

UM POSSÍVEL ITINERÁRIO PARA O ESTUDO INTRODUTÓRIO DE BURACOS NEGROS

Marcos Genilson da Silva Medeiros¹
Francisco Geniedson Silva de Medeiros²
Lizandra Magna dos Santos Oliveira³
José Genielisson da Silva Medeiros⁴
Jardel Lucena da Silva⁵

RESUMO

O presente trabalho culmina em um possível itinerário formativo que se faz necessário para um entendimento físico da solução de Schwarzschild para Buracos Negros, a qual dela surgem as premissas do objeto em questão. Na perspectiva de contribuir para amenizar problemas na formação de professores de física e/ou outros interessados, no que diz respeito a compreensão de temas vinculados à Física Moderna, este artigo se faz justo. Para qual, utilizamos como metodologia a pesquisa bibliográfica, e a partir disto, elaboramos um texto que aborda as principais ideias da Teoria da Relatividade Restrita e da Teoria da Relatividade Geral, que são imprescindíveis para uma compreensão significativa do desenvolvimento da solução de Schwarzschild. Além de que, nos subsidiamos também em uma abordagem que considera aspectos históricos e atuais sobre o tema, os quais em algum momento tiveram sua exposição citada dentre a comunidade. Concluímos que mesmo não sendo possível expor uma abordagem mais ampla dos conceitos, o presente trabalho pode ser considerado satisfatório por proporcionar, além de um possível primeiro contato sobre o tema em questão, um caminho sólido para sua efetiva compreensão e desenvolvimento, deste modo, vindo a ser útil para a elaboração de futuras transposições didáticas que venham a corroborar nossas expectativas.

Palavras-chave: Buracos Negros, solução de Schwarzschild, Teoria da Relatividade Restrita, Teoria da Relatividade Geral.

INTRODUÇÃO

Em concordância com Silva, 2015, o ensino de física moderna como área a ser aplicada nos anos finais do ensino básico padece de uma carência de aplicação, uma vez que o ensino médio estes temas voltados a área em questão são ignorados. É inegável que quando os alunos adentram nesse contexto formativo voltado para as ciências naturais, se deparam com uma imensa gama de conteúdos que não estão diretamente ligados aos desta ramificação dos conteúdos da física. Alguns pontos podem ser apresentados como possíveis causas que resultam neste problema, como a atuação de professores cuja formação não se dá em física (SANTOS, 2010), os currículos de física no âmbito escolar desatualizados (OLIVEIRA, et al, 2007),

¹ Graduado no Curso de Física do Instituto Federal - RN, marcos.genilson72@gmail.com;

² Graduado no Curso de Física do Instituto Federal - RN, geniedsonmedeiros26@gmail.com;

³ Graduada no Curso de Física do Instituto Federal - RN, lizz.magnasantos@gmail.com;

⁴ Graduado no Curso de Física do Instituto Federal - RN, genielisson93@gmail.com;

⁵ Mestre pelo Curso de Física da Universidade Federal - PB, jardel.lucena@ifrn.edu.br;

professores de física com uma formação problemática, implicando assim na sua qualificação docente (GOBARA; GARCIA, 2007), os recursos disponibilizados aos docentes como laboratórios de física equipados (SILVA, et al, 2018), entre outros.

A partir deste cenário, é possível observar que o ensino de física, tal qual o ensino das ciências naturais, estão sendo pouco explorados e quando são, estão com um declínio em sua abordagem, não sendo contundentes no cotidiano dos alunos apresentando-se com um êxito muito baixo deixando o aprendizado, que deveria ser prazeroso e significativo, cansativo e desgastante. Por tanto, o desenvolvimento de trabalhos e/ou pesquisas que busquem amenizar/contribuir para superar os problemas supracitados se fazem plenamente justificáveis.

Assim, este trabalho propõe-se a contribuir com a dissolução deste problema, apresentando uma possibilidade de sistematização de um estudo sobre um tema de física moderna, visando fornecer à professores em formação entre outros interessados, um caminho consistente para o entendimento do referido tema para que, a posteriori, venha a ser utilizado como transposições didáticas inserindo este assunto no contexto das aulas de física.

Se tratando de física moderna, podemos ter um vasto acervo de conteúdos que poderiam ser trabalhados, consideramos válido abordar um tema muito específico neste trabalho, o tema de Buracos Negros. Por ser um tema extremamente instigante, e por se apresentar na atualidade como um assunto em ascensão devido os vários meios de comunicação apresentarem informações acerca desse tema, tornando-o popular no meio social, mas ainda com lacunas a serem trabalhadas no âmbito educacional (OLIVEIRA, et al, 2007). A título de informação e como meio de apresentar exemplos da afirmação acima citada, podemos observar o termo buracos negros em títulos de músicas, como *Black Hole Sun* (Soundgarden, 1994), em títulos de *graphic novels: Black Hole* (Charles Burns, 2005), em poesias: *Meu coração e outros buracos negros* (Jasmine Warga, 2016), sempre com um sentido alusivo ao conceito científico, o que evidencia sua popularização.

De modo que os próprios meios de divulgação científica apresentam, de forma eficiente, a inserção deste tipo de conteúdo no cotidiano das pessoas, por meio de plataformas extremamente utilizadas por estas, a exemplo do *youtube*, por meio de Canais como: Ciência todo dia (desde de 2012), do Pedro Loos, e o *Space Today* (desde de 2015), do Sérgio Sacani, têm abordado frequentemente, de forma exemplar e didática estes temas. Além do *youtube*, temos o *instagram* como uma das maiores ferramentas de comunicação da atualidade, onde há a inúmeros perfis que divulgam a ciência como um todo, assim como o tema de buracos negros, evidenciando o perfil da NASA, bem como o do observatório nacional, o qual evidência o prêmio Nobel de física 2020, alcançado por Roger Penrose, Reinhard Genzel e Andrea Ghez

por descobertas sobre buracos negros (OBSERVATORIONACIONAL, 2020). Podemos citar ainda, algumas plataformas de *Streaming*, tal como a Netflix (2019), onde é possível encontrar assuntos correlacionados, como o documentário *Black Nova Apocalypse*. Além disto, várias evidências recentes como fotos de Buracos Negros (2019) e a descoberta de Ondas Gravitacionais (2015) reforçam a importância de colocarmos o referido assunto em pauta no contexto do ensino de Física.

Ao passo que com o tema bem delimitado, propomo-nos como objetivo desenvolver um itinerário formativo para que seja possível compreender a dedução da equação de Schwarzschild, que a partir desta solução, foi possível extrapolar a existência de objetos astronômicos que posteriormente ficaram conhecidos por buracos negros. Para alcançarmos o objetivo, faremos a exposição de um resumo das principais ideias que necessitam ser estudadas para a apropriação devida deste assunto.

METODOLOGIA

Para que fosse possível alcançarmos esse objetivo, o trabalho se desenvolveu por meio de uma análise de referências bibliográficas evidenciando os trabalhos já consolidados no âmbito acadêmico. De acordo com Gil (2022, p. 44) “é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos”. Por meio desta, pudemos identificar as ideias necessárias para se compreender o desenvolvimento da solução de Schwarzschild para que fosse possível apresentar uma sequência de conteúdos que devem ser estudados para a compreensão do referido tema. Logo, com a organização destes, o interessado terá uma orientação a seguir, com bases sólidas de estudo.

REFERENCIAL TEÓRICO

Para a compreensão introdutória deste conceito entendemos ser interessante que houvesse de início um estudo numa perspectiva de contextualização subsidiada de forma moderada pela história da ciência. Daqui supomos que o interessado já tenha um contato com o tema, seja direto ou indireto com o tema, como abordado na introdução deste trabalho.

Neste sentido, encontramos informações de que nos anos iniciais do século XX, com a publicação dos trabalhos da Teoria da Relatividade Geral, vários cientistas tentaram obter soluções das equações de campo de Einstein. E neste contexto, tivemos um em especial, que

desenvolveu uma solução muito peculiar para essas equações, Carl Schwarzschild, um físico alemão que detinha um grande acervo matemático apresentando um notório domínio desta área (SAA, 2016).

Um ponto extremamente interessante, se dá pelas condições nas quais Schwarzschild concebeu essa solução. Durante os anos de 1915, ele esteve na frente de guerra russa, mesmo não sendo obrigado servir, ele se dispôs a fazê-lo, algo interessante, o entusiasmo com a guerra por parte dos cientistas daquela época. Ele estudou o comportamento de regiões adjacentes a uma distribuição esférica e homogênea de massa, e obteve a primeira e, considerado por muitos, a mais importante solução para o caso trivial das equações de Einstein (LAMBOURNE, 2012). Como se trata de uma solução das equações de Einstein, sendo esta a equação fundamental da Teoria da Relatividade Geral (TRG), a solução de Schwarzschild requer a apropriação de aspectos fundamentais desta teoria. Entretanto, é sabido que a TRG surgiu como uma tentativa de se estender a Teoria da Relatividade Restrita (TRR), que, portanto, também se torna importante para consolidar a compreensão do tema em questão. Para não se cair numa espécie de regressão infinita, partimos do pressuposto de que os interessados neste tema já tenham tido contato com conceitos básicos da Mecânica Clássica, e que por isto, podem iniciar a jornada para a compreensão de Buracos Negros a partir de estudos sobre a TRR.

A Teoria da Relatividade Restrita surgiu de um contexto no qual havia divergências entre previsões do comportamento de sistemas físicos em certos fenômenos quando descritos pela Mecânica Clássica e pelo Eletromagnetismo (MARTINS, 2015). Neste contexto, Einstein propôs dois postulados para subsidiar esta teoria:

1º Postulado de Relatividade – As leis da física são as mesmas em qualquer referencial inercial.
2º Postulado da Relatividade – A velocidade da Luz é invariante em todos os referenciais inerciais.

Esses postulados se tornam os principais responsáveis por grandes mudanças voltadas as grandezas físicas até então consideradas como absolutas. Estas grandezas precisaram ser reestruturadas, uma vez que, a depender do referencial inercial com velocidades relativas entre si, elas apresentam uma característica relativa.

E a outra consequência importante foi a possibilidade de se definir novas grandezas físicas que preservavam sua invariância nestes referenciais. Um exemplo destas é o quadrado do intervalo de espaço-tempo:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2, \quad (1)$$

em que $c \equiv$ velocidade da luz; x, y e z são as coordenadas espaciais do sistema cartesiano ortogonal. Uma outra notação válida e adotada por alguns escritores é a seguinte:

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2, \quad (2)$$

onde dx^0 representa a coordenada temporal da métrica do espaço tempo, e as demais representam as coordenadas espaciais do sistema de cartesiano ortogonal.

Trazendo esse novo olhar, culminou em uma nova perspectiva no contexto da física, ao se considerar o quadrado do módulo de um vetor definido em um espaço de 4 dimensões, em que uma destas está relacionada ao tempo, e cuja geometria é descrita a partir da métrica de Minkowski.

Entretanto, lidar com esse novo formalismo, se fez necessária uma nova concepção matemática, uma vez que a complexidade dos fenômenos físicos no espaço-tempo a partir de quadrivetores. Conhecido como *formalismo tensorial*, cuja existência de entes matemáticos com a capacidade de descrever as propriedades dos sistemas físicos de forma mais adequada ao contexto da TRR (MARTINS, 2015). Quando aplicado à descrição da dinâmica de meios contínuos, por exemplo, podemos sintetizar as propriedades deste sistema físico através do tensor energia-momentum-tensão:

$$T_{\mu\nu} = (\rho c^2 + p)U_\mu U_\nu + p\eta_{\mu\nu}, \quad (2)$$

em que $\rho \equiv$ densidade de energia; $p \equiv$ pressão; $U^\mu \equiv$ componente da quadrivelocidade e $\eta_{\mu\nu} \equiv$ métrica do espaço-tempo de Minkowski.

Quando se fala em referenciais inerciais, a TRR consegue descrever os fenômenos físicos de maneira satisfatória. No entanto, numa tentativa de estender esta teoria para situações envolvendo referenciais não-inerciais, Einstein chegou à conclusão de que um referencial não-inercial poderia ser considerado como equivalente a um referencial inercial com a presença de um campo gravitacional, esta observação de Einstein ficou conhecida por princípio da equivalência.

Deste contexto, foi possível chegar a conclusões de que uma distribuição de matéria/energia poderia imprimir ao espaço-tempo ao seu redor, uma curvatura, que por sua vez, implicaria em uma nova forma de explicar os efeitos gravitacionais. Neste sentido, Einstein conseguiu estabelecer as equações que codificavam tal relação, as chamadas equações de campo de Einstein (LAMBOURNE, 2010):

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \left(\frac{8\pi G}{c^4}\right) T_{\mu\nu}, \quad (3)$$

em que $R_{\mu\nu} \equiv$ Tensor de Ricci; $R \equiv$ escalar de curvatura; $g_{\mu\nu} \equiv$ métrica do espaço-tempo com curvatura. Nesta equação, $T_{\mu\nu}$ pode ser definido como na eq. 2, no entanto, considerando a métrica $g_{\mu\nu}$, no lugar de $\eta_{\mu\nu}$.

Ao analisar esta equação, nota-se que o primeiro membro da equação acima descreve propriedades geométricas do espaço, e o segundo membro descreve propriedades dos entes físicos responsáveis por causar a curvatura deste. Podemos resumir a ideia contida nesta equação da seguinte forma: se conhecermos suficientemente bem as propriedades dos sistemas físicos responsáveis por causar a curvatura do espaço-tempo, podemos utilizar tal fato para determinarmos a métrica $g_{\mu\nu}$ que o descreve, e com isto, poderemos descrever fenômenos físicos no espaço-tempo com curvatura. Isto consiste, em essência, no problema fundamental da TRG.

Após sua apresentação das equações de campo, Einstein demonstrou ceticismo em algumas soluções, pois, sua solução não se daria de forma simples devido a necessidade de um conhecimento apurado e habilidades matemáticas específicas para solucioná-la. Entretanto, para resolver as equações, Schwarzschild considerou uma distribuição de massa esférica e estacionária, que por sua vez, causasse uma curvatura pequena no espaço-tempo, regime este denominado de limite de campo fraco. A solução obtida permite expressar o quadrado do intervalo de espaço-tempo como segue:

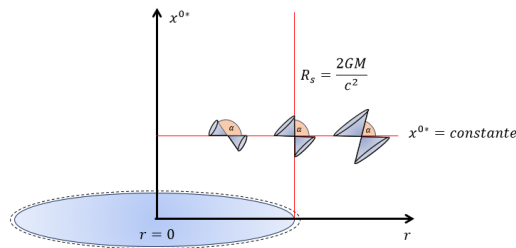
$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} - r^2 d\theta^2 - r^2 \sin^2 \theta d\phi^2. \quad (4)$$

em que $G \equiv$ Constante da gravitação universal; $M \equiv$ Massa; e r, θ e ϕ são as coordenadas esféricas polares. Essa solução é assintoticamente plana, isto é, para raios muito grandes recaímos na métrica Minkowski.

Com isso, Schwarzschild demonstrou que existe uma região em torno da distribuição esférica de massa, delimitada por uma superfície imaginária chamada de horizonte de eventos, a qual qualquer objeto que a ultrapassar no sentido de aproximação do centro dessa distribuição, não poderá mais sair desta região, nem mesmo a luz! E por essa característica, tal objeto recebeu o nome de *Buraco Negro*.

Um ponto de extrema importância, e que se faz necessário uma abordagem, se dá pela análise do cone de luz nas proximidades do raio de Schwarzschild. Analisemos o comportamento de uma partícula de luz ao longo de uma curva radial. Esse tipo de análise requer uma mudança no sistema de coordenadas que possibilite essa investigação, o sistema de coordenadas possível é o de Eddington-Finkelstein, logo:

Figura 1: Análise da estrutura causal do espaço-tempo de Schwarzschild nas coordenadas de Eddington-Finkelstein



Fonte: Medeiros (2022)

De acordo com Medeiros (2022):

Com isto, podemos perceber que neste sistema de coordenadas, a partícula atravessa a região de interesse sem problemas, no entanto, a partir de $r = R_s$, a abertura do cone de luz que denota eventos futuros, está completamente voltada para o interior da superfície de interesse. Isto, por sua vez, indica que qualquer partícula, seja ela massiva ou não, uma vez que adentre essa região, não mais poderá sair.

Após a solução de Schwarzschild houve grandes discussões sobre a possibilidade da existência real deste objeto físico cuja natureza desafia os ideais físicos. Inclusive, sobre possibilidades de detecção destes, uma vez que sua visibilidade não é concebível (SAA, 2016). Neste contexto, assim como em toda teoria fisicamente coerente, buscaram-se formas de se verificar efeitos que pudessem ser atribuídos diretamente como consequência da validade desta solução. Isto culminou nos primeiros testes clássicos da TRG, que ficaram conhecidos como: A precessão do periélio de Mercúrio; o *Redshift*; a deflexão gravitacional da luz; Atraso gravitacional dos sinais que passam perto do Sol. Todas as previsões sobre o comportamento destes fenômenos foram corroboradas com sucesso pelas observações (LAMBOURNE, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

No decorrer da história, surgiram outras evidências indiretas da existência de Buracos Negros, como a detecção de estrelas que aparentemente orbitam o vazio, mas fazem parte de sistemas binários de estrelas com Buracos Negros (WÜRZ, 2022); sistemas como estes podem também gerar ondas gravitacionais, que têm sido detectadas desde 2015; entre outras.

Apesar dos claros indícios da existência dos Buracos Negros, apenas recentemente pudemos verificar de forma direta a existência destes objetos a partir de ‘fotografias’ que capturaram o momento em que os chamados discos de acreção foram produzidos em seus entornos. Estas fotografias foram produzidas pelo *Event Horizon Telescope* (EHT), que se trata

de uma colaboração internacional que captura imagens de Buracos Negros usando um conjunto de nove radiotelescópios espalhados pelo planeta, ou seja, um telescópio virtual do tamanho da Terra. Os Buracos Negros fotografados foram: o da galáxia M87 e o da galáxia em que nos encontramos, a Via Láctea, chamado Sagittarius A*.

Figura 2: *Sagittarius A**, Buraco Negro do centro da via lactea.



Fonte: <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-reveal-first-image-black-hole-heart-our-galaxy>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dado o objetivo do presente trabalho, que tinha por finalidade apresentar a professores de física e outros interessados, uma possibilidade de um itinerário formativo para se compreender de forma introdutória o tema de Buracos Negros, consideramos satisfatória esta exposição, uma vez que apresentamos de forma concisa uma sequência de temas com as principais ideias necessárias ao entendimento da dedução da solução de Schwarzschild, e como a partir desta se chega a conclusão da existência dos Buracos Negros. Ressaltamos, porém, que tal exposição foi fruto de experiências pessoais dos autores deste trabalho, a partir de suas tentativas de compreender melhor o referido tema. E deste modo, apesar de não podermos assegurar que se trata do melhor itinerário a ser seguido para alcançar a compreensão do assunto, acreditamos que possa ser útil para supostos interessados.

REFERÊNCIAS

- OBSERVATORIO NACIONAL. **Astrofísica de buracos negros é agraciada com o Nobel de Física 2020!**. Rio de Janeiro. 06 out. 2020. Instagram: @observatorionacional. Disponível em: <<https://www.instagram.com/p/CGBHrAppFIq/>>. Acesso em: 25 jul. 2023
- CASTRO, P. A.; SOUSA ALVES, C. O.. Formação Docente e Práticas Pedagógicas Inclusivas. **E-Mosaicos**, V. 7, P. 3-25, 2019.
- OSTERMANN, F.; MOREIRA, M.A. Anais do VII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física, Florianópolis, 2000.
- SANTOS, C. A. B. O ensino da física na formação do professor de matemática. 2010. 189 f. Tese (Doutorado em Ensino de Ciências e Matemática) – Universidade Cruzeiro do Sul, São Paulo, 2010.
- OLIVEIRA, F. F.; VIANNA, D. M.; GERBASSI, R. S. Física moderna no ensino médio: o que dizem os professores. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, p. 447-454, 2007.
- GURGEL, C. Reforma do Estado e segurança pública. **Política e Administração**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 2, p. 15-21, set. 1997.
- MARTINS, R. A. A Origem Histórica da Relatividade Especial. São Paulo: Livraria da Física, 2015.
- LAMBOURNE, Robert J. **Relativity, gravitation and cosmology**. Cambridge University Press, 2010.
- DA SILVA, P. G. A. Física Moderna para o Ensino Médio: relato de uma experiência. 2015.
- GIL, A. C. et al. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- SAA, A. Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 38, 2016.
- ROSSER, W. G. V., *Introductory Special Relativity* (Taylor and Francis, London, 1991).
- PIATTELLA, O. F., *Cadernos de Astronomia* vol. 1, 30-39 (2020).
- GOBARA, S. T.; GARCIA, J. R. B. As licenciaturas em física das universidades brasileiras: um diagnóstico da formação inicial de professores de física. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 519-525, 2007.
- WÜRZ, G. Buracos negros de Schwarzschild e de Kerr: uma abordagem usando o Python. 2022.
- TELESCOPE, Event Horizon. **Astronomers Reveal First Image of the Black Hole at the Heart of Our Galaxy**. Event Horizon Telescope. Disponível em: <<https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-reveal-first-image-black-hole-heart-our-galaxy>>. Acesso em: 21 Jan 2023.