

**VOYAGE
DANS
L'ESPACE**

Épisode

67

LES TROUS NOIRS



De la fiction à la réalité

Le balado et les fascicules

Depuis janvier 2018, Claude Lafleur et Mathieu Rancourt produisent un balado consacré à l'exploration de l'espace. Intitulé *Voyage dans l'espace*, il est diffusé sur la plate-forme soundcloud.com. Chaque épisode vous fait parcourir une dimension particulière, qu'il s'agisse de l'exploration d'une planète, de la recherche de vie dans l'Univers ou de l'aventure des astronautes et de ceux et celles qui rêvent d'espace.

Pour la plupart des balados, ils préparent un exposé détaillé, sous forme de questions/réponses. Il peut s'agir d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace* Mathieu et le passionné d'espace Claude, ou d'une entrevue avec un spécialiste (souvent un astronome). Ils publient ces exposés sous forme de fascicules, comme celui-ci.

Notez que le balado diffusé s'inspire librement des questions/réponses préparées à cet effet. Le texte qui suit n'est pas un verbatim de l'émission, mais plutôt une autre version; le balado et ce fascicule se complètent l'un et l'autre.

Tous les fascicules sont offerts aux abonnés du balado *Voyage dans l'espace*, abonnement au coût de 5\$/mois, via la plate-forme patreon.com.

Mathieu Rancourt est géographe et professionnel de recherche.
Claude Lafleur est journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis cinquante ans les péripéties de l'exploration spatiale.

L'équipe des fascicules:
Rédaction: Claude Lafleur et
Serge Pineault
Couverture: Mathieu Rancourt
Illustrations: NASA

Balado: <https://soundcloud.com/voyage-danslespace/>

Abonnement:
<https://www.patreon.com/voyagedanslespace>

Facebook: <https://www.facebook.com/voyagedanslespace/>

Courriel: claude-lafleur1@videotron.ca

© Copyright, Claude Lafleur, 2021

ISBN 978-2-925106-34-0 (pdf)

ISBN 978-2-925106-33-3 (kindle)

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Québec, 2021

Dépôt légal: Bibliothèque nationale du Canada, 2021



Un trou noir, malgré sa masse époustouflante (des milliards de fois celle du Soleil), tiendrait aisément dans une main. C'est ce qu'on appelle une *singularité*.

Les trous noirs: de la fiction à la réalité

Écoutez le balado *Les trous noirs...* diffusé le 4 juillet 2021.

Existe-t-il un objet cosmique plus intrigant que les trous noirs?

Depuis des décennies, ils alimentent l'imagination d'un peu tout le monde, et en particulier celle des auteurs de science-fiction. On imagine entre autres que les trous noirs pourraient nous servir un jour pour voyager à travers l'Univers. Qui sait, peut-être même des extraterrestres s'en servent-ils pour venir nous visiter?!

Mais comme nous le verrons, la réalité des trous noirs diffère de ce que nous présente la science-fiction. Ce sont néanmoins des objets cosmiques très bizarres; certaines de leurs propriétés dépassent même notre entendement. Et ces dernières années, on a fait des découvertes surprenantes à leur sujet.

Nous allons donc explorer la véritable nature des trous noirs en compagnie d'un expert en la matière, Serge Pineault, professeur titulaire retraité du Département de physique, de génie physique et d'optique de l'Université Laval. Comme il nous le racontera lui-même, ce chercheur s'est «toujours profondément intéressé» aux trous noirs. Ce fut même l'objet de sa thèse de doctorat dans les années 1970. Dans cette thèse, il a développé une méthode de calculs qui a par la suite servi aux artisans du film *Interstellaire* pour générer leurs images de trou noir!



Le professeur Serge Pineault.

1 – Un *fan* d'Einstein et de la Relativité

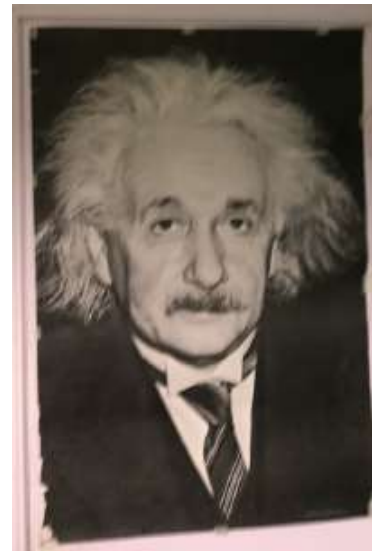
Professeur Pineault, avant de plonger dans le vif du sujet, racontez-nous comment vous êtes devenu astronome: qu'est-ce qui a fait, lorsque vous étiez jeune, que vous vous êtes intéressé aux sciences et éventuellement à l'astronomie, pour finalement devenir astrophysicien?

En fait, c'est un peu bizarre parce que je suis tombé un peu par accident dans la potion de l'astronomie.

En premier lieu, j'ai fait un cours classique où on ne faisait pas de «vraies» sciences avant l'équivalent du 4^e ou 5^e secondaire ou de la première année du cégep d'aujourd'hui. Ce qui fait qu'il s'est écoulé beaucoup de temps avant que je sois exposé entre autres à la physique moderne. Mais lorsque j'y ai été exposé, grâce à mon professeur Yves-Marie Dionne, j'ai été tout simplement emballé par la logique et par la rigueur que la physique nous procure. Mais à ce moment-là, c'était la physique qui m'intéressait, et non pas l'astronomie comme telle.

Ensuite, tout naturellement, je suis allé à l'Université Laval faire mon *bac* en physique. Pour moi, ce qui m'intéressait vraiment, c'était la physique théorique. Et au fur et à mesure que je poursuivais mes études, je me suis rendu compte que je

devenais un *fan* fini d'Einstein. (J'ai d'ailleurs toujours dans mon bureau le même poster de lui que j'avais dans ma chambre étudiant.) Et là, je me suis dit que je désirais continuer aux études graduées en relativité générale.



Le poster d'Einstein affiché dans le bureau du Prof. Pineault.

Or, à ce moment-là au Canada, il n'y avait qu'à l'Université de Toronto où des chercheurs travaillaient en relativité générale. Il y en avait entre autres un qui travaillait au département d'astronomie.

Je me suis donc inscrit à ce département et c'est comme ça que j'ai abordé le domaine de l'astronomie – mais pour mener des études sur la relativité générale.

Cependant, mon éventuel directeur de thèse était trop occupé pour me prendre sous sa gouverne, ce qui a fait que j'ai plutôt complété une maîtrise en magnétohydrodynamique – donc rien à voir avec la relativité générale!

Alors que je faisais mon doctorat, on venait de découvrir une nouvelle façon de décrire les trous noirs. J'ai alors suggéré à mon directeur de thèse de travailler sur les trous noirs... Et c'est ainsi que je me suis finalement retrouvé à consacrer une thèse de doctorat à ces objets.

Comme nous le verrons, la théorie de la relativité avait prédit l'existence des trous noirs bien avant qu'on ne les repère. C'est donc la théorie de la relativité qui vous a mené à vous intéresser aux trous noirs?

Absolument!

J'ai amorcé mon doctorat en 1971-1972 et, à l'époque, on n'avait repéré qu'un seul trou noir – et on n'était même pas certain que c'en était bien un. En général, on considérait les trous noirs comme des objets qui n'avaient un intérêt que du point de vue théorique, tandis que du point de vue observationnel, ça demeurait des objets plus ou moins hypothétiques. Je menais donc des travaux théoriques.

Il s'agissait pour moi de voir ce qui se passe pour une source de rayonnement qui se trouverait en orbite autour d'un trou noir. Ce qui m'intéressait, c'était d'étudier comment les propriétés observables de cette source allaient être modifiées par le fait que celle-ci est en orbite autour d'un trou noir. Ainsi, même si on ne peut pas voir la source comme telle (parce

qu'elle est trop proche du trou noir), on devrait pouvoir observer des variations dans le temps. Voilà l'objet de ma thèse.

Autrement dit, à l'époque où Serge Pineault mène ses études théoriques, on tente d'imaginer ce qui pourrait se passer lorsqu'une source – notamment une étoile – s'approcherait d'un trou noir. Comment les propriétés observables de l'étoile seront-elles modifiées par la présence d'un trou noir?

Vous êtes donc véritablement arrivé au début de la découverte des premiers trous noirs, vous êtes réellement l'un des pionniers du domaine, n'est-ce pas?

Disons que je suis arrivé au bon moment! Et alors que j'amorçais mes études graduées en 1972, s'est tenue une école d'été aux Houches, dans la vallée de Chamonix en France. Il s'agissait d'un stage d'été de quatre semaines qui portait exclusivement sur les trous noirs.

Nous étions une soixantaine d'étudiants gradués provenant d'un peu partout à travers le monde ainsi qu'une demi-douzaine de spécialistes. C'était vraiment très intense. Parmi les experts présents, il y avait Stephen Hawking, Kip Thorne (jeune chercheur à l'époque qui partagera en 2017 le prix Nobel de physique pour sa contribution à la découverte des ondes gravitationnelles), ainsi que d'autres chercheurs de très haut calibre.

Durant cette école d'été, nous avons été immergés littéralement dans ce qui se faisait de mieux à propos des trous noirs. De fait, la matière que nous voyions allait donner lieu à des publications scientifiques au cours des années suivantes.

Quelle formation de base absolument extraordinaire vous avez eue!

Honnêtement, ce serait difficile d'imaginer mieux!

Dans le cadre de votre thèse sur les trous noirs, vous avez mis au point une méthode de calculs qui a éventuellement servi aux concepteurs du film *Interstellaire*. Racontez-nous.

Charles Dyer, un étudiant gradué qui avait fait une thèse avec le même directeur de recherche que moi, avait utilisé une nouvelle méthode de calculs: pour étudier la lumière qui émane d'un corps céleste, au lieu de ne prendre qu'un rayon de lumière, on considère un faisceau de rayons. On examine donc comment ce faisceau de rayons se comporte – comment il peut être déformé, contracté, etc. –, ce qui nous donne de l'information sur les propriétés de la source de cette lumière.

Pour ma part, j'ai eu l'idée d'appliquer cette méthode aux trous noirs. C'est donc ce que j'ai fait. L'avantage de cette méthode, c'est qu'au lieu de prendre chaque rayon indépendamment, on analyse un faisceau, ce qui simplifie énormément les calculs.



Serge Pineault et Charles Dyer, aux Houches, en 1972 (à la mode de l'époque!).

Or, c'est cette méthode de calculs que les concepteurs du film *Interstellaire* ont voulu appliquer pour créer leurs images de trou noir. Ainsi, lorsqu'ils ont fait des recherches préalables, ils se sont rendu compte qu'il y avait des travaux de faits – les miens – qui rendent ces calculs considérablement plus faciles.

Ainsi, quelques années avant que le film ne soit produit, j'ai reçu un courriel de Kip Thorne, qui était alors producteur exécutif et scientifique associé au film. Celui-ci voulait vérifier qu'il n'y avait pas d'erreur dans mes travaux. Eh bien non, je n'avais vu aucune erreur et il n'y avait jamais eu d'*errata* de publié. J'ai donc dit à Kip que tout était en ordre et qu'il pouvait utiliser ma méthode de calculs.

J'ai par la suite reçu un courriel m'informant qu'il avait appliqué ma méthode et que celle-ci reproduisait les résultats qu'on connaissait.

Je dois avouer que j'ai eu un peu peur parce que ce n'était pas impossible, puisque les équations étaient terriblement complexes, qu'il aurait pu se glisser quelques erreurs!

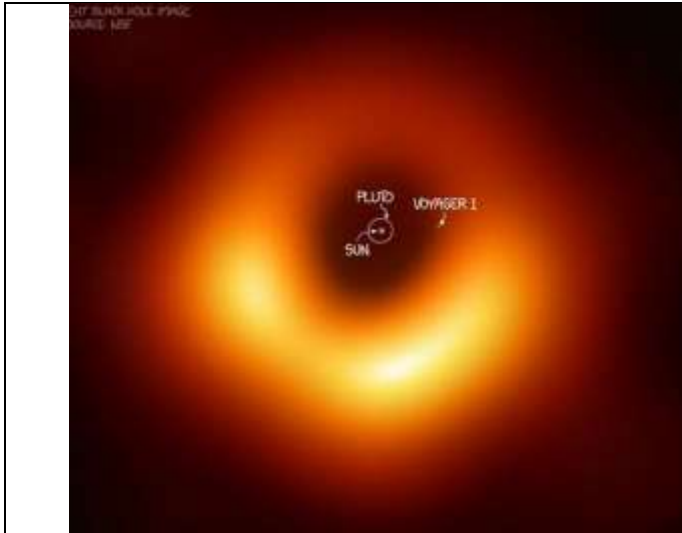
Avez-vous été d'une certaine façon associé à la production du film?

Non. Pas du tout. Ça été la seule occasion et Kip Thorne m'a demandé de garder cela pour moi, puisque ce n'était pas connu publiquement que le film était en train de se faire.

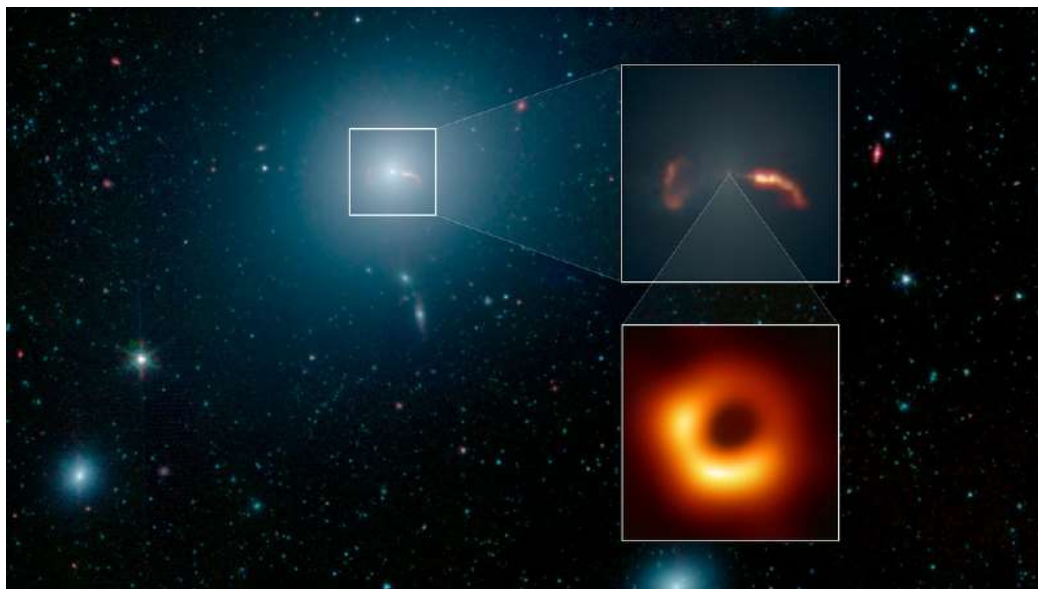
Ajoutons qu'à l'époque où j'ai fait ma thèse, il était impensable d'imaginer qu'on pourrait un jour prendre une photo d'un trou noir, comme nous l'avons justement fait en 2019 avec M87. Or, cette image, c'est exactement le genre de choses que je traitais dans ma thèse... sans imaginer que cinquante ans plus tard, on allait la voir!

Première photographie d'un trou noir

Le 10 avril 2019, une nouvelle étonnante est diffusée: des astronomes sont parvenus à photographier un trou noir. Mais comment est-ce possible puisqu'un trou noir est impossible à voir? En fait, ce qu'on voit sur l'image ci-dessous, ce n'est pas le trou noir comme tel, mais plutôt la matière qui l'encercle avant d'être absorbée par celui-ci.



Il s'agit d'un gigantesque trou noir, qui réside au cœur de la galaxie elliptique Messier 87 (M87), situé à 55 millions d'années-lumière de nous. La masse de ce trou noir est énorme: 6,5 milliards de fois celle du Soleil. Par conséquent, l'objet est immense, nettement plus vaste que le Système solaire, tel qu'esquissé au centre de la photo, mais il n'en reste pas moins qu'il ne représente qu'un minuscule point au centre de la galaxie (En [savoir plus.](#))



Ce montage photo nous montre la galaxie M87 (à gauche) au centre de laquelle se cache le trou noir. (En [savoir plus.](#))

2 – Quatre types de trous noirs

J'imagine que la plupart des gens ont à l'esprit le film *Interstellaire* dans lequel on voit ce qu'on appelle un trou noir *supermassif*. Il y a différents types de trous noirs. Qu'est-ce qui les différencie? Qu'est-ce qui fait qu'il y a différentes catégories de trous noirs?

Tous les trous noirs, peu importe leur dimension, ont les mêmes propriétés et il s'agit de propriétés très simples. Ce qui différencie les trous noirs, c'est la façon selon laquelle ils se forment.

Historiquement, les premiers trous noirs qui ont été considérés, ce sont ceux qui se forment à partir des étoiles massives.

On sait que les petites étoiles finissent leur vie en devenant des naines blanches, c'est-à-dire des astres qui ont à peu près la taille d'une planète, donc de l'ordre d'une vingtaine de milliers de kilomètres environ.

Ce sera le cas du Soleil, qui fait environ 300 000 fois la masse de la Terre. Imaginez donc toute la matière qui compose le Soleil et qui, au lieu d'occuper un volume d'un million et demi de kilomètres de diamètre – comme c'est le cas actuellement – ne sera plus que de dix mille kilomètres. Voilà qui fait une densité de matière absolument phénoménale! C'est le sort qui attend les petites étoiles.

Rappelons au passage les balados synthèses 55 – L'étrange monde des étoiles et 59 – Vie et mort du Soleil, et particulièrement le balado 59 – Le monde méconnu des étoiles dans lequel le spécialiste des étoiles Laurent Drissen nous explique la vie et la mort des étoiles – vie et mort qui dépendent essentiellement de la masse de l'étoile.

Les étoiles de taille moyenne deviennent au terme de leur vie des étoiles à neutrons, c'est-à-dire des objets d'une vingtaine de kilomètres de diamètre seulement – donc de la taille d'une montagne comme le mont Everest. Ces objets ont une densité absolument prodigieuse.



Conception artistique d'une étoile à neutrons, qui a la dimension d'une grosse montagne.

Ainsi, dans le cas des naines blanches, le poids d'une cuillerée à thé de la matière qui les compose serait de 10 tonnes. Dans le cas d'une étoile à neutrons, une cuillerée à thé de cette matière pèserait 100 millions de tonnes!

Et lorsqu'on arrive aux étoiles considérablement plus massives que le Soleil, elles vont tout simplement s'effondrer sur elles-mêmes jusqu'à ce que toute leur matière se concentre en un seul point. Et lorsqu'on dit *en un seul point*, c'est vraiment cela: imaginez un point qui tiendrait à l'intérieur de la paume de votre main... et où toute l'étoile s'y tiendrait! C'est ce qu'on appelle une singularité.



Si on tenait un trou noir dans notre main, il serait impossible de le voir puisque, par définition, un trou noir, quelle que soit sa masse, est infiniment petit. D'où l'idée, sur cette photo, que si vous la scrutiez à la loupe, vous ne le trouveriez pas!

Or, en physique, on ne peut pas traiter une singularité, puisque les lois de la physique ne fonctionnent plus. On est rendu dans le domaine de la physique quantique, tout en faisant de la relativité générale – mais les deux théories n'ont pas encore pu être rassemblées en une seule et même théorie.

Ce que vous racontez là est absolument ahurissant. Lorsque notre Soleil va terminer sa vie, il va se densifier au point d'atteindre les dimensions d'une petite planète. Lorsqu'il s'agit d'étoiles un peu plus massives (de quelques fois la masse du Soleil), elles deviennent des étoiles à neutrons qui font environ la taille d'une montagne. Quant aux étoiles encore plus massives, elles terminent leur vie en s'effondrant sur elles-mêmes jusqu'à devenir un point infiniment petit qu'on appelle une singularité – un point qui ne tiendrait même pas dans la paume de ma main, tant il est petit! C'est tout bonnement inimaginable.

Absolument! C'est absolument inimaginable. C'est le mot qui s'applique ici.

Des trous noirs nettement plus massifs

Donc, puisqu'on parlait des différents types de trous noirs, nous venons de parler des trous noirs de masse stellaire, des trous noirs qui se forment à partir des grosses étoiles. Historiquement, c'est de cette façon qu'on a conclu que les trous noirs prévus selon la théorie d'Einstein devaient exister puisque les grosses étoiles n'ont plus de façons de se stabiliser lorsqu'elles arrivent en fin de vie. Elles s'effondrent complètement, jusqu'à devenir des singularités.

En 1969, l'astrophysicien théorique Donald Lynden-Bell propose que les quantités d'énergie phénoménales qu'on observe au centre de certaines galaxies pourraient s'expliquer par la présence de trous noirs supermassifs, c'est-à-dire des trous noirs qui, au lieu de faire quelques dizaines de fois la masse du Soleil, atteindraient des millions ou des milliards de fois cette masse. Ces trous noirs supermassifs se trouveraient dans le centre des galaxies et c'est l'activité reliée à leur présence qui serait à l'origine de phénomènes comme les quasars.



Certaines galaxies émettent de puissants jets d'énergie, ce qui a longtemps mystifié les astronomes: quel mécanisme peut-il générer de tels jets d'énergie?

À partir des années 1960, les astronomes se sont mis à repérer des objets cosmiques qui émettent de prodigieuses quantités d'énergie – objets qu'on a baptisés quasars («*quasi-stellar sources*») – ainsi que des galaxies d'où émanent de fulgurants jets de matière et d'énergie. On a longtemps été mystifié par de tels déferlements d'énergie: quels sont les mécanismes qui peuvent générer autant d'énergie?

Or, Lynden-Bell a démontré que si un disque de matière se formait autour d'un trou noir supermassif, on pourrait en extraire suffisamment d'énergie pour expliquer tous les phénomènes qui étaient observés et qu'on n'expliquait pas, dont de puissants jets de matière en provenance du centre de certaines galaxies.

On s'est donc rendu graduellement à l'évidence qu'il devait y avoir des trous noirs supermassifs au centre des galaxies – dans la plupart, sinon même dans toutes les galaxies.

Nous parlons actuellement de deux sortes de trous noirs: ceux qui ont quelques dizaines de fois la masse du Soleil et ceux qui ont des millions ou des milliards de fois cette masse, donc des trous noirs de masse stellaire et supermassifs. Et juste pour compléter: la dimension des trous noirs supermassifs est également une singularité qui, théoriquement, tiendrait dans la paume de main!

Exact, toute la matière du trou noir supermassif tiendrait dans votre main!

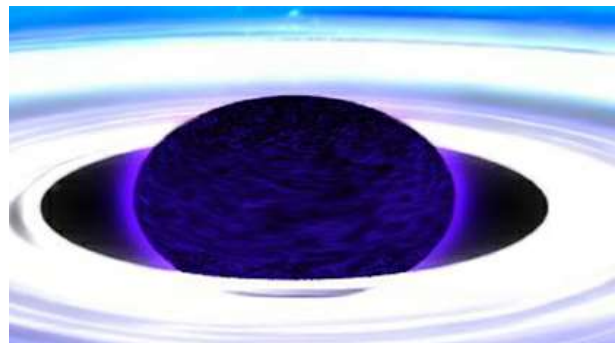
C'est incroyable.

Dans un trou noir, toute la matière se retrouve dans un point central, et cette matière a, formellement, un volume nul; elle se retrouve en un point infiniment petit, une singularité.

Notre problème, c'est que les lois de la physique telles qu'on les connaît ne s'appliquent alors plus.

L'horizon des événements

Le trou noir en tant que tel est infiniment petit, c'est une singularité. Par contre, il existe autour de lui une sphère imaginaire qu'on appelle l'horizon des événements. Dans le cas d'un trou noir ayant dix fois la masse du Soleil, cette sphère aurait un rayon de trente kilomètres.



Représentation artistique de l'horizon des événements: une sphère noire entourant le trou noir, ce dernier étant un point infiniment petit au centre. Et le tout est ici entouré par un disque de matière (blanche).

Lorsque de la matière tombe vers le trou noir, elle émet du rayonnement (lumière, rayons X, etc.) qu'on va pouvoir observer jusqu'à ce que cette matière franchisse l'horizon des événements. À partir de là, tout le rayonnement que cette matière peut émettre est capté par le trou noir. *Rien* ne peut sortir de l'horizon des événements, pas même la lumière.

Vous voyez donc que la singularité, où se trouve concentrée toute la matière, est

enveloppée derrière un horizon. Il n'y a aucune information – absolument rien – qui puisse ressortir de cet horizon. Dans cette région, c'est le mystère complet.

Et cet horizon se trouve à une trentaine de kilomètres du centre du trou noir?

La taille de la sphère qui entoure la singularité – l'horizon des événements – est proportionnelle à la masse du trou noir. Pour un trou noir qui aurait un milliard de fois la masse du Soleil, le rayon de l'horizon se trouve à 3 milliards de kilomètres.

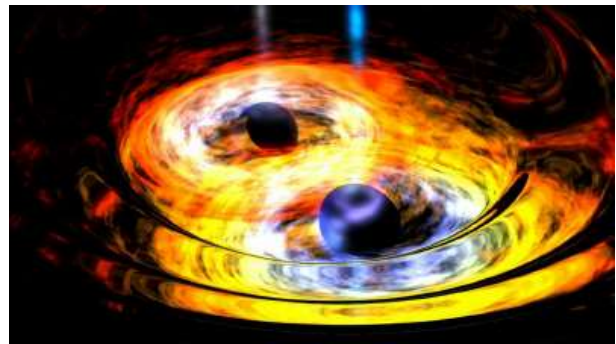
C'est ainsi que la dimension de l'horizon des événements se calcule selon une formule toute simple: 3 km x la masse du trou noir exprimée en masse solaire.

Y a-t-il des trous noirs de masse intermédiaire?

Revenons à nos différents types de trous noirs. On a des trous noirs de masse stellaire et des trous noirs supermassifs. Les trous noirs stellaires ne peuvent pas avoir plus qu'environ cent fois la masse du Soleil – au maximum – puisqu'il ne peut pas y avoir d'étoiles plus massives, car elles seraient instables. Et il y a des trous noirs supermassifs, dont la masse équivaut à des millions jusqu'à des milliards de fois la masse du Soleil. Mais que se passe-t-il entre les deux? C'est là qu'on entre dans le domaine des trous noirs de masse intermédiaire.

À l'époque où j'ai fait ma thèse de doctorat, c'était un type de trous noirs qu'on ignorait puisqu'on se disait que ce genre d'objets ne pouvait tout simplement pas exister. Sauf qu'on s'est rendu compte dernièrement que de tels trous noirs pourraient exister, possiblement dans certains amas d'étoiles ou dans certaines galaxies naines.

On a en outre repéré, par la détection d'ondes gravitationnelles, quelques trous noirs formés par l'union de deux trous noirs de masse stellaire, notamment un trou noir de quelques 80 masses solaires qui s'est fondu à un autre trou noir pour former un trou noir de 150 fois la masse du Soleil. Or, il n'y a pas d'étoiles suffisamment massives qui pourraient finir en un trou noir d'une telle masse. Dans ce cas, ce trou noir de masse intermédiaire résulte de la fusion de deux trous noirs stellaires. Il s'agit cependant d'un cas spécial.



Deux trous noirs de masse stellaire sont en train de fusionner pour donner lieu à un trou noir de masse intermédiaire.

Y aurait-il des trous noirs qui se formeraient dans le noyau de plus petites galaxies? Peut-être et là, on pourrait obtenir des trous noirs ayant la masse de 10 000 à 100 000 fois celle du Soleil. Mais à ma connaissance, le nombre d'objets connus qui tomberaient dans la catégorie de masse intermédiaire serait, présentement, de l'ordre de la dizaine ou de quelques dizaines tout au plus. Certains chercheurs ont avancé l'idée que les trous noirs de masse intermédiaire pourraient cependant être assez communs et agir comme précurseurs à des trous noirs supermassifs en accumulant progressivement de plus en plus de matière.

Par contre, les trous noirs de masse stellaire, il y en aurait peut-être cent à

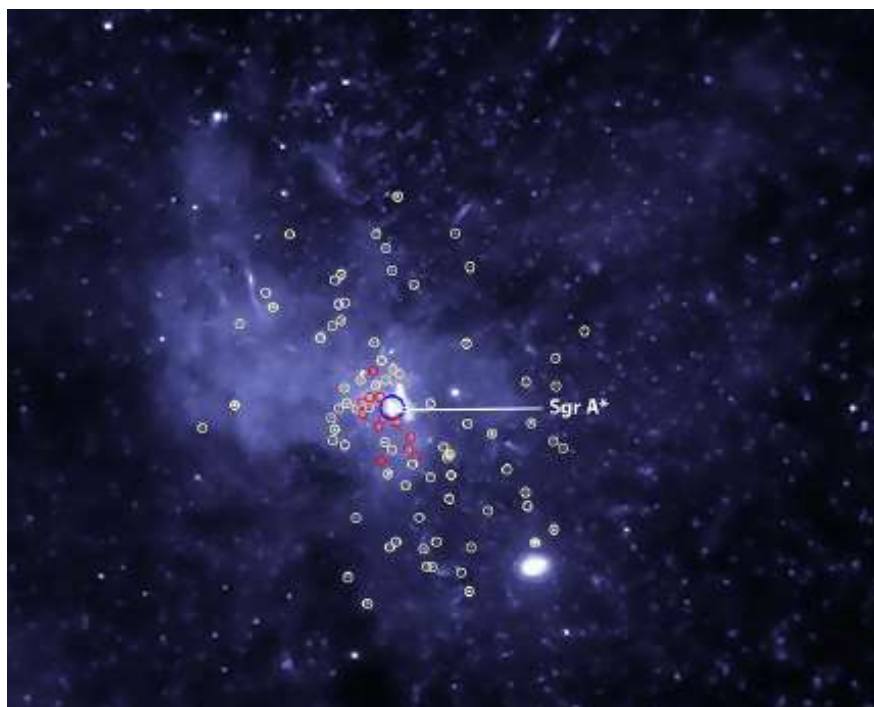
deux cents de repérés dans notre galaxie, tandis que les trous noirs supermassifs, si on considère que chaque galaxie active en contiendrait, alors là, il y en a une multitude. Et si chaque galaxie qui se respecte possède un trou noir en son centre, alors là, on parle de centaines de milliards de trous noirs.

Si nous avons enregistré ce balado il y a quelques années, on n'aurait probablement pas parlé des trous noirs intermédiaires, puisqu'on n'en avait pas repérés. On est vraiment à la fine pointe de la recherche.

Effectivement. Et si nous avions fait notre entrevue dans les années 1980, nous aurions peut-être parlé davantage de ce qu'on appelle les mini trous noirs, qui seraient le quatrième type de trous noirs.

Les mini trous noirs de Stephen Hawking

C'est Stephen Hawking qui, au début des années 1970, en utilisant la mécanique quantique, s'est rendu compte qu'il pourrait exister des trous noirs qui auraient la masse type d'une montagne, donc de quelques milliards de tonnes seulement.

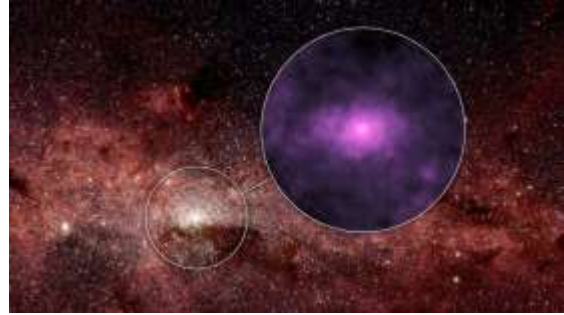


Notre galaxie contiendrait une multitude de petits trous noirs (de masse stellaire), représentés ici par de petits cercles, ainsi que le gigantesque trou noir appelle Sagittaire A* (Sag A*), dont la masse équivaldrait à quelques 4 millions de fois celle du Soleil.

Ces trous noirs, qui tiendraient toujours dans votre main, auraient un horizon des événements microscopique. Or, ce rayon microscopique engendrerait des effets quantiques. Ces effets généreraient entre autres des paires de particules: l'une pourrait tomber à l'intérieur de l'horizon des événements, et l'autre partir vers l'infini. Cela signifie que les mini trous noirs s'évaporeront à la longue.

Hawking a calculé que des mini trous noirs qui se seraient formés au début du Big Bang, il y a donc plus de 13 milliards d'années, et qui auraient une masse d'environ 10^{15} grammes, seraient en train de s'évaporer maintenant et émettraient par conséquent des rayons gamma.

À l'époque, on avait calculé que s'ils étaient distribués plus ou moins uniformément à travers l'Univers, le plus proche de ces mini trous noirs ne se trouverait qu'à 60 unités astronomiques de nous!



Un gigantesque trou noir se cache au cœur de notre galaxie, la Voie lactée, telle que l'illustrent ces deux représentations artistiques.

Or, une telle distance – qui correspond à 60 fois la distance Terre-Soleil – équivaut à près de deux fois la distance Soleil-Pluton, ce qui est très peu en termes cosmiques. C'est dire qu'un mini trou noir pourrait se trouver dans notre Système solaire, ce qui paraît invraisemblable.

Somme toute, les mini trous noirs seraient quelque chose d'*académique*, c'est-à-dire qu'il s'agit d'un concept intéressant à étudier mais pour lequel il n'existe présentement aucune évidence observationnelle.

3 – À la découverte des trous noirs

La théorie de la relativité, proposée par Albert Einstein dans les années 1910, a permis d'élaborer le concept de trous noirs. L'idée même des trous noirs est apparue des décennies avant qu'on en repère?

C'est-à-dire que la théorie de la relativité a prédit l'existence d'objets qui, advenant un effondrement total, concentreraient toute leur matière en un point infiniment petit avec, autour, un horizon des événements. C'était prévu mais c'était surprenant, même si on savait que des étoiles massives devaient probablement devenir des trous noirs. Mais au début, on se disait que c'était tellement bizarre que de telles choses ne se produisaient probablement pas.

Le premier trou noir

C'est ainsi qu'au mois d'août 1972, lorsque j'ai assisté à l'école d'été aux Houches, il n'y avait qu'un objet dans notre galaxie pour lequel on pensait qu'il

pouvait s'agir d'un trou noir – Cygnus X-1 – donc une source de rayons X.



Voici comment on se représente Cygnus X-1. Il s'agit d'un système double, c'est-à-dire composé d'un trou noir (à gauche) et d'une étoile ordinaire (à droite). Le trou noir est en train d'absorber la matière de l'étoile, ce qui génère des rayons X qu'on détecte depuis la Terre.

En 1965, les astronomes Louise Webster et Paul Murdin ont repéré un duo d'étoiles particulier situé dans la constellation du Cygne, à 6000 années-lumière de nous (donc dans notre galaxie).

Ce système binaire présentait la particularité d'émettre une quantité anormalement élevée de rayons X. Les deux astronomes ont par conséquent appelé ce système Cygnus X-1, la 1^{ère} source X répertoriée dans la constellation du Cygne. En 1971, Tom Bolton a identifié Cygnus X-1 comme étant un trou noir, en utilisant le télescope de l'observatoire de l'Université de Toronto – là où, justement, se rendait Serge Pineault réaliser son doctorat.

En étudiant de près Cygnus X-1, les astronomes ont fini par déduire qu'une grosse étoile (8,7 fois la masse du Soleil) gravite autour d'un objet ayant de 20 à 40 fois la masse du Soleil. L'étude détaillée de ce système binaire nous a ainsi procuré les premières indications de l'existence des trous noirs.

La façon selon laquelle on est parvenu à déterminer qu'il s'agissait d'un trou noir, c'est qu'on avait un objet émettant des rayons X autour duquel gravitait une étoile ordinaire. En fait, les deux objets gravitaient en orbite autour de leur centre de masse commun – ce qui fait qu'on observait des variations périodiques dans l'émission des rayons X, variations qui correspondaient à la période de révolution des deux objets l'un autour de l'autre.

Imaginez deux astres de même masse. Lequel tournerait autour de l'autre? Aucun, bien entendu. En réalité, ces astres tourneraient autour d'un point imaginaire situé à mi-chemin entre les deux. Et si l'un des deux astres est plus

massif que l'autre, ce centre commun de gravité se trouvera plus proche de celui-ci.

C'est ainsi que, dans le cas du système Terre-Lune – alors que la Terre est 81 fois plus massive que la Lune – le centre commun de gravité se situe près de la surface de la Terre. Notre planète se comporte alors comme un danseur qui fait virevolter autour de lui sa partenaire... au rythme d'une fois à tous les 28 jours.

Dans le cas du système binaire Cygnus X-1, une étoile ordinaire tourne autour d'un objet nettement plus massif en 5½ jours.

Il faut aussi savoir qu'on peut assez facilement déterminer la masse d'une étoile «ordinaire» en étudiant son spectre, c'est-à-dire la distribution de la lumière en fonction de la longueur d'onde ou sa couleur.

Comme on connaissait la masse de cette étoile, on a pu par la suite déduire celle de l'objet mystérieux autour duquel elle gravite. Et là, on s'est rendu compte qu'il s'agissait d'une masse trop grande pour qu'il puisse s'agir d'une étoile à neutrons ou d'une naine blanche. Ce devait donc être un trou noir. C'était la première fois qu'on se disait: «Eh bien là, on est en présence d'un trou noir.»

Le télescope spatial Uhuru

C'est à cette époque, en décembre 1971, qu'on a lancé un petit télescope spatial, qui s'appelle Uhuru. Et ce télescope va détecter de façon formelle les premiers trous noirs?

Oui. C'est qui est arrivé. En fait, la détection de Cygnus X-1 était quelque peu

incertaine, tandis qu'Uhuru a été le premier télescope qui observait l'Univers dans les rayons X. Et là, on a vraiment été surpris de découvrir à quel point le firmament ne contient pas que de beaux petits points de lumière qu'on appelle étoiles et de belles nébuleuses puisqu'il y a en réalité une foule d'objets qui émettent des rayons X.

Uhuru et la révolution des télescopes spatiaux

Depuis la surface de la Terre, où nous habitons, nous recevons une mince portion des radiations qui proviennent de l'espace, principalement la lumière et la chaleur du Soleil, ainsi que les ondes détectables par des radiotélescopes. Cependant, un large éventail de ce rayonnement cosmique est filtré ou bloqué par l'atmosphère – notamment les rayons X, les rayons gamma, etc. – ce qui nous protège contre bon nombre de radiations nocives.

Néanmoins, ces radiations sont riches d'information concernant tout ce que recèle l'Univers. C'est pourquoi les astronomes placent en orbite des télescopes munis de détecteurs conçus pour capter le rayonnement infrarouge, les rayons X, gamma, etc. Et même un télescope optique parvient à faire des observations de très haute qualité en orbite, car la turbulence de notre atmosphère dégrade la résolution permise par un télescope situé au sol (ce qu'on appelle le *seeing* en anglais).

C'est ainsi qu'à partir des années 1960, la NASA a entrepris de lancer de petits télescopes qui nous ont révélé



Le petit télescope spatial Uhuru était un cylindre de 56 cm de diamètre, mesurant 1,16 mètre de longueur et pesant 141,5 kg.

l'Univers sous différentes longueurs d'onde. Ces télescopes ont d'ailleurs rapidement révolutionné nos connaissances astronomiques.

L'un de ces premiers télescopes révolutionnaires a été surnommé du joli nom d'Uhuru. Il s'agissait en fait du premier *Small Astronomy Satellite* (SAS 1), aussi baptisé Explorer 42. Ce satellite ayant été lancé le 12 décembre 1970, jour anniversaire de l'indépendance du Kenya, il a été pour l'occasion surnommé du mot swahili signifiant liberté.

Il s'agit du premier télescope spatial conçu spécialement pour capter les rayons X en provenance du cosmos. Sa principale mission était de dresser un premier inventaire des sources célestes émettant des rayons X (galaxies, étoiles, etc.). La mission d'Uhuru n'a duré qu'une quinzaine de mois mais elle a été à l'origine de nombreuses avancées scientifiques, dont l'identification avec certitude des premiers trous noirs.

Bien sûr, on savait que certaines étoiles émettent des rayons X, comme c'est le cas

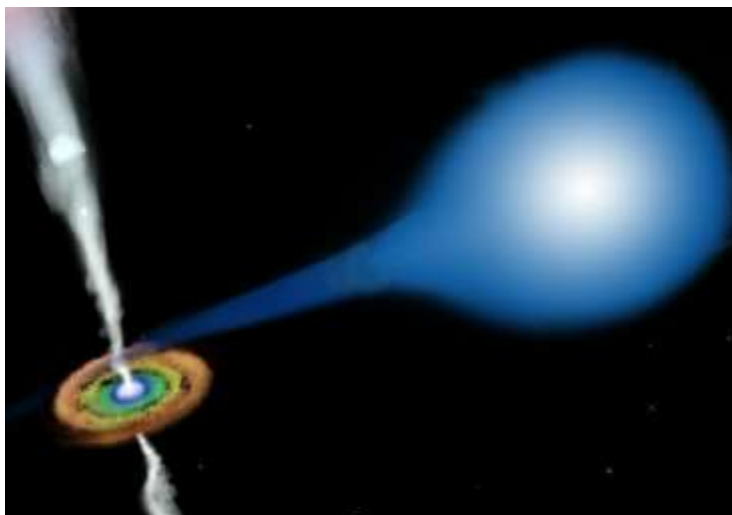
pour notre Soleil (quoique en quantité négligeable). On s'attendait donc à observer des rayons X en provenance d'étoiles normales. Mais grâce à Uhuru, on s'est rendu compte que des rayons X proviennent de régions où il n'y a pas d'étoiles, où on n'aurait pas pensé détecter des rayons X «normaux».

Il faut dire qu'Uhuru avait une résolution qui n'était pas très bonne [c'est-à-dire une capacité à distinguer précisément les objets célestes], donc on avait une boîte d'erreur dans laquelle il y avait plusieurs objets. Mais graduellement, on a lancé des télescopes de plus en plus précis. On est par exemple maintenant capable de pointer un télescope X directement sur un objet. À l'époque, ça ne se faisait pas, mais quand même, on a vu qu'il y avait des sources de rayons X qui ne provenaient pas d'étoiles ordinaires.

Ajoutons que lorsqu'une étoile ordinaire gravite autour des restes d'une étoile que sont les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs, elle peut déverser une partie de sa matière vers l'astre très compact. C'est ce déversement qui génère des rayons X.

En tombant vers l'objet compact, la matière en provenance de l'étoile ordinaire forme un disque, qu'on appelle un *disque d'accrétion*. C'est dire que les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs peuvent, dans le cas de systèmes binaires, être à l'origine de rayons X.

Alors donc, comment fait-on pour déterminer si on a ici affaire à un trou noir,



Un trou noir (à gauche) est en train d'absorber la matière d'une grosse étoile (à droite). Se forme autour du trou noir un disque d'accrétion de matière.

plutôt qu'à une naine blanche ou à une étoile à neutrons? On calcule la masse de l'objet. Si cette masse est en-deçà de 1,4 fois celle du Soleil, on sait qu'on a affaire à une naine blanche. Si la masse est d'environ trois fois la masse du Soleil, on a affaire à une étoile à neutrons. Par contre, si cette masse est supérieure à la masse maximale d'une étoile à neutrons, c'est qu'on a affaire à un trou noir.

Notons que la masse maximale d'une étoile à neutrons est plus incertaine que celle d'une naine blanche. Pour cette raison, plusieurs chercheurs sont plus conservateurs et admettront qu'un objet compact est un trou noir seulement si sa masse est supérieure à environ 5 à 10 fois la masse du Soleil.

Il nous faut donc détecter des rayons X en provenance d'un duo composé d'une étoile ordinaire et d'un objet compact, puis éliminer que ce dernier peut avoir la masse de naines blanches ou d'étoiles à neutrons.

4 – Gros plans sur les trous noirs

Comment se forment les trous noirs de masse stellaire? Comment naissent-ils?

Ça, c'est probablement ce qui est le plus facile à expliquer au sujet des trous noirs, puisque l'évolution des étoiles – de laquelle découlent les naines blanches, les étoiles à neutrons et les trous noirs – est l'une des facettes de l'astrophysique la mieux étudiée. Depuis que nos recherches se font à l'aide d'ordinateurs, on peut facilement reproduire l'évolution théorique des étoiles.

Bien entendu, on ne peut pas observer une étoile tout au long de sa vie, car cela prendrait, dans le cas du Soleil, une dizaine de milliards d'années, ou encore quelques dizaines de millions d'années dans le cas des étoiles les plus massives. On recourt plutôt à des simulations par ordinateur. Il s'agit de programmer toutes les lois de la physique dans un ordinateur, puis de les appliquer à une boule de matière, c'est-à-dire à une étoile d'une certaine masse et d'une certaine composition. On regarde ensuite ce qui se passe.

Ce qu'on observe, c'est qu'au cœur de toute étoile, les températures sont extrêmement élevées, ce qui génère des réactions nucléaires. Au début, les atomes d'hydrogène se fusionnent entre eux pour former de l'hélium. Cela se produit à des températures relativement basses, de l'ordre de 10 millions de degrés. (Pour nous, astrophysiciens, c'est une basse température.) Ce processus dégage énormément d'énergie, dont de la lumière et de la chaleur, c'est pourquoi les étoiles brillent tant et sont si chaudes. Sans cesse, le cœur de l'étoile se contracte et la température nécessaire pour la fusion de l'hélium en carbone va un jour se produire. [Il y a alors le flash de l'hélium, comme nous le relatons dans le balado 59 – Vie et mort du Soleil.]

Graduellement, les étoiles fabriquent ainsi les éléments chimiques de plus en plus lourds. Mais ce qui arrive au bout du compte dépend de la masse de l'étoile. Si celle-ci est petite, la contraction de son cœur s'arrête au stade de naine blanche – ce qui attend notre Soleil. Si l'étoile est plus massive, elle finira sa vie en étoile à neutrons – une étoile composée essentiellement de neutrons.

Quant aux étoiles les plus massives, les réactions nucléaires vont aller jusqu'à ce que des atomes de fer soient produits. Or, la fusion en atomes plus lourds que le fer ne génère pas d'énergie, mais plutôt en nécessite! Cela a pour conséquence que les grosses étoiles s'effondrent sur elles-mêmes. Leur cœur devient alors si dense qu'aucune loi de la physique ne peut arrêter cet effondrement... jusqu'à ce que toute la matière ne tienne plus que dans une singularité.

C'est de cette façon que les étoiles massives deviennent des trous noirs.



Un trou noir entouré d'un disque d'accrétion.

Puisque notre Soleil n'a pas la masse suffisante pour devenir un trou noir, on n'a donc pas à craindre qu'un jour, il devienne un trou noir?

Non, il n'y a pas de danger. Notre Soleil va finir sa vie en naine blanche et cela ne va arriver que dans 4½ milliards d'années. [Écoutez notre balado 63 – L'ultime destin du Soleil: un trou noir?]

Plongeon au cœur d'un trou noir

Nous avons mentionné au début du balado le film *interstellaire*, dans lequel on s'approche d'un trou noir. Mais, en réalité, si on pouvait faire un tel voyage, que verrait-on?

Si le trou noir n'a aucune matière autour de lui – on dit alors qu'il est nu –

vous verriez une zone centrale complètement noire. Car même s'il y a des étoiles en arrière-plan, la lumière de celles-ci, qui passerait à travers l'horizon des événements, n'en ressortirait pas. On va donc voir une sorte de sphère sombre.

Quant aux étoiles situées derrière le trou noir tout en se trouvant en périphérie de cette zone noire, leur apparence, leur position apparente, tout ça va être déformé. Vous allez voir, par exemple, une étoile en haut à droite, mais également une autre image de la même étoile en bas à gauche. Et si vous vous déplacez, tout cela va bouger. Ce serait vraiment étourdissant! Le trou noir agit un peu comme une lentille déformante.

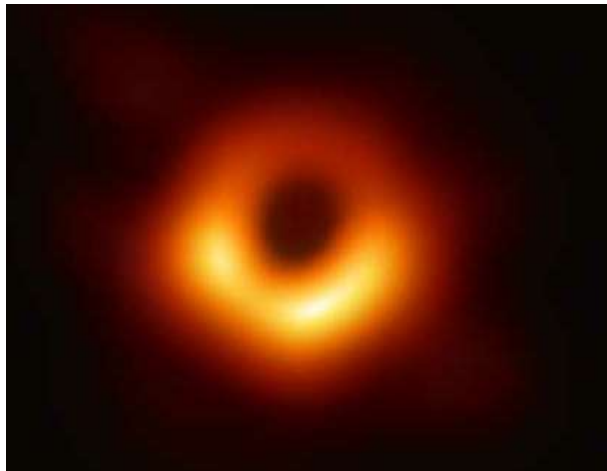


Supposons que vous faites partie d'une excursion interstellaire et que vous faites la rencontre d'un trou noir vagabond. Ces deux figures illustrent l'impact de sa présence sur l'apparence d'une galaxie. La première montre la galaxie telle que vue normalement et la deuxième lorsque le trou noir s'interpose directement entre la galaxie lointaine et votre vaisseau spatial. A titre d'exemple, si on suppose que l'ombre du trou noir (la partie circulaire centrale complètement noire) a une dimension angulaire comparable à celle d'une pleine Lune (30 secondes d'arc) et que le trou noir a une

masse d'un million de masses solaires, alors votre vaisseau se trouve à une distance d'environ 100 milliards de kilomètres ou 600 unités astronomiques (soit environ 10 fois la distance de Pluton), soit près de 30 000 fois le rayon de l'horizon du trou noir (une distance plus que sécuritaire!). Cette distance nous apparaît considérable quand on pense à notre Système Solaire, mais elle correspond à 1 centième d'année-lumière, soit près de 400 fois plus petite que la distance de l'étoile la plus proche du Soleil. (Crédit: A. Riazuelo IAP/UPMC/CNRS.)

Nous verrions donc une zone d'ombre où la lumière ne passe pas... qui serait de l'ordre d'une trentaine de kilomètres?

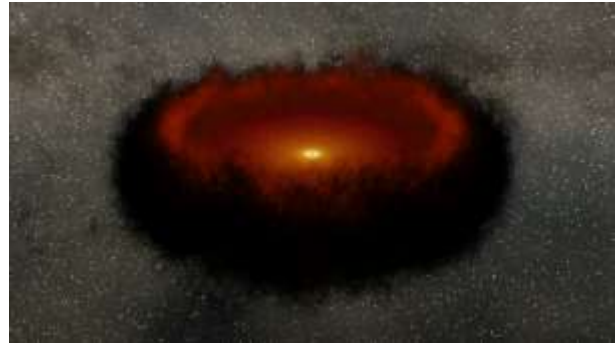
... si votre trou noir a dix fois la masse du Soleil, oui. Dans le cas de M87 – le trou noir qu'on a photographié –, comme il s'agit d'un objet dont la masse est de 6½ milliards de fois celle du Soleil, son horizon des événements se trouve par conséquent à quelques 20 milliards de kilomètres. Il s'agit donc d'une zone complètement noire, comme on le voit sur la photo.



La célèbre (et unique) photo d'un trou noir.

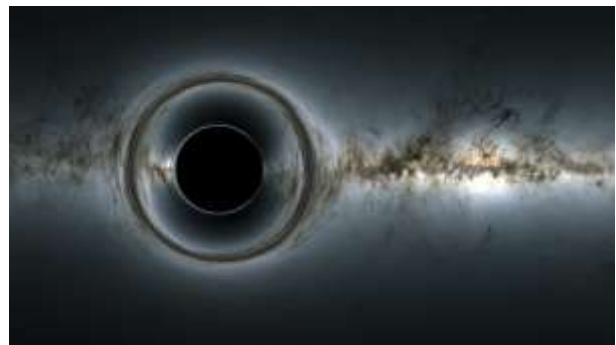
Ce qu'on voit autour, c'est une partie de la matière qui forme un disque d'accrétion. Ce n'est donc pas un trou noir nu, mais un trou noir entouré d'un disque de matière qui provient de la galaxie M87.

Il y a donc une quantité de matière qui tombe vers le trou noir et qui, ce faisant, forme un disque plus ou moins plat, dans le plan de rotation de la galaxie. Ce disque d'accrétion va émettre de la lumière et cette lumière va être altérée par la gravité du trou noir. Ainsi, la partie du disque qui est la plus loin de vous va être déformée parce que la lumière va devoir passer proche du trou noir, ce qui déforme complètement le disque de matière.



Un trou noir supermassif situé au centre d'une galaxie entouré d'un disque d'accrétion (rouge) avec tout autour un autre disque de gaz et de poussière.

Si on revient au trou noir d'*Interstellaire*, si vous vous rappelez bien, on avait l'impression que celui-ci était entouré de quelque chose de presque sphérique. Mais en réalité, le trou noir de ce film était entouré par un disque plat. Or, les aventuriers qui s'en sont approché se trouvaient dans le plan de ce disque. Et puisque la gravité du trou noir déforme considérablement le disque de matière, au lieu de le voir par la tranche, comme ça aurait dû être le cas, on a plutôt eu l'impression de le voir complètement relevé, ce qui fait que, finalement, on a eu l'impression que c'était presque un cercle parfait.



Un trou noir qui déforme l'apparence du ciel en arrière-plan.

Pour en revenir à un trou noir nu, nous verrions donc une zone sombre où la lumière ne passe pas. Mais si on franchissait l'horizon des événements, que verrait-on de l'autre côté, avant d'arriver au centre où se trouve la singularité?

Imaginons que vous vous laissez tomber en ligne droite dans un trou noir supermassif, les pieds en premier, et que vous regardiez vers le haut, là d'où vous venez. Vous allez alors voir l'Univers en train de vous dire *bye-bye*, puisque vous n'allez pas revenir de là où vous plongez. À partir du moment où vous passez l'horizon des événements, c'en est fait de vous! Vous êtes téméraire, vous voulez vivre une belle aventure? Eh bien, vous allez en avoir une!

Et sous vos pieds, vous ne verriez rien qui émane du trou noir, puisque la gravité est si forte que toute la matière – y compris la lumière qui tenterait de venir vers vous – ne peut pas sortir de l'horizon des événements. En fait, même la lumière ne peut pas converger vers vous, à partir du centre du trou noir. C'est le néant total.

Donc, au-dessus de votre tête, vous verriez l'Univers extérieur – mais considérablement déformé – et absolument rien sous vos pieds.

Notons que dans le film *interstellaire*, on a pris une certaine liberté d'imaginer des choses puisque nous ne sommes jamais allés dans un trou noir. Nous supposons qu'il s'agit d'un trou noir en rotation, la structure diffère un peu d'un trou noir immobile; on y retrouverait probablement des effets surprenants menant à la possibilité de se retrouver dans une dimension additionnelle, etc. Mais là, on est dans la spéculation...

Peut-on décrire la matière qui constitue un trou noir? De quoi est fait un trou noir?

En fait, à partir du moment où la matière franchit l'horizon des événements, la composition de celle-ci n'a absolument plus aucune importance puisque tout ce qui parvient jusqu'à la singularité perd son

identité. Il n'y a plus d'électrons, plus de neutrons, plus de protons, mais uniquement une certaine masse. Tout ce que veut savoir le trou noir c'est: «Dis-moi particule, quelle est ta masse?»

En réalité, ce n'est pas tout à fait exact puisqu'il y a un autre paramètre. Selon le théorème dit du *No hair theorem* – le théorème du sans cheveu –, lorsqu'un trou noir se forme, toute l'information qui était présente dans la matière avant qu'elle ne passe l'horizon des événements est perdue à jamais. Par exemple, un téléviseur tombe dans le trou noir ou un chien, cela n'a aucune importance! Tout ce qui importe, c'est la masse de ces objets.

Tout objet peut cependant tomber en ligne droite dans le trou noir ou il peut l'aborder en biais, selon un certain angle. Or, s'il arrive sous un angle, il a ce qu'on appelle un moment cinétique – et cela, ça compte pour le trou noir.

À toutes fins utiles, il y a donc deux propriétés – deux cheveux – qui comptent pour le trou noir: le «cheveu» de la masse et celui du moment cinétique (ou la quantité de rotation). Le reste n'a absolument aucune importance pour lui.

Est-ce que théoriquement, un trou noir peut atteindre une masse infinie? Pourrait-on avoir, théoriquement, un trou noir qui éventuellement engloberait toute la masse de l'Univers?

Il y a ici une expression qui rend bien compte de ce qu'un trou noir peut devenir: *Sky is the limit!* C'est-à-dire qu'il n'y a aucune limite à la masse que peut atteindre un trou noir.

Autrement dit, vous pouvez envoyer n'importe quelle quantité de matière dans un trou noir, celui-ci va l'accepter avec grand plaisir. Sa masse va augmenter sans aucune limite.

Par contre, il ne faut pas penser que, parce qu'on a un trou noir aussi gros soit-il, que celui-ci pose un danger absolu. Un trou noir, c'est un peu comme la gueule d'un loup, mais encore faut-il se jeter dans la gueule du loup pour être avalé! Le loup ne viendra pas vous chercher.

Donnons un exemple. Que se passerait-il si notre Soleil devenait, par un coup de baguette magique, un trou noir? Il cesserait alors de briller mais, puisqu'il conserverait la même masse, la Terre continuerait de graviter autour de lui, sur son orbite, comme si rien n'avait changé. De même pour Mercure, qui se trouve trois fois plus proche de ce Soleil théorique devenu trou noir, tout continuerait comme avant.

En pratique, un trou noir absorbe la matière qui se trouve à passer proche de son horizon des événements. (Or, dans le cas de notre Soleil devenu trou noir, cet horizon se trouverait à 3 kilomètres seulement.) Et s'il n'y a aucune raison pour que la matière passe proche de l'horizon des événements, il ne va rien arriver.

Détection des trous noirs

L'une des caractéristiques des trous noirs, c'est de retenir tout ce qui tombe à l'intérieur, y compris même la lumière – c'est pourquoi on ne peut les voir. Alors, comment fait-on pour les repérer?

Dans le cas des trous noirs stellaires, comme je l'ai mentionné, nous cherchons à détecter des sources de rayons X dans des systèmes binaires – composé d'une étoile ordinaire gravitant avec un objet invisible. Il s'agit alors de déterminer la masse des deux objets. Normalement, l'une des masses sera celle d'une étoile ordinaire et sera relativement facile à dé-

terminer. On peut ensuite parvenir à déduire la masse de l'autre objet, qu'on ne peut voir, et si celui-ci fait plus d'à peu près cinq fois la masse du Soleil, c'est un trou noir. Voilà!

En astronomie, il est facile de déterminer la masse d'un corps céleste, même si on ne le voit pas, si un second corps gravite autour du premier. Il s'agit de parvenir à établir la vitesse à laquelle circule le second corps autour du premier.

Par exemple, on sait que dans le cas de la Terre, chaque satellite qu'on place en orbite à quelques centaines de kilomètres d'altitude doit circuler à la vitesse de 28 000 kilomètres à l'heure. Cette vitesse dépend essentiellement de la masse de la Terre; si notre planète avait été plus massive, nos satellites devraient circuler plus rapidement autour d'elle pour se maintenir en orbite, ou si elle avait été moins massive, la vitesse orbitale serait moindre.

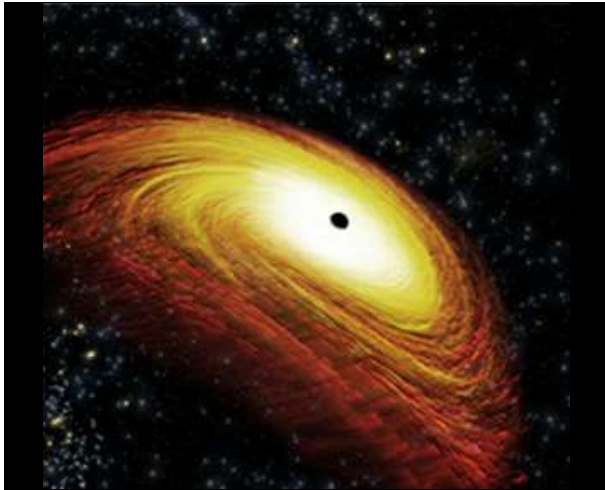
Cette vitesse ne dépend nullement de la masse du satellite. Elle est par contre liée à la distance séparant les deux objets. C'est ainsi que la Lune ne se déplace qu'à la vitesse de 3700 km/h, puisqu'elle se trouve à 385 000 kilomètres de la Terre.

Dans le cas de deux étoiles, les astronomes cherchent donc à mesurer la vitesse de circulation de l'une autour de l'autre et la distance séparant les deux astres.

Ainsi donc, un extraterrestre pourrait facilement déduire la masse de la Terre simplement en observant la révolution de la Lune autour de notre planète.

Dans le cas des trous noirs supermassifs, on scrute le centre des galaxies. S'il y a

une activité très importante – forte émission de radiation et d'énergie –, cela risque d'être dû à la présence d'un trou noir. Dans le cas de M87, on est même parvenu à photographier le centre de la galaxie et on a constaté que cela correspondait à ce qu'on s'attendait de trouver pour un trou noir.



Au centre de la plupart des galaxies se cache un trou noir.

Il y a aussi une autre façon de déterminer la masse des trous noirs supermassifs. Il s'agit de l'*imagerie par réverbération*, une méthode développée récemment. La plupart des trous noirs qui se trouvent au cœur des galaxies sont entourés par un disque d'accrétion qui émet du rayonnement. Or, il arrive souvent qu'on observe des variations importantes d'intensité dans ce rayonnement. C'est comme s'il y avait tout à coup une augmentation de la luminosité.

Or, ce rayonnement se propage à travers la galaxie et va être responsable de l'excitation (du «réchauffement») de la matière qui compose certains nuages de gaz qui orbitent tout près du trou noir mais à une certaine distance. On peut déterminer la période de rotation de ces nuages autour du trou noir, ce qui nous permet encore une fois de déterminer la masse de celui-ci. C'est de cette façon qu'on a déterminé la masse de nombreux trous noirs supermassifs au centre des galaxies.

5 – Des trous noirs par millions

Nous savons qu'au centre de notre galaxie, il y a un trou noir supermassif ainsi que de petits trous noirs éparpillés un peu partout à travers la galaxie – des trous noirs qui sont les restes d'étoiles massives. Il y aurait possiblement 200 trous noirs de masse stellaire qui vagabonderaient dans notre galaxie, n'est-ce pas?

En fait, c'est beaucoup plus que cela! Nous avons répertorié environ deux cents sources qui sont probablement des trous noirs stellaires. Cependant, il nous faut également prendre en compte la distribution de la masse des étoiles dans notre galaxie.

Nous savons que la masse totale de notre galaxie équivaut à environ 400 milliards de fois la masse du Soleil. On sait aussi que la majeure partie de cette masse est constituée de petites étoiles puisqu'il y a bien davantage d'étoiles de petites masses que d'étoiles de très grandes

masses. On peut néanmoins calculer le nombre d'étoiles suffisamment massives pour terminer leur vie en trou noir. Ce calcul donne un chiffre compris entre 100 millions et un milliard d'étoiles massives. Il y aurait donc potentiellement entre 100 millions et un milliard de trous noirs stellaires dans notre galaxie, dont un minuscule 200 seulement ont été observés.

Mais lorsque vous parlez d'étoiles massives, il y a un certain nombre d'entre elles qui sont présentement dans la phase principale de leur vie. Ces étoiles

massives ne sont donc pas encore toutes transformées en trous noirs, mais elles vont le devenir éventuellement.

Oui. Non seulement des étoiles meurent mais il s'en forme de nouvelles. Et les étoiles massives évoluent très rapidement. Par exemple, les étoiles qui ont la même masse que le Soleil mettent 10 milliards d'années de leur naissance à leur transformation en naine blanche, tandis qu'une étoile très massive ne mettra même pas 10 millions d'années pour devenir un trou noir. Et comme il y a beaucoup de gaz et de poussière à l'intérieur de la galaxie, il y a toujours de nouvelles étoiles qui se forment. Les petites étoiles qui se forment présentement vont durer encore une dizaine de milliards d'années, tandis qu'une étoile de trente fois la masse du Soleil qui se forme maintenant sera devenue trou noir dans quelques millions d'années.

S'il y a des centaines de millions de trous noirs dans notre galaxie, ne risque-t-on pas un jour de se faire avaler par l'un d'eux?

En fait, ce serait là quelque chose de très surprenant.

Lorsqu'on regarde la Voie lactée, on a souvent l'impression qu'il y a tant d'étoiles qu'il devrait y avoir des collisions. Pourtant, la collision entre étoiles n'arrive pratiquement jamais.



Notre galaxie est une immense spirale composée de 200 à 300 milliards d'étoiles. Parmi celles-ci, une certaine proportion sont de grosses étoiles qui deviennent éventuellement des trous noirs. C'est dire qu'il y aurait de disséminés un peu partout à travers la Voie lactée jusqu'à des milliards de trous noirs de masse stellaire.

Prenons même l'exemple d'un amas globulaire – une très forte concentration d'étoiles qui peut rassembler, disons, 100 000 étoiles dans un très petit volume. Un amas globulaire ressemble à une grosse pelotte d'étoiles. Or, si vous preniez une étoile et que vous la lanciez en plein cœur de cet amas globulaire, il n'y aurait fort probablement pas la moindre collision.

Bref, ce qu'il faut retenir, c'est que l'espace entre les étoiles est étonnamment vaste.

Étonnamment, il y a plus de probabilités de collisions entre les galaxies qu'entre les étoiles à l'intérieur d'une même galaxie. C'est d'ailleurs pourquoi on observe des collisions de galaxies, comme nous le montre le télescope Hubble.



Exemples de galaxies qui sont un jour entrées en collision et dont les noyaux, des trous noirs, sont en train de se fondre.

On a aussi repéré, par l'entremise des ondes radio, des galaxies où se trouvent deux noyaux. Voilà qui nous fait présumer qu'il s'agit de deux galaxies qui sont un jour entrées en collision. On voit donc deux trous noirs centraux qui sont en train de tourner l'un autour de l'autre et qui vont éventuellement fusionner pour ne plus former qu'un seul trou noir de grande taille.

Quant aux étoiles de notre galaxie, les probabilités de collisions sont pratiquement nulles. Même chose pour les millions de trous noirs stellaires qu'on retrouve un peu partout à travers notre galaxie. Ils ne sont nullement une menace pour nous.

Il n'y a donc pas vraiment à craindre que nous entrions en collision avec les restes d'une étoile devenue un trou noir.

Il y a d'ailleurs tellement plus d'étoiles ordinaires que d'étoiles massives dans notre galaxie que s'il y avait eu des collisions entre notre Soleil et d'autres étoiles, nous ne serions pas ici pour en parler!

En fait, ce que nous avons de la difficulté à réaliser — car ça dépasse notre entendement — c'est à quel point l'espace est vaste, même si on s'en tient uniquement à l'intérieur de notre galaxie. Une galaxie, c'est essentiellement du vide parsemé de très petites concentrations de matière qu'on appelle étoiles. C'est pour quoi, lorsqu'on voit une collision

entre deux galaxies, c'est souvent deux nuages qui passent l'un à travers l'autre.

C'est exactement cela. De fait, lorsque deux galaxies entrent en collision, il n'y a que très peu de collisions directes entre les étoiles. Par contre, la gravité de chaque galaxie va agir sur l'autre et elles vont par conséquent se déformer.

C'est fascinant l'Univers!

Assez fascinant, eh oui!

Quels secrets cachent les singularités?

Dites-moi, vous qui vous intéressez tant aux trous noirs, y a-t-il un aspect particulier qui vous intrigue, une question particulière à laquelle vous aimeriez trouver réponse?

Je pense que tous les physiciens — et pas uniquement ceux qui s'intéressent aux trous noirs — vous répondraient que ce qui nous intrigue le plus, c'est la singularité. Que se passe-t-il au sein d'une singularité?

Or, on a ici forcément affaire à de la relativité générale et, en même temps, à de la mécanique quantique. La relativité générale implique une déformation extrême de l'espace, tandis que la mécanique quantique s'applique à la dimension infime de la singularité.

On est donc en présence de deux théories et là, il faudra bien qu'elles se fusionnent (le terme technique est *unification*) pour ne former qu'une seule et même théorie cohérente — ce qui n'est pas encore fait — si on veut espérer comprendre complètement tous les aspects d'un trou noir.



Voici à quoi pourrait ressembler un trou noir de masse stellaire, entouré d'un disque d'accrétion (rouge) et qui assimile lentement la matière en provenance d'une étoile ordinaire (jaune).

Conclusion: science et science-fiction

Nous arrivons au terme de notre entretien. Nous avons tous en tête des images de ce que serait un trou noir, mais une version hollywoodienne des trous noirs. Lorsque vous, vous voyez ce genre de représentations – et là, je ne fais pas nécessairement allusion à *Interstellaire*, mais aux images qu'on nous montre en général – qu'en pensez-vous?

Je suis un amateur de science-fiction, je suivais d'ailleurs avec beaucoup d'intérêt la série *Star Trek: The Next Generation*... Dans ces cas-là, je me dis tout simplement que, lorsque je regarde des trucs de science-fiction, je mets de côté mon esprit d'astrophysicien. Je m'installe devant la télé ou je vais au cinéma et je deviens alors quelqu'un qui veut tout simplement se distraire.

Il faut admettre qu'*Interstellaire* sortait du lot parce que je savais que les images ont été conçues à partir des équations d'Einstein. Bien sûr, on prenait une certaine licence artistique, mais lorsque ce fut le temps de faire des calculs, ceux-ci étaient exacts. Je n'ai donc rien vu de faux.

Quant aux autres films, je n'ai même pas idée de vouloir vérifier quoi que ce soit parce que, généralement, il y a un fond scientifique, mais pas aussi rigoureux que celui d'*Interstellaire*. Mais ça m'est égal.

Par exemple, dans *Star Trek: The Next Generation*, il y a un épisode où les gens passaient à travers les murs comme dans du beurre... mais pas à travers le plancher! Bien sûr, ça aurait été malcommode s'ils avaient passé aussi facilement à travers le plancher! Mais qui sait, celui-ci avait peut-être un p'tit quelque chose de plus que les murs... une couche de vernis additionnelle!

En science-fiction, on imagine souvent qu'on pourrait se servir des trous noirs pour parcourir la galaxie. Cela me fait sourire si on prend cela d'un point de vue artistique, mais ça me frustre un peu de penser qu'on nous montre qu'on pourrait passer au travers d'un trou noir alors que même la lumière n'en ressort jamais.

En fait, il faut distinguer ici le trou noir d'un trou de ver. Et là, on entre dans la spéculation pure. Dans *Interstellaire*,

lorsque nos aventuriers s'en vont du côté de Gargantua – qui est le trou noir super-massif où ils vivront leurs aventures –, ils passent d'abord par un trou de ver situé près de Saturne. Ça, c'est complètement de la spéculation. On nous montre d'ailleurs l'analogie classique du ruban qu'on recourbe sur lui-même et dans lequel on perce un trou... ce qui va nous permettre de passer d'ici à là-bas.

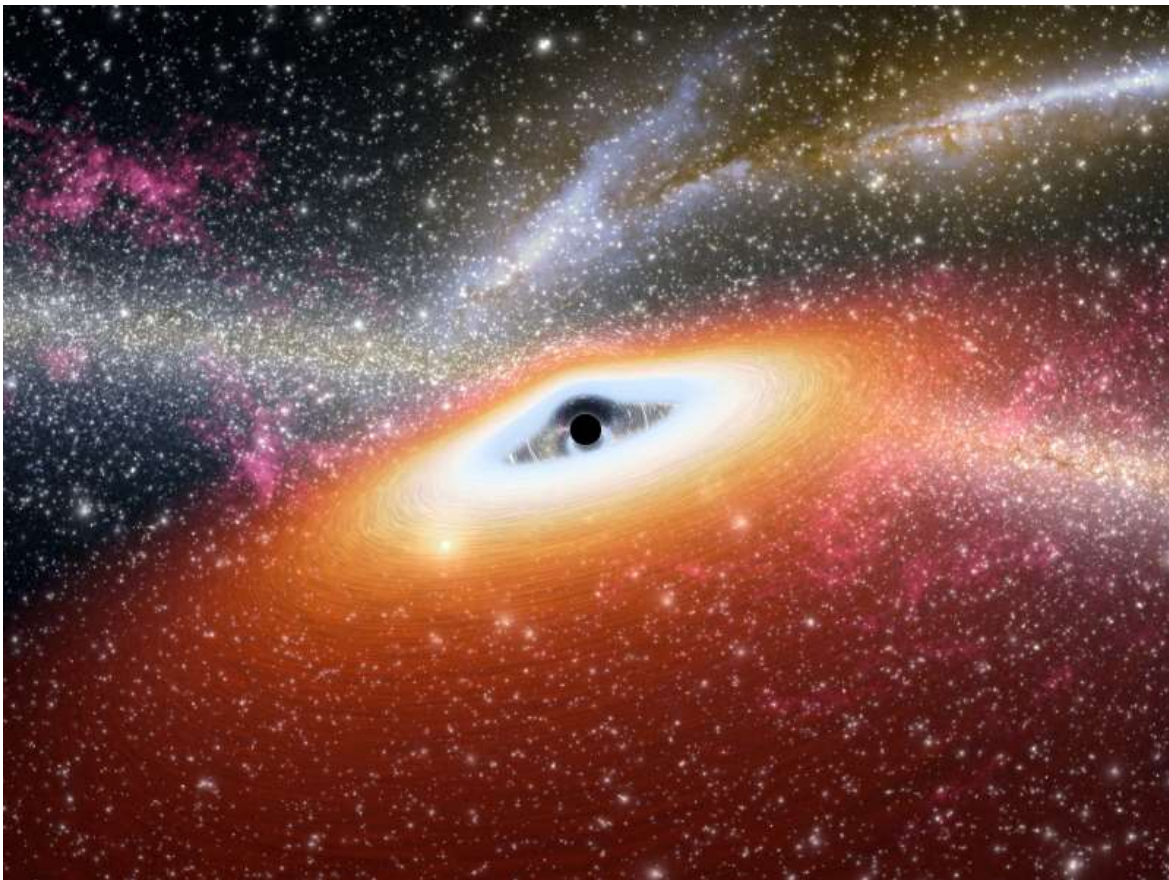
Il y a des théoriciens qui ont étudié cela, puisque c'est en accord avec les équations d'Einstein. Mais cela demande des conditions spéciales... mais pas impossibles. Le problème, semble-t-il, c'est que ça prendrait, pour garder ces trous de ver ouverts, de la matière avec des propriétés assez exotiques – une sorte de matière qu'on ne connaît pas encore. Apparemment, un trou de ver serait une entité assez instable... ce qui ne garantirait pas

que vous puissiez passer au travers. Mais là, on est vraiment dans la spéculation.

Bien sûr que pour le bénéfice de la science-fiction, c'est merveilleux puisqu'on peut utiliser quelque chose qui est vraisemblablement scientifique – même si ce n'est pas prouvé – et s'en tirer. C'est correct puisqu'on peut toujours se dire qu'on ne sait pas encore si c'est possible ou pas...

Cela a un vernis scientifique qui nous permet de spéculer comme bon nous semble. Mais, personnellement, et contrairement à ce qu'on voit dans beaucoup de films, je ne m'aventurerais pas dans les parages d'un trou noir!

Tout dépend, Claude! J'ai 74 ans et si on m'en donnait la chance... je me le demande bien!



Un jour, parviendrons-nous à obtenir des images aussi féériques de trous noirs que ce tableau?

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



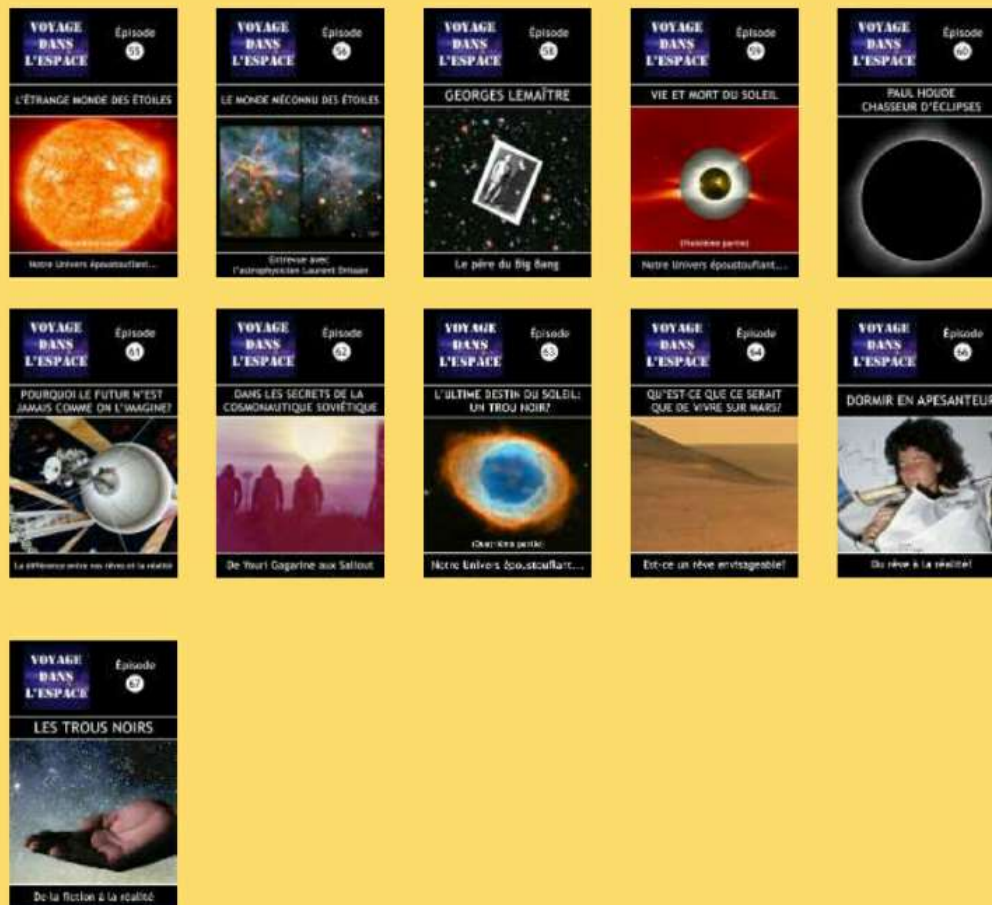
Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.