

Sombras de buracos negros

Pedro V. P. da Cunha^{1,2}, Carlos A. R. Herdeiro¹

¹ Departamento de Física da Universidade de Aveiro e CIDMA, Campus de Santiago, 3810-183 Aveiro

² CENTRA, Departamento de Física, IST, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa

cunhapcc@gmail.com; herdeiro@ua.pt

Resumo

Os buracos negros são provavelmente dos objectos mais misteriosos no Cosmos, levando as leis da física ao limite. Actualmente existe um número crescente de evidências experimentais de que o Universo está povoado por estas entidades. No centro da nossa galáxia, a Via Láctea, reside um buraco negro supermassivo denominado Sagitário A*. O que veria alguém que olhasse para um? E o que é a “sombra” de um buraco negro? Este artigo procura responder a estas questões.

Introdução

A teoria da Relatividade Geral de Einstein fez recentemente 100 anos. Uma das suas previsões mais intrigantes, e que gerou inicialmente um grande debate científico sobre o seu significado físico, são os buracos negros. Estes correspondem a regiões no espaço-tempo onde o campo gravitacional é incrivelmente forte, havendo um ponto de não retorno chamado horizonte de eventos a partir do qual nada consegue escapar (pelo menos classicamente), nem mesmo a luz, razão que inspirou John Wheeler a apelidá-los de “buracos negros” no final da década de 60 [1,2].

Existe actualmente um consenso na comunidade científica de que estes objectos deverão ser relativamente comuns no Universo, devendo formar-se no final da vida de estrelas muito massivas. De facto, após as suas reservas de combustível nuclear se terem esgotado, uma estrela massiva entra em colapso gravitacional, podendo dar origem a uma estrela de neutrões. Contudo, há um valor máximo permitido para a massa de uma estrela de neutrões, designado na literatura pelo limite de Tolman–Oppenheimer–Volkoff, e cujo valor é da ordem de três massas solares. Acima deste limite, nenhuma força conhecida consegue sustentar o colapso e o produto final é um buraco negro [1].

Já foram detectados vários objectos com emissão nos raios x que são fortes candidatos a buracos negros, com massas entre 5 a 30 massas solares [3]. Inclusivamente, no

dia 14 de Setembro de 2015, foram detectadas pela primeira vez ondas gravitacionais, sendo a forma do sinal a esperada pela Relatividade Geral para a coalescência de dois buracos negros com respectivamente 36 e 29 massas solares [4]. Esta foi também a primeira observação indirecta de uma colisão de buracos negros.

Contudo, existem buracos negros muito maiores do que os já mencionados, chegando a ser milhões de vezes mais massivos. Na verdade, no centro de muitas galáxias, habita um destes buracos negros supermassivos, e a nossa galáxia não é excepção. De facto, no centro da Via Láctea foram observadas estrelas a orbitar um corpo denominado Sagitário A* e, a partir das características das órbitas, foi possível inferir que este objecto compacto tem 4 milhões de massas solares, e que deverá ser um buraco negro supermassivo [5].

Ao longo dos últimos anos, tem-se descoberto que existe uma correlação entre certas propriedades das galáxias e a massa do buraco negro supermassivo nos respectivos centros. Tal descoberta é intrigante, pois significa que apesar de estes buracos negros serem tipicamente 100 milhões de vezes mais pequenos do que toda a galáxia, influenciam propriedades globais da galáxia-mãe [3].

Sombras

Contudo, já alguma vez alguém “viu” um buraco negro? E se estes são “negro”, seria possível ver alguma coisa?

Até hoje, os telescópios ainda não têm a resolução necessária para observar buracos negros à escala do horizonte de eventos. No entanto, devido à sua proximidade e tamanho, Sagitário A* encontra-se no limiar da resolução necessária, existindo neste momento um projecto internacional chamado *Event*



Fig. 1 - Simulação numérica da sombra de um buraco negro com a luz de fundo de estrelas. Esta imagem não é uma fotografia astronómica.

Horizon Telescope cujo objectivo é fazer precisamente essa observação. Para o efeito, será utilizada uma rede de telescópios espalhados pelo planeta, permitindo assim obter uma resolução sem precedentes [5].

Não obstante, recorrendo à Relatividade Geral é possível prever o que poderia ser o aspecto de um buraco negro caso alguém lhe tirasse uma fotografia. O que se espera observar é uma mancha negra na imagem, contrastando com a luz de fundo (Figura 1). O facto de haver luz nas proximidades do buraco negro é, portanto, importante. A esta região negra na imagem é dada o nome de sombra e, devido ao efeito de lente gravitacional, a sua forma não é necessariamente simples [6]. De facto, a sombra apenas depende da geometria do espaço-tempo na vizinhança do horizonte de eventos, e como tal, poderia ser usada para distinguir diferentes tipos de buracos negros.

Apesar de em alguns casos particulares se poder obter a forma da sombra analiticamente, geralmente tal não é possível, sendo necessário recorrer a métodos numéricos.

Ray-tracing

Na Relatividade Geral, os raios de luz seguem trajetórias especiais chamadas geodésicas. Resolvendo a equação que descreve as geodésicas, é possível prever o trajecto dos raios de luz. Uma maneira engenhosa de simular uma fotografia seria então propagar estes raios desde as fontes de luz e analisar os que chegassem à máquina fotográfica.

Contudo, este procedimento é muito ineficiente, uma vez que a maioria dos raios de luz nunca chegariam à máquina e seria portanto um desperdício de poder de cálculo.

Na verdade, a maneira mais eficiente de simular uma fotografia numericamente é propagar os raios de luz a partir da câmara e *para trás no tempo*, ou seja partindo da posição final e detectando o ponto de partida (Figura 2) [7]. Este procedimento, denominado de *backwards ray-tracing*, é também implementado em alguns jogos de computador, apesar de nesse caso os raios de luz seguirem trajetórias rectas e simples. Se alguns raios de luz atravessarem o horizonte de eventos do buraco negro, então tal implica que não houve luz que veio daquela direcção, e o pixel correspondente na imagem será preto.

Tal como já foi referido, um aspecto crucial para conseguir discernir a sombra é haver luz de fundo para ter contraste.

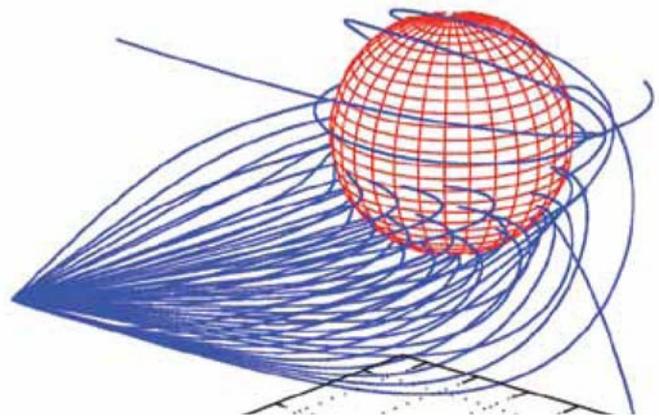


Fig. 2 - Propagação de raios de luz (azul) a partir da posição da máquina fotográfica (ponto de bifurcação). A esfera vermelha representa um buraco negro com rotação (Kerr) [9].



Fig. 3 - Simulação numérica da sombra de um buraco negro com um padrão de fundo diferente, nomeadamente o logótipo da *Gazeta de Física*.

Em termos astrofísicos, esta luz poderá vir do disco de acreção que circunda o buraco negro na sua proximidade. Esta situação é representada no recente filme de ficção científica *Interstellar* [7,8]. Contudo, para efeitos didácticos, pode-se considerar a situação idealizada de ter como fonte de luz as estrelas longínquas. Este caso está representado na Figura 1. O chamado anel de Einstein sobressai com facilidade nessa imagem. Dentro deste anel encontra-se representado todo o céu, havendo uma estrutura de repetição à medida que nos aproximamos do contorno da sombra. Por curiosidade, o padrão de fundo pode ser mudado (Figura 3) [9].

Conclusões

Resolvendo as equações de propagação dos raios de luz na Relatividade Geral, é possível prever teoricamente o que alguém veria se tirasse uma fotografia a um buraco negro. Nomeadamente, se houver luz de fundo que permita ter contraste, é possível discernir a sombra do buraco negro. Apesar de nenhuma sombra ter ainda sido detectada, há um projecto internacional chamado *Event Horizon Telescope* que pretende observar a sombra do buraco supermassivo Sagitário A* no centro da nossa galáxia.

Agradecimentos

Pedro Cunha é suportado pela bolsa de doutoramento N° PD/BD/114071/2015 FCT-IDPASC e pela fundação Calouste Gulbenkian através do Prémio de Estímulo à Investigação 2015.

Por opção pessoal, os autores do texto não escrevem segundo o novo Acordo Ortográfico.

Referências

1. V. P. Frolov e I. D. Novikov, *Black Hole Physics: Basic concepts and new developments*. Kluwer Academic Publishers (1998).
2. K. Thorne, *The Science of Interstellar*. WW Norton & Company (2014).
3. R. Narayan e J. E. McClintock, "Observational evidence for black holes," arXiv preprint:1312.6698 (2013).
4. B.P.Abbott *et al.* (Ligo Scientific Collaboration and Virgo Collaboration) "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger", *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).

Referências (cont.)

5. R.-S. Lu, A. E. Broderick, F. Baron, J. D. Monnier, V. L. Fish, S. S. Doeleman, e V. Pankratius, "Imaging the supermassive black hole shadow and jet base of M87 with the event horizon telescope," *The Astrophysical Journal* 788(2), 120 (2014).
6. J. M. Bardeen, "Timelike and null geodesics in the Kerr metric", C. Witt e B. Witt, editors, *Black Holes*, pp. 215 (1973).
7. O. James, E. von Tunzelmann, P. Franklin, e K. S. Thorne, "Gravitational lensing by spinning black holes in astrophysics, and in the movie *Interstellar*" arXiv preprint: 1502.03808 (2015).
8. P. Cunha "Física do filme *Interstellar*", *Gazeta de Física* 38 (1), 18 (2015).
9. P. Cunha *Black Hole Shadows*, Tese Mestrado, Universidade de Coimbra (2015).



Pedro Cunha licenciou-se em física na Universidade de Coimbra, tendo terminado o mestrado em Astrofísica e Instrumentação para o Espaço na mesma universidade. É estudante de doutoramento em Física no Instituto Superior Técnico (IST), tendo também como instituição de acolhimento a Universidade de Aveiro. Recebeu em 2015 um prémio de Estímulo à Investigação da Fundação Calouste Gulbenkian pelo seu trabalho em sombras de buracos negros com cabelo escalar.



Carlos Herdeiro é Professor Auxiliar com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro e também investigador do Centro de Investigação e Desenvolvimento em Matemática e Aplicações (CIDMA), nas áreas de Gravitação, Cosmologia e Física das Altas Energias. A sua pesquisa actual incide sobretudo na física de buracos negros. Doutorou-se em 2001 na Universidade de Cambridge (Reino Unido), e foi *post-doc* na Universidade de Stanford (EUA) e na Faculdade de Ciências da Universidade do Porto. Fundou o grupo de Gravitação Gr@v na Universidade de Aveiro em 2010, grupo do qual é actualmente o coordenador científico. É autor de mais de uma centena de artigos em jornais de circulação internacional nesta área científica.