

Dans les pages qui suivent, vous trouverez une traduction d'un extrait du livre blanc *Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap* réalisé à l'occasion de l'Action COST 16104. Cette traduction est publiée à l'initiative de M. François Bondu<sup>1</sup>, et est principalement destinée aux étudiants en astrophysique ne maîtrisant par forcément la langue anglaise.

François Morillon  
Paris, le 6 décembre 2019

### **À propos du texte :**

---

CARDOSO Vitor *et al.* Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap [online], v4. *Classical and Quantum Gravity*, 2019, vol. 36, n° 14. Available from: <https://iopscience.iop.org/issue/0264-9381/36/14> or from: <https://arxiv.org/abs/1806.05195> (pp. 12–19)

---

- Caractéristiques du texte-support : 3 349 mots / 20 686 signes espaces compris.
- Caractéristiques de la traduction : 3 985 mots / 24 912 signes espaces compris.

Ces caractéristiques ne comprennent pas l'annexe à la traduction ni les références situées à la fin de la traduction.

Ce texte est soumis à des droits d'auteurs. La traduction a été publiée avec l'accord des auteurs et de *Classical and Quantum Gravity*. Toute réutilisation du contenu des pages suivantes est donc soumise à des droits d'auteur et doit faire l'objet d'une demande auprès traducteur/des auteurs et du service Copyright Clearance Center de IOP Publishing.

L'extrait qui suit a été rédigé par Edward K. Porter, Martin Hendry et Ik Siong Heng (première partie du texte), ainsi que par Monica Colpi et Marta Volonteri (seconde partie). Il s'agit du début d'un livre blanc écrit par des membres de COST (*European Cooperation in Science and Technology*). Cette organisation de financement a pour but de créer des réseaux de recherche et d'innovation en Europe<sup>2</sup>. Le texte a été rédigé à l'occasion de l'Action COST 16104<sup>3</sup>, qui met en réseau les communautés scientifiques autour d'une thématique : les ondes gravitationnelles, les trous noirs et la physique fondamentale dans le cas présent. Les Actions COST s'inscrivent dans le cadre de programmes de recherche européens comme Horizon 2020 et reçoivent à ce titre des aides financières de l'Union européenne.

Le livre blanc dresse un état des lieux de ce que l'on connaît à ce jour sur les trous noirs et les ondes gravitationnelles. Il aborde notamment les processus de formation et d'évolution de tous les types de trous noirs, la fusion entre ces astres, leur lien avec la matière noire ou encore leur détection grâce aux ondes gravitationnelles et aux rayonnements électromagnétiques.

---

<sup>1</sup> Directeur de recherches CNRS, Laboratoire Institut FOTON, <http://foton.cnrs.fr/v2016/spip.php?article1670>

<sup>2</sup> MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR, DE LA RECHERCHE ET DE L'INNOVATION. Horizon 2020 [en ligne]. Disponible sur : <http://www.horizon2020.gouv.fr/cid72416/qu-est-que-cost.html> (consulté le 10/08/2019)

<sup>3</sup> COST. CA16104 [online]. Available from: <https://www.cost.eu/actions/CA16104> (accessed 10/08/2019)

## **À propos de la traduction :**

Cette traduction a été réalisée dans le cadre de mon mémoire de traduction sur les trous noirs. Elle a été vérifiée par mon spécialiste-référent, M. François Bondu, ainsi que par M<sup>me</sup> Marta Volonteri<sup>4</sup>, une des autrices du texte source. J'espère que ce travail pourra profiter au plus grand nombre !

J'ai placé sur une page le texte en anglais, puis sur la page suivante le texte en français. À la fin de la traduction, vous pouvez retrouver une annexe à la traduction, dans laquelle sont recensés les acronymes et les unités utilisés dans la traduction, ainsi que la liste des références citées dans le texte (numéros entre crochets).

L'extrait choisi comprend les deux premières parties du chapitre 1 (« *The astrophysics of compact object mergers: prospects and challenges* »). Dans la première partie, les auteurs et autrices retracent brièvement l'histoire des premières découvertes d'ondes gravitationnelles par les observatoires LIGO et Virgo, en expliquant les méthodes de détection utilisées, puis présentent les conséquences sur notre connaissance des trous noirs. Dans la seconde partie sont exposées les différentes configurations que peuvent adopter les trous noirs, ainsi que leurs processus de formation et d'évolution.

## **À propos du traducteur : François Morillon**

Je suis étudiant en Master 2 de Traduction éditoriale, économique et technique à l'ESIT (École Supérieure d'Interprètes et de Traducteurs, Paris III – Sorbonne Nouvelle<sup>5</sup>), sur le point d'obtenir mon diplôme. À la fin de mon master, j'ai eu la chance d'effectuer un stage de deux mois au sein du service de traduction du CERN (Organisation européenne pour la recherche nucléaire). Je souhaite ensuite faire carrière dans les institutions internationales ou en traduction technique et scientifique. En parallèle de mes études, j'ai opté pour le statut de micro-entrepreneur pour effectuer des missions de traduction en tant que free-lance, principalement pour Lingua ESIT et Upwork.

Si vous avez des questions ou souhaitez une traduction scientifique (de l'anglais ou de l'espagnol vers le français), n'hésitez pas à me contacter :

- sur LinkedIn : <https://www.linkedin.com/in/françois-morillon/>
- par mail : [morillon.francois@protonmail.com](mailto:morillon.francois@protonmail.com)

---

<sup>4</sup> Directrice de recherches CNRS, Institut d'Astrophysique de Paris, <http://www2.iap.fr/users/volonteri/>

<sup>5</sup> <http://www.univ-paris3.fr/bienvenue-sur-le-site-de-l-esit-63854.kjsp>

# Black holes, gravitational waves and fundamental physics: a roadmap

## 2. LIGO and Virgo Observations of Binary Black Hole Mergers and a Binary Neutron Star

*Contributors:* E. Porter, M. Hendry, I. S. Heng

On September 15th 2014 the discovery of GWs from the merger of two BHs during the *first* advanced era detector run, commonly called O1, by the two LIGO observatories heralded the dawn of GW astronomy [1]. This event was quickly followed up by two other BBH mergers: one of lower significance on October 12th, 2015, and another on December 26th, 2015 [2, 3]; see Table 1 for the source properties of the published GW mergers. These detections, as exemplified by this white paper, have had a major impact on the fields of astrophysics and fundamental physics [3-8].

The detection of GWs from only BBH mergers from all O1 detections has had significant ramifications on our understanding of astrophysical populations [3, 6, 9, 10]. The detected BHs were more massive than any BHs that had been previously detected in low mass X-ray binaries, requiring a re-evaluation of the models of stellar evolution in binary systems [5]. From just these three events, the LIGO Scientific and Virgo collaborations (LVC) constrained the rate of BBH mergers to between  $9-240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  [3] (see [11] for an updated BBH merger rate of  $12-213 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ ). The non-detection of BNSs and NS-BH binaries allowed constraints of  $< 12, 600 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  and  $< 3, 600 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  respectively [6]. At the time of this science run, the LVC had over 60 MOUs signed with external telescopes, satellites and neutrino detectors. No EM counterparts were found relating to the BBH mergers [12-14].

To detect and extract astrophysical information, GW astronomy uses the method of matched filtering [15]. This method is the optimal linear filter for signals buried in noise, and is very much dependent on the phase modelling of a GW template. Within the LVC, the GW templates are constructed using both analytical and numerical relativity [16]. In this case, the phase evolution of the template is a function of a number of frequency dependent coefficients.

# Tour d'horizon : les trous noirs, les ondes gravitationnelles et la physique fondamentale

## 2. Les détections de LIGO-Virgo : de la fusion d'une binaire de trous noirs à celle d'une binaire d'étoiles à neutrons

*Auteurs* : E. Porter, M. Hendry, I. S. Heng

Le 15 septembre 2014, au cours de leur *première* campagne de prise de données (*Observation run 1* ou O1), les deux observatoires Advanced LIGO découvrent des ondes gravitationnelles (OG) provenant de la fusion de deux trous noirs (TN), ouvrant ainsi la voie à l'astronomie gravitationnelle [1]. Peu de temps après sont détectés deux événements similaires : le premier, de faible signification statistique, le 12 octobre 2015, et le second, le 26 décembre 2015 [2, 3] (voir tableau 1 pour consulter les propriétés des sources d'OG intervenant dans les fusions étudiées). Comme l'illustre ce livre blanc, ces détections ont révolutionné l'astrophysique et la physique fondamentale [3-8].

Au cours de O1, la détection d'OG provenant uniquement de fusions de TN binaires entraîne des répercussions considérables sur notre compréhension des populations astrophysiques [3, 6, 9, 10]. Ces TN, de masse supérieure à celle de tous ceux repérés jusqu'alors dans des binaires X de faible masse, imposent une réévaluation des modèles d'évolution stellaire dans les systèmes binaires [5]. À partir de ces trois événements seulement, la collaboration LIGO-Virgo établit des limites inférieure ( $9 \text{ Gpc}^{-3} \text{ an}^{-1}$ ) et supérieure ( $240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ an}^{-1}$ ) au taux de fusion de TN binaires [3] (voir [11] pour ce taux actualisé à  $12\text{-}213 \text{ Gpc}^{-3} \text{ an}^{-1}$ ). Le fait qu'aucune binaire d'étoiles à neutrons ni d'étoile à neutrons-TN ne soit détectée permet de fixer des bornes de  $< 12\,600 \text{ Gpc}^{-3} \text{ an}^{-1}$  et de  $< 3\,600 \text{ Gpc}^{-3} \text{ an}^{-1}$  respectivement [6]. Au lancement de O1, la collaboration LIGO-Virgo comptait plus de 60 accords de collaboration signés avec des télescopes, des satellites et des détecteurs de neutrinos. Cependant, aucune contrepartie électromagnétique (EM) aux fusions mentionnées n'est observée [12-14].

L'astronomie gravitationnelle a recours à la méthode du filtrage adapté pour repérer et extraire des informations astrophysiques [15]. Cette méthode constitue le filtre linéaire optimal pour les signaux noyés dans du bruit. Elle dépend en grande partie de la modélisation de la phase du patron d'onde. Dans le cadre de la collaboration LIGO-Virgo, ces patrons sont conçus grâce à la prédiction analytique et à la relativité numérique [16]. L'évolution de la phase du patron d'onde est alors fonction de nombreux coefficients dépendant de la fréquence.

Alternative theories of gravity predict that these coefficients should be individually modified if general relativity (GR) is not the correct theory of gravity. While GR predicts specific values for these coefficients, one can treat each coefficient as a free variable and use Bayesian inference to test for deviations in the values of the parameters from the nominal GR value. All tests conducted by the LVC displayed no deviations from GR [3, 11, 17, 18]

In addition, searches for generic GW transients, or *GW-bursts*, typically do not require a well-known or accurate waveform model and are robust against uncertainties in the GW signature. GW-burst searches are designed to detect transients with durations between  $10^{-3}$  – 10 seconds with minimal assumptions about the expected signal waveform. Such searches are, therefore, sensitive to GW transients from a wide range of progenitors, ranging from known sources such as BBH mergers to poorly-modeled signals such as core-collapse supernovae as well as transients that have yet to be discovered. An overview of GW-burst searches performed by LVC can be found here [19]. Both GW-burst and compact binary coalescences (CBC) searches detected the first GW signal from BBH mergers, GW150914.

In November 2016, the *second* Advance Era Observation run, O2, began. Once again, in January and June 2017, two BBH mergers were observed by the two LIGO detectors [11, 18]. At the end of July 2017, the Advanced Virgo detector joined the global network of detectors. On August 14th, all three detectors observed the merger of a BBH system. In previous detections, using only the two LIGO detectors, the sources were located to 1000s of square degrees in the sky. In this case, due to the addition of Advanced Virgo, this system was localised to within 60 square degrees. While not greatly advancing our understanding of the formation mechanisms of such systems, this detection did have a major effect in the field of fundamental physics. Due to the misalignment of the three detectors, for the first time we were able to test the tensorial nature of GWs. This event allowed the LVC to conclude that the GW signals were tensorial in nature, as is predicted by GR [18].

Selon certaines théories alternatives de la gravitation, chacun de ces coefficients devrait être corrigé si la relativité générale se révélait inexacte. En effet, cette dernière associe une valeur propre à ces coefficients, mais ceux-ci peuvent également être considérés comme des variables libres. On peut alors utiliser l'inférence bayésienne pour tester les éventuels écarts entre les valeurs nominales de la relativité générale et celles des paramètres. En ce qui concerne les tests de LIGO-Virgo, aucune déviation par rapport à la relativité générale n'a été mise en évidence [3, 11, 17, 18].

De plus, la recherche de signaux d'OG transitoires ne requiert pas de patron d'onde précis et présente pourtant un taux d'incertitude faible. Conçue pour détecter les signaux d'OG transitoires d'une durée de 1 milliseconde à 10 secondes, elle formule le moins d'hypothèses possible sur la forme d'onde attendue. Cette méthode est donc sensible aux signaux d'OG transitoires issus de nombreux progéniteurs : ceux que l'on connaît, comme les fusions de TN binaires ou les supernovæ à effondrement de cœur (dont la modélisation est loin d'être parfaite), mais également ceux non découverts à l'heure actuelle (voir [19] pour un aperçu des recherches d'OG transitoires effectuées par LIGO-Virgo). Le premier signal d'OG provenant de la fusion de TN binaires, GW150914, a ainsi été observé conjointement par les détecteurs d'OG transitoires et de signaux émis lors de la coalescence de binaires compactes.

La *deuxième* campagne de prise de données (O2) est lancée en novembre 2016. À nouveau, les deux détecteurs Advanced LIGO observent les signaux de deux fusions de TN binaires, en janvier et juin 2017 [11, 18]. Fin juillet 2017, le détecteur Advanced Virgo rejoint le réseau mondial de détecteurs et, le 14 août, ces trois détecteurs captent quasi simultanément un signal provenant de la fusion de TN binaires. Pour les événements précédents, lorsque seuls les deux détecteurs LIGO étaient utilisés, la zone de localisation des sources dans le ciel s'étendait sur des milliers de degrés carrés. En comparaison, cette première détection conjointe localise le système à moins de 60 degrés carrés grâce au détecteur supplémentaire Advanced Virgo. Si la compréhension des mécanismes de formation de tels systèmes n'en évolue pas beaucoup, cet événement a des répercussions considérables en physique fondamentale : les détecteurs LIGO-Virgo étant implantés dans trois lieux différents, on a pu vérifier et confirmer pour la première fois la nature tensorielle des OG telle que décrite par la théorie de la relativité générale [18].

Burst searches were also used as an independent analysis to complement matched filtering analyses for the detection of GW170104 [11], Burst searches further identified a coherent signal, corresponding to GW170608, with a false-alarm rate of 1 in  $\sim 30$  years [20] and validated the detection of GW170814 with a false-alarm rate  $< 1$  in 5900 years [18]. Note that, given the “unmodelled” nature of burst searches, the estimated event significances from burst searches tend to be lower than matched-filtered searches for the same event, especially for lower-mass compact binary signals.

On August 17th, the first BNS merger was observed by the LIGO and Virgo detectors [21]. This event was very quickly associated with a short gamma-ray burst (sGRB) detected by both the Fermi and Integral satellites [22]. Within 10 hours, the host galaxy had been optically identified. Within 16 days, the source had been identified across all bands of the EM spectrum. This single event heralded the true beginning of multi-messenger astronomy, and raised as many questions as it answered.

While confirming the hypothetical link between BNS mergers and sGRBs, the delay between the gamma and X-ray signals (9 days) suggested that not all sGRBs are the same [23]. This fact generated a number of studies regarding equation of state models, and the possible remnant of such mergers. This one event also allowed the LVC to update the BNS event rate from  $< 12, 600 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  in O1, to  $320\text{-}4740 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  in O2 [21].

Perhaps, the most interesting results from this event concern fundamental physics. The delay between the detection of GWs and gamma-rays was 1.74 seconds. This places a bound on the difference between the speed of light and the speed of GWs of  $3 \times 10^{-15} \leq |\Delta c/c| \leq 7 \times 10^{-16}$  [23]. This single result has implications for certain alternative theories of gravity. For instance, the fact that GWs seem to travel at the same speed as that of strongly constrains the family of alternative theories of gravity that require  $v_+, v_- \neq v_{light}$  (e.g., beyond Horndeski, quartic/quintic Galileon, Gauss-Bonnet, if they are supposed to explain cosmology), as well as theories that predict a massive graviton. Furthermore, by investigating the Shapiro delay, the GW170817 detection also rules out MOND and DM emulator MOND-like theories (e.g., TeVeS), as according to these theories, the GWs would have arrived 1000 days after the gamma-ray detection.

Dans le cas de GW170104, la recherche de transitoires complète indépendamment les analyses du filtrage adapté [11]. De plus, elle contribue à la détection d'un signal cohérent correspondant à GW170608, avec un taux de fausse alarme inférieur à une fois sur environ 30 ans [20]. Par ailleurs, elle confirme la détection de GW170814 avec un taux de fausse alarme inférieur à une fois tous les 5 900 ans [18]. Il convient de remarquer que, pour un même événement, la signification statistique estimée pour les transitoires observés sans faire appel à la modélisation est généralement plus faible que celle calculée pour des signaux détectés par filtrage adapté. Cela est d'autant plus vrai dans le cas des binaires compactes de faible masse.

Le 17 août 2017, LIGO-Virgo détecte pour la première fois la fusion d'une binaire d'étoiles à neutrons [21]. Peu après, cet événement est associé à un sursaut gamma court, capté par les satellites Fermi et Integral [22]. Dix heures plus tard, la galaxie hôte est identifiée dans le domaine optique et, dans un délai de 16 jours, des émissions EM sont observées dans l'ensemble du spectre. Cet événement marque l'avènement de l'ère de l'astronomie multi-signaux et soulève autant de questions qu'il n'en résout.

Bien qu'il confirme le lien entre la fusion de binaire d'étoiles à neutrons et l'émission de sursauts gamma courts, l'intervalle de temps écoulé entre l'observation des signaux  $\gamma$  et X (9 jours) laisse entendre que les sursauts gamma courts ne sont pas tous identiques [23]. Cela a donné lieu à de nombreuses études relatives aux modèles d'équations d'état et aux possibles restes de telles fusions. Grâce à cet événement, la collaboration LIGO-Virgo a également pu mettre à jour le taux de fusion de binaires d'étoiles à neutrons, de  $< 12\,600\text{ Gpc}^{-3}\text{ an}^{-1}$  (O1) à  $320\text{--}4\,740\text{ Gpc}^{-3}\text{ an}^{-1}$  (O2) [21].

Cependant, la conséquence la plus importante concerne sans doute la physique fondamentale. Les rayons  $\gamma$  sont arrivés 1,74 seconde après l'OG. On peut donc en déduire une différence limite entre la vitesse de la lumière et celle des OG de  $3 \times 10^{-15} \leq |\Delta c/c| \leq 7 \times 10^{-16}$  [23]. Par conséquent, le fait que les OG et la lumière semblent voyager à la même vitesse remet notamment en cause les théories alternatives de la gravitation qui reposent sur  $v_+, v_- \neq v_{light}$  (ex. au-delà de Horndeski, Galiléon quartique/quintique, Gauss-Bonnet, lorsqu'elles sont appliquées à la cosmologie), ainsi que les théories qui s'appuient sur l'existence d'un graviton massif. De plus, la détection de GW170817 infirme la théorie MOND ainsi que toutes les théories alternatives à la matière noire de type MOND (ex. TeVeS). Plus précisément, c'est l'étude de l'effet Shapiro qui réfute ces théories prévoyant que l'OG arriverait 1 000 jours après les rayons  $\gamma$ .



	GW150914	GW151226	LVT151012	GW170104	GW170608	GW170814	GW170817
$m_1 / M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$23^{+18}_{-6}$	$31.2^{+8.4}_{-6.0}$	$12^{+7}_{-2}$	$30.5^{+5.7}_{-3.0}$	(1.36, 1.60)
$m_2 / M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$13^{+4}_{-5}$	$19.4^{+5.3}_{-5.9}$	$7^{+2}_{-2}$	$25.3^{+2.8}_{-4.2}$	(1.16, 1.36)
$\mathcal{M} / M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.88^{+0.33}_{-0.28}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$	$21.1^{+2.4}_{-2.7}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$
$q$	$0.81^{+0.17}_{-0.20}$	$0.52^{+0.40}_{-0.29}$	$0.57^{+0.38}_{-0.37}$	$0.62^{+}_{-}$	$0.6^{+0.3}_{-0.4}$	$0.83^{+}_{-}$	(0.73, 1)
$M_f / M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	$35^{+14}_{-4}$	$48.7^{+5.7}_{-4.6}$	$18.0^{+4.8}_{-0.9}$	$53.2^{+3.2}_{-2.5}$	---
$\chi_{eff}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.29}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.03^{+0.31}_{-0.20}$	$-0.12^{+0.21}_{-0.30}$	$0.07^{+0.23}_{-0.09}$	$0.06^{+0.12}_{-0.12}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$
$a_f$	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$	$0.64^{+0.09}_{-0.20}$	$0.69^{+0.04}_{-0.05}$	$0.70^{+0.07}_{-0.05}$	---
$D_L / \text{Mpc}$	$420^{+150}_{-180}$	$440^{+180}_{-190}$	$1020^{+500}_{-490}$	$880^{+450}_{-390}$	$340^{+140}_{-140}$	$540^{+130}_{-210}$	40
$z$	$0.090^{+0.029}_{-0.036}$	$0.094^{+0.035}_{-0.039}$	$0.201^{+0.086}_{-0.091}$	$0.18^{+0.08}_{-0.07}$	$0.07^{+0.03}_{-0.03}$	$0.11^{+0.03}_{-0.04}$	0.0099

**Table 1.** Source properties of the published BBH and BNS discoveries (June 2018) by the LIGO and Virgo detectors

The detection of GWs by the Advanced LIGO and Advanced Virgo detectors have had a major effect on our understanding of the Universe, sparking the fields of GW and multi-messenger astronomy and cosmology [22, 24]. It is becoming increasingly clear that combining EM and GW information will be the only way to better explain observed phenomena in our Universe. The third Advanced Detector Observation run (O3) will begin in early 2019, and will run for a year [14]. We expect the detected events to be dominated by BBH mergers at a rate of one per week. However, we also expect on the order of ten BSN events during this time, and possibly an NS-BH discovery (and potentially more than one such system). Given the effects of one GW detection on both astrophysics and fundamental physics, we expect O3 to fundamentally change our view of the Universe.

### 3. Black hole genesis and archaeology

*Contributors:* M. Colpi and M. Volonteri

#### 3.1. Black Hole Genesis

Gravity around BHs is so extreme that gravitational energy is converted into EM and kinetic energy with high efficiency, when gas and/or stars skim the event horizon of astrophysical BHs. Black holes of stellar origin (sBHs) with masses close to those of known stars power galactic X-ray sources in binaries, while supermassive black holes (SMBHs) with masses up to billions of solar masses power luminous quasars and active nuclei at the centre of galaxies. BHs are key sources in EM in our cosmic landscape.

	GW150914	GW151226	LVT151012	GW170104	GW170608	GW170814	GW170817
$m_1 / M_\odot$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$23^{+18}_{-6}$	$31.2^{+8.4}_{-6.0}$	$12^{+7}_{-2}$	$30.5^{+5.7}_{-3.0}$	(1.36, 1.60)
$m_2 / M_\odot$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$13^{+4}_{-5}$	$19.4^{+5.3}_{-5.9}$	$7^{+2}_{-2}$	$25.3^{+2.8}_{-4.2}$	(1.16, 1.36)
$\mathcal{M} / M_\odot$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.88^{+0.33}_{-0.28}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$	$21.1^{+2.4}_{-2.7}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$24.1^{+1.4}_{-1.1}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$
$q$	$0.81^{+0.17}_{-0.20}$	$0.52^{+0.40}_{-0.29}$	$0.57^{+0.38}_{-0.37}$	$0.62^{+}_{-}$	$0.6^{+0.3}_{-0.4}$	$0.83^{+}_{-}$	(0.73, 1)
$M_f / M_\odot$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	$35^{+14}_{-4}$	$48.7^{+5.7}_{-4.6}$	$18.0^{+4.8}_{-0.9}$	$53.2^{+3.2}_{-2.5}$	---
$\chi_{eff}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.29}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.03^{+0.31}_{-0.20}$	$-0.12^{+0.21}_{-0.30}$	$0.07^{+0.23}_{-0.09}$	$0.06^{+0.12}_{-0.12}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$
$a_f$	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$	$0.64^{+0.09}_{-0.20}$	$0.69^{+0.04}_{-0.05}$	$0.70^{+0.07}_{-0.05}$	---
$D_L / \text{Mpc}$	$420^{+150}_{-180}$	$440^{+180}_{-190}$	$1020^{+500}_{-490}$	$880^{+450}_{-390}$	$340^{+140}_{-140}$	$540^{+130}_{-210}$	40
$z$	$0.090^{+0.029}_{-0.036}$	$0.094^{+0.035}_{-0.039}$	$0.201^{+0.086}_{-0.091}$	$0.18^{+0.08}_{-0.07}$	$0.07^{+0.03}_{-0.03}$	$0.11^{+0.03}_{-0.04}$	0.0099

**Tableau 1.** Propriétés des sources de binaires de TN et d'étoiles à neutrons découvertes par les détecteurs LIGO-Virgo (à juin 2018).

L'observation des signaux d'OG par les détecteurs d'Advanced LIGO et Virgo a eu des retombées considérables sur notre compréhension de l'Univers, révolutionnant la cosmologie et donnant jour à l'astronomie gravitationnelle et multi-signaux [22, 24]. Une chose est claire : ce n'est qu'en croisant les informations transportées par les OG et les rayons EM que l'on parviendra à expliquer les phénomènes cosmiques. La troisième campagne de prises de données (O3) sera lancée début 2019, pour une durée d'un an [14]. Les événements observés devraient principalement être des fusions de TN binaires, estimées à une par semaine. On devrait également pouvoir détecter une dizaine de fusions de binaires d'étoiles à neutrons et peut-être même des signaux provenant d'une fusion de binaire d'étoile à neutrons-TN (voire plus). Étant donné les répercussions d'une seule détection d'OG sur l'astrophysique et de la physique fondamentale, O3 devrait transformer radicalement notre compréhension de l'Univers.

### 3. Trous noirs : origines et archéologie galactique

*Auteurs :* M. Colpi et M. Volonteri

#### 3.1. Les origines des trous noirs

Dans l'environnement immédiat des TN, la gravitation est telle que l'énergie gravitationnelle est convertie en énergie électromagnétique et cinétique avec un rendement élevé au moment où les gaz et les étoiles frôlent l'horizon des événements. Les trous noirs stellaires (TNS), dont la masse est comparable à celle des étoiles, constituent la source d'énergie des binaires X. Les trous noirs supermassifs (TNSM), quant à eux, présentent une masse pouvant atteindre des milliards de masses solaires ( $M_\odot$ ) et alimentent en énergie les quasars et les noyaux actifs des galaxies (NAG). Les TN sont une des sources principales de rayonnements EM de notre paysage cosmique.

According to General Relativity (GR), Kerr BHs, described by their mass  $M_{BH}$  and spin vector  $S = \chi_{spin} G M_{BH} / c$  (with  $-1 \leq \chi_{spin} \leq 1$ ) are the unique endstate of unhalted gravitational collapse. Thus understanding astrophysical BHs implies understanding the conditions under which gravitational equilibria lose their stability irreversibly. The chief and only example we know is the case of NSs which can exist up to a maximum mass  $M_{max}^{NS}$  around  $2.2 M_{\odot} - 2.6 M_{\odot}$ . No baryonic microphysical state emerges in nuclear matter, described by the standard model, capable to reverse the collapse to a BH state, during the contraction of the iron core of a supernova progenitor. The existence of  $M_{max}^{NS}$  is due to the non linearity of gravity which is sourced not only by the mass “charge” but also by pressure/energy density, according to the Oppenheimer-Volkoff equation. Thus, sBHs carry a mass exceeding  $M_{max}^{NS}$ . Discovering sBHs lighter than this value (not known yet to high precision) would provide direct evidence of the existence of PBHs arising from phase transitions in the early universe.

As of today, we know formation scenarios in the mass range between  $5 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$ , resulting from the core-collapse of very massive stars. The high masses of the sBHs revealed by the LVC, up to  $36 M_{\odot}$ , hint formation sites of low-metallicity,  $Z^6$ , below 0.5% of the solar value  $Z_{\odot} = 0.02$  [25-27]. Theory extends this range up to about  $40 M_{\odot} - 60 M_{\odot}$  [28] and predicts the existence of a gap, between about  $60 \lesssim M_{BH} / M_{\odot} \lesssim 150$ , since in this window pair instabilities during oxygen burning lead either to substantial mass losses or (in higher mass stellar progenitors) the complete disruption of the star [29- 31]. sBHs heavier than  $150 M_{\odot}$  can form at  $Z < 1\% Z_{\odot}$ , if the initial mass function of stars extends further out, up to hundreds of solar masses.

The majestic discovery of BBHs, detected by LVC interferometers [1, 2, 5, 11, 18, 20], at the time of their coalescence further indicates, from an astrophysical standpoint, that in nature sBHs have the capability of pairing to form binary systems, contracted to such an extent that GW emission drives their slow inspiral and final merger, on observable cosmic timescales. As GWs carry exquisite information on the individual masses and spins of the BHs, and on the luminosity distance of the source, detecting a population of coalescing sBHs with LVC in their advanced configurations, and with the next-generation of ground-based detectors [32, 33], will let us reconstruct the mass spectrum and evolution of sBHs out to very large redshifts.

---

<sup>6</sup> In astrophysics “metallicity” refers to the global content of heavy elements above those produced by primordial nucleosynthesis

Si l'on en croit la relativité générale, les TN de Kerr, caractérisés par leur masse  $M_{TN}$  et leur vecteur spin  $S = \chi_{spin} GM_{TN}/c$  (où  $-1 \leq \chi_{spin} \leq 1$ ), sont le seul résultat possible de l'effondrement gravitationnel total. Pour comprendre les TN astrophysiques, il faut donc appréhender les conditions dans lesquelles l'équilibre gravitationnel est définitivement rompu. Le seul exemple d'effondrement que nous connaissons bien est celui de l'étoile à neutrons (*neutron star* – NS) : celle-ci peut exister jusqu'à une masse maximale  $M_{max}^{NS}$  d'environ  $2,2 M_{\odot} - 2,6 M_{\odot}$ . D'après le Modèle standard, aucun état microphysique baryonique de la matière nucléaire ne permet d'inverser le processus d'effondrement en TN du noyau de fer d'un progéniteur de supernova. L'existence de cette  $M_{max}^{NS}$  découle de la non-linéarité de la gravitation, due non seulement à la « charge » de masse, mais aussi à la densité de pression ou d'énergie, selon l'équation d'Oppenheimer-Volkoff. Les TNS ont donc une masse supérieure à  $M_{max}^{NS}$ . La découverte de TNS d'une masse inférieure à cette valeur (encore peu précise) prouverait directement l'existence de TN primordiaux issus de transitions de phase dans les premiers instants de l'Univers.

À ce jour, nous expliquons la naissance des TN d'une masse de  $5 M_{\odot} - 40 M_{\odot}$  par l'effondrement gravitationnel du noyau d'étoiles massives. Les masses considérables des TNS calculées par LIGO-Virgo, s'élevant jusqu'à  $36 M_{\odot}$ , indiquent que ces TNS proviennent de sites de formation de faible métallicité ( $Z$ )<sup>7</sup> de moins de 0,5 % par rapport à la métallicité du Soleil,  $Z_{\odot} = 0.02$  [25-27]. Cette gamme de masse peut théoriquement être étendue à environ  $40 - 60 M_{\odot}$  [28]. De plus, il existerait une fenêtre d'instabilité de paires, à environ  $60 \lesssim M_{TN}/M_{\odot} \lesssim 150$ , dans laquelle la combustion de l'oxygène conduirait soit à des pertes de masse considérables, soit à la rupture complète de l'étoile (dans le cas de progéniteurs stellaires de masse plus importante) [29-31]. Des TNS d'une masse supérieure à  $150 M_{\odot}$  peuvent se former à  $Z < 1\% Z_{\odot}$  si la fonction de masse initiale des étoiles s'étend au-delà, à des centaines de masses solaires.

La découverte fondamentale de TN binaires au moment de leur coalescence par les interféromètres de LIGO-Virgo [1, 2, 5, 11, 18, 20] indique que, d'un point de vue astrophysique, les TNS peuvent par nature s'associer pour former un système binaire. Ce dernier est tellement contracté que la perte d'énergie par émission d'OG accompagne la lente phase spiralante jusqu'à la fusion finale, évolution observable à l'échelle de temps cosmique. Les OG transportent des informations précieuses telles que la masse et le spin des deux TN, ainsi que la distance de luminosité de la source. L'observation de nombreux signaux provenant de la coalescence de TNS en phase avancée, grâce à LIGO-Virgo et à la nouvelle génération de détecteurs terrestres [32, 33], permettra de reconstituer la gamme de masse de ces TNS et de comprendre leur évolution jusqu'à des décalages vers le rouge (ou *redshift*) très élevés.

---

<sup>7</sup> En astrophysique, la « métallicité » d'une étoile est la fraction de tous les éléments lourds sur les éléments produits par la nucléosynthèse primordiale (hydrogène et hélium).

Observations teach us that astrophysical BHs interact with their environment, and that there are two ways to increase the mass: either through accretion, or through a merger, or both. These are the two fundamental processes that drive BH mass and spin evolution. Accreting gas or stars onto BHs carry angular momentum, either positive or negative, depending on the orientation of the disk angular momentum relative to the BH spin. As a consequence the spin changes in magnitude and direction [34-36]. In a merger, the spin of the new BH is the sum of the individual and orbital angular momenta of the two BHs, prior to merging [37, 38]. An outstanding and unanswered question is can sequences of multiple accretion-coalescence events let sBHs grow, in some (rare) cases, up to the realm of SMBHs? If this were true, the “only” collapse to a BH occurring in nature would be driven by the concept of instability of NSs at  $M_{max}^{NS}$ .

SMBHs are observed as luminous quasars and active galactic nuclei, fed by accretion of gas [39], or as massive dark objects at the centre of quiescent galaxies which perturb the stellar and/or gas dynamics in the nuclear regions [40]. The SMBH mass spectrum currently observed extends from about  $5 \times 10^4 M_{\odot}$  (the SMBH in the galaxy RGG118 [41]) up to about  $1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$  (SDSS J0100+2802 [42]), as illustrated in Figure 1. The bulk of active and quiescent SMBHs are nested at the centre of their host galaxies, where the potential well is the deepest. The correlation between the SMBH mass  $M_{\bullet}$  and the stellar velocity dispersion  $\sigma$  in nearby spheroids, and even in disk/dwarf galaxies [43] hints towards a concordant evolution which establishes in the centre-most region controlled by powerful AGN outflows. Extrapolated to lower mass disk or dwarf galaxies, this correlation predicts BH masses of  $M_{\bullet} \sim 10^3 M_{\odot}$  at  $\sigma$  as low as  $10 \text{ km s}^{-1}$ , typical of nuclear star clusters (globular clusters) [44]. We remark that only BHs of mass in excess of  $10^3 M_{\odot}$  can grow a stellar cusp. The lighter BHs would random walk, and thus would have a gravitational sphere of influence smaller than the mean stellar separation and of the random walk mean pathlength.

Observations suggest that SMBHs have grown in mass through repeated episodes of gas accretion and (to a minor extent) through mergers with other BHs. This complex process initiates with the formation of a *seed* BH of yet unknown origin [45].

Grâce aux précédentes observations, nous savons que les TN interagissent avec leur environnement et que l'augmentation de leur masse s'explique de deux manières uniquement : par accrétion et/ou fusion. Ces deux processus fondamentaux déterminent l'évolution de la masse et du spin des TN. Le gaz et les étoiles accrétés par ces derniers présentent un moment cinétique propre, positif ou négatif, en fonction de l'orientation du moment cinétique du disque d'accrétion par rapport au spin du TN. La matière accrétée modifie donc la vitesse et le sens de rotation du spin [34-36]. Dans le cas d'une fusion, le moment cinétique du TN formé est la somme vectorielle du moment cinétique intrinsèque de chacun des trous noirs avant la fusion et de leur moment cinétique orbital [37, 38]. Toutefois, une question de taille demeure encore sans réponse : après avoir fusionné avec de nombreux autres TNS et accrété une quantité considérable de matière, les TNS peuvent-ils, dans des cas extrêmes, atteindre le domaine des TNSM ? Dans ce cas, le « seul » effondrement en TN qui pourrait avoir lieu serait dû au concept d'instabilité des étoiles à neutrons au-delà de  $M_{max}^{NS}$ .

Les TNSM se retrouvent dans deux configurations : d'une part, dans les quasars et les NAG, se nourrissant de gaz par accrétion [39] ; d'autre part, sous forme d'objets sombres de taille considérable, siégeant au centre de galaxies inactives et perturbant la dynamique des étoiles et des gaz qui s'y trouvent [40]. La gamme de masse des TNSM tels qu'on les connaît actuellement s'étend d'environ  $5 \times 10^4 M_{\odot}$  (TNSM de la galaxie RGG118 [41]) jusqu'à environ  $1,2 \times 10^{10} M_{\odot}$  (SDSS J0100+2802 [42]), comme le montre la figure 1. La plupart des TNSM, qu'ils soient actifs ou inactifs, se trouvent au centre de leur galaxie hôte, là où le puits de potentiel gravitationnel est le plus fort. La corrélation entre la masse des TNSM ( $M_{\bullet}$ ) et la dispersion des vitesses des étoiles ( $\sigma$ ) dans les sphéroïdes proches ainsi que dans les galaxies naines et à disque [43] semble indiquer une coévolution de la région centrale, régulée par des jets de matière puissants provenant du NAG. Dans le cas des galaxies naines ou à disque de faible masse, cette corrélation prévoit des TN d'une masse  $M_{\bullet} \sim 10^3 M_{\odot}$  avec une faible dispersion des vitesses des étoiles  $\sigma$  de  $10 \text{ km s}^{-1}$ , caractéristique des amas nucléaires d'étoiles (amas globulaires) [44]. On remarque que seuls les TN dont la masse est supérieure à  $10^3 M_{\odot}$  peuvent présenter une cuspide stellaire. Les TN légers auraient une marche aléatoire et donc une sphère d'influence gravitationnelle plus petite que la moyenne de la séparation entre les étoiles et que la longueur de parcours moyen de la marche aléatoire.

D'après les observations effectuées, l'augmentation de la masse des TNSM serait due aux multiples épisodes d'accrétion de gaz et, dans une moindre mesure, à des fusions avec d'autres TN. Ce processus complexe démarre par la formation d'une *graine* de TN, dont l'origine est encore inconnue [45].

The concept of seed has emerged to explain the appearance of a large number of SMBHs of billion suns at  $z \sim 6$ , shining when the universe was only 1 Gyr old [46]. Furthermore, the comparison between the local SMBH mass density, as inferred from the  $M_{\bullet} - \sigma$  relation, with limits imposed by the cosmic X-ray background light, resulting from unresolved AGN powered by SMBHs in the mass interval between  $10^{8-9} M_{\odot}$ , indicates that radiatively efficient accretion played a large part in the building of SMBHs below  $z \sim 3$ , and that information is lost upon their initial mass spectrum [47]. Thus, SMBHs are believed to emerge from a population of seeds of yet unconstrained initial mass, in a mass range *intermediate* between those of sBHs and SMBHs, about  $10^2 M_{\odot}$  to  $10^5 M_{\odot}$ , and therefore they are sometimes dubbed Intermediate-mass BHs (IMBHs).

Seeds are IMBHs that form “early” in cosmic history (at redshift  $z \sim 20$ , when the universe was only 180 Myr old). They form in extreme environments, and grow over cosmic time by accretion and mergers. Different formation channels have been proposed for the seeds [45, 48, 49]. *Light seeds* refer to IMBHs of about  $100 M_{\odot}$  that form from the relativistic collapse of massive Pop III stars, but the concept extends to higher masses, up to  $\sim 10^3 M_{\odot}$ . These seeds likely arise from runaway collisions of massive stars in dense star clusters of low metallicity [50, 51], or from mergers of sBHs in star clusters subjected to gas-driven evolution [52]. The progenitors of light seeds are massive stars. However, they could be also the end result of repeated mergers among BHs [53]. Finding merging sBHs with the LVC detectors with masses in the pair instability gap would be a clear hint of a second generation of mergers resulting from close dynamical interactions.



Le concept de graine a été créé en réponse à l'apparition de nombreux TNSM de milliards de masses solaires à  $z \sim 6$ , dans des quasars qui illuminaient déjà notre Univers, alors âgé de 1 milliard d'années seulement [46]. De plus, la comparaison entre la masse volumique des TNSM de l'Univers local (selon la relation  $M_{\bullet} - \sigma$ ) et les limites imposées par le fond cosmologique de rayons X, provenant de NAG non résolus alimentés en énergie par des TNSM d'une masse de  $10^{8-9} M_{\odot}$ , indique que l'efficacité de l'accrétion sous forme de rayonnements joue un rôle important dans la naissance de TNSM de métallicité inférieure à  $z \sim 3$  et que des informations relatives au spectre de masse initial sont perdues [47]. On suppose donc que les TNSM sont issus d'une population de graines dont la masse initiale (sans limites définies pour le moment) se trouve dans une gamme *intermédiaire*, entre la masse des TNS et des TNSM, allant d'environ  $10^2 M_{\odot}$  à  $10^5 M_{\odot}$ . On les nomme donc parfois trous noirs de masse intermédiaire (TNMI).

Les graines sont des TNMI formés dans l'Univers primordial (décalage vers le rouge :  $z \sim 20$ , âge de l'Univers : 180 millions d'années). Elles proviennent d'environnements extrêmes et se développent par accrétion et fusion au fil du temps cosmique. Plusieurs scénarios de formation des graines de TN ont été formulés [45, 48, 49]. Les *graines légères* désignent des TNMI d'environ  $100 M_{\odot}$  issus de l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives de population III. Cependant, ce terme recouvre également des masses atteignant  $\sim 10^3 M_{\odot}$ . Ces graines se formeraient suite à des collisions d'étoiles massives en fuite au sein d'amas stellaires denses et de faible métallicité [50, 51], ou suite à des fusions de TNS dans des amas stellaires dont l'évolution est régulée par des gaz [52]. Les progéniteurs des graines légères sont des étoiles massives. Cependant, elles pourraient également être le résultat de nombreuses fusions de TN [53]. Si LIGO-Virgo parvenait à détecter la fusion de TNS dont les masses se trouvent dans la fenêtre d'instabilité de paires, cela constituerait la preuve de l'existence d'une seconde génération de fusions découlant d'interactions dynamiques proches.

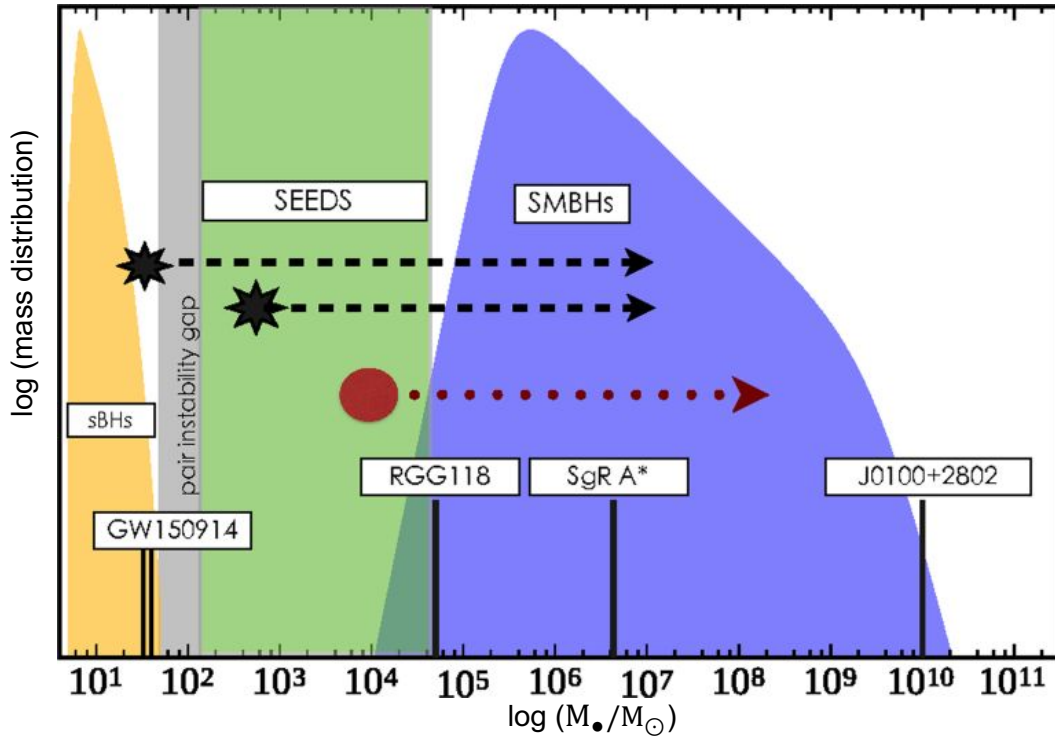


Accretion on sBHs occurs in X-ray binaries, and there is no evidence of accretion from the interstellar medium onto isolated sBHs in the Milky Way. But, in gas-rich, dense environments characteristic of galaxy halos at high redshifts, single sBHs might accrete to grow sizably, despite their initial small gravitational sphere of influence, if specific dynamical conditions are met. For instance, in rare cases they may be captured in dense gas clouds within the galaxy [55]. Another possibility is that a sBH forms at the very center of the galaxy, where large inflows may temporarily deepen the potential well and allow it to grow significantly. This “winning sBH” must be significantly more massive than all other sBHs in the vicinity to avoid being ejected by scatterings and to be retained at the center of the potential well by dynamical friction. Similar conditions can also be present in nuclear star clusters characterized by high escape velocities. After ejection of the bulk of the sBHs, the only (few) remaining isolated BH can grow by tidally disrupting stars and by gas accretion [57] sparking their growth to become an IMBH.

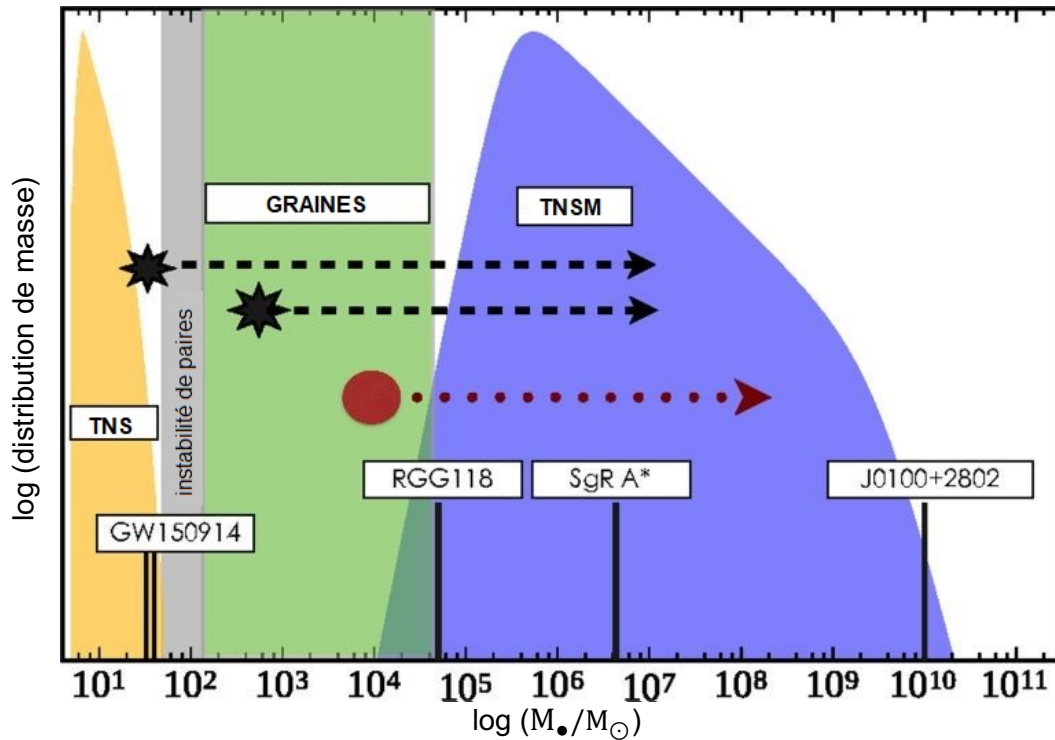
*Heavy seeds* refer instead to IMBHs of about  $10^{4-5} M_{\odot}$  resulting from the monolithic collapse of massive gas clouds, forming in metal-free halos with virial temperatures  $T_{vir} \gtrsim 10^4$  K, which happen to be exposed to an intense  $H_2$  photodissociating ultraviolet flux [49, 56, 58-60]. These gas clouds do not fragment and condense in a single massive proto-star which is constantly fueled by an influx of gas that lets the proto-star grow large and massive. Then, the star contracts sizably and may form a quasi-star [61], or it may encounter the GR instability that leads the whole star to collapse directly into a BH. Heavy seeds might also form in major gas-rich galaxy mergers over a wider range of redshifts, as mergers trigger massive nuclear inflows [62], Figure 1 is a cartoon summarising the current knowledge of BHs in our Universe, and the link that may exist between sBHs and SMBHs, which is established by seed BHs along the course of cosmic evolution.

Le phénomène d'accrétion s'opère également dans les binaires X de TNS. Dans la Voie lactée, rien n'indique que des TNS isolés accrètent de la matière interstellaire. Cependant, dans les milieux denses et riches en gaz caractéristiques des halos galactiques à des décalages vers le rouge élevés, les TNS isolés pourraient accréter suffisamment de matière pour grandir considérablement malgré leur faible champ gravitationnel initial si les conditions dynamiques nécessaires sont réunies. Dans de rares cas, ils peuvent se retrouver enfermés dans des nuages de gaz denses au sein de la galaxie [55]. Les TNS pourraient également se former au centre de la galaxie : une grande quantité de matière y tomberait, renforçant le puits gravitationnel et permettant au TN de grandir en conséquence. Ce TN doit alors présenter une masse bien supérieure à ceux qui se trouvent dans son entourage pour ne pas être éjecté par diffusion et pour pouvoir rester au centre du puits gravitationnel grâce à la friction dynamique. Certains amas nucléaires d'étoiles caractérisés par des vitesses de libération importantes présentent les mêmes conditions. Après éjection du TNS en leur centre, les quelques (rares) TN isolés qui restent peuvent grandir en déchiquetant les étoiles par forces de marée et par accrétion de gaz [57]. Ils deviennent alors des TNMI.

Les *graines massives*, elles, correspondent aux TNMI d'environ  $10^{4-5} M_{\odot}$  provenant de l'effondrement monolithique de nuages de gaz géants. Ils se forment au sein de halos de métallicité nulle et de température du viriel  $T_{vir} \geq 10^4$  K, exposés à un puissant rayonnement ultraviolet capable de dissocier l'hydrogène moléculaire [49, 56, 58-60]. Ces nuages ne se fragmentent pas. Au contraire, ils se condensent en une seule et unique protoétoile massive dont la taille et la masse augmentent par absorption de gaz. Ensuite, l'étoile se contracte considérablement et peut soit former une quasi-étoile [61], soit dépasser la limite d'instabilité définie par la relativité générale et s'effondrer directement en TN. Des graines massives pourraient également se former lors de fusions de galaxies riches en gaz à des décalages vers le rouge très variés, car ces fusions entraînent des flux de gaz importants vers le noyau [62]. La figure 1 est un graphique représentant notre savoir actuel des TN de l'Univers, ainsi que le lien possible entre les TNS et les TNSM, établi grâce à l'évolution des graines de TN au cours du temps cosmique.



**Figure 1.** Cartoon illustrating the BH mass spectrum encompassing the whole astrophysical relevant range, from sBHs to SMBHs, through the unexplored (light-green) zone where BH seeds are expected to form and grow. Vertical black-lines denote the two sBH masses in GW150914, the mass  $M_{\bullet}$  of RGG118 (the lightest SMBH known as of today in the dwarf galaxy RG118), of SgrA\* in the Milky Way, and of J0100+2802 (the heaviest SMBH ever recorded). The mass distribution of sBHs, drawn from the observations of the Galactic sBH candidates, has been extended to account for the high-mass tail foil owing the discovery of GW150914. The minimum (maximum) sBHs is set equal to  $3 M_{\odot}$  ( $60 M_{\odot}$ ), and the theoretically predicted pair-instability gap is depicted as a narrow darker-grey strip. The SMBH distribution has been drawn scaling their mass according to the local galaxy mass function and  $M_{\bullet} - \sigma$  correlation. The decline below  $\sim 10^5 M_{\odot}$  is set arbitrarily: BH of  $\sim 10^{4-5} M_{\odot}$  may not be ubiquitous in low-mass galaxies as often a nuclear star cluster is in place in these galaxies, which may or may not host a central IMBH [54]. The black stars and dashed tracks illustrate the possibility that a SMBH at high redshift forms as sBH-only (born on the left side of the sBH gap) or as light seed (on the right of the gap) which then grows through phases of super-Eddington accretion [55]. The red circle and dotted track illustrates the possibility of a *genetic* divide between sBHs and SMBHs, and that a heavy seed forms through the direct collapse of a supermassive protostar in a metal free, atomic-hydrogen cooling, DM halo [48, 56]. The seed later grows via gas accretion and mergers with SMBHs in other black halos.



**Figure 1.** Ce graphique représente la gamme de masse considérée, s'étendant des trous noirs stellaires (TNS) aux trous noirs supermassifs (TNSM), en passant par la gamme de masse inexplorée (en vert clair) dans laquelle on suppose que les graines de TN se forment et se développent. Les lignes verticales noires marquent la masse des deux TNS de GW150914, la masse  $M_{\bullet}$  de RGG118 (TNSM le plus léger à ce jour, situé dans la galaxie naine RG118), de SgrA\* (au centre de la Voie lactée) et de J0100+2802 (plus gros TNSM). La distribution de masse des TNS, établie à partir des candidats repérés dans la Galaxie, a été étendue pour prendre en compte la queue lourde suite à la détection de GW150914. Pour les TNS, la masse minimale définie est de  $3 M_{\odot}$  et la masse maximale, de  $60 M_{\odot}$ . La fenêtre d'instabilité de paires prédite par la théorie est représentée sous forme d'une étroite bande grise. La distribution des TNSM est représentée en mettant à l'échelle leur masse selon la fonction de masse du Groupe local de galaxies et la corrélation  $M_{\bullet} - \sigma$ . La courbe décroissante après  $\sim 10^5 M_{\odot}$  a été déterminée de façon arbitraire : les TN de  $\sim 10^{4-5} M_{\odot}$  ne sont pas si fréquents dans les galaxies de faible masse, car celles-ci renferment souvent des amas nucléaires d'étoiles qui n'abritent pas forcément un TNMI en leur centre [54]. Les étoiles et les traits en pointillés noirs illustrent la possibilité qu'un TNSM à un décalage vers le rouge important se forme à partir d'un TNS (de masse inférieure à la fenêtre d'instabilité de paires) ou à partir d'une graine légère (de masse supérieure à la fenêtre), qui grandit ensuite grâce à des phases d'accrétion dépassant la limite d'Eddington [55]. Le rond et les pointillés rouges illustrent la possibilité d'un fossé dans la *nature* des TNS et des TNSM, mais également que les graines massives sont issues de l'effondrement direct d'une protoétoile supermassive dans un halo de matière noire de métallicité nulle et à refroidissement atomique d'hydrogène [48, 56]. La graine grandit ensuite par accrétion de gaz et par fusion avec des TNSM situés dans d'autres halos de matière noire.

The seeds of the first SMBHs are still elusive to most instruments that exist today, preventing us to set constraints on their nature. Seed BHs are necessarily a *transient* population of objects and inferring their initial mass function and spin distribution from observations is possible only if they can be detected either through EM or GW observations at very high  $z$ , as high as  $\sim 20$  (even  $z \sim 40$  as discussed recently). Since, according to GR, BHs of any flavour captured in binaries are loud sources of GWs at the time of their merging, unveiling seeds and MBHs through cosmic ages via their GW emission at coalescence would provide unique and invaluable information on the *BH genesis and evolution*. The *Gravitational Wave Universe* is the universe we can sense using GWs as messengers [63, 64]. In this universe, BBHs are key sources carrying invaluable information on their masses, spins and luminosity distance that are encoded in the GW signal. There is one key condition that needs to be fulfilled: that the BHs we aim at detecting pair and form a binary with GW coalescence time smaller than the Hubble time, possibly close to the redshift of their formation. This condition, enabling the detection of seeds at very high redshifts, is extremely challenging to be fulfilled. BHs in binaries form at “large” separation. Thus, nature has to provide additional dissipative processes leading to the contraction of the BBH down to the scale where GWs drive the inspiral. This requires a strong coupling of the two BHs with the environment, before and after forming a binary system. As we now discuss, understanding this coupling is a current challenge in contemporary astrophysics, cosmology and computational physics [65].

Les instruments d'aujourd'hui ne sont pas encore à même d'étudier les graines des premiers TNSM. Pour le moment, il nous est donc impossible de fixer des bornes à leur nature. Il apparaît évident que les graines de TN sont des populations d'astres *transitoires*. Il est possible de calculer leur fonction de masse et leur distribution de moment cinétique à partir des observations uniquement si l'on parvient à capter des signaux EM ou des OG à de très grands décalages vers le rouge à  $z \sim 20$  (voire à  $z \sim 40$  dans les travaux récents). D'après la relativité générale, tous les types de TN faisant partie d'un système binaire émettent une grande quantité d'OG lorsqu'ils fusionnent. L'observation de signaux d'OG provenant de la coalescence de graines ou de TN massifs nous permettrait donc de collecter des données aussi précieuses qu'inédites sur les *origines et l'évolution des trous noirs*. On appelle *Univers gravitationnel* cet Univers que l'on peut étudier grâce aux signaux d'OG [63, 64]. Sources cosmiques d'une importance cruciale, les TN binaires nous fournissent des informations précieuses : leur masse, leur moment cinétique, leur distance de luminosité sont codés dans les OG qu'elles émettent. Pour que l'on puisse les détecter, les TN doivent s'associer et former un système binaire dont le temps de coalescence (et donc d'émission d'OG) est inférieur au temps de Hubble, préférablement à un décalage vers le rouge proche de celui de leur formation. Cette dernière condition, qui permet de détecter des graines de TN à des décalages vers le rouge très élevés, est extrêmement dure à remplir. Les systèmes binaires se forment alors que les TN sont loin l'un de l'autre. Ainsi, la binaire de TN va se contracter grâce aux processus dissipatifs naturels nécessaires, jusqu'à ce que l'émission d'OG accompagne la phase spiralante. Cela nécessite une forte interaction entre les deux TN et leur environnement, avant comme après la formation du système binaire. La compréhension de cette interaction est un des défis actuels de l'astrophysique contemporaine, de la cosmologie et de la physique numérique [65], comme nous allons le voir par la suite.

## Annexe à la traduction

Acronymes et unités	Signification
EM	Électromagnétique
Gpc	Giga parsec
LIGO	<i>Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory</i>
$M_{\odot}$	Masse solaire
MOND	<i>Modified Newton Dynamics</i> (théorie de la dynamique newtonienne modifiée)
NAG	Noyau actif de galaxie
NS	Étoile à neutrons
O1, O2, O3	Campagne de prise de données 1, 2, 3
OG	Ondes gravitationnelles
SgrA*	Sagittarius A*
TeVS	Théorie tenseur-scalaire
TN	Trou noir
TNMI	Trou noir de masse intermédiaire
TNS (proposé)	Trou noir stellaire
TNSM	Trou noir supermassif
Z	Métallicité
z	Décalage vers le rouge

Ces acronymes sont utilisés pour les formes singulières et plurielles.

## Références de la traduction

Les références qui suivent ne sont que celles de l'extrait du texte choisi. Elles n'ont pas été traduites, mais j'ai décidé de les faire figurer tout de même en annexe pour que les lecteurs voulant creuser le sujet puissent suivre les références indiquées dans le texte-support et sa traduction.

[1] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 061102 (2016), arXiv:1602.03837 [gr-qc].

[2] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 241103 (2016), arXiv:1606.04855 [gr-qc].

[3] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev.* **X6**, 041015 (2016), arXiv:1606.04856 [gr-qc].

[4] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* **116**, 241102 (2016), arXiv:1602.03840 [gr-qc].

[5] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Astrophys. J.* **818**, L22 (2016), arXiv:1602.03846 [astro-ph.HE].

[6] Benjamin P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Astrophys. J.* **832**, L21 (2016), arXiv:1607.07456 [astro-ph.HE].

[7] Benjamin P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 121102 (2017), arXiv:1612.02030 [gr-qc].

[8] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, IPN, LIGO Scientific), *Astrophys. J.* **841**, 89 (2017), arXiv:1611.07947 [astro-ph.HE].

[9] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Astrophys. J.* **833**, L1 (2016), arXiv:1602.03842 [astro-ph.HE].

[10] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), *Astrophys. J. Suppl.* **227**, 14 (2016), arXiv:1606.03939 [astro-ph.HE].

[11] Benjamin P. Abbott *et al.* (VIRGO, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 221101 (2017), arXiv:1706.01812 [gr-qc].

[12] B. P. Abbott *et al.* (InterPlanetary Network, DES, INTEGRAL, La Silla-QUEST Survey, MWA, Fermi-LAT, J-GEM, GRAWITA, Pi of the Sky, Fermi GBM, MASTER, Swift, iPTF, VISTA, ASKAP, SkyMapper, PESSTO, TOROS, Pan-STARRS, Virgo, Liverpool Telescope, BOOTES, LIGO Scientific, LOFAR, C2PU, MAXI), *Astrophys. J.* **826**, L13 (2016), arXiv:1602.08492 [astro-ph.HE].

[13] B. P. Abbott *et al.* (InterPlanetary Network, DES, INTEGRAL, La Silla-QUEST Survey, MWA, Fermi-LAT, J-GEM, Zadko, GRAWITA, Pi of the Sky, MASTER, Swift, iPTF, VISTA, ASKAP, SkyMapper, PESSTO, TOROS, Pan-STARRS, Virgo, Algerian National Observatory, Liverpool Telescope, BOOTES, LIGO Scientific, LOFAR, TAROT, C2PU, MAXI, Fermi-GBM), *Astrophys. J. Suppl.* **225**, 8 (2016), arXiv:1604.07864 [astro-ph.HE].



- [14] Benjamin P. Abbott *et al.* (VIRGO, KAGRA, LIGO Scientific), Living Rev. Rel. **21**, 3 (2018), arXiv:1304.0670 [gr-qc].
- [15] B. S. Sathyaprakash and S. V. Dhurandhar, Physical Review D **44**, 3819–3834 (1991).
- [16] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. **D93**, 122003 (2016), arXiv:1602.03839 [gr-qc].
- [17] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. Lett. **116**, 221101 (2016), arXiv:1602.03841 [gr-qc].
- [18] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. Lett. **119**, 141101 (2017), arXiv:1709.09660 [gr-qc].
- [19] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. **D93**, 122004 (2016), [Addendum: Phys. Rev.D94, no.6,069903 (2016)], arXiv:1602.03843 [gr-qc].
- [20] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Astrophys. J. **851**, L35 (2017), arXiv:1711.05578 [astro-ph.HE].
- [21] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, LIGO Scientific), Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017), arXiv:1710.05832 [gr-qc].
- [22] B. P. Abbott *et al.* (GROND, SALT Group, OzGrav, DFN, INTEGRAL, Virgo, Insight-Hxmt, MAXI Team, Fermi-LAT, J-GEM, RATIR, IceCube, CAASTRO, LWA, ePESSTO, GRAWITA, RIMAS, SKA South Africa/MeerKAT, H.E.S.S., 1M2H Team, IKI-GW Follow-up, Fermi GBM, Pi of Sky, DWF (Deeper Wider Faster Program), Dark Energy Survey, MASTER, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, Swift, Pierre Auger, ASKAP, VINROUGE, JAGWAR, Chandra Team at McGill University, TTU-NRAO, GROWTH, AGILE Team, MWA, ATCA, AST3, TOROS, Pan-STARRS, NuSTAR, ATLAS Telescopes, BOOTES, CaltechNRAO, LIGO Scientific, High Time Resolution Universe Survey, Nordic Optical Telescope, Las Cumbres Observatory Group, TZAC Consortium, LOFAR, IPN, DLT40, Texas Tech University, HAWC, ANTARES, KU, Dark Energy Camera GW-EM, CALET, Euro VLBI Team, ALMA), Astrophys. J. **848**, L12 (2017), arXiv:1710.05833 [astro-ph.HE].
- [23] B. P. Abbott *et al.* (Virgo, Fermi-GBM, INTEGRAL, LIGO Scientific), Astrophys. J. **848**, L13 (2017), arXiv:1710.05834 [astro-ph.HE].
- [24] B. P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific, VINROUGE, Las Cumbres Observatory, DES, DLT40, Virgo, 1M2H, Dark Energy Camera GW-E, MASTER), Nature **551**, 85–88 (2017), arXiv:1710.05835 [astro-ph.CO].
- [25] K. Belczynski, M. Dominik, T. Bulik, R. O’Shaughnessy, C. L. Fryer, and D. E. Holz, Astrophys. J. **715**, L138 (2010), arXiv:1004.0386 [astro-ph.HE].
- [26] M. Spera, M. Mapelli, and A. Bressan, MNRAS **451**, 4086–4103 (2015), arXiv:1505.05201 [astro-ph.SR].

- [27] Krzysztof Belczynski, Daniel E. Holz, Tomasz Bulik, and Richard O’Shaughnessy, *Nature* **534**, 512 (2016), arXiv:1602.04531 [astro-ph.HE].
- [28] N. Giacobbo, M. Mapelli, and M. Spera, *MNRAS* **474**, 2959–2974 (2018), arXiv:1711.03556 [astro-ph.SR].
- [29] S. E. Woosley, *Astrophysical Journal* **836**, 244 (2017), arXiv:1608.08939 [astro-ph.HE].
- [30] K. Belczynski *et al.*, *Astron. Astrophys.* **594**, A97 (2016), arXiv:1607.03116 [astro-ph.HE].
- [31] Mario Spera and Michela Mapelli, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **470**, 4739–4749 (2017), arXiv:1706.06109 [astro-ph.SR].
- [32] Benjamin P. Abbott *et al.* (LIGO Scientific), *Class. Quant. Grav.* **34**, 044001 (2017), arXiv:1607.08697 [astro-ph.IM].
- [33] B. Sathyaprakash, M. Abernathy, F. Acernese, P. Ajith, B. Allen, P. Amaro-Seoane, N. Andersson, S. Aoudia, K. Arun, P. Astone *et al.*, *Classical and Quantum Gravity* **29**, 124013 (2012), arXiv:1206.0331 [gr-qc].
- [34] A. R. King, S. H. Lubow, G. I. Ogilvie, and J. E. Pringle, *MNRAS* **363**, 49–56 (2005), astro-ph/0507098.
- [35] A. Perego, M. Dotti, M. Colpi, and M. Volonteri, *MNRAS* **399**, 2249–2263 (2009), arXiv:0907.3742.
- [36] Emanuele Berti and Marta Volonteri, *Astrophys. J.* **684**, 822–828 (2008), arXiv:0802.0025 [astro-ph].
- [37] Enrico Barausse, Viktoriya Morozova, and Luciano Rezzolla, *Astrophys. J.* **758**, 63 (2012), [Erratum: *Astrophys. J.* 786,76(2014)], arXiv:1206.3803 [gr-qc].
- [38] L. Rezzolla, in *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, Vol. 905, edited by F. Haardt, V. Gorini, U. Moschella, A. Treves, and M. Colpi (2016) p. 1.
- [39] A. Merloni, in *Lecture Notes in Physics, Berlin Springer Verlag*, *Lecture Notes in Physics*, Berlin Springer Verlag, Vol. 905, edited by F. Haardt, V. Gorini, U. Moschella, A. Treves, and M. Colpi (2016) p. 101, arXiv:1505.04940 [astro-ph.HE].
- [40] J. Kormendy and L. C. Ho, *ARA&A* **51**, 511–653 (2013), arXiv:1304.7762.
- [41] V. F. Baldassare, A. E. Reines, E. Gallo, and J. E. Greene, *Astrophysical Journal* **809**, L14 (2015), arXiv:1506.07531.
- [42] X.-B. Wu, F. Wang, X. Fan, W. Yi, W. Zuo, F. Bian, L. Jiang, I. D. McGreer, R. Wang, J. Yang, Q. Yang, D. Thompson, and Y. Beletsky, *Nature* **518**, 512–515 (2015), arXiv:1502.07418.

- [43] D. D. Nguyen, A. C. Seth, N. Neumayer, S. Kamann, K. T. Voggel, M. Cappellari, A. Picotti, P. M. Nguyen, T. Böker, V. Debattista, N. Caldwell, R. McDermid, N. Bastian, C. C. Ahn, and R. Pechetti, *ApJ* **858**, 118 (2018), arXiv:1711.04314.
- [44] R. C. E. van den Bosch, *Astrophysical Journal* **831**, 134 (2016), arXiv:1606.01246.
- [45] M. Volonteri, *A&AR* **18**, 279–315 (2010), arXiv:1003.4404.
- [46] L. Jiang, I. D. McGreer, X. Fan, M. A. Strauss, E. Bañados, R. H. Becker, F. Bian, K. Farnsworth, Y. Shen, F. Wang, R. Wang, S. Wang, R. L. White, J. Wu, X.-B. Wu, J. Yang, and Q. Yang, *Astrophysical Journal* **833**, 222 (2016), arXiv:1610.05369.
- [47] A. Marconi, G. Risaliti, R. Gilli, L. K. Hunt, R. Maiolino, and M. Salvati, *MNRAS* **351**, 169–185 (2004), astro-ph/0311619.
- [48] D. R. G. Schleicher, F. Palla, A. Ferrara, D. Galli, and M. Latif, *A&A* **558**, A59 (2013), arXiv:1305.5923.
- [49] Muhammad A. Latif and Andrea Ferrara, *Publ. Astron. Soc. Austral.* **33**, e051 (2016), arXiv:1605.07391 [astro-ph.GA].
- [50] M. Mapelli, *MNRAS* **459**, 3432–3446 (2016), arXiv:1604.03559.
- [51] B. Devecchi, M. Volonteri, E. M. Rossi, M. Colpi, and S. Portegies Zwart, *MNRAS* **421**, 1465–1475 (2012), arXiv:1201.3761.
- [52] A. Lupi, M. Colpi, B. Devecchi, G. Galanti, and M. Volonteri, *MNRAS* **442**, 3616–3626 (2014), arXiv:1406.2325.
- [53] Davide Gerosa and Emanuele Berti, *Phys. Rev.* **D95**, 124046 (2017), arXiv:1703.06223 [gr-qc].
- [54] A. W. Graham and L. R. Spitler, *MNRAS* **397**, 2148–2162 (2009), arXiv:0907.5250.
- [55] A. Lupi, F. Haardt, M. Dotti, D. Fiacconi, L. Mayer, and P. Madau, *MNRAS* **456**, 2993–3003 (2016), arXiv:1512.02651.
- [56] M. A. Latif, D. R. G. Schleicher, W. Schmidt, and J. C. Niemeyer, *MNRAS* **436**, 2989–2996 (2013), arXiv:1309.1097.
- [57] N. C. Stone, A. H. W. Küpper, and J. P. Ostriker, *MNRAS* **467**, 4180–4199 (2017), arXiv:1606.01909.
- [58] M. Dijkstra, A. Ferrara, and A. Mesinger, *MNRAS* **442**, 2036–2047 (2014), arXiv:1405.6743.
- [59] M. Habouzit, M. Volonteri, M. Latif, Y. Dubois, and S. Peirani, *MNRAS* **463**, 529–540 (2016), arXiv:1601.00557.

- [60] J. A. Regan, E. Visbal, J. H. Wise, Z. Haiman, P. H. Johansson, and G. L. Bryan, *Nature Astronomy* **1**, 0075 (2017), arXiv:1703.03805.
- [61] M. C. Begelman, *MNRAS* **402**, 673–681 (2010), arXiv:0910.4398.
- [62] L. Mayer, D. Fiacconi, S. Bonoli, T. Quinn, R. Roškar, S. Shen, and J. Wadsley, *Astrophysical Journal* **810**, 51 (2015), arXiv:1411.5683.
- [63] M. Colpi and A. Sesana, “Gravitational Wave Sources in the Era of Multi-Band Gravitational Wave Astronomy,” in *An Overview of Gravitational Waves: Theory, Sources and Detection*, edited by G. Augar and E. Plagnol (World Scientific Publishing Co, 2017) pp. 43–140.
- [64] Pau Amaro-Seoane *et al.* (LISA), (2017), arXiv:1702.00786 [astro-ph.IM].
- [65] M. Colpi, *Space Sci. Rev.* **183**, 189–221 (2014), arXiv:1407.3102.