

## BURACOS NEGROS COM CABELO E AS SUAS SOMBRAS

*Carlos A. R. Herdeiro, Pedro V. P. Cunha*

Departamento de Física da Universidade de Aveiro e Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações (CIDMA)

Campus de Santiago, 3810-183 Aveiro, Portugal

e-mail: herdeiro@ua.pt

cunhapcc@gmail.com

**Resumo:** Em 2015 celebra-se simultaneamente o centenário da Relatividade Geral (RG) e o ano internacional da luz. Uma das mais fascinantes previsões da RG une estes dois tópicos: a RG prevê a existência de Buracos Negros (BNs), zonas do espaço-tempo que aprisionam a própria luz. Ao longo das últimas décadas, extraordinários desenvolvimentos teóricos criaram um paradigma de simplicidade sobre os BNs, sintetizado na seguinte máxima de John Wheeler: os *BNs não têm cabelo*. Simultaneamente, um acumular de dados observacionais sugere que os BNs são também objectos abundantes no Cosmos. Neste artigo, explicamos brevemente estas ideias e discutimos a possibilidade de, afinal, os BNs poderem ser mais complexos, isto é, de poderem ter *cabelo*. Terminamos ilustrando como *BNs com cabelo* podem ter diferentes consequências observacionais, nomeadamente na sua "sombra", que é a silhueta de um BN colocado em frente de uma fonte de luz, ligando uma vez mais os tópicos das duas efemérides.

**Abstract** In 2015 we celebrate both the centennial of General Relativity (GR) and the international year of light. One of the most fascinating predictions of GR connects these two topics: GR predicts the existence of Black Holes (BHs), space-time regions that trap light itself. During the last few decades, extraordinary theoretical developments have created a simplicity paradigm concerning BHs, summarized in the following "mantra" coined by John Wheeler: *BHs have no hair*. Simultaneously, accumulated observational data suggests that BHs are also abundant objects throughout the Cosmos. In this paper, we briefly explain these ideas and discuss the possibility that, after all, BHs may be more complex than previously thought, that is, they may have *hair*. We conclude by illustrating how *hairy BHs* may have different observational signatures, namely in their shadow, which is the silhouette cast by a BH in front of a light source, connecting once more the two topics we celebrate in 2015.

**palavras-chave:** Buracos negros; buracos negros com cabelo; sombras de buracos negros.

**keywords:** Black Holes; hairy black holes; black holes shadows.

## 1 Buracos negros: paradigma teórico e evidência astrofísica

A primeira solução exacta das equações de campo da Relatividade Geral (RG), que seria – muito mais tarde – interpretada como descrevendo um buraco negro (BN), foi publicada por K. Schwarzschild em 1916 [1] (mas comunicada por carta a A. Einstein em Dezembro de 1915). Nas décadas seguintes ocorreu uma considerável controvérsia sobre a interpretação desta métrica. Esta discussão foi apenas clarificada com a publicação do artigo de M. Kruskal, em 1960 [2], estudando o que se designa por “máxima extensão analítica” da solução de Schwarzschild, obtida independentemente por G. Szekers. A terminologia “buraco negro” foi cunhada um pouco mais tarde, em 1967, por J. Wheeler.

De uma maneira simples, um BN pode ser definido como uma zona do espaço-tempo causalmente desligada da região assimptótica; uma região onde a gravidade “encurralou” todas as trajectórias causais dirigidas para o futuro, incluindo as dos raios de luz. A fronteira desta região é designada por “horizonte de acontecimentos”. O conceito de BN recebeu um enorme ímpeto na década de 1960. Para além do trabalho de Kruskal e Szekers, em 1963 R. Kerr apresentou a sua celebrada solução, que descreve um BN em rotação [3], no *First Texas Symposium on Relativistic Astrophysics*. Este encontro científico, que marca precisamente o nascimento desta área de investigação, foi planeado para discutir a principal questão em aberto da astrofísica da altura: o mecanismo de produção de energia dos *quasars*, os objectos mais luminosos do Universo que haviam sido descobertos na década anterior. Fenómenos relativistas deveriam estar envolvidos e a explicação que se foi tornando gradualmente aceite invoca enormes acreções por BNs supermassivos.

Em paralelo, outras evidências astrofísicas de (candidatos a) BNs foram sendo acumuladas por observações electromagnéticas, no rádio e nos raios X [4]. Com o tempo, a ideia de que no centro de um grande número de galáxias existe um BN supermassivo, com uma massa entre  $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$ , onde  $M_{\odot}$  é a massa do Sol, tornou-se o paradigma vigente. Por exemplo, no centro da nossa galáxia, a Via Láctea, a fonte de emissão no rádio designada por “Sagittarius A\*” é aceite como sendo um BN com massa  $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ . Acresce que algumas dezenas de fontes com forte emissão na banda dos raios X, na Via Láctea, são também consensualmente aceites como BNs, com massas entre  $\sim 5 - 30 M_{\odot}$ , encontrando-se num processo de acreção de matéria de uma estrela companheira.

O acumular de evidência observacional do que parece ser a miríade de BNs que habitam o Cosmos, foi acompanhada por um fantástico desenvolvimento teórico. Na década de 1970 foram estabelecidos vários “Teoremas de Unicidade” demonstrando que – com certas hipóteses – a métrica de Kerr é a única solução da RG que descreve BNs relevantes para a astrofísica [5]. Estes resultados levaram S. Chandrasekhar à seguinte exclamação, que resume a simplicidade do paradigma vigente sobre os BNs astrofísicos [6]:

*“In my entire scientific life, extending over forty-five years, the most shattering experience has been the realization that an exact solution of Einstein’s equations of general relativity, discovered by the New Zealand mathematician, Roy Kerr, provides the absolutely exact representation of untold numbers of massive black holes that populate the universe.”*

## 2 Para além de Kerr e futuras observações

Há razões, quer de carácter observacional, quer de carácter teórico para questionar o apelativo paradigma apresentado na secção anterior.

Em primeiro lugar, as observações descritas não comprovaram a existência de um horizonte de acontecimentos e como tal não eliminaram a hipótese de estes candidatos a BNs serem, de facto, objectos compactos constituídos por algum tipo de matéria exótica e sem um horizonte de acontecimentos. Genericamente, contudo, hipotéticos objectos exóticos deste tipo têm dificuldades, tanto teóricas (*p. ex.* problemas de estabilidade) como na explicação de todos os detalhes observacionais [7]. A consequente falta de uma alternativa convincente (a BNs) é, também, uma das razões pela qual a existência de BNs é genericamente aceite pela comunidade – mas nada demonstra.

Em segundo lugar, mesmo partindo do princípio que os (candidatos a) BNs astrofísicos são de facto BNs, pode-se questionar se são realmente descritos pela métrica de Kerr. Isto, porque os “Teoremas de Unicidade” mencionados invocam hipóteses, e estas hipóteses podem ser violadas, por exemplo em teorias para além da RG ou usando matéria-energia menos convencional. Nestes contextos, modelos alternativos de BNs têm sido propostos, sugerindo que os (candidatos a) BNs observados podem diferir do BN de Kerr [9]. Em particular, em 2014, foi descoberto um novo tipo de BN – *Buracos Negros de Kerr com Cabelo Escalar* (BNsKCE) [8], que surpreendeu e tem despertado o interesse da comunidade internacional como alternativa ao BN de Kerr, e que será descrito na próxima secção.

É, pois, prudente manter um espírito aberto relativamente à verdadeira

natureza dos (candidatos a) BNs astrofísicos, uma questão que apenas será clarificada através da obtenção de dados observacionais de grande precisão. E urge, em simultâneo, obter dos modelos alternativos mais interessantes e plausíveis a fenomenologia necessária, para que estes modelos possam ser confrontados com as experiências que se encontram a decorrer ou em preparação num futuro próximo.

De facto, o momento presente é excitante perante a expectativa de obter novos dados observacionais. Desenvolvimentos tecnologicamente impressionantes prometem a obtenção de informação com uma precisão sem precedentes sobre os (candidatos a) BNs astrofísicos. A detecção de ondas gravitacionais por interferómetros na Terra – como o aLIGO – ou por técnicas usando *Pulsar Timing Arrays* (PTA) está mais próxima do que nunca e deverá tornar-se uma realidade antes da década terminar. Observações astrométricas irão aumentar em precisão devido a uma nova geração de instrumentos, como o *Gravity*, que tentarão identificar novas órbitas estelares em torno (e mais próximas) de Sagittarius A\*. Observações em raios X de discos de acreção irão adquirir precisão suficiente para restringir as propriedades métricas na vizinhança de (candidatos a) BNs com massas estelares. Finalmente, o *Event Horizon Telescope* [11] pretende usar uma rede de observatórios terrestres para examinar o centro galáctico em comprimentos de onda sub-milimétricos e resolver a escala do horizonte de acontecimentos de Sagittarius A\* [12] e do BN supermassivo no centro da galáxia M87 [13], determinando a “sombra” (*cf.* secção 4) dos respectivos BNs.

É, pois, razoável esperar que na próxima década a astrofísica relativista irá apresentar resultados com precisão nunca vista, em particular, sobre os (candidatos a) BNs conhecidos.

### 3 Uma nova família de Buracos Negros

Uma propriedade genérica dos BNs é a impossibilidade de ter matéria, em seu redor, num equilíbrio eterno com o BN. Em geral a matéria irá escapar ou cair para o BN, convertendo a sua energia potencial gravítica em energia cinética (e vice-versa) e dissipando uma parte dela em radiação gravitacional e electromagnética (se a matéria for carregada electricamente). Uma conclusão semelhante pode ser aplicada a um campo clássico: um pacote de ondas na vizinhança de um BN será difundido para o infinito e/ou absorvido pelo BN.

Foi, contudo, observado em 2012 por S. Hod, que campos massivos e escalares (isto é, campos associados a partículas com massa e sem *spin*)

podem formar “nuvens” estacionárias em redor de BNs de Kerr [14]. Aqui, a terminologia “nuvem” pretende transmitir a sensação de leveza, dado que o cálculo da Ref. [14] ignora o campo gravitacional criado pela própria nuvem. Portanto, esta análise é válida apenas no limite em que a nuvem tem uma energia muito menor que o BN, ou seja, a nuvem é “leve”.

Estas nuvens encontram-se em co-rotação com o BN de Kerr. Quando a velocidade angular de uma nuvem excede a do horizonte de acontecimentos esta última é absorvida, transferindo a sua energia rotacional para o BN; contudo quando a sua velocidade angular é inferior à do BN a nuvem é amplificada, extraíndo parte da energia rotacional do BN por um fenómeno chamado “superradiância”, descoberto – no contexto da física de BNs – na década de 1970 por W. Press and S. Teukolsky [15]. Quando a nuvem tem precisamente a mesma velocidade angular do horizonte de acontecimentos do BN, esta pode ficar em equilíbrio estacionário com ele. Este argumento – um “mecanismo de sincronização” –, originalmente proposto em [16], sugere que o equilíbrio entre a nuvem e o BN é estável.

A existência destas nuvens escalares em torno do BN de Kerr – curiosamente análogas às orbitais do átomo de hidrogénio [14] – foi estabelecida considerando-as “leves” e negligenciando a sua própria influência gravitacional. Considerar o seu “peso” implica resolver as equações de campo da RG, acopladas à equação de Klein-Gordon que rege o campo escalar. Esta tarefa – tecnicamente exigente – foi levada a cabo em [8] (e detalhada em [17]), onde foi obtida a nova família de soluções exactas das equações de Einstein-Klein-Gordon anteriormente mencionada: BNsKCE.

A existência de BNsKCE surpreendeu a comunidade, dado um conjunto de teoremas *no-go* – designados por “Teoremas sem cabelo” – que generalizam os “Teoremas de Unicidade” anteriormente mencionados. Alguns destes teoremas garantiam a inexistência de novos BNs com “cabelo” precisamente na teoria de Einstein-Klein-Gordon [18]. Contudo os BNsKCE não obedecem a uma das hipóteses técnicas desses teoremas, o que compatibiliza estes novos BNs com a literatura existente.

Por outro lado, esta nova família de BNs tem revelado propriedades fenomenológicas interessantes e que podem diferir substancialmente das dos BNs de Kerr, algo difícil de encontrar em modelos alternativos de BNs [19]. Assinaturas específicas em termos de radiação gravitacional, do momento quadrupolar, da frequência orbital na órbita circular estável mais interior foram já discutidas, embora necessitem de ser aprofundadas. Uma outra característica fenomenológica de interesse e atualidade é a “sombra” destes novos BNs, que será discutida na próxima secção.

No limite em que o horizonte de acontecimentos desaparece, as soluções de BNsKCE descrevem aglomerados de campo escalar designados por “estrelas de bosões” [20]. Estes aglomerados de matéria têm sido sugeridos como possíveis candidatos para os halos de matéria escura [21, 22]. A investigação desta nova família de BNs liga-se deste modo, também à questão da matéria escura, de enorme importância na Cosmologia/Astrofísica contemporânea.

Finalmente, para além uma nova família de soluções, a descoberta dos BNsKCE revelou a existência de um mecanismo para gerar outras novas soluções [23], na medida em que haverá outras famílias de BNs em equilíbrio com outros campos, devido ao mesmo “mecanismo de sincronização”. Uma destas generalizações foi já construída em [24] e uma outra família, qualitativamente diferente, é antecipada em [25].

## 4 Uma assinatura observacional: sombras

Durante um eclipse do Sol, observa-se a silhueta da Lua. Analogamente, a “sombra” de um BN é a silhueta observada se o BN se encontrar entre uma fonte de luz e o observador. Contudo, e ao contrário do caso familiar do Sol e da Lua em que o perfil esférico da Lua é revelado durante o eclipse, a silhueta do BN não corresponde em geral à geometria intrínseca da fronteira do BN, isto é, do seu horizonte de acontecimentos. Em primeiro lugar porque, no caso do BN a secção de absorção da luz proveniente do “infinito” é maior do que a secção geométrica do horizonte de acontecimentos; em segundo lugar porque os BNs exercem um forte efeito de lente gravitacional e, ao curvarem o espaço-tempo, originam uma imagem deformada.

Tecnicamente, a sombra de um BN vista por um observador localizado num ponto  $\mathcal{O}$ , calcula-se usando uma técnica designada por *backwards ray tracing*: integram-se “para trás” geodésicas nulas que partem de  $\mathcal{O}$  varrendo todos os ângulos de observação. Os ângulos correspondentes a geodésicas que atingem, eventualmente, o horizonte de acontecimentos, formam a sombra do BN.

No caso do BN de Schwarzschild, a sombra é sempre um disco esférico, e apenas o seu tamanho varia com  $\mathcal{O}$ . No caso do BN de Kerr, a forma da sombra depende de  $\mathcal{O}$  e do quão rapidamente o BN roda. Em particular, para  $\mathcal{O}$  localizado no plano equatorial, a sombra varia de um disco esférico – na ausência de rotação –, para um disco em forma de **D** – para a rotação máxima [26]. No caso dos BNsKCE existem dificuldades acrescidas na aplicação da técnica. Em primeiro lugar porque as soluções de BNsKCE foram obtidas numericamente e não existe uma forma analítica fechada que as

descreva. Em segundo lugar, porque estes BNs têm menos simetria do que o BN de Kerr e não permitem a separação das equações geodésicas. Estas dificuldades foram ultrapassadas em [27], onde desenvolvemos métodos de interpolação da métrica numérica e um código de *ray tracing* que não requer qualquer simetria.

Para efeitos de visualização usou-se o seguinte *setup*: dividimos a “esfera celestial” (onde tem origem a luz) em quadrantes, cada um deles pintado com uma cor diferente (verde, azul, vermelho e amarelo). Colocámos também na esfera celestial uma grelha de linhas (a negro) de latitude e longitude constante, em que as linhas adjacentes estão separadas por  $10^\circ$  - Figura 1 (painel da esquerda). Este *setup* foi introduzido em [28].

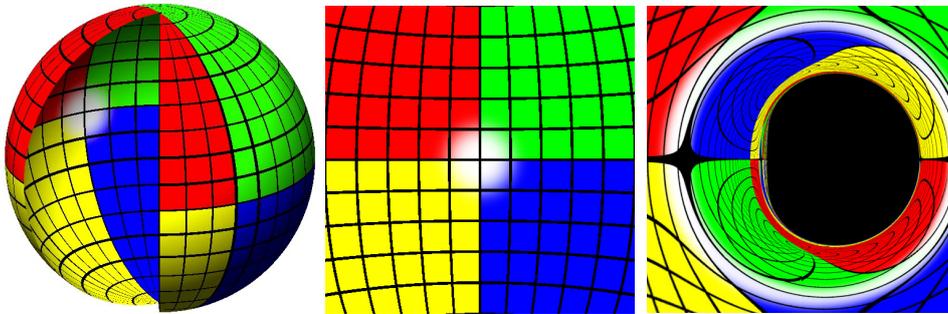


Figura 1: (Esquerda) Esfera celestial. (Centro) ângulo de observação. (Direita) Observação de um BN de Kerr com rotação (quase) máxima.

O observador é colocado dentro da esfera celestial, no plano equatorial, mas fora do centro, e o seu ângulo de visão tem uma abertura de  $\sim 100^\circ$  da esfera - Figura 1 (painel do centro). O ponto da esfera celestial imediatamente em frente do observador – ponto  $\mathcal{F}$  – é representado a branco. Quando no centro da esfera celestial é colocado um BN de Kerr com rotação (quase) máxima, obtém-se o painel da direita da Figura 1. O ponto  $\mathcal{F}$  é mapeado pelo efeito de lente gravitacional para um anel – “anel de Einstein”; dentro do anel de Einstein encontra-se não só a sombra do BN (a negro) com a forma de **D** anteriormente mencionada, mas também uma cópia invertida e deformada de toda a esfera celestial. De facto, esta cópia é apenas uma entre infinitas outras cópias que se acumulam perto do limite da sombra, algo que se pode vislumbrar do lado esquerdo da sombra no painel da direita da Figura 1. Este padrão está associado a uma estrutura fractal no efeito de lente gravitacional de um BN [28].

Na Figura 2 compara-se a sombra de um BNKCE (painel da esquerda),

com um BN de Kerr (painel da direita), com a mesma massa e momento angular totais<sup>1</sup> e condições de observação semelhantes [27]. Este exemplo demonstra como a nova família de BNs pode ter sombras muito distintas de Kerr, quer no tamanho, quer na forma. Um conjunto de parâmetros quantitativos pode ser introduzido para descrever estas diferenças [29].

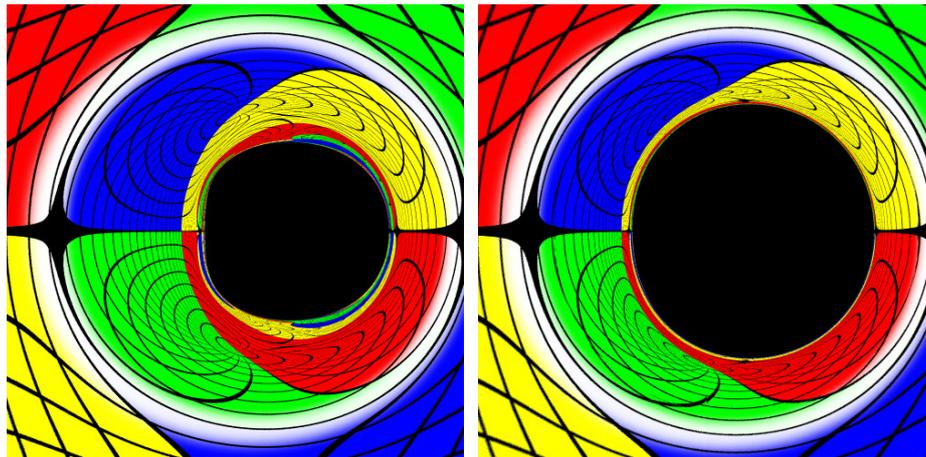


Figura 2: Sombra de um: (esquerda) BNKCE; (direita) BN de Kerr. Ambos os BNs têm a mesma massa e momento angular totais.

## 5 Um olhar para o futuro

É notável como a RG, 100 anos após a sua formulação, continua a ter surpresas reservadas. Isto revela como a RG foi uma teoria avançada para a sua época, cujo aparecimento precoce foi permitido pelo génio de Einstein.

A existência dos BNs com cabelo aqui descritos, com potencial interesse astrofísico, é uma destas surpresas e um tópico que merece ser aprofundado. Por exemplo, no contexto das sombras aqui discutidas valerá a pena:

- 1) Fazer um estudo detalhado e preciso das sombras de BNsKCE em todo o espaço de soluções. O estudo feito em [27] e exemplificado na Figura 2, considerou apenas alguns exemplos de BNsKCE no plano equatorial. Será interessante fazer um estudo exaustivo das sombras em todo o espaço de parâmetros e para várias latitudes de observação.

<sup>1</sup>O termo “total” refere-se ao sistema BN mais o campo escalar, caso o último exista.

- 2) Simular um ambiente astrofísico mais realista. O estudo feito em [27] assume uma fonte luminosa numa esfera celestial longe do BN. Num ambiente astrofísico realista há fontes luminosas na vizinhança (e a várias distâncias do BN), por exemplo em discos de acreção. Um estudo deste tipo, para estrelas de bosões, foi recentemente levado a cabo [30] e poderá ser também efectuado para BNsKCE. Para esse efeito pretendemos usar, no futuro, o código GYOTO [31], usado em [30], efectuando também uma verificação adicional do *ray-tracing* realizado com o nosso código.
- 3) Estudar as sombras de famílias de BNs que generalizam os BNsKCE, nomeadamente: *i*) em modelos onde o campo escalar tem auto-interacções [32]; *ii*) em modelos onde o “cabelo” do BN é um campo vectorial massivo, *campo de Proca* (antecipados no recente artigo [25]).

Finalmente, vale a pena enfatizar a atualidade destes estudos quando existe uma expectativa de que nos próximos anos teremos observações precisas que identifiquem (ou não!) a existência de BNs astrofísicos, bem como a sua verdadeira natureza.

## Agradecimentos

Os trabalhos originais descritos neste artigo foram desenvolvidos em co-autoria com Eugen Radu e Helgi Rúnarsson; é um prazer agradecer-lhes a frutífera colaboração. As figuras aqui apresentadas foram retiradas do artigo [27]. C. H. agradece o financiamento do programa FCT-IF. P.C. é financiado pela bolsa FCT IDPASC Portugal de ref. IDPASC/PhD/2015/24. Este trabalho foi também financiado pela acção Marie Curie NRHEP-295189 FP7-PEOPLE-2011-IRSES, e pelo projecto estratégico UID/MAT/04106/2013 da Unidade de Investigação CIDMA.

## Referências

- [1] Karl Schwarzschild, Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss. Berlin (Math. Phys.) 1916 (1916) 189-196
- [2] M. D. Kruskal, Phys. Rev. **119** (1960) 1743.
- [3] R. P. Kerr, Phys. Rev. Lett. **11** (1963) 237.
- [4] R. Narayan and J. E. McClintock, arXiv:1312.6698 [astro-ph.HE].

- [5] P. T. Chrusciel, J. L. Costa and M. Heusler, *Living Rev. Rel.* **15** (2012) 7
- [6] S. Chandrasekhar, in *Truth and Beauty: Aesthetics and Motivations in Science*, Chicago University Press, Chicago, 1987.
- [7] Y. F. Yuan, R. Narayan and M. J. Rees, *Astrophys. J.* **606** (2004) 1112
- [8] C. A. R. Herdeiro and E. Radu, *Phys. Rev. Lett.* **112** (2014) 221101
- [9] E. Berti *et al.*, *Class. Quant. Grav.* **32** (2015) 24, 243001
- [10] C. M. Will, *Living Rev. Rel.* **17** (2014) 4
- [11] S. Doeleman *et al.*, arXiv:0906.3899 [astro-ph.CO].
- [12] H. Falcke, F. Melia and E. Agol, *Astrophys. J.* **528** (2000) L13
- [13] A. E. Broderick *et al.*, *Astrophys. J.* **805** (2015) 2, 179
- [14] S. Hod, *Phys. Rev. D* **86** (2012) 104026 [*Phys. Rev. D* **86** (2012) 129902]
- [15] W. H. Press and S. A. Teukolsky, *Nature* **238** (1972) 211.
- [16] C. L. Benone, L. C. B. Crispino, C. Herdeiro and E. Radu, *Phys. Rev. D* **90** (2014) 10, 104024
- [17] C. Herdeiro and E. Radu, *Class. Quant. Grav.* **32** (2015) 14, 144001
- [18] C. A. R. Herdeiro and E. Radu, *Int. J. Mod. Phys. D* **24** (2015) 1542014
- [19] E. Barausse, J. Bellovary, E. Berti, K. Holley-Bockelmann, B. Farris, B. Sathyaprakash and A. Sesana, *J. Phys. Conf. Ser.* **610** (2015) 1, 012001
- [20] F. E. Schunck and E. W. Mielke, *Class. Quant. Grav.* **20** (2003) R301
- [21] B. Li, T. Rindler-Daller and P. R. Shapiro, *Phys. Rev. D* **89** (2014) 8, 083536
- [22] A. Suárez, V. H. Robles and T. Matos, *Astrophys. Space Sci. Proc.* **38** (2014) 107
- [23] C. A. R. Herdeiro and E. Radu, *Int. J. Mod. Phys. D* **23** (2014) 12, 1442014

- 
- [24] B. Kleihaus, J. Kunz and S. Yazadjiev, *Phys. Lett. B* **744** (2015) 406
- [25] R. Brito, V. Cardoso, C. A. R. Herdeiro and E. Radu, doi:10.1016/j.physletb.2015.11.051 arXiv:1508.05395 [gr-qc].
- [26] Bardeen, J. M. 1973, *Black Holes (Les Astres Occlus)*, 215
- [27] P. V. P. Cunha, C. A. R. Herdeiro, E. Radu and H. F. Runarsson, *Phys. Rev. Lett.* **115** (2015) 21, 211102
- [28] A. Bohn, W. Thrope, F. Hébert, K. Henriksson, D. Bunandar, M. A. Scheel and N. W. Taylor, *Class. Quant. Grav.* **32** (2015) 6, 065002
- [29] T. Johannsen, *Astrophys. J.* **777** (2013) 170
- [30] F. H. Vincent, Z. Meliani, P. Grandclement, E. Gourgoulhon and O. Straub, arXiv:1510.04170 [gr-qc].
- [31] F. H. Vincent, T. Paumard, E. Gourgoulhon and G. Perrin, *Class. Quant. Grav.* **28** (2011) 225011
- [32] C. A. R. Herdeiro, E. Radu and H. Rúnarsson, *Phys. Rev. D* **92** (2015) 8, 084059