São os buracos negros reais?

Domingos Soares
Departamento de Física
Universidade Federal de Minas Gerais
Belo Horizonte, Brasil

28 de agosto de 2018

Resumo

A realidade física do buraco negro, como definido na literatura, é investigada através do exame de detalhes de seu campo de métrica. Uma comparação com o campo gravitacional de uma esfera material homogênea é considerada também.

1 Introdução

Em 1916, logo após a publicação dos artigos de Albert Einstein (1879-1955) sobre a Teoria da Relatividade Geral (TRG), o astrônomo alemão Karl Schwarzschild (1873-1916) resolveu as equações de campo de Einstein para um caso muito particular, ao mesmo tempo simples e de grande aplicabilidade experimental e observacional. Ela se refere à determinação da métrica do espaço-tempo no exterior de uma distribuição de massa estática e esfericamente simétrica M. A solução de Schwarzschild é a solução no vácuo, fora do objeto de massa M, e válida somente nesta região do espaço-tempo.

A métrica tem enorme sucesso em suas aplicações. Ela é verificada no movimento planetário, na deflexão da luz devido à presença de uma concentração de massa, na previsão correta do avanço do periélio de Mercúrio — onde a gravitação de Newton falha — e em aplicações modernas de sistemas de posicionamento global.

A métrica de Schwarzschild possui uma ressalva que tornou-se bastante frutífera em suas consequências, a saber a existência de duas singularidades em sua expressão matemática. Uma das singularidades, no chamado "raio de Schwarzschild", levantou discussões teóricas a respeito de um habitante plausível do mundo natural, i.e., o conhecido "buraco negro"(BN). A existência do buraco negro no mundo físico é aceita por muitos mas é questionada por outros. Meu objetivo principal aqui é responder à pergunta proposta no título do artigo. Eu faço isto tanto através do exame de detalhes da métrica de Schwarzschild quanto comparando-a com o campo gravitacional de um objeto newtoniano clássico, qual seja, uma esfera material homogênea.

A métrica de Schwarzschild é discutida na seção 2 assim como a definição do buraco negro como apresentada por Capelo (2018). Na seção 3, eu discuto o equivalente newtoniano ao campo da métrica relativista de Schwarzschild, i.e., o campo gravitacional de uma esfera homogênea. A pergunta proposta é respondida na seção 4 e considerações adicionais são apresentadas na seção 5.

2 A métrica de Schwarzschild e a definição de um buraco negro

A definição do buraco negro adotada na presente discussão é a de Capelo (2018). Ele começa com a métrica de Schwarzschild que é descrita pela expressão do intervalo espaço-temporal ds:

$$(ds)^2 = -(1-2GM/rc^2)(cdt)^2+\left(\frac{1}{1-2GM/rc^2}\right)(dr)^2+(rd\theta)^2+(r\,\mathrm{sen}\,\theta\, d\phi)^2, \tag{1}$$

onde r, θ e ϕ são as coordenadas esféricas usuais, c é a velocidade da luz no vácuo e M é a massa da fonte. O "raio de Schwarzschild"é definido como

$$r_S = \frac{2GM}{c^2}. \tag{2}$$

Este raio define a chamada "esfera de Schwarzschild". Na linguagem da TRG o campo da métrica é o equivalente físico do campo gravitacional newtoniano (cf. Soares 2012, seção 1). A sua representação bidimensional está mostrada na figura 1. Vale a pena mencionar que esta representação falha para $r < r_S$, porque nesta região não existe nenhuma descrição física teórica conhecida

— a eq. 1 não é definida lá — e, portanto, a figura 1 mostra apenas uma extrapolação possível, mas muito provavelmente não física, no interior da esfera de Schwarzschild (mais sobre isto em Soares 2017a).

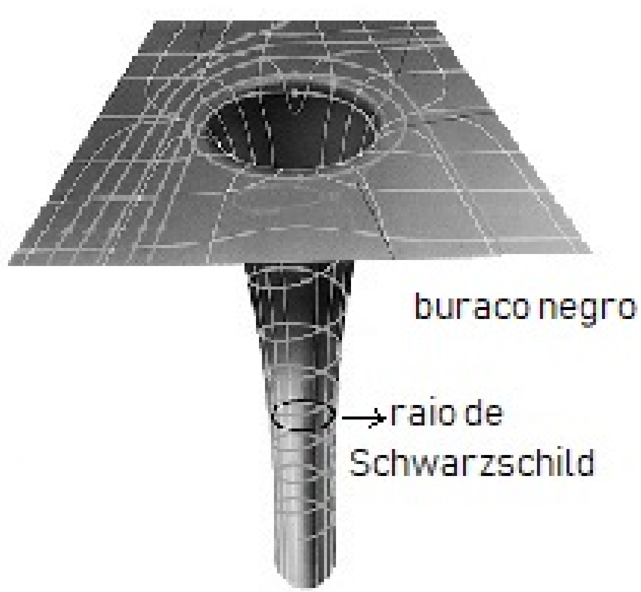

Figura 1: O campo da métrica — i.e., a gravidade — de um buraco negro mostrado como uma superfície bidimensional curva. O buraco negro abriga uma singularidade física no interior da esfera de Schwarzschild. A representação para $r < r_S$ é muito provavelmente inválida porque a métrica não é definida nesta região.

Em seu artigo, Capelo define o BN e examina as principais características de vários tipos de BNs. Um excerto do resumo do artigo de Capelo reza:

> *"... introduzimos o conceito de um buraco negro (BN) e relatamos as previsões teóricas iniciais. Examinamos os tipos possíveis de BNs na natureza, desde BNs primordiais, até os de massas estelares, até os supermassivos."*

Trato aqui apenas da definição de um BN; o leitor deve consultar o artigo de Capelo para as outras considerações.

Existem duas singularidades na eq. 1. A equação diverge tanto em $r = 0$ quanto em $r = r_S$. Das palavras de Capelo, *somente a primeira é uma singularidade física verdadeira (i.e. o tensor de curvatura de Riemann só é infinito em r = 0), com o espaço-tempo sendo não singular no chamado raio de Schwarzschild.* Este fato pode ser visto facilmente, de acordo com Capelo, através de uma transformação das coordenadas nas quais a eq. 1 é apresentada (e.g., Kruskal 1960).

No entanto, a vizinhança do raio de Schwarzschild é uma região bastante peculiar, porque o futuro de uma partícula viajando em direção ao centro é inevitável, quer dizer, quando ela cruza $r = r_S$ *o único futuro possível daquela partícula é a singularidade.* O BN é então *instável* na sua concepção ou, mais precisamente, ele sempre dispara instabilidades quando é formado (ver também Kruskal 1960, figura 2).

A superfície externa da esfera de Schwarzschild é chamada "horizonte de eventos"do BN. Capelo então descreve uma propriedade bastante drástica do BN relativamente a uma partícula movendo-se próximo da fronteira representada pelo horizonte de eventos, qual seja, a de que *um observador estático no infinito nunca observará a travessia de tal fronteira (ou horizonte de eventos), pois o tempo de observação tenderá a infinito (apesar de que o tempo próprio da partícula ser finito) e qualquer radiação enviada da partícula e direcionada ao observador será infinitamente desviada para o vermelho. Em outras palavras, um fóton enviado de r_S necessitaria energia infinita para atingir o observador, efetivamente tornando a região de espaço-tempo no interior do horizonte de eventos desconectada causalmente do resto do Universo.* Esta é a razão técnica rigorosa pela qual uma massa M confinada a r_S é chamada um "buraco negro"e representa, portanto, a sua definição.

Como a massa está confinada à esfera de Schwarzschild, isto motiva a um paralelo com uma massa M confinada a um dado raio R, i.e., uma esfera homogênea newtoniana clássica. A grande diferença entre as duas é que o campo gravitacional da esfera homogênea é bem definido no interior do raio de confinamento ($r < R$) e a grande semelhança é, obviamente, que em ambas a massa total situa-se no interior de uma esfera de raio conhecido.

3 A gravidade de uma esfera homogênea

Considero agora um objeto clássico newtoniano, qual seja, a esfera homogênea (EH), mencionada acima, de massa M e raio R. (Note que o buraco negro é também, a rigor, um objeto clássico, já que não se requer qualquer fundamento de mecânica quântica em sua prescrição.) O campo gravitacional da esfera é descrito por:

$$\overrightarrow{g}(r) = -\mathrm{Gm(r)}\frac{\overrightarrow{r}}{\mathrm{r}^3} \tag{3}$$

com

$$m(r) = \frac{M}{R^3}r^3 \qquad\qquad (0 \leq r < R),$$
$$m(r) = M \qquad\qquad\qquad (r \geq R).$$

O módulo de $\overrightarrow{g}$(r) está traçado na figura 2.

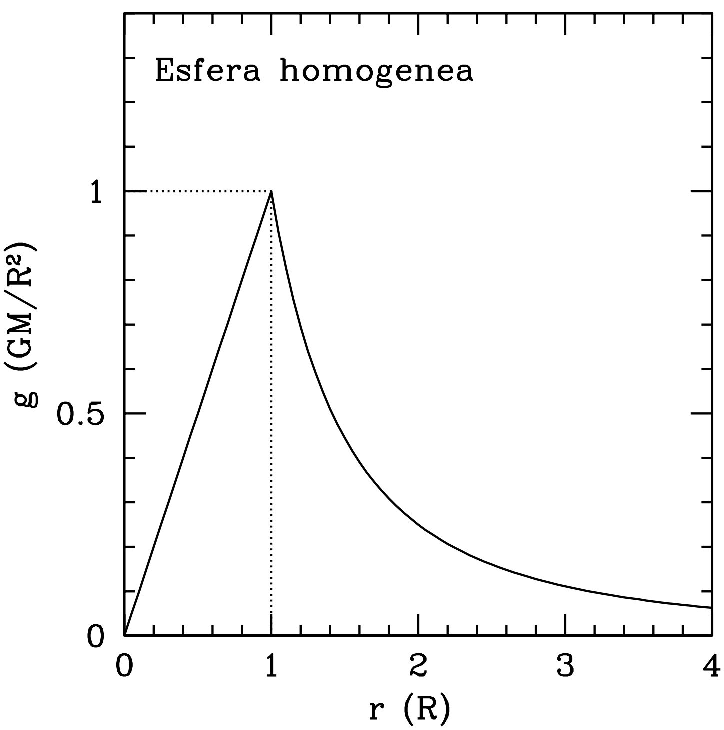

Figura 2: O módulo do campo gravitacional no interior (r < R) e no exterior (r $\geq$ R) de uma esfera homogênea de massa M e raio R (eq. 3). Note a ausência de singularidades.

Os campos gravitacionais do BN e da EH possuem descrições diferentes, mas pode-se mostrar que no limite de campo fraco, i.e., para $r \gg r_S$, o campo da métrica dado pela eq. 1 se reduz à lei gravitacional de Newton (e.g., Soares 2014). Os campos de gravidade do BN e da EH apresentam uma simetria perfeita para grande r. Este não é o caso para pequeno r, $r < r_S$ (BN) e $r < R$ (EH). O campo gravitacional é perfeitamente bem definido para esta e diverge para aquele, ou seja, eles apresentam aqui uma perfeita assimetria.

O campo gravitacional no interior da EH é bem definido inclusive em $r = 0$. Em contraste, o BN tem uma singularidade física no próprio centro da esfera de Schwarzschild. Tal assimetria é notável e indica que alguma coisa muito crucial está ausente na descrição teórica da métrica de Schwarzschild, que é, obviamente, uma teoria de gravidade quântica.

4 A resposta

Uma resposta plausível à questão colocada no título pode ser formulada considerando-se as três extradordinárias características do BN apresentadas nas seções 2 e 3. Elas são:

1. O BN deflagra instabilidades onde quer que se forme (seção 2).

2. A região do espaço-tempo no interior de r_S (o raio do horizonte de eventos) é desconectada causalmente do resto do universo (seção 2).

3. Os campos de gravidade do BN e da EH exibem uma perfeita simetria para r grande, mas uma assimetria perfeita para r pequeno (seção 3).

Não obstante os pontos 1 e 2 acima serem por eles mesmos suficientes para uma resposta "não", o argumento mais significativo para a resposta reside no item 3. A assimetria observada em r pequeno na descrição destes dois objetos clássicos é fundamentalmente uma assimetria entre os domínios físico e não físico. Quer dizer, não é necessariamente obrigatório que os campos gravitacionais sejam os mesmos em raios pequenos como ocorre para os raios grandes. A exigência fundamental é que ambos os campos sejam físicos. Como eles não são, a única resposta possível é "não".

Um objeto físico e bem definido é sugerido em Soares (2017b) como uma alternativa ao BN.

5 Considerações adicionais

Apesar de uma mudança de coordenadas ser capaz de transformar o carácter de uma singularidade de física para não física (seção 2), as singularidades em $r = 0$ e $r = r_S$ permanecem ainda desconfortavelmente concretas nas coordenadas da eq. 1. Além do mais, é concebível que deva existir um sistema de coordenadas no qual a singularidade em $r = 0$ é removida enquanto a singularidade em $r = r_S$ é preservada e, se isto é factível, ser-se-ia levado à conclusão de que as mudanças de coordenadas são meros artefatos matemáticos que no final não são realmente capazes de remover descrições não físicas.

Supondo que a singularidade no raio de Schwarzschild não é, de fato, física, isto não excluiria o fato de que a esfera de Schwarzschild hospede uma singularidade física perfeitamente real. Mas não seria isto suficiente para declarar o BN como um objeto não físico e inexistente na natureza? Não é o chamado "Objeto de Gravitação Extrema"(OGE), proposto por Soares (2017b), um conceito muito mais palatável do que o BN? O OGE possui todas as características físicas de um BN, exceto as singularidades em $r = 0$ e em $r = r_S$.

Manobras matemáticas, tais como mudanças de sistemas de coordenadas, são incapazes de remover as características não físicas de um BN, porque a questão principal em tudo isso é que a TRG é uma teoria de gravidade incompleta, i.e., ainda não existe uma teoria de gravidade quântica que certamente removeria de forma natural ambas as singularidades presentes na métrica de Schwarzschild.

A exposição brilhante e clara de Capelo (2018) é muito útil para aqueles interessados nas maravilhas do intrigante conceito de um buraco negro. O artigo quase abalou a minha convicção de que BNs são a mais sutil expressão de uma "divagação científica"(cf. Soares 2017a) muito refinada.

Suplementarmente, dever-se-ia também ler o artigo escrito por Bernstein (1996), que apresenta uma perspectiva histórica muito interessante sobre buracos negros, que inclui a primeira proposição científica do conceito de buraco negro por J.R. Oppenheimer (1904-1967) e H.S. Snyder (1913-1962) em 1939 e a negação de sua existência por Einstein naquele mesmo ano. O artigo é bastante informativo, sem uma equação sequer, mas o título **"O Relutante Pai dos Buracos Negros"** soou-me intrigante. Inicialmente pareceu-me, obviamente, referir-se a Einstein e deve ter sido esta intenção do autor. Dois pontos, porém, contradizem esta interpretação: Einstein **não foi** o pai dos buracos negros e, consequentemente, **não pode** ter sido relutante. O título, por outro lado, encaixa-se como uma luva em Oppenheimer. Além das afirmações de Bernstein, temos também o depoimento do físico anglo-americano Freeman Dyson sobre a total falta de interesse de Oppenheimer no assunto quando, na década de 1950, Dyson trabalhava no Instituto de Estudos Avanados de Princeton sob a sua direção. O depoimento apresentado em Dyson (2016) deixa isto bem claro.

Agradecimento – A figura 2 foi confeccionada em um dos computadores do Instituto Astronômico Kapteyn, Groningen, Holanda, sob os auspícios do Prof. Reynier Peletier.

Referências

[1] J. Bernstein, *The Reluctant Father of Black Holes* (1996), Sci. Am. 274, 80,
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/brcs/bernstein.txt`

[2] P.R. Capelo, *Astrophysical black holes* (2018), arXiv:1807.06014v1 [astro-ph.HE]]

[3] F.J. Dyson, *Depoimento sobre Oppenheimer* (2016),
`https://www.youtube.com/watch?v=kEAy6ClrDLA`

[4] M.D. Kruskal, *Maximal Extension of Schwarzschild Metric* (1960), Phys. Rev. 119, 1743,
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/brcs/kruskal-1960.pdf`

[5] D. Soares, *Divagação científica: buracos relativistas* (2017a),
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/brcs/brcs.htm`

[6] D. Soares, *Objeto de Gravitação Extrema* (2017b),
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/extn/brcs/oge.htm`

[7] D. Soares, *De Schwarzschild a Newton* (2014),
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/schnew/schnew.pdf`

[8] D. Soares, *Os fundamentos físico-matemáticos da cosmologia relativista* (2012),
`http://lilith.fisica.ufmg.br/dsoares/ensino/cosmrel/cosmrel.htm`