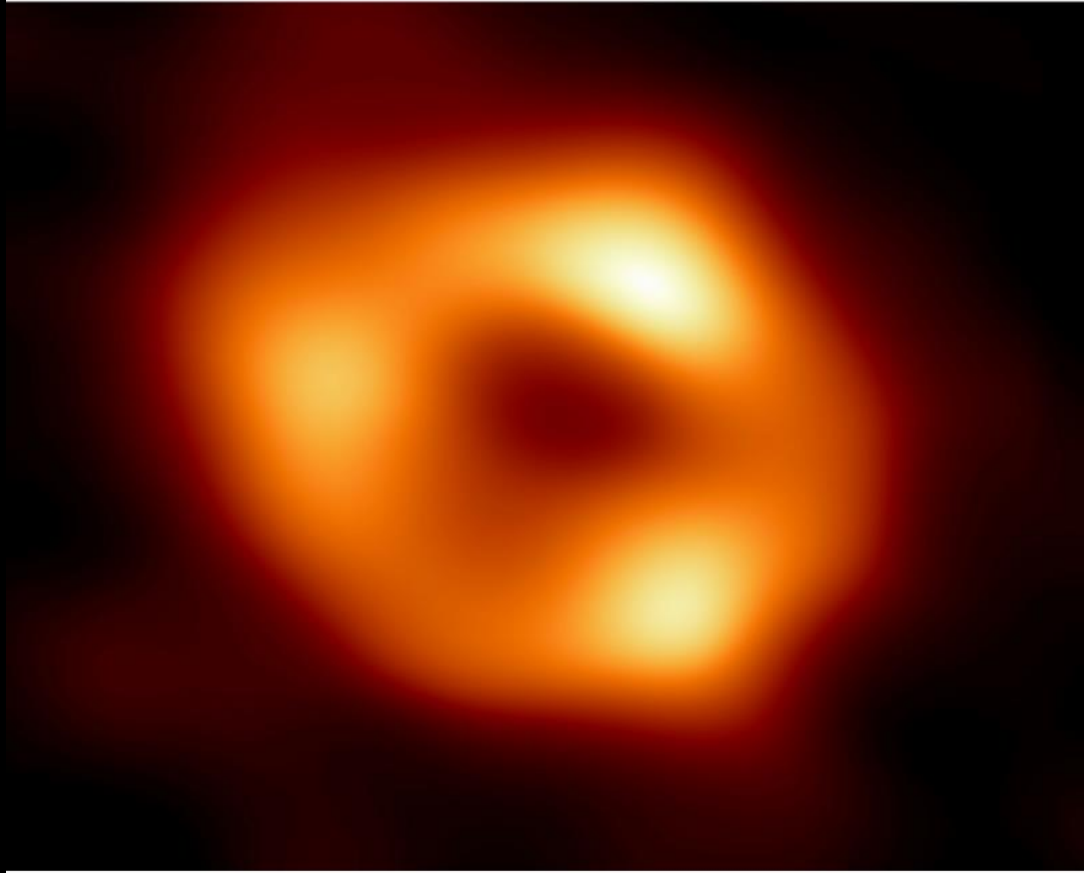


**VOYAGE
DANS
L'ESPACE**

Épisode

89

**SAGITTAIRE A* :
COMPRENDRE CE QUE L'ON VOIT**



Le trou noir au centre
de notre galaxie révélé

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 plateforme 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, de cosmologie, etc.

Pour la plupart des balados, nous préparons un exposé détaillé; il peut s'agir d'une conversation entre l'animateur de *Voyage dans l'espace* (à l'origine Mathieu et à présent Florent Meunier), et Claude, le passionné d'astronautique, ou d'une entrevue avec un spécialiste (souvent un astronome).

Ces exposés sont publiés sous forme de fascicules, comme celui-ci. Notez que 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 plateforme patreon.com.

L'équipe de *Voyage dans l'espace* se compose de: **Claude Lafleur**, journaliste scientifique qui suit au quotidien depuis plus de 50 ans les péripéties de l'exploration spatiale; **Florent Meunier**, ingénieur du son, **Laurent Runigo**, infirmier et **Mathieu Rancourt**, géographe et professionnel de recherche.

En couverture



La photo du trou noir Sagittaire A*, qui se trouve au centre de notre galaxie, la Voie lactée, a été dévoilée le 12 mai 2022.

L'équipe de *Voyage dans l'espace*:

Claude Lafleur, contenu

Florent Meunier, animation et montage

Laurent Runigo, médias sociaux

Mathieu Rancourt, soutien technique

[Les balados](#) ; [Abonnement](#) ; [Courriel](#).

[Facebook](#) ; [YouTube](#) ; [Instagram](#).

L'équipe des fascicules:

Rédaction: Claude Lafleur

Couverture: Florent Meunier

Illustrations: NASA, ESO, [Derek Muller](#)

© Copyright, Claude Lafleur, 2022

ISBN 978-2-925106-63-0 (pdf)

ISBN 978-2-925106-64-7 (kindle)

Dépôt légal:

Bibliothèque nationale du Québec, 2022

Bibliothèque nationale du Canada, 2022



Photo des deux trous noirs, à la fois très différents mais si semblables.

Sagittaire A*: comprendre ce que l'on voit

[Écoutez](#) le balado *Sagittaire A*: comprendre ce que l'on voit*, diffusé le 22 mai 2022. Entrevue avec Serge Pineault, colligée par Claude Lafleur.

L'importante équipe scientifique du projet *Event Horizon Telescope* a recueilli les deux premières photos de trou noir, l'un au cœur de la galaxie Messier 87 et l'autre au centre de notre galaxie. Ce qu'il y a de remarquable dans ces clichés, c'est le fait qu'il s'agit de deux objets fort différents: le trou noir de M87 est 2000 fois plus massif que le nôtre. Il s'agit d'un trou noir très actif, qui avale quantité de matière et émet beaucoup d'énergie, ce qui n'est pas le cas de notre trou noir. En outre, on l'a photographié de face, tandis que le nôtre est vu de profil. Pourtant, ils se ressemblent comme deux gouttes d'eau – ce qui confirme ce à quoi s'attendaient les astronomes.

Le 12 mai 2022, une importante équipe scientifique, composée de plus de 300 astronomes, nous a présenté la photo du centre de notre galaxie, là où se loge un trou noir. Cette nouvelle sensationnelle a fait le tour du monde, on en a parlé partout, partout. Pour notre part, nous présentons un balado spécial avec deux buts

en tête. En premier, nous allons tenter d'expliquer en termes simples ce que l'on voit sur la photo et, dans un second temps, nous allons tenter de répondre à la question: que nous dit cette découverte? Est-ce réellement une importante avancée scientifique? Que comprend-on? Qui y a-t-il à savoir?

Pour ce faire, nous nous entretenons avec Serge Pineault, astrophysicien et professeur retraité du Département de physique, de génie physique et d'optique de l'Université Laval.



Serge Pineault

Nous avons déjà fait deux entretiens avec lui: le balado 67 sur [Les trous noirs, de la fiction à la réalité](#) et le balado 82 sur [La Relativité](#). Comme nous le verrons, il s'agit de deux aspects de l'astrophysique directement liés à ce dont nous allons traiter.

Comme nous le relations dans le balado 67, Serge a débuté sa carrière d'astronome dans les années 1970 en s'intéressant de très près aux trous noirs; il a vu ce sujet évoluer tout au long de sa carrière, en plus d'être un spécialiste de la relativité. Il s'agit donc de la bonne personne pour nous parler de la photographie du trou noir qui se loge au cœur de notre galaxie. Claude Lafleur s'est entretenu avec lui le 16 mai 2022.

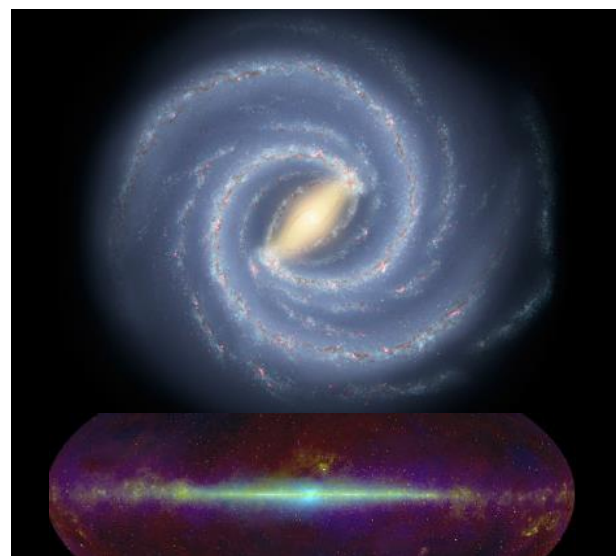
Serge, avant de plonger dans le vif du sujet, j'aimerais connaître vos premières impressions: qu'avez-vous pensé le vendredi matin où vous avez vu la photo? Ça été un grand moment pour vous?

Ça été un grand moment pour toute sorte de raisons. Premièrement, j'ai été un peu surpris par la très grande ressemblance avec le trou noir de M87, qui se trouve dans une galaxie située à 65 millions d'années-lumière de la Terre. Nous savons qu'il s'agit d'une galaxie beaucoup plus massive que notre Voie lactée. Il s'agit aussi d'une galaxie active, qui expulse des jets de matière très loin d'elle-même. Le trou noir qui se cache au cœur



M87 est l'une des plus grosses galaxies connues avec une masse dix fois supérieure à notre galaxie. Son noyau émet un immense jet de particules s'étendant sur des milliers d'années-lumière. Ce jet est dû à la présence d'un trou noir extrêmement massif, de 6,5 milliards de masses solaires.

de cette galaxie est environ 2000 fois plus massif que celui au centre de la nôtre. De plus, on observe ce trou noir et le disque d'accrétion [la matière qui gravite autour de celui-ci] pratiquement de face. Tandis que dans le cas du trou noir de notre galaxie, puisque nous nous trouvons dans le plan de la Voie lactée, on le voit par la tranche. On pourrait donc penser qu'on aurait dû voir deux choses différentes.



Deux façons de voir une galaxie: de face et par la tranche.

C'est la première impression qu'on devrait avoir. Cependant, lorsqu'on a fait de la relativité, on est moins surpris, puisque celle-ci nous dit qu'à proximité d'un trou noir, les rayons lumineux vont être déviés d'une façon très substantielle. En fait, ce qui est curieux lorsqu'on voit par la tranche un disque de matière autour d'un trou noir, c'est que cela ressemble à un beigne même si, normalement, on devrait s'attendre à voir une sorte de crêpe vue par la tranche. Or, nous voyons plutôt un beigne puisque les rayons lumineux sont considérablement déviés. Ceci explique donc cela! [Nous verrons plus loin l'explication de ce phénomène.]

En fait, cela n'est pas si surprenant puisque, aussi bizarre que cela puisse paraître, les trous noirs sont parmi les objets célestes les plus simples qu'on puisse concevoir. Ce qui est complexe dans leur cas, c'est tout ce qui se passe autour d'eux. Le trou noir lui-même est caractérisé par trois paramètres: sa masse, son moment cinétique (son mouvement de rotation) et sa charge électrique nette. Cependant, on ne tient généralement pas compte de ce troisième facteur, de sorte qu'il n'y a que deux paramètres à retenir pour définir un trou noir.

Et puisqu'un trou noir est simple, ce qu'on voit correspond finalement aux calculs qui ont été faits au début des années 1970, calculs auxquels j'ai participé. En effet, j'ai fait des calculs d'apparence de ce qui orbite autour d'un trou noir, comme aussi l'ont fait l'astrophysicien français Jean-Pierre Luminet et autres étudiants gradués. Or, on a tous trouvé ce que les images nous montrent à présent.

Vous êtes en quelque sorte surpris d'observer ce à quoi vous vous attendiez?!

C'est un peu cela! Parce qu'à l'époque, on nageait dans de la science-fiction, si je puis dire, puisqu'on n'avait aucun instrument suffisamment puissant pour observer des trous noirs. On se disait même qu'il sera impossible de voir ce qu'on parvenait à calculer. Mais, avec le temps – cinquante ans plus tard – la technique a évolué...

Tout compte fait, c'est à la fois surprenant... mais pas tant que ça!

Il est amusant de penser qu'au début de votre carrière, vous avez fait des calculs et aujourd'hui, vous voyez vos résultats confirmés.

Exactement.

1 – La fameuse photo...

Nous abordons à présent le trou noir qu'on a observé et que les astronomes appellent *Sagittaire A** [«sagittaire A étoile»]. Que signifie une telle appellation?

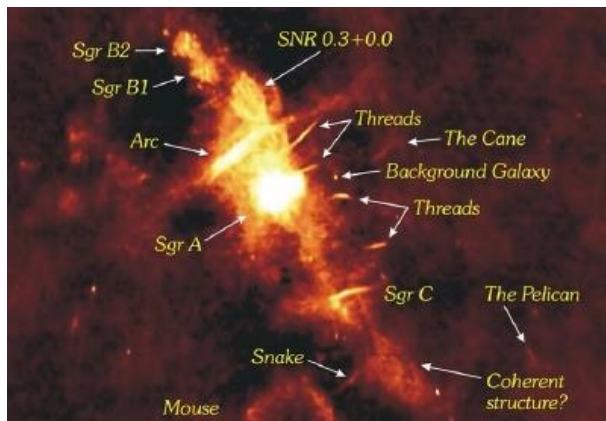
C'est simple. Sagittaire, c'est la constellation où se trouve le centre de la Voie lactée. (Ne vous inquiétez pas, les astrophysiciens ne croient pas en l'astrologie, mais on utilise les constellations pour se repérer dans le ciel.)

Soulignons au passage que de tout temps, les astronomes ont *imaginé* des constellations réparties dans le ciel afin de s'y repérer. Mais ces constellations sont purement des créations imagi-

naires, ce ne sont que des regroupements *apparents* d'étoiles, des figures géométriques, qui servent à se guider dans le firmament. Les astronomes modernes ont convenu de diviser le ciel en 88 constellations, alors que les astronomes de différentes civilisations passées en avaient imaginées quantité d'autres.

Les constellations, c'est un peu comme lorsqu'on se balade en nature et qu'on se crée des repères: le regroupement de certains arbres, la forme d'un rocher ou d'une montagne, le bord d'un lac, etc., auxquels on donne des noms pour mieux se reconnaître. Les habitants d'une région se créent ainsi des repères, comme les astronomes se guident à l'aide des constellations.

Le A [de Sagittaire A*] provient des observations qu'on faisait il y a une cinquantaine d'années. On s'est alors rendu compte qu'au centre de la Voie lactée — donc dans la direction de la constellation du Sagittaire —, il y avait plusieurs sources qui émettent des ondes radios: il y a entre autres un complexe qu'on a appelé *Sagittarius A* ainsi qu'un autre complexe appelé Sagittarius B, etc. En plus, on a détecté une source compacte.



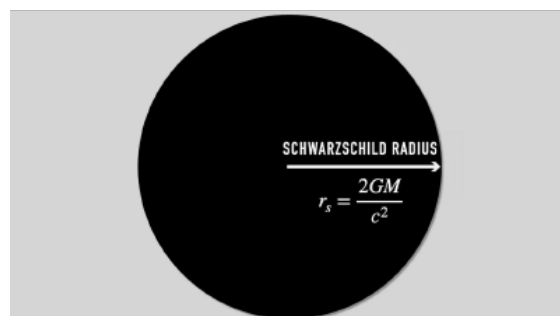
Le centre de notre galaxie est peuplé de différentes structures et sources d'émissions d'ondes radio.

À l'époque, on ignorait que c'était l'endroit où se trouve le trou noir de la Voie lactée. Mais à partir du moment où on a compris qu'il y avait là un trou noir, qui se trouvait dans le complexe *Sagittarius A*, on l'a appelé *Sagittarius A**.

[Wikipédia](#) rapporte qu'en 1974, deux astronomes, Bruce Balick et Robert Brown, repèrent une radiosource dans la région A du Sagittaire, désignée Sagittarius A*. Brown fut d'ailleurs le premier à employer l'abréviation Sgr A* en 1982. Pour lui, l'astérisque dénote que Sgr A* est une «source d'excitation» pour la région d'hydrogène ionisé qui l'entoure, l'astérisque étant utilisé en physique atomique pour noter l'état excité des atomes.

C'est comme si on qualifiait le trou noir d'«étoile» même si ce n'en est pas une?

Non. Sauf que, techniquement, un trou noir, ça n'a pas de dimensions. Autour de lui, il y a une zone de «non-retour», qu'on appelle l'*horizon des événements* ou encore le *rayon de Schwarzschild*. Mais en ce qui concerne le trou noir comme tel, toute sa matière se retrouve en un point infiniment petit. Puis, autour de ce point, il y a une zone d'où il est impossible de sortir.



L'*horizon des événements* ou *rayon de Schwarzschild* au centre duquel se trouve le trou noir *infiniment* petit.

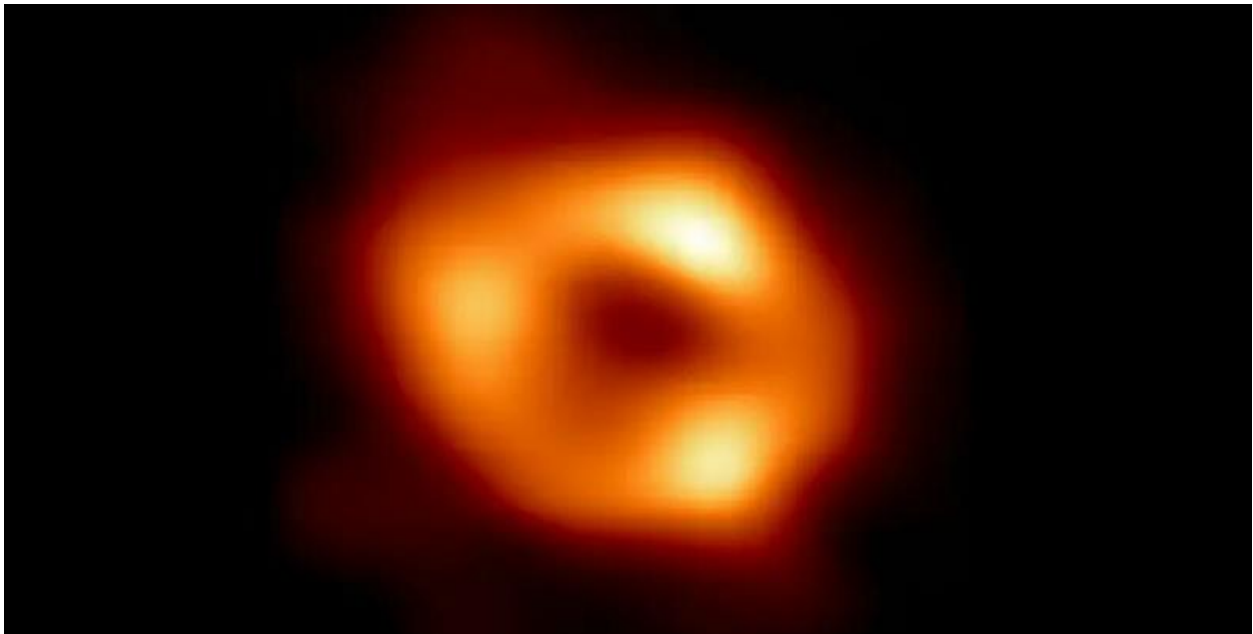


[Karl Schwarzschild](#) (1873-1916) est un brillant astrophysicien allemand à l'origine de nombreuses découvertes majeures en astronomie fondamentale.

Il a entre autres démontré, en se basant sur les équations d'Einstein, qu'il serait possible de concentrer une quantité prodigieuse de matière en un

point pour obtenir un trou noir. Il est également le premier à avoir décrit les phénomènes de courbure des rayons lumineux au voisinage de points gravitationnels, contribuant ainsi à fonder la théorie des trous noirs qui sera développée cinquante ans après sa mort.

Hélas, ce grand savant a péri à l'âge de 42 ans seulement, au cours de la première guerre mondiale.



La photo du trou noir Sagittaire A* qui réside au cœur de la Voie lactée.

2 – Anatomie d'une photo

Que voit-on au juste sur la photo? Je pense qu'on a souvent dit qu'on voyait le trou noir – ce qui n'est pas le cas – entouré par un nuage de matière. Que voit-on au juste, Serge?

La partie foncée, noire, qu'on voit, c'est ce qu'on appelle plus précisément *l'ombre du trou noir*. Mais contrairement à ce que la plupart des gens pensent, ce

n'est pas le rayon de l'horizon des événements ou le rayon de Schwarzschild qu'on voit. C'est une zone dont la taille est 2,6 fois plus vaste que l'horizon des événements.



Cette image tirée de la [vidéo](#) de [Derek Muller](#) montre qu'entre le disque de matière colorée et l'horizon des événements (la boule noire) existe un vaste espace sombre.

Ce que nous voyons, c'est la zone où, lorsque la matière ou la lumière pénètre, elles disparaissent à tout jamais?

Jusqu'à un certain point, oui, sauf que si on devait ne retenir que cette interprétation, cela signifierait que la zone sombre correspond à l'horizon des événements, ce qui n'est pas le cas. En fait, le rayon de l'ombre correspond à près de trois fois (plus précisément 2.6 fois) le rayon de l'horizon des événements.

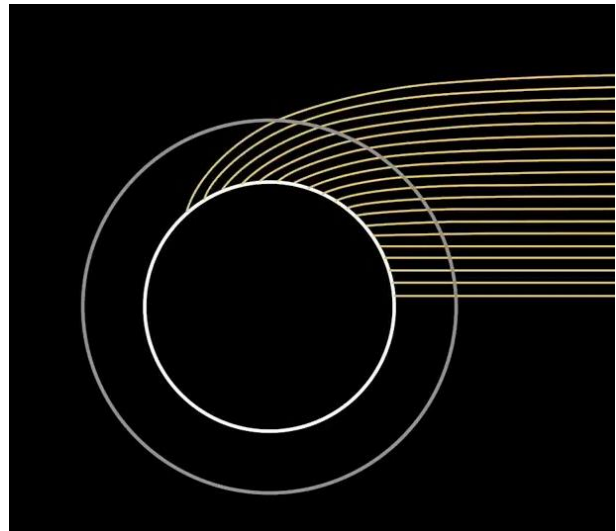
Faisons ici une analogie afin d'expliquer que la zone sombre est plus vaste que le rayon des événements.

Imaginons qu'on lance des projectiles en direction de la Lune (qui a son propre champ de gravitation). Si on lance un projectile directement vers le centre de la Lune, celui-ci va la percuter en plein centre. Mais si je vise plutôt le bord de la

Lune, mon projectile va se diriger vers celui-ci mais plus il s'approchera de la Lune, plus sa trajectoire sera courbée par le champ gravitationnel de la Lune. Par conséquent, le projectile ne va pas percuter le bord de la Lune mais un peu plus vers le centre. Ce qui signifie que je puis même lancer un projectile légèrement à côté de la Lune mais que la gravité de celle-ci va courber la trajectoire de sorte que le projectile finira par percuter la Lune.

Si donc, nous nous trouvons de l'autre côté de la Lune – derrière la face cachée – et qu'on observait des projectiles en provenance de la Terre – on en verrait certains passer à côté de la Lune mais venir s'écraser sur sa

face cachée.



Imaginez une série de projectiles provenant de la droite et percutant un astre possédant un champ gravitationnel. Certains projectiles le frapperont de plein fouet tandis que d'autres seront déviés pour finir par le percuter. (Source: [Derek Muller](#).)

Tout cela pour expliquer qu'à cause de la déviation qu'exerce le champ gravitationnel d'un trou noir, sa zone d'influence est plus large que l'horizon des événements.

C'est ainsi que les rayons lumineux qui proviennent de l'arrière du trou noir vont dans certains cas tomber directement dans l'horizon des événements, tandis que d'autres, qui passent légèrement à côté de cet horizon sont néanmoins déviés et finissent également par être absorbés. D'où le fait que la zone d'ombre qu'on voit au centre de la photo est plus vaste que l'horizon des événements.

Dans le [balado 67](#) qu'on a fait vous et moi, on expliquait que le trou noir est infiniment petit. Ainsi, dans le cas du trou noir dont on parle, sa masse équivaut à 4 millions de fois celle du Soleil, mais sa taille est plus petite que le plus petit grain de sable qu'on puisse imaginer. C'est ce que les astronomes appellent une *singularité*. Le trou noir est non seulement invisible parce qu'il retient toute la lumière mais également parce qu'il est littéralement infiniment petit. On ne verra jamais un trou noir, même si on pouvait parvenir à le regarder suffisamment près?



Aussi incroyable que cela puisse paraître, un trou noir dont la masse équivaut à des millions de fois celle du Soleil tiendrait aisément dans une main... puisqu'il est infiniment petit!

Exactement. Ce qui arrive en fait, c'est qu'en physique, il y a une vitesse limite, celle de la lumière. Et si on a de la matière ou de la lumière qui tombent vers un trou noir – dès que celle-ci passe l'horizon des événements ou le rayon de Schwarzschild –, il est absolument impossible pour elle de ressortir du trou noir puisqu'il faudrait pour cela que l'objet voyage à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

C'est dire que même si vous vous jetiez dans un trou noir emportant avec vous un rayon laser ultrapuissant, dès que vous aurez passé l'horizon des événements, vous aurez beau pointer votre laser vers l'extérieur, les particules de lumière sortant de celui-ci (les photons) tomberont comme vous vers le trou noir. Autrement, il faudrait que le rayon de lumière émanant du laser aille plus vite que la vitesse de la lumière – ce qui est bien sûr impossible.

Donc, l'horizon des événements est une frontière, ce qui fait que, une fois dépassée, plus rien n'en ressort ni n'est visible. Au centre de cet horizon, il y a le trou noir qui, lui, est véritablement infiniment petit: une singularité – même si sa masse est prodigieuse?

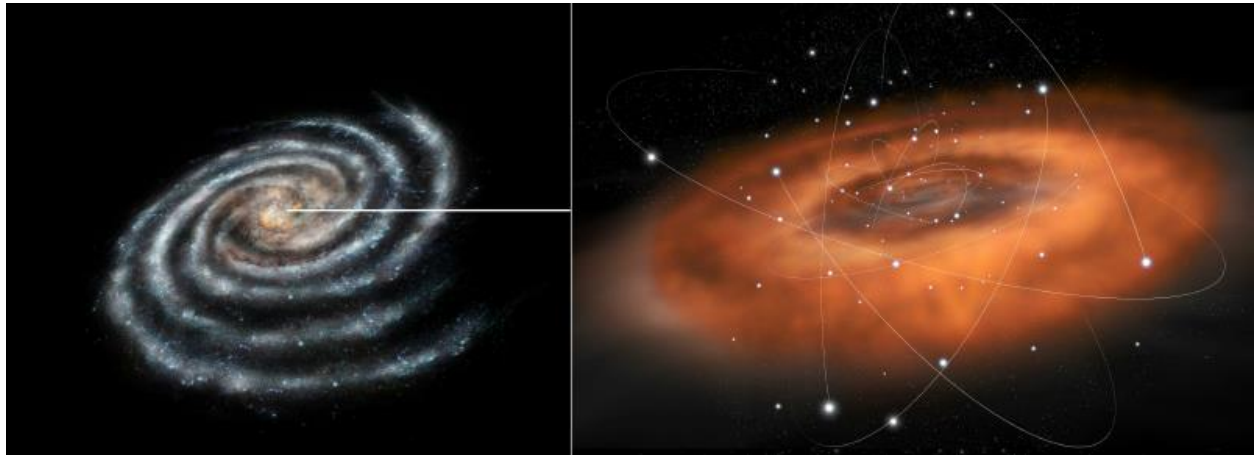
Exactement.

C'est assez difficile d'imaginer comme concept: dans le cas de Sagittaire A* vous avez un trou noir dont la masse équivaut à 4 millions de fois celle du Soleil, mais toute cette matière est contenue dans un espace *infiniment* petit.

C'est tout à fait impossible à imaginer, en effet. Et ça dérange même les physiciens puisque cela veut dire que, forcément, les lois de la physique telles qu'on les connaît ne s'appliquent plus lorsqu'on

arrive à la singularité. La théorie d'Einstein est basée sur le fait qu'on a un continuum espace-temps. Mais là, on a quelque chose qui est infiniment petit et il faut par conséquent recourir à ce qu'on appelle la *physique quantique*. Ce sont là des règles

qui sont différentes. Cela veut dire qu'au niveau de la singularité, on a à la fois de la relativité générale et de la physique quantique, mais ces deux théories n'ont pas encore été unifiées.



À partir des années 1990, on s'est mis à soupçonner qu'il se cachait au centre de notre galaxie un trou noir qui, par définition, demeurerait parfaitement invisible. Comment donc le repérer?

3 – Débusquer le fameux trou noir

Est-ce qu'on a une idée, approximative, de la taille de l'ombre du trou noir, le cercle sombre qu'on voit au centre de la photo?

Oui, puisqu'on connaît exactement la dimension angulaire, mesurée en microsecondes d'arc, ainsi que la distance à laquelle se trouve le trou noir de nous, soit 27 000 années-lumière. Par conséquent, on connaît la dimension physique, en kilomètres, de l'ombre [qui est de l'ordre de 34 millions de kilomètres de rayon].

Ajoutons que cette dimension est directement liée au rayon de l'horizon des événements qui, lui, nous donne la masse du trou noir.

On connaissait déjà la masse du trou noir. [Celle-ci a été établie il y a une vingtaine d'années, lorsque des astronomes ont observé des étoiles qui passaient relativement proche du trou noir – voir encadré ci-contre.] On n'est donc pas surpris

par la dimension qu'on observe puisqu'on connaissait très bien la masse du trou noir.

Et connaissant bien cette masse, cela nous a permis de calculer la dimension de l'ombre du trou noir.

Dans les années 1990, des astronomes sont parvenus à repérer des étoiles se trouvant au centre de la galaxie. Ils ont alors fait une découverte étonnante: sur une période d'une vingtaine d'années, ils ont observé un certain nombre de ces étoiles orbitant autour d'un point totalement invisible.

En étudiant le déplacement de ces étoiles, ils ont pu calculer la masse autour de laquelle elles gravitent: quelques 4 millions de fois la masse du So-



Quelques étoiles (cercles blancs) gravitent autour d'un point invisible (pointé). Voir la [vidéo](#) de l'ESO.)

lei. Et puisque cette masse est contenue dans un très petit volume (bien inférieur à la taille du Système solaire), ils en ont déduit qu'il s'agissait bien d'un trou noir.

C'est ainsi qu'en 2020, [Reinhard Genzel](#), de l'Institut Max Planck, et [Andrea Ghez](#), de l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), ont reçu le Nobel de physique pour cette découverte.

Ne rapporte-t-on pas que le rayon du disque serait de l'ordre d'une centaine de millions de kilomètres?

Je n'ai pas encore vu les détails et j'ai très hâte de lire les articles scientifiques qui vont nous parvenir très bientôt.

Par contre, probablement que, comme dans le cas du trou noir qui se trouve au centre de la galaxie M87, on voit un disque d'accrétion qui est relativement étendu; on s'attend à ce que ce soit plusieurs fois le rayon de l'horizon. Sauf que là où il doit y avoir des phénomènes importants, ça risque d'être dans les parties internes, où la matière se prépare à tomber irrémédiablement vers le trou noir. Donc, ce qu'on voit probablement – mais, comme je vous le dis, il me faudra lire les articles scientifiques, je suppose que le beigne orangé qu'on voit autour du disque sombre est

constitué de rayonnements qui provient des parties très proches de l'horizon des événements du trou noir.

Lorsque vous parlez du disque d'accrétion, c'est le disque orangé qu'on voit sur la photo?

En fait, non. C'est trompeur puisque même si normalement, on peut voir des détails, la résolution de l'image n'est pas extraordinaire. Si au lieu de voir un beigne entourant le trou noir, on avait plutôt vu une mince ligne, à cause de la faible résolution de notre télescope, on verrait non pas une mince ligne, mais une ligne plus épaisse et brouillée.

Pourrait-on prendre comme analogie que, si on observe au loin avec une paire de jumelles qui n'est pas bien ajustée, tout devient un peu plus flou et un peu plus gros?

C'est exactement cela! L'image est plus floue puisqu'on n'a pas la résolution pour observer les détails qu'on aimerait bien avoir.



Autre analogie: deux photos de la galaxie d'Andromède: à gauche, une photo à basse résolution qui ne permet pas de voir grand-chose. La photo du trou noir s'apparente à celle-ci plutôt qu'à la photo de droite d'Andromède.

A-t-on une idée de quoi est faite la matière orangée qu'on voit autour du disque noir?

Ça risque d'être du gaz et des champs magnétiques. Je n'ai pas encore lu les ar-

tics scientifiques mais c'était le cas pour M87; ce qu'on observe, ce n'est pas de la matière qui brille parce qu'elle serait chaude, comme par exemple celle à la surface du Soleil. Le Soleil est brillant parce qu'il est fait de gaz à haute température, et tout ce qui est chaud émet du rayonnement.

Dans ce cas-ci, ça risque d'être ce qu'on appelle du rayonnement synchrotron: ce sont des particules qui ont des vitesses accélérées. Dans les environs du trou noir, ces particules se déplacent à des vitesses proches de celle de la lumière. Et quand cette matière se déplace dans un champ magnétique, elle fait des spirales et émet un rayonnement qu'on appelle du rayonnement synchrotron. (Ce rayonnement est appelé ainsi puisqu'on l'a observé pour la première fois dans des accélérateurs de particules qu'on appelait des synchrotrons.)



Voici à quoi pourrait ressembler le disque de matière encerclant le trou noir Sagittaire A*.

Une étoile émet du rayonnement parce que ses gaz sont chauds, mais ce qui se passe dans les environs d'un trou noir et dans beaucoup de sources extragalactiques, ce sont plutôt des électrons accélérés à des vitesses proches de celle de la lumière et qui évoluent dans des champs magnétiques en émettant d'autres formes de rayonnements — et non pas du rayonnement thermique.

Voilà ce que cela risque d'être. Mais si on parle de matière orangée, n'oublions pas qu'il s'agit de fausses couleurs puisqu'on observe à des longueurs d'onde de 1,3 millimètre.

Or, en optique — ce que nous percevons avec nos yeux — les longueurs d'ondes sont d'environ 5/10^e de micromètre. Cela veut dire qu'on observe à des longueurs d'onde qui sont environ 2000 fois plus grandes.

Ce n'est donc pas du tout le même processus d'émission de rayonnement.

Ce n'est donc pas comme si on voyait de la poussière autour du trou noir.

Non.

J'aimerais maintenant «corriger» une information que j'ai entendue quelques fois dans les médias: certains rapportaient qu'on venait de découvrir un trou noir au centre de notre galaxie. En réalité, nous connaissons l'existence de ce trou noir depuis une bonne vingtaine d'années, n'est-ce pas? On l'avait déjà repéré...

Absolument. Cela fait de très nombreuses années... Par exemple, on a repéré des étoiles qui tournent autour de ce trou noir et qui nous ont permis de calculer la masse de celui-ci, et cela a été fait dans les années 1990. Deux chercheurs ont d'ailleurs reçu un prix Nobel pour cela. On parle donc d'une bonne trentaine d'années. Ce n'est donc pas une nouvelle qu'il y a un trou noir au centre de notre galaxie.

Et lorsqu'on a calculé les orbites des étoiles qui gravitent autour du trou noir, on s'est rendu compte que celui-ci équivaut à 4,3 millions de fois la masse du Soleil. Il était évident que cela ne pouvait pas être autre chose qu'un trou noir. On se doutait à quoi il ressemblerait, mais on ne l'avait pas encore vu...

Puisque des étoiles tournent autour de quelque chose d'extrêmement massif, ce qui leur confère une certaine vitesse de déplacement, cela nous a permis de déduire qu'il y avait là un trou noir. C'est bien cela?

Exactement. Et on fait cela en utilisant la bonne vieille loi de Kepler, sans même avoir à utiliser la relativité générale. La bonne vieille loi de Kepler nous permet de déterminer la masse du trou noir. En observant l'orbite d'étoiles qui se trouvent suffisamment loin de l'horizon des évé-

nements, on se retrouve donc en physique newtonienne – la physique classique – et on applique tout simplement les lois de Kepler.

C'est un peu ce que nous faisons lorsque nous voulons déterminer la masse d'une étoile, s'il y a des planètes autour d'elle, étant donné les vitesses selon lesquelles se déplacent ces planètes, cela nous indique la masse de l'étoile en question.

Exactement. C'est l'application de la même bonne troisième loi de Kepler!



Les zones sombres que l'on voit un peu partout à travers le disque de notre galaxie ne sont pas dues à l'absence d'étoiles mais plutôt à la présence de quantité de poussière qui en cache des milliards.

4 – Un centre bien poussiéreux

On mentionne que la prise de la photo du trou noir Sag A* est un prodige scientifique remarquable. Le premier problème que l'on rencontre, c'est que lorsqu'on regarde vers le centre de la galaxie, c'est-à-dire en direction de la constellation du Sagittaire, on découvre qu'entre nous, ici sur Terre et le centre, qui se trouve à 27 000 années-lumière, il y a énormément de matière, de poussière, du gaz, quantité d'étoiles, etc. On ne pourrait donc pas photographier tout simplement cette région puisqu'il y a trop d'obstacles qui nous bloquent la vue?

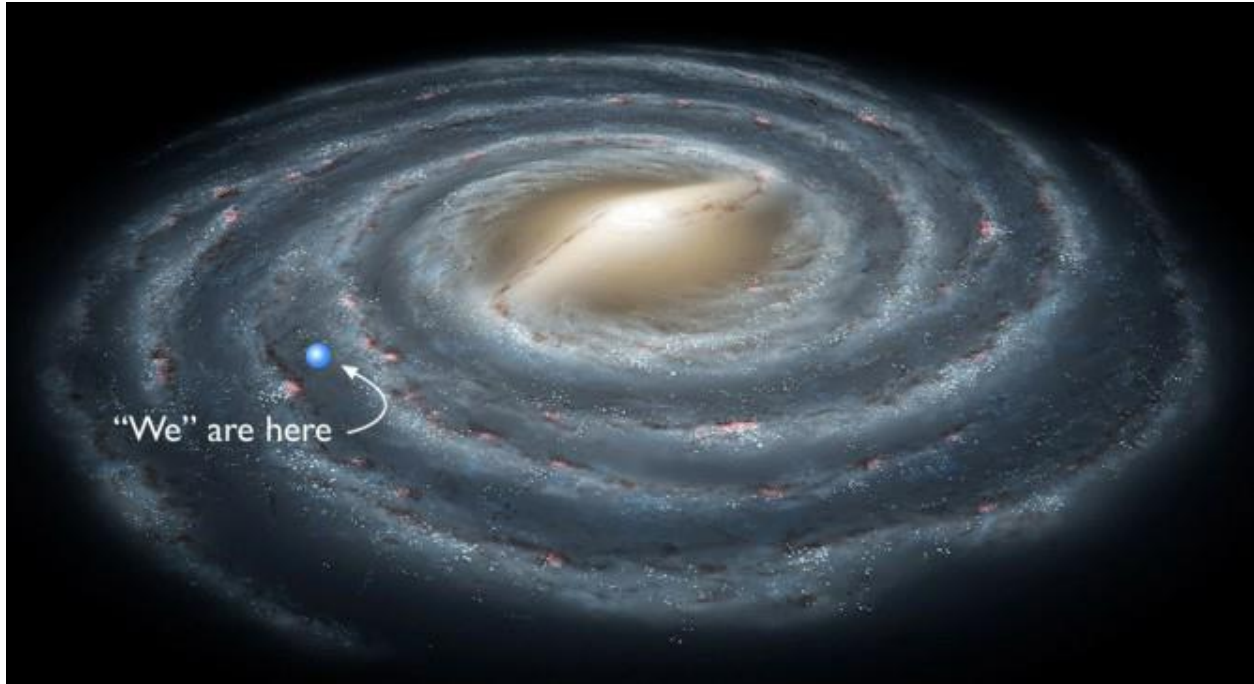
Exactement. Et il y a une façon très simple de le comprendre: c'est de regarder des galaxies. Si vous voyez une galaxie par la tranche, ce que vous remarquerez, c'est qu'il y a une partie qui est relativement plate et mince – c'est le disque de

la galaxie – et une partie centrale, qui est un genre de bulbe.

Lorsqu'on regarde vers le centre de notre galaxie, vous allez voir que c'est



Photo du centre de la galaxie qui fait voir les zones obscurcies par de la poussière.



Lorsque nous scrutons le centre de la galaxie, il y a entre nous et celui-ci une foule d'obstacles.

noir. Or, c'est de la poussière – et non du gaz – de la bonne vieille poussière que vous retrouvez lorsque vous passez le balai. Et il y en a tellement qu'elle bloque toute la lumière en provenance des étoiles qui se trouvent au centre de la galaxie.

Autre exemple, si on regarde une nébuleuse, comme celle de la Tête de Cheval (ci-contre), ce ne sont pas des objets qui sont très loin de nous, mais il y a entre nous et eux des nuages de poussière qui font qu'on perd déjà la lumière d'étoiles qui ne sont pas aussi éloignées de nous que le centre de la galaxie.

Cela veut dire que pour voir au centre de la Voie lactée, on ne peut pas faire des observations dans le visible – on ne verrait rien – mais plutôt dans l'infrarouge. D'ailleurs, les astronomes qui sont parvenus à observer des étoiles se déplaçant autour de Sagittaire A* l'ont fait dans l'infrarouge – ce qui leur a permis de passer au travers de toute la poussière qui se trouve entre nous et le centre de la galaxie. C'est la poussière qui nous empêche de voir le centre de notre galaxie.



La splendide [Nébuleuse de la Tête de Cheval](#) est le produit de nuages de poussière et de gaz qui «jouent» avec des étoiles. Elle ne se trouve qu'à 1500 années-lumière de nous, soit vingt fois plus proche que le trou noir Sag A*.

Si notre galaxie était propre, si quelqu'un avait fait le ménage et qu'il n'y

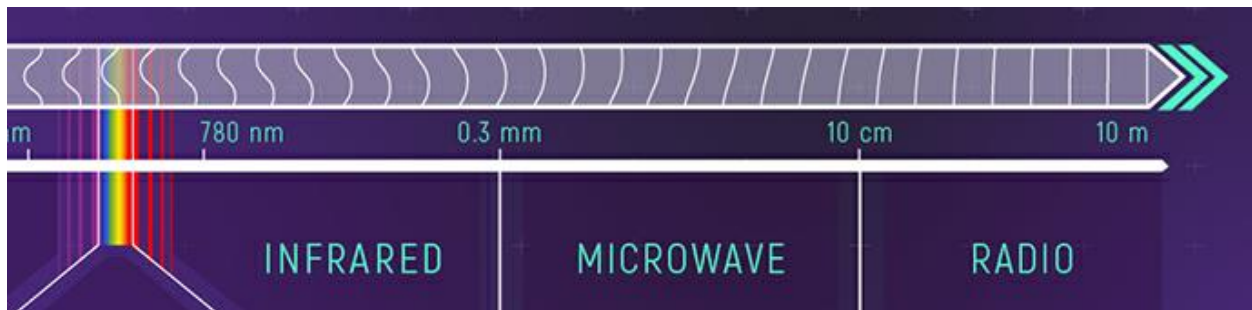
avait pas de poussière, on verrait relativement facilement le centre de la galaxie!

Exactement!

Il y a donc quelqu'un quelque part qui n'a pas fait son boulot!

Eh oui, exactement!

[Par contre, pourrait-on ajouter, on ne verrait plus les si belles nébuleuses!]



Une portion du spectre des ondes électromagnétiques. Le visible est une mince bande dont les longueurs d'onde s'étendent de 380 à 750 nanomètres, tandis que les ondes radio débutent à 10 cm.

Et c'est pourquoi nous avons utilisé, assez surprenamment, des radiotélescopes pour prendre une photo du centre de la galaxie. Expliquez-nous le lien entre un radiotélescope, un appareil qui capte des ondes radio mais qui permet pourtant d'obtenir des photos!

Les radiotélescopes fonctionnent dans des longueurs d'onde qui sont beaucoup plus grandes que celles du visible. Mais généralement, un seul radiotélescope ne nous donnera pas une très bonne résolution. C'est-à-dire qu'on ne verra pas grand détail, puisque la résolution dépend de la longueur d'onde à laquelle on observe. Et plus la longueur d'onde est grande, moins la résolution est bonne. C'est dire que dans le visible, on a une très bonne résolution mais, par contre, la poussière nous bloque la vue.

On a donc eu l'idée d'utiliser les ondes radio, ce qu'on fait depuis longtemps. On a même mis au point une technique qui consiste à utiliser plusieurs radiotélescopes en même temps, c'est ce qu'on appelle un interféromètre.

Lorsqu'on a plusieurs radiotélescopes sur un même site, on parle alors d'un radio-observatoire, comme celui à Penticton, en Colombie-Britannique, où on dispose de sept radiotélescopes placés sur des rails, ce qui permet de les déplacer les uns par rapport aux autres.



Les sept radiotélescopes de l'[Observatoire fédéral de radioastrophysique, à Penticton](#).

Par la suite, on a conçu ce qu'on appelle un interféromètre à longue base. La résolution qu'on obtient avec plusieurs radiotélescopes dépend de la séparation entre eux. Ainsi, dans le cas du VLA [voir photos page suivante], on est limité par une vingtaine de kilomètres.

Mais que se passerait-il si je pouvais paier un radiotélescope situé en Colombie-Britannique avec un autre situé en Ontario? C'est ce qu'on a d'ailleurs fait. Les



Le célèbre et gigantesque VLA, ou Very Large Array, est un ensemble de 25 radiotélescopes de 25 mètres de diamètre chacun installés sur des rails en forme de Y dans le désert du Nouveau-Mexique. Ce fut l'une des «vedettes» du film [Contact](#).

premières expériences d'interférométrie à longue base ont été menées au Canada par n groupe de radioastronomes, dont [John Galt](#) de Penticton et Allen Yen de l'Université de Toronto. C'est ainsi que cette technique a éventuellement été parfaitement mise au point.

On observe séparément, depuis divers sites sur Terre, la même source au même moment, et on enregistre le tout sur des bandes magnétiques [ou, à présent, sur des disques durs]. On synchronise précisément ces observations à l'aide d'horloges atomiques, ce qui permet de s'assurer que les observations ont bien été faites simultanément. Puis c'est à partir de ces observations qu'on fabrique une image.

Lorsqu'on a une très grande séparation entre deux radiotélescopes – par exemple un en Colombie-Britannique et un autre en Ontario – on obtient une résolution qui correspondait à la distance. C'est un peu comme avoir un plus gros miroir.

C'est ainsi que pour observer le trou noir au cœur de la galaxie M87 et celui de notre galaxie, on a utilisé une dizaine de radiotélescopes répartis un peu partout sur Terre: en Australie, en Europe, aux États-Unis (côte est et côte ouest) ainsi qu'en Antarctique. On a appelé ce réseau le *Event Horizon Telescope*, EHT en

abrégé, le télescope d'horizon des événements.

On observe donc la même source à la longueur d'onde de 1,3 millimètre. On obtient alors des quantités prodigieuses de données. [Les responsables du projet EHT ont rapporté que si on avait imprimé toutes les données recueillies pour concevoir l'image de Sag A*, cela aurait donné une pile de feuilles aussi longue que la distance Terre-Lune, soit quelques 385 000 kilomètres.]

On parle ici de radiotélescopes qui ressemblent à des antennes paraboliques, n'est-ce pas?

Oui. C'est comme les petites coupoles qu'on voit sur le toit des maisons, mais qui sont beaucoup plus grosses...



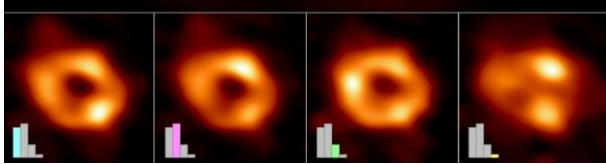
Exemple de radiotélescope.

... qui font plusieurs dizaines de mètres de diamètre. On peut donc, en couplant plusieurs radiotélescopes, obtenir une résolution assez intéressante.

Néanmoins, on capte des ondes radio qu'on traite par la suite. Mais comment parvient-on, au final, à obtenir une

photo qui nous permet de voir, vous et moi, un trou noir?

On pourrait dire que c'est de la magie! C'est la magie des mathématiques. Nous traitons donc les données recueillies par tous les télescopes pour faire des combinaisons entre chaque paire de radiotélescopes.



Chaque observation réalisée par une paire de radiotélescopes du projet EHT a généré une photo, comme celles-ci. Et c'est en combinant les contributions de la centaine de paires recueillies qu'on en est arrivé au résultat final:



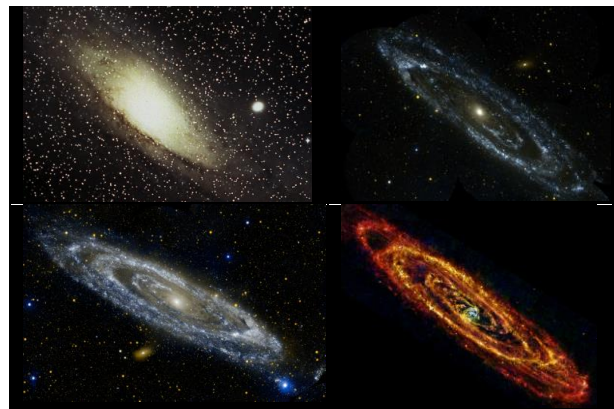
Ce qu'on obtient au bout du compte c'est une «bête» qu'on appelle une *visibilité*. C'est ainsi qu'un physicien et mathématicien français du 18^e siècle, [Joseph Fourier](#), a inventé une magnifique technique mathématique qui permet de partir de visibilités pour fabriquer une image, à partir d'une opération mathématique qu'on appelle une [transformation de Fourier](#).

Autrement dit, si je prenais une image, je pourrais faire l'opération mathématique inverse et obtenir une visibilité. Et si alors je refaisais l'opération inverse, j'obtiendrais à nouveau l'image.

Voilà ce qu'on a fait avec les observations de chaque paire de radiotélescopes, dont on fait la corrélation de leurs signaux et avec les visibilités obtenues qui contiennent toute l'information de l'image. Il nous reste alors à faire l'opération mathématique et, bingo!, on obtient une image.

Il faut tout de même dire que l'image qu'on voit, si on pouvait s'approcher à une distance raisonnable du trou noir pour le voir à peu près comme elle apparaît sur la photo, ce n'est pas ce qu'on verrait avec nos yeux. C'est une image de synthèse dans laquelle nous avons ajouté de la couleur. Le disque autour du trou noir n'est pas nécessairement orange.

Ce sont en effet de fausses couleurs, bien sûr. En réalité, si on pouvait voir de nos yeux le trou noir, ce n'est pas du tout ce qu'on verrait puisque la photo a été prise à une longueur d'onde de 1,3 millimètre, alors que nos yeux ne sont pas sensibles à cette longueur d'onde.



Le fait qu'on voit les objets célestes différemment selon la longueur d'onde avec laquelle on les photographie est illustré ici par ces quatre photos de la galaxie d'Andromède, observée différemment pour en faire ressortir différentes structures.

Que verrait-on avec nos yeux? Bien honnêtement, je ne me suis jamais posé la question! Ça serait autre chose, et ce ne

serait sûrement pas ce que l'on voit sur la photo réalisée à l'aide des radiotélescopes de l'horizon des événements (EHT).

En passant; que signifie au juste l'appellation *Event Horizon Telescope*, une appellation qui sonne un peu bizarre.

À l'origine, on a décidé qu'on voulait faire de l'imagerie de trous noirs qui se trouvent au centre des galaxies. Ce projet, qui est une vaste collaboration rassemblant des centaines de spécialistes en provenance de nombreux pays et auquel on a donné le nom d'*Event Horizon Telescope*. On parle d'ailleurs de la Collaboration EHT.

Dans le fond, c'est davantage le nom d'un projet de collaboration internationale plutôt que l'appellation d'un télescope en tant que tel, ou d'un groupe de télescopes. Ça donne l'impression qu'il y aurait quelque part un télescope, ou un groupe de télescopes, qui porte l'appellation EHT. Mais c'est essentiellement un projet scientifique.

Exactement. En fait, tous les radiotélescopes utilisés pour ce projet servent également à une foule d'autres projets. C'est comme si on utilisait une série d'outils pour réaliser un projet en particulier qui consiste à imager les environs de trous noirs. Et nous appelons cette collaboration *Event Horizon Telescope*.

L'équipe scientifique du projet EHT

Project Director: Huib Jan van Langevelde
Operations Manager: Remo Tilanus
Project Scientist: Geoff Bower
Deputy Project Scientist: Mariafelicia de Laurentis
ICT Officer and Secretary: Rocco Lico
Founding Director: Sheperd Doeleman

Science Council: Lindy Blackburn (SAO/CfA)
Chi-kwan Chan (U. Arizona) – Secretary
Jason Dexter (CU Boulder); Mariafelicia de Laurentis (U. Napoli); José L. Gómez (IAA-CSIC); Kazuhiro Hada (NAOJ); Michael Johnson (SAO/CfA); Shoko Koyama (ASIAA); Thomas Krichbaum (MPIfR); Sera Markoff (U. Amsterdam) – Vice Chair; Dan Marrone (U. Arizona) – Chair; Monika Mościbrodzka (Radboud); Feryal Özel (U. Arizona); Bong Won Sohn (KASI)

Junior Science Council
Yuzhu Cui (TDLI, SJTU); Lia Medeiros (IAS); Kotaro Moriyama (U. Frankfurt); Daniel Palumbo (CfA, BHI); Cristina Romero-Cañizales (ASIAA); Thalia Traianou (IAA, MPIfR)

EHTC Operations Manager: Remo Tilanus
System Engineer: André Young

Operations Data Manager Lynn Matthews
Operations Data Manager: Vincent Fish
Scheduler: Vincent Fish
Observations Leads: Lindy Blackburn, Alex Raymond
Lead Future Backend Systems: Jonathan Weintraub
Array Operations Division: Remo Tilanus
Technical Operations Division: André Young
Data Management Division: Vincent Fish

Science Utilization:
Proposal Coordination: Kazuhiro Hada, Sera Markoff
Synthetic Data Generation: Roger Deane
Calibration and Error Analysis: Lindy Blackburn

Data Analysis
Imaging: Kazunori Akiyama, Katherine Bouman, José L. Gómez
Scattering: Gregory Desvignes, Guang-Yao Zhao
Time Variability: Alexandra Tetarenko, Maciek Wielgus
Polarimetry: Andrew Chael, Iván Martí-Vidal
Near Horizon Science Utilization
Parameter Definition: Sascha Trippe, Gunther Witzel

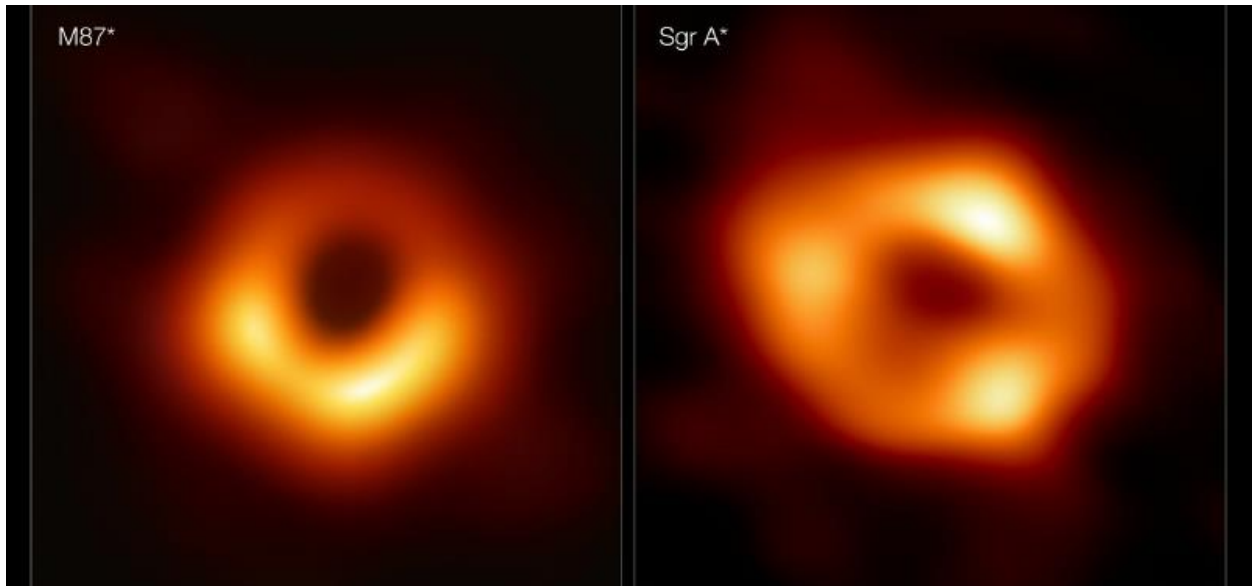
Theoretical Models and Simulations: Jason Dexter, Yosuke Mizuno, Hung-Yi Pu
Model Comparison and Feature Extraction: Roman Gold, Dom Pesce
Gravitational Physics: Mariafelicia De Laurentis, Lia Medeiros

Beyond Horizon Science Utilization
Multiwavelength Science: Kazuhiro Hada, Daryl Haggard, Sera Markoff
Active Galactic Nuclei: Thomas Krichbaum, Venkatesh Ramakrishnan

Pulsars: Michael Kramer, Scott Ransom, Pablo Torne

Products and Publications
Software and Data Compatibility: Chi-kwan Chan, Matt Turk
Publications: Charles Gammie, Shiro Ikeda, Kazi Rygl, Derek Ward-Thompson (Chair), John Wardle
Outreach: Richard Anantua, Mei-Yin Chou, Eduardo Ros

Collaboration Board and Representatives
Chair: Colin J. Lonsdale
Vice Chair: David Hughes
Executive: Raymond Blundell, Paul Ho, J. Anton Zensus
Secretary Michael Hecht



À gauche, le trou noir se trouvant au centre de la galaxie M87. À droite, Sagittaire A*.

5 – Comparaison entre M87* et Sag A*

En 2019, on nous a révélé la première image d'un trou noir, situé dans la galaxie Messier 87. C'est un trou noir qui est semblable mais différent de celui au centre de notre galaxie: il est en fait beaucoup plus massif et beaucoup plus vaste que Sagittaire A*.

On pourrait peut-être mentionner que pour le trou noir de notre galaxie, le rayon de l'horizon tiendrait à l'intérieur de l'orbite de Mercure – ce qui nous donne une

idée de la dimension de l'objet, même si ce n'est pas, comme je le disais plus tôt, une distance matérielle, puisqu'on ne peut pas faire «Toc, toc» sur le rayon de

l'horizon. Dans le cas de M87, le trou noir est 2000 fois plus massif que Sag A*, ce qui signifie que son horizon sera 2000 fois plus vaste. Si la dimension de notre trou noir correspond plus ou moins à l'orbite de Mercure, multipliez cela par 2000 pour obtenir une idée de la dimension du trou noir au centre de la galaxie M87. [Ce qui équivaut à la taille du Système solaire.]

Même si ces trous noirs sont très différents – M87* étant beaucoup plus massif que Sag A* –, par contre, il est tellement plus loin de nous que le facteur distance fait que la dimension angulaire – leur dimension apparente au firmament – est environ la même. Cela veut dire que si je vois quelque chose pour M87, je devrais pouvoir voir quelque chose de semblable avec celui de la Voie lactée. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'on a choisi d'observer ces deux trous noirs [plutôt que d'autres].

Grosso modo, M87* est 2000 fois plus massif que Sag A*, mais il se trouve 2000 fois plus distant de nous.

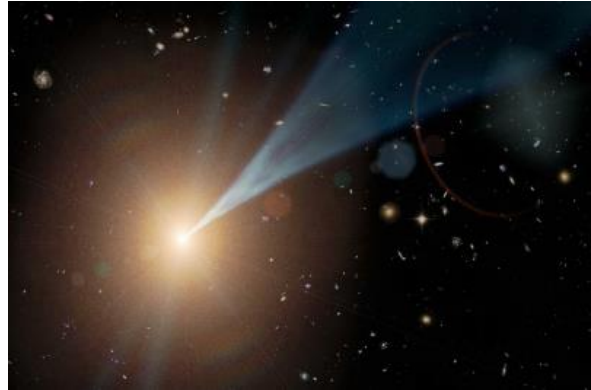
Grosso modo, c'est ça!

On a aussi mentionné que l'une des différences est le fait que M87* est un trou noir très actif, qu'il se passe beaucoup de choses autour de lui, tandis que Sagittaire A* est plutôt tranquille. On en parle même comme d'un trou noir «à jeun». Que signifient ces différences?

En général, l'activité d'un trou noir dépend de la matière disponible autour de lui. En fait, l'énergie qui émane d'un trou noir doit provenir de quelque part et la source de cette énergie, c'est justement la matière qui tombe vers lui.

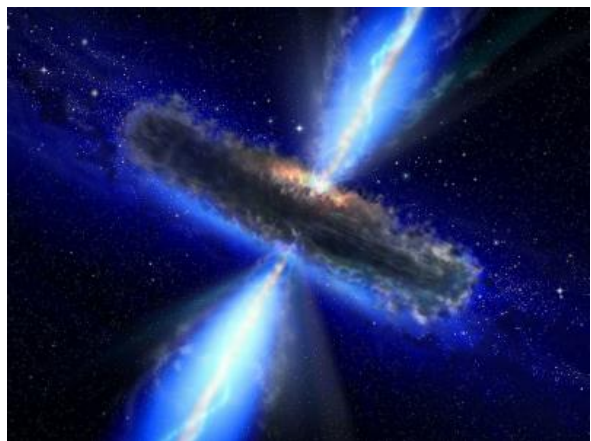
On se retrouve donc autour d'un trou noir avec un cocktail de particules qui se déplacent à des vitesses proches de celle

de la lumière et des champs magnétiques. Il va donc y avoir quantité de rayonnements qui va être produit. Et tout cela vient de ce qu'il y a de la matière qui chute vers le trou noir.



Il existe des galaxies au centre desquelles se trouve un trou noir qui expulse à grande vitesse de puissants jets de matière. Ce phénomène est alimenté par la matière qui tombe vers le trou noir. C'est le cas de la galaxie 87, mais pas de la nôtre.

Dans le cas de M87, nous savions que c'est une galaxie très active parce qu'on voit dans le visible comme dans les ondes radio qu'il y a un jet de matière propulsé sur des distances considérables. On supposait – et je pense que maintenant, on en est à peu près sûr – que ces jets sont propulsés par une énergie qui provient de la matière en chute vers le trou noir. Et à



Exemple de jets de matière émis par un trou noir perpendiculairement au disque de la galaxie.

cause des champs magnétiques qui entourent le trou noir, cela concentre un jet de matière qui sort de la galaxie de façon perpendiculaire au disque de celle-ci.

Dans le cas de notre Voie lactée, il s'agit d'une galaxie tranquille – comme ça semble être le cas pour la galaxie d'Andromède, notre voisine, et comme il y a beaucoup d'autres. Mais on pense que même ces galaxies tranquilles possèdent leur propre trou noir et que peut-être que par le passé, celui-ci était plus actif, alors que maintenant, il y a peu de matière pour le nourrir.

C'est dire que le trou noir de M87 est encore nourri, contrairement à celui de notre Voie lactée...

Il y a peu ou pas de matière autour de notre trou noir qui tombe sur lui?

C'est cela.

N'est-ce pas un peu surprenant d'avoir deux trous noirs très différents – un très actif et l'autre pas – mais qui revêtent à peu près la même apparence? Des trous noirs qui se ressemblent beaucoup?

Oui et non. Dans le cas de M87, on voit le disque de la galaxie pratiquement de face. Je prends toujours l'analogie avec un DVD ou un CD: imaginons qu'au centre du DVD se trouve un trou noir. Si vous le regardez en le voyant du dessus [comme pour lire les inscriptions], vous verrez un gros beigne. Dans ce cas-là, il n'y aura pas de déviations notables des ondes lumineuses vers vous, puisque ces rayons ne passent pas vraiment près du trou noir. Mais si vous faites pivoter votre DVD afin de l'observer par la tranche, vous ne le verrez pratiquement plus. Néanmoins, vous savez où se trouve le centre du DVD, là où il y aurait le trou noir.

La lumière qui doit provenir de la partie lointaine du DVD doit passer à proximité du trou noir pour vous atteindre, en plus de passer par-dessus et par-dessous le trou noir pour également vous atteindre. Et puisqu'il y a une symétrie parfaite, on obtiendra deux arcs de cercle – l'un au-dessus du DVD et un autre en dessous. Vous obtiendrez donc quelque chose qui ressemble à un beigne!

Voilà pourquoi il est à la fois surprenant et pas surprenant de constater que, bien qu'on ait photographié deux trous noirs sous un angle différent, on obtient la même apparence.



Dans son vidéo [A Picture of the Milky Way's Supermassive Black Hole](#), Derek Muller illustre très bien ce concept pas facile à expliquer (à partir de 16:30).

Au moment du dévoilement de la photo, on a rapporté que cette observation confirmait les hypothèses qu'Albert Einstein a énoncées il y a maintenant plus d'un siècle (et auxquelles nous avons consacré le [Balado 82](#)). En quoi cette observation confirme-t-elle la théorie de la relativité?

De mon point de vue, c'est surtout ce qu'on observe à propos des déviations majeures des rayons en provenance du trou noir. Tout cela se trouve confirmé par les

images des deux trous noirs. Par contre, comme nous avons dit au début, nous savions qu'il y avait un trou noir au centre de notre galaxie, l'existence des trous noirs ayant été prédite par la relativité générale... Je pense donc qu'on parle ici de la confirmation des processus qu'on observe autour de M87 et qu'on estime être responsables des activités au sein d'une galaxie active. La théorie de la relativité générale semble bien expliquer tout ce qu'on observe. Ce qui ne veut pas dire que dans cinquante ou dans cent ans, on n'aura pas trouvé autre chose.

C'est là le fonctionnement même de la science: nous tentons d'expliquer des phénomènes – ce qu'on appelle un modèle théorique – mais s'il y a quelque chose de nouveau qui nous apparaît et qui fait qu'on doit changer ce modèle, on le fait!

Nous observons que la théorie d'Einstein s'applique sans faille dans toutes les observations que nous avons faites jusqu'à maintenant et jusqu'au jour où nous allons peut-être trouver une faille qui va nous conduire vers une nouvelle théorie?

Exactement. Si par exemple, on observe un phénomène complètement en désaccord avec la théorie d'Einstein, on se dira qu'il y a quelque chose qui cloche.

Souvent, ce qui se passe, c'est qu'on tente de modifier un peu notre modèle théorique pour tenir compte des nouvelles observations. C'est d'ailleurs ce qu'on a fait il y a plusieurs siècles à propos des épicycles de Ptolémée. On rajoutait alors toute sorte de mécanismes pour tenter d'expliquer les mouvements rétrogrades de certaines planètes. Mais la théorie de Ptolémée, qui supposait que la Terre était au centre de l'Univers – ce qui est faux, comme nous le savons –, a néanmoins été celle qui a tenu durant une dizaine de siècles...

... et jusqu'à ce qu'on replace les choses à leur place.

C'est exactement cela: on a remplacé les choses à leur place!

Là, Serge, nous faisons allusion au balado 80 que nous avons fait avec Jean-René Roy à propos de [Notre place dans l'Univers 2500 ans d'histoire](#).

En conclusion: à quoi bon une telle photo?

Dites-moi, Serge, j'ai une question à vous poser mais pour laquelle j'ignore si vous avez une réponse à proposer. J'ai le goût de me faire l'avocat du diable....

Nous avons relaté que la photo du trou noir au centre de notre galaxie est un véritable prodige scientifique, que la prise de celle-ci a nécessité la collaboration d'au moins 300 scientifiques durant plusieurs années... Mais nous pourrions nous demander: qu'est-ce que cela nous donne? Est-ce qu'un tel effort en vaut vraiment le coût, tant d'efforts, tant d'énergie pour obtenir une telle photo?

Auriez-vous une réponse à nous suggérer?

En fait, lorsque j'étais associé de recherche à l'observatoire de Penticton, on avait souvent des visites du grand public durant les fins de semaine d'été... L'une des questions qui revenait souvent, pour employer les mots de l'un de mes collègues, c'était: est-ce que vos recherches aident à faire de meilleurs grille-pain?!

Je donnais alors toute sorte d'exemples. Notamment: aimez-vous écouter de la musique? C'est le cas de la plupart des gens, n'est-ce pas? Avez-vous un lecteur laser? Probablement, puisqu'à peu près tout le monde en possédait un à l'époque. Et aujourd'hui, on pourrait demander: avez-vous un GPS? Trouvez-vous pratique de pouvoir utiliser les télécommunications par satellite? Etc.

Or, tous ces progrès technologiques sont le fruit de la recherche fondamentale.

Prenons l'exemple du laser. Les scientifiques qui ont commencé à travailler là-dessus, dont Einstein, s'intéressaient aux transitions d'atomes entre leurs différents niveaux d'énergie. Voilà qui n'est pas très pratico-pratique! Sauf qu'éventuellement, quelqu'un s'est demandé: que se passerait-il si on parvenait à envoyer davantage d'électrons vers des niveaux d'énergie plus élevés? Il s'est rendu compte qu'en faisant cela, on parvenait à faire ce qu'on appelle un laser. Mais à l'époque, personne n'avait songé à une application quelconque, comme on le fait de nos jours en arpentage, pour des chirurgies au laser, etc.

Pensons également aux satellites de communication et à ceux qui observent la Terre, des engins très utiles... Tout cela remonte aux travaux menés par Tycho Brahe au 15^e siècle; celui-ci a consacré des années à observer attentivement les déplacements de la planète Mars, observations dont s'est ensuite servi Johannes Kepler pour élaborer ses trois lois... qui servent à présent à calculer la trajectoire des satellites et à guider nos sondes à travers le Système solaire. Ajoutons qu'entretiens, Isaac Newton s'est servi des lois de Kepler pour élaborer sa théorie de la gravitation universelle, théorie qui nous sert à présent à expédier des satellites dans l'espace. Et voilà qu'arrive Einstein, dont

la théorie de la relativité nous sert à établir notre position sur Terre grâce aux satellites GPS. Ces satellites nous permettent de nous situer sur Terre, grâce à la théorie de la relativité d'Einstein! [Écoutez les balados [80](#) et [82](#).]

On peut ainsi dire que la recherche fondamentale, ça ne donne rien sur le coup, mais que c'est très rare qu'elle ne nous mène pas à quelque chose de très pratique.

Incidemment, les capteurs CCD que vous retrouvez dans vos téléphones cellulaires et qui servent à prendre des photos ont en bonne partie été mis au point par des astronomes. Et du moment qu'on s'en sert pour examiner le ciel, on peut très bien s'en servir, vous et moi, dans notre vie de tous les jours!

Personnellement, je réponds à cette question en disant: si vous vous demandez à quoi sert la connaissance, essayez l'ignorance! Vous verrez la différence. De fait, ce sont les connaissances de base, acquises grâce à la recherche fondamentale, qui nous conduisent au monde dans lequel nous vivons.

Dans le cas de la photo de Sagittaire A*, on pourrait dire qu'elle fait partie de l'ensemble des connaissances que nous accumulons depuis des millénaires concernant notre place dans l'Univers: d'où venons-nous et où allons-nous? Nous comprenons beaucoup mieux notre place dans l'Univers, mais les recherches astronomiques se poursuivent sans trop savoir jusqu'où elles nous conduiront.

Un formidable exemple de l'utilité des connaissances fondamentales qu'on accumule se retrouve dans le documentaire [The History of Earth: How Our Planet Formed](#), disponible sur YouTube.

Sommes-nous menacés par Sag A*?

En terminant, la publication de la photo du trou noir au centre de notre galaxie a peut-être inquiété certaines personnes qui se sont demandées si nous ne risquons pas un jour d'être avalés par ce trou noir? Hollywood nous montre souvent que les trous noirs sont des bêtes voraces qui avalent tout sur leur passage. Ainsi, doit-on craindre le monstre qui se cache au centre de notre galaxie?

C'est une bonne question puisque, lorsque nous n'avons pas la connaissance des phénomènes comme tels, il est fréquent d'avoir peur. On nous présente effectivement souvent les trous noirs comme des monstres qui avalent tout autour d'eux. Bien sûr, si vous passez très proche de l'un d'eux, vous n'en sortirez pas.

Cependant, l'exemple que j'aime bien donner c'est: imaginez que, par un coup de baguette magique, on transformerait le Soleil en un trou noir. Imaginons qu'il devienne donc un trou noir... Que se passerait-il alors?

Vous vous lèveriez par un bon matin et vous découvririez qu'il fera désormais noir, que ce sera l'obscurité totale, puisque le Soleil n'émettra plus ni sa lumière ni sa chaleur. Mais vous réaliserez aussi, en faisant toute sorte d'observations, que rien d'autre n'a changé, que la Terre continue de tourner autour du Soleil comme si de rien n'était. Il n'y aurait rien de

changé, car les autres planètes, y compris Mercure (la plus proche du Soleil) continueraient de graviter autour de ce trou noir.

Oui, c'est vrai qu'un trou noir est un objet qui, si on s'en approche trop, devient dangereux. Mais si on en imagine un qui serait dix fois plus massif que le Soleil, son rayon des événements – son rayon d'action – ne serait que de 30 kilomètres seulement. Il serait donc extrêmement dangereux de s'en approcher à moins d'une centaine de kilomètres. Mais la Terre se trouvant à 150 millions de kilomètres de ce trou noir, on ne risquerait rien.

On pourrait même se demander: quelle est la probabilité qu'on soit un jour avalé par un trou noir qui viendrait à passer à proximité de la Terre? Or, cette probabilité est à toutes fins utiles infinitésimale étant donné la faible dimension de l'horizon des événements de tout trou noir. Il faudrait que celui-ci passe extrêmement proche de la Terre pour qu'on soit avalé.

C'est donc dire qu'il n'y a aucun risque d'être gobé par le trou noir au centre de notre galaxie, qui se trouve à 27 000 années-lumière de nous?

















Absolument! D'autant plus que le Soleil va continuer de graviter autour du centre de la galaxie, à 27 000 années-lumière de distance, en prenant 250 millions d'années pour décrire son orbite. Et rien ne va jamais changer. ●

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*



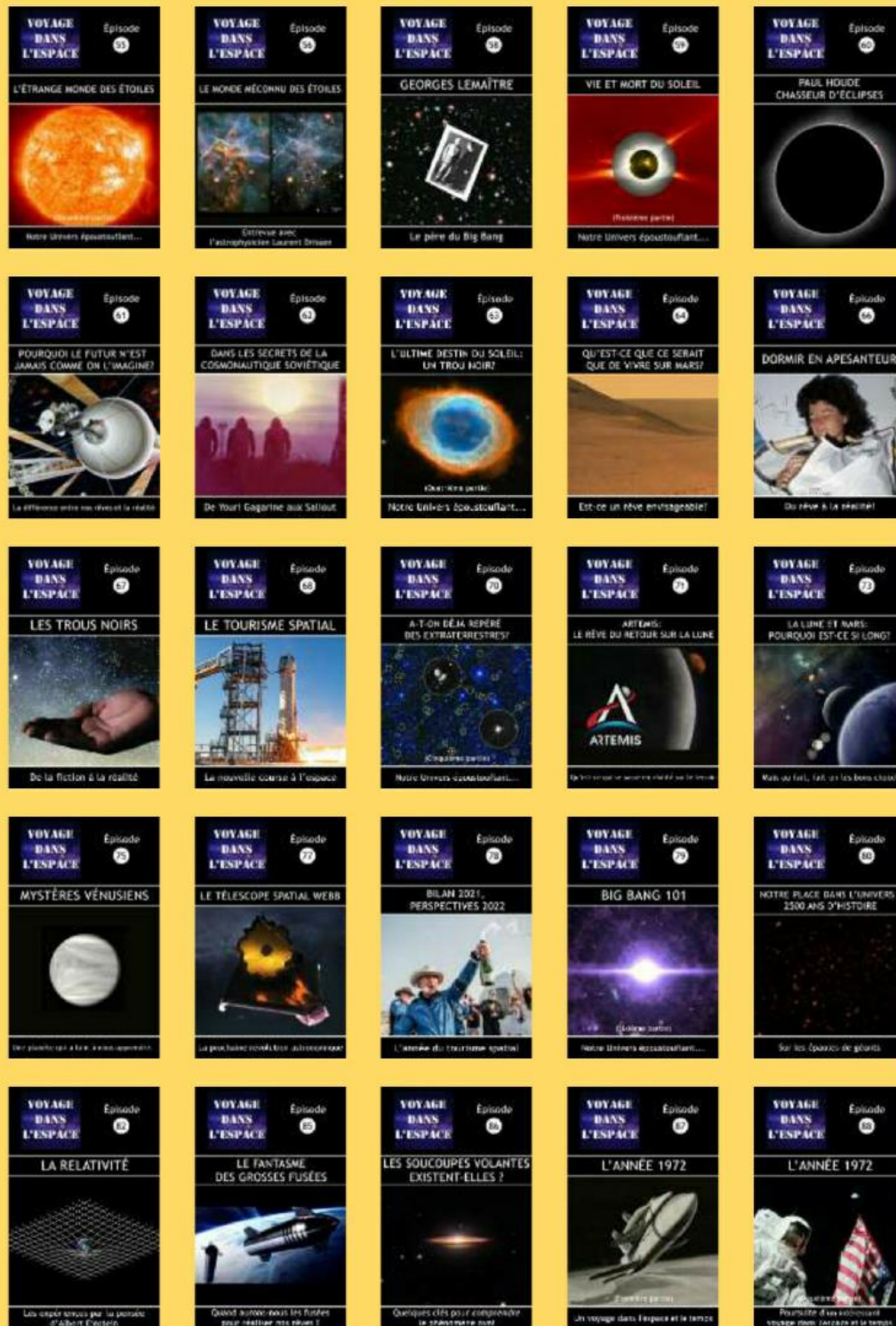
Note: les fascicules ci-dessus accompagnent les balados *Voyage dans l'espace* mais ce ne sont pas tous les balados qui sont accompagnés par un fascicule. Il «manque» donc des numéros.

Les Fascicules de *Voyage dans l'espace*

<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 26</p> <p>ALEXEI LEONOV</p>  <p>Le cosmonaute aux sept vies</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 27</p> <p>PARLONS DE... CAPSULES SPATIALES</p>  <p>Pourquoi voyager dans l'espace ? L'ère des capsules</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 28</p> <p>TRING, LA FACILITÉ DÉCOUVERTE DE LA VIE SUR MARS</p>  <p>Orbiter et rover : où se trouvent nos prochains habitats</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 29</p> <p>LA GRANDE PEUR DE 1910</p>  <p>Quand le passé est garant de l'avenir</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 30</p> <p>VIKTOR L'ESPÉRANTO - LES ASTÉROÏDES</p>  <p>Le petit astère qui nous surveille tout le temps</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 31</p> <p>DES IDÉES PAS COMME LES AUTRES...</p>  <p>Peut-être pas rêver, mais au moins se le faire pas rêver!</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 32</p> <p>PRELUDES À APOLLO 11</p>  <p>La grande Fête de la course à la Lune</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 33</p> <p>APOLLO 11 DANS LES CONGRÈS DE L'HISTOIRE</p>  <p>Et qu'il n'y ait jamais d'oubli...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 34</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALART!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 35</p> <p>NOTRE UNIVERS: BEAUX, MYSTÉRIEUX... SPOUSALART!</p>  <p>À la frontière de nos connaissances... et même au-delà!</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 36</p> <p>LES SURPRISES DE L'ÉTÉ 2019</p>  <p>Des idées pour les années à venir de l'espace</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 37</p> <p>POURQUOI MARS...</p>  <p>... nous obsède-t-elle autant?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 38</p> <p>OU EN SERONS-NOUS EN 2040?</p>  <p>Controverses dans le futur : l'histoire des scénarios américains du Qatar</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 39</p> <p>L'ASTRONOMIE PAR L'IMAGE</p>  <p>Avec un grand télescope spatialisé</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 40</p> <p>LA LUNE. CETTE INCONNUE</p>  <p>On croit tout savoir à son sujet... Mais non.</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 41</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>1^{ère} partie: le Grand Tour</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 42</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>2^e partie: destination Jupiter et Saturne</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 43</p> <p>LA VOIE LACTÉE: HISTOIRE DE L'UNIVERS</p>  <p>Le fil de l'univers est-il une spirale à double brin?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 44</p> <p>ET SI ÇA C'ÉTAIT PASÉ AUTREMENT...</p>  <p>Pourquoi, la course à l'espace spatiale prend-elle fin?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 45</p> <p>ETÉ 2020 À L'ÉCHÉLON DE LA PLANÈTE MARS</p>  <p>À la recherche d'eau et de vie</p>
<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 46</p> <p>DE NOUVELLES PLANÈTES INCROYABLES</p>  <p>Une diversité à n'en plus finir...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 47</p> <p>LA GRANDE EXPÉDITION DES VOYAGES</p>  <p>3^e partie: aux confins du système solaire</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 48</p> <p>LES GALAXIES: AUX FRONTIÈRES DE LA COSMOLOGIE</p>  <p>Comment se fait-il que nous existions?</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 49</p> <p>LE SYSTÈME SOLAIRE N'EST PLUS CE QU'IL ÉTAIT</p>  <p>2^{ème} partie: Notre univers spatialement...</p>	<p>VOYAGE DANS L'ESPACE Episode 50</p> <p>LE MÉTIER D'ASTRONAUTE</p>  <p>1^{ère} partie: au-delà du monde à l'échelle humaine Claude Laffleur Chapitre 3 Les multiples chemins vers l'espace</p>

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.