
Documents sauvegardés

Mardi 11 septembre 2018 à 10 h 04

1 document

Par Université Bordeaux Montaigne

Sommaire

Documents sauvegardés • 1 document

La Recherche

1 mars 2018

« La visualisation est capitale pour comprendre les trous noirs »

La Recherche Pour le grand public, les **trous noirs** sont des astres nimbés d'une aura de mystère, est-ce parce qu'on ne les a jamais vus ?

3

La Recherche

Nom de la source

La Recherche

Type de source

Presse • Magazines et revues

Périodicité

Mensuel ou bimensuel

Couverture géographique

Internationale

Provenance

France

p. 40



Jeudi 1 mars 2018

La Recherche • no. 533 • p. 40 • 2363 mots

1

Voir les **trous noirs**

« La visualisation est capitale pour comprendre les trous noirs »

Propos recueillis par Philippe Pajot

Entretien avec Nathalie Deruelle, laboratoire astroparticules et cosmologie de l'université Paris Diderot et Alain Riazuelo, Institut d'astrophysique de Paris Qu'est-ce que « voir » un trou noir ? S'agit-il de connaître les paramètres qui le définissent ou bien d'en faire une image à l'aide d'un télescope ? Spécialistes de la relativité générale, le cosmologiste Alain Riazuelo et la physicienne Nathalie Deruelle nous livrent leur analyse.

La Recherche **Pour le grand public, les trous noirs sont des astres nimbés d'une aura de mystère, est-ce parce qu'on ne les a jamais vus ?**

Nathalie Deruelle On ne les a jamais vus, mais on les représente - c'est ce qui est important. Quand j'étais étudiante, beaucoup de chercheurs, en particulier en France, doutaient encore de l'existence des **trous noirs**. En 1971, j'avais lu dans la revue *Physics Today* un article des physiciens John Wheeler - qui a popularisé le terme « trou noir » - et Remo Ruffini (1). Cet article était largement illustré. On avait l'impression que les équations devenaient une réalité tangible. L'impact de cette visualisation sur l'étudiante que j'étais a été déterminant. Peut-être qu'ils existent finalement, me suis-je dit.

Alain Riazuelo J'ai récemment rencontré un chercheur post-doctorant qui m'a dit que les images de **trous noirs** que j'avais produites il y a une dizaine d'années avaient motivé son intérêt pour

l'astrophysique. La visualisation a donc un rôle important. Elle met des équations en images et ces images forgent une vision du monde.

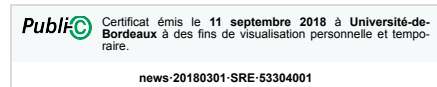
Comment a évolué notre approche des trous noirs ?

N. D. Alors que la solution de Schwarzschild avait été extraite de la théorie de la relativité d'Albert Einstein dès 1916, il a fallu attendre les années 1960 pour que les **trous noirs** qu'elle décrit soient compris. Avant cela, les chercheurs - y compris Einstein - n'appréhendaient pas bien la signification de leur « horizon », cette sphère dont rien ne peut sortir, pas même la lumière. Les problèmes étaient mathématiques - selon le système de coordonnées, cette sphère est pathologique ou non.

Notre visualisation des trous noirs a-t-elle évolué de manière semblable ?

N. D. Oui. Le premier à proposer une vision géométrique d'un trou noir fut l'Autrichien Ludwig Flamm. Dès 1916, il a dessiné une espèce de drap déformé

© 2018 La Recherche. Tous droits réservés. Le présent document est protégé par les lois et conventions internationales sur le droit d'auteur et son utilisation est régie par ces lois et conventions.



et troué qu'il a fallu cinquante ans pour comprendre (voir ci-contre). Le drap déformé représente le « plan » équatorial courbé aux abords du trou noir et le trou marque l'horizon au-delà duquel on ne voit rien. Aujourd'hui, on se représente les **trous noirs** comme quelque chose de noir sur un ciel étoilé. Ces deux images sont, en fait, deux représentations du même objet : le « trou » étant l'objet noir et la courbure du drap faisant dévier la lumière, comme les images construites par Alain Riazuelo l'illustrent. Quand il s'agit d'un système binaire - deux **trous noirs** en rotation l'un autour de l'autre - , leurs horizons se déforment. L'image actuelle est celle de bulles de savon tournant l'une autour de l'autre. Quand les **trous noirs** fusionnent, les bulles s'assemblent pour en former une plus grosse.

Comment définir un trou noir ?

A. R. Sur le plan mathématique, un trou noir est une solution des équations de la relativité générale. Fait remarquable, cette solution est définie uniquement par deux paramètres : sa masse et sa vitesse de rotation - ou spin. De fait, ce sont des objets physiques très « purs », dans le sens où seuls deux paramètres suffisent à les définir complètement (lorsqu'ils sont isolés).

Comment sait-on qu'il y a des **trous noirs** dans l'Univers et de quel type sont-ils ?

A. R. Dans l'Univers, on rencontre des **trous noirs** stellaires issus de l'effondrement d'étoiles massives que l'on « voit » quand ils sont en couple avec d'autres étoiles normales, c'est-à-dire lumineuses. Ils sont alors trahis par les émissions de leur environnement - par exemple, Cygnus X-1, qui a été le

premier candidat trou noir identifié en 1971. Il y a également les **trous noirs** de quelques dizaines de masses solaires, telles les binaires de **trous noirs** révélées par la détection des ondes gravitationnelles depuis 2015 (cinq fusions de **trous noirs** binaires ont été enregistrées jusqu'ici par les interféromètres Ligo et Virgo). Dans la gamme des fortes masses, on rencontre les **trous noirs** massifs, pesant des millions de fois la masse du Soleil, tapis au centre des galaxies. Pour ces derniers, on déduit leur existence par leur environnement de gaz, qui émet un puissant rayonnement quand il est chauffé (les quasars (*) lointains), ou parce qu'ils détruisent les étoiles qui passent à leur portée (lire p. 54). Pour le plus proche de ces **trous noirs** massifs, Sgr A*, au centre de notre propre Galaxie, ce sont les étoiles en orbite autour de cette région qui l'ont trahi. L'étude de Sgr A* est le principal objectif de l'instrument Gravity, installé sur le Very Large Telescope, au Chili (lire p. 50).

Le tableau que nous avons des **trous noirs** est-il complet ?

A. R. On ne peut pas le savoir, car nous connaissons uniquement ce que nous voyons ou ce dont nous pouvons déduire l'existence à l'aide de nos connaissances en physique. Par exemple, les équations de la relativité générale autorisent a priori des **trous noirs** de toutes les masses. Mais nous ne voyons pas de **trous noirs** de masse intermédiaire - entre 1 000 et 10 000 fois la masse du Soleil. Existents-ils ? Il y a des candidats, mais les choses ne sont pas claires. De même, on a enregistré uniquement des fusions de **trous noirs** d'une trentaine de masses solaires. Peut-être qu'il y a aussi des collisions de **trous noirs** de 10 masses solaires, mais comme le taux de détection dans le volume exploré se révèle plus petit, on ne

les a pas encore détectés. Autrement dit, on voit les têtes qui dépassent, mais cela ne nous permet pas de dire qu'il s'agit de la population la plus nombreuse.

Peut-on se représenter des **trous noirs** isolés ?

A. R. On peut l'imaginer en ombre chinoise, en supposant un trou noir isolé devant le fond du ciel : on verra alors sa silhouette se découper sur le fond étoilé. Cela donne toutes ces images très étonnantes que j'ai pu calculer : puisque l'espace-temps à proximité du trou noir est très déformé, la lumière peut faire le tour, voire plusieurs tours avant de revenir à l'oeil de l'observateur. Cela engendre des effets tout à fait contraires à l'intuition (voir p. 43). Des **trous noirs** avec un disque - c'est ce qu'a fait Jean-Pierre Luminet en 1979 - jusqu'à des représentations récentes du trou noir Gargantua pour le film *Interstellar* (lire p. 44).

N. D. Pour moi, la visualisation fait partie du travail de recherche. La représentation de Flamm, par exemple, a été capitale pour commencer à comprendre les **trous noirs**, pour donner du sens à une solution mathématique et créer une image qui sort de l'équation. Ce type d'image sert à guider l'intuition des chercheurs pour prédire de nouveaux phénomènes observables. C'est un aspect de pure recherche. La visualisation sert aussi pour extraire des résultats scientifiques des données observationnelles auxquelles il faut donner du sens, guidé par le travail théorique et nos représentations. Les visualisations, comme celles d'Alain Riazuelo, de **trous noirs** isolés pour lesquels il n'y a pas encore de données observationnelles, servent aussi à faire rêver, à faire sentir la

beauté de l'Univers et... à faire de beaux films à Hollywood.

Quid des trous noirs binaires ? Peut-on se les représenter de la même façon ?

A. R. Avec des trous noirs binaires ou un trou noir en rotation, les calculs numériques sont bien plus lourds, de sorte que la représentation n'est pas aisée. Pour un trou noir isolé, on peut avoir une précision presque arbitraire. J'ai ainsi conçu un simulateur de vol où l'on se promène autour d'un trou noir isolé et les calculs sont faits en temps réel à mesure que l'on se déplace. À l'inverse, avec un trou en rotation, la quantité de calculs à effectuer est pour l'instant réhibitoire pour faire du temps réel. Et pour des collisions de trous noirs, c'est beaucoup, beaucoup plus difficile, ne serait-ce que parce qu'il y a quelques années, on ne savait même pas simuler de telles collisions, même avec les plus gros ordinateurs.

N. D. Les outils numériques et analytiques ont été en effet très importants pour parvenir à détecter les ondes gravitationnelles résultant de la fusion de deux trous noirs. Le but est de prédire leur « forme », leur « gazouillis » (*chirp* en anglais), qui décrit leur danse folle et leur fusion en un trou noir plus gros. Or ce signal observé est si faible, tellement noyé dans le bruit, qu'il faut le calculer à l'avance pour être en mesure de détecter quelque chose. Les « patrons d'onde », des modélisations précises du signal faites notamment par Luc Blanchet, de l'Institut d'astrophysique de Paris, pour ce qui est du début du signal, et par Thibault Damour, de l'Institut des hautes études scientifiques, pour les raccorder aux simulations numériques, sont confrontées aux données expérimentales,

ce qui a permis d'extraire des données le *chirp* qui correspond au passage de l'onde !

Enfin, les ondes gravitationnelles sont une nouvelle façon d'avoir des renseignements sur les trous noirs, de les « voir » ?

A. R. Voir un trou noir isolé directement, c'est ce que fera l'Event Horizon Telescope, avec normalement la première image de la silhouette de Sgr A* qui devrait être publiée courant 2018 (lire p. 46). Les ondes gravitationnelles nous donnent, elles, un nouveau sens qui n'est pas visuel. Mais si voir, c'est connaître les trous noirs, comme les ondes gravitationnelles nous fournissent l'intégralité de leurs paramètres - leur masse et leur spin -, on pourrait dire qu'on « voit » les trous noirs d'une nouvelle manière.

N. D. Cette nouvelle manière d'avoir des informations sur les trous noirs que sont les ondes gravitationnelles peut être comparée à ce qu'a fait Galilée : quand, en 1610, il a pointé sa lunette vers les cieux, il a découvert un autre monde qu'on ne pouvait pas soupçonner et qui, à terme, a changé notre vision de l'Univers.

Et quels renseignements sur les paramètres fondamentaux des trous noirs a-t-on justement obtenus jusqu'ici ?

A. R. Grâce aux ondes gravitationnelles, les masses des trous noirs avant fusion ont été obtenues, mais pas très précisément. Pour ce qui est des spins, le premier événement d'onde gravitationnelle détecté a donné une information sur le spin, mais pas le second.

N. D. Pour les spins, les indications sont moins sûres. Le signal n'est presque que du bruit, de sorte que, sans prédictions théoriques extrêmement précises, on ne voit rien ! C'est comme une radio bruitée où, pour entendre une mélodie, il faut la connaître d'avance. Autrement dit, il faut glisser dans les données les modèles théoriques et tout dépend de leur sophistication. Celle des modèles incluant la rotation des trous noirs n'est pas encore suffisante.

Aujourd'hui, les trous noirs sont omniprésents dans la recherche en astrophysique. N'est-ce pas une belle revanche pour des objets restés longtemps dans l'ombre ?

A. R. Les trous noirs sont fondamentaux pour l'évolution des galaxies et de l'Univers. Un résultat récent : on détecte de plus en plus de trous noirs très massifs dans l'Univers très lointain, donc jeune (2) . D'où viennent ces trous noirs supermassifs ? Comment ont-ils eu le temps de croître pour aboutir à ces masses dans un Univers jeune ? Peut-être que nos connaissances sur la manière dont apparaissent les trous est-elle complètement fautive. En tout cas, plus qu'une revanche des trous noirs, je pense qu'il s'agit d'une revanche de la relativité générale : quasiment aucun domaine de l'astrophysique n'échappe aujourd'hui à cette description de la gravitation. Que l'on étudie les exoplanètes, la cosmologie, les grandes structures de l'Univers, les lentilles gravitationnelles, on ne peut pas s'en passer.

N. D. Cette ubiquité démontre que cette théorie, qui a mis longtemps à s'ancrer dans le réel et dont les trous noirs sont les manifestations les plus extrêmes, a encore de beaux jours devant elle.

Encadré(s) :

Contexte

Les **trous noirs** sont de plus en plus présents en astrophysique. Pourtant, on n'en a jamais « vu ». En revanche, nous savons les représenter de mieux en mieux, et les détections de collisions de **trous noirs**, grâce aux ondes gravitationnelles qu'elles émettent, ouvrent de nouvelles perspectives.

ALAIN RIA

Chargé de recherche au CNRS, Alain Riazuelo est un ancien membre du consortium Planck. Le cosmologiste a produit quantité de représentations de **trous noirs**.

NATHALIE DERUELLE

Directeur de recherche au CNRS, Nathalie Deruelle est spécialiste de relativité générale. Elle a enseigné à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure.

ALIGNEMENT GRAVITATIONNEL

Les **trous noirs** stellaires, issus de l'effondrement d'étoiles massives, sont difficiles à repérer lorsqu'ils ne sont pas en couple. Pourtant, une équipe menée par Jean-Philippe Beaulieu, de l'Institut d'astrophysique de Paris, pense avoir repéré de tels astres. Quand deux étoiles sont alignées, on peut observer un phénomène de lentille gravitationnelle : l'étoile d'avant-plan focalise la lumière de l'étoile située derrière. Habituellement, l'étoile d'arrière-plan est une géante rouge du bulbe galactique, très lumineuse, et celle d'avant-plan une étoile de faible

masse. Dans certains cas, il se trouve que l'étoile d'avant-plan devrait être suffisamment massive pour être visible (on déduit sa masse de l'effet de lentille gravitationnelle), sauf qu'elle reste invisible. S'agirait-il de la première détection de **trous noirs** stellaires isolés dans notre Galaxie ?

Une aventure scientifique hors du commun

Avec Jean-Pierre Lasota, de l'Institut d'astrophysique de Paris, Nathalie Deruelle sort ce mois-ci un nouvel ouvrage qui rend hommage à tous les acteurs ayant contribué à l'aventure scientifique qui a abouti à la détection sur Terre des ondes gravitationnelles issues de la fusion de **trous noirs**. Une aventure qui débute avec Einstein et qui se termine avec les interféromètres Ligo et Virgo, mais qui est appelée à se poursuivre, car ces détections ouvrent la voie à une nouvelle astrophysique. Les astres compacts - étoiles à neutrons et **trous noirs** - sont omniprésents dans ce livre rempli d'anecdotes passionnantes. Indispensable pour ceux qui veulent comprendre comment expérimentateurs et théoriciens ont travaillé de concert pour aboutir à ces détections que l'on peut considérer comme l'un des plus grands accomplissements scientifiques de l'humanité.

Note(s) :

(1) R. Ruffini et J. Wheeler, *Physics Today*, 24, 30, 1971.

(2) C. Grier *et al.*, *Astrophys. J.*, 851, 21, 2017.

(*) Les **quasars** sont des noyaux de galaxies actifs, sources les plus lumineuses de l'Univers.