

GWTC-4.0 : MISE À JOUR DU CATALOGUE DE LIGO, VIRGO ET KAGRA INCLUANT LA PREMIÈRE PARTIE DE LA PRISE DE DONNÉES O4

En août 2025, les collaborations LIGO, Virgo et KAGRA (LVK) ont publié les données ondes gravitationnelles de la première partie de leur quatrième période d'observation commune (O4a), de mai 2023 à janvier 2024. Dans ces données, nous avons découvert 128 nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles (OGs) provenant de trous noirs et d'étoiles à neutrons. En plus de ces données, nous publions la version 4.0 de notre catalogue de signaux transitoires d'OGs (GWTC-4.0), qui contient des listes de signaux candidats pour être des OGs et les mesures de leurs propriétés. Une série d'articles thématiques accompagnent ce catalogue. Ils sont soumis à la revue *Astrophysical Journal Letters* pour publication sous la forme d'un numéro spécial. Ici, nous résumons les trois premiers de ces articles qui décrivent la mise à jour du catalogue de signaux GWTC-4.0 ainsi que les résultats qu'il contient.

L'ARTICLE INTRODUCTIF

Cet article, « GWTC-4.0 : une Introduction à la Version 4.0 du Catalogue des Signaux Transitoires d'OGs », fournit une vue d'ensemble du numéro spécial, présente les autres articles et donne des informations importantes pour aider le lecteur à comprendre la terminologie de notre domaine.

Nommer les signaux d'OGs

Nous nommons nos signaux d'OGs selon la date et l'heure à laquelle nous les détectons en [temps universel coordonné](#) (UTC). Le premier événement nouveau du catalogue GWTC-4.0, baptisé GW230518_125908, a donc été détecté le 18 mai 2023 à 12h59m08s

UTC. Nous ajoutons également le préfixe « GW » à tous nos signaux candidats. Cette convention diffère de celles des précédents catalogues : les signaux que nous pensons être en fait d'origine terrestre sont maintenant inclus dans le catalogue, mais avec des informations supplémentaires qui expliquent pourquoi nous pensons qu'ils ne sont peut-être pas de vraies OGs.

Des catalogues cumulatifs

Le catalogue de signaux d'OGs transitoires GWTC est cumulatif : ainsi, la mise à jour GWTC-4.0 contient tous les nouveaux résultats de O4a, plus l'ensemble des catalogues publiés précédemment. Cette information est représentée sur la Figure 1 (ci-dessus) qui montre la succession des prises de données (représentées par des bandes colorées) et les lots de données contenus dans chaque édition du catalogue. Vous remarquerez que ces dernières sont identifiées par deux nombres, le principal et le secondaire, séparés par un point. Le nombre principal augmente quand des données sont ajoutées au catalogue, tandis que le nombre secondaire est incrémenté s'il y a un changement au niveau des méthodes d'analyse (ce fut le cas pour GWTC-2.1) ou du contenu des données. Dans le passé, le nombre secondaire était omis lorsqu'il valait 0 mais nous avons remarqué que cela pouvait prêter à confusion. À partir de maintenant nous incluons toujours le nombre secondaire pour désigner une édition particulière du catalogue – mais nous continuons à l'omettre quand nous parlons du lot de données (comme indiqué sur la Figure 1).

Sur la Figure 1, vous remarquerez également que les détecteurs LIGO sont les seuls à avoir pris des données pendant tout O4a : toutes les détections et les mesures associées sont basées sur les données de ces deux instruments. KAGRA a brièvement pris des données au début de O4a, mais sa sensibilité était insuffisante pour contribuer aux résultats du catalogue.

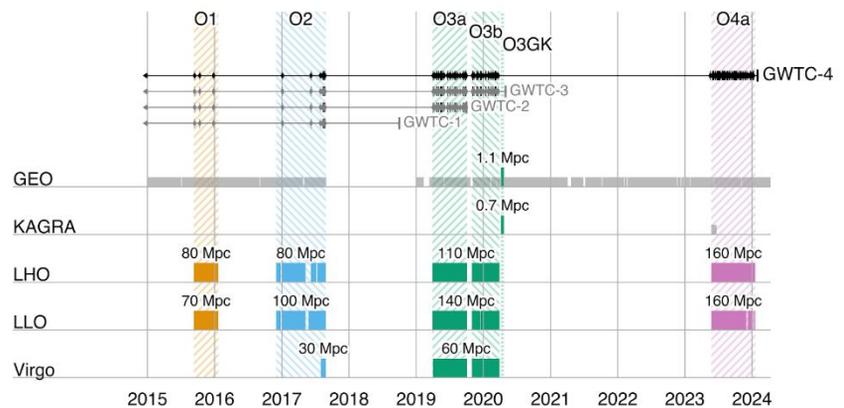


Figure 1 : Une chronologie des prises de données des détecteurs d'OGs [GEO](#) (en Allemagne), [KAGRA](#) (au Japon), [LIGO-Hanford](#) (« LHO », état de Washington), [LIGO-Livingston](#) (« LLO », Louisiane) et [Virgo](#) (Italie). Les nombres suivis de l'unité "Mpc" (mégaparsecs) situés au-dessus de chaque bloc coloré donnent la distance jusqu'à laquelle un détecteur pouvait détecter la fusion de deux étoiles à neutrons, une mesure standard de sa sensibilité. Dans la partie supérieure, des traits verticaux montrent les dates des détections incluses dans le catalogue GWTC, tandis que les barres horizontales délimitent les lots de données analysés dans chaque mise à jour.

POUR EN SAVOIR PLUS

Visitez nos sites internet www.ligo.org, www.virgo-gw.eu et gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en



Dans l'article d'introduction, nous décrivons pour la première fois en détail l'évolution de chaque détecteur. En rassemblant ces informations dans un même article, nous espérons faciliter les échanges entre la communauté scientifique qui étudie nos observations et les collaborations LVK qui construisent et font fonctionner ces détecteurs.

Des signaux toujours plus nombreux

Nous pouvons calculer « l'hypervolume » à quatre dimensions (trois d'espace, un volume habituel donc, plus une de temps) que les détecteurs LIGO ont observé pendant O4a en ajoutant des signaux simulés aux données et en vérifiant s'ils sont détectés par les méthodes d'analyses, puis en combinant ces efficacités de détection avec l'évolution du « rendement » des instruments – c'est-à-dire la fraction du temps pendant laquelle ils prennent effectivement des données. La Figure 2 présente le nombre de détections (définies comme étant les événements du catalogue dont la probabilité p_{astro} d'avoir une origine astrophysique est d'au-moins 50%) en fonction d'une estimation de cet hypervolume (dont l'unité de longueur est le gigaparsec (Gpc), bien adaptée aux distances dans l'Univers et l'unité de temps l'année) ; les bandes colorées verticales correspondent aux différentes périodes de prise de données. Ce graphique montre que, grâce à O4a, le nombre total de détections a plus que doublé ! Enfin, les bandes bleues autour des courbes représentent l'incertitude sur le nombre de vraies détections. En effet, si beaucoup de candidats OGs inclus dans ce comptage ont p_{astro} proche de 100%, ceux pour lesquels p_{astro} vaut à peine 50% ont autant de chances d'être une vraie OG qu'une fluctuation du bruit de mesure.

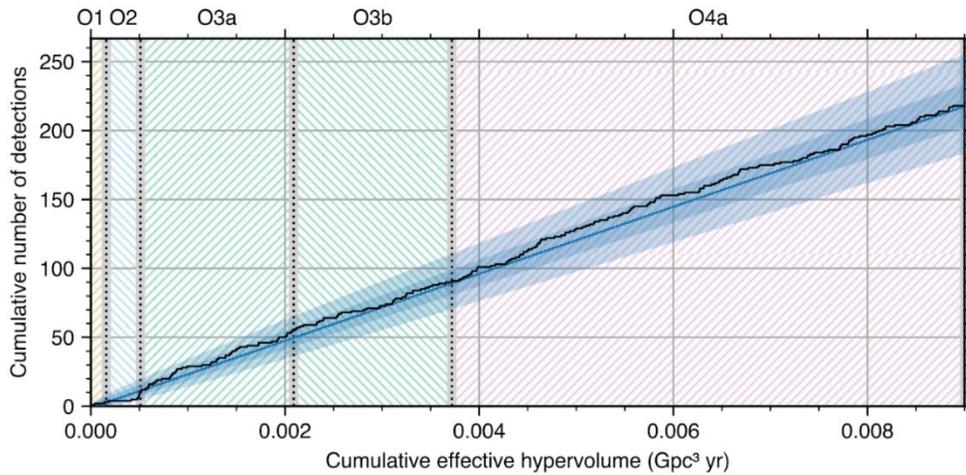


Figure 2 : Le nombre cumulé de détections (candidats trouvés avec une probabilité d'être d'origine astrophysique supérieure à 50 %) en fonction d'une estimation de l'hypervolume d'espace-temps observé par les deux détecteurs LIGO durant O4a.

Le reste de l'article passe en revue les différentes sources de signaux transitoires d'OGs observées à ce jour, avant un court résumé de son contenu comme conclusion. La description des sources d'OGs ne vise pas à remplacer les nombreux ouvrages de référence existants, mais plutôt à fournir une brève introduction au langage et aux mathématiques que nous utilisons pour décrire les propriétés de ces sources tout au long du numéro spécial du journal. Cette introduction commune assure la cohérence globale de nos notations et fournit un point de référence unique pour les personnes intéressées par ce domaine de la physique. Nous incluons également en appendice une table des acronymes fréquemment utilisés et des définitions sous forme de glossaire, ainsi qu'une synthèse des conventions retenues pour les analyses des données.

L'article introductif définit le cadre du numéro spécial. S'il ne contient pas de résultat, il a pour but d'éviter les redites entre articles, de s'assurer qu'ils forment un tout cohérent et de fournir des définitions claires pour la communauté scientifique.

L'ARTICLE "MÉTHODES"

L'article sur les méthodes d'analyse, « GWTC-4.0 : Méthodes pour identifier et caractériser les signaux transitoires d'OGs », fournit les détails de la méthodologie utilisée pour produire le catalogue GWTC-4.0. Il commence par une revue des modèles de formes d'onde théoriques pour les fusions de trous noirs et d'étoiles à neutrons, avant de passer à la description des algorithmes de recherche qui produisent les listes de candidats OGs. Chaque candidat est soumis à une batterie de tests de validation, dont la vérification de la qualité des données associées. Finalement, une procédure dite « d'estimation des paramètres » lui est appliquée pour mesurer les paramètres de la source de l'OG ; elle s'accompagne d'une vérification de la cohérence du signal avec la forme d'onde associée afin de valider les hypothèses de l'analyse.

Des analyses toujours plus complexes et plus performantes

Depuis la fin de la prise de données O3 et la publication du catalogue GWTC-3.0, nous avons fait beaucoup d'efforts pour améliorer nos analyses. Nous avons ainsi introduit de nouveaux modèles de formes d'onde qui décrivent mieux la physique des sources d'OGs et demandent moins de temps de calcul. Ceux-ci sont inclus dans la mise à jour GWTC-4.0 et nous utilisons même jusqu'à quatre formes d'onde différentes pour analyser de nombreux événements : c'est deux fois plus que pour GWTC-3.0, ce qui nous permet de mieux prendre en compte les inexactitudes de ces modèles. Nous avons également ajusté nos algorithmes de recherche, en introduisant de nouvelles approches pour améliorer leur efficacité de détection. Ces nombreuses améliorations ont augmenté la complexité de la production de notre catalogue, et nous avons continué à

développer de nouvelles technologies innovantes pour automatiser autant que possible les analyses, afin de pouvoir les pousser plus loin et de nous assurer que nos résultats sont faciles à reproduire.

Une perspective historique

Dans l'article « méthodes », vous pourriez être surpris de trouver la description d'algorithmes « historiques » utilisés pour analyser les données de O1 (2015 – 2016). Cela s'explique par la nature cumulative du catalogue : si les anciennes données n'ont pas été réanalysées, alors il est important de présenter les méthodes qui ont produit ces résultats – des méthodes qui peuvent être très différentes de celles développées pour les nouvelles données. C'est pourquoi cet article propose une approche historique et décrit jusqu'aux changements les plus récents apportés à notre méthodologie.

En résumé, cet article fournit une vue d'ensemble de nos méthodes de travail. Il montre comment nous exploitons chacune de ces étapes (les analyses de données, d'abord en temps réel puis plus complètes ; les études préliminaires ; et enfin les vérifications minutieuses de chaque résultat pour nous assurer que ceux-ci sont corrects et de la plus haute qualité).

LES RÉSULTATS

Plus de signaux, plus de variété

Nous avons trouvé 128 nouveaux candidats qui ont une probabilité p_{astro} d'être d'origine astrophysique supérieure à 50%. Cela porte le nombre total de détections à 218 : la taille du catalogue GWTC a plus que doublé ! Nous présentons une analyse détaillée de 86 de ces signaux dans la mise à jour GWTC-4.0. Ces nombreuses découvertes ont été rendues possibles par l'amélioration de la sensibilité des détecteurs, et par de nouveaux développements pour les techniques d'analyse utilisées pour extraire les signaux du bruit de mesure.

C'est excitant d'avoir autant de nouvelles observations. Si les données de O4a contiennent en majorité des signaux émis lors de fusions de systèmes binaires de trous noirs que nos détecteurs identifient maintenant de manière très efficace, on y trouve également des fusions de systèmes mixtes trou noir + étoile à neutrons qui sont différents de tout ce que nous avons observé jusqu'à maintenant.

Des détections temps réel aux analyses complètes en temps décalé (et vice-versa)

Pendant O4a, nous avons émis aussi rapidement que possible des alertes publiques portant sur les candidats OG probables, détectés en temps réel. Cela permet aux astronomes d'effectuer des observations de suivi avec leurs télescopes pour rechercher toute forme de lumière émise par les sources de ces candidats. Il y a eu en tout 1697 alertes pendant O4a,

dont 82 ont été jugées très probables d'être d'origine astrophysique et ne présentaient aucun problème de qualité des données. Comme mentionné plus tôt, le catalogue GWTC-4.0 contient au final 128 candidats très probables : ceux-ci sont le résultat de ce que l'on appelle des analyses « en temps décalé » qui utilisent des méthodes de recherche améliorées et l'ensemble des informations disponibles. Cependant, parmi ces 128 signaux, seuls huit n'ont pas du tout été identifiés en temps réel ! Cela montre que ces recherches rapides font un excellent travail en trouvant la plupart des candidats et fournissent aux astronomes des informations très précises à exploiter.

Matière à études

Deux des nouvelles détections du catalogue O4a semblent avoir été produites par la fusion d'un trou noir et d'une étoile à neutrons. Ces signaux sont très intéressants car, contrairement aux fusions de trous noirs qui impliquent peu ou pas de « vraie » matière, la présence de matière (nucléaire) issue de l'étoile à neutrons peut potentiellement être détectée dans le signal d'OG mesuré. Nous n'avons pas réussi à observer ces effets dans aucun des deux cas mais, plus nous détectons des signaux de la même catégorie, et plus il est probable que nous réussirons à mesurer les effets de la matière.

Effet de masse

À partir du signal d'OG détecté, nous pouvons mesurer directement les masses des deux astres qui ont fusionné. Chaque point sur la Figure 3 correspond aux masses les plus probables d'un système binaire du catalogue GWTC-4.0 – la masse primaire (axe horizontal) est par convention

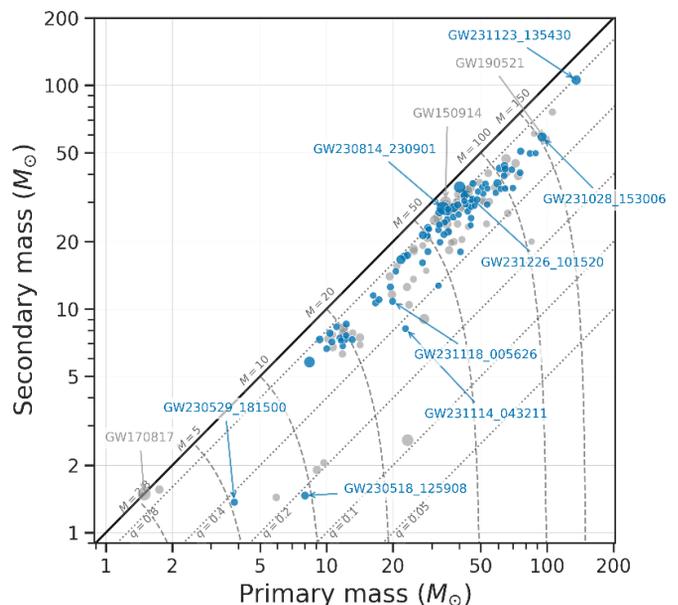


Figure 3 : Représentation graphique des masses des deux astres compacts qui ont fusionné, pour chaque système binaire inclus dans le catalogue GWTC-4.0. Les nouveaux candidats identifiés dans les données O4 sont en bleu ; ceux des anciens lots de données O1-O3 en gris. Chaque masse reportée sur le graphique est une estimation ponctuelle qui ne prend pas en compte les incertitudes et correspond à la valeur la plus probable estimée. Pour chaque événement, la taille du repère est proportionnelle au rapport signal sur bruit détecté : plus cette surface est grande et plus le signal était visible. Les lignes en pointillés et parallèles suivent des valeurs constantes pour le rapport de masse $q = (\text{masse secondaire}) / (\text{masse primaire})$; les lignes en tirets correspondent à des valeurs constantes de la masse totale du système. L'unité choisie pour les masses est la masse du Soleil. (Crédit : G. Ashton, Royal Holloway University of London.)

la plus élevée des deux ; l'autre est la masse secondaire (axe vertical). Et donc tous les points sont sous la diagonale du graphique. L'absence de nouveau point dans le coin inférieur gauche montre que nous n'avons pas trouvé de nouvelles fusions d'étoiles à neutrons. Par contre, il y a des fusions trou noir + étoiles à neutrons très intéressantes et de nouvelles fusions de trous noirs, avec des masses totales supérieures à 150 masses solaires !

La juste rotation

En plus de sa masse, on peut mesurer une seconde propriété d'un trou noir ou d'une étoile à neutrons qui a fusionné : sa rotation propre (en anglais « spin »), c'est-à-dire s'il tourne sur lui-même et, dans l'affirmative, autour de quel axe et à quelle vitesse. Cette information est importante pour étudier comment cet astre s'est formé ou dans quel environnement il a évolué. Pour chaque système binaire dont la fusion a été détectée sous forme d'OG, on peut calculer un paramètre dit de « spin effectif » (voir la Figure 4) qui incorpore les informations des deux spins et nous renseigne sur leurs points communs ou leurs différences. Un grand spin effectif positif implique que l'un ou les deux astres tournent rapidement sur eux-mêmes, et dans le même sens qu'ils tournent l'un autour de l'autre. un spin effectif négatif signifie au contraire que les deux mouvements de rotation

(sur soi-même et en orbite) ont des directions opposées.

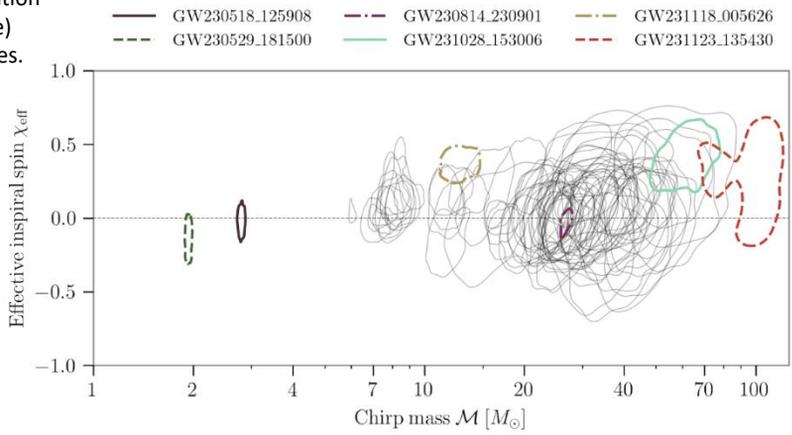


Figure 4 : Un graphique montrant, pour tous les nouveaux systèmes binaires détectés pendant O4a, le paramètre de spin effectif en fonction de la « masse chirp » du système, une combinaison des deux masses des astres compacts qui ont fusionné et qui est mesurée avec la meilleure précision. Une sélection de signaux intéressants est mise en évidence en couleur – voir également la légende au-dessus du graphique. Sur cette Figure, les incertitudes sont prises en compte : au lieu d'un point unique par système binaire, on a un contour fermé qui a 90% de chance de contenir les vraies valeurs des deux paramètres mesurés.

Le catalogue GWTC-4.0 double le nombre de signaux d'OGs connus. C'est un résultat majeur, rendu possible par les nombreuses améliorations apportées aux détecteurs ces dernières années. Les signaux de O4a nous fournissent beaucoup de nouvelles informations sur les trous noirs et les étoiles à neutrons et généreront certainement un grand enthousiasme au sein de la communauté scientifique, promesse de nombreuses études de ces données à venir.

POUR EN SAVOIR PLUS

Visitez nos sites internet :

- www.ligo.org
- www.virgo-gw.eu
- gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en

Lisez une copie gratuite de nos articles scientifiques

- Introduction : [ici](#) ou sur [arXiv](#).
- Méthodes : [ici](#) ou sur [arXiv](#).
- Résultats : [ici](#) ou sur [arXiv](#).
- La [documentation du catalogue GWTC-4.0](#) sur le site du [GWOSC](#).

GLOSSAIRE

Algorithme d'analyse : Un logiciel qui se compose d'une suite de processus informatiques qui récupèrent, mettent en forme et analysent les données, puis calculent une série de quantités prédéfinies qui servent à rejeter le plus possible de candidats créés artificiellement par des fluctuations du bruit de mesure et à estimer la probabilité qu'un signal détecté soit d'origine astrophysique (c'est-à-dire qu'il vienne du cosmos).

Analyse en temps décalé : Ces analyses filtrent les données des semaines voire des mois après que celles-ci ont été enregistrées. Elles utilisent toutes les informations disponibles et font appel à des méthodes souvent plus gourmandes en temps de calcul que les analyses temps réel qui doivent fournir une réponse rapide. Les analyses en temps décalé complètent donc les analyses en temps réel en donnant des résultats meilleurs qui sont utilisés comme référence dans les articles scientifiques.

Bruit de mesure : Des fluctuations aléatoires qui proviennent de composants du détecteur (par exemple un signal électrique légèrement brouillé) ou de son environnement (des microséismes qui font vibrer le sol). La sensibilité d'un détecteur est limitée par l'amplitude du bruit qu'il génère et un signal d'OG ne peut être détecté que s'il « sort » du bruit d'une manière ou d'une autre.

Efficacité : la fraction de signaux simulés qui sont détectés par les algorithmes d'analyse. Elle dépend de la sensibilité du détecteur, du type de forme d'onde testé et de l'amplitude du signal choisie pour ce test.

Estimation des paramètres : Une technique statistique pour estimer les paramètres astrophysiques (masses, etc.) de la source d'un signal d'onde gravitationnelle détecté.

Etoile à neutrons : un vestige d'une étoile massive. Lorsqu'un astre de ce type a épuisé son combustible nucléaire, il explose de manière catastrophique en une supernova qui peut laisser derrière elle une étoile à neutrons : un astre si massif et si dense (mais pas autant qu'un trou noir) que les atomes ne peuvent maintenir leur structure normale comme sur Terre. Les protons des noyaux et les électrons des nuages électroniques se combinent pour former des neutrons, d'où le nom de ce type d'étoiles. Une étoile à neutrons est aussi lourde que le Soleil mais son rayon est de seulement 10 km.

Forme d'onde : L'évolution de l'amplitude d'un signal d'onde gravitationnelle en fonction du temps.

Masse "chirp" : Une combinaison mathématique des masses individuelles d'un système binaire qui a également la dimension d'une masse. Cette quantité détermine à l'ordre dominant l'évolution orbitale du système qui perd de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles.

Niveau de confiance : La probabilité que la vraie valeur d'un paramètre soit contenue dans l'intervalle obtenu à la fin de la procédure d'analyse des données.

Ondes gravitationnelles : Des oscillations de la structure de l'espace-temps générées par certains des phénomènes les plus violents dans l'Univers, comme la fusion d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.

Rendement : Fraction du temps pendant laquelle un détecteur prend des données.

Signal d'onde gravitationnelle : La modification relative de distance entre deux points (c'est-à-dire le rapport entre la variation de longueur et la longueur au repos) due à la déformation de l'espace-temps produite par le passage d'une onde gravitationnelle. L'amplitude typique des signaux les plus « forts » arrivant sur Terre est très faible : au mieux de l'ordre de 10^{-21} .

Spin : Le moment angulaire d'un trou noir en rotation ; l'un des trois nombres caractérisant complètement un trou noir, avec sa masse et sa charge électrique.

Trou noir : Une région de l'espace-temps où la gravité est si intense qu'elle empêche tout signal physique (y compris la lumière) de s'en échapper. Les trous noirs peuvent avoir des masses très différentes. Les trous noirs « stellaires » issus de l'effondrement d'étoiles massives ont des masses comprises entre quelques masses solaires et environ 65 masses solaires. Les trous noirs « intermédiaires » ont des masses comprises entre environ 100 et 10^5 masses solaires. Finalement les trous noirs « supermassifs » ont des masses qui peuvent aller jusqu'à 10^9 masses solaires.