

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
CAMPUS ARAPIRACA
FÍSICA - LICENCIATURA

LUCAS SANTANA PEREIRA SILVA

ESTUDOS PRELIMINARES SOBRE FORMAÇÃO DE BURACOS NEGROS

ARAPIRACA

2023

Lucas Santana Pereira Silva

Estudos preliminares sobre formação de buracos negros

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
corpo docente do curso de Licenciatura em Física
da Universidade Federal de Alagoas - UFAL,
Campus Arapiraca.

Orientador: Prof. Dr Emerson de Lima.

Arapiraca

2023



Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus Arapiraca
Biblioteca Setorial *Campus Arapiraca* - BSCA

S586e Silva, Lucas Santana Pereira
Estudos preliminares sobre formação de buracos negros [recurso eletrônico] / Lucas Santana Pereira Silva. – Arapiraca, 2023.
30 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Emerson de Lima.
Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Física) - Universidade Federal de Alagoas, *Campus Arapiraca*, Arapiraca, 2023.
Disponível em: Universidade Digital (UD) / RD- BSCA– UFAL (*Campus Arapiraca*).
Referências: f. 29-30.

1. Pesquisa. 2. Divulgação científica. 3. Buracos negros (Astronomia). 4. Ciência do espaço I. Lima, Emerson de. II. Título.

CDU 53

Bibliotecário responsável: Nestor Antonio Alves Junior
CRB-4 / 1557

Lucas Santana Pereira Silva

Estudos preliminares sobre formação de buracos negros

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
corpo docente do curso de Licenciatura em Física
da Universidade Federal de Alagoas - UFAL,
Campus Arapiraca.

Data de aprovação: 07/07/2023

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente



EMERSON DE LIMA

Data: 25/07/2023 12:43:20-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Emerson de Lima
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus Arapiraca
(Orientador)

Documento assinado digitalmente



ANDRE DE LIMA MOURA

Data: 18/07/2023 19:37:36-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. André de Lima Moura
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus A. C. Simões
(Examinador)

Documento assinado digitalmente



ELTON MALTA NASCIMENTO

Data: 21/07/2023 14:59:22-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Elton Malta Nascimento
Universidade Federal de Alagoas - UFAL
Campus A. C. Simões
(Examinador)

À Deus, minha noiva, meus familiares,
professores, companheiros de turma e amigos
de todas as horas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me dado forças e me sustentado durante toda a graduação, que nos momentos mais difíceis Ele foi meu refúgio e minha fortaleza. Agradeço também a minha família que não desistiu de me apoiar e sempre me ajudou na medida do possível para que meu sonho se tornasse realidade, meus nobres agradecimentos ao meu pai Eraldo Pereira da Silva, minha mãe Raquel Hosana Santana Silva, homem e mulher da minha vida. Também quero agradecer a minha noiva Yris Gabriela Nunes Silva que me mostrou que ainda existem boas pessoas no mundo e que me abriu os olhos e mostrou-me o amor. Também não poderia esquecer dos grandes amigos que a vida e a graduação me deram, em especial aos mais próximos.

Ao Rodrigo (5 artigos publicados por m²) que sempre me apoiou; Ao Pedro que sempre esteve comigo, em todos os momentos bons e ruins; Ao João, amigo de todas as disciplinas (kkkk); Ao Ismael que considero um cara incrível; Ao Daniel que estava sempre bem humorado; Ao Enedson, meu amigo de infância, fica aqui minha admiração; Ao Matheus, futuro milionário; Ao Edival, sempre atencioso e alegre; Ao Henrique amigo de Feira Grande; Ao Jadielson, vascaíno topado.

Todos vocês moram dentro do meu coração e vocês nunca serão esquecidos.

Quero agradecer a minha irmã Rayssa Ester Santana Pereira que me deu forças e me apoiou e minha falecida irmã, Débora Raquel Santana Pereira Silva, sei que onde você estiver estará orgulhosa de mim. Não poderia esquecer dos meus professores desde meu ensino fundamental até a minha graduação, que foram incríveis e são minha principal inspiração, plantaram e regaram em mim a semente do conhecimento e alimentaram o desejo de dar continuidade e levar essa mesma semente para mais pessoas.

Um agradecimento especial ao professor e meu orientador Dr. Emerson de Lima. Que me ajudou e que foi o responsável por cativar a aumentar ainda mais a curiosidade sobre o cosmos, muito obrigado por tudo. Todas nossas conversas sobre física foram de extrema importância para minha formação como profissional, curioso e amante do céu.

RESUMO

Apesar dos buracos negros serem uma realidade consolidada na ciência, não é comum encontrar artigos científicos e esclarecimentos acerca de sua divulgação científica no campus Arapiraca. A presente monografia é uma análise e visa tratar e esclarecer um estudo inicial acerca dos fascinantes buracos negros, com o intuito de criar um material acessível aos estudantes do campus, bem como tratar desde sua criação até crenças populares e mitos que cercam o tema. Dessa forma faz-se necessário evidenciar a necessidade e a carência de informações, o presente trabalho traz uma seleção de investigações tendo como foco central uma exposição de uma série de materiais analisados, sem adição de novas informações, este foi escrito de maneira simples e eficiente para que o leitor possa ter uma fácil compreensão do tema abordado.

Palavras-chave: buracos negros; monografia; divulgação científica.

ABSTRACT

Although black holes are a consolidated reality in science, it is not common to find scientific articles and explanations about their scientific dissemination on the Arapiraca campus. This monograph is an analysis and aims to address and clarify an initial study on the fascinating black holes, in order to create accessible material for campus students, as well as address from their creation to popular beliefs and myths that surround the subject. Therefore, it is necessary to highlight the need and lack of information, this work brings a selection of investigations focusing on an exhibition of a series of analyzed materials, without the addition of new information, it was written in a simple and efficient way so that the reader can have an easy understanding of the subject addressed.

Keywords: Black holes; monograph, scientific dissemination.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação das forças gravitacional e nuclear.	10
Figura 2 - Comparação entre o sol e a estrela VY CANIS MAJORIS cujo raio é cerca de 1800 vezes o do sol.	11
Figura 3 - Acervo experimental utilizado por Fizeau para medir a velocidade da luz.	12
Figura 4 - Experimento de dupla fenda, responsável por representar a luz como uma onda.	13
Figura 5 - Representação das franjas no anteparo 3.	14
Figura 6 - Evolução da primeira ilustração em 1978 até a primeira imagem dos campos magnéticos em 2021.	16
Figura 7 - O buraco negro supermassivo no centro da galáxia elíptica supergigante Messier 87, com uma massa de aproximadamente 7 bilhões de vezes a do Sol.	17
Figura 8 - Simples ilustração sobre a ideia de buraco negro.	19
Figura 9 - Imagem de uma simulação de um buraco negro espelindo radiação.	20
Figura 10 - Fusão de Hidrogênio em Hélio na estrela.	22
Figura 11 - Representação do tecido do espaço tempo com um ponto de singularidade.	24

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	09
2	BREVE HISTÓRICO	10
2.1	MICHELL E A IDEIA DE UM CORPO SUPERMASSIVO QUE A LUZ NÃO PODE ESCAPAR	10
2.2	A LUZ COMO ONDA E O PENSAMENTO DE MICHELL	12
2.3	EINSTEIN E A RELATIVIDADE	15
3	BURACOS NEGROS	17
3.1	ETIMOLOGIA	17
3.2	PROPRIEDADES GERAIS	18
3.3	PROPRIEDADES FÍSICAS	20
4	O QUE SE SABE SOBRE BURACOS NEGROS	22
4.1	COMO SE DÁ A FORMAÇÃO DE BURACOS NEGROS	22
4.2	O QUE É VISÍVEL EM UMA IMAGEM DE BURACO NEGRO	23
4.3	EFEITOS CAUSADOS NO TECIDO DO ESPAÇO-TEMPO	24
4.4	COMPROVAÇÃO DA EXISTÊNCIA DE BURACOS NEGROS	25
5	PERSPECTIVAS FUTURAS SOBRE O AVANÇO DOS ESTUDOS ACERCA DE BURACOS NEGROS	26
5.1	PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS	26
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
	REFERÊNCIAS	29

1 INTRODUÇÃO

Entender sobre os fenômenos que permeiam o surgimento e o desenvolvimento dos buracos negros, de certa forma, é avançar alguns passos no que até pouco tempo era apenas suposição e agora com todo o desenvolvimento científico mostra-se como uma realidade indiscutível. O grande físico Albert Einstein em 1905 publicou sua teoria da relatividade ao mundo e já previa a existência de buracos negros.

Observar e mapear os buracos negros é um dos grandes desafios da cosmologia moderna. Desse modo, se faz necessário dar continuidade aos estudos e entender como se dá a formação e a evolução dos mesmos, tomando como base os aspectos evolucionários de estrelas massivas, que são consideradas as “mães” de buracos negros, o que nos permite compreender suas principais características, baseando-se nos fatores morfológicos que nos propiciam determinar sua classificação, massa, tamanho e seu campo gravitacional (HAWKING, 2017).

Recentemente, a relatividade ganhou maior notoriedade porque cientistas da Universidade de Stanford, nos Estados Unidos, conseguiram visualizar luz atrás de um buraco negro. Porém, por mais que os estudos relacionados com os buracos negros estejam em desenvolvimento e que sua realidade já seja consolidada, deve-se entender a importância de dar continuidade com os estudos e com os avanços científicos acerca desse grande fenômeno ainda cercado de muitos mistérios e futuras descobertas. (MATSUURA, 2020, p. 53).

A motivação para o desenvolvimento desse estudo nasceu inicialmente pelo grande interesse no tema e pela falta de informação acerca do mesmo no campus. Surgindo a necessidade de contribuir com a mudança desta realidade para os atuais e futuros graduandos do curso de física e afins. Assim, este presente trabalho de conclusão de curso - TCC, tem o intuito de evidenciar um estudo preliminar e explicar os fenômenos que ocorrem na formação de um buraco negro, mostrar a beleza por trás dos misteriosos, fantásticos, intrigantes e assombrosos buracos negros. Descrevendo um pouco sobre sua criação, desenvolvimento, causas, relações e deformações causadas no tecido do espaço-tempo.

Explorar os buracos negros ainda é campo em desenvolvimento. Este TCC tem o intuito de fazer isto de maneira simples e coesa, sem trazer novos dados, preocupando-se em criar um material de fácil acesso para os graduandos, servindo de divulgação científica. Para que essa ideia se tornasse possível, foi feita uma revisão bibliográfica sobre o tema abordado, conforme apresentado nos capítulos a seguir.

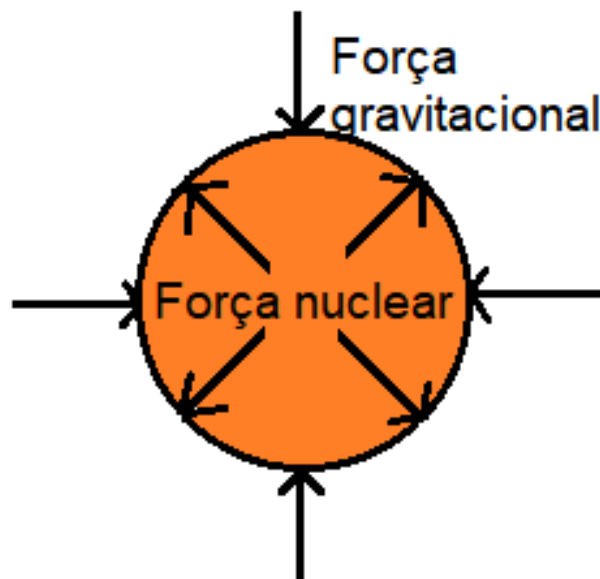
2 BREVE HISTÓRICO

A ideia acerca de um corpo tão massivo que nem a luz poderia escapar, inicialmente, não foi proposta por Albert Einstein, como alguns acreditam, mas sim pelo astrônomo John Michell, que em novembro de 1784 publicou uma carta que tratava de um corpo celeste cuja sua velocidade de escape é maior que a da luz (ISRAEL, 1987). Com um jogo mental e com os cálculos sobre a velocidade de escape que já eram conhecidos desde a época de Isaac Newton, Michell supôs um corpo que pudesse ter a mesma densidade que o Sol tem e chegou até a conclusão que esse corpo se formaria quando o diâmetro de uma estrela excedesse o do Sol por um fator de 500 vezes e que sua velocidade de escape na superfície excedesse a velocidade usual da luz.

2.1 MICHELL E A IDEIA DE UM CORPO SUPERMASSIVO QUE A LUZ NÃO PODE ESCAPAR

O tamanho de uma estrela é um resultado natural do equilíbrio interno da estrela, entre a atração gravitacional que puxa tudo para dentro e a pressão de radiação que empurra tudo para fora. Observe a imagem ilustrativa.

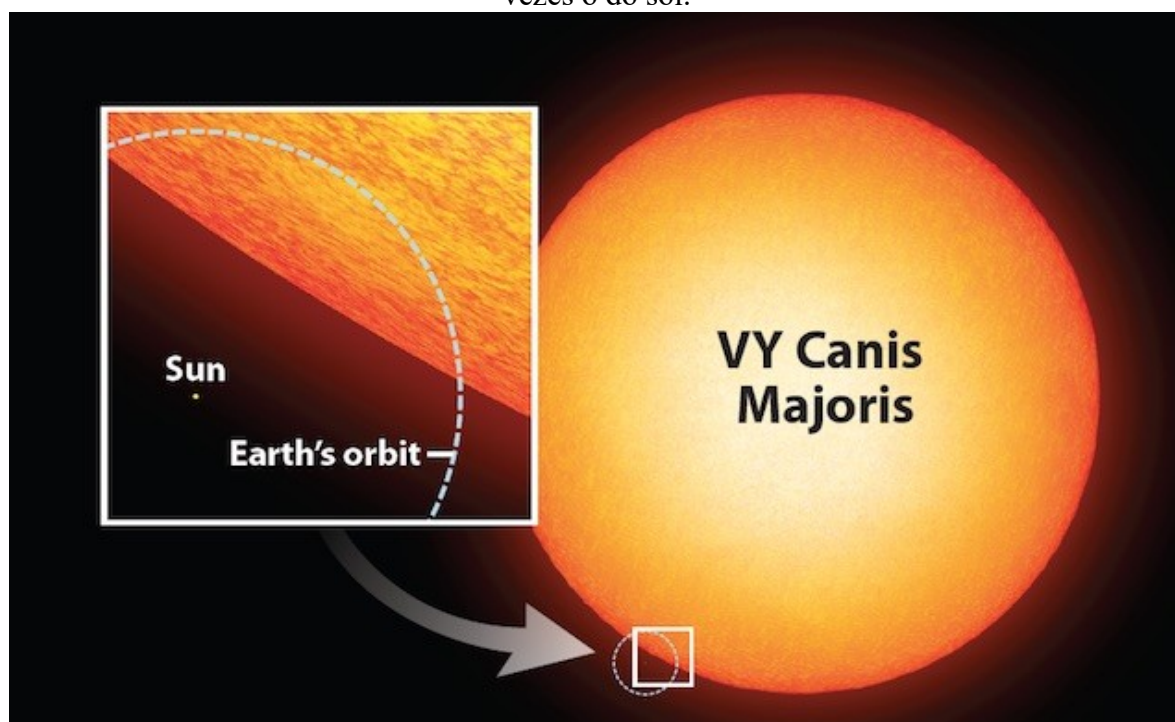
Figura 1 - Representação das forças gravitacional e nuclear.



Fonte: Disponível em : <https://www.infoescola.com/fisica/equilibrio-hidrostatico/> Acesso em: 11 mar. 2023.

Quando essas duas forças estão em equilíbrio, as camadas externas da estrela são estáveis e a estrela está em equilíbrio hidrostático. Em geral, tanto a força gravitacional quanto a taxa de produção de energia dependem da massa da estrela. Durante a maior parte de sua vida, uma estrela queima hidrogênio em seu núcleo, cuja estrutura é determinada quase inteiramente por sua massa. No final de sua vida, a energia é produzida em uma camada ao redor do núcleo e as camadas externas se expandem, como uma supergigante vermelha para uma estrela de maior massa e uma gigante vermelha para uma estrela de menor massa. Embora uma estrela não tenha superfície, a definição mais comum do limite externo de uma estrela é sua fotosfera, onde a luz sai da estrela. As maiores estrelas são supergigantes vermelhas, a maior das quais tem um raio de cerca de 1800 vezes o tamanho do Sol. Estrelas como essas, são possíveis candidatas a futuros buracos negros (ISRAEL, 1987).

Figura 2 - Comparação entre o sol e a estrela VY CANIS MAJORIS cujo raio é cerca de 1800 vezes o do sol.



Fonte: Disponível em : <https://spacetoday.com.br/qual-o-tamanho-maximo-que-uma-estrela-pode-ter-sem-violar-as-leis-da-fisica/> Acesso em: 01 mar. 2023.

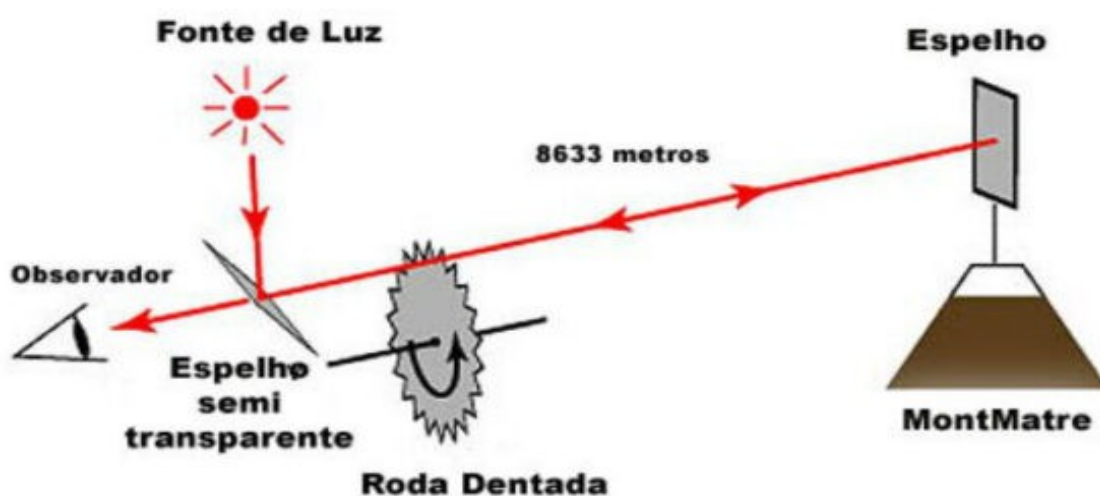
Michell supondo um corpo extremamente massivo observou de maneira correta que esses corpos apesar de supermassivos não seriam visíveis, já que nem a própria luz poderia escapar (MONTGOMERY; ORCHISTON; WHITTINGHAM, 2009), ainda assim poderiam ser detectados por seus efeitos gravitacionais em corpos cuja a velocidade de escape é menor

que a da luz e que estejam relativamente próximos a esses corpos supermassivos, como será abordado mais à frente (MONTGOMERY; ORCHISTON; WHITTINGHAM, 2009).

2.2 A LUZ COMO ONDA E O PENSAMENTO DE MICHELL

Alguns estudiosos antigos importantes, como Aristóteles e Hero de Alexandria, afirmaram que a velocidade da luz, embora alta, era de valor finito (BASSALO, 1988). Em 1638, o físico italiano Galileo Galilei realizou vários experimentos para medir a velocidade da luz. Um desses experimentos ficou muito famoso, quando Galileo Galilei tentou medir o tempo em que a luz viajava de uma lanterna no alto de uma montanha até chegar à outra que estava a 2 quilômetros de distância, utilizando apenas espelhos e um relógio para marcar o tempo de ida e volta da luz. Sem sucesso, Galileu raciocinou que os equipamentos de medição da época não eram precisos o suficiente para medir o tempo que a luz levava para viajar de um ponto a outro. O astrônomo dinamarquês Olaf Roemer publicou uma medição mais precisa da velocidade da luz em 1676. Para fazer isso, ele percebeu que algumas das luas de Júpiter tinham eclipses mais longos em certas épocas do ano, então a Terra estaria mais distante dessas luas nessas épocas. Como resultado, a luz que eles emitem leva mais tempo para chegar à Terra. No ano de 1849, o francês Armand Hippolyte Fizeau desenvolveu e propôs um método mais preciso de medir a velocidade da luz do que os métodos conhecidos anteriormente. Inspirado por experimentos anteriores, Fizeau montou uma engrenagem e um conjunto de espelhos.

Figura 3 - Acervo experimental utilizado por Fizeau para medir a velocidade da luz.



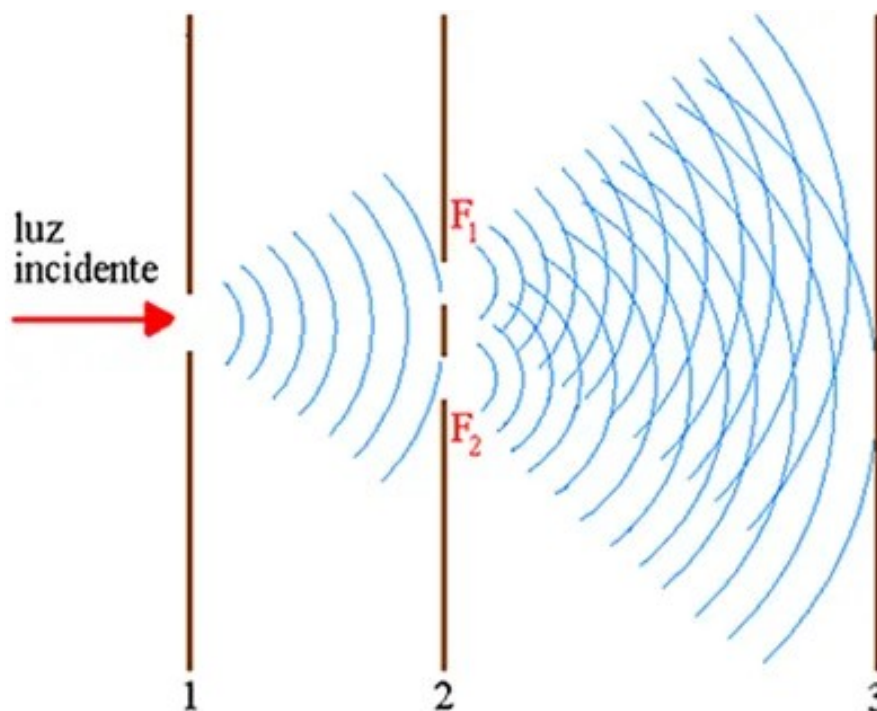
Fonte: Disponível em: <https://www.ufmg.br/espacodoconhecimento/adaptacoes-de-medidas-o-que-e-o-ano-luz/>
Acesso em: 01 mar. 2023.

Fizeau construiu o dispositivo em seu laboratório nos arredores de Paris, com uma engrenagem e um espelho separados por 8.633 metros e enviou pulsos de luz entre eles. As engrenagens pararam e ele observou a luz passar pelo vão entre os dois dentes, bater no espelho, voltar ao ponto original e passar pelo mesmo vão. Os físicos então começaram a girar a roda, aumentando a velocidade até que o reflexo refletido no espelho desaparecesse. A velocidade diminuiu e o raio apareceu novamente. Ele então concluiu que o feixe de luz refletido no espelho foi bloqueado pelos dentes da engrenagem.

Então Fizeau sugeriu que o tempo que leva para a roda percorrer uma distância de uma largura de engrenagem é igual ao tempo que leva para o feixe de luz viajar do espelho distante e voltar. Como sabia a velocidade com que as engrenagens giravam, a largura de cada engrenagem e a distância até o espelho, o cientista pôde calcular a velocidade da luz. Ele fez isso! Ele obteve um valor de 313.300 m/s, que é apenas 5% maior do que medimos hoje com a ajuda de tecnologia mais aprimorada. O valor aceito atualmente para a velocidade da luz no vácuo é de 299 792 458 m / s (BASSALO, 1988).

Observando como a natureza ondulatória da luz se tornou aparente no início do século XIX, e atualmente pode ser comprovada utilizando um experimento de dupla fenda.

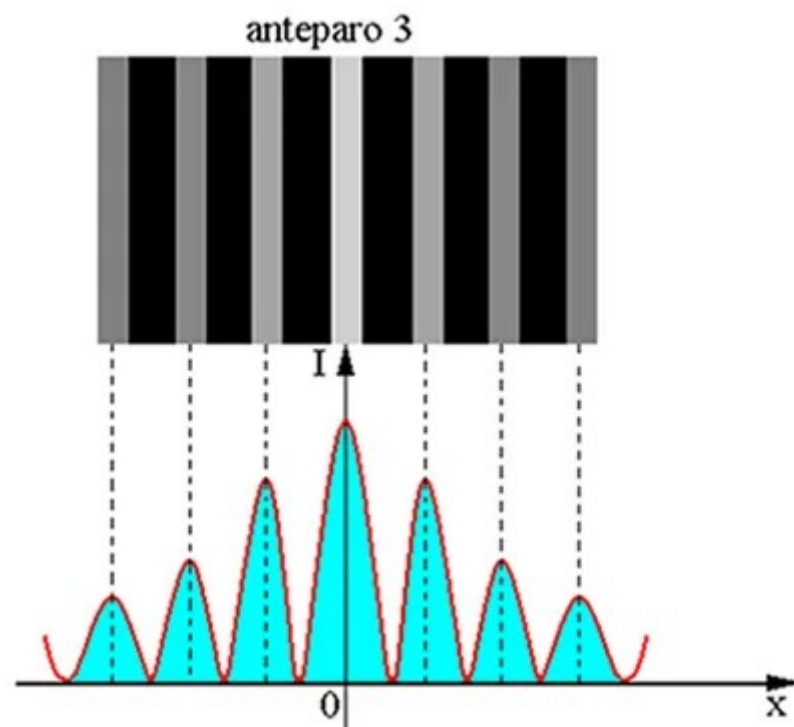
Figura 4 - Experimento de dupla fenda, responsável por representar a luz como uma onda.



Fonte: Disponível em : <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/experimento-das-duas-fendas.htm> Acesso em : 01 mar. 2023.

A imagem acima representa o experimento feito por Thomas Young, de dupla fenda, que consiste em três anteparos. No primeiro, havia um pequeno orifício em que ocorria a primeira difração da luz proveniente de uma fonte de luz incidente e monocromática. Onde este primeiro anteparo tinha a função de fazer a luz atingir o segundo anteparo em fase. Já o terceiro anteparo é o responsável por receber as manchas de difração e interferência, o que só é possível caso a luz também possa ser descrita como uma onda. Observe a figura 4 que apresenta o padrão de interferência causado pela difração da luz. Onde as franjas claras correspondem a regiões de interferência construtiva. Já as franjas escuras correspondem a regiões de interferência destrutiva.

Figura 5 - Representação das franjas no anteparo 3



Fonte: Disponível em : <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/experimento-das-duas-fendas.htm> Acesso em : 03 mar. 2023.

Na física atual a luz é conhecida por ter uma dualidade onda-partícula. (BETZ; LIMA e MUSSATTO, 2009).

A ideia de Michell iria ficando cada vez mais sem respostas. O que aconteceria se a luz fosse uma onda e não um "corpúsculo"?, hoje sabe-se da dualidade da luz, porém, Michell sequer pensou nisso e não deixou claro o que aconteceria, e se isso teria influência na gravidade e na fuga das ondas de luz. (ISRAEL, 1987).

2.3 EINSTEIN E A RELATIVIDADE

Albert Einstein em 1915 propôs a teoria da relatividade mostrando que a gravidade influencia no movimento da luz, evidenciando então que o pensamento de John Michell estava incompleto. Passado alguns meses o físico e astrônomo Karl Schwarzschild chegou a uma solução para a equação de campo desenvolvida por Einstein que descreve o campo gravitacional de uma massa pontual e de uma massa esférica (EINSTEIN, 1916). A equação de campo de Einstein descreve como o espaço-tempo se curva pela matéria e, reciprocamente, como a matéria é influenciada pela curvatura do espaço-tempo, ou seja, como a curvatura dá a sensação de gravidade.

Schwarzschild obteve então a primeira solução exata da seguinte equação de campo de Einstein:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi G}{C^4}T_{\mu\nu}, \quad (1)$$

Onde $R_{\mu\nu}$ e R são respectivamente, o tensor e o escalar de Ricci, $g_{\mu\nu}$ é a métrica para o espaço-tempo curvo, G representa a constante gravitacional, c representa a velocidade da luz e $T_{\mu\nu}$ é o tensor de energia-momento. Interessados em observar as equações diferenciais e as equações de campo, analisem as referências.

Um fato curioso foi que, dentro das soluções para as equações, foi encontrado um termo de singularidade, ou seja, um termo de densidade infinita. A natureza dessa superfície ainda não era totalmente compreendida. Os estudos sobre esse corpo celeste ganharam ainda mais relevância após as teorias de Einstein, assim iniciou-se uma nova era com os objetivos de entender o que era tudo aquilo que Einstein propôs e se o mesmo estava correto, se haveria algum dado experimental ou observacional que servissem como prova concreta para as suas ideias desenvolvidas. (SCHWARZSCHILD, 1999).

É notório a evolução dos estudos e da tecnologia aplicada aos buracos negros, o que antes era apenas suposição, passou a ser ilustração, simulação e atualmente é possível observar uma imagem real desse fenômeno incrível.

Figura 6 - Evolução da primeira ilustração em 1978 até a primeira imagem dos campos magnéticos em 2021.



Fonte: Disponível em : <https://pt.quora.com/Como-pesquisadores-encontram-buracos-negros-se-eles-s%C3%A3o-invis%C3%ADveis> Acesso em : 05 mar. 2023.

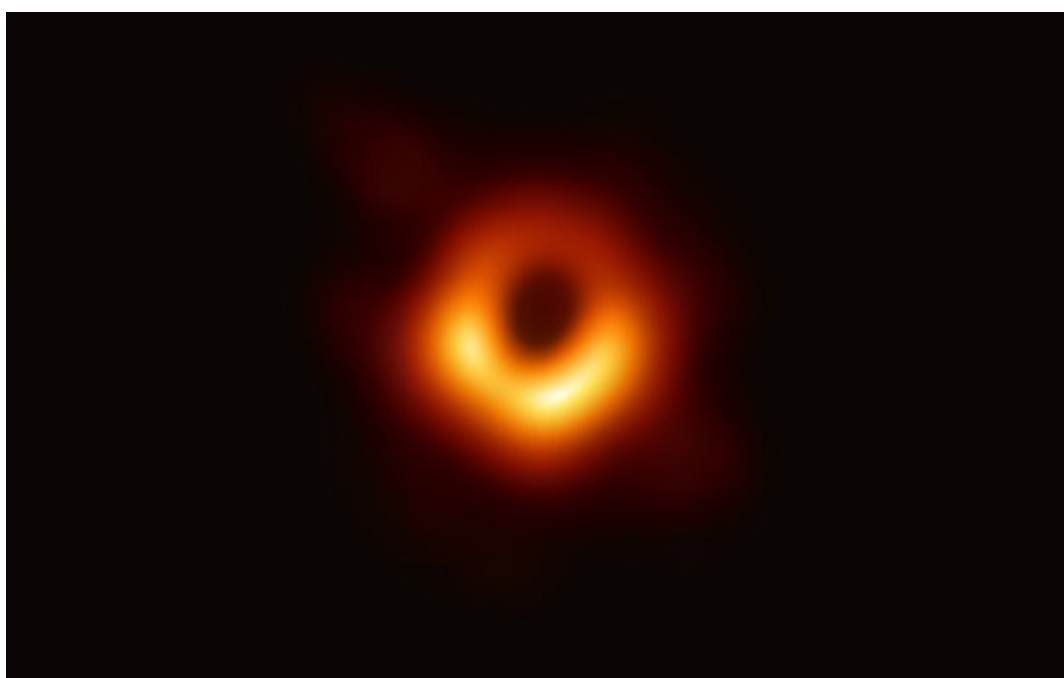
A imagem acima mostra a evolução de uma ilustração em 1978, ilustração de como se acreditava que seria um buraco negro, após isso, passando por simulações até atingir o patamar contemporâneo, onde já é possível observar imagens do campo magnético de buracos negros. Fica claro que a primeira ilustração não fugiu do real aspecto observado atualmente.

3 BURACOS NEGROS

Buracos negros são sem duvidas umas das coisas mais intrigantes e estranhas consequências da relatividade geral. São objetos ainda repletos de curiosidades que são extremamente densos cobertos por um horizonte de eventos que escondem uma singularidade em seu interior e aprisionam em seu extremo campo gravitacional qualquer matéria que se arrisca a adentrá-lo, incluindo a própria luz. (HAWKING, 2017, p. 16).

Observe a primeira imagem de um buraco negro.

Figura 7 - O buraco negro supermassivo no centro da galáxia elíptica supergigante Messier 87, com uma massa de aproximadamente 7 bilhões de vezes a do Sol.



Fonte: Disponível em : <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2019/04/primeira-foto-de-um-buraco-negro-um-dia-historico-para-ciencia.html> Acesso em: 05 mar. 2023.

3.1 ETIMOLOGIA

O primeiro termo a ser utilizado ao se referir ao que hoje é conhecido como buraco negro, foi “estrela negra” e foi utilizado por John Michell. Nome que se adequa um pouco mais ao que ele mesmo representa quando comparado com o atual nome. O segundo termo utilizado começou no início do século XX, os físicos usaram o termo "objeto gravitacionalmente colapsado" referindo-se ao colapso gravitacional sofrido por estrelas no processo de formação desse objeto. (ISRAEL, 1987).

O termo buraco negro como hoje é conhecido foi proposto por um físico, seu nome era Robert H. Dicke, que no início dos anos 1960 comparou o fenômeno ao Buraco Negro de

Calcutá, uma prisão onde as pessoas entravam, mas nunca saíam vivas, fazendo uma relação a tudo que adentra o horizonte de eventos já não poderiam mais escapar. Porém, em dezembro no ano de 1967, um estudante sugeriu a expressão "buraco negro" em uma palestra de John Wheeler, Wheeler então adotou o termo por sua brevidade e "valor publicitário", o que levou alguns a atribuírem crédito a Wheeler por cunhar o termo (HERDEIRO; LEMOS, 2018).

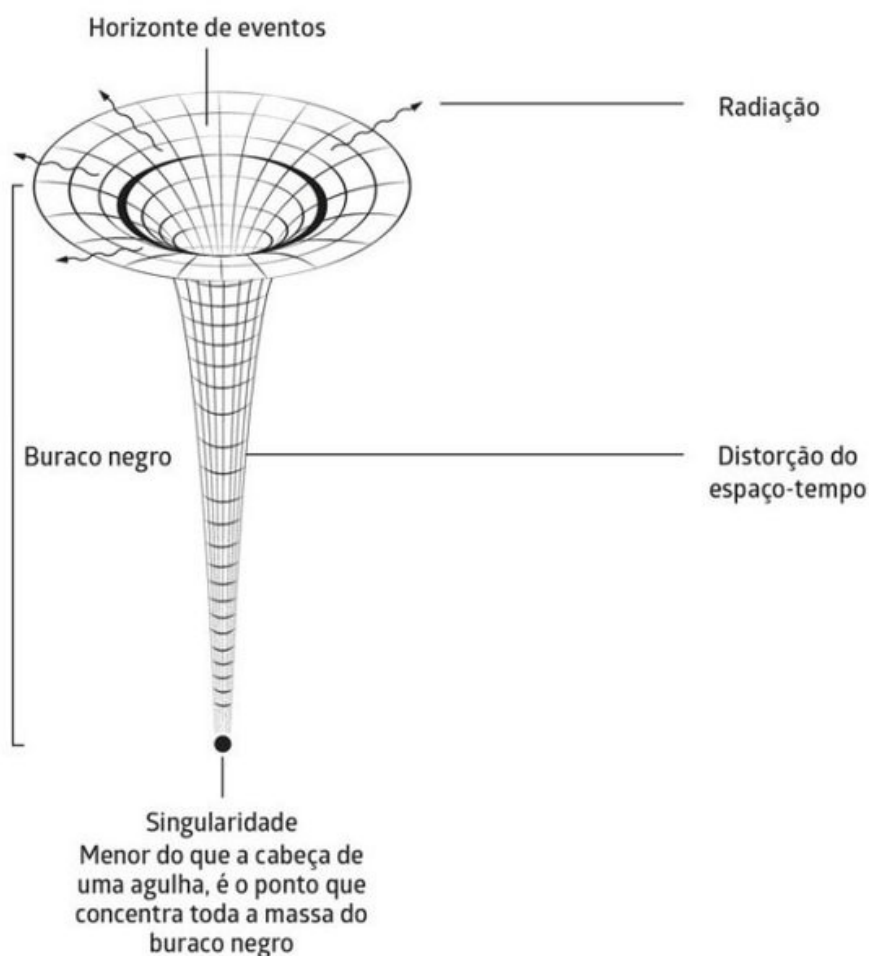
3.2 PROPRIEDADES GERAIS

O teorema no-Hair assume que, uma vez formados e atingindo um estado estacionário, os buracos negros têm apenas três propriedades físicas separadas: massa, carga e momento angular; caso os buracos negros apresentem igualdade nessas três propriedades eles não se diferem entre si, ou seja, são incaracterísticos. Se essa conjectura for verdadeira, então quaisquer dois buracos negros com os mesmos valores dessas propriedades ou parâmetros seriam indistinguíveis. Até que ponto essa conjectura é verdadeira para buracos negros reais é atualmente uma questão que está em aberto, de acordo com as leis da física moderna. Essas propriedades são especiais porque podem ser observadas de fora do buraco negro. Como exemplo, um buraco negro carregado repele outros objetos que tem carga semelhante, assim como qualquer outro objeto carregado. De maneira semelhante, pode-se ser feita uma simulação gravitacional utilizando a lei de Gauss para encontrar a massa total dentro da esfera que contém o buraco negro. (RUFFINI; WHEELER, 1971).

Os buracos negros estacionários que são considerados os mais simples, têm massa, entretanto, não tem carga elétrica nem momento angular. São conhecidos como buracos negros Schwarzschild em homenagem a Karl Schwarzschild, que descobriu essa solução em 1916. (HAWKING, 2017).

Observe a ilustração sobre a propriedade mais simples acerca dos buracos negros. **A imagem abaixo não está em escala.** O horizonte de eventos é bem maior que o ponto de singularidade.

Figura 8 - Simples ilustração sobre a ideia de buraco negro.



Fonte: Disponível em: <https://qph.cf2.quoracdn.net/main-qimg-841e8d9a5acea3c327610f96df7302cd-lq> Acesso em: 07 mar. 2023.

De acordo com o teorema de Birkhoff, essa é a única solução no vácuo esféricamente simétrica. Isso significa que não há diferença observável na distância entre o campo gravitacional de um buraco negro e o de qualquer outro objeto esférico da mesma massa. (BEVILAQUA, 2007).

Pode-se tomar como exemplo um exercício imaginário. Imagine a substituição do sol por um buraco negro de mesma massa, em nada alteraria a órbita da terra. Portanto, a visão popular de que um buraco negro "suga tudo" ao seu redor só é verdadeira perto do horizonte de eventos do buraco negro. À distância, o campo gravitacional externo é o mesmo de qualquer outro objeto da mesma massa. (HAWKING, 2017).

Existem também soluções que descrevem buracos negros mais gerais. A métrica Reissner-Nordström descreve um buraco negro carregado sem rotação, enquanto a métrica

Kerr descreve um buraco negro rotativo sem carga. A solução conhecida mais comum para um buraco negro estacionário é a métrica de Kerr-Newman, que descreve um buraco negro com carga elétrica e momento angular (SHAGHOULIAN, 2022).

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS

Dentre todas as propriedades físicas de um buraco negro, deve-se analisar com cautela a que mais chama atenção. A radiação expelida pelo mesmo, denominada radiação Hawking (SANTI; SANTARELLI, 2019).

Em 1974, Stephen Hawking com toda sua genialidade conseguiu fazer uma descoberta surpreendente, segundo ele, os buracos negros irradiam, podendo trazer uma comparação com um corpo negro, o que indica que podem ser similar a um corpo quente que irradia em função apenas de sua temperatura. A radiação do corpo negro é responsável por um pedaço de ferro aquecido irradiar com a cor vermelha. Caso esta temperatura esteja sendo aumentada, a cor passará do vermelho escuro para o vermelho vivo (vermelho mais claro), logo após passará a cor laranja, depois a cor amarela e finalmente, o branco. Além disso, sua luminosidade crescerá rapidamente com a temperatura. Hawking descobriu que, quando se consideram efeitos quânticos, o buraco negro irradia como um corpo negro à temperatura, a imagem abaixo mostra uma simulação onde um buraco negro expelle radiação de coloração branca.

Figura 9 - Ilustração de um buraco negro espelindo radiação.



Fonte: Disponível em: <https://www.estudopratico.com.br/teorias-de-stephen-hawking/> Acesso em: 08 mar. 2023.

A equação que descreve a temperatura de um buraco negro é dada através de:

$$T = \frac{\hbar \cdot c^3}{8\pi KGM} \quad (2)$$

onde: T temperatura do buraco negro; $\hbar$ constante de planck; c velocidade da luz; K constante de Boltzmann; G constante gravitacional de Newton; M massa do buraco negro.

Isto é denominado de radiação Hawking. Na equação (2), foi dada temperatura T de um buraco negro segundo Hawking. A radiação Hawking significa que os buracos negros não são completamente negros afinal, visto que expõem esse tipo de radiação. Dada a equação é possível observar que a temperatura T é inversamente proporcional à massa do buraco negro, assim, os buracos negros supermassivos no centro das galáxias, são ainda mais difíceis de serem detectados. Quanto maior a massa do buraco negro, menor será o seu brilho.

Como é produzida a radiação Hawking? É o vácuo que é responsável. Na mecânica quântica, o vácuo não é inerte, mas, graças ao princípio da incerteza, constitui uma verdadeira onda de energia caracterizada pelas chamadas flutuações quânticas. Essas flutuações geram pares de partículas virtuais. Ao contrário das partículas reais, elas se aniquilam tão rapidamente que não podem ser observadas por nenhum detector. Perto do horizonte de eventos do buraco negro, no entanto, fortes campos gravitacionais perturbam o vácuo, fazendo com que um membro do par de partículas virtuais fique preso pelo buraco negro. Sem sua contraparte, o outro membro da dupla se liberta e escapa, transformando-se em uma partícula real. Para observadores distantes além do horizonte de eventos, a impressão é que o buraco negro está irradiando partículas que escaparam. (SANTI; SANTARELLI, 2019).

4 O QUE SE SABE SOBRE BURACOS NEGROS

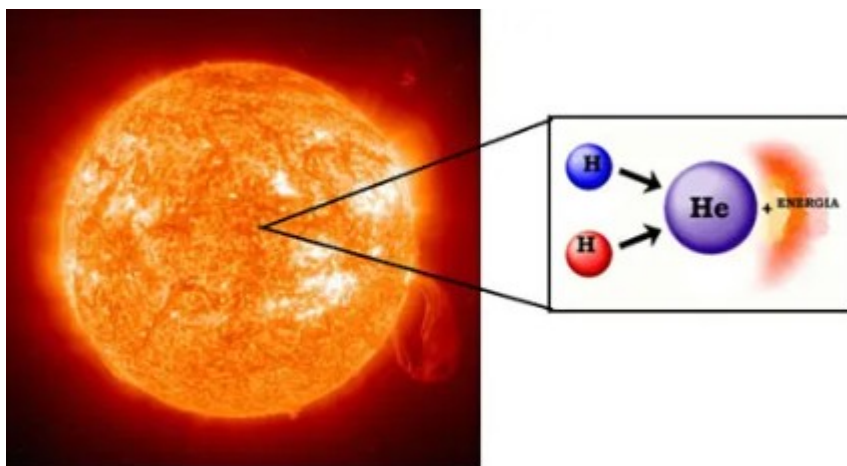
Os buracos negros são um dos mais incompreensíveis aspectos do espaço, para começar eles não são realmente objetos. São o resultado da extrema deformação do tecido do espaço-tempo. Por conta dessa distorção, algumas coisas realmente curiosas começam a acontecer ao redor deles. Algumas delas parecem tão estranhas que geravam uma dúvida pertinente sobre sua real existência, a não ser por sua matemática extremamente sólida que respalda sua veracidade e suas propriedades características. Foi mostrada que a matemática está correta através das observações que comprovaram sua realidade. (ISRAEL, 1987).

4.1 COMO SE DÁ A FORMAÇÃO DE BURACOS NEGROS

Os buracos negros existem em uma variedade de tamanhos, o menor buraco negro observado tem cerca de 3,8 massas solares ($1,9891 \times 10^{30} \text{ kg}$ $332\,900 \times \text{Terra}$), do outro lado da escala, é possível encontrar buracos negros que surgiram ainda no universo primordial, buracos negros de bilhões de massas solares, esses gigantes sistemas além de super massivos, são enormes, caberiam facilmente em todo o sistema solar dentro do seu horizonte de eventos. (HAWKING, 1988).

Os buracos negros que estão sendo criados hoje são o estágio final do ciclo de vida de estrelas particularmente massivas (EINSTEIN, 1916), quando tal estrela nasce ela está essencialmente se equilibrando sobre o peso de duas forças, a primeira é a gravidade que empurra sua massa em direção ao centro. A segunda é a fusão nuclear.

Figura 10 - Fusão de Hidrogênio em Hélio na estrela.



Fonte: Disponível em : <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/fusao-nuclear.htm> Acesso em: 11 mar. 2023.

Nas profundezas das estrelas os átomos hidrogênio (H) são esmagados contra outros átomos de H, com tanta força que se combinam para formar um elemento mais denso, o Hélio (He), onde essa nova estrutura atômica precisa de menos energia do que quando eram dois átomos de H individuais e separados. A energia que “sobra” é liberada, essa energia liberada corresponde a segunda força, ela irradia do centro da estrela como calor e luz neutralizando a força da gravidade (HAWKING, 1988).

O estado em que a estrela permanece é relativamente estável até o momento em que a reação começa a parar, à medida que fica sem Hidrogênio (H) que funciona como seu combustível. Caso a estrela seja massiva o suficiente, assim que o H começar a se esgotar a estrela combinará o He recém-formado em materiais ainda mais densos, como carbono, Lítio e eventualmente oxigênio e silício. Começa então a fundir o ferro, surgindo um problema com o mesmo, é que ele não economiza energia em sua nova forma, logo, não resta energia para ser liberada, ficando então no centro da estrela e crescendo.

Sem haver energia empurrando de volta contra a gravidade a balança se inclina, a energia desse colapso é surpreendente, mas a força depende da massa original da estrela, a massa se comprime para encontrar o núcleo com tanta força que o rebote desse golpe é o que chamamos de supernova. Matéria e energia são lançadas pelo universo a partir de uma das maiores explosões possíveis, que produz elementos ainda mais pesados, podendo ir do ferro (Fe) até o urânio (U). O que resta da estrela depende de alguns fatores, caso a massa da estrela e consequentemente a força do golpe for muito baixa o que resta é uma estrela de nêutrons, uma pequena bola de matéria com no máximo 25 Km de diâmetro, porém, com uma massa tão densamente compactada que equivale a aproximadamente um milhão de terras. Caso a massa e consequentemente a força forem grandes o suficiente, a física prevê a geração de um buraco negro. (HAWKING, 1988).

4.2 O QUE É VISÍVEL EM UMA IMAGEM DE BURACO NEGRO

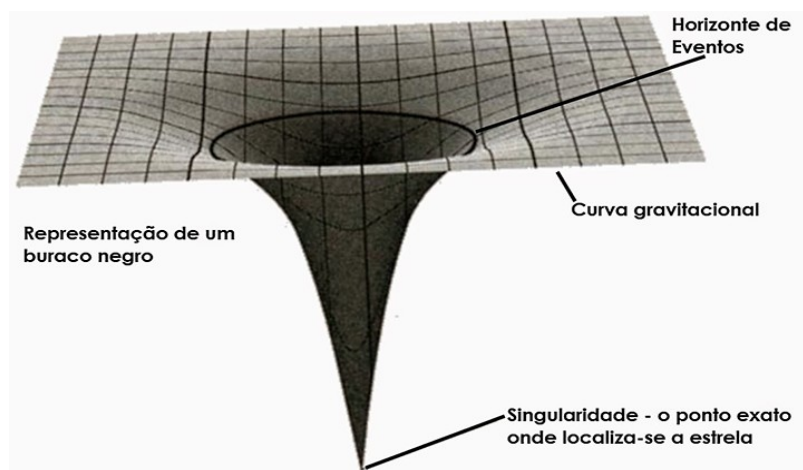
Quando se observa uma imagem de um buraco negro, a esfera negra vista, não é realmente o próprio buraco negro. Alguns cientistas teorizam que sua verdadeira forma ainda é menor e mais densa do que uma estrela de nêutrons, na verdade é provável que seja infinitamente pequeno e infinitamente denso, ou seja, uma singularidade, gerando uma deformação no tecido do espaço-tempo. Porém, ainda não é possível afirmar com clareza sobre esse aspecto, por conta do horizonte de eventos. (HAWKING, 1988).

Sabe-se que segundo Newton, todos os objetos com massa exercem gravidade, no entanto, quando Einstein surgiu em 1915 com sua teoria da relatividade geral, foi possível concluir que poderiam existir objetos tão massivos capazes de criar um campo gravitacional tão intenso que nem mesmo a luz consiga escapar. E mesmo os fótons de luz que não possuem massa não conseguem sair, nada poderia. Por conta disso, quando se observa uma foto de um buraco negro você não o vê, mas sim, apenas o horizonte de eventos ao seu redor, a linha de demarcação onde a gravidade se tornou tão intensa que nem mesmo a luz pode sair, deixando a impressão visual que não há nada além de escuridão. (RUFFINI; WHEELER, 1971).

4.3 EFEITOS CAUSADOS NO TECIDO DO ESPAÇO-TEMPO

Os buracos negros também afetam um aspecto importante do universo, o próprio tempo. Segundo Einstein, espaço e tempo estão inseparavelmente conectados, a massa distorce o tecido do espaço-tempo (EINSTEIN, 1916). Com o infinito ponto de massa da singularidade especulado pelos cientistas, o espaço-tempo é esticado de tal modo que o horizonte de eventos marca o ponto onde o tempo para, dentro desse horizonte o tempo e o espaço basicamente deixam de existir, um lugar onde não há onde ou quando. Produzindo um fenômeno interessante para um observador externo que observa a massa ultrapassar o limite do horizonte de eventos. Do ponto de vista do mesmo, a medida em que a matéria se aproxima do buraco negro, ela desacelera até pouco antes de parar completamente, o observador nunca verá a matéria cruzar o horizonte de eventos. Ao invés disso, a matéria gradualmente escurecerá até que seja impossível de vê-la. (HAWKING, 2001).

Figura 11 - Representação do tecido do espaço tempo com um ponto de singularidade.



Fonte: Disponível em: <https://astro.ufes.br/primeira-foto-buraco-negro>. Acesso em: 09 mar. 2023.

4.4 COMPROVAÇÃO DA EXISTENCIA DE BURACOS NEGROS

Quando teorizado pela primeira vez, astrônomos e físicos não tinham certeza se os buracos negros existiam de fato, apenas 40 anos depois foi possível observar a evidência de sua existência. Em 1964 utilizando satélites de raio-x recém-desenvolvidos, os cientistas notaram um objeto na constelação do cisne que parecia estar emitindo uma grande quantidade de raio-x. Curiosamente os cientistas não conseguiram ver o objeto em si, surpreendeu porque caso fosse uma estrela deveria obrigatoriamente emitir luz visível, bem como radiação. Já em 1970, a medida que os telescópios avançavam foi possível notar que o que quer que fosse havia formado uma órbita binária com uma estrela em seu sistema e isso ajudou aos cientistas a calcularem a sua massa, e que esse objeto invisível era 15 vezes mais massivo que o sol, como a estrela de nêutrons tem um limite superior de três vezes a massa solar. Os cientistas perceberam que esse era provavelmente o primeiro buraco negro descoberto. Desde então, foram descobertos muitos buracos negros. Os supermassivos parecem existir no centro das galáxias até foi possível tirar fotos de algumas manchas escuras contra um anel rodopiante de matéria que a cerca, um disco de acreção de um buraco negro. É assim que ainda podem ser detectados através de raio-x.

Embora os buracos negros não possam emitir radiação eletromagnética visível, os raios-x vindo deles na verdade se origina de seus discos de acreção, onde a matéria em queda é aquecida a milhões de graus celsius por meio de um imenso atrito. Logo, os buracos negros sem matéria em queda, são basicamente e completamente invisíveis, já que não há um disco de acreção brilhante para ser observado. (HAWKING, 2017).

5 PERSPECTIVAS FUTURAS SOBRE O AVANÇO DOS ESTUDOS ACERCA DE BURACOS NEGROS

Baseando-se nas especulações e no que já é realidade do mundo científico contemporâneo, as perspectivas começam a fugir do que atualmente é possível e começam a adentrar o mundo das ideias. O telescópio James Webb é uma das tecnologias responsáveis por dar continuidade aos estudos após a primeira imagem real de um buraco negro, fato histórico de grande contribuição científica.

As ideias sobre o avanço científico nos estudos dos buracos negros podem adentrar de vez no mundo das especulações, visto que na física tudo é possível até que se prove o contrário. Questionamentos que são pertinentes: O que há dentro de um buraco negro? ; Será que conseguiremos tecnologia suficiente para cruzar o horizonte de eventos? ; Buracos negros podem ser portais para outras dimensões (buracos de minhoca) ? ; Como realmente a singularidade funciona ?

5.1 PERSPECTIVAS CIENTÍFICAS

A história dos buracos negros já passou por diversas fases, a primeira fase foi a da ideia, onde foi utilizado cálculos matemáticos e jogos mentais na tentativa de prever a existência de um objeto tão massivo que nem a luz poderia escapar (MONTGOMERY; ORCHISTON; WHITTINGHAM, 2009), como abordado no capítulo 2. A segunda fase foi a tentativa de mostrar que os cálculos realmente tratavam de algo verídico no nosso universo, com o objetivo de descobrir sua existência. A terceira fase foi a tentativa de simular computacionalmente como seria. A quarta fase e mais marcante até o momento foi a primeira imagem real de um buraco negro.

É possível analisar que em toda história, a transição de fase era vista como algo quase impossível, porém, com o avanço tecnológico e científico, o que era suposição tornou-se realidade, abrindo assim espaço para novas ideias e frases acerca dos buracos negros. De acordo com um relatório da Scientific American, descobertas recentes mostram que, se é possível coletar toda a radiação de um buraco negro à medida que ele evapora, também pode ser possível obter informações que caem nele. Isso "atualizou" os cientistas: se isso pode ser feito com esses objetos, também é possível identificar tudo que já atravessou seu horizonte de eventos.

Os cientistas agora abriram as portas para investigar maneiras de coletar essa radiação e analisá-la antes que ela evapore. As novas descobertas são apontadas pela pesquisa do físico

teórico Almheir, da Universidade da Califórnia, em Santa Cruz, cujo trabalho se concentra em buracos negros e cosmologia quântica. Almheiri *et al.* (2020), afirma:

Embora tenha havido um progresso empolgante, até agora não conseguimos aplicar diretamente o que aprendemos sobre horizontes de buracos negros ao horizonte cosmológico em nosso universo por causa das diferenças entre esses dois tipos de horizontes. (ALMHEIRI *et al.*, 2020, p.7).

Ele também apontou que muitos físicos acham que a melhor maneira de fazer isso é criar uma descrição holográfica, ou seja, usar três dimensões espaciais para encontrar uma maneira de coletar essa radiação (de buracos negros e horizontes cósmicos). Existem duas maneiras de fazer isso. A primeira é usar as ferramentas da teoria das cordas, que trata as partículas fundamentais da natureza como cordas vibrantes, o mesmo para o horizonte de eventos cósmicos. Outra maneira de adivinhar uma descrição holográfica é procurar pistas sobre as propriedades que tal descrição deve ter, (ALMHEIRI *et al.*, 2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os buracos negros despertam a curiosidade em larga escala, desde pessoas inseridas na área científica até pessoas leigas no tema, por se tratar de um tema da atualidade, o meio científico e vários veículos de comunicação abordam o tema. Visando a necessidade de propagar as informações sobre divulgação científica acerca dos buracos negros, esse TCC foi elaborado. Diante de artigos de leitura complexa e matemática rebuscada, criar um material de fácil compreensão sem abordar a matemática foi uma missão intrigante. Por mais que o tema esteja muito em alta no momento, o acervo encontrado e utilizado para desenvolver este trabalho de conclusão de curso em sua maior parte não objetivava a divulgação científica, causando uma problemática na facilitação de desenvolver um estudo sem muitas equações, como foi apresentado nos capítulos anteriores. O estudo foi pensado e elaborado totalmente com carácter de divulgação científica, visto que desperta uma curiosidade e interesse sobre o mesmo.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. R. A pré-história dos buracos negros. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 42, e6201, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/pNWMzvbjGv9cZjd8smp5N9H/>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- ALMHEIRI, Ahmed *et al.* Replica wormholes and the entropy of Hawking radiation. **Journal of High Energy Physics**, v. 2020, n. 5, p. 1-42, 2020.
- BASSALO, José Maria Filardo. Fresnel: o formulador matemático da teoria ondulatória da luz. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 5, n. 2, p. 79-87, 1988.
- BETZ, Michel; LIMA, Ismael de; MUSSATTO, Gabriel. Dualidade onda-partícula: um objeto de aprendizagem baseado no interferômetro de Mach-Zehnder. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 31, n. 3, p. 3501.1-3501.8, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-11172009000300007>
- BEVILÁQUA, Leandro Ibiapina. O teorema de Birkhoff. **Dosity**, 4 dez. 2007. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/o-teorema-de-birkhoff/4738340/>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- EINSTEIN, A. Die Grundlage der allgemeinen relativitäts theorie. **Annalen der Physik**, v. 354, n. 7, p. 769-822, 1916.
- EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY. **Primeira imagem de um buraco negro**. München, Alemanha: European Southern Observatory, 2019. Disponível em: <https://www.eso.org/public/images/eso1907a/>. Acesso em: 2 jun. 2022.
- HAWKING, S. **Buracos negros**: palestras da BBC Reith Lectures. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2017.
- HERDEIRO, C. A. R.; LEMOS, J. P. S. O buraco negro cinquenta anos depois: a gênese do nome. **Gazeta de Física**, v. 41, n. 2, 2018.
- ISRAEL, Werner. Estrelas negras: a evolução de uma ideia. In: HAWKING, Stephen W.; ISRAEL, Werner (ed.). **Trezentos anos de gravitação**. Cambridge: Cambridge University Press, 1987. p. 631-651.
- MATSUURA, Oscar T. A primeira imagem de um buraco negro. **Cadernos de Astronomia**, v. 1, n. 1, p. 52-82, 2020.
- MELCHIOR, Amanda Guerrieri. Solução de Reissner-Nordström. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE FÍSICA, 63., 2018, Foz do Iguaçu. RS. **Anais eletrônicos [...]**. Foz do Iguaçu, RS: SBF, 2018. p. 1-2. Disponível em: <https://sbf1.sbfisica.org.br/eventos/snf/2018/sys/resumos/R0342-1.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2023.
- MONTGOMERY, C.; ORCHISTON, W.; WHITTINGHAM, I. Michell, Laplace e a origem do conceito de buraco negro. **Journal of Astronomy History and Heritage**, v. 12, n. 2, p. 90-96, 2009.

RUFFINI, R.; WHEELER, J. A. Apresentando o buraco negro. **Física Hoje**, v. 62, n. 4, p. 47–53, abr. 2009.

SANTI, N. S. M. de; SANTARELLI, R. Desvendando a radiação Hawking. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 41, e20180209, 2019. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000100203&lng=en&nrm=iso. Acesso em: 2 maio 2022.

SCHWARZSCHILD, Karl. **Beiträge zur photographischen photometrie der gestirne**. Ottakring, Wien: Kuffnerschen Sternwarte, 1899.