

# A galáxia M87 e a sombra de buracos negros

Pedro V.P. da Cunha<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dept. de Matemática da Universidade de Aveiro e CIDMA, Campus de Santiago, 3810-183 Aveiro, Portugal

pvcunha@ua.pt

## Abstract

*A 10 abril de 2019, foi publicada a primeira fotografia astronómica de um buraco negro e da sua misteriosa sombra. Esta imagem, amplamente partilhada pela comunicação social no mundo, abriu um novo capítulo na história da Ciência. Um dos motivos para a sua importância é o facto de esta fotografia permitir sondar o campo gravitacional extremo em redor de um buraco negro, abrindo assim a porta a novos testes à teoria da Relatividade Geral de Einstein, num regime praticamente inexplorado. A incrível complexidade do processo para obter esta fotografia é um feito inatingível por um único ser humano que merece também ser celebrado como uma vitória da engenhosidade e cooperação humanas. Este artigo pretende esclarecer o leitor curioso que queira saber mais sobre esta observação significativa, que permitiu conferir aos buracos negros uma acrescida credibilidade experimental, certamente determinante para a atribuição do prémio Nobel da Física 2020.*

## 1. Introdução

Há muito tempo, numa galáxia muito, muito distante... o buraco negro monstruoso M87\* encontrava-se na sua habitual rotina de consumir enormes quantidades de gás interstelar, num ritmo equivalente à absorção da massa do planeta Terra a cada 15 minutos. Este gás e poeira cósmica, acelerado pelo campo gravitacional de M87\*, formava um turbilhão diabólico com velocidades próximas da luz, emitindo no processo enormes quantidades de radiação eletromagnética, num evento de uma luminosidade colossal. Estes raios de luz iniciaram assim uma viagem intrépida aos confins do Cosmos em todas as direções. Para os raios que foram enviados (por acaso) na direção do nosso planeta, a viagem demorou quase 53 milhões de anos, aproximadamente desde a origem dos primeiros primatas (antropóides) na Terra até à sua deteção no ano de 2017 [1, 2]. Essa luz, ao ser detetada, irá dar forma à mundialmente famosa imagem de M87\* na Fig. 1, uma fotografia do evento luminoso colossal que teve lugar em seu redor há quase 53 milhões de anos atrás.

O ano de 2017 foi o ano em que o Telescópio do Horizonte de Eventos (Event Horizon Telescope) alcançou finalmente a resolução necessária para conseguir observar M87\* a uma escala comparável à do seu horizonte de eventos [1-3]. O horizonte de eventos determina a fronteira do buraco negro, ou seja delimita a região do espaço-tempo onde o campo gravitacional é tão intenso que nada consegue es-



Figura 1 - Primeira fotografia de um buraco negro: o objeto M87\*, observado em 2017 pelo Telescópio do Horizonte de Eventos, e divulgada ao público em 2019 [1].

capar do seu interior, nem mesmo a luz. Existe atualmente um consenso na comunidade científica de que os Buracos Negros deverão ser relativamente comuns no Universo, com os maiores Buracos Negros a residir no centro das galáxias. Esse é precisamente o caso de M87\*, que reside no centro da galáxia Messier 87, e visível na Constelação da Virgem. Curiosamente, M87\* encontra-se entre os maiores buracos negros que se conhecem atualmente, com uma massa cerca de 6 mil milhões de vezes maior que a do nosso Sol. Com este tamanho colossal, M87\* poderia conter no seu interior todo o nosso sistema solar... e ficar ainda com espaço disponível. Na verdade, o horizonte de M87\* ficaria mais perto

da localização atual da Voyager 1 do que da órbita de Plutão. Como referência, a Voyager 1 é o objeto construído por humanos que se encontra mais distante da Terra, e encontra-se a entrar já no espaço interstelar, fora da influência do Sol.

É este tamanho colossal de M87\* que permite compensar a enorme distância a que este se encontra da Terra e ainda assim ser visível. Como a nossa experiência diária sugere, uma casa ao fundo de uma rua comprida aparenta ser mais pequena aos nossos olhos do que uma casa mais próxima. Naturalmente, não é a casa que diminui realmente de tamanho mas sim o “ângulo de observação” do objeto, que diminui rapidamente com a distância. Por isso, apenas objetos grandes podem compensar a redução do ângulo de observação para distâncias também grandes. O Sol é um exemplo: é visível a olho nu com um ângulo razoavelmente grande (0,5 graus), apesar da distância elevada a que se encontra. Em comparação, o planeta Júpiter tem (no máximo) um ângulo de observação de cerca de 0,014 graus, cerca de 40 vezes mais pequeno. Os nossos olhos não têm resolução suficiente para conseguir ver os detalhes do planeta Júpiter a olho nu. Mas é possível fazê-lo aumentando 40 vezes o tamanho dos nossos “olhos”, se substituirmos as nossas pupilas de 4 mm por uma objetiva de 16 cm de um telescópio astronómico amador.

No caso de M87\*, o ângulo de observação é consideravelmente mais desafiante: é cerca de 2 milhões de vezes mais pequeno do que o de Júpiter: 0,000 000 006°. Este ângulo é comparável ao da observação de um átomo na palma da sua mão, ou a olhar para uma moeda de dois euros na superfície da Lua. Em termos práticos, para conseguir observar M87\* seria necessário um telescópio com uma objetiva do tamanho do mundo.

Mas como pode isso ser possível?

## 2. O Telescópio do Horizonte de Eventos

Nenhum telescópio individual possui a resolução necessária para observar M87\* diretamente. A solução reside numa técnica astronómica que já é usada há mais de 40 décadas: a Interferometria de Longa Linha de Base (*Very Long Baseline Interferometry*), ou sigla VLBI em Inglês. A técnica VLBI permite aumentar artificialmente a resolução ao combinar dados de vários telescópios individuais que estão bastante afastados fisicamente. Analisando ligeiras variações do sinal detetado pela rede de telescópios, é possível simular o efeito de um telescópio gigante com o tamanho da distância típica entre os telescópios individuais.

A colaboração do Telescópio do Horizonte de Eventos levou o conceito do VLBI ao limite: ao combinar dados de vários observatórios astronómicos em diferentes pontos do planeta numa estrutura em rede, é possível formar um telescópio virtual do tamanho da Terra! Coordenar todos os nós desta rede é um desafio técnico e logístico considerável, que requer uma coordenação precisa entre as estações. Para a observação de M87\* em 2017 foram usados oito telescópios em localizações distintas da Terra, nomeadamente nos Estados Unidos, México, Chile, Espanha e Polo Sul (ver Fig. 2). Utilizando esta rede de

VLBI foi possível atingir o limiar de resolução necessária para observar a escala do horizonte de M87\*.

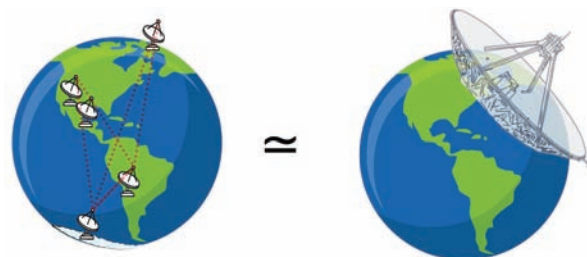


Figura 2 - Ao combinar dados de vários observatórios astronómicos em diferentes pontos do planeta numa estrutura em rede, é possível formar um telescópio virtual do tamanho da Terra. Para a observação de M87\* em 2017 foram usados observatórios nos Estados Unidos, México, Chile, Espanha e Polo Sul.

Como funciona este processo? As estações de observação da rede VLBI recolhem sinais eletromagnéticos de M87\* na banda dos microondas, e digitalizam no total cerca de 10 petabytes (10 milhões gigabytes =  $10^7$  gigabytes) de informação em discos rígidos. Estes discos das diferentes estações de VLBI são transportados fisicamente por avião para uma base de análise central, onde todos os discos rígidos são reunidos. O motivo para este transporte por avião é simples: é mais rápido do que enviar pela Internet este gigantesco volume de dados. De facto, com uma taxa típica de download na Internet de um Megabyte por segundo, demoraríamos mais de 300 anos a transferir todo esse volume de dados. Na base central, um supercomputador combina os sinais dos diferentes telescópios, agindo como se estes fizessem parte de pequenas componentes de um telescópio do tamanho da Terra. Este processo, quando combinado com técnicas de calibração e filtragem sofisticadas do sinal, permite reduzir o volume de dados dos 10 petabytes iniciais para 10 megabytes em disco. Num passo final, técnicas de imagem permitem reconstruir a imagem de M87\* (Fig. 1) que terá dado origem ao sinal inicial. Num enorme feito de análise de dados, esta imagem final de M87\* com cerca de 10 kilobytes é cerca de um bilião ( $10^{12}$ ) de vezes mais pequena que o volume de informação inicial em bruto, recolhida pelas estações de VLBI.

Na imagem de M87\* (Fig. 1) é muito clara a existência de um anel luminoso, com uma região central mais escura. Mas o que se esperava ver na imagem de M87\* exatamente? Para compreender a imagem observada é preciso primeiro discutir o que é a sombra de um buraco negro.

## 3. A sombra de buracos negros

Em termos gerais, como podemos ver um objeto negro se este não emite ou reflete luz? Esta questão tem uma resposta surpreendentemente simples: se tivermos luz de contraste suficiente, a presença de um objeto escuro é denunciada pela redução de

luz que pode provocar numa imagem, ou seja pela sua sombra. Um exemplo simples é o seguinte: um gato (totalmente) preto pode ser claramente visível à noite se existir um candeeiro por detrás do gato. A imagem do gato pode até ser capturada numa fotografia, uma vez que este constitui um obstáculo à luz do candeeiro e cria uma penumbra na fotografia com a sua forma, na região onde há absorção da luz. Ao analisar as características da sombra do gato na fotografia é possível inferir algumas propriedades, como por exemplo o seu tamanho e forma.

A sombra de um buraco negro segue alguns destes princípios simples, apesar de haver algumas diferenças importantes. Antes de mais, a luz de contraste necessária para detetar o buraco negro provém do disco de gás e plasma luminoso em seu redor (Fig. 3).

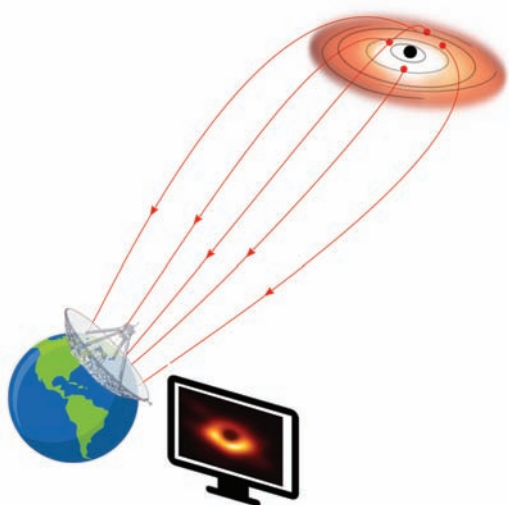


Figura 3 - A luz de contraste necessária para detetar o buraco negro provém do disco de gás e plasma luminoso em seu redor. As estações de observação da rede VLBI recolhem esta radiação eletromagnética de M87\* para formar a imagem.

Adicionalmente, a sombra do buraco negro não corresponde exatamente a uma imagem do horizonte de eventos, mas sim a um conjunto de órbitas especiais de raios de luz. O motivo é relativamente simples de compreender: a sombra do buraco negro é determinada pelos raios de luz que são absorvidos por este e que portanto não chegam à Terra. No entanto, devido ao enorme campo gravitacional, a trajetória dos raios de luz que passam perto do buraco negro são encurvadas. No caso de um raio de luz se aproximar o suficiente, a trajetória poderá encurvar o necessário para descrever várias voltas completas em redor do buraco negro antes de conseguir escapar. A condição limite entre um raio de luz que consegue escapar *in extremis*, e a de um raio que cai no buraco negro, é dada por órbitas de luz especiais que não escapam nem caem dentro do buraco negro. Ou seja, órbitas que ficam indefinidamente presas em redor do buraco negro.

O exemplo mais simples deste género de órbitas é circular e fechada, onde um raio de luz pode (teoricamente) ficar eternamente a orbitar o buraco negro sem nunca cair ou escapar. No cenário mais simples, todas estas órbitas circulares encontram-se circunscritas à superfície de uma esfera, denominada como a Esfera de Fotões. O contorno da sombra do buraco negro é precisamente uma imagem desta esfera, e não do horizonte de eventos propriamente dito. A fronteira da sombra é facilmente identificável num contexto astrofísico (ver Fig. 4), uma vez que quando iluminada pela luz do disco de plasma o contorno da sombra é visível como um anel brilhante quasi-circular, contendo uma região de luminosidade reduzida no seu interior (a sombra).

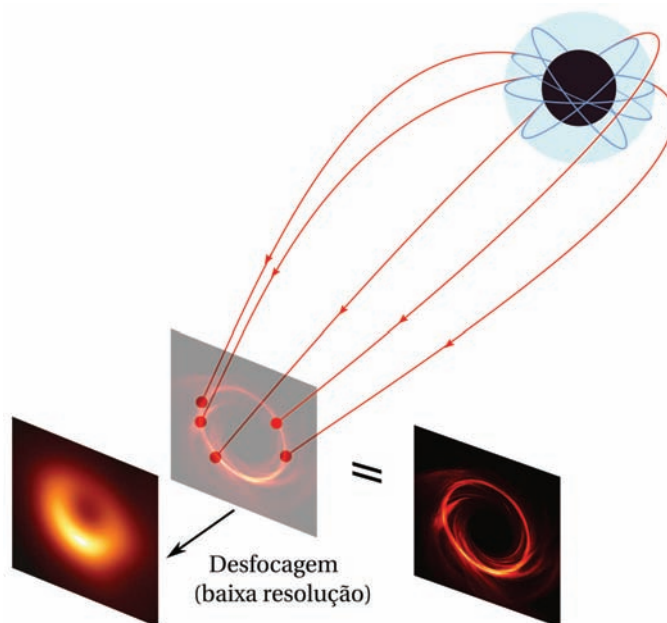


Figura 4 - O contorno da sombra do buraco negro é uma imagem da Esfera de Fotões (representada a azul), e não do horizonte de eventos (representado a preto). Tendo luz de contraste, a fronteira da sombra é facilmente visível na fotografia como um anel brilhante quasi-circular, com uma região interior de luminosidade reduzida. Para compararmos a imagem simulada de M87\* com a fotografia real na Fig. 1, temos primeiro de desfocar a imagem simulada. Imagem simulada adaptada de [1, 3].

O tamanho e forma deste anel luminoso pode ser analisado usando simulações numéricas de raios de luz em volta de um buraco negro, assumindo que a descrição da gravidade é corretamente dada pela Relatividade Geral de Einstein. Para compararmos a imagem simulada de M87\* com a fotografia real, temos primeiro de desfocar a imagem simulada de forma a reproduzir o efeito da baixa resolução angular da rede VLBI. Após esta redução de resolução, a imagem prevista da Relatividade Geral para M87\* está completamente consistente com o observado pelo Telescópio do Horizonte de Eventos. Este é certamente um triunfo para a ciência e para a Relatividade Geral. Apesar desta fotografia de M87\* ter sido o culminar de muitos anos de trabalho, o caminho está longe de ter terminado. Pelo contrário, esta imagem do Telescópio do Horizonte de Eventos inaugura uma nova era na astrofísica onde os buracos negros podem ser fotografados como objetos astronómicos convencionais, e não encarados como entida-

des puramente teóricas e abstratas. Esta é uma fotografia à qual se pode aplicar, literalmente, a expressão popular de “ver para crer”.

Quais são os próximos passos deste novo caminho?

#### 4. Os próximos 100 anos

Antecipar os avanços científicos que terão lugar durante as próximas décadas é bastante desafiante. Contudo, algumas das etapas que se seguem já se encontram em desenvolvimento. Um dos próximos buracos negros a ser fotografado após M87\* dever a ser Sagitário A\*, o buraco negro supermassivo localizado no centro da nossa galáxia, a Via Láctea. Apesar de Sagitário A\* ser cerca de 1000 vezes mais pequeno que M87\*, encontra-se também cerca de 1000 vezes mais próximo da Terra, e portanto o ângulo de observação é comparável. Existe a expectativa de que a primeira fotografia de Sagitário A\* seja publicada ainda durante o ano 2021.

A próxima geração do Telescópio do Horizonte de Eventos encontra-se também em preparação. A fase de planeamento irá ter lugar até 2024, enquanto que a fase de construção de dez novas estações terrestres está prevista estender-se até 2030 [4]. A integração destas novas estações na rede de VLBI irá permitir melhorar a qualidade da imagem de forma significativa e obter imagens de vídeo de M87\* e Sagitário A\*. Existem igualmente planos para expandir a rede VLBI para o espaço, incluindo nomeadamente um satélite em órbita em volta da Terra. Isso permitiria duplicar a resolução atual da fotografia de M87\* [5-7].

Desenvolvimentos posteriores a 2030-2040 encontram-se ainda em termos bastante incertos e no domínio da especulação. Numa perspetiva otimista, poderemos assumir que avanços substanciais em viagens interplanetárias terão lugar durante os próximos 100 anos. Ao adicionar à rede VLBI uma estação permanente na Lua, a resolução da observação iria aumentar quase 60 vezes, enquanto que uma estação em Marte aumentaria a resolução milhares de vezes. Tais desenvolvimentos permitiriam, a existir, obter fotografias de resolução extremamente elevada e sensíveis a desvios mínimos à previsão da Relatividade Geral. Há ainda várias questões em aberto relativas ao comportamento das leis da Mecânica Quântica no contexto de campos gravitacionais fortes. Estas e outras questões poderão vir a ser resolvidas com fotografias de alta precisão de buracos negros.

Existe um longo caminho para as próximas décadas que terá de ser percorrido pelas novas gerações. Os alunos do ensino secundário e universitário de hoje encontram-se em condições privilegiadas de participar nesta jornada. A fotografia de M87\* é um enorme feito que esperamos que possa inspirar alunos a contribuir para as grandes descobertas científicas do amanhã.

#### 5. Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao Prof. Carlos Herdeiro e ao Prof. José Sande Lemos por comentários sobre uma versão inicial do artigo. Este trabalho é suportado pelo Centro de Investigação e Desenvolvimento em Ma-

temática e Aplicações (CIDMA) através da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), referências BIPD/UI97/7484/2020, UIDB/04106/2020 and UIDP/04106/2020. Este trabalho é também suportado pelos projectos PTDC/FIS-OUT/28407/2017, CERN/FISPAR/0027/2019 e PTDC/FIS-AST/3041/2020 e ao abrigo da COST ActionCA16104.

#### References

- [1] K. Akiyama *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole,” *Astrophys. J.*, vol. 875, no. 1, p. L1, 2019, arXiv:1906.11238.
- [2] C. Goddi *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results and the Role of ALMA,” *The Messenger*, vol. 177, pp. 25-35, 2019, a Xiv:1910.10193.
- [3] K. Akiyama *et al.*, “First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring,” *Astrophys. J.*, vol. 875, no. 1, p. L5, 2019.
- [4] L. Blackburn *et al.*, “Studying Black Holes on Horizon Scales with VLBI Ground Arrays,” 9 2019, arXiv:1909.01411.
- [5] K. Haworth *et al.*, “Studying black holes on horizon scales with space-VLBI,” 9 2019, arXiv:1909.01405.
- [6] L. I. Gurvits *et al.*, “TeraHertz Exploration and Zooming-in for Astrophysics (THEZA): ESA Voyage 2050 White Paper,” 8 2019, arXiv:1908.10767.
- [7] C. M. Fromm, Y. Mizuno, Z. Younsi, H. Olivares, O. Porth, M. De Laurentis, H. Falcke, M. Kramer, and L. Rezzolla, “Using space-VLBI to probe gravity around Sgr A\*,” 1 2021, arXiv:2101.08618.



Pedro Cunha, obteve o doutoramento no Instituto Superior Técnico (IST) em Física. Foi investigador no Instituto Max-Planck na Alemanha, e mudou-se recentemente para a Universidade de Aveiro. É co-autor de vários artigos e trabalhos de investigação em sombras de buracos negros.