

BURACOS NEGROS SUPERMASSIVOS: III. SAGITÁRIO A* NO CENTRO DA VIA LÁCTEA

SUPERMASSIVE BLACK HOLES: III. SAGITTARIUS A IN THE CENTER OF THE MILKY WAY*

Rainer Karl Madejsky

Departamento de Física da Universidade Estadual de Feira de Santana, BA, Brasil

A radiofonte Sagitário A* (Sgr A*) no exato centro da Via Láctea em uma distância de 8 kpc é o buraco negro supermassivo mais próximo do sistema solar. A observação no visível é impossível devido a uma absorção muito eficiente causada por nuvens de gás e poeira do disco galáctico. As observações no infravermelho realizadas durante três décadas indicam a presença de uma massa compacta de quase quatro milhões de massas solares na posição de Sgr A*. As técnicas observacionais no rádio desenvolvidas ao longo de meio século, culminaram na construção de uma imagem da sombra do buraco negro supermassivo Sgr A* pela colaboração do telescópio EHT (Event Horizon Telescope). Em torno da sombra é observado um anel de emissão de radiação síncrotron. A aparência do anel foi reproduzida em simulações magneto-hidrodinâmicas relativísticas e o seu diâmetro indica uma massa de $4 \times 10^6 M_{\odot}$ para Sgr A*. Em conjunto com M 87*, a observação da sombra de Sgr A* representa uma excelente confirmação direta da existência de buracos negros supermassivos, abrangendo mais que três ordens de grandeza em massa.

Palavras Chave: Sagitário A, Buracos Negros Supermassivos, Horizonte de Evento, Radiação Síncrotron, Sombra de um Buraco Negro

The radio source Sagittarius A* (Sgr A*) in the exact center of the Milky Way at a distance of 8 kpc is the supermassive black hole nearest to the solar system. The observation at visible wavelengths is impossible because of a very efficient absorption that is caused by gas and dust clouds of the galactic disk. The observations in the infrared realized over three decades indicate the presence of a compact mass of about four million solar masses at the position of Sgr A*. The observational techniques in the radio developed over the last half century culminated with the construction of an image of the shadow of the supermassive black hole Sgr A* by the Event Horizon Telescope Collaboration. Around the shadow is observed a ring of emission of synchrotron radiation. The appearance of the ring was reproduced in general relativistic magnetohydrodynamic simulations and its diameter indicates a mass of $4 \times 10^6 M_{\odot}$ for Sgr A*. Together with M 87*, the observation of the shadow of Sgr A* represents an excellent direct confirmation of the existence of supermassive black holes spanning over more than three orders of magnitude in mass.

Keywords: Sagittarius A, Supermassive Black Holes, Event Horizon, Synchrotron Radiation, Shadow of a Black Hole

OBSERVAÇÕES DE SGR A* ANTES DE EHT: DÉCADAS DE 1970 A 2010

A radiofonte Sgr A* encontra-se no exato centro da Via Láctea em uma distância de 8 kpc ou 26 mil anos-luz. A observação no visível é impossível devido à grande quantidade de gás e poeira que se encontra no plano galáctico e causa uma absorção da ordem de 30 magnitudes em direção às constelações Escorpião - Sagitário, resultando em uma atenuação de um feixe de luz visível por um fator de 10^{12} . Devido à enorme absorção em comprimentos de onda λ entre 1 nm e 1 μm , o estudo observacional do centro galáctico deve ser realizado em comprimentos de onda maiores que λ 1 μm no infravermelho, em micro-ondas e no rádio ou em curtos comprimentos de onda de raios X e raios gama.

Na região central de 8 pc em torno do centro galáctico encontra-se a radiofonte Sagitário A (Sgr A). A emissão no rádio se deve à radiação síncrotron. Até o final do século XX, o desenvolvimento de interferometria VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) resultou em observações no rádio que alcançaram uma resolução angular de 0,2 milissegundos de arco (0,2 mas). Com essa resolução angular foi possível

identificar várias componentes revelando grande atividade perto do centro galáctico no recém passado da Via Láctea. Entre essas componentes extensas são Sgr A East e Sgr A West mostrando uma extensão angular sobre um minuto de arco correspondendo a uma extensão linear de vários parsecs. Perto do centro de Sgr A West encontra-se a radiofonte Sgr A* a qual parece puntiforme quando observada com uma resolução da ordem de milissegundos de arco. A posição das várias componentes de Sgr A coincide quase perfeitamente com a posição do centro de um aglomerado estelar o que indica que essa região é o exato centro da Via Láctea.

A região em torno do centro galáctico é composta de estrelas e existe gás e poeira em pequenas quantidades. A velocidade radial do gás pode ser determinada através da linha de 21 cm do hidrogênio neutro H I. Em torno do centro galáctico encontra-se a maior acumulação de matéria molecular da Via Láctea que, provavelmente, é instável contra colapso gravitacional em uma escala de tempo da ordem de 10^5 anos. A análise dos deslocamentos da linha de estrutura fina do néon ionizado, Ne II, com λ 12 μ m, mostra uma velocidade alta de $v_{\text{Ne}} \approx 250 \text{ km s}^{-1}$ nos centrais 10'' (0,4 pc). A análise cinemática do gás representa a primeira evidência a favor da existência de uma massa compacta no centro da Via Láctea. No entanto, a cinemática do gás depende não somente do potencial gravitacional mas também da presença de um campo magnético. A emissão de radiação síncrotron comprova a existência de um campo magnético. Adicionalmente, ventos estelares e pressão de radiação na proximidade de estrelas muito luminosas podem contribuir para tornar os perfis das linhas espectrais mais complexos, o que de fato é observado.

Portanto, a análise da cinemática estelar é mais confiável do que a cinemática do gás para determinar a massa central. As primeiras imagens obtidas no infravermelho de uma região de 10'' x 10' correspondendo a dimensões lineares de 0,4 pc x 0,4 pc, mostram a presença de estrelas supergigantes nas proximidades do centro galáctico. No infravermelho próximo é comumente usado o filtro K em torno de λ 2,2 μ m. Esse comprimento de onda é adequado para a observação de estrelas gigantes que possuem uma temperatura superficial da ordem de 4000 K e são abundantes na região central da Via Láctea. A observação dessas estrelas velhas da população I revela uma densidade espacial com dependência radial proporcional a $r^{-1,8}$ até uma distância de 0,1 pc do centro galáctico, correspondendo aproximadamente à dependência radial de uma esfera isotérmica. Uma distribuição isotérmica de velocidades é o resultado de encontros frequentes de estrelas na região central da Via Láctea, diferente dos encontros muito raros na vizinhança solar.

No entanto, para distâncias menores que 2 pc do centro galáctico, o estudo cinemático usando a banda de absorção da molécula CO em comprimento de onda λ 2,3 μ m mostra que as velocidades aumentam quando a distância ao centro vai diminuindo. Uma das conclusões é que deve se encontrar uma massa muito grande em um volume muito pequeno em torno do centro galáctico.

A distribuição luminosa das estrelas observadas perto do centro galáctico mostra um máximo perto de um objeto infravermelho conhecido como IRS 16 (*IRS - infrared source*). Durante uma ocultação lunar, IRS 16 foi resolvido em 15 fontes luminosas aparentemente puntiformes. Trata-se, provavelmente, de estrelas individuais com luminosidades extremas da ordem de $10^6 L_{\odot}$. A velocidade do gás em torno de IRS 16 com valores de até 700 km s^{-1} indica uma massa muito alta, mas a massa de IRS 16 não é suficiente para

explicar esse aumento de velocidade.

O teorema virial em sua versão escalar mais simples, $2T + V = 0$, onde T representa a energia cinética e V representa a energia potencial, pode ser aplicado ao aglomerado observado. A análise das linhas espectrais permite determinar a energia cinética do aglomerado. Sob a hipótese de equilíbrio dinâmico pode ser determinada a energia potencial e, portanto, a massa. O resultado é que a massa dentro do raio 2 pc deve ser maior \times que $10^7 M_{\odot}$. Ao diminuir o raio a 0,5 pc, a massa diminui a $4 \times 10^6 M_{\odot}$. Para raios menores até a resolução alcançada da ordem de 0,01 pc a massa permanece constante nesse valor (Madejsky, 2014).

Em sua versão mais geral, o teorema virial em forma tensorial, permite incluir velocidades anisotrópicas. Ao considerar vários parâmetros de anisotropia obtém-se uma massa ligeiramente diferente, mas a conclusão da presença de uma massa compacta muito alta é mantida. Nesse estudo foram consideradas várias configurações de hipotéticos aglomerados de estrelas de nêutrons ou de outros tipos mais exóticos de estrelas degeneradas.

Em anos recentes foi possível observar órbitas individuais de várias estrelas na vizinhança do centro galáctico. A órbita da estrela S0-2 foi observada a partir da última década do século XX. A estrela S0-2 orbita o centro galáctico em 15,2 anos com uma excentricidade orbital de $e = 0,87$ se aproximando a uma distância perigaláctica de apenas 17 horas-luz (120 ua - unidades astronômicas ou distância angular 15 mas - milissegundo de arco) à radiofonte Sgr A*. Com a órbita estelar conhecida é possível determinar a massa central de $M = 3,7 \times 10^6 M_{\odot}$.

O TELESCÓPIO EHT

O raio de Schwarzschild $R_S = 2GM/c^2$ define o horizonte de evento de um buraco negro de massa M. G representa a constante da gravitação e c é a velocidade da luz. Fora do horizonte de evento até aproximadamente três raios de Schwarzschild, $R_S < d < 3R_S$, não existem órbitas estáveis. Para distâncias maiores, $d > 3R_S$, a matéria forma um disco de acreção e a emissão nessa região se deve à radiação síncrotron com máximos de emissão entre rádio e infravermelho distante.

Os cenários desenvolvidos através de simulações magneto-hidrodinâmicas relativísticas chamadas GRMHD (*general relativistic magnetohydrodynamics*) mostram que a região em torno da borda interna do disco é transparente para radiação com comprimento de onda de micro-ondas, portanto, a combinação de um horizonte de evento e o desvio de luz devido a lenteamento gravitacional e a captura de fótons resultam na aparência de uma sombra escura dentro de um anel de emissão.

Os núcleos galácticos da Via Láctea e da galáxia elíptica M 87 são núcleos ativos galácticos de baixa luminosidade chamados LLAGNs (Madejsky, 2019) que ambos possuem um disco de acreção opticamente fino. A extensão angular δ do raio do horizonte de evento de um buraco negro supermassivo que se encontra na distância D é dado por $\delta = R_S/D = 2GM/(c^2D)$.

O buraco negro supermassivo Sgr A* no centro da Via Láctea em uma distância de 8 kpc e com uma massa de $4 \times 10^6 M_{\odot}$ possui um horizonte de evento $R_S = 1,2 \times 10^7 \text{ km}$ que corresponde a uma extensão

angular de $\delta_{\text{SgrA}^*} = 10 \mu\text{s}$ (microsegundo de arco, $1\mu\text{s} = 10^{-6}''$), ainda muito abaixo da resolução angular alcançada há uma década com as técnicas VLBI mais avançadas.

O diâmetro da região de emissão em torno de Sgr A* foi determinado a aproximadamente $40 \mu\text{s}$ com observações VLBI de $\lambda 1,3 \text{ mm}$ em anos recentes (Doeleman et.al. 2012), mas a tecnologia há uma década ainda não permitiu obter uma imagem dessa região. Com o intuito de alcançar a resolução angular e sensibilidade necessárias para obter imagens bidimensionais, foi construído o telescópio EHT (*Event Horizon Telescope*). Alguns detalhes técnicos são discutidos no segundo artigo desta série sobre buracos negros supermassivos (Madejsky, 2019).

O desenvolvimento tecnológico e o uso de técnicas computacionais sofisticadas resultam em uma resolução efetiva do telescópio EHT da ordem de $20 \mu\text{s}$. A combinação de vários radiotelescópios aumenta a resolução angular pelo preço de ter que analisar uma distribuição não uniforme do sinal recebido. Portanto, é necessário reconstruir a distribuição de luminosidade da fonte observada. A técnica de interferometria VLBI foi desenvolvida ao longo de anos com o objetivo de diminuir o comprimento de onda até milímetros, desta forma melhorando a resolução angular. A principal dificuldade é a supressão de ruído, o que requer condições observacionais extremamente estáveis.

A OBSERVAÇÃO DA SOMBRA DE SGR A*

As observações do EHT foram realizadas em 2017 usando oito observatórios em seis regiões geográficas, sendo ALMA e APEX (*Atacama Pathfinder Experiment*) no Llano de Chajnantor no Chile, o LMT (*Large Millimeter Telescope Alfonso Serrano*) no vulcão Sierra Negra no México, o JCMT (*James Clerk Maxwell Telescope*) e SMA (*Submillimeter Array*) no Havaí, o IRAM (*30m Telescope*) no Pico Veleta na Espanha, o SMT (*Submillimeter Telescope*) no Mount Graham na Arizona e o SPT (*South Pole Telescope*) no Antártico. As observações foram realizadas em comprimento de onda $\lambda 1,3 \text{ mm}$ (230 GHz).

A análise dos dados observacionais envolve técnicas Fourier avançadas. A maior parte da emissão em $\lambda 1,3 \text{ mm}$ tem origem perto do horizonte de evento e variabilidade foi detectada em escalas de tempo de minutos até horas. A variabilidade temporal de Sgr A* exigiu o uso de novos métodos de calibração. O efeito de espalhamento interstelar deve ser considerado na análise dos dados observacionais e na construção das imagens, no entanto, o efeito de espalhamento é muito inferior em comparação com os efeitos introduzidos pela variabilidade temporal. Simultaneamente foram realizadas observações em 22 GHz ($\lambda 1,36 \text{ cm}$), 43 GHz ($\lambda 7 \text{ mm}$), 86 GHz ($\lambda 3,5 \text{ mm}$) e para comprimento de onda no infravermelho próximo e em raios X. A variabilidade em raios X e no infravermelho próximo em escalas de horas, indicam a emissão em uma região em torno da órbita estável mais próxima do buraco negro.

Depois da completa análise dos dados observacionais por vários grupos que trabalharam de forma independente e usando métodos diferentes, a imagem final, Figura 1, foi publicada pela colaboração EHT no site eventhorizontelescope.org e no jornal *Astrophysical Journal Letters* (EHT 2022 - Artigo 1). Observa-se um anel quase circular com um diâmetro de $51,8 (\pm 2,3) \mu\text{s}$ e com assimetrias azimutais. As várias técnicas Fourier aplicadas resultam em imagens ligeiramente diferentes como mostram as imagens menores.

A imagem observada é consistente com a sombra que se espera de um buraco negro com métrica de Kerr quando calculado com métodos numéricos de relatividade geral GRMHD.

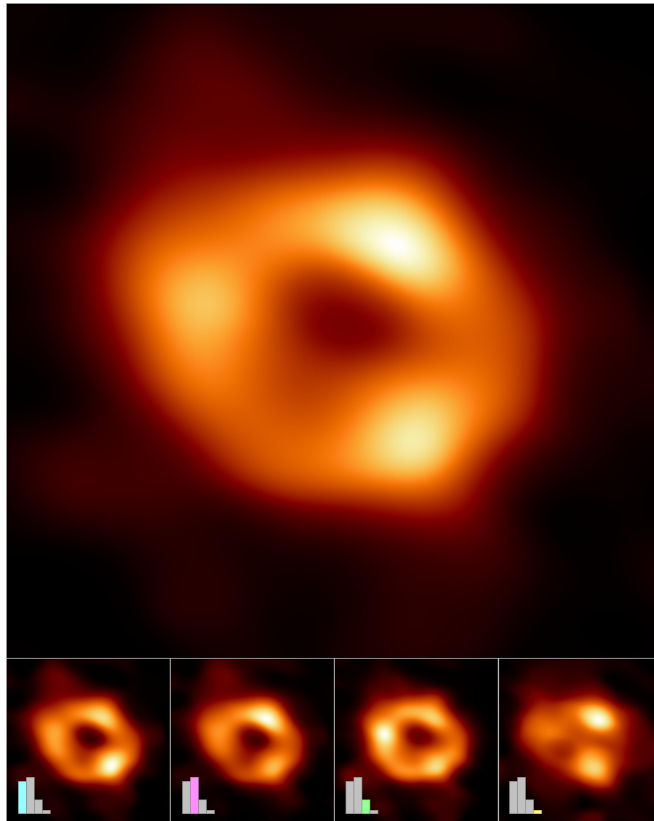


Figura 1: Sombra em torno do horizonte de evento do buraco negro supermassivo Sgr A*. A área observada tem tamanho de $140 \mu\text{as} \times 140 \mu\text{as}$. A melhor resolução angular alcançada é de $15,3 \mu\text{as}$. O anel em emissão de radiação síncrotron é causado pelo desvio gravitacional de fótons cujo parâmetro de impacto é igual ao raio de captura de fótons. A emissão do anel é assimétrica em direção azimutal devido a uma variabilidade da radiofonte e sua amplificação e colimação relativísticas (*relativistic beaming*). As diferenças das imagens menores se devem, principalmente, à variabilidade intrínseca da fonte em escalas a partir de minutos, bem como das técnicas Fourier aplicadas. Fonte: *Event Horizon Telescope Collaboration* (EHT 2022 - Artigo 3).

A MASSA DE SGR A*

Fótons que se aproximam ao buraco negro com parâmetro de impacto b menor que o raio de captura, $b < r_c$, são capturados e desaparecem atrás do horizonte para o observador distante. Fótons com parâmetro de impacto maior, $b > r_c$, escapam da atração gravitacional do buraco negro. Portanto, o anel de emissão observado contém fótons com parâmetro de impacto igual ao raio de captura de fótons, $b = r_c$, os quais são desviados pelas intensas forças gravitacionais.

Um buraco negro sem momento angular é descrito pela métrica de Schwarzschild e possui um raio de captura de fótons de $r_c = \sqrt{27/4} R_s$. Quando o buraco negro possui alto momento angular, deve ser usada a métrica de Kerr e o raio de captura r_c varia entre $r_c = 2,25 R_s$ e $2,6 R_s$ a depender do momento angular do buraco negro e sua orientação em relação à linha de visada.

Quando o disco de acreção se encontra em rotação com velocidade próxima à velocidade da luz, o efeito relativístico de amplificação e colimação (*relativistic beaming*) pode resultar em assimetrias azimutais. Partes do anel que se aproximam do observador são amplificadas, as partes opostas que se afastam são atenuadas e não são observadas. O *relativistic beaming* ocorre devido ao direcionamento da radiação dentro de um cone com semiabertura angular $\varphi \approx 1/\gamma$, onde γ é o fator de Lorentz dos elétrons que emitem a radiação síncrotron (Madejsky 2015).

O diâmetro observado da sombra de 51,8 μas corresponde, na distância de 8 kpc de Sgr A*, a uma extensão linear de 0,41 ua. O diâmetro da sombra deve ser igual ao diâmetro da área de captura de fótons que por sua vez é $2r_c = 5,2 R_S$ naétrica de Kerr. Dessa maneira obtém-se um raio de Schwarzschild para Sgr A* de $R_{S,SgrA*} = 0,079$ ua que corresponde a uma massa de $M_{SgrA*} = 4 \times 10^6 M_\odot$ (EHT 2022 - Artigo 4).

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A colaboração do telescópio EHT observou a radiofonte Sgr A* através de técnicas avançadas de interferometria entre oito telescópios em comprimento de onda λ 1,3 mm. As observações permitem resolver espacialmente a região de emissão em torno de Sgr A*. A análise e modelagem dos dados observacionais resultam em uma imagem de um anel de emissão com diâmetro angular de 51,8 μas . O anel possui uma assimetria azimutal e uma parte central escura. Simulações numéricas mostram que as imagens do EHT são consistentes com a aparência de um buraco negro de Kerr com uma massa de $4 \times 10^6 M_\odot$. Portanto, as imagens do EHT comprovam a existência de um buraco negro supermassivo no centro da Via Láctea e pela primeira vez as observações anteriores de órbitas estelares em uma escala da ordem de vários mil raios de Schwarzschild podem ser conectadas a observações até uma escala de poucos diâmetros do horizonte de evento.

Na relatividade geral, o espaço-tempo em torno de um buraco negro deve ser descrito pela métrica de Kerr que é caracterizada por massa e momento angular do buraco negro. De acordo com simulações, as imagens de buracos negros possuem uma região central escura, chamada de sombra do buraco negro. Em torno da sombra existe um anel luminoso que contém fótons que foram emitidos perto do raio de captura e são sujeitos a lenteamento gravitacional.

O raio gravitacional r_g definido por $r_g = GM/c^2$ corresponde à metade do raio de Schwarzschild R_S e indica a escala linear típica. A escala de extensão angular de um buraco negro supermassivo que se encontra na distância D é dado por $\delta_g = r_g/D = GM/(c^2D)$. A escala de tempo característica definida por $t_g = GM/c^3$ corresponde ao tempo que um fóton precisa para se deslocar uma distância r_g e indica a escala de tempo das variações mais rápidas. No caso de Sgr A*, o tempo característico é $t_g = 20\text{s}$. O diâmetro do anel corresponde a aproximadamente $10 r_g$, portanto, esperam-se variações em uma escala a partir de 3 minutos. O tempo característico t_g de M 87* é por um fator 1500 maior em comparação com Sgr A*, portanto não há variabilidade durante uma noite de observação o que torna mais fácil a análise das imagens de M 87*.

O diâmetro esperado da sombra circular de um buraco negro sem momento angular é dado por $\delta_s =$

$2\sqrt{(27) GM/(c^2D)} = 2\sqrt{(27) r_g/D} = 10, 39 \delta_g$. Os buracos negros possuem momento angular, nesse caso é usado o parâmetro adimensional $a^* = Jc/(GM^2)$, onde J é o momento angular do spin do buraco negro, para quantificar e caracterizar a rotação. Quando $a^* < 0$, trata-se de rotação retrógrada em relação ao disco de acreção. A análise das imagens em conjunto com as simulações GRMHD mostra que Sgr A* possui um parâmetro adimensional positivo, $a^* > 0$. Em consequência, a sombra não é perfeitamente circular e o seu tamanho depende tanto do valor de a^* quanto da inclinação i (ângulo entre linha de visada e eixo de rotação do buraco negro) que não é conhecida no caso de Sgr A*. O raio da sombra pode ter um valor mínimo $\delta_s = 9 GM/(c^2D) = 9 \delta_g$ para $a^* = 1$ e $i = 90^\circ$.

A comparação dos dados observacionais de Sgr A* e de M 87* confirmam as previsões da relatividade geral sobre um intervalo de mais que três ordens de grandeza da massa central do buraco negro supermassivo. Ao considerar, adicionalmente, as observações das ondas gravitacionais emitidas durante a fusão de buracos negros com massas de dezenas de massas solares, a abrangência em massa é de oito ordens de grandeza. A teoria da relatividade geral é confirmada em todos os aspectos que podem ser verificados no contexto dessas observações.

A comprovação direta da existência de buracos negros supermassivos requer uma nova discussão detalhada da sua formação e evolução. O cenário convencional do crescimento de um buraco negro de origem estelar mostra que, a princípio, é possível aumentar a massa da ordem de poucas dezenas até centenas de milhões de massas solares durante a idade do universo de 13,8 bilhões de anos. No entanto, os buracos negros supermassivos presentes nos quasares mais distantes devem ter se formado em apenas 500 milhões de anos, e conseqüentemente, devem ter originado a partir de uma massa inicial muito maior do que corresponde aos convencionais buracos negros de origem estelar. Portanto, é necessário elaborar um cenário da evolução de buracos negros que se formam a partir de minihalos de matéria escura ou a partir da primeira geração de estrelas, a ainda hipotética população III.

BIBLIOGRAFIA

1. eventhorizontelescope.org
2. Doeleman, S.S., Fish, V.L., Schenk, D.E., et.al., Science 338, 355, 2012
3. The Event Horizon Telescope Collaboration, *First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way*, The Astrophysical Journal Letters, ApJL 930, L12, 2022 (EHT - Artigo 1). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6674>
4. The Event Horizon Telescope Collaboration, *First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. III. Imaging of the Galactic Center Supermassive Black Hole*, The Astrophysical Journal Letters, ApJL 930, L14, 2022 (EHT - Artigo 3). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6429>
5. The Event Horizon Telescope Collaboration, *First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. IV. Variability, Morphology and Black Hole Mass*, The Astrophysical Journal Letters, ApJL 930, L15, 2022 (EHT - Artigo 4). <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ac6736>

6. Madejsky, R., *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia, 1 - O sistema solar, as estrelas e a Via Láctea*, UEFS Editora, Feira de Santana, 2014.
7. Madejsky, R., *Curso Básico de Astrofísica e Cosmologia, 2 - Das Galáxias aos Quasares*, UEFS Editora, Feira de Santana, 2015.
8. Madejsky, R., *Buracos negros supermassivos, II. A Sombra de M 87**, Caderno de Física da UEFS, 17 (01): 1402.1-8, Feira de Santana, 2019