

Buracos Negros, História da Ciência e Ensino de Física

Ricardo Roberto Plaza Teixeira*, João Pereira Neto**, Vinicius Carvalho Rosa***

Resumo

Este artigo examina o potencial existente no uso do conceito de buraco negro como eixo temático para atividades de ensino de física e de divulgação científica, tendo em vista especialmente a história do desenvolvimento histórico das ideias acerca deste objeto da astrofísica. Para a fundamentação teórica deste artigo foi feita uma extensa revisão da literatura científica acerca do tema, por meio da análise de trabalhos apresentados em congressos acadêmicos, artigos publicados em revistas especializadas, teses de doutorado, dissertações de mestrado e livros. Para um estudo mais bem estruturado sobre a história da evolução do conceito de buraco negro desde o final do século XVIII, foram utilizados artigos originais de cientistas como Michell, Laplace, Einstein, Schwarzschild, Droste, Oppenheimer, Hawking, Kerr, Penrose, Ghez e Genzel. Os links para que os leitores possam acessar estes artigos são apresentados junto com as referências bibliográficas. O estudo dos buracos negros e da história da ciência associada a eles se apresenta como um excelente eixo temático para a realização de atividades interdisciplinares que podem colaborar significativamente para o processo de aprendizagem dos alunos.

Palavras-chave: Astrofísica; Divulgação Científica; Artigo Original; História da Ciência.

-
- * Doutor em Física pela Universidade de São Paulo e docente do Instituto Federal de São Paulo (IFSP), campus Caraguatatuba. E-mail: rteixeira@ifsp.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7124-1774>
- ** Licenciando em Matemática pelo Instituto Federal de São Paulo (IFSP), campus Caraguatatuba. E-mail: jpn.mnb@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9849-0305>
- *** Graduado em Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pelo Instituto Federal de São Paulo (IFSP), campus Caraguatatuba. E-mail: v.rosa@aluno.ifsp.edu.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9945-2581>

<https://10.5335/rbecm.v5i2.12927>

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>

Recebido em: 06/09/2021; Aceito em: 17/06/2022

ISSN: 2595-7376



Introdução

Este artigo analisa o potencial educacional existente no uso de temas relacionados ao estudo dos buracos negros e de diferentes momentos históricos que ocorreram para a produção deste conceito científico como norteadores de atividades de ensino de física e de divulgação científica. No transcorrer dessa pesquisa foi feita uma robusta revisão bibliográfica sobre a História do conceito de buraco negro, inclusive com o acesso a inúmeros artigos originais de valor histórico, como fontes primárias – de cientistas como Michell, Laplace, Einstein, Schwarzschild, Droste, Oppenheimer, Hawking, Kerr, Penrose, Ghez e Genzel – que estão disponíveis na internet e podem ser úteis para a estruturação e a execução de ações educacionais de ensino de física tendo o conceito de buraco negro como eixo temático.

As fontes primárias consultadas envolvem obras escritas desde o final do século XVIII até o século XXI, a grande maioria delas disponíveis livremente para serem acessadas na internet. Outros trabalhos tanto sobre astronomia e astrofísica, quanto sobre educação científica, foram encontrados a partir de buscadores como o “Google Acadêmico” (“Google Scholar”) e o “Scielo”, restringindo-se basicamente a trabalhos produzidos a partir do ano 2000 e usando como palavras-chave, para o procura, termos como “buraco negro”, “astrofísica”, “história da ciência”, “ensino de física”, “ensino de astronomia” e “divulgação científica”. Dentre os procedimentos realizados com as fontes usadas neste trabalho, foram feitos fichamentos para sistematizar os conhecimentos abordados nelas e que fossem úteis para desenvolver as ideias relacionadas ao eixo temático central deste ensaio, a saber, o uso do conceito de Buraco Negro e da sua História em atividades de ensino e de divulgação científica.

Na “Introdução”, deste artigo, que se caracteriza como um ensaio, é abordada a relevância da inserção da astronomia e da sua história tanto em ações de popularização da ciência, quanto no ensino de disciplinas científicas, em particular, no ensino de física. Em seguida, na seção “A História do conceito de Buraco Negro” são analisados diversos momentos da história da construção do conceito de buraco negro desde o final do século XVIII até o século XXI, com o intuito de desvendar os desafios e as concepções científicas existentes em cada período histórico e examinar as possíveis contribuições destes conhecimentos para o processo de aprendizagem no âmbito da disciplina de física. Nas “Considerações Finais” é realizada uma avaliação

panorâmica acerca das possíveis contribuições das questões e dos conhecimentos abordados no âmbito da educação científica.

A Astronomia no Ensino

Os temas de Astronomia geralmente despertam o interesse das pessoas das mais variadas idades, classes sociais e, até mesmo, graus de escolaridade, sendo, portanto, um campo com diversas potencialidades para o uso em propostas de ensino de ciências e de divulgação científica. A astronomia é também uma área aberta, na educação, para discussões e conexões com diversas outras disciplinas do conhecimento humano, sejam elas das ciências naturais (física, química, biologia, matemática), das ciências humanas (história, geografia, filosofia, sociologia) e até mesmo das artes (cinema, literatura, música, teatro), permitindo que os problemas sejam abordados de forma não fragmentada, colaborando para o desenvolvimento cognitivo do aluno nestas outras disciplinas e possibilitando uma melhor compreensão do universo em que vivemos (SIEMSEN; LORENZETTI, 2020). Em particular episódios históricos relacionados à astronomia podem ser usados como elementos problematizadores e que estimulem os alunos para o processo de aprendizagem (MOURA; SILVA, 2014).

Uma consequência do caráter interdisciplinar da astronomia está relacionada à evolução tecnológica decorrente do desenvolvimento da astronomia com aplicações que transbordaram para diversas outras áreas do conhecimento, tais como nos casos de antenas, espelhos, telescópios, sensores e detectores de raios-X (DIAS; RITA, 2008). Em certa medida, também em decorrência das suas características interdisciplinares, a astronomia consegue despertar habilidades de observação, estimular o senso crítico e sensibilizar para questões filosóficas sobre o universo envolvendo a sua existência, os primórdios e a sua evolução (CARNEIRO; LONGHINI, 2015).

Assim como na biologia, o estudo das células e da genética molecular, pelo seu caráter microscópico, se tornou crescentemente afastado das nossas experiências visuais cotidianas (sem o uso de instrumentos como microscópios), algo semelhante tem acontecido com a astronomia, que pelo seu caráter cósmico, envolve escalas de distâncias gigantescas e frequentemente distantes da nossa experiência visual (sem o uso de telescópios): muitos fenômenos da astrofísica atual, tais como os buracos negros, não são visíveis com olhos desarmados, o que implica na necessidade de confiar em cientistas profissionais que produzem imagens a partir de instrumentos



de medição, tais como os telescópios que observam o universo em diferentes faixas do espectro das radiações eletromagnéticas e não somente nas frequências associadas à luz visível (HORVATH, 2013). Esta questão merece uma reflexão mais apurada pelos professores, pois pode se tornar um obstáculo para a aprendizagem de conceitos de astrofísica, sobretudo em um ambiente social em que a desconfiança na ciência vem crescendo com o fortalecimento de movimentos negacionistas.

Diversos tópicos da astrofísica e da cosmologia envolvem conceitos importantes de física moderna e contemporânea, especialmente aqueles relacionados à teoria da relatividade geral: alguns exemplos são os estudos sobre as propriedades gravitacionais relacionadas à expansão do universo e às características peculiares dos buracos negros (GARCIA, 2015). Os conhecimentos de física moderna e contemporânea, além das suas diversas aplicações tecnológicas que estão cada vez mais entranhadas na sociedade, são também partes constituintes da cultura humana e conhecê-los nos torna mais plenos e amplia a compreensão que temos do mundo (OSTERMANN; MOREIRA, 2000). A astrofísica e a cosmologia, em particular, permitem que as pessoas se localizem, em termos científicos, nas escalas temporal e espacial do universo.

Há um entusiasmo genuíno quando os alunos aprendem na escola acerca de assuntos que estão situados na fronteira do conhecimento atual e sobre os quais eles têm acesso pela internet. O envolvimento com experimentos atuais e com as expectativas e debates sobre o futuro da ciência é revigorante: saber que nem tudo no universo científico está completamente entendido torna-se algo desafiador em termos educacionais, assim como é no próprio campo contexto do desenvolvimento científico. É fundamental que os alunos compreendam que a ciência não é algo acabado, não é um livro fechado, não é um corpo de saberes prontos e sobre os quais cabe apenas se informar, pois não haveria mais nada de novo a ser produzido.

A organização curricular do ensino que tem como base uma estrutura conceitual hierárquica e linear, implicitamente considera os fatos historicamente “mais antigos” como sendo pedagogicamente preliminares, o que provoca a necessidade de que os alunos percorram o caminho histórico do desenvolvimento do conhecimento, segundo uma ordem cronológica que muitas vezes acaba por se limitar à física desenvolvida entre os séculos XVII e XIX, deixando de fora a física moderna e contemporânea dos séculos XX e XXI: a compreensão desenvolvida pelos alunos sobre a física acaba por estar bastante distante da natureza da ciência atual e das atividades de pesquisa

que são realizadas nos centros de investigação e nos laboratórios universitários dos dias de hoje (PIETROCOLA, 2005). Deste modo, na prática, quase toda a astrofísica e a cosmologia contemporâneas (que passaram a ser desenvolvidas sobretudo a partir da primeira metade do século XX) ficam de fora dos saberes com os quais os alunos lidam nos bancos escolares.

A opção pela ausência de tópicos de fronteira da ciência fragiliza a formação dos alunos que, por meio das mídias digitais, têm um acesso cada vez mais amplo a todo tipo de informação – e desinformação – mas sem os filtros e as habilidades, que o processo de educação formal pode oferecer, para a interpretação e análise crítica dos conteúdos de seus interesses: deste modo, na perspectiva da educação cidadã, torna-se necessário integrar, aos currículos escolares, os conhecimentos produzidos mais recentemente ou que estão ainda em processo de construção, diminuindo assim o intervalo de atraso entre a produção do conhecimento e a sua respectiva transposição didática (AMADOR; ALBUQUERQUE, 2016).

A divulgação científica é um espaço de reflexão e ação com o importante papel de apoio e de motivação para a educação, especialmente sobre temas contemporâneos da ciência: ela pode provocar uma articulação entre ciência, pesquisa e educação formal, impedindo que a população seja apartada e tolhida do acesso ao conhecimento científico. A divulgação científica tem o papel relevante de colaborar para a construção de representações sociais, conjuntos de conhecimentos, opiniões e imagens que possibilitam evocar um dado acontecimento, pessoa ou objeto e pode colaborar para um processo de maior reflexividade da sociedade acerca de si mesma e de tudo que a cerca, tornando-se neste contexto uma ferramenta para o exercício do pensamento crítico (CARNEIRO; LONGHINI, 2015). O ensino de ciências em ambiente escolar e a divulgação científica não são dicotômicos, mas têm obviamente as suas especificidades que devem ser sempre consideradas, sobretudo tendo em vista os objetivos educacionais em cada caso. Em particular, a aprendizagem de conceitos de astronomia pode ocorrer em diferentes âmbitos, inclusive em atividades de divulgação e popularização da ciência (LANGHI; NARDI, 2009).

A História do conceito de Buraco Negro

Buracos negros são deformações extremas do espaço-tempo, onde até a luz está aprisionada e que podem ser explicadas pela Teoria da Relatividade. Há diversas



evidências observacionais e experimentais da astrofísica atual para a existência real desses corpos que podem ser considerados “prisões” de matéria e luz no Universo. A ciência envolvendo o estudo dos buracos negros têm se desenvolvido substancialmente e esses objetos passaram a fazer parte do imaginário da cultura humana.

Os buracos negros foram previstos teoricamente muito antes de serem observados experimentalmente (ALMEIDA, 2020). A ideia de um corpo que capturaria a luz, tornando-se assim invisível para o resto do universo, foi considerada pela primeira vez pelo britânico John Michell (1724-1793) e pelo francês Pierre-Simon Laplace (1749-1827), no final do século XVIII.

O conceito denominado de “estrela negra” por John Michell, foi apresentado em três sessões distintas da Royal Society de Londres que ocorreram, duas delas em dezembro de 1783 e a última em janeiro de 1784. Na página 50, parágrafo 29, daquele trabalho, Michell fala de um objeto cuja luz não poderá chegar até nós devido à ação da gravidade: em resumo, segundo este trabalho, em um objeto com a mesma densidade do Sol, mas um raio 500 vezes maior, a velocidade de escape excederia a velocidade da luz no vácuo (aproximadamente 300.000 km/s), ou seja, ele seria um buraco negro, de acordo com a nomenclatura atual. Michell argumenta também que se quaisquer outros corpos luminosos orbitarem em torno deste tipo de “estrela negra”, será possível inferir a sua existência com algum grau de probabilidade, a partir das dicas fornecidas pelas irregularidades nas órbitas destes corpos luminosos que não são possíveis de explicar por meio de qualquer outra hipótese.

Hoje conhecemos, de fato, pistas da presença de buracos negros associadas aos registros de órbitas anômalas e aceleradas de uma estrela ou de um conjunto de estrelas em torno de pontos supostamente vazios. Este fenômeno ocorre com os movimentos de estrelas situadas em torno do centro da Via Láctea, a nossa galáxia, como é o caso da estrela S2, evidenciando que existe ali um buraco negro supermassivo, denominado Sagittarius A* (resumidamente Sgr A*), com aproximadamente 4 milhões de massas solares. Este feito rendeu o Prêmio Nobel de Física de 2020 para o alemão Reinhard Genzel (1952-) e a estadunidense Andrea Ghez (1965-), juntamente com o britânico Roger Penrose (1931-), que desempenhou um papel importante nas primeiras formulações teóricas acerca de buracos negros supermassivos nos anos 1960, como será visto mais à frente. O trabalho de Andrea Ghez e colaboradores, publicado em 2008, sob o título “Measuring distance and properties of the milky way’s central supermassive black hole with stellar orbits” (“Medindo distância e

propriedades do buraco negro supermassivo do centro da Via Láctea com órbitas estelares”) propõe mecanismos experimentais para mensurar características do buraco negro supermassivo situado na região central de nossa galáxia. O trabalho extenso publicado por Reinhard Genzel, Frank Eisenhauer e Stefan Gillessen em 2010, intitulado “The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster” (“O buraco negro supermassivo no centro da galáxia e o aglomerado nuclear de galáxias”) também tem o mesmo objetivo: na sua parte IV intitulada “Testing the Black-Hole Paradigm: Is Sgr A* a Massive Black Hole?” (“Testando o paradigma do buraco negro: É Sgr A* um buraco negro supermassivo?”), o subitem B - “Evidence from stellar motions” (“Evidências de movimentos estelares”) também procura seguir a sugestão fornecida por Michell há mais de dois séculos.

Na década seguinte à apresentação feita por John Michell, em um trabalho em francês publicado em 1796, com o título “Exposition du Système du Monde” (“Exposição do Sistema de Mundo”), Pierre-Simon Laplace, fez referência, sem demonstrar, a corpos que seriam tão massivos que nem a luz poderia escapar da sua superfície e que seriam invisíveis por causa da magnitude da velocidade de escape. Uma tradução para o inglês deste trabalho, com o título “The System of the World” foi feita por J. Pond e publicada em 1809 em Londres, no Reino Unido.

Três anos depois, em 1799, Laplace publicou (em alemão, em uma revista de Weimar, cidade situada no centro da Alemanha) um trabalho sobre a afirmação acerca da existência de corpos invisíveis, na forma de um ensaio (MONTGOMERY, ORCHISTON; WHITTINGHAM, 2009). A tradução para o inglês deste artigo, com o título “Proof of the theorem that a heavenly body can be such large that light cannot leak out from it” (“Prova do teorema de que um corpo celeste pode ser tão grande que a luz não pode escapar dele”), foi disponibilizada em um trabalho de autoria de H. Stephani (2003) que estabelece algumas relações entre a descoberta de Laplace de que buracos negros podem ocorrer na natureza e o poema “Der Taucher” (em inglês “The Diver”, em português “O Mergulhador”) escrito pelo poeta alemão Friedrich von Schiller (1759-1805) em 1797.

Usando apenas conceitos da mecânica clássica, é possível calcular a velocidade de escape de um corpo esférico com uma determinada massa (por exemplo, uma estrela) e, por decorrência, determinar o raio que ele tem que ter para que a velocidade de escape seja igual à velocidade da luz: assim é possível prever a existência de estrelas tão densas que a luz não poderia escapar delas. Supondo um corpo esférico (uma



estrela) de massa M e raio R , para calcular a velocidade de escape v_e necessária para que um objeto de massa m , situado na superfície do corpo esférico, consiga escapar da sua gravidade, basta igualar a energia cinética do objeto $K=mv_e^2/2$ ao módulo da energia potencial gravitacional $U=GMm/r$. Com isso temos $v_e^2=2GM/r$ ou de modo alternativo: $r=2GM/v_e^2$. Portanto, em um corpo suficientemente massivo, a velocidade de escape é igual à velocidade da luz c para um raio igual a $R=2GM/c^2$ e para qualquer ponto interior a este raio (que define um “horizonte de eventos”) a velocidade de escape será maior que a velocidade da luz.

A relatividade geral que foi publicada por Einstein no final de 1915, é uma teoria do espaço, tempo e matéria, na qual a gravitação é explicada por meio da curvatura do espaço-tempo e da sua interação com a matéria. Resumidamente: o espaço-tempo diz à matéria como se mover e a matéria diz ao espaço-tempo como curvar (WHEELER, 2010). Por milênios, o espaço foi considerado o fundo fixo onde os fenômenos físicos ocorreram; a teoria da relatividade mudou isso, propondo o espaço-tempo como a nova arena (STOICA, 2014). O espaço-tempo pode ser definido como sendo a soma de todos os eventos de todas as coisas: tudo que já aconteceu, que acontece ou que acontecerá é apenas um elemento ou ponto do espaço-tempo. Portanto, o espaço-tempo é a propriedade que relaciona todas as coisas ou objetos dotados de características físicas (ROMERO; VILA, 2014). Uma vez que são feitos de espaço e tempo curvos, e energia, os buracos negros são, de certo modo, os objetos mais elementares da teoria da relatividade. Buracos negros podem ser definidos por apenas três parâmetros livres que os caracterizam completamente, a saber massa, spin (rotação) e carga (GAMMIE, SHAPIRO; MCKINNEY, 2004), três quantidades que têm em comum o fato de serem conservadas (BEKENSTEIN, 1998). Se ele não for carregado eletricamente, bastarão a massa e o momento angular para caracterizá-lo (FROLOV; NOVIKOV, 1997).

Os buracos negros são regiões nos espaços cuja velocidade de escape é maior que a velocidade da luz, a velocidade limite para qualquer sinal físico que carregue informação de acordo com a teoria da gravitação de Einstein: é por este motivo que nenhum objeto, partícula ou sinal, nem mesmo a luz, pode escapar de um buraco negro (SILVA, 2018). O limite dessa região do espaço de não retorno é chamado de horizonte de eventos. A deformação do espaço-tempo causada por um buraco negro é contraintuitiva e incorpora efeitos relativísticos: o fluxo do tempo na vizinhança de um buraco negro é cada vez mais lento conforme um objeto se aproxima do ho-

rizonte de eventos (HERDEIRO, 2019). Do ponto de vista geométrico, um buraco negro deforma o espaço-tempo de modo que as linhas geodésicas (ou seja, os caminhos mais curtos) seguidas pelas partículas de luz caem na deformação crítica sem retornar, o que explica por que não é possível observar um buraco negro diretamente (COIMBRA-ARAÚJO, 2016).

A existência dos buracos negros provoca a reflexão de que para os observadores externos ao buraco negro, existe uma região do espaço-tempo que está em princípio inobservável em seu referencial. Faz algum sentido em discutir o que acontece dentro de um buraco negro se não houver maneira de comparar as observações com as previsões, algo que é considerado fundamental para o fazer científico? Talvez a resposta geral a essa questão esteja fora da própria física, na filosofia, por exemplo (FROLOV; NOVIKOV, 1997).

Apesar de ter sido o criador da relatividade geral, Einstein nunca derivou o conceito de buraco negro de sua teoria e nunca admitiu a possibilidade de sua existência teórica (CROTHERS, 2006), tendo buscado usar ironicamente as suas próprias equações para provar que esse tipo de objeto não poderia existir (BERNSTEIN, 2007), como foi o caso do seu artigo “On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses”, publicado em 1939, no qual ele conclui afirmando que a singularidade de Schwarzschild não pode existir na realidade física (“Schwarzschild singularities” do not exist in physical reality”) pela razão de que a matéria não pode se concentrar arbitrariamente (“The ‘Schwarzschild singularity’ does not appear for the reason that matter cannot be concentrated arbitrarily”). Este é um artigo de Einstein que tem sido largamente esquecido (GUPTA, 2019), talvez por abalar o estereótipo de que cientistas geniais não erram.

Matematicamente, os buracos negros são descritos por soluções das equações de campo da teoria da relatividade geral, publicadas pela primeira vez em 1916 por Karl Schwarzschild (1873-1916). Ao tentar explicar o campo gravitacional fora de uma estrela esférica, uma solução apresentava um raio (chamado de raio de Schwarzschild) muito menor que o raio da estrela, sendo que as propriedades desta região eram bastante inusitadas. Em decorrência, esta solução foi considerada sem importância em termos astrofísicos e foi ignorada pela maioria dos físicos por algumas décadas (HERDEIRO, 2019). Para uma estrela de massa M , o raio de Schwarzschild r_s é dado numericamente pela equação $r_s = 2GM/c^2$, sendo G a constante da gravitação universal e c a velocidade da luz.



Quase que simultaneamente, no mesmo ano de 1916, o holandês Johannes Droste (1886-1963) obteve a mesma solução de Schwarzschild (SAA, 2016). Essa é uma indicação de como surgem novas ideias na física e do caráter coletivo do esforço científico, pois torna evidente que, frequentemente, em um certo período histórico, algumas ideias se tornam maduras para a sua época, com mais que um cientista as “colhendo” e produzindo conhecimentos similares ao mesmo tempo. No ano seguinte à publicação original do artigo de Droste, em 1917 este mesmo trabalho foi publicado em inglês, com o título “The field of a single centre in Einstein’s theory of gravitation, and the motion of a particle in that field” (“O campo de um centro único na Teoria de Einstein da Gravitação, e o movimento de uma partícula nesse campo”).

A solução de Schwarzschild para as equações da relatividade geral, descreve o espaço-tempo ao redor de um buraco negro com simetria esférica, sem carga elétrica e sem rotação. Logo em seguida, foi obtida uma nova solução de um buraco negro carregado eletricamente e sem rotação, primeiro por Hans Jacob Reissner (1874-1967) em 1916 e, mais a frente, independentemente, por Gunnar Nordström (1881-1923) em 1918 (LIMA JUNIOR et al., 2021). Finalmente, a primeira solução matemática exata para um buraco negro com rotação foi obtida décadas depois, em 1963, por Roy Patrick Kerr (1934-).

Uma exceção no período de algumas décadas de “entressafra”, após os artigos iniciais sobre singularidades nos anos 1910, foi o aclamado artigo teórico “On Continued Gravitational Contraction” (“Sobre a contração gravitacional contínua”, em tradução livre) de J. Robert Oppenheimer (1904-1967) e Hartland Snyder (1913-1962), publicado em 1939, mostrando que, em seu próprio sistema de referência, uma estrela suficientemente pesada, quando as fontes termonucleares de energia são exauridas, vai colapsar indefinidamente, com a sua superfície diminuindo e ultrapassando o raio gravitacional (a denominação usada na época para o raio de Schwarzschild), sem qualquer resistência, durante o processo irrefreável de auto-compressão. A região definida pela superfície do horizonte de eventos apresenta propriedades peculiares. Enquanto o tempo total de colapso para um observador em movimento junto com a matéria estelar se comprimindo é finito, um observador externo vê a estrela encolhendo assintoticamente para seu raio gravitacional. Esta ideia considerada muito estranha para se acreditar em 1939, foi a primeira versão do conceito moderno de buraco negro, um corpo que é tão massivo que só pode ser detectado por sua interação gravitacional (ALMEIDA, 2018).

A questão central da linha de raciocínio desenvolvida neste artigo pioneiro de Oppenheimer e Snyder (que era um estudante orientado por Oppenheimer na época) – “O que acontece quando uma estrela de nêutrons não consegue segurar seu próprio peso?” – é tão óbvia, em retrospecto, que parece incrível que outros cientistas não a tenham seguido, na época de sua publicação (THORNE, 1994). Em contraste com, por exemplo, o princípio da incerteza na física de partículas, a ideia de buraco negro não recebeu o benefício da dúvida: possivelmente, os insights astrofísicos de Oppenheimer estavam bem à frente de seu tempo (ORTEGA-RODRÍGUEZ et al., 2017). O conceito de matéria escura que foi imaginado nos anos 1930 por Fritz Zwicky (1898-1974), também teve que esperar algumas décadas, aproximadamente na mesma época, para merecer a devida atenção da comunidade científica. A ocorrência da Segunda Guerra Mundial, entre 1939 e 1945, o conflito mais mortal de todos os tempos e que engolfou boa parte do mundo, pode ter colaborado para desviar a atenção da comunidade científica e modificar as suas prioridades: o estudo do cosmo neste contexto não era uma prioridade. Adicionalmente, isto pode ter decorrido também do fato de que os estudos na área da teoria da relatividade entre meados da década de 1920 e meados da década de 1950 se estagnaram, em detrimento do desenvolvimento da física quântica que atraiu mais a atenção da maioria dos físicos deste período (ALMEIDA, 2020).

Nos anos 1950 e 1960, alguns físicos importantes, como o estadunidense John Wheeler (1911-2008) e o britânico Dennis Sciama (1926-1999) começaram a coordenar equipes de pesquisa voltadas especificamente para problemas envolvendo a teoria da relatividade.

Nos EUA, na Universidade de Princeton, John Wheeler se tornou uma liderança neste campo de pesquisa, orientando os trabalhos de físicos importantes, dentre os quais Kip Thorne (1940-), que foi um dos ganhadores do Prêmio Nobel de 2017, pela detecção das ondas gravitacionais em 2015, ondas que neste caso específico foram provocadas pela fusão de dois buracos negros. Foi John Wheeler quem adotou pela primeira vez o termo buraco negro em um artigo publicado em 1968. Entretanto, anteriormente, no início dos anos 1960, Robert Dicke (1916-1997), colega de Wheeler em Princeton, conhecedor da história acerca de uma tragédia acontecida duzentos anos antes em uma prisão indiana conhecida como “Buraco Negro de Calcutá”, já a comparava com o colapso gravitacional completo de estrelas. A expressão “Black Hole” deve, portanto, ser reconhecida como fruto da parceria entre Wheeler e Dic-



ke (HERDEIRO, 2019). Outros termos que eram usados antes, tais como estrela escura (“dark star”), estrela congelada (frozen star”) e estrela colapsada (“collapsed star”), não tiveram o mesmo apelo que a expressão buraco negro, caíram em desuso e acabaram não vingando. Segundo Wheeler (2010), a expressão curta “black hole” era melhor que a expressão que ele usava antes, “gravitationally completely collapsed object” (“objeto gravitacionalmente colapsado por completo”). O termo buraco negro imediatamente capturou a imaginação dos cientistas e do público em geral, tendo se mostrado o nome ideal: primeiro porque a singularidade cria uma espécie de “buraco” no espaço-tempo, impedindo que qualquer coisa na região dentro do horizonte de eventos escape para fora dele; além disso, para um observador externo, esse buraco é negro, pois nem mesmo a luz emana dele.

No Reino Unido, por sua vez, o físico Dennis Sciama, na Universidade de Cambridge, também desenvolveu um grupo de pesquisa avançada em áreas relacionadas à relatividade, que contou, entre outros, com a participação de jovens físicos, na época, como Stephen William Hawking (1942-2018) e Roger Penrose (1931-).

Nos anos 1960, iniciou-se um período em que foram realizados desenvolvimentos teóricos e descobertas observacionais importantes. Stephen Hawking em suas pesquisas, que se iniciaram nesta época, acabou por descobrir, teoricamente, que um buraco negro poderia “evaporar” (perder massa) por meio de processos quânticos: ele mostrou que a radiação eletromagnética continuamente escapa (“vaza”) dos buracos negros e, portanto, apesar do seu campo gravitacional gigantesco, eles lentamente se dissipam e “morrem”, ou seja, desaparecem (GUPTA, 2019), um resultado no qual o próprio Hawking no início não acreditou, pois pensou que poderia ser apenas um artefato matemático oriundo da simetria esférica que ele assumira para o problema (PAGE, 2004). Sobre isto, Hawking primeiro publicou um artigo curto, com duas páginas, na revista “Nature” em 1974 intitulado “Black Hole Explosions?” (“Explosões de buracos negros?”), sintomaticamente, com uma pergunta no título. No ano seguinte, em 1975 Hawking publicou um artigo bem mais detalhado na revista “Communications in Mathematical Physics” intitulado “Particle creation by black holes” (“Criação de partícula por buracos negros”). Neste segundo trabalho, Hawking afirma textualmente que “*This thermal emission leads to a slow decrease in the mass of the black hole and to its eventual disappearance: any primordial black hole of mass less than about 10^{15} g would have evaporated by now*” (“Esta emissão térmica leva a uma lenta diminuição da massa do buraco negro e ao seu eventual

desaparecimento: qualquer buraco negro primordial de massa inferior a cerca de 10^{15} g já teria se evaporado”). A existência de um mecanismo segundo o qual os buracos negros evaporariam e, eventualmente, desapareceriam, foi uma predição notável feita por Stephen Hawking e que mudou completamente a concepção da teoria clássica de que os buracos negros seriam indestrutíveis (MATSAS, 2005).

Este trabalho de Hawking foi considerado bastante inovador na década de 1970, dentre outros motivos, porque articulava três diferentes áreas da física, a teoria quântica de campos, a relatividade geral e a termodinâmica clássica; além disso ele contrariava a ideia que prevalecia na época de que os buracos negros seriam objetos passivos, no sentido de que apenas absorviam matéria, mostrando que eles também podiam emitir partículas (SANTI; SANTARELLI, 2019), e, portanto, possuíam temperatura e entropia. A entropia de um buraco negro, em particular é diretamente proporcional à área da superfície do horizonte de eventos (BASTOS FILHO; ARAUJO, 2007).

Roger Penrose, em 1965 escreveu um artigo considerado seminal sobre buracos negros, cuja tradução para o português, intitulada “Colapso gravitacional e singularidades espaço-temporais”, foi publicada por Julio C. C.F. Souza (2021) e na qual ele inicia lembrando que o descobrimento, nos anos 1960, de fontes de rádio quase-estelares renovou o interesse pela questão do colapso gravitacional, pois as quantidades enormes de energias emitidas poderiam resultar do colapso de uma massa entre 1 milhão e 100 milhões de massas solares, para a vizinhança de seu raio de Schwarzschild. Trata-se da previsão teórica dos buracos negros supermassivos (associados aos quasares) que formam núcleos de galáxias: em 2020, Penrose foi um dos ganhadores do Prêmio Nobel de Física por este seu trabalho pioneiro.

Portanto, na década de 1960, o incentivo para o desenvolvimento do estudo dos buracos negros veio também da física experimental, com a detecção de fontes de rádio de grande energia que ficaram conhecidas como quasares, abreviação de objetos quase-estelares (CONOVER, 2019), porque eles se pareciam com estrelas nas fotografias. Foi a liberação dessas quantidades imensas de energia que levou à especulação de que se tratava de objetos altamente compactos nos quais os processos relativísticos eram fundamentais para a geração de energia. Parece ser uma contradição o fato de que objetos tão luminosos quanto quasares estejam associados a buracos negros supermassivos que por definição não emitem radiação, entretanto isso ocorre devido aos gases que são capturados da vizinhança e migram em direção



ao buraco negro, causando fricção e transformando sua energia potencial em energia cinética e térmica, que é liberada por meio de irradiação (STEINER, 2010).

A maioria das galáxias que contém um bojo (uma estrutura esferoidal em torno dos centros galácticos), possuem um buraco negro supermassivo no seu núcleo. A massa do buraco negro central é da ordem de um milésimo da massa do bojo: essa relação de proporcionalidade direta permite concluir que se o bojo cresce, o buraco negro cresce conjuntamente (STORCHI-BERGMANN, 2009).

Um outro dado experimental que ganhou destaque entre as décadas de 1960 e 1970 diz respeito a uma das fontes de raios-X mais brilhantes no céu, chamada de Cygnus X-1 (ou resumidamente de Cyg X-1), por se localizar na constelação de Cygnus. Em dezembro de 1970, com o lançamento do Uhuru, o primeiro satélite voltado para a pesquisa em astronomia na faixa espectral dos raios-X, foi determinado que Cyg X-1 se tratava de um sistema binário. A partir da medida do deslocamento Doppler da estrela parceira em órbita, estimou-se a massa da fonte de raios-X como sendo da ordem de 15 massas solares, muito acima dos limites teóricos para as massas de anãs brancas ou de estrelas de nêutrons. Adicionalmente foi detectada uma rápida variabilidade de Cyg X-1, em escalas de tempo menores que um segundo, sugerindo fortemente que o tamanho físico da região emissora de raios-X era bastante compacto, muito menor do que uma estrela típica. Estes motivos combinados (massa muito grande e tamanho muito pequeno) tornaram Cyg X-1 um excelente candidato para ser um buraco negro do tipo estelar (SCHNITTMAN, 2019).

Em 1963, o matemático neozelandês Roy Patrick Kerr publicou o trabalho “Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics” (“Campo Gravitacional de uma Massa em Rotação como um exemplo de uma Métrica Algebricamente Especial”), com uma solução exata para a equação de campo de Einstein para um objeto massivo em rotação, modelando o campo gravitacional externo a um buraco negro em rotação (HERDEIRO, 2019). A solução de Kerr não apresenta mais simetria esférica, mas sim simetria por rotação em torno de um eixo (HOOF, 2009) e está associada a um buraco negro descrito por dois parâmetros, a sua massa e o seu momento angular (XAVIER et al., 2020). Se a rotação é interrompida, obtém-se a solução Schwarzschild. Deste modo, os buracos negros de Schwarzschild e Kerr estão associados respectivamente a buracos negros estáticos e em rotação. Adicionalmente, os buracos negros de Kerr-Newman são aqueles que além de rotação, também possuem carga elétrica: assim, se generaliza a métrica

de Kerr levando em consideração também a energia de um campo eletromagnético, junto com a rotação (COIMBRA-ARAUJO, 2016). Consequentemente, das quatro soluções exatas das equações da relatividade geral descrevendo buracos negros com ou sem carga e com ou sem momento angular, a solução com os três parâmetros de Kerr-Newman (massa, rotação e carga), proposta em 1965, é a mais geral, para o estado final de equilíbrio de um buraco negro (LUMINET, 1998).

A detecção de ondas gravitacionais, em 2015, criadas pela coalescência (fusão) de um sistema binário de buracos negros tornou-se uma das evidências experimentais mais concretas de que os buracos negros existem (ALMEIDA, 2018). O evento GW150914 foi revelado pela estrutura do laboratório LIGO (“The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory”) em Hanford e Livingston nos Estados Unidos (ABBOTT et al., 2016). Estas ondas gravitacionais foram formadas pela coalescência de dois buracos negros, cujas massas valiam 36 e 29 massas solares: a massa final do buraco negro formado era de 62 massas solares, indicando que aproximadamente 3 massas solares foram irradiadas na forma de ondas gravitacionais, uma quantidade imensa de energia.

O conceito de buraco negro é hoje amplamente aceito na astronomia e envolve uma variedade de corpos com tamanhos diversos. Há os buracos negros remanescentes do colapso de estrelas com massas da ordem de dezenas de massas solares. Buracos negros estelares são formados com a explosão como supernovas de estrelas progenitoras cuja massa (na sequência principal) é maior que cerca de 25 massas solares (FRYER, 1999). Se a massa da estrela for extremamente grande, com no mínimo uma massa da ordem de 40 massas solares, ela pode colapsar diretamente em um buraco negro sem uma explosão de supernova (MIRABEL, 2016). Devido aos seus efeitos gravitacionais, há evidências de que buracos negros com massas estelares existam em uma série de sistemas binários em nossa galáxia (FROLOV; NOVIKOV, 1997). Há também os buracos negros supermassivos com massas entre um milhão e um bilhão de massas solares que formam os núcleos ativos de galáxias (MONTGOMERY, ORCHISTON; WHITTINGHAM, 2009).

Mais recentemente, a partir das pesquisas em conjunto entre os observatórios LIGO e VIRGO, em um dos eventos detectados, GW190521, os dados indicam que as ondas gravitacionais foram produzidas pela coalescência entre dois buracos negros com massas iguais a 85 e 66 massas solares resultando em um buraco negro com 142 massas solares, que seria considerado um buraco negro com massa intermediária,



categoria esta que envolve buracos negros com massas entre 100 e 100 mil massas solares (ABBOTT et al., 2020). Uma hipótese é a de que os buracos negros intermediários seriam as “sementes” de buracos negros supermassivos (PIVETTA, 2020). De qualquer modo, as tecnologias de detecção de ondas gravitacionais iniciaram uma verdadeira “idade de ouro” dos buracos negros em particular com a observação de novas classes de buracos negros e das chamadas fábricas galácticas que os geram (GAWRYLEWSK, 2021), com, inclusive, a expectativa de que possam surgir processos inesperados envolvidos na formação de buracos negros (PAPANTONOPOULOS, 2009).

Finalmente, especula-se a respeito da existência dos chamados buracos negros primordiais, com massas pequenas (até menores que a massa da Terra) formados no início do universo, após o Big Bang, a partir de inomogeneidades que geraram pequenas regiões cuja atração gravitacional superaram a expansão, provocando o colapso em uma singularidade (GUARIENTO, 2010).

A vizinhança de um buraco negro a partir da qual nada consegue escapar é delimitada por uma espécie de membrana unidirecional que constitui o horizonte de eventos. Dentro dele há uma singularidade, o que significa um ponto com densidade infinita, provocando um furo no tecido do espaço-tempo: eventualmente, toda massa que entra no buraco negro, atravessando o seu horizonte de eventos, acaba “caindo” nesta singularidade, “engordando-a” (ALMEIDA, 2021). Essa “membrana” do horizonte de eventos é o que tem que ser levado em conta no reconhecimento de um objeto como sendo um buraco negro (NEVES, 2017).

A colaboração “Event Horizon Telescope” – EHT, ou, em português, “Telescópio Horizonte de Eventos”¹ é uma importante cooperação científica que se iniciou em 2009, envolvendo centenas de cientistas de 60 instituições localizadas em 20 países diferentes (MATSUURA, 2020). Em 10 de abril de 2019, a EHT divulgou uma das mais comentadas imagens associadas à ciência durante muito tempo: a imagem de um buraco negro existente no centro da galáxia Messier 87 (indicado por M87*), situado a aproximadamente 53 milhões de anos-luz da Terra e com uma massa de aproximadamente 6,5 bilhões de massas solares. Para compor esta imagem, foram usadas oito estações de observação com radiotelescópios espalhados em diferentes regiões do globo terrestre, sincronizando-as de modo a tornar a Terra um grande radiotelescópio e realizar observações no comprimento de onda de 1,3 mm (NEVES, 2020). Em certo sentido, metaforicamente falando, foi produzida uma imagem do fim do mundo: o limite existente entre o interior e o exterior de um buraco negro é feito pelo horizonte

de eventos e quando alguém o cruza, de fora para dentro, não consegue escapar mais do buraco negro. Logo, alguns divulgadores da ciência costumam afirmar que próximo ao horizonte de eventos deveriam existir inscrições com o mesmo teor daquelas do inferno de Dante: “Deixai, ó vós que entraís, toda a esperança!” (ALIGHIEIRI, 2003). Na imagem produzida, a mancha escura, envolta pelo anel iluminado no centro da M87, é justamente a sombra deixada pelo horizonte de eventos (ZORZETTO, 2019).

Provavelmente, o próximo passo para o EHT talvez seja investigar o buraco negro que existe no centro de nossa galáxia da Via Láctea, conhecido como Sagitário A* (Sgr A*), que é o buraco negro supermassivo mais próximo da Terra: Sgr A* está localizado a 26 mil anos-luz de distância da nós e tem uma massa que vale cerca de 4 milhões de massas solares. Em contraste, em valores aproximados, o buraco negro do M87* está 2.000 vezes mais distante da Terra e tem 1.600 vezes mais massa do que Sgr A*: portanto os tamanhos das sombras dos buracos negros são semelhantes, o que poderia facilitar a produção de uma imagem do buraco negro existente no centro da Via Láctea como ocorreu com M87*.

Novos insights sobre buracos negros supermassivos poderão ser obtidos a partir da sensibilidade do Telescópio Espacial James Webb (programado para ser lançado ao espaço até o final de 2021), que pelo fato de operar no infravermelho, permitirá investigar os centros obscurecidos das regiões que hospedam os núcleos ativos das galáxias; avanços na pesquisa acerca de buracos negros supermassivos também poderão advir dos telescópios gigantes (STORCHI-BERGMANN; SCHNORR-MÜLLER, 2019), como é o caso do ELT – “Extremely Large Telescope”, um empreendimento do ESO – “European Southern Observatory”² que está em construção no Chile.

Uma outra área de destaque na pesquisa nessa área que deve ser ressaltada – e que será mais investigada no futuro – é aquela que lida com o conceito de buraco negro regular (ou não singular) que não apresentaria uma singularidade dentro dele, ou seja, em que não ocorre uma divergência para o infinito na função da massa (CHAMSEDDINE; MUKHANOV, 2017).

Considerações finais

Os astrônomos já identificaram diversos objetos no céu que coincidem completamente com as descrições detalhadas que os teóricos derivaram para os buracos negros e que não podem ser interpretados como sendo qualquer outra coisa: a de-



tecção em 2015 pela primeira vez de ondas gravitacionais produzidas pelos buracos negros, a primeira imagem produzida para um buraco negro (M87*) em 2019 e a destinação do Prêmio Nobel de 2020 para três pesquisadores envolvidos com investigações acerca de buracos negros supermassivos localizados no centro das galáxias são algumas das evidências de que a área de pesquisa que estuda os buracos negros se consolidou definitivamente no âmbito da astrofísica e passou a ser reconhecida como parte constituinte relevante da ciência produzida contemporaneamente.

Os múltiplos interesses de diversos alunos por áreas da física moderna e contemporânea, como a astrofísica, a cosmologia, a física de partículas, a relatividade e a física quântica, podem ser úteis em iniciativas pela melhoria do ensino de física e, também, em atividades de divulgação científica com o intuito de colaborar com o processo de aprendizagem, estimular a imaginação dos jovens e despertar a vontade de se aprofundar mais nos estudos de temas de fronteira da ciência: o estudo dos buracos negros pode se configurar um eixo temático propício para articular estas e outras áreas do conhecimento.

A ideia de “narrativa” é importante na educação, assim como ocorre em outros diversos aspectos da vida humana (para exemplificar, basta pensar na força do cinema, como *soft power*). Narrativas não são estáticas, mas sim dinâmicas e associadas a situações que se transformam com o tempo a partir das ações dos seus protagonistas (HARARI, 2018). A história da ciência pode propiciar narrativas para os conteúdos escolares a serem ensinados que apresentam diversas potencialidades no trabalho voltado ao ensino, relacionadas, por exemplo, com o envolvimento emocional do leitor ou ouvinte, com criação de empatia e identificação e com o estímulo da imaginação (DOMINGOS, BAGDONAS; ZANETIC, 2020). Em particular a história do desenvolvimento de um determinado conceito (como o de buraco negro), com seus dilemas, idas e vindas, controvérsias e disputas pode colaborar para a aprendizagem e contribuir para uma compreensão diferenciada e mais próxima da realidade acerca da produção da ciência (FIÚZA; GUERRA, 2014). O trabalho com episódios controversos da história da ciência, permeado por uma abordagem filosófica pluralista, pode colaborar decisivamente para a formação de cidadãos críticos e reflexivos (BAGDONAS, ZANETIC; GURGEL, 2014), algo importante para a vida na democracia.

O trabalho na área de ensino de ciências a partir de fontes primárias – com textos originais de cientistas que se destacaram em momentos históricos impor-

tantes da construção do conhecimento científico – pode ser bastante valioso para a aprendizagem de diversos conceitos científicos, em especial por permitir uma mediação dialógica em sala de aula (ZANOTELLO, 2011) e por desvelar o fato de que a consolidação de novas ideias científicas não é um processo linear. A leitura de trechos dos artigos originais de cientistas que colaboraram ao longo da história para o estabelecimento da área de estudo acerca dos buracos negros fornece indicações acerca dos obstáculos que surgiram para a compreensão científica deste fenômeno. Em particular, é bastante auspicioso em termos educacionais, o fato de estarem abertos e disponíveis na internet artigos científicos acerca da ideia de buraco negro, escritos por pesquisadores como Michell, Laplace, Einstein, Schwarzschild, Droste, Oppenheimer, Hawking, Kerr, Penrose, Ghez e Genzel. Este material pode contribuir como um recurso didático valioso para a aprendizagem e compreensão de diversos aspectos científicos do estudo de buracos negros e de assuntos interrelacionados, como o ciclo de vida das estrelas, a noção de singularidade, a relatividade geral, os quasares, as galáxias e as ondas gravitacionais. O estudo do desenvolvimento ao longo do tempo das ideias científicas permite pensar em estratégias didáticas que propiciem uma melhor compreensão dos conceitos científicos produzidos, especialmente pelo fato de evidenciar as dificuldades históricas, as dúvidas, os dilemas e os desafios que surgiram neste processo histórico (CARVALHO; GOMES, 2017).

O desinteresse pelo conhecimento científico, a aversão ao estudo das ciências e o fracasso escolar associado às disciplinas ligadas às ciências naturais são problemas graves de nosso país, que exigem um esforço investigativo para a sua compreensão e ações visando a sua superação: para que o Brasil consiga atender às necessidades fundamentais de sua população, o ensino de ciências para todos e de qualidade é uma necessidade premente para viabilizar o desenvolvimento social e econômico. Os buracos negros podem cumprir um papel relevante neste sentido, ao despertar a curiosidade e engajar o aluno nas tarefas relacionados ao seu próprio aprendizado.



Black Holes, History of Science and Physics Teaching

Abstract

This article examines the potential that exists in the use of the concept of black hole as a thematic axis for teaching physics and scientific dissemination activities, especially considering the history of the historical development of ideas about this object of astrophysics. For the theoretical foundation of this article, an extensive review of the scientific literature on the subject was made, through the analysis of works presented in academic congresses, articles published in specialized magazines, doctoral theses, master's dissertations and books. For a better structured study on the history of the evolution of the black hole concept since the end of the 18th century, original articles were used from scientists such as Michell, Laplace, Einstein, Schwarzschild, Droste, Oppenheimer, Hawking, Kerr, Penrose, Ghez and Genzel. The links for readers to access these articles are presented together with bibliographic references. The study of black holes and the history of science associated with them presents itself as an excellent thematic axis for the performance of interdisciplinary activities that can significantly contribute to the students' learning process.

Keywords: Astrophysics; Science Outreach; Original Paper; History of Science.

Notas

- ¹ Disponível em: <<https://eventhorizontetelescope.org/>>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- ² Disponível em: <<http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

Referências

- ABBOTT, B. P. et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. **Physical Review Letters**, 116, 061102, 12 feb. 2016. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>>. Acesso em: 21 ago. 2021.
- ABBOTT, R. et al. **GW190521: A Binary Black Hole Merger with a Total Mass of 150 $M_{\odot}$** . ArXiv, 2020. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2009.01075>>. Acesso em: 22 ago. 2021.
- ALIGHIERI, D. **A Divina Comédia**. São Paulo: Atena Editora, 2003. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/eb00002a.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2021.
- ALMEIDA, C. R. A brief history of black holes. **The Conversation**, 2018. Disponível em: <<https://theconversation.com/a-brief-history-of-black-holes-107298>>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- ALMEIDA, C. R. A pré-história dos buracos negros. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 42, e20200197, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172020000100712&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 23 ago. 2021.
- ALMEIDA, C. R. Buracos negros: mais de 100 anos de história. Cadernos de Astronomia, v. 2, n. 1, p. 93-105, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufes.br/astronomia/article/view/33499/22901>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

AMADOR, F.; ALBUQUERQUE, L. G. Discussões em áreas de fronteira da ciência com impacto na sociedade: dilemas no domínio do desenvolvimento curricular. *Indagatio Didactica*, v. 8, n. 1, 2016. Disponível em: <<https://proa.ua.pt/index.php/id/article/view/4710/3522>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

BAGDONAS, Alexandre; ZANETIC, João; GURGEL, Ivã. Controvérsias sobre a natureza da ciência como enfoque curricular para o ensino da física: o ensino de história da cosmologia por meio de um jogo didático. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 7, n. 2, p. 242-260, 2014. Disponível em: <https://www.sbhic.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=1960>. Acesso em: 23 ago. 2021.

BASTOS FILHO, J. B.; ARAUJO, R. M. X. A entropia de Hawking para buracos negros: um exercício de análise dimensional a partir de um texto de divulgação. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 527-533, 2007. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172007000400010>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

BEKENSTEIN, J. D. Black Holes: Classical Properties, Thermodynamics, and Heuristic Quantization. *ArXiv*, 1998. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/gr-qc/9808028.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

BERNSTEIN, J. The Reluctant Father of Black Holes. *Scientific American*, 2007. Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/the-reluctant-father-of-black-holes-2007-04/>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

CARNEIRO, D. L. C. M.; LONGHINI, M. D. Divulgação científica: as representações sociais de pesquisadores brasileiros que atuam no campo da astronomia. *RELEA*, n. 20, p. 7-35, 2015. Disponível em: <<https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/204/307>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

CARVALHO, B. C.; GOMES, L. C. Análise histórica do conceito de calor nos trabalhos de Joule e implicações para o ensino de física. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 22, n. 3, p. 264-290, 2017. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/cref/ojs/index.php/ienci/article/view/733/pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

CHAMSEDDINE, A. H.; MUKHANOV, V. Nonsingular black hole. *The European Physical Journal C*, v. 77, n. 183, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1140/epjc/s10052-017-4759-z>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Diagramas de Carter-Penrose em Relatividade Geral: buracos negros e outros exemplos explícitos. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 3, e3305, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0046>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

CONOVER, E. A short history of black holes. *Science News for Students*, 2019. Disponível em: <<https://www.sciencenewsforstudents.org/article/short-history-of-black-holes>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

CROTHERS, S. J. A Brief History of Black Holes. *Progress in Physics*, v. 2, p. 54-57, 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/26416769_A_Brief_History_of_Black_Holes>. Acesso em: 18 ago. 2021.

DAMASIO, F.; PACHECO, S. M. V. Buracos nem tão negros assim. *Física na Escola*, v. 10, n. 1, p. 30-35, 2009. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol10/Num1/a06.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2021.



DIAS, C. A.; RITA, J. R. S. Inserção da astronomia como disciplina curricular do ensino médio. RELEA, n. 6, p. 55-65, 2008. Disponível em: <<https://www.relea.ufscar.br/index.php/relea/article/view/121/145>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

DOMINGOS, Fernando; BAGDONAS, Alexandre; ZANETIC, João. “Então as luzes se curvaram”: Uma narrativa histórica para debater a ascensão da Relatividade Geral. Resumos do XVIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física (EPEF), 2020. Disponível em: <<https://sec.sbfisica.org.br/eventos/epf/xviii/sys/resumos/T0145-1.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

DROSTE, J. The field of a single centre in Einstein's theory of gravitation, and the motion of a particle in that field. Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences, Amsterdam, 19, p. 197-215, 1917. Disponível em: <<https://www.dwc.knaw.nl/DL/publications/PU00012346.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

EINSTEIN, A. The Field equations of Gravity. English translation. Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin, p. 844-847, 1915. Disponível em: <<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/vol6-trans/129>>. Acesso em: 31 ago. 2021.

EINSTEIN, A. On a stationary system with spherical symmetry consisting of many gravitating masses. Annals of Mathematics, v. 40, n. 4, p. 922-936, 1939. Disponível em: <http://old.phys.huji.ac.il/~barak_kol/Courses/Black-holes/reading-papers/Einstein1939.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

FIÚZA, Luciana; GUERRA, Andreia. Controvérsias históricas em torno à ideia de natureza: atividades com imagens. Ensaio - Pesquisa em Educação em Ciências, v. 16, n. 2, p. 125-145, 2014. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/epcc/a/JJxX34zPnMjbKJ6xpKJ6xpkFhk8n/?lang=pt>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

FROLOV, V. F.; NOVIKOV, I. D. Black Hole Physics. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic, 1997. Disponível em: <<http://thirring.org/upload/blackhole.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

FRYER, C. L. Mass Limits For Black Hole Formation. The Astrophysical Journal, v. 522, n. 1, p. 413-418, 1999. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/307647/pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

GAMMIE, C. F.; SHAPIRO, S. L.; MCKINNEY, J. C. Black Hole Spin Evolution. **The Astrophysical Journal**, v. 602, n. 1, p. 312-319, 2004. Disponível em: <<https://iopscience.iop.org/article/10.1086/380996/pdf>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

GARCIA, D. S. O conceito de espaço em física moderna: um estudo a partir de objetos da cosmologia. Campo Grande, MS: Dissertação de Mestrado (UFMS), 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufms.br/handle/123456789/2630>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

GAWRYLEWSK, A. Golden Age of Black Holes. Scientific American, 2021. Disponível em: <<https://www.scientificamerican.com/article/golden-age-of-black-holes/>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

GENZEL, R.; EISENHAEUER, F.; GILLESSEN, S. The Galactic Center massive black hole and nuclear star cluster. Reviews of Modern Physics, v. 82, p. 3121-3195, 2010. Disponível em: <<https://journals.aps.org/rmp/pdf/10.1103/RevModPhys.82.3121>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

GHEZ, A. et al. Measuring distance and properties of the milky way's central supermassive black hole with stellar orbits. ArXiv, 2008. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/0808.2870.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

GUARIENTO, D. C. *Evolução de Buracos Negros Primordiais no Universo*. São Paulo: Tese de Doutorado (IFUSP), 2010. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/43/43134/tde-16092010-102755/publico/tese.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

GUPTA, R. A Brief History of Black Holes. *The Wire*, 2019. Disponível em: <<https://thewire.in/the-sciences/a-brief-history-of-black-holes>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

HARARI, Y. N. *21 lições para o século 21*. São Paulo: Companhia das Letras, 2018.

HAWKING, S. W. Black hole explosions? *Nature*, v. 248, p. 30-31, 1974. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/248030a0>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

HAWKING, S. W. Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics*, v. 43, p. 199-220, 1975. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/BF02345020.pdf>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

HERDEIRO, C. A. R. The black hole fifty years after: Genesis of the name. *ArXiv*, 2019. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1811.06587.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

HORVATH, J. E. Uma proposta para o ensino da astronomia e astrofísica estelares no Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 35, n. 4, p. 1-8, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172013000400012>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

KERR, R. P. Gravitational Field of a Spinning Mass as an Example of Algebraically Special Metrics. *Physical Review Letters*, v. 11, p. 237-238, 1963. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/248781267_Gravitational_Field_of_a_Spinning_Mass_as_an_Example_of_Algebraically_Special_Metrics>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LANGHI, Rodolfo; NARDI, Roberto. Ensino da astronomia no Brasil: educação formal, informal, não formal e divulgação científica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 31, n. 4, 4402, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/jPYT5PrkLsy5TJQfM8pDWKB/abstract/?lang=pt>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

LAPLACE, P.-S. *Exposition du Système du Monde*. Paris: 1796. Disponível em: <<https://www.loc.gov/resource/rbctos.2017gen02967?r=-1.196,0.09,3.392,1.391,0>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

LAPLACE, P.-S. *The System of the World*. English translation by J. Pond. London: 1809. Disponível em: <<https://archive.org/details/systemworld01laplgoog/page/n8/mode/2up>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

LAPLACE, P.-S. Beweis des Satzes, dass die anziehende Kraft bey einem Weltkörper so gross seyn könne, dass das Licht davon nicht ausströmen kann. *Allgemeine Geographische Ephemeriden*, v. 4, p. 1-6, 1799. Disponível em: <https://zs.thulb.uni-jena.de/rsc/viewer/jportal_derivate_00201002/AGE_1799_Bd04_0041.tif?logicalDiv=jportal_jparticle_00214574>. Acesso em: 11 ago. 2021.

LIMA JUNIOR, H. C. D. et al. Sombras de buracos negros: desvendando a física por detrás da imagem de M87. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, e20200232, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0232>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

LUMINET, J.-P. Black Holes: A General Introduction. *ArXiv*, 1998. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9801252.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

MATSUURA, O. T. A primeira imagem de um buraco negro. *Cadernos de Astronomia*, v. 1, n. 1, p. 52-82, 2020. Disponível em: <<https://periodicos.ufes.br/astrofisia/article/view/31781/21244>>. Acesso em: 11 ago. 2021.



MACHADO, R. R.; TORT, A. C. Michell, Laplace e as estrelas negras: uma abordagem para professores do Ensino Médio. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 2, e2314, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0017>>. Acesso em: 16 ago. 2021.

MATSAS, G. Gravitação semiclássica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 1, p. 137-145, 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172005000100016>>. Acesso em: 10 ago. 2021.

MICHELL, J. On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose. By the Rev. John Michell, B. D. F. R. S. In a Letter to Henry Cavendish, Esq. F. R. S. and A. S. *Proceedings of the Royal Society of London, Philosophical Transactions of the Royal Society*, v. 74, p. 35-57, 1784. Disponível em: <<https://archive.org/details/philtrans00894012>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

MIRABEL, I. F. The formation of stellar black holes. *ArXiv*, 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1609/1609.08411.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

MONTGOMERY, C.; ORCHISTON, W.; WHITTINGHAM, I. *Journal of Astronomical History and Heritage*, v. 12, n. 2, p. 90-96, 2009. Michell, Laplace and the origin of the black hole concept. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/303727417.pdf>>. Acesso em: 22 ago. 2021.

MOURA, B. A.; SILVA, C. C. Abordagem multicontextual da história da ciência:

uma proposta para o ensino de conteúdos históricos na formação de professores. *Revista Brasileira de História da Ciência*, v. 7, n. 2, p. 336-348, 2014. Disponível em: <https://www.sbhc.org.br/arquivo/download?ID_ARQUIVO=1966>. Acesso em: 12 ago. 2021.

MURCHIKOVA, E. How the Event Horizon Telescope Showed Us a Black Hole. Institute for Advanced Studies (IAS), 2019. Disponível em: <<https://www.ias.edu/ideas/murchikova-eht-black-hole>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

NEVES, J. C. S. Relatividade bem comportada: buracos negros regulares. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 39, n. 3, e3303, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0288>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

NEVES, J. C. S. O buraco negro e sua sombra. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, e20200216, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0216>>. Acesso em: 19 ago. 2021.

OPPENHEIMER; J. R.; SNYDER, H. On Continued Gravitational Contraction. *Physical Review*, v. 56, p. 455-459, 1939. Disponível em: <<https://journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.56.455>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

ORTEGA-RODRÍGUEZ, M. et al. The early scientific contributions of J. Robert Oppenheimer: Why did the scientific community miss the black hole opportunity? *Physics Perspective*, v. 19, p. 60–75, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00016-017-0195-6.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

OSTERMANN, F.; MOREIRA, M. A. Uma revisão bibliográfica sobre a área de pesquisa “física moderna e contemporânea no ensino médio. *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 5, n. 1, p. 23-48, 2000. Disponível em: <<https://www.if.ufrgs.br/ceref/ojs/index.php/ienci/article/view/600>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

PAGE, D. N. Hawking radiation and black hole thermodynamics. ArXiv, 21004. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/hep-th/0409024.pdf>>. Acesso em: 23 ago. 2021.

PAPANTONOPOULOS, E. (Ed.). Physics of Black Holes: A Guided Tour. New York: Springer, 2009.

PENROSE, R. Gravitational collapse and space-time singularities. Physical Review Letters, v. 14, n. 3, p. 57-59, 1965. Disponível em: <<https://journals.aps.org/prl/pdf/10.1103/PhysRevLett.14.57>>. Acesso em: 13 ago. 2021.

PIETROCOLA, M. Modern Physics in Brazilian Secondary Schools. Proceedings of the International Conference on Physics Education, New Delhi, 2005. Disponível em: <https://sites.usp.br/nupic/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/Pietrocola_Modern_Physics_In_Brazilian_Secondary_Schools.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2021.

PIVETTA, M. De todos os tamanhos. Pesquisa Fapesp, v. 297, nov. 2020. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/de-todos-os-tamanhos/>>. Acesso em: 21 ago. 2021.

ROMERO, G. E.; VILA, G. S. Introduction to black hole astrophysics. New York: Springer, 2014.

SAA, A. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 38, n. 4, e4201, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2016-0191>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

SANTI, N. S. M.; SANTARELLI, R. Desvendando a radiação Hawking. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 41, n. 3, e20180312, 2019. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2018-0312>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

SCHNITTMAN, J. A brief history of black holes. Astronomy Magazine, 2019. Disponível em: <<https://astronomy.com/magazine/2019/08/a-brief-history-of-black-holes#:~:text=Karl%20Schwarzschild%20developed%20the%20idea,after%20Einstein%20published%20his%20theory.&text=For%20this%20reason%2C%20early%20physicists,Wheeler%20in%201967%3A%20black%20holes.>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

SCHWARZSCHILD, K. On the Gravitational Field of a Mass Point according to Einstein's Theory. ArXiv, 27 fev. 1916. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/physics/9905030.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

SIEMSEN, G. H.; LORENZETTI, L. O ensino de astronomia e a alfabetização científica e tecnológica: uma abordagem no ensino médio. Areté, v. 14, n. 28, p. 137-151, 2020. Disponível em: <<http://periodicos.uea.edu.br/index.php/arete/article/view/1991/1156>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

SILVA, A. T. N. Termodinâmica de um buraco negro BTZ com um comprimento mínimo. Campina Grande, PB: Dissertação de Mestrado (UFCG), 2018.

SOUZA, J. C. C. F. Singularidade: O artigo seminal sobre buracos negros. Cadernos de Astronomia, v. 2, n. 1, 193-196, 2021. Disponível em: <<https://periodicos.ufes.br/astro/article/view/33409/22902>>. Acesso em: 14 ago. 2021.

STEINER, J. E. Buracos Negros: sementes ou cemitérios de galáxias? Caderno Brasileiro de Ensino de Física, v. 27, n. especial, p. 723-742, 2010. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2010v27nespp723/17204>>. Acesso em: 12 ago. 2021.

STEPHANI, H. L. P. Weimar, Schiller and the Birth of Black Hole Theory. ArXiv, 2003. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/gr-qc/0304087.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2021.



STOICA, O. C. The Geometry of Black Hole Singularities. *Advances in High Energy Physics*, v. 2014, 907518, 2014. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/ahep/2014/907518/>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

STORCHI-BERGMANN, T. Buracos negros supermassivos: os monstros que se escondem no centro das galáxias. *Ciência e Cultura*, v. 61, n. 4, p. 38-41, 2009. Disponível em: <<http://cienciaecultura.bvs.br/pdf/cic/v61n4/13.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2021.

STORCHI-BERGMANN, T.; SCHNORR-MÜLLER, A. Observational Constraints on the Feeding of Supermassive Black Holes. *ArXiv*, 2019. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1904.03338.pdf>>. Acesso em: 11 ago. 2021.

WHEELER, J. A. *Geons, Black Holes, and Quantum Foam: A Life in Physics*. New York: W. W. Norton & Company, 2010.

XAVIER, S. V. M. C. B. et al. Órbitas esféricas de fótons ao redor de um buraco negro de Kerr. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, e20200181, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172020000100463&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 19 ago. 2021.

ZANOTELLO, M. Leitura de textos originais de cientistas por estudantes do Ensino Superior. *Ciência e Educação (Bauru)*, v. 17, n. 4, P. 987-1013, 2011. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1516-73132011000400014>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

ZORZETTO, R. O limite do visível. *Pesquisa Fapesp*, v. 279, p. 52-55, 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2019/05/052-e-055_Buraco-negro-279-1.pdf>. Acesso em: 11 ago. 2021.