

Dez anos de astronomia de ondas gravitacionais

Emanuele Berti

William H. Miller III Department of Physics and Astronomy, Johns Hopkins University, Baltimore

berti@jhu.edu

Há dez anos, a humanidade alcançou a primeira observação direta de ondas gravitacionais. Partilho algumas recordações pessoais dessa primeira deteção. Apresento também um resumo do que aprendemos desde então e algumas especulações sobre o que poderemos vir a aprender no futuro.

Há datas que permanecem na nossa memória, para o bem ou para o mal. Todos os adultos que viram as Torres Gémeas a desmoronarem-se a 11 de setembro de 2001 lembram-se de onde estavam nesse dia. Eu estava numa sala sobrelotada de doutorandos no Departamento de Física em Roma, a trabalhar num problema relacionado com a teoria de perturbações de buracos negros. Tinha visitado os EUA pela primeira vez em novembro do ano anterior. Como muitos turistas, decidi visitar o último andar das Torres Gémeas (“the top of the world”) para admirar a vista. Nesse dia abri as notícias e vi os aviões a embater nas torres, depois a ligação à internet foi abaixo — demasiado tráfego. Pequenos grupos juntaram-se à porta do edifício do departamento de física para ouvir as notícias devastadoras através do rádio.

O dia 14 de setembro de 2015 foi uma data igualmente memorável, mas por uma razão feliz. Enquanto os detetores LIGO operavam em “modo de engenharia” — a fase formal de “observação” só estava prevista para começar três dias depois— a humanidade captou o primeiro sinal de ondas gravitacionais. As ondas emitidas por dois buracos negros que colidiram há cerca de 1,3 mil milhões de anos, numa altura em que a vida na Terra era sobretudo microbiana e a vida multicelular como hoje a conhecemos estava apenas a começar a surgir, produziram um deslocamento nos espelhos do LIGO inferior ao tamanho de um núcleo atómico— mas suficientemente grande para ser detetado [1].

A maioria dos cientistas que não eram membros da Colaboração LIGO-Virgo (eu incluído) souberam da deteção semanas ou meses mais tarde. Tal como no caso das Torres Gémeas, apostaria que a maioria se lembraria de onde estava quando ouviu a notícia pela primeira vez. Nessa altura, já há alguns anos que eu trabalhava com Michal

Dominik, aluno de doutoramento de Chris Belczynski, que me veio visitar ao Mississippi. Estávamos a usar modelos de síntese populacional para prever taxas de fusão de buracos negros binários. Tínhamos chegado à conclusão de que a próxima campanha de observação dos detetores LIGO teria de detetar algumas fusões binárias, a menos que os modelos estivessem errados [2] (ver [3] para uma revisão). Depois começaram os rumores nas redes sociais. Os nossos colegas da LIGO-Virgo começaram a agir de forma muito reservada. O Chris e alguns amigos comuns do LIGO ficaram subitamente muito entusiasmados. Algo se passava, claramente.

O meu filho tinha dois anos na altura e a minha filha nasceu em dezembro de 2015, por isso tive muitas noites sem dormir nesses dias. Mas no dia 20 de janeiro de 2016, não dormi por outro motivo. Nessa data recebi um e-mail da Jessica Thomas com o assunto “Pedido urgente e confidencial dos editores da Physics e da PRL”. Ao início pensei que me iam pedir para rever aquele artigo. Mas o e-mail dizia: “Sou a editora da Physics, uma publicação online com notícias e comentários sobre artigos da PRL e da Physical Review. Estou a escrever-lhe, em confiança, porque o meu colega da PRL, Robert Garisto, alertou-me para um artigo muito entusiasmante relacionado com a busca por ondas gravitacionais que a revista espera receber amanhã. Assumindo que este artigo passe no rigor da revisão por pares, iremos certamente querer destacá-lo na Physics com um comentário Viewpoint. Estaria interessado em escrever esse comentário para nós?” Claro que sim, estava!

No dia seguinte, verifiquei o email freneticamente, mas o “artigo muito entusiasmante” ainda não tinha chegado. Finalmente, encontrei-o na minha caixa de entrada poucos minutos antes da hora de ir buscar o meu filho à creche. Fiquei boquiaberto quando vi o agora famoso gráfico do sinal medido nos detetores de Hanford e Livingston (reproduzido na Figura 2 do Viewpoint [4]), e quase me atrasei para ir buscar o meu filho.

O “artigo muito entusiasmante” foi publicado a 11 de fe-

vereiro de 2016. Nesse dia, o site da PRL foi abaixo — demasiado tráfego. O comité Nobel tomou nota. A forma como observamos o Universo mudou para sempre. Na década que se seguiu, aprendemos imenso sobre a astrofísica de binários compactos e sobre a própria gravidade — tanto a partir de eventos individuais, como da população total de sistemas binários em fusão.

Uma lista parcial de eventos individuais notáveis

Nos últimos dez anos, a rede LIGO-Virgo-KAGRA observou muitos eventos individuais notáveis. Cada um deles contribuiu para aprofundar — ou pôs em causa — a nossa compreensão da astrofísica dos objetos compactos. Esta é uma lista incompleta de alguns desses eventos e do que nos ensinaram.

GW150914 [1] foi a primeira deteção direta de ondas gravitacionais. Também provou que buracos negros astrofísicos com massa de aproximadamente $30 M_{\odot}$ — muito mais massivos do que os buracos negros de massa estelar inferidos por observações eletromagnéticas até então — existem e se fundem.

GW151226 [5], o “Boxing Day event”, é um sinal relativamente longo (~ 55 ciclos). Proporcionou a primeira medição, através de ondas gravitacionais, do spin de um buraco negro (pelo menos um dos componentes tem spin $> 0,2$) e de um desalinhamento de spins diferente de zero. Argumentos cinéticos indicam que o remanescente da fusão recebeu um impulso inicial de $v_{\text{kick}} \geq 50$ km/s [6].

GW170817 [7, 8] foi a primeira observação de uma fusão de estrelas de neutrões binárias. A sua associação com a explosão de raios gama GRB 170817A, detetado pelo Fermi-GBM 1,7 segundos após a coalescência, forneceu a primeira evidência direta de uma ligação entre fusões de estrelas de neutrões binárias e rajadas curtas de raios gama. Sinais transientes associados identificados no ultravioleta, ótico, infravermelho próximo, raios X e rádio confirmaram que o evento foi produzido pela fusão de duas estrelas de neutrões, seguida por uma curta rajada de raios gama e por uma quilonova/macronova alimentada pela decomposição radioativa de núcleos formados por processos r nas ejeções. Estas observações multi-mensageiras também provaram que elementos pesados, como o chumbo e o ouro, são criados nestas colisões.

GW190412 [9] provou que fusões de buracos negros podem envolver massas muito assimétricas (neste caso, $\sim 30 M_{\odot}$ e $\sim 8 M_{\odot}$). Este sistema é difícil de explicar tanto pela evolução isolada como pela formação dinâmica, e veio reforçar a ideia de que algumas fusões de buracos negros podem ocorrer em aglomerados estelares nucleares ou em núcleos galácticos ativos (AGNs).

GW190425 [10] é compatível com os componentes binários serem estrelas de neutrões, embora não se possa excluir, com base nos dados das ondas gravitacionais, a possibilidade de um ou ambos os componentes do sis-

tema serem buracos negros. Se os componentes forem de facto estrelas de neutrões, este evento sugere que os sistemas binários de estrelas de neutrões podem ser sistematicamente mais massivos do que a população conhecida de estrelas de neutrões da nossa galáxia.

GW190521 [11] foi a fusão de buracos negros invulgarmente massivos: a massa do buraco negro primário está dentro da chamada “lacuna de massa superior”, criada por processos de supernovas por instabilidade de pares (PISN/PPISN), onde, teoricamente, buracos negros não se deveriam formar por colapso estelar, e a massa do remanescente é de $\sim 142 M_{\odot}$. Este evento provou que essa lacuna pode ser preenchida e que buracos negros de massa intermédia existem no Universo.

GW190814 [12], com os seus componentes de $(23+2,6) M_{\odot}$ foi o evento com a razão de massas mais desigual alguma vez medida. Contém ou o buraco negro mais leve ou a estrela de neutrões mais massiva já descoberta num sistema binário de objetos compactos. O spin adimensional do buraco negro primário está fortemente limitado a $\leq 0,07$. Modelos astrofísicos preveem que binários com razões de massa semelhantes à de GW190814 podem formar-se por diversos canais, mas é pouco provável que se tenham formado em enxames globulares. A combinação da razão de massas, das massas dos componentes e da taxa de fusão inferida para este evento desafia todos os modelos atuais de formação e distribuição de massas de binários compactos.

GW200105_162426 e GW200115_042309 [13] forneceram evidências de que estrelas de neutrões podem fundir-se com buracos negros, bem como os primeiros estrangimentos na taxa desses eventos.

GW200129 foi apontado como evidência de precessão orbital [14] (embora ver [15] para advertências relacionadas com a qualidade dos dados) e permitiu a primeira identificação de uma velocidade de impulso elevada para o remanescente, $v_{\text{kick}} \geq 698$ km/s com 90 % de credibilidade [16].

GW230529 [17], com massas dos componentes no intervalo $[2,5;4,5] M_{\odot}$ e $[1,2;2,0] M_{\odot}$ com um nível de confiança de 90 %, mostrou que objetos compactos podem ocupar a hipotética “lacuna de massa inferior” que poderá separar as estrelas de neutrões mais massivas dos buracos negros mais leves — ou seja, a massa do primário é $< 5 M_{\odot}$ com 90 % de credibilidade.

Dadas as estimativas atuais da massa máxima de uma estrela de neutrões, a interpretação mais provável desta fonte é uma coalescência entre uma estrela de neutrões e um buraco negro, onde o buraco negro tem uma massa entre a das estrelas de neutrões mais massivas e a dos buracos negros menos massivos observados na Galáxia.

GW231123 [18] apresenta as maiores massas individuais

observadas, $\sim (140+100)M_{\odot}$, e spins muito elevados, com um spin primário inferido de $\chi_1 \sim 0,9$. Algumas propriedades de GW231123 estão sujeitas a grandes incertezas sistemáticas, uma vez que os parâmetros inferidos variam consoante o modelo de onda gravitacional utilizado. O buraco negro primário situa-se dentro ou acima da lacuna de massa superior, entre $60 M_{\odot}$ e $130 M_{\odot}$, onde os buracos negros deveriam ser raros devido ao mecanismo PISN/PPISN, enquanto o secundário abrange essa lacuna. Este evento sugere que, pelo menos, alguns buracos negros se devem formar através de canais além do colapso estelar convencional, e que buracos negros de massa intermédia, com $\sim 200 M_{\odot}$, podem formar-se por fusões hierárquicas [19–21].

GW250114 [22] é um "gémeo" do primeiro evento detetado, mas graças ao impressionante progresso experimental na década que lhe seguiu, é o sinal mais claro observado até agora, com uma relação sinal-ruído de rede de 80 nos dois detectores LIGO. Os dados pós-fusão são consistentes com o modo quadrupolar dominante da radiação e seu primeiro sobretom, o que permite o primeiro teste da natureza de buraco negro de Kerr do remanescente da fusão com base na "espectroscopia de buraco negro" [54–58]. Ao medir a massa e o spin dos progenitores e do remanescente com uma gama de análises que excluem até cinco dos ciclos de fusão mais fortes, este evento também confirmou a lei da área de Bekenstein-Hawking, também conhecida como a "segunda lei" da mecânica dos buracos negros, que afirma que a área total dos horizontes de eventos do buraco negro é proporcional à sua entropia e não pode diminuir com o tempo.

Propriedades da população astrofísica

No final da terceira campanha de observação (O3), temos um catálogo com cerca de 100 deteções de fusões [23]. As taxas de fusão de sistemas estrela de neutrões–estrela de neutrões e estrela de neutrões–buraco negro são estimadas nos intervalos $[10; 1700] \text{ Gpc}^{-3} \text{ ano}^{-1}$ e $[7,8; 140] \text{ Gpc}^{-3} \text{ ano}^{-1}$, respetivamente, enquanto a taxa de fusão de buraco negro–buraco negro, para um desvio para o vermelho (*redshift*) de referência de $z = 0,2$, está no intervalo $[17,9, 44] \text{ Gpc}^{-3} \text{ ano}^{-1}$ [24].

A forma do espectro de massas apresenta várias características interessantes, incluindo, possivelmente, um pico em torno de $10 M_{\odot}$ e outro por volta de $35 M_{\odot}$ [24]; a origem destes picos está em debate, sendo incerto se o segundo pico está relacionado com as instabilidades PISN/PPISN [25, 26].

Estas observações suscitam muitas questões que talvez possamos responder à medida que detetarmos mais binários com interferómetros mais sensíveis e modelos de ondas gravitacionais mais precisos (ver, por exemplo, [27] para uma revisão):

- (i) Qual é a melhor interpretação do espectro de massas observado para buracos negros binários [28]? Quão

bem conseguimos realmente observar esse espectro? Que massas devem ter os buracos negros que se fundem e será possível reconciliar as medições feitas por ondas gravitacionais com as medições eletromagnéticas?

- (ii) Existem correlações entre os parâmetros binários observados? Em particular, fusões com massas mais desiguais têm spins efetivos maiores, como sugerido por uma análise estatística dos dados [29]? Se sim, porquê?

- (iii) Os spins observados dos buracos negros parecem ser geralmente baixos. Trata-se de um efeito físico real ou são simplesmente mal determinados [30]?

- (iv) Como evoluem as taxas de fusão e as propriedades dos binários com o desvio para o vermelho [31–33]? A distribuição dos spins efetivos alarga-se com o desvio para o vermelho, como algumas observações parecem sugerir — e, se sim, porquê [34–36]? Há indícios de ressonâncias entre o spin e a órbita na população [37], e será possível usá-las para inferir a história da formação dos binários [38–44]?

O catálogo O4 de eventos de ondas gravitacionais mais do que duplicará a amostra atual. À medida que descobrirmos mais sobre a população de binários compactos, algumas destas questões poderão encontrar respostas mais claras.

Testes da gravidade e da natureza dos objetos compactos

Estamos apenas a começar a usar as observações de ondas gravitacionais para responder a algumas das grandes questões da física. Será a relatividade geral a teoria correta da gravidade [45–47]?

Temos realmente a certeza de que os objetos compactos observados pela colaboração LIGO-Virgo-KAGRA são consistentes com as soluções de buracos negros no vácuo previstas pela relatividade geral [48]?

Têm sido feitas muitas especulações sobre possíveis assinaturas observacionais da gravidade quântica e de objetos compactos exóticos, mas todas as observações realizadas até agora pela colaboração LIGO-Virgo-KAGRA são compatíveis com a relatividade geral [49–53].

Os testes de "espectroscopia de buracos negros" [54–57], que exigem a medição de mais do que um modo de oscilação, ainda estão na sua infância [22]. Testes melhores vão requerer modelos precisos de não-linearidades em relatividade geral, e terão de levar em conta várias subtilezas na análise de dados [58].

Mais pedanticamente, precisamos de fazer o nosso trabalho de base e compreender melhor a emissão de ondas gravitacionais no âmbito da relatividade geral. O nosso conhecimento limitado das formas de onda gravitacionais já está a afetar a interpretação astrofísica de certos even-

tos, como o GW190521 [11] e o GW231123 [18]. Alguns eventos, como o GW200129_065458 [59], apresentam aparentes violações da relatividade geral que foram atribuídas a erros sistemáticos nos modelos de forma de onda (como modelação incorreta da precessão do spin) ou a problemas na qualidade dos dados.

Modelos de forma de onda mais precisos serão essenciais para testar a relatividade geral [60] e para medir parâmetros cosmológicos [61] num futuro próximo. Entre as causas potenciais que podem levar a uma identificação errada de uma violação da relatividade geral na era dos detetores de próxima geração incluem-se: ruído do detetor, sobreposição de sinais, lacunas nos dados, calibração dos detetores, imprecisão nos modelos das fontes, falhas na identificação da física relevante no modelo da fonte e do ambiente envolvente, identificação incorreta da fonte e modelação inadequada da população astrofísica [62].

O que nos reserva o futuro?

Como em todos os ramos da astronomia, a nossa capacidade de testar a gravidade forte, a natureza dos objetos compactos e os seus cenários de formação astrofísica dependerá da construção de uma vasta rede de detetores sensíveis, tanto na Terra como no espaço. O programa científico do Einstein Telescope [63], do Cosmic Explorer [64] e de interferómetros espaciais (como o LISA [65], TianQin [66] ou Taiji [67]) é excepcional. Uma lista parcial de possibilidades para expandir o alcance em frequência e amplitude das experiências atuais inclui detetores de alta frequência [68, 69], futuros detetores deciHz [70], mHz [71] ou μ Hz [72] no espaço, detetores lunares [73–76], e experiências com interferometria atômica, como MAGIS [77], AION [78] e AEDGE [79]. Apesar do clima difícil de financiamento, o futuro (gravitacional) é promissor.

Referências

[1] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016), arXiv:1602.03837 [gr-qc].
 [2] M. Dominik, E. Berti, R. O’Shaughnessy, I. Mandel, K. Belczynski, C. Fryer, D. E. Holz, T. Bulik, and F. Pannarale, *Astrophys. J.* 806, 263 (2015), arXiv:1405.7016 [Astro-ph.HE].
 [3] I. Mandel and F. S. Broekgaarden, *Living Rev. Rel.* 25, 1 (2022), arXiv:2107.14239 [astro-ph.HE].
 [4] E. Berti, *APS Physics* 9, 17 (2016), arXiv:1602.04476 [gr-qc].
 [5] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (2016), arXiv:1606.04855 [gr-qc].
 [6] R. O’Shaughnessy, D. Gerosa, and D. Wysocki, *Phys. Rev. Lett.* 119, 011101 (2017), arXiv:1704.03879 [astro-ph.HE].
 [7] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017), arXiv:1710.05832 [gr-qc].
 [8] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo, Fermi GBM, INTEGRAL, IceCube, AstroSat Cadmium Zinc Telluride Imager Team, IPN, Insight-Hxmt, ANTARES, Swift, AGILE Team, IM2H Team, Dark Energy Camera GW-EM, DES, DLT40, GRAWITA, Fermi-LAT, ATCA, ASKAP, Las Cumbres Observatory Group, OzGrav, DWF (Deeper Wider Faster Program), AST3, CAASTRO, VINROUGE, MASTER, J-GEM, GROWTH, JAGWAR, CaltechNRAO, TTU-NRAO, NuSTAR, Pan-STARRS, MAXI Team, TZAC Consortium, KU, Nordic Optical Telescope, ePESSTO, GROND, Texas Tech University, SALT Group, TOROS, BOOTES, MWA, CALET, IKI-GW Follow-up, H.E.S.S., LOFAR, LWA, HAWC, Pierre Auger, ALMA, Euro VLBI Team, Pi of Sky, Chandra Team at McGill University, DFN, ATLAS Telescopes, High Time Resolution Universe Survey, RMAS, RATIR, SKA South Africa/MeerKAT), *As- trophys. J. Lett.* 848, L12 (2017), arXiv:1710.05833 [astro-ph.HE].
 [9] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. D* 102, 043015 (2020), arXiv:2004.08342 [astro-ph.HE].
 [10] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Astrophys. J. Lett.* 892, L3 (2020), arXiv:2001.01761 [astro-ph.HE].
 [11] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 125, 101102 (2020), arXiv:2009.01075 [gr-qc].
 [12] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Astrophys. J. Lett.* 896, L44 (2020), arXiv:2006.12611 [astro-ph.HE].
 [13] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, KAGRA, VIRGO), *Astrophys. J. Lett.* 915, L5 (2021), arXiv:2106.15163 [astro-ph.HE].
 [14] M. Hannam et al., *Nature* 610, 652 (2022), arXiv:2112.11300 [gr-qc].
 [15] E. Payne, S. Hourihane, J. Golomb, R. Udall, D. Davis, and K. Chatziioannou, *Phys. Rev. D* 106, 104017 (2022), arXiv:2206.11932 [gr-qc].
 [16] V. Varma, S. Biscoveanu, T. Islam, F. H. Shaik, C.-J. Haster, M. Isi, W. M. Farr, S. E. Field, and S. Vitale, *Phys. Rev. Lett.* 128, 191102 (2022), arXiv:2201.01302 [astro-ph.HE].
 [17] A. G. Abac et al. (LIGO Scientific, KAGRA, VIRGO), *Astrophys. J. Lett.* 970, L34 (2024), arXiv:2404.04248 [astro-ph.HE].

[18] R. Abbott et al. (KAGRA, VIRGO, LIGO Scientific), (2025), arXiv:2507.08219 [astro-ph.HE].
 [19] D. Gerosa and E. Berti, *Phys. Rev. D* 95, 124046 (2017), arXiv:1703.06223 [gr-qc].
 [20] M. Fishbach, D. E. Holz, and B. Farr, *Astrophys. J. Lett.* 840, L24 (2017), arXiv:1703.06869 [astro-ph.HE].
 [21] D. Gerosa and M. Fishbach, *Nature Astron.* 5, 749 (2021), arXiv:2105.03439 [astro-ph.HE].
 [22] A. G. Abac et al. (LIGO Scientific, KAGRA, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 135, 111403 (2025), arXiv:2509.08054 [gr-qc].
 [23] R. Abbott et al. (KAGRA, VIRGO, LIGO Scientific), *Phys. Rev. X* 13, 011048 (2023), arXiv:2111.03634 [astro-ph.HE].
 [24] R. Abbott et al. (KAGRA, VIRGO, LIGO Scientific), *Phys. Rev. X* 13, 041039 (2023), arXiv:2111.03606 [gr-qc].
 [25] A. M. Farah, B. Edelman, M. Zevin, M. Fishbach, J. M. Ezquiaga, B. Farr, and D. E. Holz, *Astrophys. J.* 955, 107 (2023), arXiv:2301.00834 [astro-ph.HE].
 [26] S. K. Roy, L. A. C. van Son, and W. M. Farr, (2025), arXiv:2507.01086 [astro-ph.HE].
 [27] T. A. Callister, (2024), arXiv:2410.19145 [astro-ph.HE].
 [28] I. Mandel, in 59th Rencontres de Moriond on Gravitation: Moriond 2025 Gravitation (2025) arXiv:2506.01507 [astro-ph.HE].
 [29] T. A. Callister, C.-J. Haster, K. K. Y. Ng, S. Vitale, and W. M. Farr, *Astrophys. J. Lett.* 922, L5 (2021), arXiv:2106.00521 [astro-ph.HE].
 [30] T. A. Callister, S. J. Miller, K. Chatziioannou, and W. M. Farr, *Astrophys. J. Lett.* 937, L13 (2022), arXiv:2205.08574 [astro-ph.HE].
 [31] L. A. C. van Son, S. E. de Mink, T. Callister, S. Justham, M. Renzo, T. Wagg, F. S. Broekgaarden, F. Kummer, R. Pakmor, and I. Mandel, *Astrophys. J.* 931, 17 (2022), arXiv:2110.01634 [astro-ph.HE].
 [32] S. Rinaldi, W. Del Pozzo, M. Mapelli, A. Lorenzini-Medina, and T. Dent, *Astron. Astrophys.* 684, A204 (2024), arXiv:2310.03074 [astro-ph.HE].
 [33] M. Lalleman, K. Turbang, T. Callister, and N. van Remortel, *Astron. Astrophys.* 698, A85 (2025), arXiv:2501.10295 [astro-ph.HE].
 [34] S. S. Bavera, M. Fishbach, M. Zevin, E. Zapartas, and T. Fragos, *Astron. Astrophys.* 665, A59 (2022), arXiv:2204.02619 [astro-ph.HE].
 [35] S. Biscoveanu, T. A. Callister, C.-J. Haster, K. K. Y. Ng, S. Vitale, and W. M. Farr, *Astrophys. J. Lett.* 932, L19 (2022), arXiv:2204.01576 [astro-ph.HE].
 [36] C. S. Ye and M. Fishbach, *Astrophys. J.* 967, 62 (2024), arXiv:2402.12444 [astro-ph.HE].
 [37] V. Varma, S. Biscoveanu, M. Isi, W. M. Farr, and S. Vitale, *Phys. Rev. Lett.* 128, 031101 (2022), arXiv:2107.09693 [astro-ph.HE].
 [38] D. Gerosa, M. Kesden, E. Berti, R. O’Shaughnessy, and U. Sperhake, *Phys. Rev. D* 87, 104028 (2013), arXiv:1302.4442 [gr-qc].
 [39] D. Gerosa, R. O’Shaughnessy, M. Kesden, E. Berti, and U. Sperhake, *Phys. Rev. D* 89, 124025 (2014), arXiv:1403.7147 [gr-qc].
 [40] M. Kesden, D. Gerosa, R. O’Shaughnessy, E. Berti, and U. Sperhake, *Phys. Rev. Lett.* 114, 081103 (2015), arXiv:1411.0674 [gr-qc].
 [41] D. Gerosa, M. Kesden, U. Sperhake, E. Berti, and R. O’Shaughnessy, *Phys. Rev. D* 92, 064016 (2015), arXiv:1506.03492 [gr-qc].
 [42] D. Gerosa, E. Berti, R. O’Shaughnessy, K. Belczynski, M. Kesden, D. Wysocki, and W. Gladysz, *Phys. Rev. D* 98, 084036 (2018), arXiv:1808.02491 [astro-ph.HE].
 [43] D. Gangardt, N. Steinle, M. Kesden, D. Gerosa, and E. Stoikios, *Phys. Rev. D* 103, 124026 (2021), arXiv:2103.03894 [gr-qc].
 [44] D. Gangardt, D. Gerosa, M. Kesden, V. De Renzi, and N. Steinle, *Phys. Rev. D* 106, 024019 (2022), [Erratum: *Phys. Rev. D* 107, 109901 (2023)], arXiv:2204.00026 [gr-qc].
 [45] C. M. Will, *Living Rev. Rel.* 17, 4 (2014), arXiv:1403.7377 [gr-qc].
 [46] E. Berti et al., *Class. Quant. Grav.* 32, 243001 (2015), arXiv:1501.07274 [gr-qc].
 [47] N. Yunes, X. Siemens, and K. Yagi, *Living Rev. Rel.* 28, 3 (2025).
 [48] V. Cardoso and P. Pani, *Living Rev. Rel.* 22, 4 (2019), arXiv:1904.05363 [gr-qc].
 [49] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. Lett.* 116, 221101 (2016), [Erratum: *Phys. Rev. Lett.* 121, 129902 (2018)], arXiv:1602.03841 [gr-qc].
 [50] N. Yunes, K. Yagi, and F. Pretorius, *Phys. Rev. D* 94, 084002 (2016), arXiv:1603.08955 [gr-qc].
 [51] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. D* 100, 104036 (2019), arXiv:1903.04467 [gr-qc].
 [52] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, Virgo), *Phys. Rev. D* 103, 122002 (2021), arXiv:2010.14529 [gr-qc].
 [53] R. Abbott et al. (LIGO Scientific, VIRGO, KAGRA), (2021), arXiv:2112.06861 [gr-qc].
 [54] S. L. Detweiler, *Astrophys. J.* 239, 292 (1980).
 [55] O. Dreyer, B. J. Kelly, B. Krishnan, L. S. Finn, D. Garrison, and R. Lopez-Aleman, *Class. Quant. Grav.* 21, 787 (2004), arXiv:gr-qc/0309007.
 [56] E. Berti, V. Cardoso, and C. M. Will, *Phys. Rev. D* 73, 064030 (2006), arXiv:gr-qc/0512160.
 [57] E. Berti, V. Cardoso, and A. O. Starinets, *Class. Quant. Grav.* 26, 163001 (2009), arXiv:0905.2975 [gr-qc].
 [58] E. Berti et al., (2025), arXiv:2505.23895 [gr-qc].
 [59] E. Maggio, H. O. Silva, A. Buonanno, and A. Ghosh, *Phys. Rev. D* 108, 024043 (2023), arXiv:2212.09655 [gr-qc].
 [60] R. S. Chandramouli, K. Prokup, E. Berti, and N. Yunes, *Phys. Rev. D* 111, 044026 (2025), arXiv:2410.06254 [gr-qc].
 [61] A. Dhani, J. Gair, and A. Buonanno, (2025), arXiv:2507.11278 [gr-qc].
 [62] A. Gupta et al., (2024), arXiv:2405.02197 [gr-qc].
 [63] A. Abac et al., (2025), arXiv:2503.12263 [gr-qc].
 [64] M. Evans et al., (2023), arXiv:2306.13745 [astro-ph.IM].
 [65] M. Colpi et al. (LISA), (2024), arXiv:2402.07571 [astro-ph.CO].
 [66] J. Luo et al. (TianQin), *Class. Quant. Grav.* 33, 035010 (2016), arXiv:1512.02076 [astro-ph.IM].
 [67] W.-R. Hu and Y.-L. Wu, *Natl. Sci. Rev.* 4, 685 (2017).
 [68] K. Ackley et al., *Publ. Astron. Soc. Austral.* 37, e047 (2020), arXiv:2007.03128 [astro-ph.HE].
 [69] N. Aggarwal et al., (2025), arXiv:2501.11723 [gr-qc].
 [70] M. A. Sedda et al., *Class. Quant. Grav.* 37, 215011 (2020), arXiv:1908.11375 [gr-qc].
 [71] V. Baibhav et al., *Exper. Astron.* 51, 1385 (2021), arXiv:1908.11390 [astro-ph.HE].
 [72] A. Sesana et al., *Exper. Astron.* 51, 1333 (2021), arXiv:1908.11391 [astro-ph.IM].
 [73] R. T. Stebbins and P. L. Bender, in *Physics and Astrophysics from a Lunar Base*, AIP Conf. Proc., Vol. 202, edited by A. E. Potter and T. L. Wilson (AIP, 1990) pp. 188–204.
 [74] A. Cozzumbo, B. Mestichelli, M. Mirabile, L. Paiella, J. Tissino, and J. Harms, (2023), arXiv:2309.15160 [astro-ph.IM].
 [75] K. Jani and A. Loeb, (2020), 10.1088/1475-7516/2021/06/044, arXiv:2007.08550 [gr-qc].
 [76] P. Ajith et al., *JCAP* 01, 108 (2025), arXiv:2404.09181 [gr-qc].
 [77] M. Abe et al. (MAGIS-100), *Quantum Sci. Technol.* 6, 044003 (2021), arXiv:2104.02835 [physics.atom-ph].
 [78] J. L. Badurina et al., *JCAP* 05, 011 (2020), arXiv:1911.11755 [astro-ph.CO].
 [79] Y. A. El-Neaj et al. (AEDGE), *EPJ Quant. Technol.* 7, 6 (2020), arXiv:1908.00802 [gr-qc].



A investigação de Emanuele Berti centra-se em buracos negros, estrelas de neutrons, astronomia de ondas gravitacionais e testes de relatividade geral. Após o seu doutoramento pela Universidade de Roma, ocupou cargos de pós-doutoramento na Universidade Aristóteles de Salónica, no Instituto de Astrofísica de Paris, na Universidade Washington em Saint Louis e no JPL/Caltech. Ingressou no corpo docente da Universidade do Mississippi em 2009 e mudou-se para a Universidade Johns Hopkins em 2018. Berti desempenhou as funções de chefe da Divisão de Física Gravitacional da Sociedade Americana de Física (APS) e de presidente da Sociedade Internacional de Relatividade Geral e Gravitação (ISGRG). É membro da APS e da ISGRG, e recebeu o Prémio APS Richard A. Isaacson 2023 em Ciência de Ondas Gravitacionais. A sua investigação foi apoiada por prémios da National Science Foundation, NASA, Templeton Foundation e Simons Foundation.