

O “buraco negro” no centro da nossa galáxia e o Prémio Nobel 2020

Paulo J.V. Garcia¹, António Amorim²

¹ CENTRA e FEUP, Universidade do Porto

² CENTRA e FEUP, Universidade de Lisboa

Metade do Prémio Nobel da Física do ano de 2020 foi atribuído conjuntamente a Reinhard Genzel e Andrea Ghez pela “descoberta de um objeto compacto supermassivo no centro da nossa galáxia”. Neste artigo, tentamos explicar esta descoberta usando conhecimentos de Física do 12.º ano e uma linguagem coloquial. A nossa abordagem não é histórica, tenta apenas, usando o conhecimento atual, explicar a descoberta.

O artigo inicia-se por uma contextualização do “buraco negro” na nossa galáxia e do método usado na medição da sua massa. Seguidamente, o instrumento GRAVITY, que foi central nas descobertas, é apresentado assim como as deteções do desvio para o vermelho gravitacional e da precessão de Schwarzschild. Terminamos com uma contextualização destas descobertas.

A nossa galáxia é um disco

Vivemos numa galáxia com forma aproximada¹ de um disco com espirais de gás, poeira e estrelas, o disco tem uma espessura de cerca de 0.3 kpc (a luz demora cerca de 3,3 anos a viajar 1 kpc) e diâmetro de cerca de 50 kpc². A primeira pergunta que nos surge é como sabemos que a galáxia tem esta forma? Uma resposta pode ser encontrada nas estrelas. Se mapearmos as estrelas da galáxia (com, por exemplo, o satélite espacial Gaia³) conseguimos medir a posição angular no céu de cada estrela. Usando um método chamado paralaxe⁴, podemos também obter a distância da estrela. Combinada com a posição angular, a distância, permite-nos derivar para cada estrela a sua posição tridimensional em relação ao Sol.

Um “buraco negro” “micromassivo” quando comparado com a galáxia

Uma pergunta importante é qual é a massa da galáxia? Antes de respondermos a esta pergunta vamos pensar num problema mais simples, na órbita circular de raio r de um planeta (por exemplo a Terra, de massa m), em torno de um sol (por exemplo o Sol, de massa M). A sua energia mecânica (E_m) é a soma da energia potencial gravítica (E_{pg}) com a energia cinética (E_k):

$$E_m = E_{pg} + E_k$$

A energia potencial gravítica é

$$E_{pg} = -GMm/r$$

onde G é a constante gravitacional.

Como a trajetória é circular sabemos que a aceleração é v^2/r e a 2.ª lei de Newton escreve-se $m v^2/r = GMm/r^2$

o que implica que a energia cinética é $-1/2$ da energia potencial gravítica

$$E_k = 1/2 m v^2 = 1/2 GMm/r = -1/2 E_{pg}$$

Substituindo temos que a energia mecânica do sistema é metade da energia potencial gravítica

$$E_m = 1/2 E_{pg}$$

Este resultado é um exemplo do teorema do virial que permite, para sistemas físicos com dimensões limitadas no espaço, relacionar a energia cinética média com a energia potencial (gravítica) média. Por exemplo, se soubermos a energia cinética do planeta e a distância a que se encontra da estrela, podemos obter a massa da estrela a partir da energia potencial.

O satélite Gaia também permite medir o movimento tridimensional das estrelas no céu, que nos permite estimar a sua energia cinética. Equipados com a energia cinética, estimamos a energia potencial e a massa do objeto central. Usando aglomerados estelares Laura Atkins e colegas [2] estimaram a massa da galáxia em cerca de $1,5 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$. Esta massa é muito maior que a massa em estrelas (que pode ser estimada por exemplo pelo Gaia).

Na Tabela 1, algumas massas das componentes da nossa galáxia são apresentadas. O resultado mais marcante é que a maior parte da massa da nossa galáxia é massa escura, noutra forma que estrelas, gás ou poeira. Por outro lado, outro resultado marcante é que a massa do “buraco negro” no centro da nossa galáxia é minúscula comparada com o todo! A massa é cerca de 10^{-6} da massa da galáxia, é um “buraco negro” “micromassivo”. A esta

¹ Esta forma aproximada é suficiente para este artigo, não pretendemos apresentar os detalhes da estrutura da galáxia.

² Este disco encontra-se imerso num halo (nuvem esférica) de matéria escura quase cinco vezes maior.

³ https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Gaia_overview (acedido a 2021.07.01)

⁴ Ver por exemplo, o capítulo 3.1 de [1].

massa corresponde um raio de Schwarzschild de apenas 8% do raio da órbita terrestre (uma unidade astronómica).

Massa do Sol (M_{sun})	2×10^{30} kg
Massa do “Buraco Negro”	$4 \times 10^6 (M_{\text{sun}})$
Massa da galáxia	$1,5 \times 10^{12} (M_{\text{sun}})$
Massa em estrelas	$9 \times 10^{10} (M_{\text{sun}})$
Massa em poeira e gás	$5 \times 10^9 (M_{\text{sun}})$
Massa em “matéria escura”	$1,5 \times 10^{12} (M_{\text{sun}})$

Tabela 1 - Massas da nossa galáxia (adaptado de [1])

Um “buraco negro” brilhante

Se o “buraco negro” no centro da galáxia tem tão pouca massa, como foi possível detetá-lo? Uma primeira resposta poderia ser: porque é brilhante! No entanto não é uma resposta óbvia. O “buraco negro” e o Sol encontram-se no plano da galáxia, a uma distância muito significativa um do outro. O gás e da poeira da galáxia concentram-se no seu plano. A maior parte da luz visível emitida pela vizinhança do “buraco negro” não chega a um observador na Terra, porque é espalhada para fora do caminho ótico. O efeito é tão forte que se a mesma quantidade de poeira estivesse entre o Sol e a Terra, o Sol seria cerca de 3 vezes mais tênue que Estrela Polar! Por outro lado, esta quantidade enorme de poeira emite radiação numa região do espectro eletromagnético de dezenas de mm, dado pela lei do deslocamento de Wien para a temperatura da poeira, ofuscando a visão para o centro da galáxia (nessa região do espectro eletromagnético). Historicamente, o centro galáctico foi identificado como uma região de enorme luminosidade na região do espectro eletromagnético de ondas rádio com comprimento de onda de 20 cm. No entanto, a região emissora tinha uma extensão angular muito grande, não permitindo estudar com precisão a vizinhança do “buraco negro”. Esta extensão angular estava ligada quer ao processo físico e ao material que emitia a radiação e em menor escala à difração angular. Estes efeitos ilustram que para estudar com grande precisão angular o centro galáctico e a região relativamente próxima do “buraco negro” é necessário escolher um comprimento de onda otimizado simultaneamente para a deteção pelo telescópio e para o objeto emissor. O comprimento de onda de cerca de $2 \mu\text{m}$, é suficiente para a difração da radiação ser pequena, mas grande o suficiente para existirem muitos fótons e haver um grande sinal-ruído nas medições. Outra vantagem é que as estrelas emitem muita radiação neste comprimento de onda. É assim possível estudar o seu movimento. A $2 \mu\text{m}$ o “buraco negro” tem a aparência de uma estrela cuja emissão varia no tempo. Pensa-se que esta emissão tem lugar na vizinhança do “buraco negro”, a escalas angulares de centenas de microssegundos de arco, num disco de matéria que espirala na direção do horizonte, desaparecendo de vista. Neste disco têm lugar processos energéticos⁵ que estão na origem da emissão observada.

Pesando o “buraco negro”

Estamos agora preparados para perceber melhor a componente experimental do prémio Nobel da Física de 2020. Se obtivermos imagens do centro da galáxia a $2 \mu\text{m}$ é possível ver um aglomerado de estrelas. Existe uma densidade tão grande de estrelas que elas estão

muitas vezes sobrepostas. É por isso fundamental ter imagens com a maior acuidade angular possível e as primeiras duas décadas (1990-2010) foram investidas no afinar de tecnologias de óptica adaptativa que permitiam aos telescópios gigantes de 8 m e 10 m de diâmetro operando na terra terem uma acuidade angular melhor que o telescópio Hubble no espaço. Equipados com essas imagens foram medidas as órbitas das estrelas, isto é, posições angulares no espaço versus tempo. Mas as imagens não são suficientes, porque apenas medem ângulos. É necessário também medir velocidades radiais, por efeito Doppler, a partir de espectros da estrela. Esta velocidade permite obter uma medida absoluta e não apenas angular. É esse o truque que permite, a partir da combinação dos dois tipos de medições obter, quer a massa do objeto central, quer a distância a que este se encontra da Terra.

Tecnicamente a parte complicada são as medições e o ajuste não-linear a estas, usando um elevado número de parâmetros. A facilidade do problema está na Física, apenas é ajustada a órbita de um corpo em torno de um potencial gravítico pontual. Durante essas duas décadas foi possível encontrar uma estrela – S2 – numa órbita suficientemente curta (16 anos) que permitiu estimar a massa de um objeto compacto com cerca de $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$, assim como uma distância da Terra de cerca de 8 kpc. Para termos noção da importância da acuidade visual, a órbita elíptica da estrela tem um eixo maior de apenas 0,2 segundos de arco, cerca de 10 vezes menor que o tamanho angular de uma estrela vista de uma cidade em Portugal⁶!

Um “Ferrari” europeu

Nos finais da década de 2000, equipados com uma órbita precisa da estrela S2 previu-se que esta passaria pelo ponto mais próximo do “buraco negro” em 2018. A separação angular da estrela em relação ao “buraco negro” seria de apenas 14 milissegundos de arco! Seria impossível de detetar pois é uma separação cerca de 4 vezes menor que o critério de Rayleigh para o comprimento de onda de $2 \mu\text{m}$ e um telescópio de 8 m – a estrela e a emissão na vizinhança do buraco negro misturar-se-iam.

Para ultrapassar esta dificuldade foi construído um instrumento que foi acoplado ao interferómetro VLTI, operado pelo Observatório Europeu Austral (ESO), no Chile. Um interferómetro infravermelho ao manter a coerência luminosa permite obter informação angular semelhante a um telescópio com um espelho do tamanho da separação dos telescópios. Como o VLTI combina quatro telescópios de 8 m e a separação máxima é de 90 m, era possível ganhar um fator 11 e ter um critério de Rayleigh efetivo três vezes menor que a separação que se queria medir.

O final da década de 2000 e grande parte da década de 2010 foi passado a construir o instrumento GRAVITY, num consórcio em que participavam alemães, franceses e portugueses. A equipa portuguesa foi responsável pelo sub-

⁵ Por exemplo radiação de sincrotrão por elétrons acelerados em campos magnéticos na vizinhança do “buraco negro”.

⁶ O diâmetro angular das estrelas quando observadas a partir da Terra é dominado por efeitos óticos ligados à turbulência atmosférica. À exceção do Sol não se observa diâmetro angular real das estrelas.

sistema câmara de aquisição. Em 2016, o GRAVITY foi instalado nos telescópios do Chile tendo feito as primeiras observações [3].

Este instrumento deu uma vantagem competitiva determinante à equipa europeia que competia há duas décadas com a equipa americana. Aqueles usando os telescópios VLT de 8 m do ESO, estes os telescópios Keck de 10 m. Agora era possível seguir a estrela S2 numa região em que para um telescópio de 8 m a sua luz se mistura com a luz da vizinhança próxima do “buraco negro”.

A deteção do desvio para o vermelho gravitacional

O primeiro resultado marcante da equipa GRAVITY foi a deteção do desvio para o vermelho gravitacional da luz da estrela S2 no momento em que se encontra mais próxima do “buraco negro” [4]. Essa distância é de cerca de 120 unidades astronómicas (quatro vezes a distância de Neptuno ao Sol) e S2 move-se com uma velocidade de cerca de 3 % da velocidade da luz! O desvio para o vermelho gravitacional decorre da perda de energia dos fotões da estrela S2 quando escapam do buraco de potencial onde esta se move, o desvio é de cerca de 3 % da velocidade orbital. Este efeito é uma previsão da relatividade generalizada de Einstein em regiões de forte curvatura do espaço-tempo.

Na prática quando se obtém um espectro da estrela S2, na região dos 2 mm, este contém apenas “três” riscas de absorção bem vincadas, duas de He I e uma de H I (Bracket γ). Os desvios para o vermelho (de várias origens) movem as riscas da posição em repouso relativamente ao observador. O reduzido número de riscas e a sua largura tornam difícil uma medição precisa do seu desvio.

Uma primeira dificuldade da medição é que existem muitos desvios para o vermelho em jogo nessa situação, quer devido ao efeito Doppler do movimento da estrela, quer devido ao movimento da Terra, quer devido a efeitos da relatividade restrita, que é necessário tomar em conta. Uma segunda dificuldade é que o desvio para o vermelho gravitacional surge com uma contribuição constante e uma contribuição de segunda ordem na expansão de Taylor para o desvio para o vermelho total⁷. Uma terceira dificuldade é que, quer no termo constante, quer no termo de segunda ordem, outros desvios para o vermelho estão presentes. Uma quarta dificuldade reside no ajuste aos dados que é realizado. Na prática é feito um ajuste não linear de um modelo de 14 parâmetros aos dados, onde a significância do desvio para o vermelho gravitacional é um dos parâmetros. Estes ajustes são muito sensíveis a mínimos locais, sobretudo devido ao grande número de parâmetros em jogo. Aqui a equipa europeia teve a vantagem do instrumento GRAVITY cuja precisão posicional permitiu detetar o desvio para o vermelho gravitacional com uma precisão de 5 sigmas⁸, combinando também dados de espectroscopia com o instrumento SINFONI e de ótica adaptativa com o instrumento NACO. Cerca de 10 meses depois a equipa aumentou a precisão da medição do desvio para 20 sigma [5], 12 meses depois a equipa americana confirmou na Science esta descoberta usando instrumentos e telescópios diferentes, com uma precisão de 5 sigmas [6].

A caminho do Nobel com a deteção da precessão de Schwarzschild

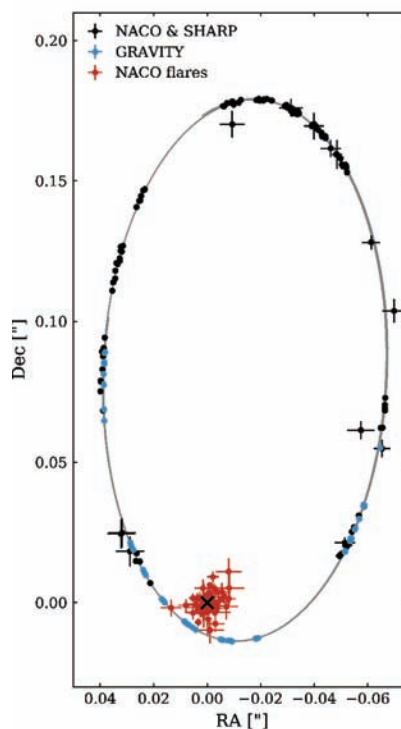


Figura 1 - Pontos da órbita da estrela S2 medidos com vários instrumentos. Os pontos vermelhos são a posição de SgrA* (a posição do “buraco negro”) medidos nas imagens do instrumento NACO. O campo angular da imagem é cerca de 10 vezes menor que o tamanho angular de uma estrela observada numa grande cidade. A curva é a órbita com precessão. A curva é aberta e o ângulo de precessão de S2 é pequeníssimo, como indicado no texto. Adaptado de [7].

Outro efeito relativista de segunda ordem é a precessão da órbita da estrela S2. No caso mais simples, a precessão não altera o plano da órbita mas apenas a orientação da linha que liga os pontos extremos da órbita (os apses). Esta precessão é chamada de precessão apsidal. Num problema clássico de dois corpos pontuais, a precessão apsidal não é possível. No entanto, se outros corpos estiverem presentes ou os corpos não forem perfeitamente esféricos a precessão apsidal pode ter lugar na mecânica Newtoniana. No caso de S2, a precessão apsidal é causada por um efeito relativista. A relatividade generalizada altera a força. Esta já não depende exatamente no quadrado da distância, criando precessão apsidal. A precessão apsidal é um fenómeno que surge em variados contextos, para a métrica de Schwarzschild tem o nome de precessão de Schwarzschild.

No caso particular de S2, a precessão é muito baixa, a órbita “roda” apenas cerca de 0,2° (cf. Figura 1). Como a precessão cria uma órbita aberta desenhando “pétalas”, é mais fácil de medir longe do ponto de maior aproximação ao buraco negro, onde a diferença entre a órbita aberta e a órbita fechada é maior. No entanto, equipada com a precisão do instrumento GRAVITY, a equipa europeia conseguiu detetar o efeito, ainda com a estrela S2 bastante próxima do “buraco negro”.

Usando métodos semelhantes ao da deteção do desvio para o vermelho gravitacional, a precessão de Schwarzschild foi medida com uma precisão de 5 sigma, sendo compatível com o valor esperado [7].

⁷ Neste texto de divulgação assume-se a ordem como a potência da variável $\beta = v/c$.

⁸ Isto é uma parte num milhão de deteção errada devido à aleatoriedade do ruído.

Aguarda-se uma confirmação deste resultado pela equipa americana, usando instrumentação independente, sensível à precessão apenas para distâncias maiores do “buraco negro”.

Considerações finais

Chegado a este ponto o leitor poderá interrogar-se por que razão estas descobertas mereceram a atenção do Comité Nobel. De facto, a precessão relativista é um fenómeno bem conhecido e medido para Mercúrio, onde representa 7 % da pressão total. O mesmo se aplica ao desvio para o vermelho gravitacional, que foi demonstrado pela experiência de Pound–Rebka. Por outro lado, a deteção de ondas gravitacionais sonda regiões da métrica onde esta é muito mais curva e os efeitos relativistas mais intensos.

É nosso entendimento que a resposta está em Sgr A*, o objeto cuja posição coincide com a do “buraco negro”. Pela primeira vez é possível realizar experiências precisas na vizinhança de um objeto compacto com $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$. Este objeto é muitíssimo (10^5) mais massivo que os objetos envolvidos na emissão de radiação gravitacional, detetados pela experiência LIGO – é surpreendente que os dados sejam compatíveis com um buraco negro de Schwarzschild. $4 \times 10^6 M_{\text{sun}}$ comprimidos num único parâmetro! Quando vemos uma imagem do Hubble Ultra-Deep Field, onde numa pequena região angular se encontram 10 mil galáxias, quase todas com um objeto compacto supermassivo no seu centro, podemos pesar a importância deste tipo de objetos.

Finalmente, o Comité Nobel, na citação do prémio refere um objeto compacto e não um buraco negro. Hoje não podemos dizer com certeza absoluta que o objeto compacto é um buraco negro. Outros tipos de objetos compactos são compatíveis com as medições. A hipótese do buraco negro é a mais simples e plausível e na nota explicativa o Comité refere que as medições reforçam esta interpretação. A curto prazo parece ser possível medir se Sgr A* tem momento angular. Espera-se que sim, que rode, pois, a matéria que o constitui originalmente teria momento angular (que se conservou em parte). A medição assenta novamente na precessão, numa contribuição devida à alteração da métrica pela rotação do “buraco negro”. A estrela terá de ter numa órbita mais pequena que S2, de modo a maximizar o sinal. Observações no ESO com o GRAVITY decorrem no momento em que este artigo é escrito para descobrir essa estrela e medir o seu movimento. Um novo instrumento, o GRAVITY+, está a ser construído para continuar a procura por mais uma década.

Agradecimentos

A. A. e P.G. agradecem o financiamento da Fundação para a Ciência e a Tecnologia, com referência UIDB/00099/2020 e PTDC/FIS-AST/7002/2020.

Bibliografia

- [1] Carroll B., Ostlie D. (2017) “An Introduction to Modern Astrophysics”, 2ª edição, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781108380980>
- [2] Watkins et al. (2019) “Evidence for an Intermediate-mass Milky Way from Gaia DR2 Halo Globular Cluster Motions”, *The Astrophysical Journal*, 873, p. 118, <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab089f>
- [3] Gravity Collaboration (2017) “First light for GRAVITY: Phase referencing optical interferometry for the Very Large Telescope Interferometer”, *Astronomy & Astrophysics*, 602, p. A94, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730838>

[4] Gravity Collaboration (2018) “Detection of the gravitational redshift in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole” *Astronomy & Astrophysics*, 615, p. L15, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833718>

[5] Gravity Collaboration (2019) “A geometric distance measurement to the Galactic center black hole with 0.3% uncertainty”, *Astronomy & Astrophysics*, 625, L10, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201935656>

[6] Do T. et al. (2019) “Relativistic redshift of the star S0-2 orbiting the Galactic Center supermassive black hole”, *Science*, 365, p. 664, <https://doi.org/10.1126/science.aav8137>

[7] Gravity Collaboration (2020) “Detection of the Schwarzschild precession in the orbit of the star S2 near the Galactic centre massive black hole”, *Astronomy & Astrophysics*, 636, p. L5, <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202037813>



Paulo Garcia, é Professor Associado do Departamento de Engenharia Física da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Doutorou-se em Física pela Universidade Claude Bernard – Lyon I, em 1999. Realizou investigação em vários temas, como em sistemas protoplanetários, instrumentação ou buracos

negros supermassivos. No consórcio GRAVITY lidera a equipa portuguesa que participa na exploração científica do instrumento. Coordena a participação portuguesa no instrumento GRAVITY+, em desenvolvimento para o Observatório Europeu Austral (ESO). <https://orcid.org/0000-0002-1678-3535>



António Amorim, é Professor Catedrático do Departamento de Física da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, investigador do CENTRA e sócio efetivo da Academia das Ciências de Lisboa. Após um conjunto de trabalhos teóricos iniciais em modelos relativistas para dispersão de deuterões,

especializou-se numa primeira fase em sistemas de aquisição de dados e informação para experiências de Física de Partículas (HERA-B/DESY, ATLAS/LHC/CERN) e dedicou-se posteriormente ao desenvolvimento de instrumentação para estudos de astrofísica. Coordenou o consórcio CAMCAO que desenvolveu o primeiro instrumento português para o ESO e coordenou a participação portuguesa no consórcio GRAVITY, bem como no projeto de instrumentação para o espaço MAGDRI-VE. Recentemente supervisiona o desenvolvimento de engenharia do sistema WSS para o instrumento METIS para o telescópio ELT do ESO e participa no desenvolvimento do sistema DAQ para a colaboração CLOUD no CERN. É autor de mais de 800 publicações indexadas. <https://orcid.org/0000-0003-0638-2321>