

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

CONCEITOS CIENTÍFICOS SOBRE BURACOS NEGROS NO ENSINO DE FÍSICA

GABRIEL SANTOS SILVA¹, RICARDO ROBERTO PLAZA TEIXEIRA²

¹ Discente do curso de Licenciatura em Física e bolsista do projeto de iniciação científica com bolsa PIBIFSP “Buracos Negros e Ensino de Física”, IFSP, Campus Caraguatatuba, silva.gabriel4@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor em Ciências pela USP e Docente do IFSP, Campus Caraguatatuba, rteixeira@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 7.08.04.02-8 Métodos e Técnicas de Ensino.

RESUMO: O objetivo deste trabalho é investigar como a inserção do estudo de conceitos científicos sobre buracos negros em atividades educacionais pode colaborar com o ensino de física. Os buracos negros, formados pelo colapso gravitacional de estrelas massivas, apresentam uma força gravitacional tão intensa que nem mesmo a luz pode escapar. Eles são centrais na pesquisa em física teórica e astrofísica, desafiando nossa compreensão de espaço e tempo. Até mesmo por, geralmente, despertarem a curiosidade de muitos alunos, estes corpos astronômicos podem ser utilizados em sala de aula para proporcionar uma educação científica de melhor qualidade e mais motivadora para os estudantes.

PALAVRAS-CHAVE: buracos negros; ensino de física; relatividade geral; educação científica; astrofísica.

SCIENTIFIC CONCEPTS ABOUT BLACK HOLES IN PHYSICS TEACHING

ABSTRACT: The objective of this work is to investigate how the inclusion of the study of scientific concepts about black holes in educational activities can collaborate with the teaching of physics. Black holes, formed by the gravitational collapse of massive stars, have a gravitational force so intense that not even light can escape. They are central to research in theoretical physics and astrophysics, challenging our understanding of space and time. Even because they generally arouse the curiosity of many students, these astronomical bodies can be used in the classroom to provide a better quality and more motivating scientific education for students.

KEYWORDS: black holes; physics teaching; general relativity; science education; astrophysics.

INTRODUÇÃO

Os buracos negros são objetos astrofísicos resultantes do colapso gravitacional de estrelas massivas, onde a força gravitacional é tão intensa que nem mesmo a luz pode escapar. Desde a previsão de sua existência pela teoria da relatividade geral, os buracos negros têm sido centrais na pesquisa em física teórica e astrofísica. A importância dos buracos negros se estende a áreas como o estudo da gravidade, termodinâmica e mecânica quântica. A teoria da radiação de Hawking, por exemplo, sugere que buracos negros podem emitir radiação e eventualmente evaporar, oferecendo ensinamentos valiosos sobre as leis do universo. A detecção de ondas gravitacionais por observatórios como LIGO e Virgo proporcionou evidências diretas da existência de buracos negros, solidificando sua importância científica. Incluir o estudo dos buracos negros em aulas de física pode aprofundar a compreensão de áreas tanto da física clássica (como a mecânica), quanto da física moderna (como a relatividade geral e a mecânica quântica), além de motivar os alunos para que eles explorem conceitos científicos mais abstratos e complexos, que geralmente representam desafios para os educadores.

Este trabalho visa explorar os conhecimentos atuais sobre buracos negros no âmbito educacional e discutir metodologias eficazes para integrá-los no ensino de física. Por meio de uma revisão bibliográfica de trabalhos de natureza similar, buscaremos identificar possíveis estratégias para tornar o estudo dos buracos negros um componente parte estimulante do ensino de física.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia para a realização desta pesquisa, os estudos realizados transcorreram por algumas etapas sistemáticas de modo a garantir a abrangência necessária desta pesquisa. Primeiramente, foi necessário definir o objetivo principal deste estudo, identificar os conceitos físicos sobre buracos negros que podem ser utilizados no ensino de física. Este trabalho também procurou entender o nível de compreensão dos alunos sobre buracos negros e avaliar os possíveis impactos de atividades educacionais tendo os buracos negros como eixo temático.

A primeira etapa consistiu em uma revisão bibliográfica detalhada. Esta fase envolveu a busca e análise da literatura acadêmica existente sobre o ensino de buracos negros, incluindo artigos publicados em periódicos científicos, trabalhos apresentados em congressos acadêmicos, livros, teses e dissertações. As bases de dados do “Google Acadêmico” (“Google Scholar”) e do SciELO foram utilizadas para localizar fontes relevantes, empregando palavras-chave como “buracos negros”, “ensino de física”, “astrofísica” e “educação científica”. A revisão bibliográfica foi planejada para permitir mapear o estado atual do conhecimento tanto sobre a física dos buracos negros, quanto sobre o ensino a respeito de buracos negros, bem como identificar possíveis lacunas na literatura.

O estudo utilizou, em um primeiro momento, um total de 40 artigos, sendo 18 voltados para pesquisas na área de ensino e os outros 22 dedicados à física dos buracos negros. No que diz respeito à sistematização dos trabalhos selecionados foi feita uma leitura exploratória dos títulos, resumos e palavras-chave dos trabalhos coletados com o intuito de determinar a relevância dos estudos para a revisão e permitir uma primeira triagem das fontes a serem analisadas em profundidade.

A seguir, foi feita uma leitura analítica dos trabalhos selecionados: cada estudo foi lido de forma mais detalhada, buscando compreender as abordagens metodológicas, os principais conceitos existentes sobre buracos negros, e como esses conceitos podem ser abordados no contexto do ensino de física. A análise das informações e conhecimentos existentes acerca de buracos negros buscou identificar padrões de compreensão, dificuldades comuns e as abordagens pedagógicas que mais contribuem para o aprendizado. Foram realizadas anotações e foram destacados trechos relevantes para o propósito desta pesquisa. A sistematização dos dados obtidos envolveu a organização das informações extraídas em categorias temáticas de modo a identificar padrões, lacunas e tendências na literatura.

As informações categorizadas foram integradas em uma visão coesa do estado da arte sobre o ensino de física usando como tema central os buracos negros de modo a desenvolver uma compreensão profunda do tema e para estruturar a discussão apresentada neste trabalho. Este trabalho permite também identificar áreas para futuras pesquisas. Os resultados foram interpretados à luz da literatura existente e para pensar em recomendações para melhorar o ensino em física e aprimorar a compreensão dos alunos sobre o tópico dos buracos negros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentre os conceitos científicos associados ao estudo de buracos negros na literatura existente, alguns se sobressaíram quantitativamente, como por exemplo “singularidade”, “horizonte de eventos”, “velocidade de escape” e “evolução estelar”. Isto foi observado a partir de uma revisão sistemática de textos acadêmicos e materiais didáticos, que permitiu identificar os termos mais frequentes e que se destacaram por sua recorrência, interconexão e importância na compreensão do funcionamento e das implicações dos buracos negros na astrofísica moderna, bem como pela sua aplicabilidade no ensino de física. Essa seleção fundamenta a construção deste trabalho. A “singularidade” refere-se ao ponto em que as leis da física se rompem, essencial para entender a natureza dos buracos negros. O “horizonte de eventos” delimita a região além da qual nada pode escapar, sendo crucial para o estudo da gravidade extrema. A “velocidade de escape” é fundamental para compreender como os buracos negros atraem matéria. Por fim, a “evolução estelar” contextualiza a formação de buracos negros a partir do colapso de estrelas massivas.

A singularidade é o ponto central de um buraco negro onde, segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, a densidade da matéria e a curvatura do espaço-tempo se tornam ilimitadas. É o local em que as leis da física, como as conhecemos, deixam de ser aplicáveis. Na singularidade, toda a massa do buraco negro é comprimida em um único ponto com volume zero, o que leva a uma densidade que tende ao infinito. O conceito de singularidade pode ser explorado em atividades que discutam as condições extremas no centro de um buraco negro, onde a densidade e a curvatura do espaço-tempo se tornam

infinitas. Os alunos podem simular a gravidade extrema usando modelos matemáticos ou softwares que ilustram como as leis físicas conhecidas falham nesse ponto.

O horizonte de eventos é a "fronteira" de um buraco negro, o ponto a partir do qual nada — nem mesmo a luz — pode escapar da atração gravitacional do buraco negro. O horizonte de eventos não é uma superfície física, mas uma região no espaço em torno da singularidade que marca a fronteira entre o que pode ser observado e o que está perdido para sempre. Uma vez que algo cruza o horizonte de eventos, ele inevitavelmente será puxado para a singularidade existente no centro do buraco negro. O raio dessa superfície esférica é chamado de raio de Schwarzschild. A importância do horizonte de eventos é que ele define a região do buraco negro “invisível” que encapsula o que está além do nosso alcance observacional. Para ensinar sobre o horizonte de eventos, os alunos podem participar de atividades que demonstram a impossibilidade de escapar de um buraco negro uma vez que se ultrapassa essa fronteira. Experimentos usando simulações computacionais podem mostrar como a luz e a matéria se comportam ao se aproximarem do horizonte de eventos, ajudando a visualizar a ideia de um "ponto sem retorno", inclusive usando a ideia de “espaguetificação”.

A velocidade de escape é a velocidade mínima necessária para que um objeto consiga se afastar de um corpo celeste esférico sem ser puxado de volta pela gravidade. No caso dos buracos negros, essa velocidade de escape é maior do que a velocidade da luz (cerca de 300.000 km/s). Como nada no universo pode viajar mais rápido do que a luz, isso significa que nem mesmo a luz pode escapar da atração gravitacional de um buraco negro. Esse conceito está diretamente relacionado à formação do horizonte de eventos: dentro dele, a velocidade de escape excede a velocidade da luz, o que torna impossível para qualquer coisa, incluindo radiação eletromagnética, escapar: dessa ideia que surgiu o termo buraco negro. O conceito de velocidade de escape pode ser trabalhado comparando as velocidades de escape Terra (cerca de 11,2 km/s) e de buracos negros (maior que 300.000 km/s). Atividades podem incluir cálculos em que os alunos determinam a velocidade de escape de diferentes corpos celestes usando apenas conceitos de mecânica clássica, quantificando e precisando como, para um buraco negro, essa velocidade excede a velocidade da luz, tornando-o de certo modo, invisível.

A evolução estelar refere-se ao ciclo de vida das estrelas, desde o seu nascimento até a sua morte. Um buraco negro é o estágio final da vida de estrelas muito massivas, tipicamente algumas dezenas de vezes a massa do Sol. Após esgotarem seu combustível nuclear, estrelas massivas passam por várias fases, como supernovas (explosões estelares), até que o colapso gravitacional das camadas externas ocorre, resultando na formação de um buraco negro. A formação de buracos negros é um aspecto central da evolução estelar e está intimamente ligada ao comportamento de estrelas com massas muito grandes. A evolução estelar pode ser abordada por meio de atividades que rastreiam a vida de uma estrela, desde a fusão nuclear no núcleo estelar até o colapso gravitacional que pode resultar na formação de um buraco negro. Modelos de estrelas em diferentes fases de evolução podem ser usados para mostrar como certas estrelas massivas terminam se transformando em buracos negros.

O estudo dos buracos negros tem proporcionado importantes avanços científicos em diversas áreas da física e da astronomia, abrindo novas fronteiras no entendimento do cosmos. Um dos marcos mais significativos foi a detecção de ondas gravitacionais, confirmada pela primeira vez em 2015 pelo observatório LIGO (Schinzel *et al.*, 2022). Essa descoberta revolucionária revelou novas formas de observar o universo, permitindo o estudo de eventos cósmicos extremos, como a colisão de buracos negros, que antes eram completamente invisíveis aos métodos tradicionais de observação. Além disso, as ondas gravitacionais têm colaborado para uma melhor compreensão da natureza da gravidade e do espaço-tempo, confirmando previsões da teoria da relatividade geral de Einstein de 1915; aliás a este propósito é importante destacar que já no ano seguinte, 1916, Karl Schwartzchild encontrou uma solução matemática para as equações de Einstein que implicava na existência de buracos negros (Saa, 2016).

A teoria da radiação de Hawking, proposta pelo físico Stephen Hawking (1942-2018), introduziu a ideia de que buracos negros emitem radiação devido a efeitos quânticos perto do horizonte de eventos. Essa teoria conecta a relatividade e a mecânica quântica, dois pilares da física moderna, e levanta questões importantes sobre a gravidade e a termodinâmica dos buracos negros (Santi; Santarelli, 2019).

O estudo de buracos negros tem avançado significativamente nossa compreensão sobre processos astrofísicos de alta energia, como os jatos relativísticos e os discos de acreção (Matsuura, 2021). Essas formações, presentes em torno dos buracos negros, desempenham um papel fundamental na dinâmica dos sistemas astrofísicos, sendo responsáveis pela emissão de radiação de alta energia, como raios-X e ondas de rádio. A investigação desses fenômenos tem revelado detalhes importantes sobre como a

matéria interage em condições extremas de gravidade e como essas interações influenciam o meio interestelar. Além disso, essas pesquisas são essenciais para explicar a formação e evolução das galáxias, oferecendo novas perspectivas sobre os processos de crescimento de buracos negros supermassivos e sua influência na estrutura e no comportamento das galáxias ao longo do tempo cósmico.

Observações de buracos negros supermassivos no centro de galáxias, incluindo a nossa Via Láctea, têm fornecido informações valiosas sobre a dinâmica galáctica e a evolução do universo, mostrando como esses objetos influenciam a estrutura e a evolução das galáxias ao longo do tempo (Garms; Grime; Caldas, 2023). Estudos revelam que buracos negros supermassivos desempenham um papel crucial na regulação da formação estelar, emitindo jatos de energia que podem aquecer o gás ao redor, impedindo ou promovendo a criação de novas estrelas. Além disso, a interação gravitacional entre buracos negros e a matéria ao seu redor ajuda a entender melhor a distribuição de massa no universo.

O estudo dos buracos negros tem proporcionado importantes avanços científicos em diversas áreas da física e astronomia. A detecção de ondas gravitacionais, confirmada pela primeira vez em 2015, pelo observatório LIGO, revelou novas formas de observar o universo, permitindo o estudo de eventos cósmicos extremos, como a colisão de buracos negros, que antes eram invisíveis (Schinzel *et al.*, 2022).

A imagem do buraco negro supermassivo na galáxia M87, capturada pelo Event Horizon Telescope em 2019 – e elaborada mesclando dados astronômicos com técnicas avançadas de machine learning para capturar o arco de luz distorcida ao redor de um buraco negro – é um marco significativo que confirmou teorias sobre esses objetos e ampliou nosso entendimento sobre o cosmos (Almeida, 2021). De modo geral, as pesquisas sobre buracos negros têm colaborado com o desenvolvimento de técnicas avançadas de simulação e modelagem computacional, essenciais para prever e interpretar comportamentos complexos. A busca por buracos negros tem impulsionado a inovação em tecnologias e instrumentos, como interferômetros para a detecção de ondas gravitacionais e telescópios espaciais, beneficiando não apenas a astrofísica, mas também outras áreas da ciência e tecnologia. Esses avanços demonstram como o estudo dos buracos negros tem sido fundamental para expandir nosso conhecimento sobre o universo e aprimorar as ferramentas científicas disponíveis.

Por sua vez, a inserção dos buracos negros no ensino de física pode ter vários impactos educacionais importantes (Barbosa; Calheiro, 2022). Estes objetos astronômicos despertam o interesse dos alunos pela ciência, permitindo a integração de conceitos avançados como relatividade geral e mecânica quântica, pelo uso de recursos didáticos modernos, como simulações e visualizações. Mesmo que a complexidade do conceito de buraco negro represente um desafio pedagógico que exige abordagens cuidadosas e ferramentas e metodologias adequadas, estudá-los pode inspirar futuras carreiras em física e manter os alunos atualizados com as descobertas científicas atuais.

Segundo a relatividade geral, nos buracos negros, a massa se comprime em uma singularidade infinitamente densa, onde as leis da física falham. Essa singularidade é envolta por um horizonte de eventos, marcando um ponto de não retorno para o que é engolido pelo buraco negro. As questões envolvendo a presença de infinitos têm impulsionado a busca por alternativas, como é o caso da proposta de buracos negros sem singularidades (também denominados buracos negros regulares), dentro dos quais a densidade não se torna infinita (Lan, 2023): em vez disso, esses buracos negros teriam um núcleo onde as leis da física não se quebrariam, diferentemente dos buracos negros convencionais previstos pela relatividade geral. Existem diferentes teorias que propõem a existência de buracos negros sem singularidades, seja pela introdução de efeitos quânticos ou por modificações na teoria da relatividade geral. Esses buracos negros hipotéticos oferecem uma visão alternativa que pode ajudar a reconciliar a relatividade geral com a mecânica quântica, bem como a fornecer novas perspectivas sobre a estrutura do espaço-tempo em condições extremas.

Em particular, gravastars (“*Gravitational Vacuum Stars*”) são objetos teóricos que surgem como uma proposta alternativa aos buracos negros, oferecendo uma nova perspectiva sobre o destino das estrelas muito massivas após o colapso gravitacional. Diferente da formação tradicional de um buraco negro, em que a matéria é comprimida em um ponto de densidade infinita, criando uma singularidade, o modelo de gravastar sugere um cenário distinto em que essa singularidade pode ser evitada (Ray; Sengupta; Nimesh, 2020). Um gravastar é concebido como uma estrutura composta por três camadas principais: um núcleo interno de energia negativa, uma casca intermediária composta de matéria ultradensa, e uma camada externa que se comporta como o espaço-tempo usual. O núcleo de energia negativa é um aspecto crucial deste modelo, pois ele cria uma pressão negativa que equilibra a força gravitacional, impedindo o colapso adicional da estrela e a formação de uma singularidade.

A camada intermediária de matéria ultradensa, por sua vez, é responsável por criar uma barreira que define claramente o limite do gravastar, diferenciando-o dos buracos negros tradicionais que apresentam um horizonte de eventos. Esta barreira impede que qualquer radiação ou matéria entre ou saia do núcleo, o que tornaria um gravastar indistinguível de um buraco negro para um observador externo, pelo menos em termos das observações astrofísicas, como da curvatura da luz ao redor do objeto.

É possível despertar o interesse e a curiosidade dos alunos ao discutir a experiência de pensamento e as hipóteses existentes sobre o que aconteceria se caíssemos dentro do horizonte de eventos de um buraco negro. Ao entrar em um buraco negro de Schwarzschild, a experiência de um observador é caracterizada por uma série de efeitos notáveis e complexos. O horizonte de eventos é o ponto sem retorno, a partir do qual o observador se aproxima da singularidade, sem poder escapar mais dela. Esse horizonte não é uma barreira física verdadeira, mas sim uma superfície matemática que delimita a fronteira onde a estrutura do espaço-tempo muda de maneira drástica.

Uma vez que o horizonte de eventos é atravessado, o observador entra em uma região onde o tempo próprio acelera de maneira extrema. Calcula-se que o tempo próprio para um observador em queda livre do horizonte até o centro do buraco negro seria de aproximadamente 6,57 microsegundos para um buraco negro com a massa equivalente à do Sol (Lobo, 2006). Isso indica que a experiência total seria extremamente breve. Portanto, uma hipotética queda em um buraco negro de Schwarzschild resultaria em uma experiência única: o observador atravessaria um horizonte de eventos que não é uma barreira física, experimentaria um tempo extremamente curto até o centro do buraco negro e sentiria forças gravitacionais intensas que aumentariam conforme se aproximasse da singularidade central. Esses efeitos são consequências diretas da intensa curvatura do espaço-tempo devido à ação gravitacional.

A abordagem de filmes para o ensino de física usando buracos negros também apresenta aspectos promissores. Propostas como essa podem ser estruturadas em diferentes etapas principais: seleção da obra cinematográfica que será exibida, a partir de critérios educacionais, científicos, estéticos e de outras naturezas; preparação prévia dos alunos por meio da leitura de textos didáticos e da exibição de vídeos de curta duração; exibição do filme em foco; debate mediado pelo professor para explorar os conceitos discutidos na obra; realização de tarefas e avaliação (Almeida; Soltau, 2022). Esta metodologia pode proporcionar um aprendizado mais profundo e contextualizado, aproveitando o interesse de muitos alunos por filmes de ficção científica.

O filme “Interestelar” é uma possível escolha para trabalhar o tema dos buracos negros. Dirigido por Christopher Nolan, esta obra é reconhecida pela tentativa de retratar conceitos científicos com precisão, até porque contou com a consultoria do físico teórico Kip Thorne (1940-) que recebeu o Prêmio Nobel de Física em 2017 e escreveu o livro “The Science of Interstellar” (Thorne, 2014). Isso faz deste filme uma ferramenta educativa valiosa para introduzir e ilustrar conceitos da relatividade geral como a dilatação temporal e a natureza dos buracos negros. A metodologia para um trabalho como este precisa ser flexível e tem que ser adaptada a diferentes conteúdos e contextos educacionais, para que consiga superar as limitações tradicionalmente existentes para o ensino da física moderna e contemporânea.

CONCLUSÕES

Diversos conceitos científicos relacionados ao estudo dos buracos negros oferecem uma oportunidade rica para serem usados no âmbito do ensino de física, tornando-o mais interessante e relevante para os alunos. A revisão bibliográfica realizada neste trabalho evidenciou que os conhecimentos existentes sobre buracos negros evoluíram significativamente nas últimas décadas, com descobertas empíricas e avanços teóricos que permitem uma abordagem mais completa e precisa do tema: esta é uma área que está situada na fronteira da ciência atual. A capacitação de professores para trabalhar com este tema (por meio de cursos de formação continuada) e o desenvolvimento de materiais didáticos acessíveis e integradores sobre buracos negros podem aproveitar a curiosidade científica de muitos alunos para promover uma educação científica mais rica e motivadora.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

R.R.P.T. contribuiu para a seleção dos trabalhos acadêmicos que foram estudados e analisados. G.S.S. contribuiu para a leitura e sistematização dos trabalhos selecionados anteriormente. Ambos os autores contribuíram para a redação e a revisão deste trabalho e aprovaram a versão submetida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao IFSP pela concessão da bolsa de iniciação científica PIBIFSP para G.S.S.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Carla Rodrigues. 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>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- ALMEIDA, Jamila Rodrigues de; SOLTAU, Samuel Bueno. Interestelar e Sala de Aula Invertida: uma proposta para ensinar relatividade geral e buracos negros no Ensino Médio. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 5, e40911528437, 2022. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28437>>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- BARBOSA, Patrynie Garcia; CALHEIRO, Lisiane Barcellos. Panorama das pesquisas sobre buraco negro nos periódicos do ensino de Física e Ciência. **Latin American Journal of Physics Education**, v. 16, n. 4, 4302, 2022. Disponível em: <<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8960824>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- GARMS, Marcos A.; GRIME, Gabriel C.; CALDAS, Iberê L. Precessão da órbita da estrela S2 em torno do buraco negro Sagitário A*. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 45, p. e20230182, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2023-0182>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- LAN, Shen *et al.* Regular Black Holes: A Short Topic Review. **International Journal of Theoretical Physics**, v. 62, 202, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10773-023-05454-1>>. Acesso em: 21 ago. 2024.
- LOBO, Matheus Pereira. No interior do horizonte de um buraco negro de Schwarzschild. **Physicae**, v. 6, n. 1, p. 1-5, 2006. Disponível em: <<https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/physicae/article/view/13438>>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- MATSUURA, Oscar 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/astronomia/article/view/31781>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- RAY, Saibal; SENGUPTA, Rikpratik; NIMESH, Himanshu. Gravastar: an alternative to black hole. **International Journal of Modern Physics D**, v. 29, n. 5, 2030004, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1142/S0218271820300049>>. Acesso em: 20 ago. 2024.
- SAA, Alberto. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, n. 4, p. e4201, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/q4zDXXHmZ7f6JMtK9hWWqZc/?lang=pt#ModalHowcite>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- SANTI, Natali Soler Matubaro de; SANTARELLI, Raphael. Desvendando a radiação Hawking. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 3, p. e20180312, 2019. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/rbef/a/CM5JzVF3Gtf5ztK3CB5vH4g/?lang=pt#ModalTutors>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- SCHINZEL, Guilherme Henrique *et al.* Buracos negros – Uma proposta de sequência didática em forma de UEPS para o ensino fundamental e médio. **Revista do Professor de Física**, v. 6, n. Especial, p. 390-399, 2022. Disponível em: <<https://periodicos.unb.br/index.php/rpf/article/view/45999>>. Acesso em: 11 ago. 2024.
- THORNE, Kip. **The Science of Interstellar**. New York, U.S.A.: W. W. Norton & Company, 2014.