



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

**Exploração dos mistérios cósmicos: Investigação sobre  
como os buracos negros são formados**

**Danrlei Severino Rodrigues**

**Gravatá**

**2024**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO**  
**UNIDADE ACADÊMICA DE EDUCAÇÃO A DISTÂNCIA E TECNOLOGIA**  
**CURSO DE LICENCIATURA EM FÍSICA**

## **Exploração dos mistérios cósmicos: Investigação sobre como os buracos negros são formados**

**Danrlei Severino Rodrigues**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Educação a Distância e Tecnologia, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador(a): Domingos Sávio Pereira Salazar

**Gravatá**

**2024**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE  
Bibliotecário(a): Suely Manzi – CRB-4 809

R696e Rodrigues, Danrlei Severino.  
Exploração dos mistérios cósmicos : investigação sobre como os buracos negros são formados / Danrlei Severino Rodrigues. – Recife, 2024.  
43 f.; il.

Orientador(a): Domingos Sávio Pereira Salazar.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Educação a Distância e Tecnologia - UAEADTEC, Licenciatura em Física, Recife, BR-PE, 2024.

Inclui referências, apêndice(s) e anexo(s).

1. Física (Ensino médio). 2. Buracos negros (Astronomia). 3. Astrofísica. 4. Física cósmica 5. Relatividade (Física). I. Salazar, Domingos Sávio Pereira, orient. II. Título

CDD 530

# **Exploração dos mistérios cósmicos: Investigação sobre como os buracos negros são formados**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Licenciatura em Física da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Educação a Distância e Tecnologia, como requisito parcial para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Aprovado em 26 de Agosto de 2024

## **BANCA EXAMINADORA**

Presidente: Domingos Sávio Pereira Salazar. UFRPE

1º Examinador(a): Flávia Portela Santos. UFRPE

2º Examinador(a): Wellington Moreira Da Silva. UFRPE

**Danrlei Severino Rodrigues**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Domingos Sávio Pereira Salazar, cujo apoio e orientação foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Sua dedicação, paciência e sabedoria foram essenciais em cada etapa do meu TCC. Agradeço por compartilhar seu conhecimento e experiência, guiando-me com *insights* valiosos que enriqueceram este estudo.

Além disso, expresso minha gratidão pela confiança depositada em mim e pela disponibilidade constante para esclarecer dúvidas e discutir ideias. Seu comprometimento foi inspirador e motivador ao longo desta jornada acadêmica.

Por fim, reconheço sinceramente a importância de sua contribuição para o meu crescimento pessoal e profissional. Este trabalho não teria sido possível sem o seu suporte generoso e sua mentoria exemplar.

Muito obrigado, Domingos Sávio Pereira Salazar, por sua orientação excepcional e por tornar possível a realização deste trabalho.

# **Exploração dos mistérios cósmicos: Investigação sobre como os buracos negros são formados**

---

*Danrlei Severino Rodrigues*

Autor(a) do Trabalho de Conclusão de Curso  
Licenciatura em Física UAEADTec  
Universidade Federal Rural de Pernambuco/UFRPE  
e-mail do autor danrlei5309rodrigues@gmail.com

*Domingos Sávio Pereira Salazar*

Orientador(a) do Trabalho de Conclusão de Curso  
Licenciatura em Física UAEADTec  
Universidade Federal Rural de Pernambuco/UFRPE  
e-mail do orientador domingos.salazar@ufrpe.br

## **Resumo**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como principal objetivo o desenvolvimento de um material didático destinado a estudantes do ensino médio, que visa introduzi-los ao fascinante e complexo mundo dos buracos negros. Buscando uma abordagem acessível e didática, o trabalho foca nos conceitos fundamentais que envolvem esses fenômenos cósmicos. A ideia central é despertar a curiosidade e proporcionar uma compreensão inicial dos buracos negros, sem recorrer a explicações extremamente técnicas ou detalhadas, que seriam mais adequadas a níveis de estudo avançados, como o ensino superior. Em vez disso, a proposta deste TCC é oferecer uma introdução básica, porém significativa, com uma ênfase em transmitir de forma clara os conceitos essenciais e o impacto desses objetos astronômicos no entendimento atual do universo. Os buracos negros são, sem dúvida, um dos temas mais intrigantes da astrofísica moderna. Eles representam regiões do espaço onde a gravidade é tão intensa que nem mesmo a luz pode escapar, desafiando a compreensão tradicional do espaço-tempo e das leis físicas. Como resultado, têm despertado a imaginação de cientistas, filósofos e do público em geral por décadas. Contudo, sua complexidade frequentemente cria uma barreira ao entendimento para aqueles que estão começando a explorar o campo da física e da astronomia. Nesse contexto, este trabalho se propõe a transpor essa barreira, oferecendo uma base que introduza os alunos aos conceitos-chave, como a formação, classificação e os impactos científicos dos buracos negros. Além disso, para alcançar esse objetivo, a presente pesquisa não se limita a discutir buracos negros em si, mas

também explora os fundamentos teóricos que tornaram sua compreensão possível. Entre os principais pilares está a Teoria da Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein, que forneceu a base matemática e conceitual para a descrição dos buracos negros. Neste trabalho, a relatividade será explicada de maneira simplificada, sem a necessidade de aprofundar-se nos complexos cálculos matemáticos que sustentam a teoria. Em vez disso, o foco será em como essas ideias revolucionaram a forma como entendemos a gravidade e o espaço-tempo, proporcionando uma estrutura acessível para estudantes do ensino médio. O desenvolvimento deste material didático é ancorado em uma cuidadosa seleção e organização dos temas que compõem a compreensão básica dos buracos negros. A ideia é que o conteúdo seja apresentado de forma gradual e sequencial, facilitando o aprendizado e permitindo que os estudantes adquiram uma visão coesa e progressiva sobre o assunto. Outro aspecto importante a ser tratado no material didático é a formação dos buracos negros. Será discutido o processo pelo qual estrelas massivas colapsam sob sua própria gravidade ao final de suas vidas, resultando em buracos negros estelares. Esse fenômeno será explicado de forma acessível, utilizando analogias e exemplos práticos para tornar o processo mais compreensível aos alunos. Também serão apresentadas outras categorias de buracos negros, como os supermassivos, que se encontram no centro de galáxias e desempenham um papel fundamental na formação e evolução dessas estruturas cósmicas. A metodologia deste TCC baseou-se em uma pesquisa em algumas fontes, incluindo livros, artigos científicos, e conteúdos digitais de confiança. A seleção do material foi feita com o objetivo de garantir que as informações fossem adequadas ao público-alvo. A linguagem técnica foi cuidadosamente adaptada para um nível mais acessível, levando em conta a capacidade de compreensão de estudantes do ensino médio. Foram utilizados exemplos cotidianos e analogias visuais para facilitar a internalização dos conceitos. Além disso, a organização do conteúdo seguiu uma lógica que respeita o ritmo de aprendizado dos alunos, permitindo que eles desenvolvam uma compreensão gradual e consistente dos temas abordados. A investigação sobre os buracos negros tem proporcionado contribuições significativas para a física teórica e para o entendimento mais amplo do universo. Estes objetos extremos não são apenas curiosidades cósmicas; eles desempenham um papel essencial na formação de galáxias, na dinâmica do espaço-tempo e no estudo das leis fundamentais da física. A própria existência dos buracos negros coloca desafios teóricos fascinantes, especialmente no que se refere à unificação das teorias da gravidade, como a relatividade geral, e da mecânica quântica. Ao introduzir os estudantes ao estudo dos buracos negros, abre-se um caminho para discussões sobre conceitos

mais amplos, como a natureza do tempo, a estrutura do universo e os limites do conhecimento humano. A importância de oferecer uma base introdutória a esses tópicos está no fato de que eles são capazes de inspirar os alunos a explorar questões profundas e complexas, incentivando o pensamento crítico e a curiosidade científica. Dessa forma, este trabalho não se propõe apenas a transmitir conhecimento, mas também a cultivar o desejo por exploração e descoberta.

## **2 Introdução**

Os buracos negros são um dos fenômenos mais fascinantes e enigmáticos do universo. Sua existência desafia nossa compreensão convencional da física e nos leva a explorar as profundezas do espaço-tempo. Para começarmos a explorar esse tema intrigante, é necessário familiarizar-se às teorias da relatividade de Albert Einstein. A teoria da relatividade restrita e a teoria da relatividade geral são fundamentais para a compreensão dos buracos negros. Através dessas teorias, podemos vislumbrar como a gravidade extrema pode deformar o espaço-tempo de maneira extraordinária, criando regiões onde a atração gravitacional se torna tão intensa que nada, nem mesmo a luz, consegue escapar.

Iremos abordar de forma simples e objetiva como os buracos negros são formados, levando em consideração o entendimento do tema por alunos do ensino médio. Explicaremos como Einstein chegou aos seus resultados e também a importância de outros cientistas nesse interessante tema.

O objetivo deste trabalho de conclusão de curso (TCC) é construir um material didático para proporcionar buscando desenvolver o interesse e a compreensão dos conceitos relacionados a esses fenômenos cósmicos. Além disso, o material desenvolvido irá fornecer uma visão geral das características dos buracos negros, como a sua formação, utilizando uma linguagem acessível para estudantes do ensino médio. Espera-se que, com este recurso didático, os estudantes se sintam motivados a buscar mais conhecimentos sobre o assunto e a explorar a fascinante área da física.

Explorar as teorias da relatividade restrita e geral de Albert Einstein, destacando como essas teorias fundamentais da física são aplicadas para compreender os buracos negros. Apresentar uma definição básica de buracos negros. Abordar os diferentes tipos de buracos negros, como buracos negros estelares e supermassivos, explorando suas diferenças de tamanho e origens.

## **2 Metodologia**

Para o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) sobre buracos negros, teorias da relatividade, formação de estrelas e áreas correlatas, adotaremos uma abordagem sistemática e acessível para alunos do ensino médio.

Inicialmente, fiz uma pesquisa ampla em livros, artigos científicos e fontes confiáveis *online* para entender os principais conceitos. Isso inclui estudar as teorias de Albert Einstein, que são fundamentais para nossa compreensão moderna da gravidade e do espaço-tempo.

Nosso foco é na formação de buracos negros, explicando como estrelas supermassivas colapsam sob sua própria gravidade para formar objetos extremamente densos. Discutiremos as propriedades físicas desses buracos negros, como o horizonte de eventos, que impede a fuga de luz e matéria.

## **3 Fundamentação teórica**

### **3.1 Teoria da relatividade especial ou restrita**

De acordo com Isaac Newton, os resultados de um experimento deveriam ser os mesmos para todos os observadores em referenciais inerciais, independentemente de estarem parados ou em movimento retilíneo uniforme. Em outras palavras, se uma pessoa estivesse em um referencial inercial, porém em movimento retilíneo uniforme, esse observador teria que obter os mesmos resultados em comparação a um observador que está em um referencial totalmente parado. Portanto, tanto o tempo quanto o espaço seriam os mesmos para observadores que observam um mesmo fenômeno. Assim, ambos teriam os mesmos resultados dessa observação. De acordo com Newton, o tempo era absoluto, e o universo possuía um relógio universal. Um exemplo seria se, na Terra, um relógio marcasse um intervalo de 12:00 (horas), esse intervalo seria válido para qualquer outro ponto do espaço sideral, assim como para nossos planetas vizinhos: Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Netuno, entre outros. (BRENNON, RICHARD 2008).

Einstein nos mostrou que as ideias de Newton não estavam corretas. Ele utilizou o conceito de eventos simultâneos para ilustrar essa diferença. No universo de Newton, dois eventos podem ocorrer simultaneamente, pois o tempo era considerado absoluto e marcado por um relógio universal.

No entanto, Einstein observou que a luz leva tempo para se propagar de um lugar para outro. Imagine dois raios atingindo um ponto específico, por exemplo, uma rodovia. Para um observador parado na rodovia, os dois raios atingirão o mesmo ponto ao mesmo tempo.

Porém, para um observador dentro de um ônibus em movimento, essa percepção seria diferente. Se o ônibus estivesse se aproximando de um dos raios e se afastando do outro, o observador dentro do ônibus veria os raios atingindo o ponto em momentos distintos: ele veria um raio que está se aproximando dele cair primeiro para depois ver o raio que está se afastando dele cair depois. Isso ocorre porque a distância entre o ônibus e cada raio está mudando constantemente, fazendo com que a luz de um raio leve mais tempo para alcançar o observador do que a luz do outro raio. (BRENNON, RICHARD 2008).

Essa diferença na percepção do tempo entre observadores em movimento relativo é um dos pilares da teoria da relatividade especial de Einstein, que sugere que o tempo não é absoluto, mas sim relativo e depende do referencial do observador.



Figura 1 - Ilustração eventos simultâneos .

Fonte: imagem gerada pelo autor com inteligência artificial (2024).

A ilustração apresenta uma situação clássica em física: a relatividade dos eventos. Temos dois observadores: um homem com uma maleta, em repouso em relação ao solo, e um passageiro dentro de um ônibus em movimento. Ambos observam raios atingindo dois pontos diferentes no solo.

Para o homem com a maleta, que está em um referencial inercial (parado em relação ao solo), os dois raios atingem o solo simultaneamente. Justificativa: Neste referencial, a luz se propaga com a mesma velocidade em todas as direções, fazendo com que os raios percorram distâncias iguais em tempos iguais.

No entanto, para o passageiro dentro do ônibus, a situação é diferente. Devido ao movimento do ônibus, ele perceberá que o raio que atinge um ponto à frente do ônibus chega primeiro do que o raio que atinge um ponto mais distante. Justificativa: A luz, embora tenha velocidade constante em qualquer referencial inercial, pode parecer ter velocidades diferentes para observadores em movimento relativo. Isso ocorre devido à contração do espaço e dilatação do tempo, conceitos fundamentais da teoria da relatividade restrita.

Em resumo, a simultaneidade de eventos não é absoluta, mas depende do referencial em que são observados. Este fenômeno, explorado pela teoria da relatividade de Einstein, desafia nossa intuição e nos mostra que o tempo e o espaço são mais complexos do que imaginávamos.

Isso quer dizer que, em um determinado referencial, os dois raios cairiam ao mesmo tempo. Porém, para outro observador em um referencial diferente, os raios cairiam em momentos distintos. Mas quem estaria certo? Einstein disse que ambos estariam certos, pois não existe um tempo absoluto. (BRENNAN,RICHARD 2008)

As observações dos fenômenos eletromagnéticos podiam ser diferentes para observadores que estavam se movendo próximo à velocidade da luz. Quando os observadores mostravam seus resultados, não eram iguais e havia divergências entre eles. Por exemplo, um observador estava observando um campo elétrico e outro o campo magnético.

Se você segurar uma carga elétrica na mão e começar a andar, você perceberá um efeito adicional devido à sua velocidade. Isso ocorre porque uma carga em movimento cria um campo magnético ao seu redor.

Do seu ponto de vista, você verá que a carga elétrica na sua mão cria um campo elétrico. Você observará a interação entre esse campo, notando as linhas de campo elétrico se estendendo a partir da carga em movimento.

Por outro lado, seu amigo que está parado em relação a você verá tanto o campo elétrico como também o magnético que você está segurando. Do ponto de vista do seu amigo, ele perceberá as linhas de campo elétrico se estendendo a partir da carga, e verá as linhas de campo magnético, pois está parado em relação à carga em movimento.

Em resumo, você verá o campo elétrico devido ao seu movimento, enquanto seu amigo que está parado verá tanto o campo elétrico quanto o campo magnético. Essas diferenças de percepção ocorrem devido ao efeito do movimento relativo sobre a interação entre cargas elétricas e campos magnéticos.

Além disso, a teoria da relatividade restrita de Einstein tem consequências surpreendentes que desafiam nossa intuição, mas podem ser compreendidas. Uma delas é a dilatação do tempo.

Essas explicações são muito úteis para ilustrar a transformação de Lorentz. Imagine dois observadores em referenciais distintos: um está dentro de um vagão de trem em movimento e o outro está parado do lado de fora. Ambos observam o mesmo feixe de luz.

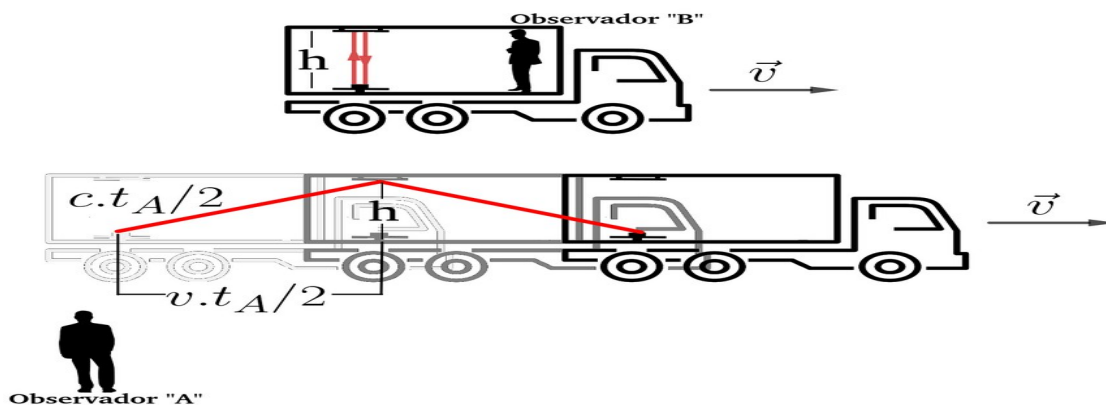


Figura 2 - Na figura temos a representação da transformação de Lorentz.

Fonte: Web física (2020).

Para o observador dentro do vagão, o feixe de luz segue uma trajetória reta, indo para cima e para baixo, já que ele vê a luz se movendo verticalmente. No entanto, o observador que

está fora do trem verá algo diferente. Como o trem está em movimento, a trajetória do feixe de luz parecerá triangular para ele, pois além do movimento vertical da luz, há também o deslocamento horizontal do trem.

Esse resultado é fascinante porque, para o observador externo, a luz leva mais tempo para percorrer a trajetória observada dentro do trem. Quando um objeto se move em relação a um observador em repouso, o tempo parece passar mais devagar para o objeto em movimento. Isso significa que os relógios em movimento parecem avançar mais lentamente do que os relógios em repouso. Essa dilatação do tempo é um efeito real e foi confirmada por inúmeros experimentos.

Um desses experimentos foi realizado em 1971, utilizando relógios atômicos, que são extremamente precisos. Para o experimento, foram usados três desses relógios, todos previamente sincronizados. Após a sincronização, um relógio permaneceu nos EUA, em Washington, como relógio de referência, enquanto os outros dois foram embarcados em aviões a jato. Esses aviões dariam a volta ao mundo, um voando em direção ao leste e o outro em direção ao oeste. No início e no final do experimento, os relógios foram comparados com o relógio de referência.

No final, os relógios não coincidiam com o tempo do relógio de referência. O relógio que foi para o leste teve um atraso de 59 nanossegundos (bilionésimos de segundo) em relação ao relógio de referência, enquanto o relógio que foi para o oeste ganhou 273 nanossegundos. (BRENNAN, RICHARD 2008)

Esse experimento é uma comprovação prática da dilatação do tempo prevista pela Teoria da Relatividade.

Outro exemplo bem interessante é o paradoxo dos dois irmãos gêmeos. Dois irmãos gêmeos nascidos na Terra, ambos com a mesma idade de 20 anos. Um deles foi convidado para viajar para outro planeta em uma espaçonave que atingirá uma velocidade próxima à da luz, enquanto o outro ficará aqui na Terra. O irmão que viajará gastará um total de 10 anos — 5 para ir até o planeta e 5 para voltar para a Terra. Porém, quando o irmão viajante retorna e se encontra com o irmão que ficou, ele percebe que sua aparência é mais jovial em relação ao irmão que permaneceu na Terra. E não é apenas a aparência: de fato, o irmão que ficou na Terra terá 30 anos, enquanto ele terá 24. Este paradoxo é resolvido com o uso da teoria da relatividade geral, visto que o gêmeo que viajou na nave precisou acelerar e desacelerar, o que o torna diferente do gêmeo que ficou no planeta Terra.



Fonte: Wade Elton (2018).

Outra consequência é a contração do espaço na direção do movimento. Isso significa que um objeto em movimento é encurtado na direção do seu movimento, quando observado por um observador em repouso. No entanto, para o objeto em movimento, seu próprio comprimento não é alterado.

Essas mudanças no tempo e no espaço são descritas pelo fator de Lorentz, uma equação fundamental na teoria da relatividade restrita. O fator de Lorentz descreve como as grandezas físicas, como o tempo e o espaço, se transformam entre observadores em movimento relativo (GREENE, 2004).

A teoria da relatividade restrita, também conhecida como teoria da relatividade especial, foi publicada pelo físico alemão Albert Einstein em 1905, em um artigo intitulado "Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento". Esta teoria postula a invariabilidade da velocidade da luz no vácuo e também a inexistência de um referencial inercial absoluto. A teoria possui dois postulados fundamentais. (TODA MATÉRIA, 2020)

1. O princípio da relatividade: todas as leis da Física são as mesmas em qualquer referencial inercial.

2. A constância da velocidade da luz: no vácuo, a velocidade da luz tem o mesmo valor para todos os observadores inerciais, independentemente da velocidade do observador ou da fonte emissora.

Esses dois postulados são a base da teoria da relatividade especial, que descreve o comportamento de observadores que se movem a velocidades constantes. O primeiro postulado afirma que todas as leis da Física – envolvendo mecânica, eletricidade,

magnetismo, óptica, e outros – são idênticas para todos os referenciais inerciais. Isso significa que, do ponto de vista experimental, qualquer experimento feito em repouso ou em movimento a uma velocidade constante produzirá os mesmos resultados, seguindo as mesmas leis da Física. Não existe um referencial inercial preferencial, tornando impossível detectar o movimento absoluto.

O segundo postulado, a constância da velocidade da luz, garante a validade do primeiro. Se a velocidade da luz fosse diferente entre referenciais inerciais, seria possível distinguir entre eles e identificar um referencial absoluto, o que contradiz o princípio da relatividade. Além disso, esse postulado elimina a necessidade de um meio como o éter, afirmando que a luz sempre viaja à mesma velocidade,  $c$ , em relação a qualquer observador inercial. (RAYMOND A, SERWAY JOHN W, JEWETT, JR. 2015)

A possibilidade de estabelecer um único parâmetro de tempo para referenciais que estão em movimento relativo é limitada. Um referencial pode ser visualizado como eixos cartesianos infinitos, representando régua rígidas, onde cada ponto é associado a um observador com um relógio. Devido ao fato de que as informações se propagam a uma velocidade finita, esses observadores precisam adotar um procedimento operacional para sincronizar seus relógios. Esse procedimento garante que todos os observadores em repouso relativo compartilhem a mesma escala de tempo, formando assim um sistema de referência comum. A diferença entre os referenciais surge da velocidade relativa entre eles (LEONARDI, ÁLVARO AYALA FILHO 2010).

## **5.2 Teoria da Relatividade Geral**

A partir da teoria da relatividade restrita, Einstein desenvolveu a teoria da relatividade geral. Ao contrário da relatividade restrita, que só funciona para referenciais inerciais, a teoria da relatividade geral passa a considerar referenciais não inerciais, ou seja, referenciais acelerados. (GOUVEIA, 2023)

Digamos que você está sentado dentro de um ônibus e ele acelera e você sente essa aceleração. O ônibus vai mudando constantemente de aceleração. Nessa situação, a pessoa que está dentro do ônibus está em um referencial não inercial, ou seja, está em um movimento retilíneo uniformemente variado. (STEINER 2010)

Einstein teve a ideia de juntar as três dimensões espaciais mais o tempo com uma só. Fazendo essa junção, ele imaginou que o espaço seria um tipo de tecido em que era deformado quando corpos celestes massivos estão sobre ele. Ele percebeu que esses corpos celestes deformavam esse tecido fazendo uma curvatura.

Essa curvatura cria o que chamamos de força gravitacional e como essa curvatura impulsiona as coisas tanto que essa curvatura aumenta conforme a massa de um corpo celeste é maior. Um bom exemplo é a aceleração da gravidade da Terra que é de  $9,8 \text{ m/s}^2$ . Se compararmos essa aceleração com planetas maiores do nosso próprio sistema solar como Júpiter, que é de  $22,9 \text{ m/s}^2$ , você irá notar que Júpiter terá uma força gravitacional mais intensa. Isso se dá porque Júpiter tem uma massa maior que a Terra e distorce o espaço-tempo fazendo uma curvatura, digamos, mais profunda.

Para você entender melhor, Einstein, enquanto trabalhava no escritório de patentes na Suíça, imaginou que uma pessoa em queda livre, ou seja, caindo, não sentiria seu peso. Um exemplo disso é quando astronautas entram na atmosfera da Terra com a gravidade agindo sobre eles; eles não sentem seu peso. Na verdade, os astronautas estão pesando o que sempre pesaram. Os astronautas dentro da nave flutuam porque não estão caindo em relação à nave espacial. Porém, se a nave ligar os motores e começar a fazer uma trajetória para cima, os astronautas conseguiriam sentir seu peso normalmente. Tanto que, se um astronauta pegar um objeto e soltá-lo, ele cairá. Isso ocorre porque o objeto está sendo deixado para trás.

Einstein fez uma comparação entre essa nave em aceleração e outra que estava na superfície da Terra em repouso. O resultado foi que as coisas funcionariam da mesma forma

Einstein imaginou um elevador sendo puxado para cima e no cenário havia dois observadores, um externo e outro interno. Agora imagine um furo na lateral do elevador, e um feixe de luz cruzando o elevador de um lado ao outro. Para o observador externo, a luz seguiria em linha reta, enquanto para o observador interno, ele veria a luz se curvar levemente. Isso ocorre porque o elevador está sendo puxado para cima, fazendo com que a luz fique para trás, assim como o objeto na nave no exemplo anterior. Com isso, Einstein concluiu que o espaço-tempo é curvo.(BRENNAN, RICHARD 2008).

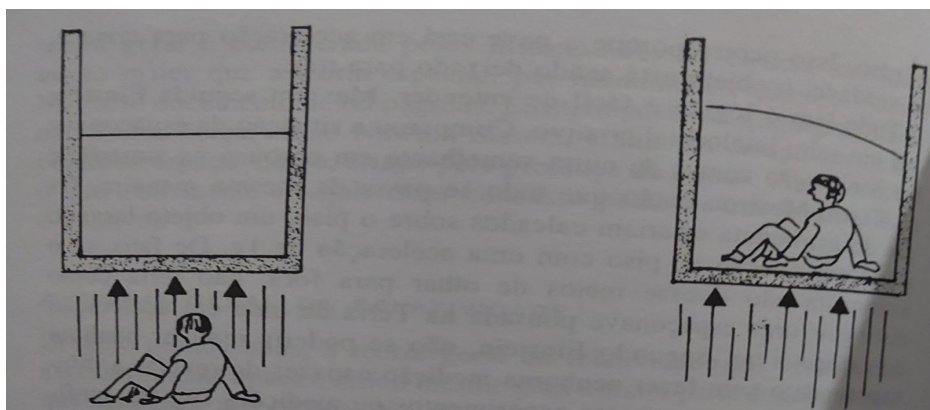


Figura 4: Esta figura ilustra o que Einstein imaginou.

Fonte: Brennan Richard 2008

Neste exemplo, temos dois observadores: o da esquerda está fora do elevador e vê a percorrer uma linha reta Já o da direita, que está dentro do elevador vê o feixe de luz se curvar devido à aceleração do elevador

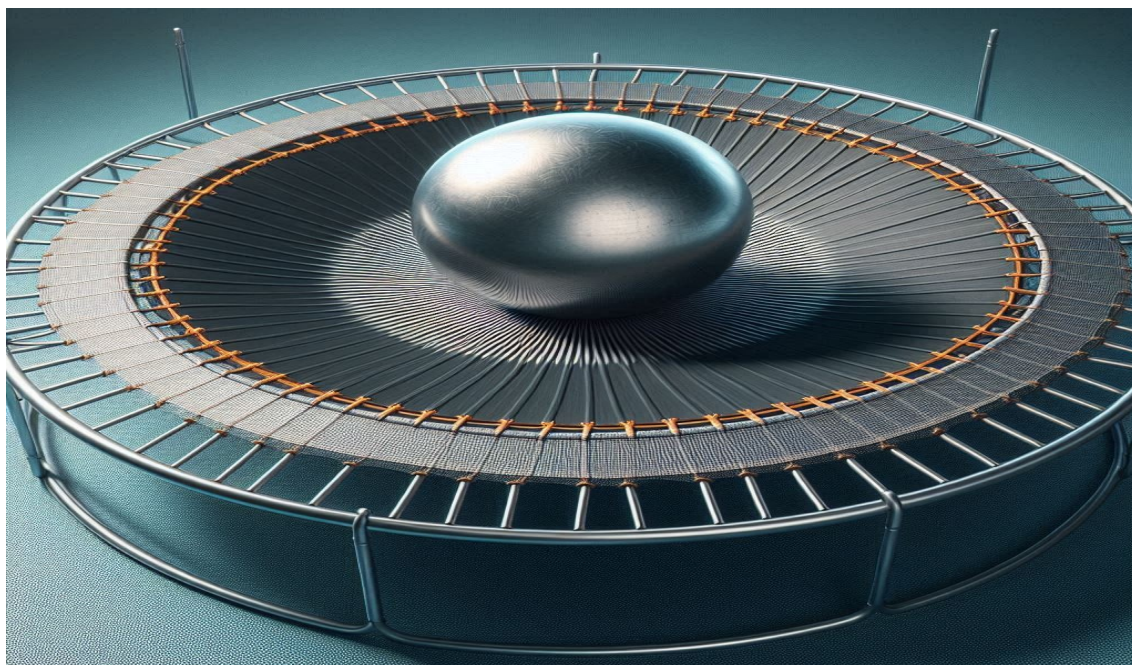


Figura 5: Na figura temos uma representação do que acontece no espaço sideral.

Fonte: imagem gerado pelo autor por inteligência artificial 2024.

Para facilitar o entendimento, vamos usar a analogia com uma cama elástica. Se colocarmos uma esfera de aço no meio da cama elástica, veremos que a esfera cria uma deformação na cama elástica. Essa deformação é causada pela massa da esfera. Se pegarmos uma bola de gude ou uma de pingue-pongue e a soltarmos, ela seguirá a curvatura criada pela esfera de aço na cama elástica.

Isso é semelhante ao que acontece no nosso sistema solar. O Sol seria a esfera de aço, a cama elástica representaria o espaço, que é curvado devido à massa do Sol, e as bolinhas seriam os planetas, que seguem a curvatura que o Sol fez no espaço.

Na teoria da relatividade geral, a gravidade não é mais vista como uma força que age à distância, como na gravitação newtoniana. Em vez disso, a presença de massa e energia curva o espaço-tempo ao seu redor. Os corpos em movimento seguem trajetórias curvas nesse espaço-tempo curvado, o que interpretamos como a força gravitacional.

Na gravitação de Newton, apenas a massa influencia o campo gravitacional. No entanto, na relatividade geral, tanto a massa quanto a energia (incluindo a energia cinética e a energia associada a campos e radiação) contribuem para a curvatura do espaço-tempo.

Enquanto a gravitação newtoniana se concentra na interação entre massas pontuais, a teoria da relatividade geral leva em conta a curvatura do espaço-tempo tridimensional em si. Isso significa que a presença de massa e energia não apenas afeta outros objetos, mas também altera a própria geometria do espaço-tempo, causando efeitos como a dilatação do tempo em campos gravitacionais intensos.

Esses conceitos são centrais para a compreensão da relatividade geral, que descreve como a gravidade surge da curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia. (ALMEIDA, 2017)

Um exemplo interessante é como um planeta orbita uma estrela. No conceito de gravitação newtoniana, essa órbita ocorre devido à força gravitacional que a estrela exerce sobre o planeta, fazendo com que ele se mova em uma trajetória elíptica.

Na relatividade geral, a estrela curva o espaço-tempo ao seu redor, criando um "poço" gravitacional. O planeta, ao se mover nesse espaço-tempo curvado, segue uma trajetória que corresponde à órbita observada. A força gravitacional é reinterpretada como a resposta do planeta à curvatura do espaço-tempo criada pela estrela. (ALMEIDA, 2017)

Essa mudança de perspectiva é crucial para entender a teoria da relatividade geral, que descreve como a presença de massa e energia distorce o espaço-tempo e afeta o movimento dos corpos celestes.

Essa teoria explica um novo conceito chamado buraco negro, uma região do espaço-tempo em que a curvatura é tão intensa que nada pode escapar, nem mesmo a luz.

### **5.3 Comprovação da Relatividade Geral**

Em 29 de maio de 1919, Sir Arthur Eddington liderou uma expedição para observar um eclipse solar, a fim de verificar se a luz das estrelas próximas ao Sol seria desviada pela curvatura do espaço-tempo, conforme previsto por Einstein. As observações feitas em Sobral, no Ceará, e na Ilha do Príncipe confirmaram o desvio, comprovando a Relatividade Geral.

Esses resultados revolucionaram nossa compreensão da gravidade e consolidaram a Teoria da Relatividade Geral como uma das principais teorias da física moderna.

No dia 29 de maio de 1919, o céu amanheceu nublado em Sobral, uma cidade no interior do Ceará, a cerca de 240 km de Fortaleza. Se o Sol permanecesse encoberto, todo o esforço da equipe de astrônomos teria sido em vão, pois perderiam o eclipse total e a oportunidade de testar as ideias revolucionárias de Albert Einstein.

Por sorte, pouco antes das 9 horas, uma brecha entre as nuvens permitiu que o disco solar fosse visível no exato momento em que a Lua o cobriu. O fenômeno foi acompanhado por muitas pessoas na praça central de Sobral, em frente ao *Jockey Clube* e à Paróquia do Patrocínio. As reações variaram bastante.

Alguns moradores, assustados, correram para a igreja com medo de que fosse o fim dos tempos; os galos, confusos, cantaram como se fosse noite. Enquanto isso, os cientistas estavam concentrados, tentando obter o máximo de dados com seus instrumentos de precisão, montados em um espaço que combinava observatório e laboratório improvisado no meio da cidade. Os brasileiros focaram-se no estudo da coroa solar, enquanto os britânicos tiravam muitas fotos.

Cinco minutos e treze segundos depois, o Sol voltou a brilhar sobre Sobral. Embora o eclipse em si não tivesse nada de extraordinário, ele ficou eternizado como um dos mais importantes na história da ciência. Aquele evento marcou o fim da visão de mundo

mecanicista de Isaac Newton como a melhor explicação do Universo, e o início da aceitação das ousadas ideias da relatividade geral de Einstein. (OLIVEIRA,RODRIGO 2016).

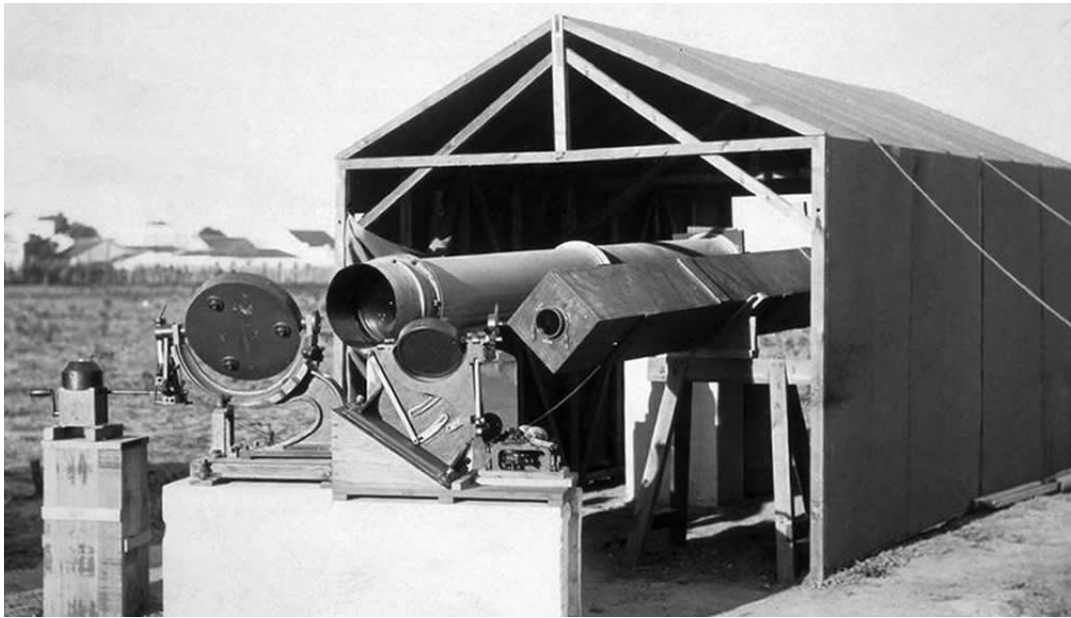


Fonte: Observatório Nacional 2016.

A partir daquele momento, o século 20 nunca mais foi o mesmo. Como destacou o britânico Richard Dunn, pesquisador da Universidade de Leicester e curador do Observatório de Greenwich, "foi um momento de mudança revolucionária, demonstrando que o modelo newtoniano do universo não era, na verdade, o correto." E foi essa expedição a Sobral que se tornou um teste crucial. Assim, a pequena cidade cearense ganhou fama internacional por ser o palco da comprovação da teoria da relatividade geral.

Um século depois, quase ninguém questiona a teoria da relatividade geral. Mas, na época, o modelo proposto por Einstein ainda era visto com bastante desconfiança pela comunidade científica, pois faltava uma prova concreta. Publicada em 1916, a teoria levou oito anos para ser finalizada. Foi o tempo que Einstein precisou para expandir os postulados da relatividade especial de 1905 e incluir a gravidade.

Segundo a teoria, espaço e tempo formam um único tecido, um contínuo flexível que se deforma na presença de corpos de grande massa, como buracos negros, aglomerados de galáxias ou até o Sol. Nem mesmo a luz escapa dessas distorções, e os fótons têm suas trajetórias desviadas ao passarem por regiões onde o espaço-tempo está curvado.



Fonte: Observatório nacional 2016.

Os eclipses solares totais eram perfeitos para testar essa previsão de Einstein. Com a Lua bloqueando temporariamente o brilho intenso do Sol, era possível observar e fotografar estrelas próximas a ele no céu. Essas estrelas, normalmente invisíveis por conta da luz solar, tinham seus raios atravessando o espaço-tempo distorcido pelo campo gravitacional do Sol. O desvio resultante podia ser medido.

A chave estava em fotografar essas estrelas durante o eclipse e compará-las com novas fotos tiradas mais tarde, quando o Sol não estivesse mais na mesma região do céu. E foi exatamente isso que a equipe britânica fez em Sobral. "Eles estavam procurando por variações tão pequenas quanto a espessura de um fio de cabelo", explicou Richard Dunn. Para isso, era preciso uma estabilidade extrema nos instrumentos, a fim de garantir a precisão dos resultados.

O segundo conjunto de fotos foi tirado em julho daquele ano, para comparação com as imagens de maio. De acordo com a teoria de Einstein, a diferença angular entre as duas deveria ser de 1,75 segundos de arco, enquanto a previsão de Newton era de apenas 0,86. Um segundo de arco corresponde ao tamanho de uma estrela vista a olho nu. "Eles passaram meses analisando as placas e realizando centenas de cálculos baseados nas fotos", disse *Dunn*.

Então, em novembro de 1919, o mundo inteiro aguardava ansiosamente o anúncio em Londres: Einstein estava certo.

Nos anos anteriores a Sobral, cientistas de diversos países organizaram expedições para observar eclipses solares em várias partes do mundo. Todas falharam. Uma dessas tentativas, em 1912, ocorreu no Brasil, na cidade de Passa Quatro, em Minas Gerais. Além dos brasileiros, representantes da Inglaterra, França, Argentina e Chile também estavam presentes, e até o então presidente Hermes da Fonseca marcou presença. Mas a chuva frustrou os planos. (OLIVEIRA, RODRIGO 2016).



Figura 8 - Nesta imagem temos a equipe de cientistas .

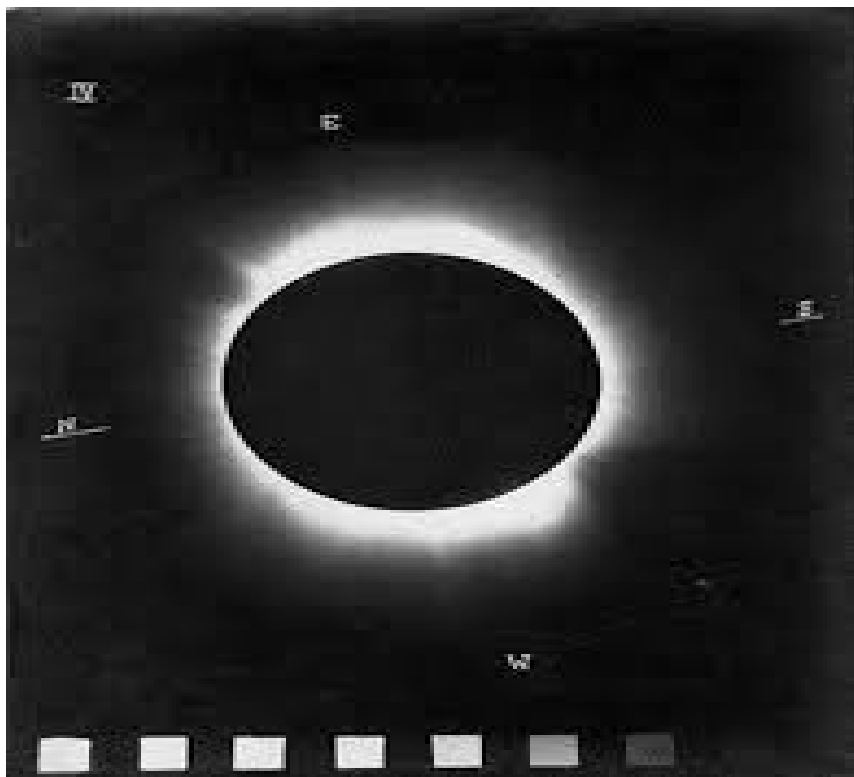
Fonte: observatório nacional 2016.

astrofísica Patrícia Spinelli, do MAST, acredita que as coisas aconteceram no momento certo. "Se Passa Quatro tivesse sido o eclipse da comprovação, talvez não tivesse tido a repercussão que Sobral deu a Einstein", comenta ela. Em 1912, boa parte da teoria da relatividade geral ainda estava sendo desenvolvida. "Quando os céus se abriram em 1919, a teoria já estava completa e pronta para ser comprovada."

O principal obstáculo para as expedições anteriores não foi apenas o clima, mas a guerra. A Primeira Guerra Mundial, que começou em 1914, impediu o deslocamento de cientistas pelo mundo. Após o armistício de novembro de 1918, que encerrou as batalhas, foi

só em junho do ano seguinte que a guerra terminou oficialmente, com o Tratado de Versalhes. Quando o eclipse de Sobral aconteceu, o mundo ainda estava, tecnicamente, em guerra.

Muitos britânicos se opunham à ideia de financiar expedições para comprovar as teorias de um cientista alemão. Mas não o astrônomo Arthur Eddington. "Ele acreditava no internacionalismo e no pacifismo, e viu essa expedição como uma chance de curar um mundo dividido através da ciência", explicou Dunn. Assim como a relatividade geral, esses ideais continuam atuais. (OLIVEIRA, RODRIGO ).



Fonte: Observatório nacional 2016.

#### 5.4 Buracos Negros

Buracos negros são objetos extremamente densos com um campo gravitacional tão intenso que conseguem distorcer o espaço-tempo ao seu redor, criando uma região de onde nada pode escapar. O nome "buraco negro" reflete suas principais características: "buraco" porque eles curvam o espaço-tempo de forma que partículas podem entrar, mas não sair, e

"negro" porque nem mesmo a luz consegue escapar dessa região, o que os torna invisíveis contra o fundo escuro do universo. A borda dessa região é chamada de horizonte de eventos, uma espécie de limite a partir do qual nada pode retornar, mas sua presença pode ser percebida pela forte influência gravitacional que exerce sobre o que está ao redor. (FELIPE S. BRUNO, OLIVEIRA, JERFERSON 2024)

Os buracos negros são uma consequência direta da teoria da relatividade geral de Einstein. Eles são regiões do espaço-tempo em que a gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar. Isso ocorre quando uma quantidade significativa de massa é comprimida em um espaço extremamente pequeno, criando uma singularidade de densidade infinita no centro, onde as leis da física conhecidas deixam de ser aplicáveis.

Em 1916, o físico e astrônomo alemão Karl Schwarzschild obteve a primeira solução exata para as equações da Relatividade Geral, enquanto servia no exército alemão durante a Primeira Guerra Mundial. Essa solução descreve a curvatura do espaço-tempo gerada por objetos esféricos e estáticos, sendo uma boa aproximação para a gravidade ao redor da Terra e do Sol. Além disso, sua descoberta possibilitou a confirmação da teoria da Relatividade Geral por meio de um experimento que mediu o desvio da luz de estrelas causado pela curvatura do espaço-tempo ao redor do Sol. Esse experimento foi realizado no Brasil, em 1919, na cidade de Sobral, no Ceará.

A solução de Schwarzschild revelou a existência de objetos peculiares, formados unicamente de espaço-tempo e energia, que mais tarde foram chamados de buracos negros. No entanto, essa solução não explicava como esses objetos poderiam se formar. Apenas em 1939, com os trabalhos dos físicos americanos Julius Robert Oppenheimer e Hartland Sweet Snyder, foi possível compreender como os buracos negros poderiam surgir. Eles demonstraram que, se um objeto esférico e massivo se contraísse até alcançar um raio crítico, conhecido como raio de Schwarzschild, ele passaria por um colapso inevitável em direção ao seu centro. Assim, os buracos negros passaram a ser interpretados como o estágio final da evolução de estrelas massivas, que, ao envelhecerem e se tornarem ricas em elementos mais estáveis, não conseguem gerar energia suficiente para equilibrar a força gravitacional de sua própria massa. Se a massa inicial da estrela for grande o suficiente, ela se contrairá até o raio crítico e, conseqüentemente, colapsará em seu centro, formando um buraco negro. (SAA ALBERTO 2016).

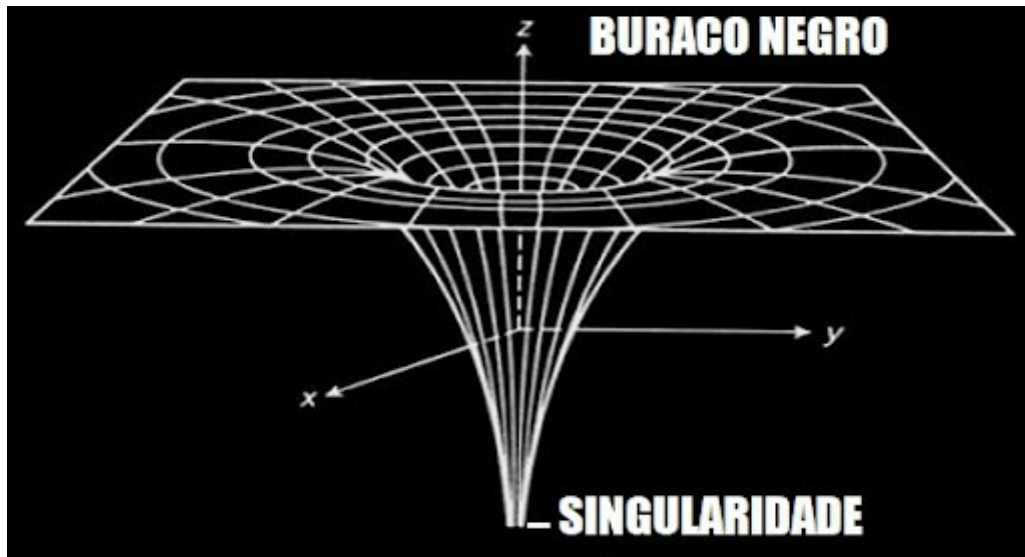


Figura 10. Modelo de um buraco negro. Fonte: <https://www.arte.br/arte-na-rede>, acesso em 10/05/2019.

Fonte: Arte na rede 2019.

Um buraco negro é definido por seu horizonte de eventos, a fronteira além da qual nada pode escapar de sua atração gravitacional. O horizonte de eventos marca a região onde a velocidade de escape é igual à velocidade da luz. Para objetos além do horizonte de eventos, a força gravitacional é tão forte que nem mesmo a luz pode escapar, tornando o buraco negro invisível para observadores externos.

O Raio de Schwarzschild é uma medida crítica em torno de um buraco negro que define o horizonte de eventos. É dado pela fórmula:

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

onde  $G$  é a constante gravitacional,  $M$  é a massa do objeto, e  $c$  é a velocidade da luz. Esse raio determina a região de onde nada pode escapar da atração gravitacional do buraco negro. Dentro do horizonte de eventos, a curvatura do espaço-tempo é tão extrema que todas as trajetórias levam à singularidade central.

Os buracos negros podem se formar através do colapso gravitacional de estrelas massivas no final de seu ciclo de vida. Quando o núcleo de uma estrela exaure seu combustível nuclear, ele pode colapsar sob sua própria gravidade, resultando em uma singularidade cercada por um horizonte de eventos.

No centro de um buraco negro está a singularidade, um ponto de densidade infinita onde as leis da física como as conhecemos não se aplicam. A proximidade de um buraco

negro causa efeitos gravitacionais extremos, como a dilatação do tempo, onde o tempo passa mais lentamente perto do horizonte de eventos em comparação com regiões mais distantes.

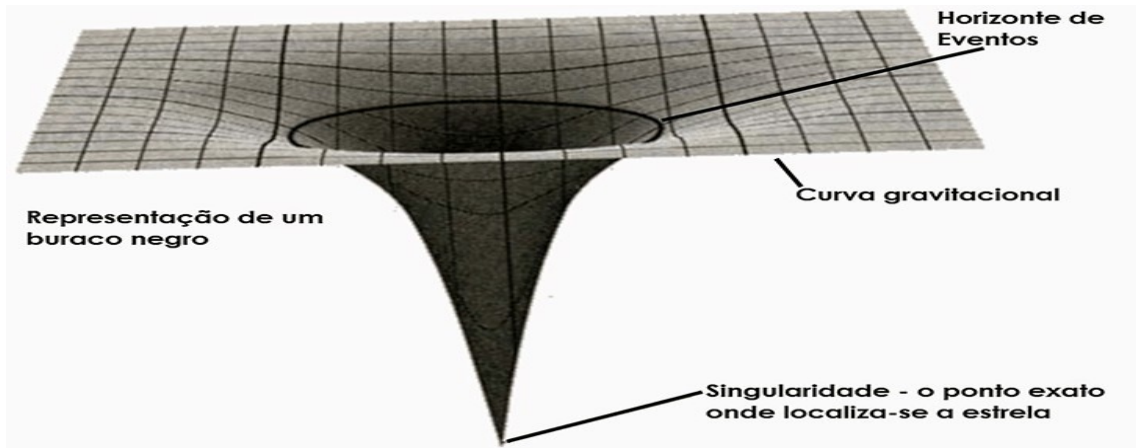


Figura 11- Na figura, temos destacadas as partes de um buraco negro.

Fonte: Research gate s.d

## 6. Formação dos Buracos Negros Estelares

O ciclo de vida de uma estrela é uma experiência incrível que dura milhões, se não bilhões de anos. A vida estelar tem regras próprias, começando nas nebulosas cósmicas, onde a gravidade esculpe a matéria em estrelas de vários tamanhos e massas.

O hidrogênio é convertido em hélio durante reações nucleares no calor intenso do núcleo estelar. Essa conversão produz calor e luz, que sustentam a estrela. A temperatura aumenta à medida que o estoque de hidrogênio diminui a estrela se expande para se tornar uma gigante vermelha ou supergigante vermelha, dependendo de sua massa inicial, para equilibrar a força gravitacional crescente. O núcleo estelar pode conter elementos mais pesados como carbono, oxigênio e ferro. (EDUARDO JOSE, 2023).

As camadas exteriores da estrela são expelidas para o espaço interestelar, enquanto o núcleo da estrela continua a se contrair. A temperatura do núcleo aumenta até atingir um ponto em que a fusão de ferro se torna inviável porque o ferro é um material mais estável e consumiria mais energia do que liberaria em outras palavras iria gastar mais energia do que a

estrela teria. Após a remoção de suas camadas externas, estrelas de baixa e média massa, como o Sol, se transformam em anãs brancas neste destino final.

Em sua corrida cósmica, as estrelas mais massivas queimam rapidamente seu combustível nuclear. Eles podem se transformar em estrelas de nêutrons ou até mesmo buracos negros em uma explosão magnífica ou colapso cataclísmico. Isso encerra seu ciclo estelar de forma impressionante. (JOSE, EDUARDO, 2023)

Quando as estrelas de menor massa encerram seu ciclo de vida de forma serena, seu núcleo se desconecta lentamente das camadas mais externas. As nebulosas planetárias são formadas pela excitação e ionização gradual do material das camadas externas, que já está disperso e disperso pelas radiações energéticas emitidas pelo núcleo estelar. A última parte da estrela agora tem a forma de uma anã branca. A matéria dessas estrelas é tão densa que compacta os núcleos atômicos. Isso resulta em um estado em que apenas núcleos e elétrons livres existem, em vez de átomos. Como o princípio de exclusão de Pauli postula que dois elétrons não podem ocupar o mesmo estado quântico, a pressão de degenerescência dos elétrons é responsável por este colapso estelar

As anãs brancas são extremamente quentes e emitem apenas radiação térmica. A companheira de Sírius, que é uma das estrelas mais brilhantes do céu, Sírius B é um bom exemplo disso. Essa anã branca tem massa quase igual à do Sol, apesar de sua menor dimensão que a Terra. A densidade extraordinária dessas estrelas é tal que uma pequena colher de chá de seu material pesaria 50 toneladas na Terra



Fonte: Notícia concurso 2021.

Quando tinha apenas 20 anos, o físico indiano Subrahmanyan Chandrasekhar descobriu, durante uma viagem de barco da Índia para a Inglaterra, onde iniciaria seu doutorado, que a pressão dos elétrons pode conter o colapso estelar. Ele calculou que, sob a pressão de degenerescência dos elétrons, apenas os remanescentes estelares com massa inferior a 1,44 vezes a massa do Sol poderiam alcançar um estado de equilíbrio. Este será o destino final do Sol, nossa estrela doméstica. O colapso inevitável se seguirá para estrelas que ultrapassam esse limite.

Quando a massa inicial de uma estrela progenitora excede aproximadamente 8 massas solares (MSol), o ciclo de conversão de hidrogênio (H) e hélio (He) em elementos mais pesados pode continuar até que o núcleo da estrela seja principalmente composto de ferro. Novas reações nucleares não são viáveis para o ferro, pois é um elemento estável. Devido à falta de pressão de radiação para equilibrar a gravidade, o núcleo estelar colapsa e perde o contato com as camadas externas (JOSE, EDUARDO, 2023).

A pressão de degenerescência dos elétrons não é suficiente para resistir à gravidade quando a massa é superior a 1,44 MSol. Os nêutrons são formados quando os elétrons entram em contato com os prótons do núcleo. O equilíbrio é alcançado se a massa do núcleo estelar for menor do que 3 MSol. Isso ocorre devido à pressão de degenerescência dos nêutrons, um princípio quântico que impede que dois nêutrons permaneçam no mesmo estado.

As massas das estrelas de nêutrons que surgem geralmente são de aproximadamente 1,5 MSol e têm um raio de aproximadamente 10 km. Sua densidade é tão alta que apenas uma colher de chá, ou uma pequena quantidade de material de uma estrela de nêutrons, pesaria centenas de milhões de toneladas na Terra devido à sua densidade.

Uma das explosões mais energéticas que ocorrem no universo é a supernova tipo II que resulta. Neste ponto, as várias camadas de elementos que a estrela criou em seu interior são enviadas para o meio interestelar. A energia suficiente para produzir elementos mais pesados que o ferro é gerada pela interação da radiação do núcleo com essas camadas durante a explosão. Isso enriquece o Universo com uma ampla gama de elementos da tabela periódica.

Devido aos intensos campos magnéticos que rodeiam as estrelas de nêutrons, os elétrons vibram e liberam radiação na forma de pulsos de ondas de rádio. Esta é a razão pela qual as estrelas de nêutrons são conhecidas como pulsares. A característica distintiva desses objetos é sua periodicidade extraordinária, comparável aos sinais luminosos de um farol.

Se a massa remanescente após esse colapso exceder o limite de Tolman–Oppenheimer–Volkoff (TOV), a estrela colapsa para formar um buraco negro estelar (Shapiro & Teukolsky, 1983).

### **6.1 Formação dos Buracos Negros Supermassivos**

A formação dos buracos negros supermassivos, encontrados nos centros de galáxias, é um fenômeno complexo. Uma teoria comum sugere que eles crescem ao longo do tempo cósmico, acumulando matéria através de processos como fusões galácticas e a ingestão de gás e poeira circundantes.

Ao contrário dos buracos negros estelares, que são originados a partir da evolução de estrelas massivas, os buracos negros supermassivos foram formados por imensas nuvens de gás ou por aglomerados de milhões de estrelas que colapsaram sobre a sua própria gravidade quando o universo ainda era bem mais jovem e denso (REES, 1984; LYNDEN-BELL, 1969).

Esses buracos negros possuem uma massa de milhões ou até bilhões de vezes maiores que a massa do Sol. Sua enorme massa os torna objetos extremamente poderosos em termos de gravidade, exercendo uma influência significativa no ambiente galáctico ao seu redor (KORMENDY & RICHSTONE, 1995).

Acredita-se que a presença de buracos negros supermassivos nos centros galácticos desempenha um papel crucial na formação e evolução das próprias galáxias. Suas interações com o gás, poeira e estrelas ao seu redor podem influenciar a dinâmica e a estrutura das galáxias, afetando o processo de formação estelar e até mesmo contribuindo para a regulação do crescimento do próprio buraco negro (VOLONTERI, 2010).

Esses objetos fascinantes são objetos de intenso estudo e pesquisa em astronomia e astrofísica, com observações realizadas por meio de uma variedade de técnicas, incluindo observações de raios-X, ondas de rádio e emissões ópticas (KORMENDY & HO, 2013).

Estudos observacionais e simulações computacionais indicam que as fusões de galáxias desempenham um papel crucial na formação e crescimento dos buracos negros supermassivos (VOLONTERI, 2010).

Os buracos negros intermediários são objetos menos compreendidos e sua formação é ainda mais especulativa. Pensa-se que eles possam surgir a partir da fusão de buracos negros estelares menores ou como resultado do colapso direto de aglomerados estelares densos.

Estudos recentes sugerem que a formação de buracos negros intermediários pode estar ligada à dinâmica dos aglomerados globulares de estrelas (GIERSZ & SPURZEM, 2003).

Buracos negros supermassivos são encontrados no centro de muitas galáxias e provavelmente se formam através do crescimento gradual de buracos negros menores. Esse processo pode ocorrer devido à fusão de galáxias, onde buracos negros menores se fundem ao longo de bilhões de anos, acumulando matéria do meio interestelar e de estrelas próximas (VOLONTERI, 2010).

Os buracos negros supermassivos têm massas que variam de milhões a bilhões de vezes a massa do Sol. Eles desempenham um papel crucial na evolução das galáxias, influenciando a formação estelar e a estrutura galáctica ao redor deles (KORMENDY & HO, 2013).

## **6.2. Buracos Negros Intermediários**

Buracos negros intermediários são uma classe teoricamente proposta que pode se formar a partir da fusão de buracos negros estelares menores ou do colapso direto de aglomerados estelares densos. Esse tipo de buraco negro ainda é objeto de estudo e pesquisa intensa para determinar sua formação e existência em diferentes ambientes galácticos (GIERSZ & SPURZEM, 2003).

As massas dos buracos negros intermediários estão na faixa entre as dos buracos negros estelares e supermassivos. Eles são cruciais para entender a transição entre buracos negros de massa estelar e supermassivos, embora sua detecção direta ainda seja um desafio significativo para a astronomia observacional (MILLER & COLBERT, 2004).

## **7 Resultados**

O presente Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve como foco o desenvolvimento de um material didático sobre buracos negros, voltado para estudantes do ensino médio, com

ênfase em conceitos fundamentais da relatividade, formação estelar e temas correlatos. O principal objetivo foi criar uma ferramenta educacional que facilitasse a compreensão desses fenômenos cósmicos, reconhecidamente complexos, por meio de uma abordagem simplificada e acessível.

Ao longo do desenvolvimento, foram feitos avanços no entendimento das teorias físicas, particularmente as de Albert Einstein, para um nível de compreensão adequado a estudantes jovens. A relatividade, tanto a restrita quanto a geral, foi essencial para a estrutura do material, pois oferece as bases teóricas necessárias para a compreensão dos buracos negros. Traduzir essas ideias para uma linguagem acessível foi um desafio importante, mas essencial para permitir que os alunos compreendessem como a gravidade extrema influencia o espaço-tempo e possibilita a formação dos buracos negros.

Outro aspecto crucial abordado foi o processo de formação dos buracos negros, explicando como o colapso de estrelas massivas resulta nesses objetos densos e misteriosos. Além dos buracos negros estelares, também foram explorados os buracos negros supermassivos e intermediários, sempre com o cuidado de utilizar analogias e exemplos próximos à realidade dos estudantes. Isso facilitou o entendimento de como diferentes tipos de buracos negros se formam e qual o papel que desempenham na dinâmica do universo.

A revisão de alguns materiais educacionais existentes, utilizados no ensino médio, evidenciou a carência de conteúdos didáticos que apresentem esses tópicos de forma acessível e envolvente. Nesse sentido, o desenvolvimento deste material pretende contribuir no preenchimento desta lacuna, oferecendo um recurso que pode ser replicado ou adaptado para diferentes contextos educacionais.

Em resumo, os resultados deste TCC demonstram que é plenamente possível abordar temas desafiadores, como os buracos negros, de maneira didática e acessível, sem sacrificar a profundidade conceitual necessária para estimular o aprendizado. O material desenvolvido se mostrou eficaz em despertar o interesse e facilitar a compreensão dos estudantes do ensino médio, cumprindo com sucesso o objetivo de inspirar futuras gerações de cientistas e pensadores.

## **8. Considerações Finais**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) teve como objetivo o desenvolvimento de um material didático sobre buracos negros, focado em estudantes do ensino médio. Ao longo do processo, foram abordados os conceitos de relatividade, formação estelar e categorias de buracos negros, buscando tornar compreensíveis alguns dos tópicos mais complexos da física contemporânea. A experiência de construir este trabalho foi enriquecedora, tanto no aspecto acadêmico quanto no desenvolvimento de habilidades didáticas, mas também foi marcada por desafios importantes, que exigiram superação e aprendizado contínuo.

Um dos maiores desafios enfrentados ao longo do desenvolvimento deste TCC foi a adaptação da linguagem. Trabalhar com um tema tão complexo, como os buracos negros, e traduzi-lo de maneira acessível para um público jovem, sem perder o rigor conceitual, foi uma tarefa que exigiu muita reflexão. A necessidade de simplificar teorias como a relatividade geral e a formação de buracos negros, mantendo a fidelidade científica, envolveu um grande esforço de pesquisa e adaptação. Foi necessário encontrar o equilíbrio entre uma linguagem didática e a profundidade necessária para que os conceitos fossem compreensíveis e, ao mesmo tempo, instigassem a curiosidade dos estudantes.

Outro ponto de dificuldade foi a busca por referências adequadas. Embora haja vasta literatura sobre buracos negros, encontrar fontes que tratassem os conceitos de forma mais acessível, voltadas especificamente para o público escolar, foi um desafio. A pesquisa envolveu a leitura de artigos científicos, livros especializados e até materiais de divulgação científica, mas nem todos eram adequados para o contexto educacional pretendido. Assim, a seleção das fontes e a forma de integrá-las ao conteúdo exigiram tempo e atenção minuciosa para garantir a qualidade e a clareza do material.

A criação de ilustrações e gráficos também apresentou desafios, especialmente no que diz respeito à simplificação visual de conceitos abstratos. Representar graficamente fenômenos como o horizonte de eventos ou a curvatura do espaço-tempo, por exemplo, exigiu não apenas criatividade, mas também a habilidade de traduzir conceitos matemáticos complexos em imagens que fossem facilmente compreendidas pelos alunos. Contudo, essas ilustrações tiveram um papel fundamental na construção do material, pois ajudaram a facilitar o entendimento dos conceitos mais difíceis.

Por outro lado, muitos pontos positivos emergiram deste trabalho. Um dos maiores ganhos foi o aprofundamento no tema dos buracos negros, o que ampliou significativamente minha compreensão da física teórica e do impacto desses objetos no estudo do universo. Além disso, desenvolver o material didático me proporcionou um importante aprendizado sobre como estruturar conteúdos educacionais de maneira lógica e acessível. Esse processo de criação envolveu não só o domínio do conteúdo, mas também a capacidade de ensinar e despertar o interesse dos estudantes, o que foi um aspecto extremamente gratificante.

Em suma, este TCC não apenas cumpriu seu objetivo de criar um material didático sobre buracos negros para o ensino médio, mas também foi um exercício de crescimento acadêmico e pessoal. Apesar das dificuldades com a adaptação da linguagem, o uso de referências e a criação de ilustrações, o resultado final demonstrou que é possível abordar temas avançados de forma envolvente e compreensível para um público jovem. As lições aprendidas durante o desenvolvimento deste trabalho serão valiosas para projetos futuros, tanto na área de pesquisa quanto na área educacional.

## 9. Referências

BRENNAN, Richard. **Gigantes da física**. 1ª ed. Rio de Janeiro. Zahar, 2008.

GREENE, Brian. **O Universo Elegante**. 1ª ed. São Paulo. Companhia das Letras; 2001

SERWAY, Raymond; JEWET, John. **Princípios de física**. 5ª ed. São Paulo. Cengage learning, 2015.

AYALA FILHO, Álvaro Leonardi. **A construção de um perfil para o conceito de referencial em física e os obstáculos epistemológicos à aprendizagem da teoria da relatividade restrita**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

GOUVEIA, Rosimar. **Teoria da Relatividade**. Toda Matéria, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.todamateria.com.br/teoria-da-relatividade-2/>>. Acesso em: 28 jun. 2023>

STEINER, João E. **Buracos Negros: sementes ou cemitérios de galáxias?**. Caderno Brasileiro de Ensino de Física, [S. l.], v. 27, p. 723–742, 2010. DOI: 10.5007/2175-7941.2010v27nespp723. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/fisica/article/view/2175-7941.2010v27nespp723>. Acesso em: 2 out. 2024.

ALMEIDA, C. R. **Buracos Negros: mais de 100 anos de história**, *Cad. Astro.*, vol. 2, nº 1, p. 93, fev. 2021.

OLIVEIRA, Rodrigo. **A história do eclipse de Sobral (CE) que comprovou a Teoria da Relatividade**. G1, 2016 Disponível em: <<https://g1.globo.com>. Acesso em: 16 set. 2024>

Significados Teoria da Relatividade (geral e restrita): entenda o que é e o que significa. significados, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <<https://www.significados.com.br/teoria-da-relatividade/>>. Acesso em: 07 junho 2023.

GIERSZ, M. ; SPURZEM R. **A stochastic Monte Carlo approach to modelling real star cluster evolution** *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Volume 343, Issue 3, 2003.

Hawking, Stephen W. **Buracos Negros e universos bebês e outros ensaios**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Rocco, 1995 .

KORMENDY, J; HO L. **Coevolution (Or Not) of Supermassive Black Holes and Host Galaxies**. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 51, 2013.

M. COLEMAN MILLER; E. J. M. COLBERT, **Intermediate-mass black holes** *International Journal of Modern Physics D* 13:01, 1-64, 2004.

Narayan, R.; McClintock, J.E. **Observational Evidence for Black Holes**. In: Ashtekar, A., Berger, B.K., Isenberg, J. and MacCallum, M., Eds., *General Relativity and Gravitation: A Centennial Perspective*, Cambridge University Press, Cambridge, 1-20, 2015.

SHAPIRO, S. L.; TEUKOLSKY, S. A. **Black holes, white dwarfs, and neutron stars: The physics of compact objects**. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.

VOLONTERI, M. **Formation of supermassive black holes.** *Astron Astrophys Rev* **18**, 279–315, 2010.

SAA, Alberto. **Cem anos de buracos negros: o centenário da solução de Schwarzschild.** *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 38, n. 4, e4201, 2016.