



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ – UFOPA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO – ICED**  
**PROGRAMA DE CIÊNCIAS EXATAS – PCEX**  
**LICENCIATURA INTEGRADA EM MATEMÁTICA E FÍSICA 2015**

**CHRYSTOPHER WOANDER SILVA DE LIMA**

**ASTROFÍSICA & COSMOLOGIA NO ENSINO DE FÍSICA:**  
**UMA PROPOSTA DE ENSINO PARA A ABORDAGEM DE BURACOS**  
**NEGROS NO ENSINO MÉDIO**

**SANTARÉM – PA**

**2025**

**CHRISTOPHER WOANDER SILVA DE LIMA**

**ASTROFÍSICA & COSMOLOGIA NO ENSINO DE FÍSICA:  
UMA PROPOSTA DE ENSINO PARA A ABORDAGEM DE BURACOS  
NEGROS NO ENSINO MÉDIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciências da Educação (ICED) do Programa de Ciências Exatas (PCEX), correspondente a Universidade Federal do Oeste do Pará (UFOPA) como requisito parcial para a obtenção de grau de Licenciado em Matemática e Física.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Manoel Gomes de Sousa

**SANTARÉM – PA**

**2025**

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/Ufopa**

---

- L732a Lima, Chrystopher Woander Silva de  
Astrofísica & cosmologia no ensino de física: uma proposta de ensino para a abordagem de buracos negros no ensino médio./ Chrystopher Woander Silva de Lima. – Santarém, 2025.  
63 p.: il.  
Inclui bibliografias.
- Orientador: Cláudio Manoel Gomes de Sousa.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Instituto de Ciências da Educação, Licenciatura em Matemática e Física.
1. Buracos negros. 2. Ensino médio. 3. Astronomia. I. Sousa, Cláudio Manoel Gomes de, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 507



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS DA EDUCAÇÃO  
PROGRAMA DE CIÊNCIAS EXATAS  
CURSO DE LICENCIATURA INTEGRADA EM MATEMÁTICA E FÍSICA

Ao(s) vinte e quatro dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco (24/2/2025), por intermédio do Microsoft TEAMS, na cidade de Santarém, do Estado do Pará, reuniu-se por meio de sala remota, para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso desenvolvido por CHRYSTOPHER WOANDER SILVA DE LIMA e intitulado: “ASTROFÍSICA & COSMOLOGIA NO ENSINO DE FÍSICA: UMA PROPOSTA DE ENSINO PARA A ABORDAGEM DE BURACOS NEGROS NO ENSINO MÉDIO”, sob orientação do (a) docente Prof. Dr. Claudio Manoel Gomes de Sousa, professor Adjunto da UFOPA. A banca examinadora foi composta pelo (a) docente orientador (a) citado (a) e pelos docentes Profa. Dra. Lilian Cristiane Almeida dos Santos (UFOPA), e o Prof. Dr. Evandro Ares de Araujo (CNPEM/Campinas-SP). Após a defesa e análise do TCC, considerando a qualidade deste trabalho com aplicação direta ao ensino médio, a banca deferiu pela ( X ) **aprovação**/( )reprovação o TCC, resultando a **nota 10,0 (dez)**, por unanimidade. Fica acordado que a nota (X) está / ( ) não está condicionada a entrega final do trabalho, no prazo máximo de **30 dias úteis** a partir desta data e o mesmo deverá contemplar as observações da banda examinadora. Proclamados os resultados pelo Coordenador da banca, foram encerrados os trabalhos e para constar, eu Claudio Manoel Gomes de Sousa, lavrei a presente ata que será assinada pelo autor e membros da banca examinadora.

ASSINATURAS:

Autor: CHRYSTOPHER WOANDER SILVA DE LIMA matrícula: 201500937	
Orientador (a): CLAUDIO MANOEL GOMES DE SOUSA Universidade Federal do Oeste do Pará	Documento assinado digitalmente CLAUDIO MANOEL GOMES DE SOUSA Data: 19/03/2025 15:03:10-0300 Verifique em <a href="https://validar.iti.gov.br">https://validar.iti.gov.br</a>
Examinadora: LILIAN CRISTIANE ALMEIDA DOS SANTOS Universidade Federal do Oeste do Pará	Documento assinado digitalmente LILIAN CRISTIANE ALMEIDA DOS SANTOS Data: 12/03/2025 18:14:30-0300 Verifique em <a href="https://validar.iti.gov.br">https://validar.iti.gov.br</a>
EVANDRO ARES DE ARAUJO CNPEM - Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais – Campinas/SP.	Documento assinado digitalmente EVANDRO ARES DE ARAUJO Data: 19/03/2025 15:26:59-0300 Verifique em <a href="https://validar.iti.gov.br">https://validar.iti.gov.br</a>

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a mim mesmo por não ter desistido. Quero agradecer a mim mesmo por ter virado noites trabalhando nesta monografia. Quero agradecer a mim mesmo pela dedicação que tive durante esses 10 anos. Quero agradecer a mim mesmo pela disciplina diante de todas as adversidades.

Em segundo lugar, agradeço à minha família: minha mãe, Nelita; meu irmão, Alec; e minha irmã, Casey. Além dos meus amigos Yan Alexandre e Francinaldo Machado, por estarem ao lado da minha família durante os períodos de recessão das nossas vidas.

Também agradeço à Dr. Lilian Cristiane e seu esposo, Sr. Júlio; e também a Francicleide Ribeiro e Aline Picanço por serem meus amigos e minhas referências.

Agradeço ao Dr. Cláudio Manuel por encontrar tempo em suas agendas lotadas para me orientar e compartilhar seus conhecimentos. Agradeço muito, Dr. Cláudio, o senhor também é uma referência para mim.

Aos meus colegas e amigos da turma de Licenciatura Integrada em Matemática e Física 2015, especialmente aos mais próximos: Ana Beatriz, Esrom, Cleudson, Ramon, Breno, Irlan e Natalie. Obrigado pelos incentivos!

Além disso, agradecer ao Colégio Rio Tapajós e a professora Edicleia por disponibilizarem o espaço para apresentar a palestra sobre Buracos Negros.

Por fim, dedico essa monografia a minha Isabella (meu animal de estimação que está comigo a mais de 15 anos).

## RESUMO

Buracos Negros são um dos fenômenos mais intrigantes da física moderna. Incorporá-los na educação básica não apenas desperta a curiosidade dos alunos, mas também serve como uma excelente plataforma para ensinar diversos conceitos científicos. Eles permitem explorar a Gravidade, a Relatividade Geral, a Termodinâmica, entre outras áreas. Além disso, ao discutir Buracos Negros, os alunos podem aprender sobre a importância do método científico e desenvolver habilidades críticas de análise e pensamento interdisciplinar. Incorporar temas tão complexos e fascinantes no currículo escolar certamente pode enriquecer a aprendizagem e inspirar futuras gerações de cientistas. Este trabalho tem como objetivo explorar esse tema Buracos Negros no contexto do ensino médio, oferecendo aos professores ferramentas metodológicas e interativas para abordar este fascinante tópico de Astronomia e Astrofísica em sala de aula. A pesquisa foi fundamentada em uma ampla gama de referências científicas e educacionais, buscando integrar conceitos teóricos com práticas pedagógicas inovadoras. Para tal, optou-se por uma pesquisa de campo, do tipo qualitativa e quantitativa-descritiva. Os dados foram obtidos através de um questionário utilizando recursos virtuais como *Kahoot*, com participação dos alunos. Os resultados foram promissores e indicando grande retenção do conteúdo. Isso significa que a utilização dos métodos apresentados com a sequência evolutiva do conteúdo contribuiu significativamente para o aprendizado dos alunos. As atividades propostas não apenas facilitaram a compreensão dos conceitos de Estrelas e Buracos Negros, mas também despertaram um maior interesse neste assunto. As considerações finais destacam a importância de continuar investigando em metodologia inovadoras para o ensino de ciências, especialmente em temas complexos como a Astrofísica. Recomenda-se que os professores sejam capacitados continuamente e que as escolas ofereçam recursos adequados para a implementação dessas práticas pedagógicas.

**Palavras – Chaves:** Buracos Negros; Ensino Médio; Astronomia; Astrofísica; Metodologias Interativas; Educação Científica; Ensino de Física.

## ABSTRACT

Black holes are one of the most intriguing phenomena in modern physics. Incorporating them into basic education not only sparks students' curiosity but also serves as an excellent platform to teach various scientific concepts. They allow for the exploration of gravity, general relativity, thermodynamics, and other areas. Additionally, discussing Black Holes helps students learn about the importance of the scientific method and develop critical analytical and interdisciplinary thinking skills. Incorporating such complex and fascinating topics into the school curriculum certainly enriches learning and inspires future generations of scientists. This work aims to explore the topic of Black Holes in the context of high school education, providing teachers with methodological and interactive tools to address this fascinating topic of Astronomy and Astrophysics in the classroom. The research is based on a wide range of scientific and educational references, aiming to integrate theoretical concepts with innovative pedagogical practices. To this end, we chose field research of a qualitative and quantitative-descriptive type. The data were obtained through a questionnaire using virtual resources such as Kahoot, with the participation of (number of students). The results were promising, indicating high content retention. This means that the use of the presented methods, along with the evolutionary sequence of the content, significantly contributed to the students' learning. The proposed activities not only facilitated the understanding of concepts related to Stars and Black Holes but also sparked a greater interest in this subject. The final considerations highlight the importance of continuing to investigate innovative methodologies for science teaching, especially in complex topics such as Astrophysics. It is recommended that teachers receive continuous training and that schools provide adequate resources for the implementation of these pedagogical practices.

**Keywords:** Black Holes; High School; Astronomy; Astrophysics; Interactive Methodologies; Scientific Education; Physics education.

## **SIGLAS**

**NASA** - National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço é uma agência do governo federal dos Estados Unidos)

**CTS** - Ciência, Tecnologia e Sociedade

**SMD** - Science Mission Directorate (diretoria de missão científica)

**$\Lambda$ CDM** - lambda-Cold Dark Matter (Matéria Escura Fria)

**EUA** - Estados Unidos da América

**LIGO** - The Laser Interferometer Gravitational – Wave Observatory

**SXS** - Simulating eXtreme Spacetimes

**EHT** - Event Horizon Telescope

**M87** - Messier 87

**Srg A\*** - Sagittarius A\*

**PCN** - Parâmetros Curriculares Nacionais

**PCN+** - Orientações Educacionais Complementares aos parâmetros Curriculares Nacionais

**BNCC** - Base Nacional Comum Curricular

**EJA** - Educação de Jovens e Adultos

**Web** - World Wide Web

**IOS** - iPhone Operating System

**CDS** - Strasbourg astronomical Data Center

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>9</b>
1.1	Objetivo Geral	10
1.2	Objetivos Específicos	10
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>12</b>
2.1	Cosmologia e Astrofísica	12
2.2	Formação das Estrelas	13
2.3	Objetos Compactos	16
<b>3</b>	<b>RELATIVIDADE GERAL</b>	<b>19</b>
3.1	A Curvatura do Espaço – Tempo	19
3.2	O Princípio da Covariância	21
3.3	Princípio da Equivalência	21
3.4	Equação de Campo de Einstein	22
3.5	Geometria de Schwarzschild	23
<b>4</b>	<b>BURACOS NEGROS</b>	<b>25</b>
4.1	Horizonte de Eventos	26
4.2	Singularidade	27
4.3	Novas Evidências dos Buracos Negros	30
4.3.1	O Primeiro Buraco Negro Detectado	30
4.3.2	Fusão de Buracos Negros	31
4.3.3	M87 e Sagittarius A*	32
<b>5</b>	<b>PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS</b>	<b>36</b>
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
6.1	Tipo de Pesquisa	39
6.2	Local e Participantes	39
6.3	Metodologia do Trabalho	40
6.4	Materiais e Software	41
<b>7</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A</b>	<b>59</b>
	<b>APÊNDICE B</b>	<b>63</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho tem por objetivo a abordagem de Buracos Negros no ensino médio, tratando do ponto de vista da Física Moderna com vista ao seu papel no Ensino de Física. De nossa experiência os alunos geralmente buscam por grande motivação para compreender dos mistérios do Universo. Com o advento das redes sociais, os conceitos de Física têm se destacado trazendo novas abordagens metodológicas para o campo em questão.

Em razão disso, o interesse na abordagem de Buracos Negros: por um lado, trabalha as áreas da Astronomia, da Astrofísica e da Cosmologia e, de outro, metodologias e procedimentos que privilegiassem as trocas verbais e interação tecnológicas dos professores com os alunos, de modo que evidenciasse o auxílio da compreensão, por parte dos professores, dos conhecimentos das áreas em questão. Portanto, trata-se de um tópico que demanda uma prática interativa em sala de aula. Logo, este é um tópico de interesse tanto para professores quanto para pesquisadores que buscam novas práticas e ferramentas de Ensino de Física.

Na revisão de literatura realizada do estudo referido, nada foi encontrado especificamente sobre abordagem de Buracos Negros no ensino médio, nem sobre suas concepções relevantes para o ensino e na aprendizagem em Física. Em termos de educação no Brasil, temos a Base Nacional comum curricular (Brasil, 2024) que traz algumas competências e habilidades para o Ensino de Física Moderna do ponto de vista de conhecimentos e materiais para uso em sala de aula que foram modelados para essa abordagem de Buracos Negros.

No trabalho aqui descrito, o problema consistiu, portanto, em verificar a possibilidade de uma abordagem de Buracos Negros em sala de aula. Tendo em conta a pretensão de se ter metodologias novas e com uso de softwares para uma prática de ensino de Buracos Negros, aplicando em uma sala de aula do ensino médio e relatando não só os dados obtidos, mas também as concepções dos alunos.

Neste procedimento, o importante é estabelecer quais conceitos os alunos demonstraram facilidades ou dificuldades em assimilar junto com as metodologias e uso de materiais que serviram para otimizar a aprendizagem destes conceitos. Buscando, é claro, uma maneira adequada de abordar os conteúdos de Física desse porte para uma sala de aula do ensino básico.

Este trabalho está estruturando em oito capítulos, divididos da seguinte forma: Introdução, Referencial Teórico, Relatividade Geral, Buracos Negros, Parâmetros Curriculares Nacionais, Metodologia, Resultados e Discussões e Conclusão. O primeiro capítulo, Introdução, traz um panorama geral sobre o trabalho, a justificativa e a importância do trabalho,

além dos objetivos gerais e específicos que norteiam o percurso do trabalho. Em seguida, o Referencial Teórico que busca a reunião de todo o conhecimento dos conteúdos necessários que serão utilizados para a elaboração do trabalho e das aulas sugeridas. No terceiro capítulo, os tópicos necessários da Relatividade Geral para a construção dos Buracos Negros. No quarto capítulo, são tratadas as características dos Buracos Negros como Horizonte de Eventos e Singularidade, além dos registros atuais dos telescópios e interferômetros gravitacionais. No quinto capítulo, são trabalhados os parâmetros educacionais necessários para a construção da aula de acordo com a metodologia: Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). No sexto capítulo, são apresentadas as metodologias das aulas e as abordagens virtuais como: software e simuladores; e materiais para ilustração do espaço curvo. Em penúltimo, em resultados e discussões são mostrados os dados e as interações obtidos da aplicação. Por fim, a conclusão do trabalho com comentários sobre os resultados além de estimular a criação de trabalhos subsequentes a partir deste.

## **1.1 Objetivo Geral**

Proporcionar aos alunos do ensino médio uma experiência educacional dinâmica e acessível sobre Buracos Negros no Ensino de Física.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Com base no objetivo geral, para melhor direcionamento da proposta, aqui estão os objetivos específicos para a realização do trabalho.

- Introduzir os conceitos básicos da Relatividade Geral, que é a base para a compreensão dos Buracos Negros.
- Explicar o que são Buracos Negros, como são formados e suas principais características.

- Discutir os efeitos dos Buracos Negros no espaço-tempo e a ideia de singularidade.
- Explorar descobertas recentes e pesquisas em andamento sobre buracos negros.
- Desenvolver atividades práticas e experimentos de pensamentos para ajudar os alunos a visualizar e entender melhor os Buracos Negros.
- Relacionar o estudo dos Buracos Negros com os Conceitos de Física ensinados no ensino médio como a Física Newtoniana.
- Incentivar o interesse e a curiosidade dos alunos pela Física e ciências espaciais

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Cosmologia e Astrofísica

Segundo a *Science Mission Directorate* (SMD)<sup>1</sup>, diretoria de missão científica da NASA (National Aeronautics and Space Administration), a divisão de Astrofísica estuda o Universo. Nesse departamento busca-se entender o Universo e o nosso lugar nele. Começando investigar o momento da criação do Universo e compreendendo a história das estrelas e das galáxias, a formação de sistemas planetários e como os ambientes hospitaleiros para a vida se desenvolvem, até mesmo a assinatura da vida em outros mundos. Em resumo, a Astrofísica é a área da astronomia que estuda como o universo funciona e explora como ele começou a evoluir, além de procurar vida em planetas ao redor de outras estrelas.

A Cosmologia, considerando o **modelo  $\Lambda$ CDM**<sup>2</sup> (Zyla, et al., 2020) o qual descreve os atuais dados observacionais e, ainda, denominado **Modelo Padrão da Cosmologia** (Neto, 2018) ou **Cosmologia Padrão** (Fróes, 2014); leva em consideração as hipóteses do *Big Bang*, ou seja, que o Universo teve um início extremamente denso, quente e compacto, seguido de um período inflacionário e uma posterior expansão. A Cosmologia Padrão considera o chamado **Princípio Cosmológico**<sup>3</sup> e como composição atual: matéria bariônica, matéria escura e energia escura. Resumidamente, a Cosmologia descreve a evolução do Universo não apenas nos dias atuais mais também em tempos primordiais.

O princípio da relatividade desenvolvido por Einstein para relatividade restrita diz que as leis da Física são independentes do sistema de referência inercial adotado. Devido a isso, essas leis devem ser expressas da mesma forma em todos os referencias inerciais<sup>4</sup> sendo a mesma para todos os observadores. Estendendo este postulado, Milne (1933) criou, em meados dos anos 1930 o Princípio Cosmológico da mesma forma que é trabalhado atualmente (De Souza, 2004). A extensão é configurada no fato de que, além da forma com que se descreve as leis físicas, analogamente, a estrutura do Universo é a mesma para observadores em diferentes referenciais em relação ao fluido cósmico (Aderaldo, Gonçalves, 2020), ou seja, um fluido

---

<sup>1</sup> NASA ASTROPHYSICS: *Science Mission Directorate*. Disponível em <https://science.nasa.gov/astrophysics>. Acesso em 10 jul. 2023

<sup>2</sup> **Modelo  $\Lambda$ CDM (*lambda-Cold Dark Matter*)** é um modelo teorizado sobre evolução do Universo.

<sup>3</sup> O princípio cosmológico afirma que, larga escala, o Universo é homogêneo e isotrópico.

<sup>4</sup> Covariância das Leis da Física

perfeito sem viscosidade, sem turbulência e sem rotação. Este princípio, em suma, diz que em escalas apropriadas o Universo é homogêneo e isotrópico.

Analisando-se as regiões do Universo da ordem de  $\sim 1$  ano-luz pode-se observar aglomerações de estrelas, enquanto que em regiões da ordem de  $\sim 10^6$  anos-luz aglomeração de galáxias, mais adiante em regiões de ordem de  $\sim 10^7$  anos-luz tem-se aglomerações de aglomerados de galáxias (Misner et. al., 2017). No entanto para regiões na escala cosmológica, i.e. distâncias  $\geq 100$  Mpc ( $1\text{pc} = 3,261$  anos-luz), pode-se observar a mesma distribuição espacial da composição e neste caso o Universo é considerado homogêneo (Ryden, 2003). Sob outra perspectiva, para a formação de sistemas é importante que haja inomogeneidade, isso em pequenas escalas. É o caso do nosso Sistema Solar. É notável que não há homogeneidade, uma vez que, os planetas têm massas e órbitas distintas. Além disso, há interação preferencial em relação à direção entre Sol-Planeta. Isso significa que a direção preferencial é relacionada com a interação gravitacional entre os corpos, dizemos que esse sistema é anisotrópico. E se caso o sistema tivesse isotropia, não seria possível manter os planetas em órbita (Ryden, 2003).

## 2.2 Formação das Estrelas

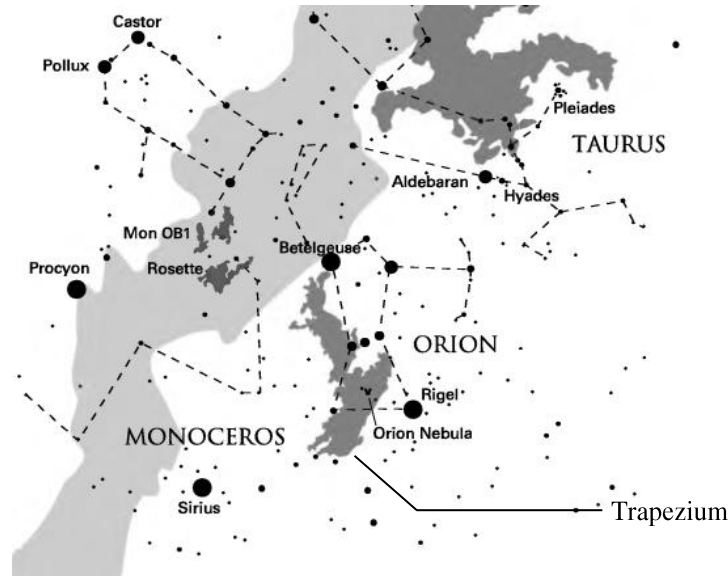
As estrelas são formadas em grandes nebulosas por todo o universo observável. Por sua vez, é um processo complexo que ocorre e ocorreu inúmeras vezes no passado em decorrência do *Big Bang*, que não só produziu todo o Universo, mas também gás difuso (Stahler e Palla, 2004). Esse gás é o ponto de partida para a criação de jovens estrelas. Como exemplo mais familiar, tomaremos Orion (O caçador), a constelação mais fácil de reconhecer nos céus noturnos (Figura 2.2.1), no qual, segundo Stahler e Palla (2004), é o berço extremamente ativo de formação de estrelas.

Aqui, podemos ver, na constelação de Órion “O guardião”, alguns objetos bastante conhecidos como: Betelgeuse, a supergigante vermelha no ombro direito; e Rigel azul brilhante em seu pé esquerdo. Mais ao sul das três estrelas que compõem o cinturão de Orion há uma mancha brilhante e difusa. Esta é a nebulosa de Orion, uma nuvem de gás sendo aquecida pela intensa radiação das estrelas do Trapezium<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup> Chamado de coração da Nebulosa de Orion, é a região de cerca de 1,5 anos-luz que denominam o núcleo do denso aglomerado estelar da Nebulosa. - <https://science.nasa.gov/trapezium-heart-orion> acessado em 12/07/2023

Figura 2.2.1 – Posição da Constelação de Orion



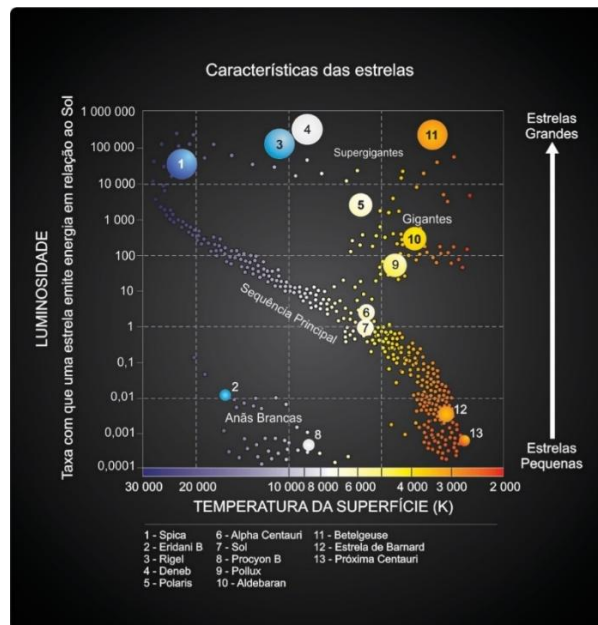
Fonte: (Stahler e Palla, 2004, p.3) – A parte cinza claro representa a Via Láctea, enquanto as manchas em cinza escuro representam as nuvens moleculares gigantes. Também mostrando as estrelas de acordo com a intensidade de seu brilho.

As estrelas no Trapezium estão se formando a partir desse gás conhecido como Nuvem Molecular de Órion. Indicado pelo sombreado na (Figura 2.2.1). Essa estrutura cobre uma distância de 450 pc. Orion, como se pode notar, é apenas umas das milhares de nuvens moleculares gigantes, ou complexos de nuvens, encontrados em toda Via Láctea. O gás é predominantemente hidrogênio molecular,  $H_2$ . Com suas massas totais de  $\sim 10^5 M_\odot$ , são consideradas as maiores estruturas da Galáxia e estão quase todas produzindo novas estrelas (Stahler e Palla, 2004).

Como vimos, as estrelas se formam a partir dos gases difusos no meio interestelar e se tornam, inicialmente, *protoestrelas*. Seguindo o diagrama Hertzsprung-Russell (Figura 2.2.2). Essas protoestrelas se aproximam da sequência principal, a temperatura fotosférica das estrelas descendentes está no nível que o hidrogênio se torna ionizado a aproximadamente  $T \approx 4000$  K. Mas, para isso, elas devem ceder de energia e momento angular e também superar as pressões magnéticas para ter sucesso em seu colapso para densidades no qual a queima nuclear possa começar. Com isso, as estrelas devem atingir uma temperatura relativamente alta, o que, por sua vez, gera grandes tamanhos e indica grandes luminosidades. Essa luminosidade surge da liberação de energia gravitacional pela estrela que encolhe. Quando o hidrogênio no núcleo se esgota, sobra apenas seu resíduo (núcleo inerte), não inflamável, de hélio, He. O hidrogênio continua a queimar em uma casca ao redor do núcleo, aumentando o seu núcleo de hélio. Nesse

processo, o núcleo encolhe tornando-se mais compactado fazendo com que a casca em chamas mude o seu estado para potências mais baixas, ocasionando aumento de temperatura. Durante um longo período, a taxa de queima do hidrogênio aumenta e a estrela responde a isso expandindo-se. A expansão é considerável que, apesar do aumento da luminosidade, a energia emergente por metro quadrado da superfície,  $\sigma T^4 (W/m^2)$ , diminui; portanto, a temperatura da superfície diminui (Bredt, 2008). Isso leva a estrela a um estágio, tornando-se avermelhado, conhecido como Gigante Vermelha. As estrelas mais massivas se tornarão supergigantes altamente luminosas, como é o caso de Betelgeuse.

Figura 2.2.2 – Diagrama Hertzsprung-Russell



Fonte: (<http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>) – O diagrama demonstra a relação entre a luminosidade com a temperatura do objeto estelar.

Casualmente, o encolhimento do núcleo torna-se cada vez mais denso e mais quente para que o hélio comece a sofrer interações nucleares produzindo elementos mais pesados (carbono, oxigênio e neon), gerando a liberação de energia nuclear e aumentando, cada vez mais, a temperatura, que por sua vez aumenta a taxa de queima. Com essa queima, o hélio no núcleo se esgota; logo as moléculas que sobram é o carbono e o oxigênio. A queima do hélio continua em sua casca esférica ao redor do núcleo. Esta casca (chamada de *concha*) é cercada por uma camada de hélio com queima de hidrogênio ainda acontecendo na borda externa. Contudo, para estrelas com massas menores que  $\sim 8M_{\odot}$ , significa o fim da queima nuclear. No fim, a estrela eventualmente, ejetará a maior parte de seu envelope difuso, dando origem a uma

nebulosa planetária. O núcleo encolhe até que a **pressão de degeneração**<sup>6</sup> o estabilize. Logo, tornando-se em um objeto compacto.

### 2.3 Objetos Compactos

Como foi visto, o primeiro estado de equilíbrio na evolução de uma estrela é a de queima de hidrogênio. Para que isso possa ocorrer, a estrela deverá ter pelo menos  $\sim 8M_{\odot}$  (Hoyang, 2006). O processo para a produção de hélio é chamado fusão, e nesse período a estrela está na sequência principal do diagrama de Hertzsprung-Russell (Figura 2.2.2). Quando o núcleo fica sem hidrogênio, ele se comprime e fica mais quente. Isso pode ser entendido com o Teorema do Virial (Equação 2.3.1):

$$E_t = -\frac{1}{2}E_p; \quad E_{tot} \equiv E_t + E_p = \frac{1}{2}E_p \quad (2.3.1)$$

onde  $E_p$ ,  $E_t$  e  $E_{tot}$  são, respectivamente, energia potencial, térmica e total da estrela. Diante disso,  $E_{tot}$  diminuirá, pois, a produção de energia pela fusão nuclear diminui enquanto a perda de energia radiativa continua inabalável. Logo,  $E_p \downarrow$  e  $E_t \uparrow$ . O núcleo da estrela se contrai ( $E_p \downarrow$ ), e a densidade e a temperatura aumentarão (compressão adiabática;  $E_t \uparrow$ ). Com isso, a estrela gasta metade da energia potencial liberada em perdas radiativas e a outra metade em compressão (aumento de  $E_t$ )

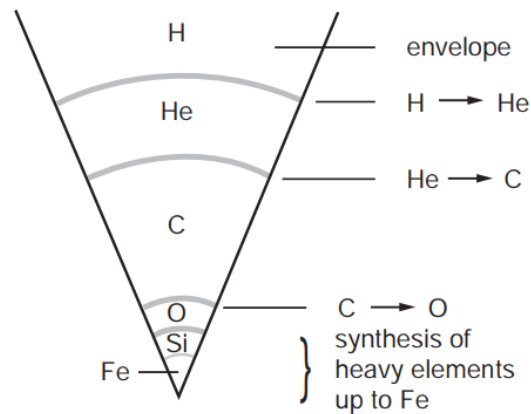
Segundo Hoyang (2006), em estrelas mais pesadas, a compressão do núcleo continua até que  $T_c \simeq 10^8 \text{K}$  seja atingido (ponto que ocorre a fusão do hélio) através da reação triplo-alfa ( $3 \text{ } ^4\text{He} \rightarrow \text{ } ^{12}\text{C} + \gamma$ ), e onde o  $^{16}\text{O}$  também é formado. A contração segue mais uma vez até o núcleo de hélio se esgotar. Estrelas mais pesadas do que cerca de  $6M_{\odot}$  atingem uma temperatura  $T_c \simeq 8 \cdot 10^8 \text{K}$ , o que é suficiente para ativar a fusão do carbono. O próximo estágio seria a fusão do  $^{16}\text{O}$ , e assim por diante. Como todas essas reações tem dependência da temperatura, a estrela

---

<sup>6</sup> É a pressão originada por efeitos quânticos em estados de matéria altamente compactada.

adquire uma estrutura de concha. Quanto mais massiva a estrela, mais camadas ela desenvolvera como mostra a (Figura 2.3.1)

Figura 2.3.1 - Estrutura de Concha (Camadas)



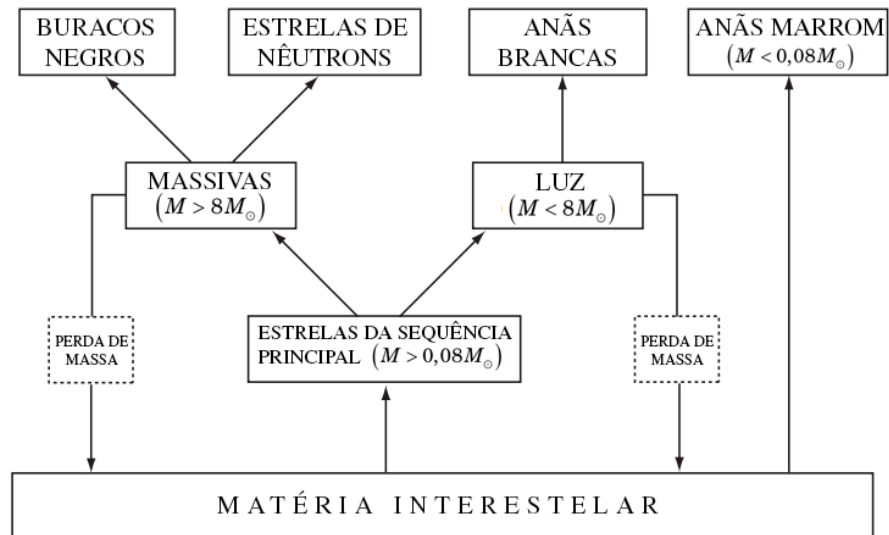
Fonte: (Hoyang, 2006, p.90) – A evolução da estrela consiste em várias camadas até núcleos pesados, com reações de fusão em andamento nas camadas limites (sem escalas). Após a produção de carbono (C), as estrelas começam a Síntese de Elementos Pesados (“Synthesis of Heavy Elements”), que vai do Oxigênio até o Ferro.

Além da rotação e dos campos magnéticos, há também a perda de massa que é uma complicação ao calcular a evolução da estrela. Essa perda ocorre quando a estrela está na fase gigante (por pressão radiativa), mas também devido a instabilidades durante os processos de queima da casca. A consequência dessa perda é muitas vezes visível como nebulosas planetárias. O processo nuclear continua até o que os recursos disponíveis da estrela são esgotados. Estrelas massivas, com  $M \geq 8M_{\odot}$ , é provável que a queima do núcleo continue até o ferro (Longair, 2011). Com isso, nos processos finais, o núcleo da estrela fica sem combustível entrando em colapso até que alguma outra forma de suporte de pressão permita que uma nova configuração de equilíbrio seja estabelecida.

De acordo com Longair (2011), essas configurações, que podem ser estabelecidas quando o combustível acaba, são: as Anãs Brancas, as Estrelas de Nêutrons ou os Buracos Negros, ilustrados na (Figura 2.3.2). As Anãs Brancas e Estrelas de Nêutrons, são configurações suportadas pela pressão de degenerescência associada aos férmions; elétrons, prótons e nêutrons ( $e^{-}, p^{+}, n$ ); o qual apenas uma partícula pode ocupar qualquer estado mecânico quântico. As Anãs Brancas são sustentadas pela pressão de degeneração de elétrons e pode ter massas de até  $1,4M_{\odot}$ . Nas Estrelas de Nêutrons, a pressão de degeneração de nêutrons é responsável pelo suporte de pressão e elas podem ter massas de  $1,4M_{\odot}$ , possivelmente um

pouco mais alta se a estrela de nêutrons estiver girando. Estrelas mais massivas devem resultar em um buraco negro, o qual veremos mais adiante.

Figura 2.3.2 – Objetos Compactos (Configurações)



Fonte: (Hoyang, 2006, p.91) Traduzido – Configuração dos objetos compactos de acordo com seus estágios da sequência principal e a evolução nos quatro tipos de estrelas resultantes.

### 3 RELATIVIDADE GERAL

A gravidade, uma das quatro forças fundamentais da natureza, desempenha importante papel na modelagem do universo em grande escala. A lei de Newton para a gravitação (Equação 3.1),

$$F = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (3.1)$$

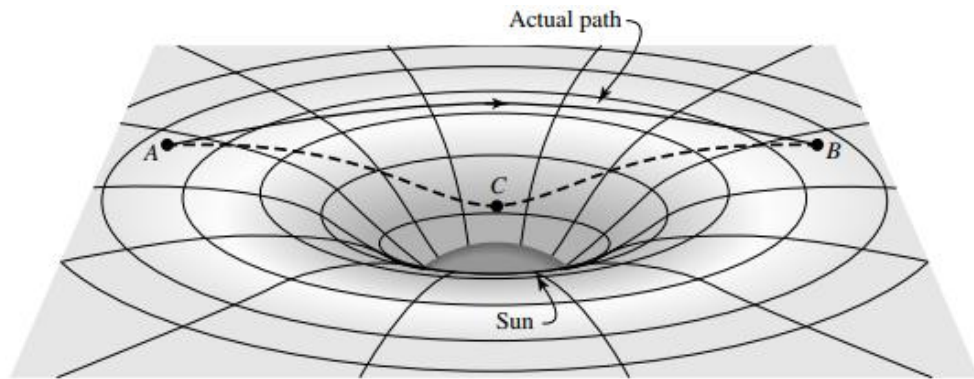
permaneceu a base inquestionável dos astrônomos sobre os movimentos celestes até o início do século XX. Sua aplicação determinou com precisão os movimentos dos planetas. A única falha na gravitação newtoniana foi a taxa inexplicavelmente grande de mudança na orientação da órbita de Mercúrio (Carrol et. al, 2013).

Entre os anos de 1907 e 1915, Albert Einstein desenvolveu uma nova teoria da gravidade, sua teoria geral da relatividade. Essa teoria resolve o mistério da órbita de Mercúrio e, além disso, previu muitos outros fenômenos que foram posteriormente confirmados por experimentos. Descreverei apenas o suficiente do conteúdo físico da relatividade geral para fornecer o pano de fundo necessário para a discussão sobre Buracos Negros.

#### 3.1 A Curvatura do Espaço – Tempo

A teoria geral da relatividade é fundamentalmente uma descrição geométrica de como as distâncias (intervalos) no espaço-tempo são medidas na presença de massa. As distâncias entre os pontos no espaço ao redor de um objeto massivo são alteradas de forma que pode ser interpretada como o espaço se curvando através de uma quarta dimensão espacial perpendicular a todas as três direções espaciais (Figura 3.1.1). O fato de que a massa tem um efeito sobre o espaço circundante é o primeiro elemento essencial da Relatividade Geral. A curva do espaço é apenas um aspecto do efeito da massa no espaço-tempo. Assim, o espaço-tempo curvo age sobre a massa, dizendo-lhe como se mover.

Figura 3.1.1 – Interpretação Geométrica



Fonte: (Carrol et. al, 2013, p. 674) – Comparação entre dois caminhos de fótons do espaço curvo entre os pontos A e B.

Ao se analisar a Figura 3.1.1, ela sugere outro importante aspecto da relatividade geral. Sabe-se que nada pode se mover mais rápido que a luz<sup>7</sup>, neste caso, a luz deve sempre seguir o caminho mais rápido entre dois pontos quaisquer. Caso o espaço em questão seja plano e vazio, a trajetória é uma linha reta, entretanto qual seria a rota através do espaço curvo? Forçando o feixe de luz viajar entre os pontos A e B pelo atalho indicado pela linha tracejada na Figura 3.1.1, após seguir sua rota, ultrapassaria o feixe livre através do espaço curvo? A resposta é não – O feixe curvo (feixe livre) ganharia. Isso significa que o feixe viajando pela linha tracejada diminui pelo caminho. Entretanto, isso é incoerente com os postulados da relatividade, no qual todo observador, incluindo um no ponto C, deverá medir o mesmo valor para a velocidade da luz. Segundo Carrol et. al (2013), isso implicaria em duas possibilidades, ou a distância na trajetória tracejada ser maior do que o caminho natural do feixe de luz ou o tempo pode correr mais lentamente ao longo do caminho tracejado; qualquer uma dessas possíveis respostas causariam efeito à passagem do feixe. Mas, a segunda possibilidade é a última característica essencial da Relatividade Geral: o tempo pode correr mais devagar no espaço-tempo curvo.

<sup>7</sup> Ao longo desse tópico, supõe-se que a luz se propaga no vácuo.

### 3.2 O Princípio da Covariância

Segundo o princípio da Relatividade Especial, ou seja, todos os observadores inerciais são equivalentes. Einstein argumentou que todos os observadores, inerciais ou não, deveriam ser capazes de descobrir as leis físicas. Caso contrário, teríamos poucas chances de determiná-las, já que estamos ligados à Terra, cujo movimento quase não é inercial. Neste caso, os observadores estão intimamente ligados aos seus sistemas de referência ou sistemas de coordenadas, logo qualquer sistema de coordenadas deveria servir. Porém a situação é diferente na relatividade especial, pois a métrica é plana e a conexão integrável, existindo um sistema preferido: ou seja, as coordenadas de Minkowski. Para o espaço-tempo curvo, não há sistema de coordenadas preferido, o que, por sua vez, acaba com a existência de um observador global. No entanto, segundo D’Inverno et. al (2022), em muitas aplicações haverá sistemas de coordenadas preferenciais, os quais devem ser invariantes sob uma transformação de coordenadas. Assim, a importação integral do princípio da relatividade geral está contida na seguinte declaração: as equações da física devem ter forma tensorial.

Define-se a expressão covariante para o intervalo contendo a geodésica do espaço-tempo (Equação 3.2.1):

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (3.2.1)$$

Essa expressão é válida para qualquer sistema de coordenadas espaço temporais. Nela,  $g_{\mu\nu}$  representa o tensor de métrico, e o índices gregos, como  $\mu, \nu$  e  $\lambda$ , assumem valores = 1, 2, 3, 4 – sendo 4 o índice que corresponde a coordenada temporal; os índices latinos correspondem somente às coordenadas espaciais.

### 3.3 Princípio da Equivalência

O princípio da equivalência diz que todos os laboratórios locais, em queda livre, e não rotativos, são totalmente equivalentes para a realização de todos os experimentos físicos (Carroll et. al, 2013). Isso significa que não é possível diferenciar movimentos que ocorrem na presença

de um campo gravitacional para um observador estacionário e movimentos que ocorrem para um referencial acelerado. Em ambos os casos, deve-se observar os mesmos fenômenos físicos.

Einstein observou este fenômeno em um dos seus experimentos mentais, ele percebeu que se uma pessoa cair em queda livre, ela não sentirá seu próprio peso. Em outras palavras, as leis que regem a queda de um corpo na presença de um campo gravitacional são equivalentes para outro observador em um referencial cuja aceleração seja idêntica, ou seja, as propriedades do movimento de uma partícula em um campo gravitacional são as mesmas para um sistema não inercial.

A Mecânica Relativística descreve o movimento dessa partícula integrando a (equação 3.2.1), de forma a se obter a equação da geodésica (Equação 3.3.1):

$$\frac{d^2 x^\sigma}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\sigma \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} = 0 \quad (3.3.1)$$

onde  $\Gamma_{\mu\nu}^\sigma$  é a conexão métrica de  $g_{\mu\nu}$ . O princípio da equivalência exige que as forças gravitacionais, bem como as forças inerciais, sejam dadas por um  $\Gamma_{bc}^a$  apropriado. E neste caso, não podemos mais considerar o espaço tempo plano, caso contrário não haveria distinção não gravitacional.

### 3.4 Equação de Campo de Einstein

Agora que princípios relacionados a espaço e tempo; expressos no espaço-tempo, com coordenadas  $(x, y, z$  e  $t)$  definindo cada evento; podemos mostrar a maior conquista de Einstein, a Equação de Campo (Equação 3.4.1). Ela é utilizada para calcular a geometria do espaço-tempo produzida por um objeto de massa e energia. Sua equação é expressa como:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (3.4.1)$$

no qual pode ser escrito de forma compacta conhecida como Tensor de Einstein (Equação 3.4.2):

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} \quad (3.4.2)$$

à direita está o tensor de Energia  $T_{\mu\nu}$ , que avalia o efeito de um determinado objeto de massa e energia na curvatura do espaço-tempo, conforme descrito matematicamente pelo tensor de Einstein  $G_{\mu\nu}$ , (para a gravidade), à esquerda<sup>8</sup>. As constantes  $G$  (constante de gravitação universal) e  $c$  (velocidade da luz no vácuo) são fundamentais para a Teoria da Relatividade Geral, que estende a Teoria da Relatividade para incluir a gravidade, ou seja, a relatividade Geral descreve a gravidade não como uma força, mas como uma curvatura do espaço-tempo causada pela massa e energia. Aprofundar-se nesta equação fascinante vai além do propósito deste trabalho e, assim, descrever apenas a curvatura do espaço-tempo ao redor de um objeto esférico de massa  $M$  e raio  $R$ , e demonstrar como ele se move através do espaço curvo que se encontra.

### 3.5 Geometria de Schwarzschild

A geometria do espaço-tempo de Schwarzschild (Equação 3.5.1)

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2 + \frac{dr^2}{1 - 2M/r} + r^2 (d\theta^2 + \text{sen}^2\theta d\phi^2) \quad (3.5.1)$$

comporta-se mal perto de  $R_s = 2M$ , a métrica  $g_{tt}$  torna-se zero, e  $g_{rr}$  se torna infinito. Segundo Misner et. al. (2017), chamam isso de patologia na própria geometria do espaço-tempo ou no sistema de coordenadas  $(t, r, \theta, \phi)$  quando próxima de  $R_s = 2M$ . Esse é chamado de *raio de Schwarzschild* ou *raio gravitacional*, uma região preocupante da geometria Schwarzschild, no

---

<sup>8</sup> Observando que  $E = mc^2$  implica que tanto a massa quanto a energia contribuem para a curvatura do espaço tempo.

qual a métrica só compreende a solução de vácuo esfericamente simétrica da Equação 3.5.1, ou seja, o espaço de fora do objeto. A forma matemática é diferente no interior do objeto, no qual é ocupado por matéria (Carrol et. al, 2013).

Vamos considerar uma estrela que sua coordenada radial da superfície colapsou para  $R_s = 2GM/c^2$ , o comportamento do espaço e do tempo é notável quando  $r = R_s$ . O tempo próprio medido por um relógio no raio gravitacional é  $d\tau = 0$ . Isso implica que o tempo desacelera até parar completamente, conforme medido por um observador longe o bastante. Deste ponto de vista, nada acontece no raio Schwarzschild. Neste caso, até mesmo a luz congela no tempo (lembrando que a velocidade da luz é sempre  $c$  em qualquer referencial local), no entanto, essa velocidade pode variar devido aos efeitos de curvatura do espaço-tempo. A velocidade aparente da luz, a taxa o qual as coordenadas espaciais de um fóton mudam é chamado de *velocidade de coordenada*. Logo, teremos que voltar para variáveis onde  $c$  aparece e fazendo  $ds = 0$  para a luz (Equação 3.5.2),

$$0 = - \left( c dt \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} \right)^2 + \left( \frac{dr}{\sqrt{1 - 2GM/rc^2}} \right)^2 + r^2 (d\theta^2 + \text{sen}^2\theta d\phi^2) \quad (3.5.2)$$

pode-se calcular a velocidade de coordenada de um fóton que viaja verticalmente. Igualando  $d\theta = d\phi = 0$ , temos que, a velocidade da luz na direção radial é (Equação 3.5.3):

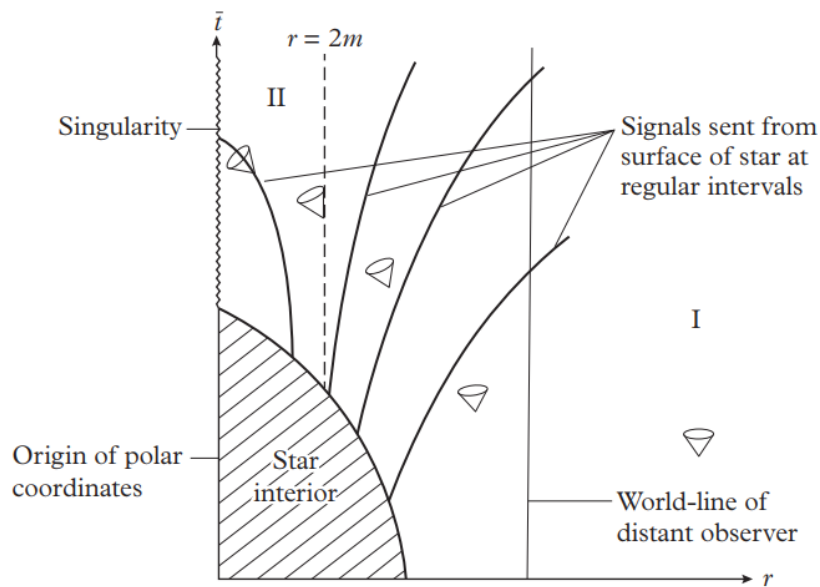
$$\frac{dr}{dt} = c \left( 1 - \frac{R_s}{r} \right) \quad (3.5.3)$$

quando  $r \gg R_s$ ,  $dr/dt \cong c$ , como esperado em um espaço tempo plano. Entretanto, em casos que  $r = R_s$ ,  $dr/dt = 0$ , a luz está de fato congelada no raio Schwarzschild. A superfície esférica para esta situação age como uma barreira impedindo que recebamos informações de dentro do objeto. Logo, para uma estrela que colapsou dentro do raio Schwarzschild é chamado de buraco negro.

## 4 BURACOS NEGROS

A teoria evolucionar das estrelas, como no diagrama Hertzsprung-Russell (Figura 2.2.2), diz que as estrelas cujas massas são da ordem do Sol podem atingir um estado final de equilíbrio como uma Anã Branca ou uma Estrela de Nêutron. Entretanto, como foi visto, para massas muito maiores do que  $8M_{\odot}$ , esse equilíbrio não é possível. Neste caso, a estrela se contrairá de tal ponto que os efeitos gravitacionais superarão a pressão interna e as tensões e não serão capazes de interromper a contração adicional. Segundo D’Inverno et. al (2022), a relatividade geral prevê que uma estrela esfericamente simétrica necessariamente se contrairá até que toda a matéria contida na estrela chegue a uma singularidade no centro de simetria (Figura 4.1)

Figura 4.1 – Diagrama Espaço-Tempo Bidimensional do Colapso Gravitacional



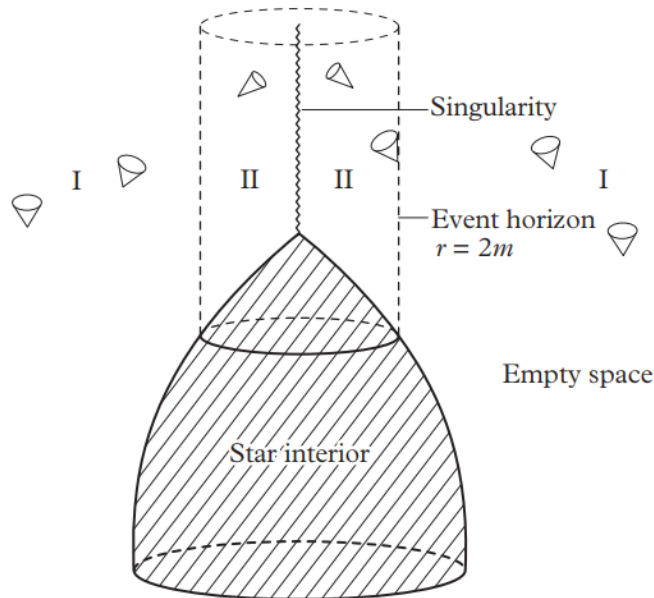
Fonte: (D’Inverno et. al, 2022 p. 333) – Colapso gravitacional (duas dimensões espaciais suprimidas).

A Figura 4.1 ilustra uma situação em que o colapso de uma estrela esfericamente simétrica e (não rotativa) ocorre se aproximando do raio de Schwarzschild. Na Figura 4.1 temos a linha do observador no qual pode seguir uma estrela em colapso através do raio de Schwarzschild. As linhas curvas representam sinais enviados pelo observador na superfície da estrela em intervalos de tempo regulares de acordo com o relógio desse observador, logo, à medida que a superfície atinge o raio de Schwarzschild, um observador receberá os sinais enviados com intervalos de tempos cada vez maiores. O sinal em  $R_s = 2GM/c^2$  (descrito como

$r = 2m$ ,  $c = G = 1$ ) nunca escapará, e todos os sinais serão arrastados à singularidade no centro. Em contrapartida, só será possível ver a superfície da estrela como era antes de mergulhar através do raio de Schwarzschild. Neste caso, o observador não veria nada da superfície, uma vez que a intensidade observada diminuiria muito rapidamente devido ao desvio para o vermelho infinito no rio de Schwarzschild. Com isso, a estrela desapareceria de vista, deixando para trás um Buraco Negro no espaço tempo.

Para complementar, podemos ver a (Figura 4.2) como um diagrama tridimensional rotacionando a figura 4.1 do colapso gravitacional.

Figura 4.2 – Diagrama Espaço-Tempo Tridimensional do Colapso Gravitacional



Fonte: (D’Inverno et. al, 2022 p. 334) – Colapso gravitacional (uma dimensão espacial suprimida).

#### 4.1 Horizonte de Eventos

O horizonte de eventos é uma fronteira teórica ao redor de um Buraco Negro a partir da qual a força da gravidade é tão intensa que nada, nem mesmo a luz, pode escapar. Isso ocorre porque a velocidade da luz é inferior à velocidade de escape do Buraco Negro. Em tal campo, ocorre um paradoxo no qual as leis da física não podem ser diretamente aplicadas, uma vez que resultam em absurdos matemáticos. Na Relatividade Geral, o horizonte de eventos é um termo utilizado para as fronteiras do espaço-tempo, definido de acordo com um ponto observador, de

onde os eventos não podem interagir com ele. A luz emitida de um lado do horizonte nunca chega ao observador, assim como tudo o que cruza nunca mais é visto.

## 4.2 Singularidade

Em uma definição mais simples, a Singularidade é o coração dos Buracos Negros, onde todas as leis da natureza são desafiadas. Nesse ponto central, toda a massa se concentra, e a densidade é infinita. As equações da física param de funcionar, pois a densidade distorce o espaço-tempo. É o maior mistério de todos os tempos que desafia nossa compreensão.

Para um detalhamento formal, temos o que a física chama de Teoremas sobre Singularidade. É o que Misner et. al. (2017) chamam de ferramentas ou técnicas globais para análise de horizontes e singularidades devido a prova do Teorema pioneiro de Penrose (1965) sobre singularidade, que deu origem a essas técnicas para estudar o espaço-tempo.

As singularidades são fenômenos muito gerais e não podem ser descartadas, é sabido desde 1965, graças aos teoremas sobre singularidade provados por Penrose, Hawking e Geroch. Antes de examinar os teoremas precisamos esclarecer o conceito de Singularidade. Não é simples como a que tentei trazer na primeira parte desse tópico. A definição mais técnica, proposta por Schmidt (1970), é mais ou menos assim,

“Em uma variedade de espaço-tempo, considere todas as geodésicas semelhantes ao espaço (caminho de táquions), todas as geodésicas nulas (caminho de fótons), todas as geodésicas semelhantes ao tempo (caminhos de observadores em queda livre) e todas as curvas semelhantes ao tempo com aceleração limitada (caminhos ao longo dos quais os observadores são capazes, em princípio, de se mover). Suponha que uma dessas curvas termine após o lapso do comprimento próprio finito (ou parâmetro afim finito no caso geodésica nula). Suponha, ainda, que seja impossível estender a variedade espaço-tempo além desse ponto terminal – por exemplo, devido à curvatura infinita ali. Então esse ponto terminal, junto com todos os pontos terminais adjacentes, é chamado de Singularidade”. (Misner et al, 2017, p. 934, cita Schmidt, 1970).

o que poderia ser mais singular do que cessação do pobre *táquion*, fóton ou observador que se move ao longo da curva terminada?

Agora veremos o teorema que satisfaz as equações previstas por Penrose e Hawking para a singularidade.

**TEOREMA:** *Um espaço-tempo  $M$  contém necessariamente geodésicas incompletas, inextensíveis, semelhantes ao tempo nulo (e é, portanto, singular no sentido de Schmidt) se, além das equações de Einstein, as seguintes quatro condições forem válidas:*

1.  $M$  não contém curvaturas fechadas semelhantes ao tempo (Razão – condição de causalidade capaz).
2. Em cada evento em  $M$  e para cada vetor unitário semelhante ao tempo  $u$ , o Tensor de Energia-Momentum satisfaz (condições energéticas razoáveis).

$$\left( T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} T \right) u^\mu u^\nu \geq 0 \quad (4.2.1)$$

3. A variedade é geral (ou seja, não muito simétrica) no sentido de que toda a geodésica temporal ou nula com tangente unitária  $u$  passe por pelo menos um evento onde a curvatura não está alinhada com ela de uma maneira específica).

$$u_{[\mu} R_{\nu]\gamma\delta [\epsilon} u_{\rho]} u^\gamma u^\delta \neq 0 \quad (\text{em algum ponto da geodésica}) \quad (4.2.2)$$

4. A variedade  $M$  contém uma superfície presa.

todas essas condições parecem eminentemente razoáveis para qualquer espaço-tempo fisicamente realista.

A relevância do teorema de Howking-Penrose para o colapso decorre da expectativa geral de que, no universo real, as superfícies aprisionadas<sup>9</sup> sempre existirão logo abaixo de todos os horizontes futuros.

Se as singularidades são realmente característica tão geral do colapso, então a natureza da singularidade é de grande importância para quem caia no horizonte. A natureza das

---

<sup>9</sup> Superfícies Aprisionada é uma superfície cuja área diminui quando ela se propaga à velocidade da luz em ambas a direções possíveis.

singularidades mudará várias vezes ao longo do tempo, entretanto aqui estão algumas possibilidades que (Misner et. al., p. 340, 2017) define:

**Possibilidade 1:** “A singularidade no ponto final de um colapso realista é uma região de forças gravitacionais de maré infinitas (curvas infinitas), que esmaga a matérias em colapso até uma densidade infinita. Oppenheimer-Snyder (1939); Podures(1966); Lifschitz e Khalatnikov (1963,1970); Misner (1969); Belinsky e Khalatnikov (1969,1970);”

**Possibilidade 2:** “A singularidade   uma região do espaço-tempo na qual terminam as geodésicas semelhantes ao tempo ou nulas, não por causa de forças gravitacionais de maré infinitas ou esmagamento infinito, mas por causa de outras patologias mais sutis. (Espaço Taub-NUT); Misner e Taub (1968); Geroch (1968).”

**Possibilidade 3:** “A singularidade pode ser suficientemente limitada em “tamanho” e influência para que toda ou a maior parte da matéria em colapso a evite com sucesso. A matéria não pode então explodir de volta através do horizonte onde desceu; o horizonte é uma membrana unidirecional e não deixa nada escapar, e então reexplodir em alguma outra região do espaço-tempo<sup>10</sup>. Várias solu es analíticas para esferas carregadas em colapso reexplodem dessa maneira. Novikov (1966), de la Cruz e Israel (1967), Bardeen (1968).”

Se, como se suspeita hoje, as singularidades são de um tipo muito físico, de curvatura infinita, então devemos enfrentar “a questão do estado final” de Jhon Wheeler (1964). Segundo Wheeler, as singularidades de curvatura infinita sinalizam um colapso na relatividade clássica – um colapso forçado pelo início dos fenômenos gravitacionais quânticos.

Se a quantiza o da gravidade irá salvar realmente o espaço-tempo de tais singularidades, não podemos saber até que a união arrepiante da Relatividade Geral com a Física Quântica tenha se consumado.

<sup>10</sup> Topologia de espaço-tempo multiplamente conectada,” Buraco de Minhoca”

### 4.3 Novas Evidências dos Buracos Negros

O que antes era apenas um resultado matemático, como uma possível solução da equação do Campo de Einstein, atualmente tomou forma com várias evidências registradas por equipamentos e telescópios de ponta.

#### 4.3.1 O Primeiro Buraco Negro Detectado

Em 1964, foi lançado, pela NASA, dois foguetes suborbitais *Aerobee* com contadores Geiger a bordo. Essa missão<sup>11</sup> tinha como objetivo mapear locais de origem de emissões de radiação de alta energia. Como as ondas de alta energia, com raios X e raios Gama, são absorvidos pela atmosfera da terrestre<sup>12</sup>, a observação dessas emissões mais energéticas deve ser realizada na órbita da Terra. Como resultado, foram detectadas oito fontes de emissões de raios X. Uma delas, extremamente forte, localizada na constelação de Cisne, chamou a atenção. Nessa região não havia nenhum tipo de comprimento de onda tão intensa de luz visível ou rádio, mas era em raio X.

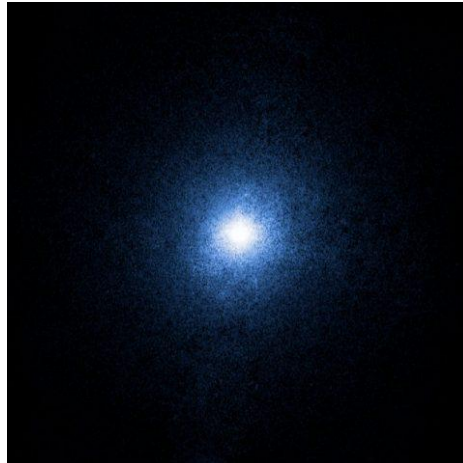
Mais tarde, os observatórios *Leinden Observatory*, na Holanda, e o *Nacional Radio Astronomy Observatory*, nos EUA (Estados Unidos da América), detectaram de forma independente que a emissão de Raio X estava na estrela HDE 226868 (Figura 4.3.1.1), uma supergigante azul. Mas essas emissões, tão intensas e energéticas, não poderiam ser emitidas por uma estrela desse tipo. Portanto, concluiu-se que deveria existir um objeto invisível que fosse capaz de aquecer o gás até milhões de graus Celsius, tornando-o capaz de emitir raios X.

---

<sup>11</sup>Chandra X-ray Observatory: [https://chandra-harvard.edu.translate.google/about/axaf\\_mission.html?\\_x\\_tr\\_sl=en&\\_x\\_tr\\_tl=pt&\\_x\\_tr\\_hl=pt&\\_x\\_tr\\_pto=tc](https://chandra.harvard.edu.translate.google/about/axaf_mission.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=pt&_x_tr_hl=pt&_x_tr_pto=tc)

<sup>12</sup>Elas são amortecidas por dois processos: Absorção Fotoelétrica e espalhamento Compton.

Figura 4.3.1.1 – Imagem de HDE 226868



Fonte: NASA – Imagem tirada pelo *Chandra Observatory*.

Em 1971 foi anunciado a descoberta de um corpo celeste muito massivo junto de HDE 226868. Por meio de medidas de desvio para o vermelho da luz, viu-se que apresentava desvios periódicos, ora vermelho ora azul. Devido a essa característica, observou-se que a estrela estava orbitando o objeto invisível mais massivo que ela mesma. Com isso, estimou-se que poderia ser um buraco negro, pois outros objetos como as estrelas de nêutrons não conseguiriam exceder 3 massas solares.

Até o final de 1973, com diversas evidências em mãos, a comunidade astronômica já estava convencida de que Cygnus X-1 poderia ser um Buraco Negro.

#### 4.3.2 Fusão de Buracos Negros

Uma das observações que corroborou a existência de buracos negros foi a busca por ondas gravitacionais – prevista por Einstein na Teoria de Relatividade. Grande parte do trabalho produzido foi desenvolvido pelo LIGO (*The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*)<sup>13</sup> e pelo interferômetro VIRGO<sup>14</sup> (situado na Europa). Eles foram os primeiros a ver um Buraco Negro engolir uma estrela de nêutrons.

A Fusão de Buracos Negros ocorre quando dois buracos negros se aproximam e colidem, resultando na formação de um novo buraco negro. Durante esse processo, uma

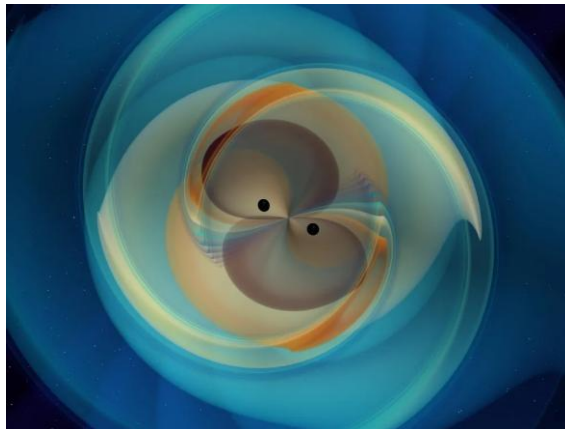
<sup>13</sup> Observatório de Ondas Gravitacionais por Interferômetro Laser (LIGO)

<sup>14</sup> O nome VIRGO é uma referência a constelação de Virgo no superaglomerado de Virgem, o maior aglomerado do grupo local de galáxias.

quantidade significativa de energia é liberada na forma de ondas gravitacionais. Por sua vez, essas ondas são perturbações no tecido do espaço-tempo, propagando-se à velocidade da luz.

Em 2019, os cientistas registraram a fusão mais massiva já observado entre dois Buracos Negros (Figura 4.3.2.1). Segundo o LIGO (2019), esses objetos tinham massas de cerca de 85 e 66 vezes a massa do Sol. Resultando na formação de um novo Buraco Negro com uma massa de 142 vezes a massa Solar.

Figura 4.3.2.1 – Simulação da fusão de dois Buracos Negros



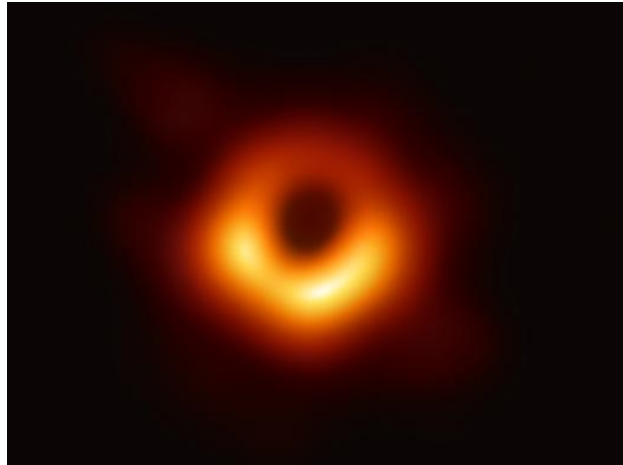
Fonte: (Instituto de Física Gravitacional Max Planck), com colaboração do *Simulating eXtreme Spacetimes* (SXS) – Ilustração feita a partir de uma simulação numérica mostra os dois buracos negros em espiral antes de se fundir, emitindo ondas gravitacionais — Foto: N. Fischer, H. Pfeiffer, A. Buonanno.

### 4.3.3 M87 e Sagittarius A\*

O marco mais incrível na astrofísica e no mundo científico foi a primeira foto de um Buraco Negro. Em 2019, o *Event Horizon Telescope* (EHT), uma colaboração internacional de cientistas, divulgou a primeira imagem de um Buraco Negro (Figura 4.3.3.1).

A imagem revela o Buraco Negro no centro da galáxia Messier 87, que está localizada na constelação de Virgo. Este Buraco Negro está a 55 milhões de anos-luz da Terra e tem massa de 6,5 bilhões de vezes a do nosso Sol. Esta imagem é o mais próximo que foi possível chegar de um Buraco Negro.

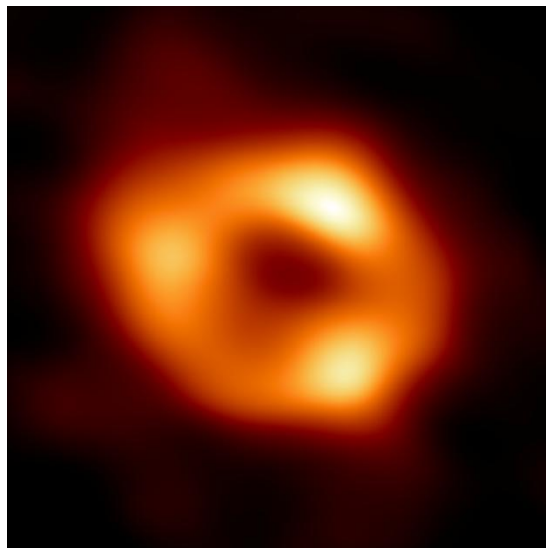
Figura 4.3.3.1 – Imagem de M87



Fonte: (EHT *Colaboracion*, 2019) – A primeira imagem de um buraco negro, usando observações do EHT do centro da galáxia M87 – A imagem mostra um anel brilhante e a luz se curvando na gravidade intensa ao redor do buraco negro que é 6,5 bilhões de vezes mais massivo que o Sol.

Mais tarde, em 2022, os astrônomos revelam a primeira evidência visual de um buraco negro supermassivo no centro da nossa galáxia. Segundo o próprio EHT, a matriz que ligava oito observatórios de rádios existentes em todo o planeta para formar um único telescópio virtual, registrou o que já se especulava. A imagem (Figura 4.3.3.2) mostra o resultado final das redes de telescópios EHT *colaboracion*.

Figura 4.3.3.2 – Imagem de Sagittarius A\*



Fonte: (EHT *Collaboracion*, 2022) – Primeira imagem do corpo supermassivo no centro da Via Láctea. A imagem é uma média das diferentes imagens que a Colaboração EHT extraiu de suas observações de 2017.

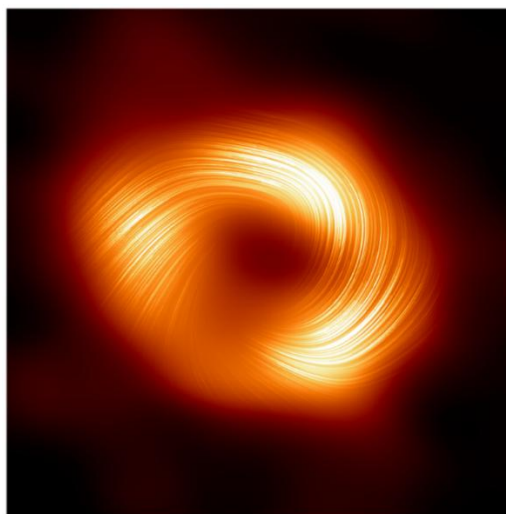
Apesar de não poder ver o horizonte de eventos em si, pois não emite luz, foi possível ver o gás brilhante orbitando ao redor do Buraco Negro – a parte escura no centro do gás – e além disso concordando com as previsões da Teoria da Relatividade geral de Einstein.

Foram desenvolvidas novas ferramentas sofisticadas para analisar o movimento do gás ao redor de Srg A\*. Os pesquisadores trabalharam por 5 anos usando supercomputadores para combinar e analisar esses dados, ao mesmo tempo que comparavam com simulações feitas a partir das observações.

Em 2024, depois de aprimorar as ferramentas, os astrônomos revelam campos magnéticos em espirais na borda de Srg A\* (Figura 4.3.3.3). O EHT *Colaboracion* (2024) descobriu campos magnéticos visto em luz polarizada, esta nova visão do Buraco negro no centro da Via Láctea revelou estruturas de campos magnéticos surpreendentemente semelhantes ao Buraco Negro do centro da galáxia M87, sugerindo que campos magnéticos são comuns em Buracos Negros.

Sabe-se que a luz é uma onda eletromagnética oscilante, ou movimento, que permite ver os objetos. Por vezes, a luz oscila numa orientação preferida, e chamamos de polarizada. Segundo o próprio EHT, no plasma em torno dos Buracos Negros, as partículas girando em torno da linha do campo magnético transmitem um padrão de polarização perpendicular ao campo. Isso permite que os astrônomos vejam com cada vez mais detalhes o que acontece nas regiões dos Buracos Negros e mapeiam suas linhas de campo.

Figura 4.3.3.3 – Imagem de Sagittarius A\*



Fonte: (EHT *Collaboracion*, 2024) – A imagem produzida com luz polarizada. Esta é a primeira vez que os astrônomos foram capazes de medir a polarização, uma assinatura de campos magnéticos, tão perto de Srg A\*. As linhas mostram a orientação da polarização, que está relacionada ao campo magnético em torno da sombra do Buraco negro.

Essas imagens deixaram a comunidade científica mais animada, pois fornecem novas maneiras de comparar e constatar Buracos Negros de diferentes tamanhos e massas. Com o avanço da tecnologia, as imagens são susceptíveis de revelar mais segredos de Buracos Negros e suas semelhanças ou diferenças.

Abordar essas descobertas em uma sala de aula do ensino básico pode refletir inúmeros benefícios, tanto para o aprendizado quanto para a maneira como os alunos enxergam o Universo. Explorar esses conceitos desafia os alunos a questionarem o que sabem sobre física, gravidade e até mesmo o tempo e o espaço. O tema desperta curiosidade e, ao discorrer sobre essas evidências mais recentes, permite que os alunos estejam conectados à ciência atual, mostrando como as teorias e as ideias evoluem, além de abordar os mais diversos tópicos da ciência. No capítulo seguinte, veremos as possibilidades e metodologias para tratar desses assuntos em sala de aula.

## 5 PARÂMETROS CURRICULARES NACIONAIS

O ensino de Física está relacionado com conjuntos de competências bem específicas, que influenciam para que o aluno consiga reconhecer os fenômenos naturais e tecnológicos no dia a dia. Além disso, possibilita uma nova visão do ser humano como agente no processo de construção do conhecimento científico e no avanço tecnológico atual. Essas mudanças indicam introdução à linguagem própria da Física, que se baseia em conceitos e língua específica de acordo com o conhecimento científico.

Neste contexto, a Astrofísica e Cosmologia são vertentes que se encaixam nessa nova visão, no qual se encontra na Astronomia, que sempre esteve presente desde o surgimento do homem no Planeta Terra, com isso sendo considerada a ciência mais antiga (Filho, Saraiva, 2004) e desde de seus primórdios chama a atenção da população em geral. Mesmo assim, nota-se que o ensino da Astronomia está engatinhando no Brasil, embora esteja presente nos livros didáticos do ensino básico e nos livros do ensino médio na disciplina de Física.

A partir dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN), foi dado um sentido novo ao conhecimento de Física. Este sentido volta-se para um cidadão moderno, influente, que se permite uma compreensão mais profunda da realidade. Entretanto, após concluir o ensino fundamental e médio, o aluno não tem mais contato com o conhecimento físico, mesmo sendo capaz de interagir e compreender a realidade em que vive. Nos PCN encontra-se uma proposta pautada no desenvolvimento de habilidades e competências as quais são divididas em três eixos: Representação e Comunicação; Investigação e Compreensão; e contextualização sociocultural. Estas competências trabalhadas de forma isoladas não apresentam significado. Elas devem estar integradas com outras áreas do conhecimento, devendo ser contextualizadas, e assim elas passam a ter significado no cotidiano do aluno. Uma dessas possibilidades de aplicação são os estudos em buracos negros que reúnem aspectos relevantes para integralizar essas habilidades e competências.

Com as Orientações Educacionais Complementares aos parâmetros Curriculares Nacionais – PCN+ (Brasil, 2002), documento com o objetivo de articular a implementação das competências disciplinares, apontado que o importante para o aprendizado de Física não é que o docente deva ensinar o conteúdo programático que nacionalmente engloba as áreas de Mecânica, Termodinâmica, Eletromagnetismo e Óptica, mas sim adotar conteúdos e métodos que possibilitem a desenvolvimento de competências, assim a Astrofísica e Cosmologia se enquadram nesta proposta.

A Base Nacional Comum Curricular (BNCC) define as aprendizagens essenciais que devem ser desenvolvidas na Educação Básica Brasileira (Brasil, 2024), foi construída a partir de estudos, ciclos, debates e até mesmo consultas públicas. Como ela deve ser seguida pelas escolas brasileiras, muitas questões pertinentes ao cotidiano do educando são apresentadas em suas estruturas. Exemplo disso, são os conhecimentos da Astrofísica e Cosmologia que está alinhado com a habilidade EF09CI17 da BNCC no qual consiste em:

“Analisar o ciclo evolutivo do Sol (nascimento, vida e morte) baseado no conhecimento das etapas de evolução de estrelas de diferentes dimensões e os efeitos desse processo no nosso planeta” (BNCC)

Segundo a própria BNCC, este tema está relacionado a Terra e Universo com o objetivo de descrever a composição, estrutura e localização do Sistema solar; além de compreender alguns aspectos da Astronomia.

Isso possibilita explorar os Buracos Negros no ensino no qual pode ser uma maneira fascinante de envolver os alunos na aprendizagem de conceitos científicos complexos como, por exemplo, conceitos fundamentais; os alunos podem aprender sobre relatividade geral, atividades práticas; como funciona o espaço-tempo e curvatura, estudo interdisciplinar; colaborando com o processo de aprendizagem, recursos digitais; uso de tecnologias para explorar os fenômenos enigmáticos dos Buracos Negros, e avanços recentes; os alunos podem aprender os avanços e pesquisas sobre Buracos Negros, como a primeira imagem de um Buraco Negro capturada em 2019 e a imagem do Buraco Negro no centro da nossa galáxia (*Sagittarius A\**), divulgada em 2022.

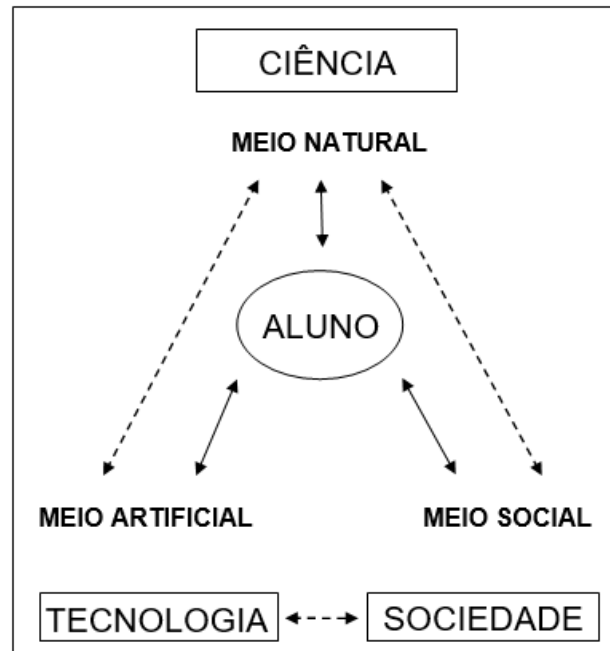
No entanto, ao ensinar sobre os Buracos Negros, é importante apresentar os conceitos de uma maneira que seja acessível e envolvente para os alunos, usando linguagem clara e exemplos concretos sempre que possível, logo, possibilitando a aplicação em sala de aula.

Nesse viés, podemos aplicar alguns métodos para o ensino de Buracos Negros com enfoque CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), no qual está vinculado à educação científica do cidadão. Para caracterizá-lo, Hofstein e et. al (1988) propõem a representação geométrica (Figura 5.1) a qual é por eles assim explicada:

“CTS, significa o ensino do conteúdo de ciência no contexto autêntico do seu meio tecnológico e social. Os estudantes tendem a integrar a sua compreensão pessoal do mundo natural (conteúdo da ciência) com o mundo construído pelo homem (tecnologia) e o seu mundo social do dia a dia (sociedade). Essas interrelações de ciência – tecnologia – sociedade são sugeridas pelas setas da figura (...). As setas

pontilhadas representam as conexões feitas pelas matérias de ensino de CTS que fornecem conteúdo de ciências neste contexto interativo” (Hofstein e et. al, 1988, p.358)

Figura 5.1 – Interpretação Geométrica



Fonte: (Hofstein et. al, (1988), p.358) – O relacionamento entre ciência, tecnologia, sociedade e aluno.

Pode-se conseguir essas conexões através da *internet*, *apps*, *software* e redes sociais; porém isso se tornou um desafio para os professores e buscar uma alternativa para a construção das aulas tornou mais difícil. Entretanto, a cada momento, essas tecnologias tornam-se mais presente no dia a dia dos alunos e os professores precisam acompanhar as atualizações e tendências atuais. Giaordan (2015, p.155) destaca a internet como “... um *locus* quase universal para o desenvolvimento de práticas educativas” e isso se tornou muito grande atualmente, professores *Youtubers* proporcionando vídeos cheios de animações e exemplificando os fenômenos físicos ou em redes sociais com vídeos curtos de curiosidades do mundo científico. Não há dúvidas que a internet se tornou uma peça chave para a propagação de ideias no qual pode ser acessado por um *smartphone* que, também, pode ser usado em sala de aula. Michel et. all. (2004), destacam o uso de *software* e sítios educacionais, que podem auxiliar os professores em suas aulas. Para o ensino de buracos negros destaquei alguns *softwares* e *apps* usados para a proposta além de materiais que podem ser construídos para exemplificar algumas características do espaço-tempo.

## **6 METODOLOGIA**

Neste capítulo, serão abordados os estágios essenciais para a elaboração do material didático e das ferramentas metodológicas voltadas para a prática de ensino sobre Buracos Negros. Serão apresentados os conhecimentos fundamentais, os recursos expositivos, os softwares utilizados, bem como os critérios para a seleção da instituição de ensino e da turma que participará do experimento.

### **6.1 Tipo de Pesquisa**

Para o estudo optou-se por uma pesquisa de campo, do tipo qualitativa e quantitativa-descritiva. Segundo Gil (2008), procura-se realizar, basicamente, por meio da observação direta das atividades do grupo a ser estudado além das entrevistas com informes para captar as explicações e interpretações do que ocorrem naquela realidade. Com o objetivo de mensurar a quantidade de alunos envolvidos e avaliar a efetividade do método, a pesquisa tem caráter qualitativo e quantitativo-descritivo que possibilitará a verificação estatística da proposta nos colégios escolhidos para aplicação.

### **6.2 Local e Participantes**

Esta proposta de ensino de Buracos Negros está vinculada aos temas de Física Moderna e Contemporânea, no qual as turmas onde se deseja abordar este conhecimento de Buracos Negros já tiveram ou estão tendo contato com algum conteúdo relacionado à Física Moderna. Neste caso, a Astrofísica e a Cosmologia já fazem partes dos conhecimentos abordados nas escolas, pois são multidisciplinares e interdisciplinares. Por exemplo, ao se estudar o Sol são necessários conhecimentos de heliocentrismo e gravitação (classicamente conteúdo do 1º ano) ou modelo atômico e eletromagnetismo (Física moderna; conteúdo do 1º ano e 2º ano).

Para desenvolver essa atividade, uma turma de alunos do **3º ano do Ensino Médio** seria mais apropriada, levando em conta a hipótese de que os alunos já estejam mais preparados para a aplicação destes conteúdos, entretanto poderá ser trabalhado nas demais turmas de forma adaptada. A atividade, devido vários imprevistos que houveram, foi feita na turma de **2º ano** do ensino médio do **Colégio Rio Tapajós**.

O colégio Rio Tapajós é uma instituição pública estadual que oferece ensino fundamental e médio. As aulas são realizadas no período diurno, e a escola também disponibiliza a modalidade de Educação de Jovens e Adultos (EJA) para aqueles que desejam concluir seus estudos. Ela está situada na Avenida Curua-Una, no bairro Diamantino, que abriga diversas instituições educacionais e possui infraestrutura que inclui acessibilidade, áreas verdes e espaços para atividades esportivas e culturais. A escola também valoriza a inclusão, com rampas e salas adaptadas para pessoas com deficiência<sup>15</sup>. Atualmente, a escola conta com aproximadamente 1.158 alunos matriculados, de acordo com o Censo Escolar<sup>16</sup> de 2023.

### 6.3 Metodologia do Trabalho

A proposta de ensino de Buracos Negros seguiu cinco etapas como ilustrado abaixo (quadro 6.3.1)

Quadro 6.3.1 – Metodologia de trabalho

I	Preparação do conteúdo.
II	Construção da Apresentação (slide).
III	Preparação do material para exposição.
IV	Levantamento de apps e <i>software</i> .
V	Aplicação.

Para a Preparação do Conteúdo (etapa I), fez-se o uso da bibliografia utilizada para a elaboração desta monografia no que tange aos conhecimentos avançados de Astrofísica e Cosmologia. Depois desse estudo, seguiu o planejamento metodológico para os principais

<sup>15</sup> Escol - <https://www.escol.as/24971-rio-tapajos?form=MG0AV3&form=MG0AV3> Acessado em 26 de fev 2025.

<sup>16</sup> Qedu - <https://qedu.org.br/escola/15551890-eeefm-rio-tapajos?form=MG0AV3> Acessado em 26 de fev 2025.

tópicos a serem abordados na aula tanto os que já são demonstrados no ensino médio quanto novos tópicos de Física Moderna. Esses conteúdos serão a base para compreender os conceitos fundamentais sobre Buracos Negros. Com isso, no (quadro 6.3.2), estão distribuídos os conteúdos a serem ministrados.

Quadro 6.3.2 – Conteúdos para a preparação da aula

AULA	TEMA	CONTEÚDO
<b>1</b>	<b>Conteúdos básicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Heliocentrismo;</li> <li>– Leis de Kepler;</li> <li>– Gravitação;</li> </ul>
<b>2</b>	<b>Cosmologia</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Surgimento do Universo;</li> <li>– Princípio Cosmológico;</li> <li>– Big Bang;</li> </ul>
<b>3</b>	<b>Astrofísica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Estrutura do Sol;</li> <li>– Tipos de Estrelas;</li> </ul>
<b>4</b>	<b>Relatividade Geral</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Postulados;</li> <li>– Geometria do espaço-tempo;</li> </ul>
<b>5</b>	<b>Buracos Negros</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Disco de Acreção;</li> <li>– Raio de Schwarzschild;</li> <li>– Singularidade;</li> </ul>

Para a Construção da Apresentação (etapa II), aulas expositivas-dialogadas seria a forma mais apropriada para abordar os conteúdos da tabela 6.3.2, utilizando-se de ilustrações (imagens dos Objetos Estelares e Buracos Negros) e animações (simuladores e vídeos dos Objetos Astronômicos) com recursos computacionais. Além disso, serão utilizados: Projetor, notebook, quadro branco, para demonstração dos cálculos; e materiais expositivos, para demonstrar visualmente a curvatura do espaço-tempo. Essa parte é muito importante para os procedimentos metodológicos, eles vão ajudar os alunos a similar os objetos que são muitos distantes de sua realidade.

#### 6.4 Materiais e Software

Para a preparação dos matérias expositivos (etapa III), destaquei os principais materiais para trabalhar com os alunos em sala de aula. São matérias simples e fáceis de encontrar. Os

materiais de exposição também serão fundamentais para a prática em sala de aula, pois eles auxiliarão na visualização das atipicidades das geometrias do espaço-tempo e dos Buracos Negros como ilustra as (Figura 6.4.1) e (Figura 6.4.2).

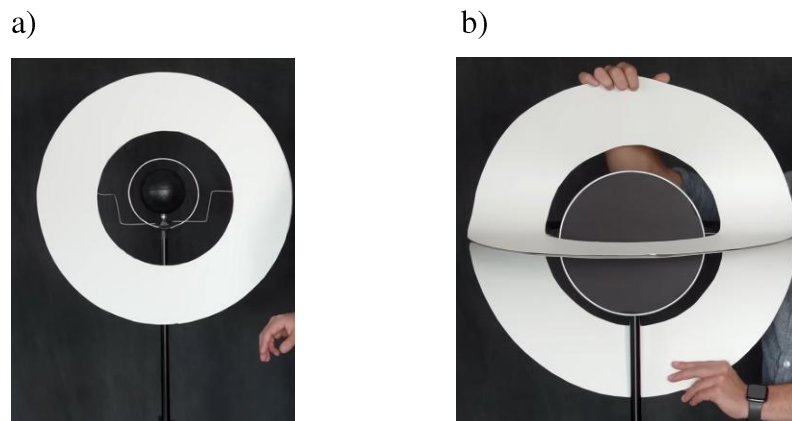
Figura 6.4.1 – Base do Espaço – Tempo



Descrição: (Observatório Nacional<sup>17</sup>) na imagem temos a representação do espaço-tempo plano, para ilustrar como a massa curva o espaço-tempo.

Na construção dessa base foram utilizados os seguintes materiais: (1) um pano de algodão preto de 1m x 1m; (2) uma peneira para usar como base circular de aro 55 cm (3) 12 prendedores de papel de 25mm.

Figura 6.4.2 – Disco de Acreção



Fonte: (Veritasium<sup>18</sup>) na imagem (a) temos a singularidade representada com a bola de isopor, um disco que representa a esfera de fótons à  $1,5R_s$ . A imagem (b) mostra a representação da sombra formada vista da perspectiva sugerida e o disco de acreção.

<sup>17</sup> Observatório Nacional leva atividades de Ciência e Tecnologia para a 20ª SNCT – Disponível em <https://www.gov.br/observatorio/pt-br/assuntos/noticias/observatorio-nacional-leva-atividades-de-ciencia-e-tecnologia-para-a-20a-snct> Acessado 29 jul 2023

<sup>18</sup> Veritasium - Disponível em <https://youtu.be/zUyH3XhpLTo?si=B59xAfRtVa6hSIFb> Acesso em 10 jul. 2024

Na construção da ilustração do disco utilizados os seguintes materiais: (1) uma bola de isopor pintada na cor preto; (2) 3 cartolinas: 1 na cor preto e 2 na cor branco; (3) Haste de suporte (Cano PVC) ou um Tripé.

Para o levantamento de Software (etapa IV), busquei uma estratégia para o levantamento de dados, fugindo do clássico questionário, foi utilizado o *Kahoot*. Esse software é uma ferramenta de aprendizagem em forma de *quizzes* ou teste de múltipla escolha que possibilita construir atividades interativas dos mais diversos temas e, nesse caso, os conteúdos trabalhados na QUADRO 6.3.2. Criado em 2012 por Morten Versvik, Johan Brand e Jamie Brooker em conjunto com a Universidade Norueguesa de Ciências e Tecnologia (NTNU), com o objetivo de poder trabalhar diversos assuntos em várias áreas do conhecimento e acessível a todos.

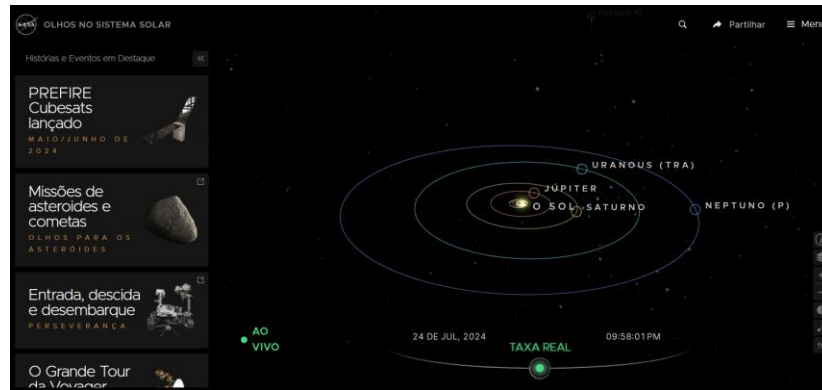
O *Kahoot* é uma plataforma virtual em forma de jogo e é bastante atrativa, proporcionando um espaço para se trabalhar em sala de aula. Costa e Oliveira (2015), sugere que o professor possa utilizar o *Kahoot* de diversas formas, mas tudo dependerá das finalidades e objetivos educacionais na sala de aula. O jogo tem alguns gatilhos mentais como a “competitividade”, que proporciona uma interação saudável entre os alunos. Segundo Ferreira (2019), os gatilhos mentais são recursos estratégicos que estimulam o cérebro a tomar decisões e possibilitam reter a atenção, e isso é importante quando se trata de adolescentes. Assim, as perguntas feitas tinham uma pontuação específica e com tempo de resposta (gatilho mental de “urgência”), o que possibilitou fugir do antigo questionário, pois é uma ferramenta mais divertida, dinâmica e envolvente.

Para ilustrações dos objetos, além das imagens na apresentação, trouxe alguns aplicativos e simuladores disponíveis gratuitamente e também pagos.

Em primeiro lugar temos o NASA’s *Eyes*<sup>19</sup>, um simulador online baseado em Web 3D desenvolvido pela NASA (Figura 6.4.3), no qual podemos ter uma imersão do Sistema Solar, Asteroides próximos à Terra, Exoplanetas e até mesmo missões sendo realizadas atualmente. Um aplicativo excelente e gratuito no qual podemos utilizar para apresentar o Sistema Heliocêntrico ou falar de algumas curiosidades astronômicas.

---

<sup>19</sup> NASA’s *Eyes*. Disponível em <https://science.nasa.gov/eyes/>

Figura 6.4.3 – Interface do Nasa’s *Eyes*

Fonte: (NASA - <https://science.nasa.gov/eyes>) – A imagem é a interface do aplicativo “Eyes on the Solar System” no qual se pode notar as órbitas dos planetas e informações dos objetos que fazem parte do nosso sistema solar.

Em segundo lugar, o *Solar System Scope*<sup>20</sup> é um aplicativo Web 3D e também disponível para Android e IOS desenvolvido pela INOVE, localizada na União Europeia. Como o próprio nome sugere, é um modelo do Sistema Solar em tempo real e com posições precisas dos objetos. Além disso, segundo o site, *Solar System Scope* é uma enorme enciclopédia espacial digital cheia de detalhes sobre o Sistema Solar (Figura 6.4.4).

Figura 6.4.4 – Interface do *Solar System Scope*

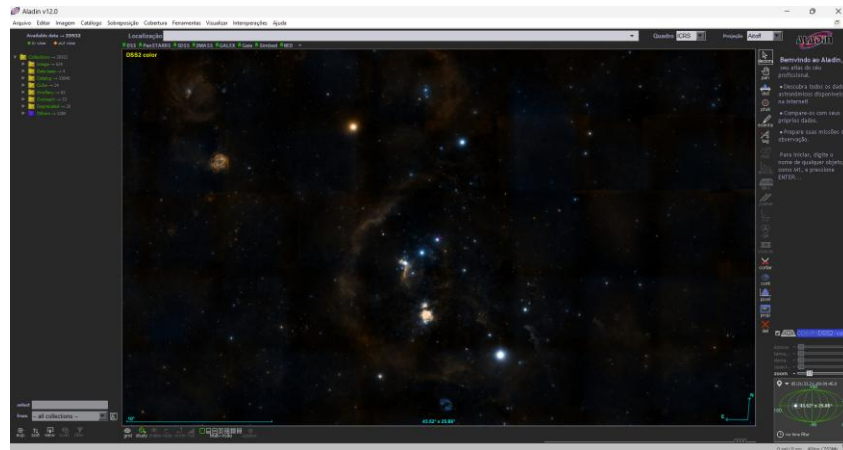
Fonte: (INOVA - <https://www.solarsystemscope.com/>) – A imagem é a interface do aplicativo “Solar System Scope” no qual se pode navegar no sistema solar e obter informações dos objetos que fazem parte do nosso sistema solar.

Os dois aplicativos são excelentes e trazem uma imersão cativante e interativa com os objetos do nosso sistema solar.

<sup>20</sup> *Solar System Scope*. Disponível em <https://www.solarsystemscope.com/>

O próximo aplicativo é o *Aladin Sky Atlas*<sup>21</sup> desenvolvido pelo LIGO, é um aplicativo que nos dá um mapa dos céus vista dos telescópios. Segundo a CDS (*Strasbourg astronomical Data Center*) – responsável pela distribuição –, o *Aldin sky Atlas* permite ao usuário visualizar as imagens astronômicas digitalizadas ou levantamentos completos. Tem disponível de forma online ou desktop permitindo o usuário baixar e instalar no computador gratuitamente (Figura 6.4.5).

Figura 6.4.5 – Interface do *Aladin Sky Atlas*



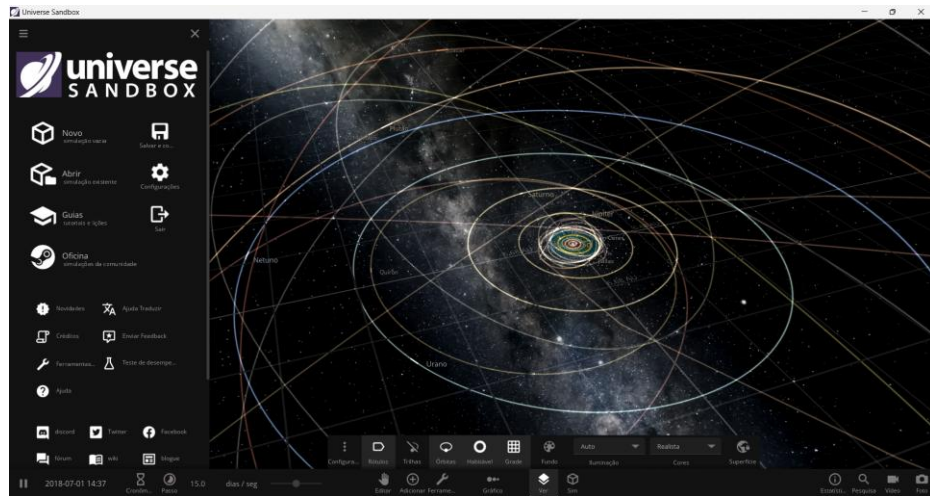
Fonte: (CDS - <https://aladin.cds.unistra.fr>) – A imagem é a interface do aplicativo desktop “Aladin Sky Atlas” no qual se pode ter entradas de catálogos astronômicos ou bases de dados, e acesso interativo a dados e informações relacionados a partir do Base de dados Simbad, o serviço VizieR e outros arquivos para todos os objetos astronômicos conhecidos no campo.

Por último, tem-se o *Universe Sandbox*<sup>22</sup>, desenvolvido pela Dan Dixon, disponível apenas para *Desktops* e *Notebooks*, é um simulador completo baseado em física no qual o usuário pode alterar os objetos e criar diferentes simulações realistas (Figura 6.4.6). O usuário pode simular a gravidade em um corpo N em quase qualquer velocidade usando a mecânica newtoniana. Além disso, permite criar sistemas solares adicionando estrelas e planetas. Também permite alterar os climas dos planetas, simular supernovas, criar estrelas de nêutrons ou pulsares e até simular eventos históricos ou futuristas. Este programa é pago e está disponível na *Steam*.

<sup>21</sup> *Aldin Sky Atlas*. Disponível em <https://aladin.cds.unistra.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

<sup>22</sup> *Universe Sandbox*. Disponível em [https://store.steampowered.com/app/230290/Universe\\_Sandbox/](https://store.steampowered.com/app/230290/Universe_Sandbox/)

Figura 6.4.6 – Interface do Universe Sandbox



Fonte: (Dan Dixon - <https://universesandbox.com>) – A imagem é a interface do aplicativo desktop “Universe Sandbox” no qual se fazer quase tudo, desde criar sistemas solares até estrelas orbitando um buraco negro.

O mais interessante desse simulador é criar as situações envolvendo Buracos Negros, pode-se colocar estrelas orbitando os Buracos Negros ou colocar um no Sistema Solar para ver o efeito gravitacional interferindo no campo do Sol. É possível trabalhar ilustrado de modo interativo os objetos astronômicos como Estrelas de Nêutrons, Pulsares, Anãs Brancas e Anãs Marrons. Assim, alinhando com a habilidade EF09CI17 da Base Nacional Curricular (BNCC) relacionados a formação das estrelas, seu meio e fim; que seria os Buracos Negros.

Para a aplicação (etapa V) de todos esses conteúdos e recursos, optou-se por um colégio público para fazer o experimento. Os resultados e discussões dessa abordagem estão no tópico a seguir.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação foi aplicada no Colégio Rio Tapajós em uma turma da segunda série do ensino médio. A sala é bem climatizada com espaços abertos para iluminação natural, isso interferiu um pouco na visualização da projeção dos slides<sup>23</sup>. Mesmo assim, consegui realizar a apresentação.

A sequência dos conteúdos abordados junto com os momentos está na (Tabela 7.1) abaixo.

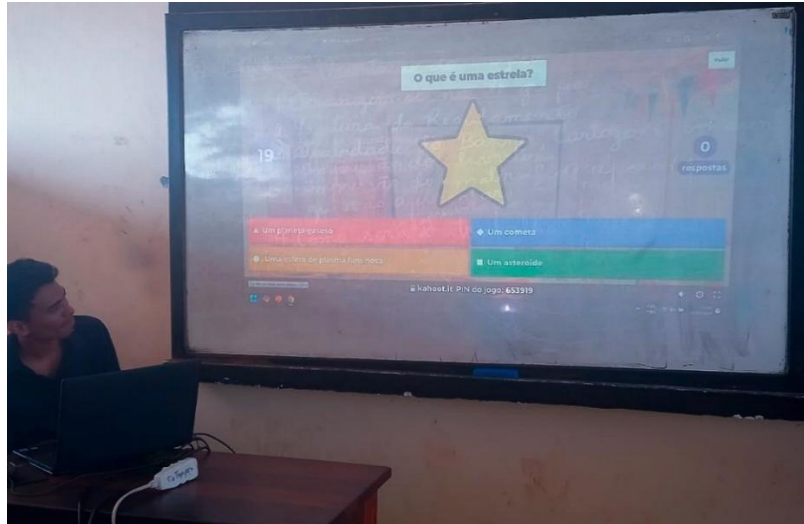
Tabela 7.1 – Processo Didático Aplicado

HORÁRIO	CONTEÚDO	RECURSOS USADOS	DISCUSSÃO
10:30	Heliocentrismo; Leis de Kepler; Gravitação;	Slide / NASA EYE'S	Aqui, apresentei os conceitos básicos utilizando os slides. Em seguida, usei o NASA Eyes para visualizar o comportamento dos planetas ao redor do Sol.
10:45	Surgimento do Universo; Princípio Cosmológico; Big Bang;	Slide / Vídeos	Neste momento, apresentei as definições de acordo com a teoria $\Lambda$ CDM, seguida por uma imagem das partículas elementares e um vídeo que ilustra, teoricamente, como ocorreu o Big Bang.
11:00	Estrutura do Sol; Tipos de Estrelas;	Sky Atlas / Slide / Universe Sandbox	Agora, utilizando o <i>Sky Atlas</i> , expliquei onde as estrelas são formadas, começando pela nebulosa de Órion. Depois, para mostrar os tipos e tamanhos das estrelas, usei o Universe Sandbox.
11:15	Postulados; Geometria do espaço-tempo;	Slide / Material Expositivo / Quadro Branco	Essa foi a parte matemática da apresentação, na qual expliquei as características geométricas do espaço-tempo. Para visualizar o espaço curvo, utilizei o material expositivo da FIGURA 7.4.
11:30	Disco de Acreção; Raio de Schwarzschild; Singularidade;	Slide / Material Expositivo / Universe SandBox / Vídeo	Foi o momento em que utilizei todos os recursos: vídeos para visualizar a estrutura e o disco de acreção do Buraco Negro, o <i>Universe Sandbox</i> para simular como os objetos se comportam próximos de um Buraco Negro, e imagens para identificar a localização da singularidade.
12:00	Gameificação de perguntas dos conteúdos	kahoot	Por fim, utilizei o <i>Kahoot</i> para obter os dados e verificar quais conteúdos foram bem assimilados pelos alunos.

<sup>23</sup> O slide da apresentação em sala - <https://encr.pw/apresentacaotccaula>

A aplicação das perguntas no final da palestra foi o momento chave para desenvolver o método Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS), tecnologia e plataformas virtuais (Figura 7.1).

Figura 7.1 – Aplicação do *Kahoot*



Autor: Aplicação do *Kahoot* em sala de aula com a participação de todos os alunos no jogo virtual.

Os dados obtidos pelo *Kahoot* das perguntas estão a seguir. A própria plataforma nos dá os dados estatísticos sobre a quantidade de acertos e a quantidade de erros de cada participante, logo, não foi preciso aplicar o questionário tradicional. Foram feitas 22 perguntas sobre os conteúdos do (Quadro 6.3.2), mostrados no APÊNDICE A, e obtivemos os seguintes resultados:






Quadro 7.2 – Resultados Gerais

PARTICIPANTES	DESEMPENHO GERAL	
19 Alunos	Total de respostas corretas	54,31%
	Total de respostas incorretas	45,69%

As perguntas tinham como objetivo estabelecer quais conceitos os alunos demonstraram facilidade ou dificuldades em assimilar, além de verificar se as metodologias e uso de materiais ajudaram na aprendizagem desses conceitos. Com isso, o resultado está dentro do esperado, um pouco mais da metade acertaram as perguntas. Os resultados individuais das perguntas estão no APÊNDICE B. A aplicação utilizando o *kahoot* permitiu as interações previstas e todos os alunos gostaram da forma de como foram apresentadas as perguntas – todos participaram.

As perguntas sobre os Buracos Negros foram as que mais chamaram atenção, pois tiveram os maiores percentuais de acertos, como mostra o (Quadro 7.3).

Quadro 7.3 – Perguntas dos Buracos Negros

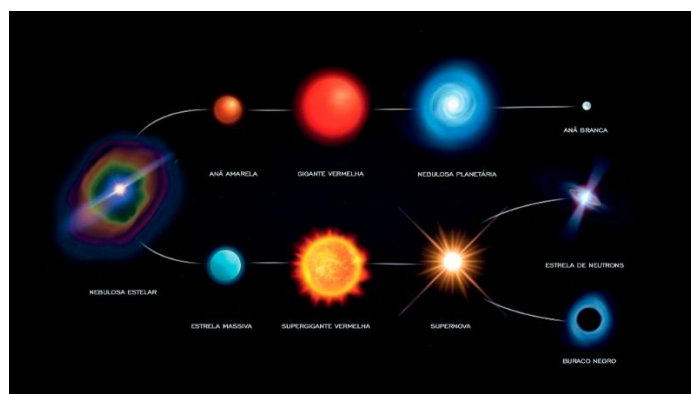
PERGUNTA	ACERTOS
O que é um Buraco Negro?	 89%
Como se forma um Buraco Negro?	 68%
O que é o horizonte de eventos de um Buraco Negro?	 58%
Qual é a principal característica de um Buraco Negro?	 79%
O que é uma singularidade em um Buraco Negro?	 74%

Analisando o QUADRO 7.3 vemos que os recursos metodológicos usados para abordar os Buracos Negros foram expressivos, pois os alunos assimilaram os conhecimentos apresentados na aula.

A questão “O que é um Buraco Negro” foi compreendida pelos participantes como uma região no espaço com gravidade extremamente intensa. Além disso, ao serem questionados, relataram que associaram esse conceito ao material apresentado, conforme ilustrado na Figura 7.4. Esses resultados indicam que os recursos expositivos utilizados desempenharam um papel fundamental no apoio à assimilação do conhecimento.

Em resposta à pergunta “Como se forma um Buraco Negro?”, 12 alunos foram capazes de recordar os tipos de estrelas, compreendendo o destino das estrelas de grande massa ao final de seus ciclos de vida. Ao serem questionados, mencionaram que a Figura 7.2, apresentada nos slides, e o simulador Universe Sandbox que foram os recursos que auxiliaram em suas respostas.

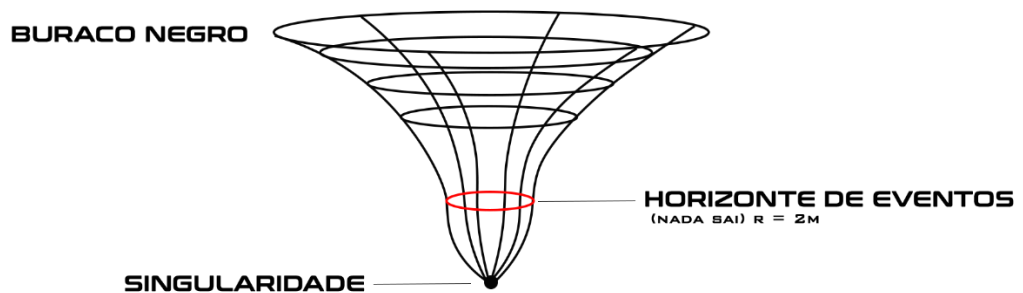
Figura 7.2 – Ciclo das Estrelas



Autor: A imagem mostra a ilustração do ciclo das estrelas.

Em relação à terceira pergunta, “O que é o horizonte de eventos de um Buraco Negro?”, 11 alunos foram capazes de recordar que se trata da região ao redor do Buraco Negro da qual nada pode escapar. No entanto, alguns demonstraram confusão com o conceito de disco de acreção. Ao serem questionados, mencionaram que a Figura 7.3, apresentada nos slides, contribuiu para marcar a resposta certa.

Figura 7.3 – Estrutura do Buraco Negro



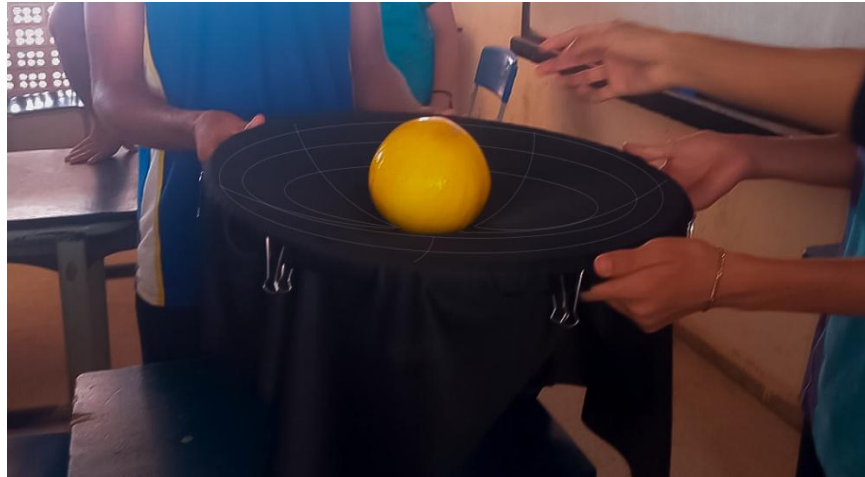
Autor: A imagem mostra a ilustração da estrutura dos Buracos Negros usando Coordenadas Esféricas.

A pergunta “Qual é a principal característica de um Buraco Negro?”, 15 alunos conseguiram responder que ele tem um campo gravitacional tão intenso que nem a luz pode escapar. Quando questionados, disseram que a Figura 7.3 ajudou também a responder incluindo a minha explicação durante o tópico Buracos Negros. Alguns disseram que viram nas redes sociais em vídeos de divulgação científica.

Por fim a pergunta “O que é uma singularidade em um Buraco Negro?”, 14 alunos responderam que é ponto onde a densidade é infinita. Quando questionados o motivo que levaram a escolher essa resposta, os alunos remeteram a Figura 7.3 e também a explicação feita sobre Buracos Negros.

Levando em consideração o pouco tempo para explicar as características de um Buraco Negro – pois já estávamos próximos das 12:00 da tarde –, os resultados mostraram boa compreensão dos conceitos e, com os dados obtidos, podemos concluir a possibilidade de trabalhar esses conteúdos em sala de aula. Ao analisar os dados do APÊNDICE B – as questões relacionadas a Relatividade –, tivemos resistência devido aos conceitos físicos que não estão na realidade dos alunos (dilatação do tempo, velocidade da luz, espaço curvo). Os experimentos utilizados ajudaram a entender boa parte dos desses fenômenos como mostra a Figura 7.4.

Figura 7.4 – Experimentos (espaço curvo)



Autor: A imagem mostra a ilustração da curvatura do espaço-tempo em 2D (pano) quando há um objeto (Melão) com massa.

Além disso, usando o experimento da Figura 7.4, foi explicado sobre a dilatação do tempo, onde o tempo passa mais devagar em campos gravitacionais fortes ou próximos à velocidade da luz. Contudo, como as distâncias no Universo são muito grandes e a velocidade da luz é constante, foi abordado que ainda assim “demora” para chegar a certos lugares. Um exemplo demonstrado é a distância entre a Terra e o Sol (~150 milhões de quilômetros), onde a luz leva aproximadamente 8 minutos para sair da superfície do Sol e chegar à superfície da Terra

Como havia suspeitado, os alunos são inundados de vídeos nas redes sociais, aproveitaram para tirar suas dúvidas, como “Por que as estrelas tem cor azul e vermelha?”, “O que tem dentro do Buraco Negro?”, “Podemos escapar dele?”, “O que acontece se estivermos próximos dele?”, “Por que se passaram vários anos para o rapaz que estava na nave de *Interestelar*?”, entre outras. Essa simples palestra pôde sanar essas dúvidas, mostrando que, apesar da grande inundação de conteúdos nas redes sociais, nada substitui o professor em sala para trabalhar essas dúvidas e curiosidades da Física.

Os *softwares* e simuladores foram cruciais para a realização dos experimentos virtuais e a visualização de conceitos abstratos, facilitando a compreensão e respondendo as perguntas levantadas por eles. De acordo com a competência 5 da BNCC,

“Compreender, utilizar e criar tecnologias digitais de informação e comunicação de forma crítica, significativa, reflexiva e ética nas diversas práticas sociais (incluindo as escolares) para se comunicar, acessar e disseminar informações, produzir

conhecimentos, resolver problemas e exercer protagonismo e autoria na vida pessoal e coletiva” (Brasil, 2024).

essas ferramentas tecnológicas não apenas aprimoraram a capacidade de análise, mas também abriram novas possibilidades de trabalhar os conteúdos com os alunos.

A análise da aula quanto das perguntas procurou estabelecer a relação entre as concepções dos alunos diante desses assuntos e o desempenho deles em relação a suas respostas. Os resultados indicam que a abordagem utilizando os recursos mencionados demonstrou elevada aplicabilidade e viabilidade para a introdução de conteúdos avançados de Física Moderna em sala de aula, por meio do método CTS. No entanto, ressalta-se a importância de que tais abordagens sejam aplicadas de forma adequada e com a devida filtragem dos conteúdos, considerando o nível dos alunos do ensino básico. Com isso, podemos inferir possíveis implicações para a prática em sala de aula do ensino de Física, em particular ensino de Buracos Negros.

## 8 CONCLUSÃO

Com base nos objetivos principais destacados no começo dessa monografia, seria possível dar aulas sobre Buracos Negros?

A resposta é sim! Na aula apresentada no colégio Rio Tapajos, foram explorados os diversos aspectos fundamentais da Astrofísica, Cosmologia e Relatividade Geral; usando ferramenta ilustrativas, *software* e simuladores para aprofundar o entendimento desses tópicos complexos. O que possibilitou uma análise dos fenômenos como: a formação e evolução de estrelas e galáxias, além de compreender melhor a estrutura e a dinâmica do Universo.

Na aplicação da metodologia, uma dúvida que foi bastante pertinente era a origem do Universo. Muitos alunos questionam a teoria do *Big Bang* – devido a divergências religiosas ou falta de informação sobre o assunto. Nesse caso a Cosmologia ajudou a explicar a origem, evolução e o destino do Universo, abordando a Teoria do *Big Bang*; baseada no modelo  $\Lambda$ CDM, e a expansão acelerada do Cosmo. A Relatividade Geral, proposta por Albert Einstein, foi essencial para descrever a gravitação e os instrumentos ilustrativos (vistos no tópico de Metodologia) que ajudaram a compreender a curvatura do espaço-tempo e entender as características dos Buracos Negros.

Vale destacar que para falar sobre os Buracos Negros não é necessário apresentar as equações complexas da Relatividade Geral. Nas aulas sugeri apenas as formas gerais como a métrica de Schwarzschild e a equação de Campo de Einstein, destacando o significado e importância de uma para outra. É possível obter o raio de Schwarzschild por princípios newtonianos, admitindo  $c = 1$  e  $G = 1$  para facilitar os cálculos. Por mais que as equações sejam as pedras nos sapatos dos alunos e sejam quase uma linguagem “alienígena”, elas representam conquistas intelectuais da humanidade que devem ser mencionadas nas aulas ou nas palestras em que o professor de física pode propor ao colégio. Devem ser apresentadas de forma a estimular gatilhos mentais de curiosidade.

Atualmente, como mencionado no texto, existem as mais diversas pesquisas pelos principais telescópios e interferômetros que contribuem para o entendimento dos Buracos Negros. A maioria deles passam nos meios de comunicação, mas ainda ficam dúvidas e é “bem aí” que o professor entra para explicar as características e os resultados obtidos dessas pesquisas. Por mais que exista a *internet*, ainda existem lacunas que o professor de Física pode estruturar em sala de aula. As imagens atuais dos Buracos Negros, por exemplo, foram utilizadas para demonstrar o registro do avanço intelectual da humanidade, o que antes era um

resultado matemático e hipotético, tornou-se um fato como ilustrado nas Figura 4.3.3.1 e Figura 4.3.3.2.

Portanto, os Buracos Negros podem ser apresentados em sala de aula como uma ferramenta poderosa para inspirar e educar os alunos. Além de despertar a curiosidade, eles possibilitam a exploração de diversos conceitos científicos e interdisciplinares, como Astronomia, Astrofísica, Cosmologia, Gravidade, Relatividade Geral e Termodinâmica. Com a abordagem correta, temas complexos como esse podem tornar as aulas mais dinâmicas e envolventes, ajudando a desenvolver habilidades críticas e analíticas nos alunos.

## REFERÊNCIAS

FRÓES, A. L. D. **Astronomia, Astrofísica e Cosmologia para o Ensino Médio**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2014. vol. 36, p. 3504.

ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (Brasil) **Explicando o Prêmio Nobel de Física de 2020: Buracos Negros**. [Rio de Janeiro](Estado): Academia Brasileira de Ciências, 2020. Disponível em: <https://www.abc.org.br/2020/10/10/explicando-o-premio-nobel-de-fisica-de-2020-buracos-negros/> Acesso em: 20 jul. 2024.

ADERALDO, Vinicius S.; GOLÇALVES, Victo P. **Uma introdução à evolução do Universo segundo sua geometria e composição**. Revista Brasileira de Ensino de Física, 2020.

BREDT, H. **Astrophysics processes**. v.1. ed. Cambridge, 2008.

BRASIL, Ministério Da Educação, Secretaria De Educação Básica. **PCN+: Ensino Médio – Orientações educacionais complementares aos parâmetros curriculares nacionais**. Brasília. MEC/SEB, 2002.

BRASIL, Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília: MEC, 2024.

BRASIL, Secretaria de Educação Básica. **Orientações curriculares para o ensino médio: Ciências da Natureza, matemática e suas tecnologias**. Brasília: MEC, 2006.

BRASIL, Secretaria De Educação Fundamental. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências Naturais/Secretaria de Educação Fundamental**. Brasília: MEC, 1998.

CAVOLCANTE, D.; PATRICIA, G. **Buracos negros existem mesmo?** Aqui estão 7 evidências e uma prova incontestável. 2021. Disponível em: <https://canaltech.com.br/espaco/buracos-negros-existem-mesmo-aqui-estao-7-evidencias-e-uma-prova-incontestavel-193814/> Acesso em: 20 jul. 2024

CARROLL, Bradley W.; OSTLIE, Dale A. **An Introduction to Modern Astrophysics** v.3. ed. Cambridge University Press, 2013.

COSTA, G. S.; OLIVEIRA, S. M. B. C. **Kahoot: a aplicabilidade de uma ferramenta aberta em sala de língua inglesa, como língua estrangeira, num contexto inclusivo**. In: 6º Simpósio

hipertexto e tecnologias na educação e 2º colóquio internacional de educação com tecnologias, n. 6., 2015. Anais 6º Simpósio Hipertexto e Tecnologias a Educação e 2º Colóquio Internacional de Educação com Tecnologias. Recife: Ed. UFPE, 2015. p. 1-17.

D'INVERNO, Ray E VICKERS, J. **Introducing Einstein's Relativity**. v.2. ed. Oxford, 2022.

DE SOUZA, R. E. **Introdução à Cosmologia**. ed. Edusp: São Paulo, 2004.

ELIZABETH, L. *In*: NASA. **Black Hole Image Makes History; NASA Telescopes Coordinated Observations**. NASA, 2024. Disponível em: <https://science.nasa.gov/universe/black-holes/black-hole-image-makes-history-nasa-telescopes-coordinated-observations/> Acesso em: 22 jul. 2024.

MILNE, E. A.; **Zeitschrift für Astrophysik**. p. 6, 1 (1933).

MILNE, E. A. **Nature**. p.130, 9 (1932). Disponível em: <https://www.nature.com/articles/166715a0.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2023.

E.H.T Collaboration. **Astronomers Capture First Image of a Black Hole**. Harvad University, 2019. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/press-release-april-10-2019-astronomers-capture-first-image-black-hole> Acesso em: 20 jul. 2024.

E.H.T Collaboration. **Astronomers Image Magnetic Fields at the Edge of M87's Black Hole**. Harvad University, 2021. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-image-magnetic-fields-edge-m87s-black-hole> Acesso em: 20 jul. 2024.

E.H.T Collaboration. **Astronomers Reveal First Image of the Black Hole at the Heart of Our Galaxy**. Harvad University, 2022. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-reveal-first-image-black-hole-heart-our-galaxy> Acesso em: 20 jul. 2024.

E.H.T Collaboration. **Astronomers Unveil Strong Magnetic Fields Spiraling at the Edge of Milky Way's Central Black Hole**. Harvad University, 2024. Disponível em: <https://eventhorizontelescope.org/blog/astronomers-unveil-strong-magnetic-fields-spiraling-edge-milky-way%E2%80%99s-central-black-hole> Acesso em: 20 Jul. 2024.

FERREIRA, S.; CORREIA, R.; SILVA, C. F. **Estudo dos roteiros de experimentos disponibilizados em repositórios virtuais por meio do ensino por investigação**. versão online. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/LJNmpSH8XwzCB84JLFkCqdj#> Acesso em: 23 mai. 2024.

FERREIRA, G. **Gatilhos mentais: o guia completo com estratégias de negócios e comunicação** provadas para você aplicar. ed. DVS, São Paulo, 2019.

NETO, G. P. Da silva. **Uma introdução à evolução do Universo segundo sua geometria e composição.** Revista Brasileira de Ensino de Física. p. 40, 2318 (2018).

GIL, A. C. **Como elaborar um projeto de pesquisa.** 5. ed. São Paulo: Atlas. 2010.

GIORDAN, M. **Análise e reflexões sobre os artigos de educação em química e multimídia publicados entre 2005 e 2014.** Química Nova na Escola. São Paulo, v. 37, n. esp. 2, p. 154-160, 2015.

HOFSTEIN, A.; AIKENHEAD, G.; RIQUEARTS, K. **Discussion over STS at the fourth IOSTE symposium** International Journal of Science Education, London v. 10, n. 4, p. 357, 1988.

HOYNG, P. **Relativistic Astrophysics and Cosmology.** v.1. ed. Springer, 2006.

INOVE. **Solar System:** Free online model of Solar System and Night sky [Internet]. Disponível em: <https://www.solarsystemscope.com/> Acesso em: 26 Jul 2024.

JAMER, C. **De cair o queixo:** veja imagem impressionante do buraco negro no coração da Via Láctea. Revista Forbes, 2024. Disponível em: <https://forbes.com.br/forbes-tech/2024/03/de-cair-o-queixo-veja-imagem-impressionante-do-buraco-negro-no-coracao-da-via-lactea/> Acesso em: 20 jul 2024.

KAHOOT. **Learning games.** Disponível em: <https://kahoot.com/> Acesso em: 26 jul. 2023.

LIGO. **Introduction to LIGO & Gravitational Waves** [Internet]. Disponível em: <https://www.ligo.org/science.php>. Acesso em: 26 jul 2024.

LONGAIR, M. S. **High Energy Astrophysics.** v.3. ed. Cambridge University Press, 2011.

MICHEL, R.; SANTOS, F. M. T.; GRECA, I. M. R. **Uma busca na internet por ferramentas para a educação química no ensino médio.** Química Nova na Escola, São Paulo, n. 19, 2004.

MISNER, C. W.; THORNE, K. S. E WHEELER, J. A. **Gravitation.** p. 934 – 940 Ed. W. H. Freeman and Company, San Francisco, 2017.

NASA OFFICIAL FOR SCIENCE. **NASA's Eyes** [Internet]. Disponível em: <https://science.nasa.gov/eyes/> Acesso em 26 jul. 2024.

NEVES C. S. J. **O buraco negro e sua sombra.** versão *online*. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbef/a/MNc6M6njv79NbCcbLjBW9HB/?lang=pt> Acesso em: 20 jul. 2024.

OLIVEIRA, K. S. F.; SARAIVA, M. F. O. **Diagrama Cor-Magnetude – HR** [Internet]. 2022. Disponível em: <http://astro.if.ufrgs.br/estrelas/node2.htm>. Acesso em: 19 jul. 2023.

ZYLA, P. A.; R. M. BARNETT J. BERINGER, O.; DAHL, D. A.; DWYER, D. E.; GROOM, C. J.; LIN, K. S.; LUGOVSKY, E.; PIANORI, D. J.; ROBINSON, et al. **Progress of Theoretical and Experimental Physics**, (2020). Disponível em: <https://scholars.duke.edu/publication/1466763> Acesso em: 20 jul. 2023.

RYDEN, B. S. **Introduction to Cosmology** ed. Addison-Wesley, San Francisco, 2003.

SANTOS, L. P. W., MORTMER, F. E. **Uma análise de pressupostos teóricos da abordagem C-T-S (Ciência - Tecnologia - Sociedade) no contexto da educação brasileira.** versão *online*. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/epcc/a/OtH9SrxpZwXMwbpfp5jqRL> Acesso em: 22 mai. 2024.

SARAIVA, M. F. O.; FILHO, K. S. O. **Astronomia e Astrofísica**, v.2 ed Livraria da Física, São Paulo, 2004.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA (Brasil) **LIGO e Virgo registram fusão de buracos negros mais massiva e distante já observada.** [São Paulo]: Sociedade Brasileira de Física, 2018. Disponível em: <https://www.sbfisica.org.br/v1/sbf/ligo-e-virgo-registram-fusao-de-buracos-negros-mais-massiva-e-distante-ja-observada/> Acesso em: 20 jul. 2024.

STAHLER, W. S.; PALLA, Francesco. **The Formation of Stars.** Wiley-VCH, 2004.

STRASBOURG ASTRONOMICAL DATA CENTER. **Aladin Desktop** [Internet]. Disponível em: <https://aladin.cds.unistra.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading> Acesso em 26 jul. 2024.

STRASBOURG ASTRONOMICAL DATA CENTER. **Aladin Sky Atlas** [Internet]. Disponível em: <https://aladin.cds.unistra.fr/> Acesso em: 26 jul. 2024.

VIRGO. **Virgo History** [Internet]. Disponível em: <https://www.virgo-gw.eu/about/virgo-history/> Acesso em: 26 jul 2024.

WHEELER, Jhon. A. **Geometrodynamics and the Issue of the Final State.** v.1 ed. Gordon and Breach, Princeton U., 1964.

## APÊNDICE A

Questionário aplicado em sala utilizando o Kahoot:

Perguntas sobre Astrofísica

1. **O que é uma estrela?**
  - A) Um planeta gasoso
  - B) Uma esfera de plasma luminosa
  - C) Um cometa
  - D) Um asteroide
2. **Como as estrelas se formam?**
  - A) A partir da colisão de planetas
  - B) A partir do colapso de nuvens de gás e poeira
  - C) A partir da fusão de buracos negros
  - D) A partir da evaporação de cometas
3. **O que é uma nebulosa?**
  - A) Um buraco negro
  - B) Uma grande nuvem de gás e poeira
  - C) Um tipo de estrela
  - D) Um planeta gasoso
4. **Qual é o papel do hidrogênio na formação das estrelas?**
  - A) Ele forma a superfície das estrelas
  - B) Ele é o principal combustível para a fusão nuclear
  - C) Ele é responsável pela cor das estrelas
  - D) Ele forma os planetas ao redor das estrelas
5. **O que é uma protoestrela?**
  - A) Uma estrela em colapso
  - B) Um estágio inicial na formação de uma estrela
  - C) Uma estrela que já esgotou seu combustível
  - D) Uma estrela que se transformou em buraco negro
6. **Qual é a diferença entre uma estrela de sequência principal e uma gigante vermelha?**

- A) A sequência principal é mais fria
- B) A gigante vermelha é mais jovem
- C) A sequência principal está em um estágio estável de fusão de hidrogênio
- D) A gigante vermelha é menor

**7. O que é uma anã branca?**

- A) Uma estrela jovem
- B) Uma estrela em formação
- C) O remanescente denso de uma estrela de baixa massa
- D) Uma estrela que está prestes a explodir

**8. Como as estrelas produzem energia?**

- A) Através da combustão de carbono
- B) Através da fusão nuclear
- C) Através da fissão nuclear
- D) Através da evaporação de gases

**9. O que é a fusão nuclear?**

- A) O processo de divisão de núcleos atômicos
- B) O processo de combinação de núcleos atômicos
- C) O processo de resfriamento de estrelas
- D) O processo de formação de planetas

**10. O que determina a cor de uma estrela?**

- A) Sua composição química
- B) Sua temperatura superficial
- C) Sua distância da Terra
- D) Sua idade

**11. O que é uma supernova?**

- A) Uma estrela jovem
- B) Uma explosão no final da vida de uma estrela de alta massa
- C) Um tipo de planeta
- D) Um buraco negro em formação

**12. O que é uma estrela de nêutrons?**

- A) Uma estrela jovem
- B) O remanescente denso de uma supernova
- C) Um tipo de planeta
- D) Uma estrela em formação

**13. Como termina a vida de uma estrela de alta massa?**

- A) Como uma anã branca
- B) Como uma supernova
- C) Como um planeta gasoso
- D) Como uma nebulosa

Perguntas sobre Relatividade Geral:

**1. Qual é um dos postulados da Teoria da Relatividade Restrita de Einstein?**

- A) A velocidade da luz depende do movimento da fonte
- B) A velocidade da luz no vácuo é constante e independente do referencial
- C) A velocidade da luz varia com a gravidade
- D) A velocidade da luz é infinita

**2. O que acontece com o tempo quando um objeto se move a uma velocidade próxima à da luz?**

- A) O tempo acelera
- B) O tempo permanece constante
- C) O tempo desacelera
- D) O tempo para completamente

**3. O que é espaço curvo na Teoria da Relatividade Geral?**

- A) Uma ilusão óptica
- B) A curvatura do espaço causada pela presença de massa e energia
- C) A deformação do espaço por ondas sonoras
- D) A distorção do espaço por campos magnéticos

**4. Qual é a relação entre massa e energia segundo a Teoria da Relatividade?**

- A) Massa e energia são conceitos independentes
- B) Massa pode ser convertida em energia e vice-versa, conforme a equação ( $E = mc^2$ )
- C) Massa é sempre maior que energia
- D) Energia não pode ser convertida em massa

**5. O que é dilatação do tempo?**

- A) O tempo passa mais rápido em um campo gravitacional forte
- B) O tempo passa mais devagar em um campo gravitacional forte ou em alta velocidade

- C) O tempo é constante em todos os referenciais
- D) O tempo não é afetado pela velocidade ou gravidade

Perguntas sobre Buracos Negros:

**1. O que é um buraco negro?**

- A) Uma estrela em formação
- B) Um planeta gasoso
- C) Uma região do espaço com gravidade extremamente forte
- D) Um cometa

**2. Como se forma um buraco negro?**

- A) Pela colisão de dois planetas
- B) Pelo colapso gravitacional de uma estrela supermassiva
- C) Pela fusão de dois buracos negros
- D) Pela evaporação de um cometa

**3. O que é o horizonte de eventos de um buraco negro?**

- A) A superfície de um planeta
- B) A borda de uma galáxia
- C) A região ao redor do buraco negro de onde nada pode escapar
- D) A camada externa de uma estrela

**4. Qual é a principal característica de um buraco negro?**

- A) Ele emite muita luz
- B) Ele tem um campo gravitacional tão intenso que nem a luz pode escapar
- C) Ele é visível a olho nu
- D) Ele é composto principalmente de gás

**5. O que é uma singularidade em um buraco negro?**

- A) Um ponto onde a densidade é infinita
- B) Uma estrela em colapso
- C) Um planeta em formação
- D) Uma galáxia em expansão

## APÊNDICE B

Pergunta ▾	Tipo ▾	Correto/incorreto
1 O que é uma estrela?	Quiz	 84%
2 Como as estrelas se formam?	Quiz	 63%
3 O que é uma nebulosa?	Quiz	 68%
4 Qual é o papel do hidrogênio na formação das...	Quiz	 68%
5 Qual é a diferença entre uma estrela de sequê...	Quiz	 21%
6 O que é uma protoestrela?	Quiz	 37%
7 O que é uma anã branca?	Quiz	 58%
8 Como as estrelas produzem energia?	Quiz	 47%
9 O que é a fusão nuclear?	Quiz	 37%
10 O que determina a cor de uma estrela?	Quiz	 89%
11 O que é uma estrela de nêutrons?	Quiz	 47%
12 Como termina a vida de uma estrela de alta m...	Quiz	 16%
13 Qual é um dos postulados da Teoria da Relativ...	Quiz	 53%
14 O que acontece com o tempo quando um obje...	Quiz	 11%
15 O que é espaço curvo na Teoria da Relatividad...	Quiz	 53%
16 Qual é a relação entre massa e energia segun...	Quiz	 42%
17 O que é dilatação do tempo?	Quiz	 32%
18 O que é um buraco negro?	Quiz	 89%
19 Como se forma um buraco negro?	Quiz	 68%
20 O que é o horizonte de eventos de um buraco ...	Quiz	 58%
21 Qual é a principal característica de um buraco ...	Quiz	 79%
22 O que é uma singularidade em um buraco neg...	Quiz	 74%