaud qui baignait l'Univers à cette époque. C'est l'hypothèse à la mode. Elle fait de ces trous noirs le germe des galaxies.

Enfin, à ces deux catégories de trous noirs s'en ajoutent deux autres dont l'existence n'a jamais été vérifiée expérimentalement.

Notre galaxie abrite, en son centre, un trou noir massif. Que sait-on de lui ?

Le centre de notre galaxie est situé à 25 000 années-lumière de la Terre. Il est difficile à observer à l'aide de télescopes classiques en raison de grandes quantités de poussières présentes sur la ligne de visée. Le seul moyen de l'étudier est d'avoir recours à des instruments fonctionnant sur des longueurs d'onde infrarouges, radios, rayons X ou gamma.

Dans le domaine radio, la partie centrale de la Voie lactée présente une source compacte :



FRANCK COURTÈS/AGENCE VU

Jean-Pierre Luminet

« Un trou noir est un objet “idéal”, par sa simplicité »

ENTRETIEN | A l'occasion des 100 ans de la théorie de la relativité, l'astrophysicien évoque l'étrangeté de ces entités prédites par Einstein

Sagittarius A*. Les observations infrarouges ont montré que celle-ci est entourée d'un amas d'étoiles. Un suivi, sur vingt-cinq ans, de cent de ces astres a permis d'en déduire leurs orbites. Celles-ci décrivent des ellipses dont l'un des foyers est, précisément, situé à l'emplacement de Sagittarius A*. Elles ont permis d'estimer la masse de l'objet caché à cet endroit : quatre millions de fois la masse du Soleil. Il ne peut s'agir que d'un trou noir.

Celui-ci est probablement entouré de ce que les astrophysiciens appellent un « disque d'accrétion », car on observe des fluctuations dans les signaux en provenance de cette région. Ces irrégularités pourraient s'expliquer par la présence de « points chauds » sur cette structure annulaire aplatie constituée de gaz. Mais il faudra attendre les résultats des prochains programmes d'observation pour le confirmer.

Quels sont ces programmes ?

La taille d'un trou noir est directement proportionnelle à sa masse. Un objet de 4 millions de fois la masse solaire comme Sagittarius A* a un diamètre d'environ 25 millions de kilomètres. Cela peut paraître beaucoup, mais, compte tenu de la distance qui nous en sépare, cela signifie qu'il est vu depuis la Terre sous un angle d'à peine 50 millièmes de seconde d'arc. Cela dépasse de très loin la résolution des plus puissants télescopes ! Deux projets se proposent de contourner le problème en recourant aux techniques d'interférométrie. Le premier, Event Horizon Telescope (EHT), va consister à faire fonctionner de concert des radiotélescopes du monde entier – dont ceux de l'Institut de radioastronomie millimétrique (IRAM), à Grenoble – afin de constituer un réseau instrumental géant de la taille de la Terre. La résolution ainsi obtenue – de l'ordre de 10 millièmes de seconde d'arc – sera suffisante pour réaliser des images. Non pas, évidemment, du trou noir lui-même. Mais de son disque d'accrétion.

Le second programme, Gravity, qui implique notamment l'Observatoire de Paris et l'Institut Max-Planck pour la physique extraterrestre, est fondé sur un instrument en cours de montage sur le Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO) au Chili. Il n'est pas destiné à produire des images, mais à mesurer avec une précision de l'ordre de

10 millièmes de seconde d'arc les positions des cibles visées – qu'il s'agisse de suivre précisément le déplacement des étoiles les plus proches de Sagittarius A* ou de connaître l'emplacement du bord interne du disque.

Qu'espère-t-on apprendre ?

Ces deux programmes ont pour objectif de tester la théorie de la relativité générale dans des situations où le champ de gravité est très fort. Ce qui n'a jamais été fait. Au passage, ils devraient nous livrer des informations sur les caractéristiques du trou noir du centre de notre galaxie. Comme, par exemple, sa vitesse de rotation sur lui-même, que l'on soupçonne très élevée. Mais ils n'ont pas pour vocation de confirmer par une observation directe l'existence des trous noirs. Le seul moyen pour y parvenir serait de réussir à détecter les ondes gravitationnelles qu'ils génèrent. D'autres instruments dans le monde tentent de le faire.

Existe-t-il des théories alternatives aux trous noirs ?

Oui, mais elles sont à la fois spéculatives et peu crédibles. Les théories modernes de la physique n'excluent pas les trous noirs, mais les englobent. C'est le cas de la « théorie des cordes » et de la « gravitation quantique à boucles », les deux voies qui sont explorées pour aller au-delà de la relativité générale d'Einstein.

De toute façon, même s'il se révélait que ces astres n'existent pas dans la nature, les physiciens n'auraient pas perdu leur temps. Un trou noir est, par sa simplicité, un objet « idéal » placé dans le monde réel. Il suffit de connaître sa masse, son moment angulaire et sa charge pour le décrire entièrement, là où des milliers de paramètres seraient nécessaires pour dépeindre un malheureux caillou. En absorbant la matière, il ne se contente donc pas de la soustraire de l'univers observable, il la dépouille aussi de son information. Ce qui contredit, au moins en apparence, les lois de la physique quantique. Ce faisant, les trous noirs constituent un extraordinaire paradoxe. Ce qui fait d'eux des objets modèles, utiles à la résolution de certains grands problèmes – comme la démonstration du fameux « principe holographique », une énigme dont la portée dépasse le cadre de la physique pour aborder le champ des mathématiques. ■

L'itinéraire d'un naturaliste humaniste

L'EXPOSITION

« Darwin, l'original » retrace le parcours intellectuel du père de la théorie de l'évolution

HERVÉ MORIN

Les stratégies créationnistes, comme les espèces, évoluent. Dans *Science*, le 17 décembre, le biologiste Nicholas Matzke livre une analyse originale des arguments portés par les adversaires de la théorie de l'évolution dans leurs tentatives de faire interdire son enseignement. Empruntant les outils classiques de la phylogénétique, il a retracé les passages qui, depuis dix ans, ont été recopiés d'un appel juridique à l'autre, y trouvant des indices de « descendance avec modification », comme aurait dit Darwin : les arguments les plus solides survivaient, les autres étaient écartés, au profit d'autres arguties. Même si les antiévolutionnistes s'en défendent, l'arbre généalogique ainsi créé suggère que leurs thèses tirent leur origine première du terreau créationniste.

Qu'aurait pensé Charles Darwin de cette application ironique des instruments qu'il a forgés à l'étude des thèses qui combattent, génération après génération, sa théorie de l'évolution ? Le savant répugnait à entrer dans l'arène pour défendre ses idées – qu'elles fussent attaquées ou déformées. Pensant que leur exposition systématique suffisait à lever doutes et objections, et s'appuyant aussi sur de solides soutiens, brillants orateurs. Sans doute aurait-il souri de ce bon tour, et poursuivi ses patientes études.

L'exposition « Darwin, l'original » que lui consacre la Cité des sciences trace ce même sillon de sérieux face à l'esbroufe, s'attachant plus à l'homme et à sa méthode qu'aux preuves habituelles qui défendent la théorie de l'évolution. Serpentant sur 1000 m², elle présente l'itinéraire intellectuel de Darwin, façonné par son tour du monde à bord du *Beagle* (1741 jours !), qui lui ouvrit les yeux sur les réalités géologiques et biologiques, mais aussi sur les duretés du monde – qui renforcèrent ses convictions anti-esclavagistes. C'est là qu'il se forgera une culture encyclopédique, comme le rappelle une des nombreuses consoles interactives de l'exposition. C'est là surtout que l'observation des pinsons des Galapagos, après celle de cousins de l'autruche en Argentine et la comparaison d'espèces vivantes avec des fossiles, le conduiront sur le chemin de l'illumination évolutionniste.

Ses trois livres majeurs – *L'Origine des espèces* (1859), *La Filiation de l'homme* (1871), *L'Expression des émotions chez l'homme et les animaux* (1872) – ponctuent l'exposition, qui insiste aussi sur une idée-force, son originalité première : là où ses prédécesseurs (et certains de ses successeurs) cherchaient à tous crins à rassembler les individus, à les regrouper en espèces, lui a vu la singularité de chacun, les variations entre tous, et est parti de celles-ci pour élaborer sa théorie.

L'exposition souligne les malentendus et les détournements dont elle sera victime, mais aussi ses apports toujours fructueux, notamment en médecine. Le catalogue est un précieux vademecum pour aller plus loin, et les passionnés se lanceront dans la lecture de *L'Évolution, de l'Univers aux sociétés* (Matériologiques, 506 p., 35 €), dirigé par le zoologiste Guillaume Lecointre, commissaire scientifique de l'exposition, et l'astrophysicienne Muriel Gargaud, qui explore les facettes du concept d'évolution aujourd'hui. ■

« Darwin, l'original », à la Cité des sciences et de l'industrie, Paris 19^e, jusqu'au 31 juillet 2016. www.cite-sciences.fr

Agenda

Exposition « Enquêteurs de nature »

La préservation de la nature est l'affaire de tous. Son étude et sa connaissance aussi. Au XVIII^e siècle, les naturalistes rapportaient du monde entier des spécimens pour enrichir les collections du Jardin du roi. Au XXI^e siècle, des milliers d'observateurs bénévoles scrutent plantes, insectes, oiseaux, chauves-souris... Des « enquêteurs de nature » à qui le Muséum national d'histoire naturelle de Paris rend hommage.

► **Au Cabinet d'histoire du Jardin des plantes, Paris 5^e, jusqu'au 16 mai 2016.**