



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CAMPUS AGRESTE  
NÚCLEO DE FORMAÇÃO DOCENTE  
FÍSICA-LICENCIATURA

LUCAS DA SILVA COSTA

**RELATIVIDADE GERAL E ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO:** uma proposta de  
sequência didática

Caruaru  
2022

LUCAS DA SILVA COSTA

**RELATIVIDADE GERAL E ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO:** uma proposta de  
sequência didática

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Física do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de monografia, como requisito parcial para a obtenção do grau de licenciado em Física.

**Área de concentração:** Ensino de Física.

**Orientadora:** Profa. Dra. Tassiana Fernanda Genzini de Carvalho

Caruaru

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Costa, Lucas da Silva.

Relatividade Geral e Astronomia no Ensino Médio: uma proposta de  
sequência didática / Lucas da Silva Costa. - Caruaru, 2022.

73 p. : il., tab.

Orientador(a): Tassiana Fernanda Genzini de Carvalho

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de  
Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Física - Licenciatura, 2022.

1. Relatividade Geral. 2. Astronomia. 3. Física Moderna e Contemporânea. 4.  
Sequência Didática. 5. Transposição Didática. I. Carvalho, Tassiana Fernanda  
Genzini de. (Orientação). II. Título.

530 CDD (22.ed.)

LUCAS DA SILVA COSTA

**RELATIVIDADE GERAL E ASTRONOMIA NO ENSINO MÉDIO:** uma proposta de  
sequência didática

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Coordenação do Curso de  
Física do Campus Agreste da  
Universidade Federal de Pernambuco –  
UFPE, na modalidade de monografia,  
como requisito parcial para a obtenção do  
grau de licenciado em Física.

Aprovada em: 02/06/2022

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Tassiana Fernanda Genzini de Carvalho (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Ernesto Arcenio Valdés Rodriguez  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Heydson Henrique Brito da Silva  
Universidade Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a minha querida Orientadora Tassiana, que teve paciência comigo, que sempre me respondia quando eu precisava e que me deu caminhos fundamentais para a conclusão desse trabalho. Mais uma vez, muito obrigado por sua gentileza e por compartilhar seu imenso conhecimento.

Esse trabalho é fruto de um longo caminho, muitas vezes me sentia perdido e sem muita perspectiva do que fazer, e meus amigos estavam lá para me ajudar e me animar de várias formas, para que assim eu pudesse ter forças para continuar. Eu agradeço a todos eles por estarem comigo jogando, assistindo ou se divertindo de alguma forma durante esse percurso.

Um agradecimento especial vai a pessoa que mais amo, para a minha namorada, Rafaela. Que sempre esteve comigo durante todo esse processo, e sem dúvidas foi a pessoa mais atenciosa e que sempre oferecia ajuda em todos os momentos. Uma boa parte desse trabalho se deve a ela, e agradeço de todo o coração por ela está do meu lado até aqui.

Agradeço aos meus amigos, Emerson, Ádriel, Carol, Vanessa, Ana e Gustavo. Me proporcionaram vários dos melhores momentos da minha vida, me inspiro em cada um de vocês, vocês são pessoas excepcionais que me ajudaram a crescer de diversas formas até chegar a esse momento. Vou guardar no meu coração cada momento e cada ensinamento que vocês me trouxeram. Obrigado a todos os colegas e amigos que fiz durante o tempo que estive no curso, que também me proporcionaram momentos que jamais vou esquecer e que me ajudaram de várias maneiras.

Agradeço aos professores e professoras que agregaram de forma significativa na minha formação, muitos de vocês são inspiração para tudo o que fiz e pretendo fazer, são pessoas maravilhosas que tive a honra e o prazer de conhecer e admirar. Por fim, palavras não conseguem representar e resumir de maneira exata a gratidão que tenho por todos que fizeram parte dessa jornada, que me ajudaram com palavras, com conselhos e bons momentos.

## RESUMO

O presente trabalho de conclusão de curso (TCC) inicialmente traz a discussão no que envolve a problematização da inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino Básico, mostrando os pontos que corroboram com as dificuldades dessa implementação, junto com argumentos e fatos que vão mostrar os ganhos que se é possível alcançar quando esses temas são incorporados nas aulas de Física e as opções de abordagem para contornar esses obstáculos. Diante dessa perspectiva, este TCC traz uma proposta de Sequência Didática, baseada nos pressupostos de Antoni Zabala, que dialoga com essas questões discutidas. Este material didático demonstra o processo de Transposição Didática, referencial teórico proposto por Yves Chervallard. O conteúdo físico abordado é a Relatividade Geral, trazendo aspectos históricos e conceituais, junto com os fenômenos da Astronomia que se associam a essa teoria científica. A Sequência Didática é dividida em cinco temáticas, e cada uma delas tem uma atividade associada, em que são explicitados os seus detalhamentos, os recursos e materiais utilizados e a dinâmica que poderá ser implementada durante as aulas no Ensino Médio. Em seguida, é analisada a sequência didática e como ela contemplou os conceitos usados, no que se refere a sua construção, chegando na conclusão de que a Teoria da Relatividade tem bastante a oferecer como um tópico a ser inserido dentro Física Moderna e Contemporânea para o Ensino Básico, com a possibilidade de instigar o uso de diferentes metodologias e assuntos dentro desses aspectos, para que sejam mais constantes no cotidiano escolar.

**Palavras-chave:** Relatividade Geral; Astronomia; Física Moderna e Contemporânea; Sequência Didática; Transposição Didática.

## ABSTRACT

The present work of conclusion of course (TCC) initially brings the discussion in what involves the problematization of the insertion of Modern and Contemporary Physics in Basic Education, showing the points that corroborate with the difficulties of this implementation, together with arguments and facts that will show the gains that can be achieved when these themes are incorporated into Physics classes and the approach options to overcome these obstacles. In view of this perspective, this TCC brings a proposal for a Didactic Sequence, based on the assumptions of Antoni Zabala, which dialogues with these discussed issues. This teaching material demonstrates the Didactic Transposition process, a theoretical framework proposed by Yves Chervallard. The physical content addressed is General Relativity, bringing historical and conceptual aspects, along with the phenomena of Astronomy that are associated with this scientific theory. The Didactic Sequence is divided into five themes, and each of them has an associated activity, in which its details, the resources and materials used and the dynamics that can be implemented during classes in High School are explained. Then, the didactic sequence is analyzed and how it contemplated the concepts used, with regard to its construction, reaching the conclusion that the Theory of Relativity has a lot to offer as a topic to be inserted within Modern and Contemporary Physics for the Basic Education, with the possibility of instigating the use of different methodologies and subjects within these aspects, so that they are more constant in the school routine. Finally, in the final considerations, it is discussed a little about the application and purposes of this material.

**Keywords:** General Relativity; Astronomy; Modern and Contemporary Physics; Following teaching; Didactic Transposition.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Nave espacial longe de qualquer influência gravitacional. ....	18
Figura 2: Nave espacial acelerada. ....	19
Figura 3: Bola lançada dentro da nave acelerada. ....	20
Figura 4: Movimento da bola vista por um observador externo. ....	21
Figura 5: Observado presenciando a trajetória do feixe de luz. ....	22
Figura 6: Trajetória da luz vista pelo observador externo. ....	23
Figura 7: Posições dos relógios em relação ao disco acelerado. ....	24
Figura 8: Representação da precessão de um planeta. ....	29
Figura 9: A lente gravitacional está localizada no centro e o corpo emissor está na parte direita. ....	30
Figura 10: Estrutura simples de um buraco negro. ....	32
Figura 11: Esferas do saber. ....	35
Figura 12: Einstein e a Relatividade Geral. ....	49
Figura 13: Rotor é uma atração de parque de diversões. ....	56
Figura 14: Animação de uma estrela em colapso. ....	58

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>14</b>
2.1	A RELATIVIDADE GERAL.....	14
2.1.1	A Construção da Relatividade Geral.....	15
2.1.2	O Princípio da Equivalência.....	16
2.1.3	Desvio da Luz pela Gravidade.....	20
2.1.4	Desvio para o Vermelho Gravitacional.....	22
2.1.5	A Geometria do Espaço-Tempo.....	25
2.1.6	Como a Relatividade Geral Mudou a Nossa Visão da Astronomia..	26
2.1.7	Periélio de Mercúrio.....	27
2.1.8	Lentes Gravitacionais.....	29
2.1.9	Buracos Negros.....	31
2.1.10	Ondas Gravitacionais.....	33
2.2	TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA.....	35
2.2.1	Transposição Didática e o que cerca o Sistema Didático.....	36
2.2.2	A Teoria da Transposição Didática no Ensino de Relatividade Geral.....	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>43</b>
<b>4</b>	<b>SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....</b>	<b>44</b>
4.1	PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....	45
4.1.1	Organização Esquemática da Sequência Didática.....	47
4.1.2	Detalhamento das Atividades e Dinâmica durante as Aulas.....	48
<b>5</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA.....</b>	<b>65</b>
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>67</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>70</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Há muito tempo se discute sobre a inserção e a importância do ensino da Física Moderna e Contemporânea (FMC) no Ensino Básico, desde os Parâmetros Curriculares do Ensino Médio (PCNEM) (BRASIL, 2000), em que é relatada as características valiosas que temas relacionados trazem ( como aspectos atuais e dentro do cotidiano do aluno), vários trabalhos nas últimas décadas vêm tratando sobre essa questão, além de trazer materiais e ferramentas motivadoras para a abordagem de tópicos relacionados a FMC. Como exemplos, temos o trabalho de Renner e Krugger (2016), que avalia se os professores da rede estadual de ensino da cidade de Jaraguá do Sul-SC e região abordam assuntos da FMC, e se sim, como fazem isso; e temos o trabalho de Oliveira, Vianna e Gerbassi (2007) que além de criticar a falta dos assuntos da Física Moderna no Ensino Médio, também mostra uma pesquisa do que os professores de Física das redes públicas e privadas têm a dizer sobre a inserção de tópicos da Física Moderna. De acordo com os resultados obtidos, esses autores elaboraram uma proposta metodológica envolvendo um certo conteúdo.

Apesar desses esforços, ainda continua difícil inserir o ensino da FMC de forma efetiva no Ensino Médio. Mesmo com a contribuição dos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs), expondo a necessidade de abordar assuntos da FMC, os livros didáticos ainda não se dedicam o bastante para trazer tais conteúdos. Os professores têm formações iniciais deficientes no assunto, principalmente em relação às práticas metodológicas necessárias para essas e outras finalidades, e as próprias escolas não se flexibilizam o bastante para colocar esses conteúdos na grade de assuntos do ensino de Física, sendo que em sua maioria, os assuntos que inseridos fogem da realidade dos estudantes, tornando difícil sua compreensão conceitual e sendo vistos apenas como um problema matemático.

O trabalho realizado por Monteiro, Nardi e Filho (2012) se preocupou em analisar pesquisas que traziam aspectos que influenciavam a introdução de assuntos da FMC no Ensino Médio. Os resultados apontaram que uma das grandes dificuldades ditas pelos professores entrevistados era o pouco tempo disponibilizado para trabalhar tais conteúdos, junto com a grande programação dos demais assuntos, e isso ocorria principalmente nas escolas públicas. Esse estudo acaba por

corroborar com o que foi citado anteriormente sobre os obstáculos envolvendo a inserção da FMC no Ensino Médio.

E partindo desses apontamentos, Santos ainda afirma que:

O processo de inserção da Física Moderna e Contemporânea torna-se possível desde que o professor e o sistema de ensino estejam totalmente imbuídos da dinâmica de modernização do currículo para que os resultados alcançados sejam positivos (SANTOS, 2020, pg. 49).

Dentre diversos conteúdos, neste trabalho, consideramos aprofundar a pesquisa na Relatividade Geral, que foi desenvolvida principalmente pelo Físico alemão Albert Einstein. Mas por que a Relatividade Geral? Porque tem uma quebra de paradigma muito grande, principalmente em relação as leis de Newton e nas noções mais intuitivas de como é o Universo, e traz os alunos para o que acreditamos ser a ideia mais correta de como parte do Universo funciona. Essa Teoria, de maneira abrangente, é matematicamente mais difícil de se aplicar no Ensino Médio, mas conceitualmente falando, ela vai englobar de maneira atrativa desenvolvimentos científicos que revolucionaram a nossa maneira de entender e observar o Cosmos, como no caso dos diversos fenômenos naturais que envolvem as dinâmicas dos corpos celestes e a suas interações gravitacionais.

Contudo, ainda se pode combinar “algo a mais” ao conteúdo da Relatividade Geral, que são suas várias relações com o conteúdo de Astronomia. Além dessas relações, quando se fala em Astronomia, é difícil não pensar nos mistérios e fenômenos que compõe o Cosmos, já que, como sendo uma das ciências mais antigas, ela expressa a nossa total curiosidade pelo Universo, e, partindo desse pressuposto, não deve ser muito diferente a reação dos estudantes frente a esse tema.

E assim como os conteúdos da FMC, a Astronomia é muito pouco aproveitada nas escolas.

A Astronomia é uma das áreas do conhecimento científico que possui um grande potencial educativo, principalmente porque permite tratar problemas da natureza do cosmos e do homem. Apesar disso, não encontrou ainda seu espaço no sistema educativo. Talvez, pelas dificuldades próprias que a área apresenta, considerando a ignorância sobre os conhecimentos de observação básicos, a forte influência das crenças pessoais, os aspectos

místicos e religiosos, a deficiência no raciocínio espacial [...]. Este problema se agrava pelo fato de que a Astronomia raramente é trabalhada nos currículos (BARRIO, 2010, p. 161 apud ALBRECHT; VOELZKE, 2016, p. 2).

Portanto, partindo da afirmação de que os conteúdos da FMC, ou, nesse caso mais específico, a Relatividade Geral e a Astronomia são poucos explorados nas salas de aulas do Ensino Médio, fica conveniente a união desses temas, em uma abordagem didática. Ainda mais porque “a Astronomia, com sua característica multidisciplinar é uma excelente ferramenta motivadora na introdução de conceitos da Física, Matemática, Biologia etc” (GONZALEZ et al., 2004), e, o seu ensino pode funcionar de forma integrada com o da Relatividade Geral.

Mas, mesmo que essas coisas consigam chamar atenção pelo seu fascínio, o conhecimento necessário para entender e acompanhar esses aspectos, como já ficou claro, ainda está muito distante de muitas pessoas, ainda mais com o viés de que é um conteúdo considerado complicado e abstrato de se entender. No entanto, consideramos que a partir do momento que se desenvolve uma prática didática que faça com que o estudante incorpore esse conhecimento físico no seu cotidiano, ele se tornará mais reflexivo, observador, e induzido a ser capaz de aprender tais assuntos. Os conceitos da Transposição Didática funcionam como uma ótima ferramenta para essa finalidade, pois como a Relatividade Geral e os demais temas da FMC não estão totalmente inseridas no Ensino Básico, ainda há de pensar nas melhores formas de se introduzir tais conteúdos de uma maneira que se adapte as necessidades desse Sistema de Ensino e que forneça reflexões para uma mudança.

A transição que o conhecimento científico sofre até chegar na sala de aula e ser ensinado é o que caracteriza a Transposição Didática. No entanto, essa mudança não pode ser baseada em apenas simplificações, ela deve atender as demandas desse novo domínio epistemológico, que é a sala de aula, e a do campo científico. Para o caso da implementação da FMC, deve-se se levar em consideração certos detalhes que melhor descrevem essa dinâmica da transposição do conhecimento, possibilitando que a FMC se torne mais pertinente e sobreviva no Ensino Básico (BROCKINGTON e PIETROCOLA, 2005). Conectado com essas características, ASTOLFI (1995) elaborou cinco regras para serem observadas durante o processo da Transposição Didática. A primeira é a modernização do saber escolar, no sentido de que os conhecimentos devem se adequar aos mais recentes

avanços sociais e tecnológicos; a segunda é a atualização do saber a ensinar, que se baseia em descartar os conhecimentos que são percebidos como ultrapassados; a terceira é articular os saberes “novos” com os “antigos”, que como o próprio nome já sugere, é conciliar os novos saberes com os já presentes no programa de ensino; a quarta regra é para que o saber produzido pelos cientistas, sejam capazes de produzir um ampla variedade de exercícios e atividades didáticas; e a última regra alega que quando o conteúdo for transposto, ele deve se tornar um conceito mais compreensível e alcançável para os alunos.

Então, a partir de tudo que foi descrito, esse trabalho se propõe a desenvolver uma proposta de Sequência Didática envolvendo os conteúdos da Relatividade Geral e fenômenos astronômicos, tomando como base os fundamentos da Transposição Didática. Analisaremos também como esse material pode contribuir para a aprendizagem de conceitos científicos e na formação das visões dos alunos em questões que envolvem esses assuntos e suas relações com outros âmbitos da ciência e da cultura.

No próximo capítulo será exibido a fundamentação teórica, em que serão apresentados os assuntos e conceitos da Transposição Didática, Relatividade Geral, e Astronomia que irão ser a base da construção, análise e interpretação do material didático que foi construído neste trabalho. Logo em seguida serão abordados os procedimentos metodológicos adotados para a organização desse trabalho. Posteriormente será feita uma meta análise dessa Sequência Didática, com base no referencial usado. Por fim, serão feitas as considerações finais sobre esse material que foi trazido, com foco nas discussões por trás da sua aplicação e montagem.

Sobre a justificativa do tema, ela surgiu enquanto estava cursando a disciplina de Estágio Supervisionado II, e durante os momentos em que participava do PIBID (Programa Institucional de Bolsas Iniciação à Docência). No estágio foi onde refletir mais profundamente a respeito de como que realmente a Física Moderna é muito pouco abordado no Ensino Médio, imaginando o quanto que esses assuntos seriam interessantes de se ver no Ensino Médio. Já no PIBID, desenvolvi uma eletiva de Astronomia, junto com uma colega, e como já era esperado, o interesse dos alunos foi bem grande pelos assuntos, e de maneira indireta eles aprenderam vários conceitos da Física Moderna. Com isso, eu pensei em juntar a Astronomia com a Física moderna, mais precisamente nesse caso, com a Relatividade Geral, para

desenvolver algum trabalho que pudesse colaborar com a presença mais constante desses temas na Educação Básica.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão apresentados os conteúdos e ferramentas que farão parte da Sequência Didática que será apresentada posteriormente. Os tópicos da Relatividade Geral serão abordados de maneira conceitual, passando brevemente pela contextualização histórica por trás da sua construção e as revoluções que essa teoria causou, e por fim, pelas consequências que se ligam com certos fenômenos astronômicos.

Em relação a Transposição Didática, será retratado os principais conceitos e características, para logo depois se discutir um pouco sobre as questões da utilização e como pode se relacionar com o ensino da Relatividade Geral.

### 2.1 A RELATIVIDADE GERAL

Não há dúvidas de que Albert Einstein é um dos maiores ícones da ciência, a imagem dele é sempre relacionada e lembrada quando se remete, principalmente, há algo relacionado à Física. Seus trabalhos envolvendo a teoria da Relatividade Geral e Restrita, e suas contribuições para a Mecânica Quântica, como a explicação do efeito fotoelétrico, até hoje trazem avanços e descobertas dentro da ciência.

Talvez o que o público em geral saiba mais, relacionado ao Einstein, dentro das suas descobertas, sejam a fórmula da equivalência massa-energia e algo sobre buracos negros e ondas gravitacionais. Por mais que alguns desses conceitos não sejam tão bem difundidos e divulgados para as pessoas, algumas ideias básicas ainda conseguem ser passadas, por se tratar justamente de algo que se tornou famoso e até se transformou em algum tipo de marca, pois, em algum momento das nossas vidas, já nos deparamos, com algo relacionado ao Einstein e suas contribuições.

No entanto, vale ressaltar que os trabalhos de cientistas vão muito além do que o conhecimento que normalmente as pessoas têm sobre ele, pois existem diversos conceitos que surgiram e se ampliaram através das descobertas de Einstein, e que podem muito bem serem tratados dentro da sala da aula, através de uma metodologia correta e durante um tempo adequado. A Relatividade Geral, por

exemplo, ajudou e continua abrindo portas para a nossa compreensão do Universo, mais especificamente nesse contexto, ao que é relacionado a Astronomia a Cosmologia e a Astrofísica atuais.

No início do século XX, quando estava nascendo a Física Moderna, e até antes desse momento, a Física era sustentada principalmente pelas teorias de Newton, que tempos depois veio a ser chamada de “Física Clássica”. Fenômenos como a radiação de corpo negro e o efeito fotoelétrico, não conseguiam ser explicados pela Física Clássica, e foi principalmente a partir de análises desses fenômenos que se fez necessário estabelecer uma nova Física, hoje chamada de Física Moderna. Nomes como Max Planck, Niels Bohr, Erwin Schrödinger, Einstein e outros cientistas, foram alguns dos nomes mais famosos que ajudaram a estabelecer teorias científicas que conseguiram explicar fenômenos envolvendo escalas atômicas, subatômicas, velocidades muito próximas à luz e atribuíram novas visões e descobrimentos de diversos outros fenômenos, como o modelo atômico, a gravidade e a sua relação com a geometria do espaço-tempo etc (HELERBROCK, 2019).

Sendo um dos grandes nomes por trás da Física Moderna, Albert Einstein ficou mais conhecido por conta da sua Teoria da Relatividade, sendo ela dividida entre a Relatividade Restrita e a Relatividade Geral, em que uma completa a outra. A Relatividade Restrita, embora timidamente, ainda é abordada nos livros didáticos do Ensino Médio, quando apresentam as transformadas de Lorentz. Entretanto, neste trabalho, estamos interessados no potencial que a Relatividade Geral tem a oferecer ao ensino de Física na Educação Básica.

Os tópicos a seguir envolvendo os conceitos da Relatividade Geral e suas consequências, fundamentam-se principalmente nos livros-textos do TIPLER (2014) e HEWITT (2015).

### **2.1.1 A construção da Relatividade Geral**

Em 1915, Einstein trouxe ao mundo a teoria da Relatividade Geral, que foi posterior a sua teoria da Relatividade Restrita e veio com o intuito de atender, de maneira válida, os referenciais não-inerciais (isto é, que sofrem aceleração). E,

revolucionando o que Isaac Newton anteriormente havia proposto, Einstein nos apresentou uma nova teoria da gravidade, bem sofisticada e que esclareceu alguns problemas que a teoria newtoniana tinha, como ausência de explicação para o surgimento da gravidade, já que a teoria apenas descrevia o funcionamento da força gravitacional, mas não conseguia explicar como de fato ela surgia e agia à distância. Em suma, a teoria da Relatividade Geral, nos ajuda a entender as interações gravitacionais e os fenômenos que a envolve (como os buracos negros, ciclo de vida das estrelas e propagação da luz em meio ao Universo) e, com isso, trouxe avanços tecnológicos, como no caso do GPS e das comunicações entre sondas espaciais.

O que levou Einstein a formular uma teoria da relatividade geral que a relatividade restrita não foi um resultado experimental que necessitasse de explicação, mas o desejo de incluir na teoria da relatividade a descrição de todos os fenômenos naturais. Em 1907, Einstein percebeu que estava em condições de atingir esse objetivo, com uma única e notável exceção: os fenômenos que envolviam a força da gravidade (TIPLER; LLEWELLYN, 2014 p. 61).

Durante o ano de 1907, Einstein havia pensado em como ele poderia mudar a gravitação newtoniana para se adaptar a Relatividade Restrita. “Então lhe ocorreu o que chamou de o ‘pensamento mais feliz da minha vida’: Se uma pessoa cai livremente do telhado de uma casa, ela não sente o próprio peso” (PIRES, 2008, p. 240). Ele imaginou que a gravidade não deveria ser necessariamente uma força, mas que ela poderia ser “fabricada” e que dependeria do sistema de referência adotado.

Einstein passou 8 anos da sua vida lapidando essa ideia, pensando em várias hipóteses que chegasse a uma teoria relativística da gravidade, e, só então, em 1915, que foi publicado oficialmente o seu trabalho da Relatividade Geral. Inicialmente ela não foi amplamente aceita pela comunidade científica, mas, conforme os anos foram passando essa teoria foi se consolidando cada vez mais com as descobertas e comprovações no que a envolve, até os dias atuais.

### **2.1.2 O Princípio da Equivalência**

O princípio da equivalência pode ser referido como a base da Relatividade Geral, sendo dito como o terceiro postulado de Einstein. Ele pode ser descrito da seguinte forma:

*“Um campo gravitacional homogêneo é equivalente, sob todos os aspectos, a um referencial uniformemente acelerado”* (TIPLER; LLEWELLYN, 2014, p. 61).

Esse princípio surge de forma parecida na mecânica de Newton. Lá, a força de interação gravitacional entre dois corpos é diretamente proporcional ao produto das massas desses corpos ( $M$  e  $m$ ) e a constante gravitacional  $G$ , e inversamente proporcional ao quadrado da distância ( $d$ ) entre esses corpos. Sendo assim, o módulo dessa força é representada pela seguinte equação:

$$F_g = \frac{GMm}{d^2}. \quad (\text{Eq. 1})$$

E, pela segunda lei de Newton, temos que a força resultante que atua sobre um corpo é diretamente proporcional ao produto da massa ( $m$ ) desse corpo e a aceleração ( $\vec{a}$ ) na qual ele está sendo submetido.

$$\vec{F}_r = m\vec{a}. \quad (\text{Eq. 2})$$

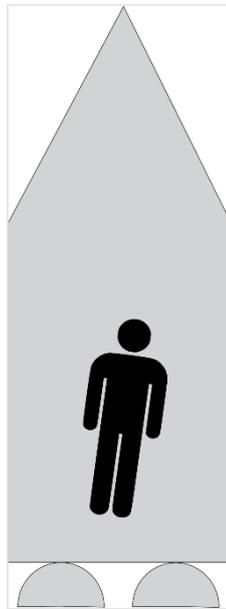
Note que existem massas “diferentes”, uma é a massa gravitacional ( $m_g$ ) e a outra é a massa inercial ( $m_i$ ) (que se refere a dificuldade de alterar o estado de movimento de um corpo). E não existe nenhuma explicação, dentro da Física Clássica, comprovando que a força gravitacional (proveniente de uma massa gravitacional), é a mesma força necessária para empurrar um corpo com massa inercial. Em outras palavras, não há como saber se um corpo está sendo acelerado na ausência de um campo gravitacional ou se está em repouso (ou se movendo com velocidade constante) na existência de um campo gravitacional. Mesmo que experimentalmente falando, mostrou-se que essas massas são iguais dentro da Física Clássica, com uma margem de erro menor que  $10^{-12}$ .

Em 1905, Einstein concluiu que dentro de um compartimento fechado, livre de perturbações externas, é impossível determinar se algo ou alguém está em repouso, ou se movendo com velocidade constante. No entanto, se estivermos a bordo de um avião, dentro das mesmas condições anteriores, e ele, em um certo momento,

sofresse uma desaceleração, notaríamos que o movimento do avião não seria mais uniforme, mas sim acelerado. Einstein tinha convicção de que as leis da Física poderiam também serem expressas para referências acelerados.

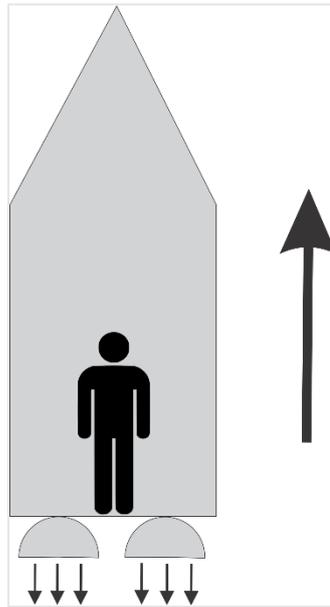
Imaginemos agora, que estamos em uma nave espacial, longe de qualquer influência gravitacional, em repouso ou em movimento uniforme em relação às estrelas; estaríamos flutuando dentro da nave, e não teríamos mais noção do que é “em cima” ou “em baixo” (**Figura 1**). A partir do momento que nave fosse acelerada, poderíamos sentir uma gravidade “fabricada”, e poderíamos ficar em pé - se ela fosse acelerada na mesma direção em está sendo representado na **Figura 2** -.

Figura 1: Nave espacial longe de qualquer influência gravitacional.



Fonte: Autoria própria.

Figura 2: Nave espacial acelerada.



Fonte: Autoria própria.

Se a aceleração da nave fosse a mesma que a aceleração gravitacional da Terra, também poderíamos pensar que a nave está parada sobre a superfície da Terra.

Mas voltando a situação em que a nave está com essa gravidade “fabricada”; suponhamos que temos duas esferas com massas diferentes, e dentro da nave, decidimos largar ambas de uma mesma altura e no mesmo instante de tempo, veríamos que as esferas chegariam ao chão da nave no mesmo momento, independentemente da massa dos dois, exatamente da mesma forma que ocorreria na Terra, desprezando-se a resistência do ar. Porém, já que a nave está se locomovendo de maneira acelerada, o chão da nave se também se moveria, até ir de encontro as esferas, após se passar um certo tempo que elas foram largadas.

A partir desse tipo de raciocínio, Einstein percebeu que essa igualdade entre massa inercial e massa gravitacional deixou de ser apenas uma coincidência para se tornar uma necessidade. Sendo impossível distinguir o que é gravidade e o que é aceleração dentro dessa situação descrita, essa equivalência foi o que se tornou a base da Relatividade Geral.

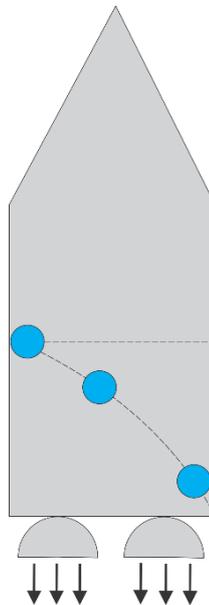
O princípio da equivalência estabelece que as observações realizadas num sistema de referência acelerado são indistinguíveis daquelas realizadas no

interior de um campo gravitacional newtoniano. Essa equivalência seria interessante, mas não revolucionária, se fosse aplicável apenas aos fenômenos mecânicos, mas Einstein foi além e estabeleceu que o princípio vale para todos os fenômenos naturais; portanto, vale também para a óptica e todos os fenômenos eletromagnéticos (HEWITT, 2015, p. 689).

### 2.1.3 Desvio da Luz pela Gravidade

Suponhamos que, dentro da nave acelerada, longe de qualquer ação gravitacional, lançarmos uma bola lateralmente de uma extremidade até a outra, paralela a ela, de tal maneira, que ela faça uma trajetória curva. Pois o piso da nave se adiantará em relação a bola, justamente porque a nave está sendo acelerada (**Figura 3**).

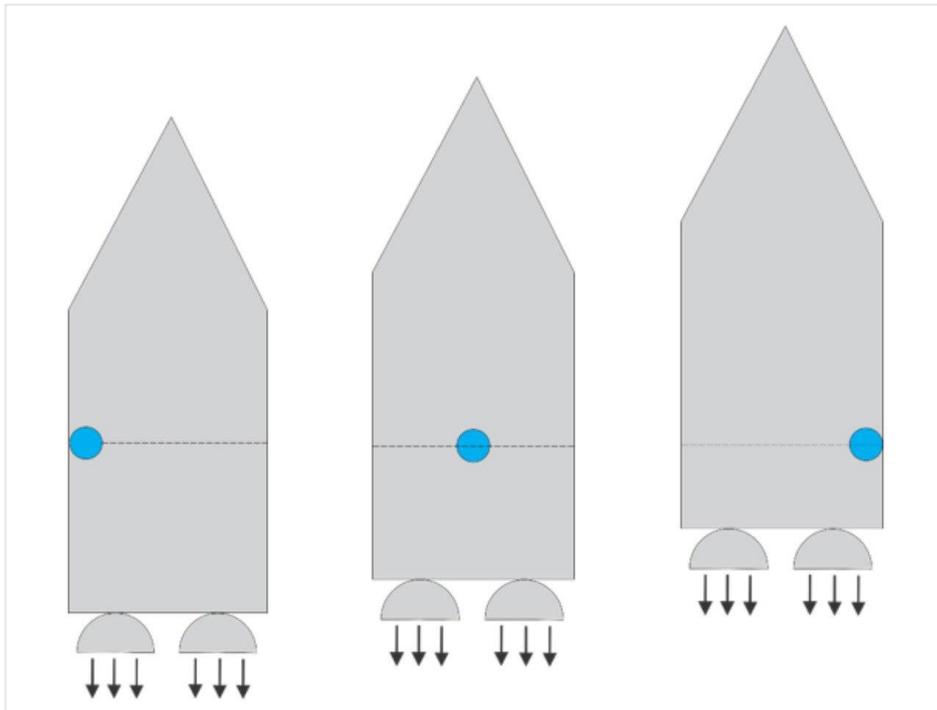
Figura 3: Bola lançada dentro da nave acelerada.



Fonte: Autoria própria.

No entanto, um observador externo a nave, verá a bola percorrer uma trajetória em linha reta por conta do movimento da nave, como na ilustração a seguir (**Figura 4**).

Figura 4: Movimento da bola vista por um observador externo.



Fonte: Autoria própria.

De maneira análoga a esse exemplo anterior, se um feixe de luz entrasse por uma extremidade da nave e atingisse a outra extremidade paralela a ela, o observador interno a nave, veria a luz se curvando por conta da aceleração da nave. Mas a aceleração da nave causaria um efeito de gravidade “fabricada” ao observador interno, então pelo princípio da equivalência, a luz está sendo curvada pela gravidade.

Essa consequência contraria o que a Física Clássica afirmava até então; que as interações gravitacionais seriam exclusivas para partículas com massa. No entanto, apesar de a luz não ter massa, ela tem energia. E Einstein havia postulado anteriormente que massa e energia são equivalentes (conhecido como o princípio da correspondência, e representado pela famosa equação de que  $E=mc^2$ ), portanto a luz deve exibir propriedades como peso e inércia sob certas condições.

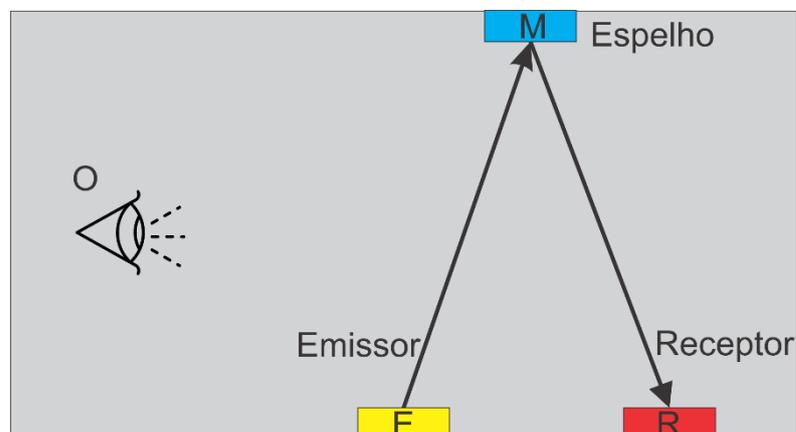
O desvio da luz pela gravidade é uma das consequências naturais do princípio da equivalência, sendo este, um dos primeiros fenômenos comprovados experimentalmente por Einstein, após comparar a luz provinda de uma estrela distante, antes e depois de passar nas proximidades do Sol. O Sol possui um campo gravitacional mais intenso, e por conta que a luz é extremamente rápida, fica um pouco mais fácil de observar a deflexão causada na luz quando está sobre ação do campo gravitacional do Sol. A comprovação veio com a observação de um eclipse solar em 1919, que tinha, inclusive, uma equipe que veio à cidade de Sobral, no Ceará – Brasil.

#### 2.1.4 Desvio da Luz para o Vermelho Gravitacional

Uma das outras consequências do princípio da equivalência, é a diminuição do fluxo temporal causado pela gravidade, em outras palavras, quanto maior for a força gravitacional, mais devagar o tempo vai decorrer naquela localidade.

Imagine que dentro de um compartimento fechado (como em um trem) – de modo que não seja possível distinguir se está parado ou se movimentado com velocidade constante – haja um emissor de luz no chão, que emite um feixe luminoso em direção ao teto do compartimento, até onde está localizado um espelho que irá refletir esse feixe para um receptor logo abaixo (**Figura 5**).

Figura 5: Observado presenciando a trajetória do feixe de luz.



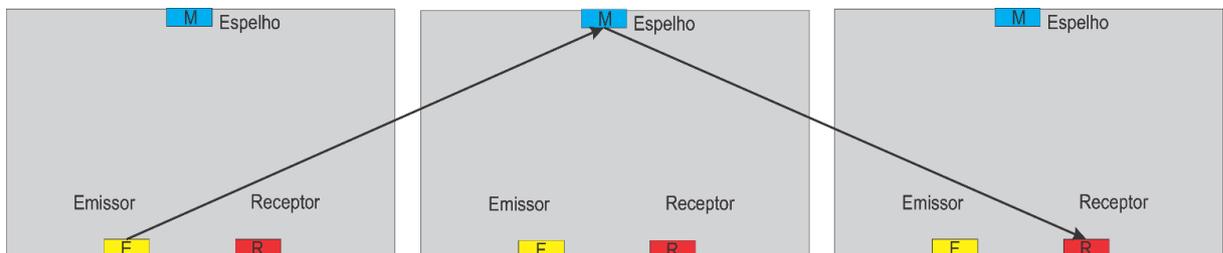
Fonte: Autoria própria.

O observador **O** vai notar que a luz demorou um certo intervalo de tempo  $\Delta t$  até fazer toda a trajetória desde ser emitida, refletida pelo espelho e chegar no receptor. De acordo com o postulado da Relatividade Restrita, a velocidade da luz é a mesma em relação a qualquer referencial, logo ela vai ser uma constante abreviada de **c**. Podemos usar a seguinte expressão para representar a velocidade de propagação da luz:

$$c = \frac{\text{distância}}{\text{tempo}} \quad (\text{Eq. 3})$$

Suponhamos que agora um observador **O'**, situado do lado de fora do compartimento, consiga enxergar a mesma situação que ocorreu na parte de dentro, e imaginemos que ele observou isso enquanto o compartimento se movia (Figura 6). Notaremos que esse novo observador percebeu que a luz percorreu uma trajetória maior se comparada com aquela que o observador **O** presenciou.

Figura 6: Trajetória da luz vista pelo observador externo.

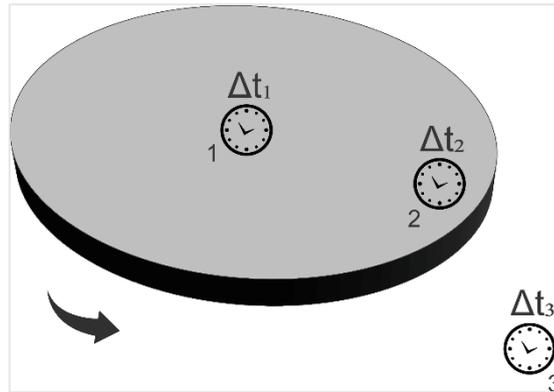


Fonte: Autoria própria.

Como a distância aumentou, por consequência, o tempo também vai aumentar, para que assim se mantenha a constância da velocidade da luz na **eq. 3**. Portanto, o tempo passa diferente para cada evento em um sistema de referência.

Pense agora na seguinte situação: um disco que gira de maneira acelerada, com dois relógios sobre ele (um no centro e outro na borda), e em repouso no solo, no mesmo sistema de referência, existe um terceiro relógio.

Figura 7: Posições dos relógios em relação ao disco acelerado.



Fonte: Autoria própria.

Os intervalos de tempo  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  e  $\Delta t_3$  dos relógios, estão perfeitamente sincronizados. Mas como o relógio 2 está se movendo em relação aos outros, teremos que  $\Delta t_1 = \Delta t_3 > \Delta t_2$ .

Um observador no centro do disco pode concluir que o relógio 2 está sobre a influência de uma força centrífuga, – o movimento de rotação do disco gera uma força inercial que tenta empurrar o relógio 2 para fora do disco – o que vai acarretar uma aceleração centrífuga, e pelo princípio da equivalência, essa aceleração é traduzida em uma força gravitacional.

Essa diminuição do fluxo temporal, se aplica a tudo que seja físico, biológico e químico. Uma pessoa que vive em um planeta com uma força gravitacional maior do que a da Terra, vai envelhecer mais lentamente se comparado com alguém que vive na Terra. Esse efeito é muito pouco perceptível nessa situação, a menos que esse outro planeta, em uma situação hipotética, tenha uma gravidade extremamente forte.

É trivial pensar que essa desaceleração temporal causada pela gravidade também vai influenciar os átomos. Cada átomo emite uma frequência de luz específica, e essa frequência se traduz em uma espécie de relógio interno para o átomo. Então diminuir essa frequência de luz emitida, significa desacelerar o tempo para um átomo. Dentro do espectro visível, a frequência mais baixa que podemos enxergar é o vermelho, e se um átomo sofre influência de um campo gravitacional, a sua frequência emitida vai tender a diminuir para o vermelho.

Desde que o vermelho está na extremidade de mais baixa frequência do espectro visível, uma diminuição na frequência desloca a cor para o vermelho. Esse efeito é chamado de desvio para o vermelho gravitacional (HEWITT, 2015, p. 692).

Na prática, observamos que certo tipo de radiação, ao deixar um campo gravitacional, perde energia, o que ocasiona a diminuição da sua frequência. E se essa mesma radiação adentra em um campo gravitacional, ela vai sofrer o efeito inverso, sua frequência vai ter um aumento e dentro do espectro visível, implicará em um desvio para o azul.

### **2.1.5 A Geometria do Espaço-Tempo**

Quando combinamos um encontro com alguém, nós vamos para algum lugar específico dentro das nossas dimensões do espaço; dotado de altura, largura e profundidade. Mas, sem saber um tempo exato para irmos a esse tal lugar, ficaríamos confusos e possivelmente estaríamos lá antes ou depois da outra pessoa chegar. Além do mais, todas as coisas que ocupam um lugar no espaço, precisam necessariamente ter um tempo a eles atribuídos, isto é, tal coisa só vai estar presente e existindo em um certo lugar do espaço, durante um certo período.

Esses são argumentos simples que mostram que o espaço é unificado com o tempo, sendo que o tempo, é responsável por estruturar mais uma dimensão do Universo. Vivemos em um Universo tetradimensional, composto pelo que chamamos de espaço-tempo, isto é, as três dimensões espaciais e a dimensão temporal.

Corpos que se movem com velocidades relativísticas (velocidades próximas à velocidade da luz) pelo espaço-tempo, alteram de forma significativa tanto o seu comprimento, como o próprio espaço a sua volta, nesse caso, o espaço vai se contrair, causando a contração do objeto também.

Essa contração do comprimento foi proposta pela primeira vez pelo físico George F. FitzGerald e expressa matematicamente por outro físico, Hendrick A. Lorentz. Enquanto esses físicos fizeram a hipótese de que era a própria matéria que sofria contração, Einstein percebeu que o que sofre à contração é o próprio espaço (HEWITT, 2015, p. 676).

Se pensarmos agora no exemplo do disco acelerado (**figura 7**), um objeto posto nas bordas do disco teria o seu comprimento contraído, então qualquer medida de tamanho feita ao longo da circunferência do disco teria o seu valor alterado. Se a razão entre o diâmetro e a circunferência do disco parado é  $\pi$ , com ele acelerado, esse valor já não seria mais uma constante, e sim uma variável, que seria influenciado pela rapidez do disco; quanto mais rápido for a rotação do disco, mais comprimidas serão as medidas de distância ao longo da circunferência.

Pelo Princípio da Equivalência, sabemos que a aceleração da rotação do disco, localmente, é equivalente a um campo gravitacional, que vai diminuindo de intensidade conforme vamos nos aproximando do centro do disco.

Se o espaço se curva/contrai por conta de um corpo massivo, podemos tirar algumas conclusões importantes a partir disso. O primeiro é que a gravidade deixa de ser uma força, e se torna uma consequência da curvatura do espaço-tempo causada por um corpo massivo. A trajetória que um objeto faz, sob a influência de um campo gravitacional, será apenas a menor distância que ele pode percorrer em uma superfície curva, que é uma geodésica (termo usado para descrever a distância mínima percorrida em uma superfície curva). A geometria euclidiana (a geometria usada para descrever figuras em uma superfície plana), não vai se aplicar nessa situação descrita, e, levando em conta essa geometria euclidiana, a menor distância entre dois pontos será uma reta, coisa que não é verdade para a trajetória percorrida por um objeto sob ação de um campo gravitacional. A partir desse momento, se fez necessário utilizar uma nova geometria para descrever o espaço, uma geometria não-euclidiana, uma geometria curva.

Einstein desenvolveu uma equação para descrever essas propriedades do espaço-tempo, denominada comumente como “Equação de Campo de Einstein”. Basicamente ela nos diz como que o espaço-tempo faz a matéria se mover e como que a matéria faz o espaço-tempo se curvar; o Físico Americano John Wheeler cita uma frase parecida para resumir a equação de Einstein. Apesar de ser explicitada como apenas uma equação, essa equação de campo é um conjunto de cerca de mais dez equações em que envolve uma matemática mais avançada.

### **2.1.6 Como a Relatividade Geral Mudou a Nossa Visão da Astronomia**

Na Astronomia as escalas são muito grandes, quando comparadas aos fenômenos que observamos na Terra, e os efeitos previstos pela Relatividade Geral são bem mais perceptíveis se observados dentro dessas escalas astronômicas. Einstein se utilizou disso para obter o primeiro dado experimental que comprova uma das consequências da Relatividade Geral. Como citado anteriormente, foi através de um Eclipse observado em 1919, por expedições que foram tanto para a cidade de Sobral, no Ceará-Brasil, quanto para Ilha do Príncipe, na África. Com a observação do eclipse total solar foi possível calcular a deflexão causada na luz proveniente de uma estrela que passava nas proximidades do Sol (PIVETTA; ANDRADE, 2019).

Vale ressaltar que o contexto histórico envolvendo essa observação da deflexão da luz é bem rico no que se refere aos detalhes por trás desse feito, até porque já tinham existido outras expedições na busca por esses dados. Por condições meteorológicas melhores, e outros fatores, a observação do eclipse em Sobral obteve melhores resultados, e atualmente, é a mais lembrada quando se comenta sobre esse marco da história da ciência, que foi o Eclipse de 1919. Ainda existia as limitações tecnológicas da época e diversos outros fatores que teriam que ser manipulados para a uma coleta mais precisa dos valores (como a interferência da atmosfera terrestre) (MATSUURA, 2019).

Um tempo depois das observações, Einstein obteve as equações de campo que descrevem a curvatura do espaço-tempo e as interações gravitacionais envolvidas no fenômeno, o que implicava na resolução final, de que a trajetória da luz percorre uma geodesia justamente por conta da curvatura do espaço-tempo, que é ocasionada por um corpo massivo. E essa curvatura é o que sentimos como gravidade.

A Relatividade Geral abriu várias portas para a nossa compreensão do cosmos. Efeitos e fenômenos relacionados a Astronomia nos mostraram o quão incrível e estranho pode ser o nosso Universo.

### **2.1.7 Periélio de Mercúrio**

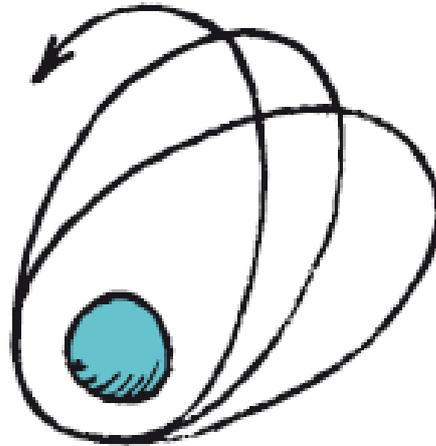
A mecânica newtoniana traz uma descrição para as órbitas dos planetas em torno do Sol. De acordo com ela, os planetas percorrem uma trajetória elíptica, tendo o Sol com um dos seus focos. Johannes Kepler foi o responsável por desenvolver essa teoria científica, mas havia um problema quando se usava ela para calcular o periélio (ponto mais próximo do Sol) de Mercúrio.

Na prática, a elipse não se mantém constante em relação a sua posição o tempo todo, e ainda deve-se levar em conta as interações gravitacionais provenientes dos planetas próximos. Mesmo com todas essas considerações, os valores para o periélio de Mercúrio divergiam dos que foram obtidos através de observações.

Esse fato manteve-se como um mistério durante muito tempo, e várias hipóteses foram propostas para tentar explicar isso, como a presença de outro planeta ou até mesmo uma correção para a equação da gravidade de Newton. Mas essa resposta só foi obtida quando se levou em consideração os efeitos relativísticos, previstos pela teoria de Einstein; o planeta Mercúrio é o mais próximo do Sol, logo ele sofre uma ação gravitacional mais intensa se comparado com todos os outros. Aplicando a gravitação de Einstein e fazendo as correções para as escalas de espaço e tempo, foi possível chegar a um valor preciso para esse periélio.

Ainda Einstein previu uma precessão nas órbitas dos planetas (o que vai de encontro com a inconstância na órbita elíptica dos planetas); quanto mais próximo um planeta estiver do Sol, maior será o efeito gravitacional sobre o tempo e maior será a taxa de precessão de um planeta.

Figura 8: Representação da precessão de um planeta.



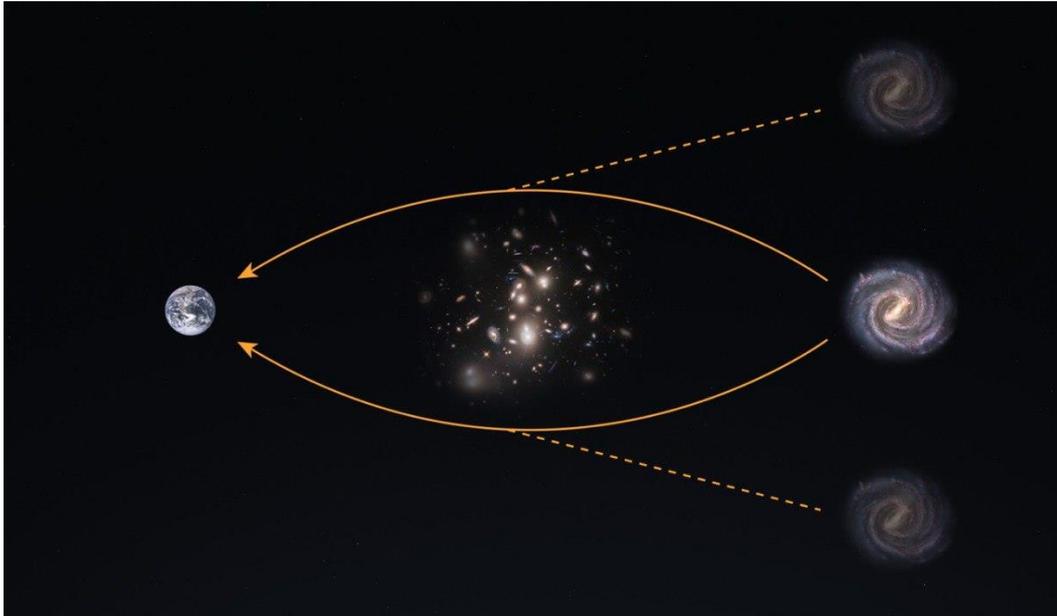
Fonte: Paul G. Hewitt (2015, p. 694)

### 2.1.8 Lentes Gravitacionais

Esse efeito se relaciona com o desvio da luz pela gravidade. O planeta Terra recebe a todo momento raios de luz defletidos gravitacionalmente de vários lugares do Universo. No entanto, alguns desses raios de luz, que foram defletidos por algum objeto e chegou até a Terra, podem revelar coisas bastante interessantes.

Quando o planeta Terra, o emissor e o corpo defletor estão mais ou menos alinhados, dizemos que o corpo defletor é a lente gravitacional e o corpo emissor é o lenteado. Através desse fenômeno podemos enxergar corpos que normalmente não poderíamos ver, revelando também, diversas propriedades desses objetos.

Figura 9: A lente gravitacional está localizada no centro e o corpo emissor está na parte direita.



Fonte: Canal Ciência Todo Dia<sup>1</sup>.

Dependendo de como fica o arranjo entre Terra, lente gravitacional e objeto lenteado, irão surgir algumas classificações para esses posicionamentos e para a qualidade de observação do objeto lenteado (que vai depender da lente):

Há também a classificação para a geometria das imagens do lenteamento que são formadas, e de acordo com a classificação anterior, esses formatos são influenciados nas **lentes fortes**, a lente possui grande massa, a geometria do arranjo é favorável e a deflexão da luz é relativamente alta. Isso faz com que o observador veja múltiplas imagens, arcos e, caso o alinhamento seja exato, um anel, também chamado de Anel de Einstein.

Nas **lentes fracas**, a lente também possui grande massa, porém a geometria do arranjo é menos favorável. Isso faz com que os objetos lenteados pareçam cisalhados, deformando-se em arcos cujo centro é a lente gravitacional, e, desse modo, sua distribuição pareça menos aleatória.

Nas **microlentes gravitacionais**, a lente possui pouca massa e a geometria do arranjo é muito favorável. Pelo tamanho da lente, os efeitos vistos nas lentes fortes não são formados e o que ocorre é a magnificação aparente do brilho do objeto lenteado (COUTO, 2020, p. 41-42).

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Ylf5QWFRtsI>. Acesso em: 5 de dezembro, 2021.

pelos posicionamentos dos corpos celestes no fenômeno da lente gravitacional.

Esféricos - as imagens obtidas, aparecem em forma de anel (conhecido como Anel de Einstein)

Alongada em forma de elipsoide – as imagens geram uma multiplicidade em forma de cruz (conhecida como Cruz de Einstein)

Se forem disformes como aglomerados massivos, as imagens aparecerão em formas de arcos (SANTOS, 2010, p. 2).

### **2.1.9 Buracos Negros**

Uma das soluções das equações de campo de Einstein sugere a existência de um corpo extremamente denso, tão denso que o seu campo gravitacional é forte o suficiente para que nem mesmo a luz consiga escapar. Esse corpo é comumente conhecido como buraco negro.

Em 1915, Karl Schwarzschild foi o responsável por chegar a essa conclusão, através da primeira e mais simples solução das equações de campo de Einstein. Ele define o raio que um corpo massivo deva ter para atingir uma densidade grande o bastante, para garantir que a curvatura do espaço-tempo ocasionada por esse objeto se torne infinita. Ao chegar nesse ponto, o corpo toma proporções infinitesimais, e esse raio que ele atinge é chamado de “raio de Schwarzschild”.

Para essa solução, foi considerado um corpo sem momento angular (sem rotação) e esfericamente simétrico. Esse ponto de densidade e curvatura do espaço-tempo é também chamado de singularidade, e a região após o raio de Schwarzschild é denominado de horizonte de eventos.

O horizonte de eventos refere-se a barreira em que um observador distante pode presenciar os eventos ocorridos em um certo corpo que esteja se aproximando, por exemplo. Após ele alcançar o horizonte de eventos, não se pode noticiar ou observar mais nenhuma informação sobre ele, o tempo vai passar cada vez mais devagar para o objeto, até parar, e toda a sua informação ficara contida nessa região de extrema ação gravitacional.

Figura 10: Estrutura simples de um buraco negro.



Fonte: Galáxias do Desconhecido.<sup>2</sup>

É importante mencionar que a solução de Schwarzschild é muito “simples”, e existem outras soluções para as equações de campo de Einstein que leva em consideração mais propriedades que fazem parte dos buracos negros. Uma delas foi desenvolvida em 1963, pelo físico-matemático Roy Kerr, que apresenta melhor as características de um buraco negro que pode existir na natureza, por levar em consideração a sua massa e seu momento angular (LEMOS; HERDEIRO; CARDOSO, 2019).

A maioria dos buracos negros que se conhece, surgem após o resultado da morte de uma estrela com massa acima de 25 massas solares. Brevemente falando, quando uma estrela consome todo o seu combustível principal (que é o hidrogênio) a partir do processo de fusão nuclear, ela passa a fundir elementos mais pesados para manter a sua estrutura, que vai oscilando conforme isso acontece, passando pelas fases de gigante vermelha e supergigantes. No momento que elas tentam fundir o ferro, elas vão gastar energia ao invés de produzir. A estrela não consegue manter sua estrutura, e pela ação gravitacional, ela vai ser comprimida tão violentamente a um ponto, que nem mesmo as forças nucleares conseguirão repelir

<sup>2</sup> Disponível em: [https://galaxiasdoconhecimento.com.br/\\_htestrut/estruturas\\_013.html](https://galaxiasdoconhecimento.com.br/_htestrut/estruturas_013.html). Acesso em: 6 de dezembro, 2021.

essa compressão, fazendo com que toda a massa da estrela seja colapsada em um espaço muito pequeno. Dessa forma, vai ser formada uma singularidade no espaço-tempo e teremos o nascimento de um buraco negro estelar.

Além dessa espécie de buraco negro descrito, existem os buracos negros supermassivos que possuem bilhões de massas solares e que são encontrados na maioria dos centros das galáxias. E sobre o seu processo de surgimento:

Seu processo de formação está associado ao das próprias galáxias, porém a forma dessa associação ainda não é consenso entre os pesquisadores. Não se sabe se eles nasceram antes das galáxias e guiaram seus desenvolvimentos ou se desenvolveram junto com elas. Também não é conhecido se já nasceram com suas massas gigantescas ou se começaram como buracos negros estelares e aumentaram de tamanho com o tempo ao colidirem com outros buracos negros ou ao sugarem matéria próxima a eles (COUTO, 2020, p. 35)

Os mais recentes avanços tecnológicos nos forneceram maneiras de se “visualizar” um buraco negro diretamente, foram obtidas fotos de dois buracos negros supermassivos (uma em 2019 e outra em 2022) em que se é possível enxergar o seu disco de acreção (matéria acelerada superaquecida que gira em torno do horizonte de eventos), sendo que um deles se encontra no centro da nossa galáxia. Esse marco na história da ciência foi noticiado em praticamente todos os meios de comunicações, sendo também responsável por contribuir com os estudos sobre buracos negros que levaram ao Prêmio Nobel de Física<sup>3</sup> no ano de 2020, e que vai possivelmente nos dar mais opções de se entender melhor sobre os tipos de buracos negros.

### **2.1.10 Ondas Gravitacionais**

Como sabemos, um objeto massivo deforma o espaço-tempo ao seu redor, e com isso sentimos o que chamamos de gravidade. Mas o que acontece quando esse objeto deixa o local no qual ele está deformando, e se movimenta para outra direção? Ou até mesmo quando acontece um grande evento como supernovas e colisões de buracos negros? Neste caso, aparecem as ondas gravitacionais.

---

<sup>3</sup> Disponível em: <https://portal.if.usp.br/imprensa/pt-br/node/2999>. Acesso em: 6 de junho, 2022.

Se pensarmos no espaço-tempo como um colchão d'água, o local deformado vai voltar ao seu estado normal, assim que o corpo deixar essa região, causando uma perturbação do tipo ondulatória que vai se propagar por todo o tecido (semelhante ao que acontece quando jogamos uma pedra em um lago). De maneira análoga, no espaço-tempo esse tipo de perturbação é denominado de onda gravitacional.

Esse fenômeno foi mais um dos que foram previstos pela Relatividade Geral, ao Einstein descobrir que as equações de campo admitiam soluções do tipo onda.

As ondas gravitacionais foram detectadas pela primeira vez de maneira indiretamente em 1974, e mais recentemente em 2015, foi observado um sinal direto através dos interferômetros da colaboração LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), criados pela fusão de dois buracos negros.

Note-se que esta descoberta não foi só relativa a ondas gravitacionais, mas também à primeira detecção da colisão e fusão de dois buracos negros e a subsequente formação de um buraco negro maior. Desde então, mais 4 eventos similares foram detectados, na verdade, em frequências audíveis para um humano (BERTOLAMI; GOMES, 2017, p. 1).

Essas ondas são informações que viajam à velocidade da luz, e a todo momento enquanto algo se move pelo espaço, estão se formando as ondas gravitacionais, inclusive de nós mesmos. Mas nessas escalas, essas ondas são imperceptíveis, só mesmo através de grandes eventos gravitacionais, envolvendo escalas gigantescas, é que se produzirá algo perceptível para a nossa tecnologia atual.

O LIGO não é o único interferômetro que existe, e ele junto com outros interferômetros, estão constantemente passando por aperfeiçoamentos na tentativa de conseguirem detectar ondas gravitacionais resultantes de eventos um pouco menores, possibilitando descobrir e estudar coisas que atualmente estão fora no nosso alcance.

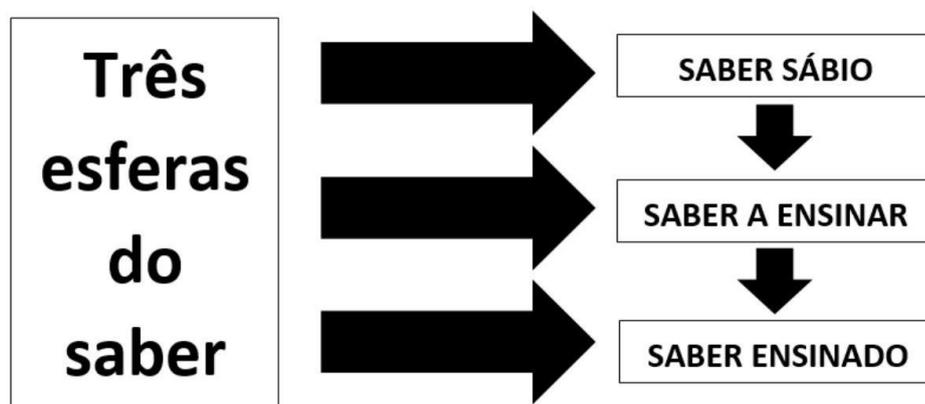
Além de nos dizer como o universo teve início, a astronomia de ondas gravitacionais vai revolucionar o nosso conhecimento da física e astrofísica e, provavelmente, nos ajudar a responder às suas principais questões da atualidade, tais como a matéria escura e a energia escura. (AGUIAR, 2018, p. 28).

## 2.2 TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA

A teoria da Transposição Didática foi desenvolvida pelo matemático Yves Chevallard em 1980, no entanto a ideia original foi formulada pelo sociólogo Micheal Verret, em 1975. No seu trabalho, publicado em 1991, Yves Chevallard estudou como alguns conceitos, desenvolvidos por teóricos dentro da área da matemática, são transformados, para ser ensinado nas salas de aulas. De maneira geral, ele analisou e descreveu as questões sociais e culturais no que envolve a transformação do conhecimento acadêmico no saber escolar.

Essa teoria nos explica que os conteúdos, originalmente desenvolvidos pelos teóricos da ciência, não devem ser apenas simplificados para chegarem no âmbito da sala de aula e nos livros didáticos, mas sim, devem passar por processos mais aprofundados, para que se adequem a um saber que cumpra os novos requisitos que englobam esse novo ambiente no qual esse conteúdo vai ser inserido. Chevallard atribui a denominação de “saber sábio” ao conhecimento desenvolvido pelos cientistas, no contexto de suas pesquisas acadêmicas; quando esse conhecimento é transformado e aplicado aos currículos e nos livros didáticos, ele se denomina como “saber a ensinar”; e, por fim, a partir do momento que esse conhecimento transformado é, de fato, ensinado dentro das salas de aulas, ele é chamado de “saber ensinado”. Essas denominações são as “três esferas do saber”, que estão esquematizados na **Figura 11**:

Figura 11: Esferas do saber.



Fonte: Autoria própria.

Um conteúdo de saber que foi designado como saber a ensinar, sofre a partir de então um conjunto de transformações adaptativas que vão torná-lo apto para ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O “trabalho” que transforma um objeto de saber a ensinar em um objeto de ensino, é denominado de transposição didática. (CHEVALLARD, 1991, apud, RODRIGUES, 2001, p. 73).

Vale ressaltar que as simplificações de conteúdos são referidas como sendo aquelas que, por exemplo, são ditas como as “situações ideais” (desprezando atrito, resistência do ar etc.), e que, conseqüentemente, acarretam situações que fogem da realidade do aluno. Simplificações que venham diminuir a abstração e dificuldade de alguns conteúdos, como o que acontece em assuntos da Física Moderna, são válidas e extremamente úteis como ferramentas de ensino. Essas simplificações podem ser usadas até como uma “escada”, em que o aluno pode ir subindo nos degraus da complexidade do conteúdo. Um exemplo é tentar explicar a distorção que um corpo massivo faz nas dimensões do espaço, que se torna mais fácil de ser retratada e visualizada com um exemplo no espaço bidimensional, como na famosa demonstração utilizando alguma bola com massa considerável em cima de um lençol esticado.

Certamente, a construção de modelos pela Ciência para a apreensão do real visa transformar situações complexas em situações mais simples, afim de poder tratá-las por meio de teorias disponíveis. Com isso, neste processo, abstrações, simplificações e idealizações são implementadas, sem que, no entanto, os limites e possibilidades de tais opções sejam esquecidas, ficando o modelo condicionado às mesmas. (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005, p.389).

### **2.2.1. Transposição Didática e o que cerca o Sistema Didático**

As “três esferas do saber” fazem parte de um Universo muito amplo e dinâmico, em que o sistema didático é o núcleo e nele se encontra o contexto escolar. O sistema de ensino é tudo o que cerca o sistema didático, são todas as esferas da sociedade que fazem parte do ensino ou que o influenciam de alguma forma. Esse Universo que cerca o contexto escolar e as suas ações contribuem de

alguma forma na transformação do saber sábio, e de como ele será abordado no ensino, o que é chamado de *noosfera*.

A complexidade que gira em torno da noosfera pode ser entendida através dos papéis que diferentes pessoas exercem na sociedade. Familiares e todo o corpo da gestão escolar estão mais próximo da realidade escolar, com relação ao saber ensinado e atuam mais frequentemente dentro desse quesito, colocando suas demandas e exigências para a educação dos estudantes. Autores de livros didáticos, divulgadores científicos e até influentes do meio educacional, fazem parte dos que auxiliam no processo de escolha dos conteúdos do saber sábio que vão ter grande peso na hora de constituir a grade curricular das escolas. Mais externamente, porém, extremamente importante, existe a parte da política pública, atuando aos arredores de toda essa dinâmica citada, influenciando nessa transposição dos saberes, como no caso do Ministério da Educação no Brasil e os seus documentos oficiais.

É evidente a participação humana dentro do sistema didático, e tradicionalmente, é comum entender esse sistema didático como sendo composto unicamente por dois membros: o professor e o aluno. No entanto, essa relação binária é muito difícil de ser analisada e não considera toda a complexidade de exigências que existem, justamente por se tratar de elementos exclusivamente humanos, e por conta disso, possuir conflitos difíceis demais para serem superados e analisados dentro de uma perspectiva do ensino/aprendizagem. Por conta dessas características humanas, Chevallard sentiu a necessidade de introduzir um novo elemento ao sistema didático, **o Saber**, que retrata a materialização desses conflitos de interesse. Sendo assim, com a introdução desse novo elemento, nascem várias possibilidades de análises teóricas dessa nova relação do sistema didático (saber, aluno e professor). Sobre esse terceiro termo, Chevallard indaga as seguintes questões pensadas no contexto da sua pesquisa e que se aplica nas demais áreas envolvendo a Transposição Didática:

O que é então aquilo que, no sistema didático, se coloca sob o estandarte de O Saber? O “saber ensinado” que concretamente encontra o observador, que relação estabelece com o que se proclama dele fora desse âmbito? E que relação estabelece então com o “saber sábio”, o dos matemáticos? Quais distâncias existem entre um e outro? (CHEVALLARD, 1991, p.15)

De acordo com o que Chevallard propõe, pode-se agora refletir e analisar questões no que se refere, por exemplo, a toda transformação que o saber científico sofre até chegar no contexto escolar. “As esferas do saber” se relacionam de maneira bem linear, se vistas de forma mais externa, como no esquema da **figura 11**. Mas, se analisarmos de maneira mais cuidadosa, entenderemos melhor como funciona a transposição de um saber para o outro, e com isso em mãos, os professores vão poder dinamizar e construir um conteúdo mais adequado e otimizado para atender tanto as suas perspectivas enxergadas para um determinado público, quanto para se enquadrar no contexto no qual esse público se encontra.

O saber sábio surge através do desenvolvimento das teorias científicas, e, a princípio, é apresentado de maneira organizada, lógica e formal, dentro de todos os referências teóricos e dados empíricos que vierem a se associar a esse conhecimento. Ele então é divulgado para o público em geral, no entanto, nesse processo existe a **despersonalização** e a **descontextualização**, que são processos que omitem detalhes sobre o caminho de produção desses saberes, as motivações, o contexto e outros fatores envolvidos no desenvolvimento, para que o conhecimento seja justificado, entrando assim, na fase da **recontextualização**; em que não vai haver mais a conexão com esses fatores históricos e a sua problemática inicial, e com isso ocorrendo uma fragmentação do conteúdo para que seja distribuído. O saber, quando não tem mais essa ligação com as razões que o originaram, enquanto conhecimento, sofreu um processo chamado de **desincretização**.

Não são todas as pessoas que têm os parâmetros básicos necessários para compreender todo o conteúdo originário do saber sábio, ou até mesmo uma parte dele, então, esse saber, quando é extraído do ambiente epistemológico original, deve levar em conta o nível de conhecimento básico do público-alvo (ou o possível conhecimento) em relação ao assunto. A *noosfera*, é um dos responsáveis por acompanhar e validar todo esse processo.

A partir dessas mudanças, o saber sábio irá compor o saber a ensinar, depois dessas primeiras transformações. Mas, para isso, os conteúdos escolhidos para adentrar o saber a ensinar precisam conseguir ser ensinados dentro do contexto no qual ele vai ser inserido, como por exemplo, dentro de uma sala de aula no ensino fundamental ou no Ensino Médio.

Uma transmissão escolar burocrática supõe, em relação ao saber:

1 – A divisão da prática teórica em campos de saber delimitados que deem lugar a práticas de aprendizagem especializadas, ou seja, a desincretização do saber.

2 – Em cada uma dessas práticas, a separação do saber e da pessoa, ou seja, a despersonalização do saber.

3 – A programação dos aprendizados e dos controles, segundo as sequências racionalizadas que permitem uma aquisição progressiva dos conhecimentos dos especialistas, ou seja, a programabilidade da aquisição do saber. (VERRET, 1975, apud, RODRIGUES, 2001, p. 77)

O conhecimento fruto de uma teoria ou área da ciência, que por sua vez, vai se adequar e se limitar ao contexto escolar, e se resumir, em partes, aos materiais didáticos do tipo-texto, vão passar por um processo engenhoso de organização para que haja a textualização do saber.

Materiais didáticos, como os livros didáticos, vão apresentar conteúdos de forma organizada, que vão se interligando, seguindo uma lógica sequencial e linear. Podemos observar isso no Ensino Médio, quando se determinam os pré-requisitos, para que alguns conteúdos vistos inicialmente sirvam como base para algo mais complexo que vai ser estudado posteriormente, ou seja, vai haver uma aprendizagem progressiva levando em consideração os conhecimentos já adquiridos. Essa textualização do saber irá auxiliar em praticamente todos os tipos de sequências didáticas e construções dos programas curriculares, o que implica na formação dos objetivos educacionais e nas maneiras de se avaliar a aprendizagem de um determinado tema.

Contudo, nem sempre um professor vai passar o conteúdo de um livro didático para seus alunos, exatamente da mesma forma que ele é apresentado no livro. O último patamar da “esfera do saber” dentro da Transposição Didática, se refere a como adaptar os conteúdos dos livros-textos para que se possa criar conexões com o aluno e com o contexto que ele está inserido.

Como essa esfera está relacionada com o ambiente de trabalho do professor, logo os demais membros que compõem esse estabelecimento de trabalho, vão fazer parte da mediação que o professor deve fazer no momento da preparação e condução das aulas, levando em consideração os seus membros, é e claro, os

alunos. Com o intuito final de atingir os objetivos postos pelo próprio professor e a coordenação escolar, dentro de um contrato didático.

Neste momento, cria-se um terceiro nicho epistemológico que, através de uma nova transposição didática sobre o saber a ensinar, transforma-o em saber ensinado. Este último é de extrema instabilidade, pois o ambiente escolar – com os alunos e seus pais, supervisores escolares, diretores ou responsáveis pelas instituições de ensino e o meio social em que a instituição está inserida – exerce fortes pressões sobre o professor, que acabam interferindo em suas ações desde o momento em que preparara sua aula até lecioná-la de fato. (ALVES FILHO, 2000, p. 49-50).

### **2.2.2. A Teoria da Transposição Didática no ensino de Relatividade Geral**

Quando se trata da Relatividade Geral, em conjunto com a Transposição Didática, deve-se levar em conta os momentos em que ela pode ser aplicada para que haja um melhor proveito na aprendizagem de suas temáticas. Na maioria das vezes, vemos que no Ensino Médio, a tendência é que os conteúdos da Física sigam uma sequência que é mais ou menos cronológica e que vai aumentando em grau de complexidade conforme vão sendo passados. Então, cabe a questão de como introduzir elementos da Física Moderna e Contemporânea em um ano letivo com um tempo limitado e repleto de assuntos a serem dados. Além de considerar que muitas das vezes, as escolas estão mais preocupadas em preparar os seus alunos para os exames de vestibulares e o ENEM, onde o conteúdo específico de Relatividade Geral possivelmente nem será contemplado.

Se for seguir a ordem dos surgimentos dos conhecimentos da Física, a parte “moderna”, como o nome já sugere, vai aparecer em último plano na grade curricular dos estudantes. Dessa forma, isso vai acabar limitando ainda mais o processo de construção do saber, primeiramente por conta do tempo, e se não tiver relação com as avaliações, muitos alunos vão acabar deixando de lado, por se tratar de algo não muito relevantes para eles dentro desse contexto, ou por eles optarem em se preocuparem com provas finais e exames externos, por exemplo.

Levando em consideração esse cenário, uma boa interação da Relatividade Geral com os demais conteúdos da Física, é trabalhar com eles de maneira paralela.

Muitos alunos, provavelmente, com a imensa quantidade de informação que nos cerca todos os dias, já devem ter tido contato de maneira informal com algo da Relatividade Geral, e trazer a conexão disso com os assuntos da sala de aula, já é uma maneira de criar uma linha entre o contexto escolar e o cotidiano. A contextualização histórica no desenvolvimento da Física Clássica até chegar nos elementos da Física Moderna é um fator que mostra aos alunos a Física como um empreendimento humano. Feitos e descobertas que foram rebuscados com o avanço da Física, envolvendo o assunto em questão, podem ir de encontro ao que vemos relacionados a pseudociência e o charlatanismo, desmistificando certas coisas e ajudando a transformar os alunos em cidadãos mais críticos e conscientes nas informações que os cercam.

A matemática da Relatividade Geral é complicada para ser abordada no Ensino Médio, e para contornar isso, este trabalho vai se apoiar na Teoria da Transposição Didática, para propor uma abordagem dos assuntos de uma maneira mais conceitual, criativa e que vá passando pelos marcos históricos que fizeram parte da construção desse conhecimento, trazendo uma ferramenta que possa ser aplicada durante as aulas de Física.

Reconhecendo a realidade do nosso Sistema Didático, o conhecimento trazido por Yves Chevallard vai auxiliar na transformação que o tema da Relatividade Geral precisa sofrer para que se torne mais pertinente ao estudante do Ensino Médio. Trabalhos como o de Souza (2019), mostraram que um produto educacional criativo envolvendo conteúdos da Relatividade Restrita e a história e filosofia da ciência, fundamentada na teoria da Transposição Didática para alunos do 3º ano do Ensino Médio, consegue ser uma válvula de motivação para motivar os estudantes a se aprofundarem mais na Física. O trabalho de Lourenço (2019), além de fazer uma revisão bibliográfica, entre os anos de 2007 e 2019, enfatizado a necessidade de se inserir tópicos da Física Moderna e Contemporânea no ensino, elaborou um material didático com base na Transposição Didática, utilizando tópicos da Cosmologia e Física Moderna, que conforme foram aplicados no 2º ano do Ensino Médio, mostrou ser possível interligar essas concepções com os conteúdos da Física Clássica.

Também se utilizando da teoria de Yves Chavellard, Sá (2015) primeiramente percebeu que existem lacunas a serem preenchidas no ensino de Física do Ensino

Médio justamente pelos assuntos da Relatividade, e com isso, ele elaborou um instrumento didático voltado a inserção do tema da Relatividade para alunos do 1º ano do Ensino Médio, para que conseguissem caminhar paralelamente aos conteúdos da Física Clássica normalmente abordados neste ano; as avaliações feitas após a aplicação desse produto educacional, mostrou que os resultados foram no mesmo nível ou melhores quando relacionados aos resultados obtidos apenas com aulas de Mecânica Clássica.

As produções desses autores mostraram que assuntos da Física Moderna podem ser abordados lado a lado com a grade de assuntos “padrão” de Física, pois foram apresentados trabalhos que inseriram o conteúdo de Relatividade em cada um dos anos do Ensino Médio, e a ferramenta da Transposição Didática se mostrou um grande aliado em tornar isso possível e deixar a área de Física mais atrativa para os alunos. Assim como essas contribuições, este presente trabalho pretende trazer algo semelhante dentro do tema em questão, a partir de uma proposta autoral de Sequência Didática.

### 3 METODOLOGIA

Esse trabalho se enquadra como uma pesquisa qualitativa de caráter descritivo, que segundo Triviños (1987), exige que o pesquisador obtenha uma série de informações sobre o que deseja pesquisar afim de descrever os fatos e fenômenos de uma determinada realidade. E essa pesquisa foi do tipo propositiva, pois apresenta uma proposta de Sequência Didática, embasada pela teoria da Transposição Didática.

A pesquisa começou com um levantamento de trabalhos já produzidos envolvendo os temas da Física Moderna e Contemporânea (FMC) e Astronomia, com enfoque na teoria da Relatividade Geral, no Ensino Médio, usando os buscadores do Google Scholar, Scielo e Revista Brasileira de Ensino de Física, entre os anos de 2005 até o ano de 2020, pois, segundo a pesquisa de Salomão, Araújo e Mackedanz (2020), durante esses 15 anos foram desenvolvidos diversos trabalhos que corroboram e se preocupam com a inserção de metodologias pedagógicas voltadas para a FMC no Ensino Médio. Segundo a teoria da Transposição Didática, essas propostas de ensino, seriam caracterizadas como o “saber a ensinar”. Assim, foi feita uma caracterização desses trabalhos, procurando compreender os “saberes sábios” de onde foram apropriados, e quais são os conteúdos e as principais metodologias sugeridas.

Depois, a partir desses dados coletados, foi montada a estrutura da Sequência Didática, levando em consideração os principais pontos e discussões envolvendo esses assuntos, além de selecionar novos materiais relacionados ao saber sábio, para que então, fossem aplicadas as regras da Transposição Didática que conseqüentemente levaram a produção um material, que é um novo “saber a ensinar”. Esses materiais constituem-se de fontes primárias ou secundárias sobre as temáticas de estudo.

Na apresentação da proposta didática, foram explicitadas a aplicação das regras da Transposição Didática, oferecendo não apenas um produto educacional, mas uma reflexão teórica a respeito de sua elaboração.

## 4 SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A Sequência Didática (SD) é um conjunto de variadas atividades que se ligam umas às outras com o objetivo de alcançar o melhor resultado envolvendo a aprendizagem de conceitos. O professor constrói essa sequência através de uma perspectiva de ensino/aprendizagem de um conteúdo, almejando um objetivo específico dentro da educação, em conjunto com as avaliações do assunto em questão.

Em seu trabalho “A prática educativa: como ensinar”, Zabala (1998) afirma que a SD é uma série ordenada e articulada de atividades que afirmam as unidades didáticas.

Além de poder atingir os objetivos especulados pelo professor, a SD deve contribuir na formação de pessoas críticas e conscientes perante a sociedade e seus avanços. De acordo com Zabala (1998), uma SD deve conter os seguintes procedimentos a fim de atingir todos esses objetivos citados:

- As atividades dessa sequência devem levar em conta os conhecimentos prévios dos alunos em relação ao conteúdo novo que vai ser introduzido, ou seja, o professor deve estabelecer alguma abordagem que o possibilite perceber o que o aluno já compreende desse novo assunto;
- Os conteúdos devem ser significativos e funcionais para os alunos, assuntos que não se apresentarem de forma pertinentes na vida dos alunos, pode acabar sendo desinteressante para eles;
- As atividades devem conter desafios alcançáveis por parte do aluno, levando em conta os seus conhecimentos atuais e que ele consiga avançar com uma ajuda necessária;
- Atividades que promovam o conflito cognitivo do aluno e a reflexão, a fim de estabelecer ligações com os conhecimentos prévios e o conteúdo novo abordado.

- Atividades que sejam confortáveis e favoráveis no quesito motivacional, o aluno deve se sentir instigado a participar e resolver alguma atividade do assunto;
- Após a realização de alguma atividade, ela deve fazer com que os alunos sintam que valeu a pena o esforço empreendido, e que de fato aprenderam algo, estimulando a autoestima e o autoconceito deles em relação a aprendizagem;
- As atividades devem fazer com que os alunos se tornem cada vez mais autônomos em relação a aprendizagem, elas devem propiciar o desenvolvimento da habilidade de aprender a aprender.

Em meio a essas atividades vão existir os conteúdos conceituais, atitudinais e procedimentais, e cabe ao professor englobar esses assuntos a atividades lúdicas, com materiais diferenciados, que sejam significativos e desafiantes para o aluno. Fica evidente também que uma SD nesse nível consegue promover até a interdisciplinaridade; conteúdos trabalhados dessa forma, que tem uma conexão com outros assuntos, conseguem estimular um conhecimento mais completo, juntando com outros aspectos promovidos pelas atividades, como a percepção dos conhecimentos prévios dos alunos.

#### 4.1 PROPOSTA DE SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Vale ressaltar que o propósito dessa SD é para que ela sirva como base para algo que vá se reelaborando e melhorando conforme for sendo usada e aplicada. Nesse tópico é apresentado uma proposta de SD que possa auxiliar o professor a mediar o processo de aprendizagem do aluno através do diálogo, da socialização e de atividades.

A partir do momento que se encerra o período de aplicação da SD, cabe ao professor perceber quais lacunas não foram preenchidas no que se refere a aprendizagem do aluno, e com isso, replanejar a SD para que se crie possibilidades dessas lacunas serem completadas. Essa flexibilização é algo individual, cada professor ensina pessoas diferentes, em escolas e ambientes distintos, é papel do professor identificar os aspectos da sua sala de aula de maneira geral, para que se

construa um contínuo processo de aprendizagem em que todos os alunos devem estar incluídos. Esse processo de elaboração, aplicação e reelaboração (EAR) é o que valida uma SD de acordo com Guimarães e Giordan (2012) e é dentro dessa perspectiva que essa SD pretendesse se perpetuar.

Como consequência, as SD são validadas em um processo que promove o desenvolvimento profissional do professor, visto que a definição dos conteúdos, identificação das condições de ensino e a seleção de dinâmicas e metodologias se materializam segundo um objeto de ensino. (GUIMARÃES; GIORDAN, 2013, p.2).

Tendo em vista as competências e habilidades requeridas pela BNCC (Base Nacional Comum Curricular) e como essa SD tem o intuito de ser aplicada durante o Ensino Médio, ela vai apresentar aspectos que vão ao encontro daquilo que se é recomendado pela BNCC, para tentar se enquadrar as exigências estabelecidas, tais como discutir e analisar situações problemas, textos, modelos e teorias científicas etc. Além de se utilizar bastante de recursos tecnológicos.

O número de aulas previsto é de 10, podendo variar de acordo com o que o professor aplicador achar necessário estender ou diminuir. O público-alvo especificamente para essa SD será para os alunos do 3º ano do Ensino Médio, visando um trabalho de maneira linear e com um grupo fixo de alunos. E há possibilidades dessa SD ser adaptada para se encaixar nos demais contextos das aulas de Física nos outros anos, como nas aulas de movimento relativo e gravitação, normalmente dadas no 1º ano do Ensino Médio.

A avaliação deve servir como algo que contribua para que o aluno avance na construção do conhecimento dentro de um objetivo de ensino que o professor estabelece, sendo aberta para admitir novas propostas que se adequem a realidade de condições de ensino e ao ritmo dos alunos (SILVA e FILHO, 1997). Portanto, o professor é orientado a usar diferentes formas de avaliar durante essa SD, desde que faça de maneira contínua, durante todas as aulas expositivas e dialogadas e durante e após cada atividade. Interrupções dos estudantes com perguntas, comentários, capacidades de investigação e reações a cada novo assunto visto são detalhes importantíssimos no processo de avaliação do aluno e do próprio professor a respeito dos aspectos educacionais da SD e na sua prática de ensino. Durante cada aula e atividade, vão surgir diversas situações como as descritas

anteriormente, em que o professor pode usar como base para avaliar a SD e decidir sobre os ajustes que possam ser feitos.

#### 4.1.1 Organização Esquemática da Sequência Didática

Tabela 1: Sequência ordinária dos temas e atividades propostas.

<b>DURAÇÃO</b>	<b>TEMAS</b>	<b>ATIVIDADES</b>
2 AULAS (COM CERCA DE 45 MINUTOS CADA AULA)	LEVANTAMENTO DOS CONHECIMENTOS PRÉVIOS E CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA FÍSICA MODERNA E RELATIVIDADE GERAL.	1. FORMAÇÃO DE GRUPOS E DISCUÇÃO DOS ASSUNTOS EM QUESTÃO.
2 AULAS	O QUE É A RELATIVIDADE GERAL? O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA.	2. DINÂMICA PARA APANHADO DE POSSÍVEIS DÚVIDAS, PARA QUE EM SEGUIDA SEJAM DISCUTIDAS COM A COORDENAÇÃO DO PROFESSOR.
2 AULAS	DESVIO DA LUZ PELA GRAVIDADE: O CONCEITO POR TRÁS DAS LENTES GRAVITACIONAIS.	3. TRABALHO REMOTO EM GRUPO ENVOLVENDO PLATAFORMAS DIGITAIS, COM O OBJETO DE ORGANIZAR AS INFORMAÇÕES ENCONTRADAS SOBRE AS LENTES GRAVITACIONAIS.
1 AULA	DESVIO PARA O VERMELHO GRAVITACIONAL E A DIMINUIÇÃO DO FLUXO TEMPORAL.	4. ATIVIDADE INDIVIDUAL REMOTA, EM QUE OS ALUNOS IRÃO RELACIONAR OS CONCEITOS VISTO NA SALA DE AULA AO FILME ASSISTIDO, PARA QUE POSSAM RESPONDER PERGUNTAS ENVOLVENDO OS ASSUNTOS VISTOS.
3 AULAS	GEOMETRIA DO	5. ATIVIDADE LÚDICA

	<p>ESPAÇO-TEMPO: COMO ISSO SE RELACIONA COM OS BURACOS NEGROS E AS ONDAS GRAVITACIONAIS?</p>	<p>ENVOLVENDO UM JOGO DE QUIZ EM GRUPO.</p>
--	--	---

Fonte: Autoria própria.

#### 4.1.2 Detalhamento das Atividades e Dinâmica Durante as Aulas

##### ATIVIDADE 1.

##### LEVANTAMENTO DOS CONHECIMENTOS PRÉVIOS E CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA DA FÍSICA MODERNA E RELATIVIDADE GERAL.

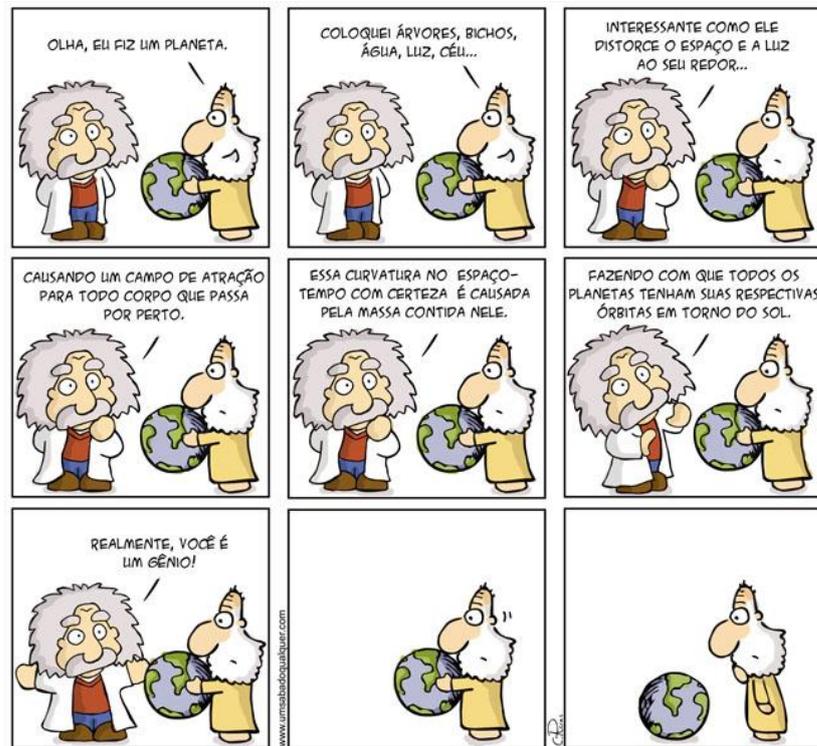
##### Objetivos Específicos:

- Propor uma atividade para descobrir os conhecimentos prévios dos alunos, instigando através do diálogo a rever os conhecimentos que já possuem. E fazer com que o aluno obtenha um conhecimento que desperte o seu interesse e que faça sentido para ele.

##### Dinâmica e Metodologia da Aula:

- Separar a sala em grupos de 5 a 4 alunos, e estabelecer um tempo de 15 a 20 minutos para que eles possam discutir e anotar algo sobre o que eles entendem e sabem sobre a Relatividade Geral, a figura 12 pode ser mostrada para que eles possam usar como parâmetro enquanto eles tentam buscar alguma informação a respeito. Após se passar o tempo determinado, cada grupo poderá relatar para o resto da turma o que eles conseguiram registrar. É importante o professor interagir com os participantes de cada grupo para que todos entrem na discussão.

Figura 12: Einstein e a Relatividade Geral.



Fonte: <https://www.umsabadoqualquer.com/300-eisntein-2/>.

- Diante dos possíveis conhecimentos prévios, será necessário agora estabelecer uma ligação aos conteúdos focos da discussão, com os fatos e contexto que o cercam. A proposta é apresentar um slide em um projetor, mostrando a evolução da Física, no que se refere ao surgimento da Física Moderna e a necessidade da Física Clássica se reinventar para conseguir resolver alguns problemas que até então não tinham solução. Em seguida, focar nas contribuições de Einstein e como e porque ele chegou na Relatividade Geral, fazendo uma rápida passagem de contextualização pela Relatividade Restrita. Uma recomendação é fazer um resumo dos capítulos 9 e 10 do livro “Evolução das Ideias da Física” de Antonio S. T. Pires, filtrando as principais informações a respeito dos acontecimentos históricos mais relevantes e dos outros nomes importantes que surgem nesse decorrer. Outro texto interessante para esse propósito, se encontra no início do capítulo 36 do livro “Física Conceitual” de Paul G. Hewitt. O professor pode tanto fazer um texto de indicação para os alunos lerem

em algum momento, ou simplesmente apresentar tudo isso ao mesmo tempo em que conversa com os alunos a respeito dos conhecimentos que eles levantaram, para que se crie uma conexão com o que está sendo apresentado e que acabe contribuindo no crescimento dos conhecimentos que eles já possuem.

- Por fim, ainda na apresentação de slides, pode-se agora falar sobre as contribuições da Relatividade Geral, como no caso do funcionamento do GPS, em como essa teoria muda a nossa visão do Universo e as portas que se abriram para o seu entendimento, criando um gancho para se introduzir o tema da Astronomia e estimular o aluno a ficar curioso para o que está por vir. Como sugestão de leitura para os alunos, fica a matéria produzida pela Revista Galileu intitulada de: “Como a Teoria da Relatividade Geral de Einstein Explica (quase) Tudo<sup>4</sup>”.

#### **Materiais para Utilizar:**

- Projetor multimídia, imagens e textos.

#### **ATIVIDADE 2.**

#### **O QUE É A RELATIVIDADE GERAL? O PRINCÍPIO DA EQUIVALÊNCIA.**

#### **Objetivos Específicos:**

- Introduzir o conceito do Princípio da Equivalência de maneira expositiva e dialogada para os alunos, se utilizando de imagens e vídeos para isso. E desenvolver uma dinâmica que possa suprir as possíveis dúvidas a respeito do assunto.

#### **Dinâmica e Metodologia Aula:**

---

<sup>4</sup> Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2021/09/como-teoria-da-relatividade-geral-de-einstein-explica-quase-tudo.html>. Acesso em: 4 de maio, 2022.

- Mostrar de maneira breve, os fenômenos astronômicos que foram possíveis serem estudados e descobertos através das consequências do Princípio da Equivalência, para mostrar aos alunos essa parte mais interessante e instigá-los a quererem compreender como esses fenômenos viraram consequências. Os vídeos 1 e 2 tratam de maneira breve e contextualizada como as ondas gravitacionais, buracos negros e o periélio de mercúrio fizeram parte da Teoria de Einstein. A partir do primeiro vídeo, o professor pode dar uma ideia superficial do que é um buraco negro e afirmar que esse assunto será tratado mais detalhadamente no futuro.
- Relacionar o Princípio da Equivalência com a Gravitação Newtoniana e a 2ª Lei de Newton, mostrar o postulado de maneira mais simples, como: *“Um campo gravitacional é equivalente a um referencial com aceleração invariável”*. Apresentar o experimento mental que Einstein formulou para que essa relação fosse revolucionária.
- Explicar de forma simplificada o postulado da Relatividade Geral e se utilizar de exemplos mais palpáveis para os alunos, com apoio de ilustrações semelhantes a figura 1 e figura 2, estimulando o aluno a imaginar e entender o que são as massas inércias e gravitacionais e como a igualdade entre ambas se torna uma necessidade para nascer o Princípio da Equivalências. Em seguida exibir um vídeo explicativo (vídeo 3) do assunto em questão.
- A atividade será uma discussão com os alunos a respeito do vídeo e os assuntos que foram explicados pelo professor, com o intuito de pedir para que cada aluno imagine que é um repórter, para que em seguida escrevam em um papel alguma dúvida a respeito do que foi apresentado, imaginando que essa dúvida será redirecionada ao próprio Einstein. Cada aluno vai ler para o restante da turma a sua dúvida e o professor fará um apanhado dessas dúvidas e escrever no quadro, englobando as dúvidas em comum para que logo após isso, reexplique o conteúdo com a participação dos alunos de maneira que possa suprir algo que não ficou muito claro.

**Materiais para Utilizar:**

- Projetor multimídia, imagens, quadro e vídeos.
- **vídeo 1**– “Ondas Gravitacionais” -YouTube. Duração: 8min09s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=z71O5cHTOvM>.
- **vídeo 2**– “A primeira comprovação da Teoria da Relatividade: a órbita de Mercúrio!” -YouTube. Duração: 4min01s.  
Fonte: [https://www.youtube.com/watch?v=Pad\\_I\\_aN6V4](https://www.youtube.com/watch?v=Pad_I_aN6V4).
- **vídeo 3**– “Relatividade Geral Explicada” -YouTube. Duração: 10min47s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=jYlr3G9yB8s>.

**ATIVIDADE 3.****DESVIO DA LUZ PELA GRAVIDADE: O CONCEITO POR TRÁS DAS LENTES GRAVITACIONAIS.****Objetivos Específicos:**

- Expor uma das consequências do Princípio da Equivalência trazendo a contextualização histórica do dado experimental que comprova a curvatura da luz pela gravidade, e instigar e desenvolver um trabalho em grupo dos alunos envolvendo a utilização de plataformas digitais.

**Dinâmica e Metodologia da Aula:**

- De início, o professor mostrará um vídeo (vídeo 4) que faz uma contextualização histórica no que envolve a comprovação de que a luz é desviada pela gravidade e consequentemente traz um dado empírico que comprova a Relatividade Geral. Como o vídeo exhibe alguns conceitos que já foram vistos anteriormente, o professor pode fazer

pausas para comentar com os alunos e reaver os conceitos e informações passadas, além de discutir ao término do vídeo, sobre as dificuldades tecnológicas e ambientais enfrentadas durante a expedição feita em busca desse dado comprovante da teoria, junto com a importância e o impacto desse feito.

- A aula tomará como ponto principal a consequência que o Princípio da Equivalência traz a respeito da trajetória dos objetos sobre a ação de um campo gravitacional, trazendo ainda um pouco o que o vídeo 1 trouxe, mas agora explicando de uma maneira em que fique clara a relação entre aceleração e gravidade, e como isso muda a direção do caminho de um corpo massivo. Utilização de imagens ou desenhos feitos pelo professor no quadro semelhante as figuras 3 e 4, ajudarão os alunos a visualizarem como a gravidade muda a trajetória de acordo com o Princípio da Equivalência.
- A parte chave será o momento em que o professor fará uma breve passagem pela equivalência da massa e energia, e que como consequência a luz vai se comportar como um corpo massivo, e desse modo, ela também poderá ter sua trajetória curvada pela gravidade. O próprio vídeo 1 tem animações que ajudam a visualizar como de fato isso acontece na prática.
- A atividade se utilizará de recursos tecnológicos, em que inicialmente os alunos formarão grupos de 5 a 6 pessoas para que em seguida pesquisem sobre as lentes gravitacionais; o que são, sua utilidade e qual a relação com o assunto visto na aula atual. Eles irão recolher essas informações e postar em alguma plataforma online, como o Padlet ou o Microsoft Teams (importante que caso o professor adote alguma plataforma não muito habitual, que ele explique o funcionamento e como que os alunos podem postar ou criar suas atividades). No início da próxima aula, o professor vai ter reunido as principais informações e conceitos das apresentações postadas e

organizá-las em uma outra apresentação por slides, explanando o assunto das lentes gravitacionais, com o objetivo de interagir com os alunos a fim de responder as questões solicitadas anteriormente. É importante que essa aula tenha um intervalo de um ou mais dias até a próxima, para que os alunos e o professor tenham tempo de se organizarem e montarem o mural de postagens, tendo em vista a demanda das outras disciplinas. Então cabe ao professor se organizar antecipadamente esse momento da SD para que ela ocorra dessa forma.

**Materiais para Utilizar:**

- Projetor multimídia, imagens, quadro, plataformas de compartilhamentos digitais e vídeos.
- **vídeo 4** – “Eclipse de Sobral: O dia em que o Brasil ajudou a confirmar a teoria da relatividade de Einstein” -YouTube. Duração: 9min27s.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=upkhZui15nk>.

**ATIVIDADE 4.  
DESVIO PARA O VERMELHO GRAVITACIONAL E A DIMINUIÇÃO DO FLUXO  
TEMPORAL.****Objetivos Específicos:**

- Estabelecer uma breve passagem pelos postulados da Relatividade Restrita para que se crie o caminho para o entendimento dos temas principais, se atentando a possíveis conceitos desconhecidos pelos alunos que possam aparecer. Com uma atividade que visa dar um tom mais concreto ao pensamento dos alunos a respeito do que foi visto na sala de aula.

### Dinâmica e Metodologia da Aula:

- Nessa aula, o professor vai fazer uma passagem pela teoria da Relatividade Restrita, em que Einstein postula sobre a invariância da velocidade da luz e como as leis da Física são as mesmas para qualquer referencial inercial, e frisar o que é um referencial inercial, para suprir possíveis dúvidas. É importante o professor voltar na questão da contextualização, em como a Relatividade Restrita é a primeira metade da que junto com a Relatividade Geral formam a tão famosa teoria da Relatividade. Vale ressaltar que o professor pode tanto apresentar esses conceitos através de uma apresentação usando um aparelho datashow, ou apenas por meio do diálogo com o apoio do quadro.
- Com os conceitos estabelecidos da Relatividade Restrita, agora se pode demonstrar como que um corpo em movimento tem o seu passar de tempo diminuído se comparado a um referencial com uma quantidade de movimento inferior. Através de um desenho ou imagens semelhantes as **figuras 3 e 4**, o professor terá melhor auxílio para explicar como que o tempo é percebido de maneira diferente dependendo da rapidez do referencial.
- A questão agora é como relacionar essa conclusão anterior com o fato de que a gravidade também influencia o fluxo temporal de acordo com a sua intensidade. Usando como exemplo um brinquedo visto em parques de diversões, o rotor, (**Figura 13**), a explicação vai conseguir se aproximar mais da realidade do aluno e possivelmente prender sua atenção, usando o **vídeo 5** e o **vídeo 6**, o professor introduz o conceito de aceleração centrífuga (ou o revisa caso os alunos estejam mais familiarizados). E em seguida, se associa a aceleração com o movimento e conseqüentemente com a diminuição da passagem do tempo nessa região - o Princípio da Equivalência estabelece que localmente uma aceleração é indiferente de uma ação gravitacional. No

centro do rotor, o movimento será quase nulo, enquanto para as pessoas que estão nas bordas sobre o efeito da aceleração do brinquedo (o que pode ser traduzido para um campo gravitacional), vai ter seu tempo passando mais devagar se comparado com alguém que esteja no centro do brinquedo (na prática esse efeito é imperceptível, pois exigiria velocidades extremamente altas). Uma pergunta boa para se fazer aos alunos, para saber se eles compreenderam esse conceito, é indagá-los sobre quem envelheceria mais lentamente, alguém morando em um edifício muito alto ou alguém que mora na superfície da Terra.

Figura 13: Rotor é uma atração de parque de diversões.



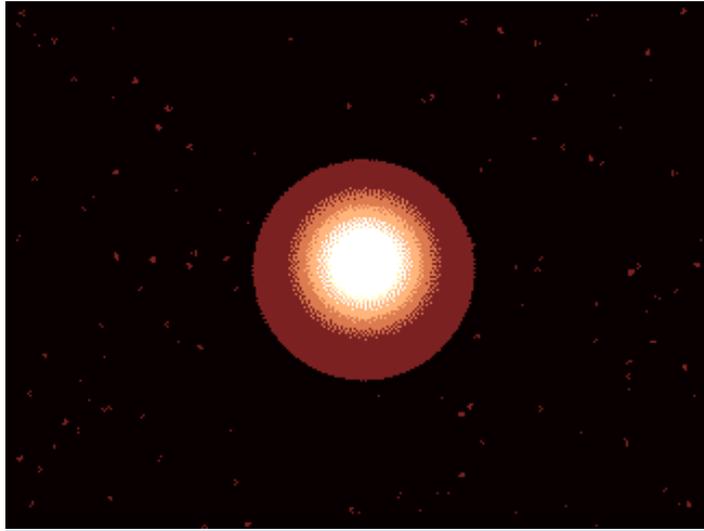
Fonte: Desconcertante (2022).

- O último conceito a ser explicado, é o desvio para vermelho causado pela gravidade. A gravidade também afeta a frequência das ondas eletromagnéticas emitidas pelos átomos, e quando um átomo está escapando de um campo gravitacional, a gravidade diminui o fluxo temporal deles, o que implica em fazê-los diminuir a sua frequência. Por tanto, dentro do espectro visível, apesar de ser um efeito quase que imperceptível em situações mais normais, isso significa em desviar

sua frequência para o vermelho. Por exemplo, a luz emitida do Sol, tem sua frequência afastada para o vermelho ao tentar escapar da ação gravitacional.

- A princípio, essa explicação acima parece ser simples, mas o que pode ser complicado para os alunos, são os conceitos que surgem, como “frequência”, “onda eletromagnética” e “espectro visível”. Então o professor deve parar a cada conceito, que pode ser novo, e em seguida recordar ou dar uma ideia base do que seja para que não complique na conclusão e no entendimento que os alunos devam chegar a respeito do desvio para o vermelho gravitacional. A preparação para esses desafios é algo essencial, as tabelas sobre o espectro visível e a ideia simples de que uma onda eletromagnética é como a luz que conseguimos enxergar e que se propagam até no vácuo, são exemplos do que pode ser apresentado e dito.
- Para a fixação do conceito principal, o professor introduz o processo de “morte” das estrelas, que de acordo com a sua massa elas acabam de maneiras diferentes. Instigando os alunos a imaginarem, com o auxílio de uma imagem animada (**figura 14**), como que veríamos, em uma situação hipotética, um objeto que seja indestrutível na superfície de uma estrela que estivesse se colapsando para o seu interior. Nessa circunstância de gravidade extrema, o efeito do desvio para o vermelho será cada vez mais perceptível conforme o objeto junto com a superfície da estrela se colapsa para uma região de mais intensa gravidade.

Figura 14: Animação de uma estrela em colapso.



Fonte: [https://31.media.tumblr.com/tumblr\\_lqimr18ryq1qbn5m1o1\\_r1\\_400.gif](https://31.media.tumblr.com/tumblr_lqimr18ryq1qbn5m1o1_r1_400.gif).

- A atividade terá o propósito de ser feita em casa, o professor pedirá para que os alunos assistam ao filme “Interestelar”, de Christopher Nolan, e escrevam em quais partes do filme os conceitos vistos nessa aula aparecem, além de dar uma breve explicação do porquê esses conceitos estão associados ao que eles viram dentro do contexto do filme. Em seguida eles responderão às seguintes perguntas: “Uma pessoa caindo para o interior de um buraco negro veria o espaço ao seu redor se desviando para qual cor? E como uma outra pessoa fora do alcance gravitacional do buraco negro perceberia a passagem do tempo dessa que está caindo? E por que a pessoa que está caindo passaria pelo processo de “espaguetificação”?”. Os alunos enviarão um texto digitado, com a devida identificação, para algum e-mail adequado em que o professor tenha acesso ou postar em alguma plataforma digital. O prazo para entrega será em uma data próxima da última aula, para que os alunos tenham tempo para fazer a atividade e o professor avaliar até o fim dessa SD.

**Materiais para Utilizar:**

- Projetor multimídia, imagens, quadro, plataformas de compartilhamento digitais e vídeos.
- **vídeo 5** – “Onride Rotor POV Rheinkirmes Düsseldorf” - YouTube. Duração: 3min07s.

Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=AjxegivQ9Zg&t=6s>.

- **vídeo 6** – “Rotor Ride - Frontier Days” - YouTube. Duração: 2min43s.
- Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=K2EBL-5-LzY>.

**ATIVIDADE 5.****GEOMETRIA DO ESPAÇO-TEMPO: COMO ISSO SE RELACIONA COM OS BURACOS NEGROS E AS ONDAS GRAVITACIONAIS?****Objetivos Específicos:**

- Compreensão da unificação das dimensões do espaço com o tempo, chegando na ideia de um espaço-tempo curvo e na necessidade de uma geometria curva para descrevê-lo. Conhecendo umas das consequências mais extraordinária dessa teoria, os buracos negros e suas características.
- Jogo interativo e competitivo com todos os alunos, visando uma revisão dos assuntos de maneira lúdica.

**Dinâmica e Metodologia da Aula:**

- Inicia-se pedindo para que os alunos façam um experimento mental, imaginando que a pessoa mais próxima de você dentro da sala de aula o chame para se encontrarem em algum lugar, e esse pessoa estará lá o esperando. A pergunta é: o que falta nessas informações do lugar de encontro? Além de que esse lugar possui as dimensões de espaço.

- Com a conclusão de que seja o tempo específico para se encontrarem, o professor completa explicando que todas as coisas que preenchem as dimensões do espaço, tem a elas o tempo associado. Os alunos, por exemplo, podem ser induzidos a pensar que um objeto só vai possuir as dimensões de espaço próprios dele durante um determinado período, se passando um certo tempo, esse objeto pode ter mudado suas dimensões (como ser amassado). Chegando no argumento de que o Universo tem a necessidade de se ter o tempo unido com o espaço, você só poderá se mover para outro local dentro das dimensões do espaço em um momento futuro, então você se move dentro do espaço-tempo.
- Enquanto o professor expõe esse processo de raciocínio, ele pode se utilizar do quadro para desenhar algo que possa ajudar ou mostra imagens que corroboram com o que foi citado na explicação. Após isso, é trazido o texto da página “jornal folha um<sup>5</sup>”, que traz uma explicação sobre o espaço-tempo com uma rápida passagem pela Relatividade Restrita, com o objetivo de dar uma base para que os alunos compreendam melhor o **vídeo 7**. O professor pode ler o texto em conjunto com os alunos, e o vídeo que vai ser apresentado posteriormente, servirá como fechamento para o entendimento do conceito de espaço-tempo.
- Com uma ideia base de espaço-tempo, chega o momento em que se pode introduzir o conceito da geometria curva do espaço, para que a gravidade de Einstein tenha uma causa e um sentido para o que foi estudado anteriormente. Com o auxílio da apresentação dos vídeos curtos (**vídeo 8 e 9**), tem-se algo tangível que ajuda a formar uma imagem mental do que seria a geometria do espaço-tempo e como que um corpo massivo o deforma. O espaço funciona como uma espécie de tecido, em que corpos massivos conseguem deformá-lo/afunda-lo, sendo isso mais significativo com objetos com muita massa (como

---

<sup>5</sup> Disponível em: <https://www.folhaum.com/post/entendendo-o-espaço-tempo>. Acesso em: 24 de abril, 2022.

planetas e estrelas), e nessas regiões onde o espaço está deformado, entraremos em queda-livre na direção do aprofundamento. No caso do planeta Terra, tem a superfície impedindo que caiamos, e a aceleração que sentimos por estarmos em queda-livre em direção desse aprofundamento, é o que chamamos de gravidade, e como consequência dessa aceleração, o tempo passará mais devagar nesse local visto de um referencial com intensidade gravitacional menor.

- Ao mesmo tempo em que se explica esse conceito, o professor deve associar e trazer a imagem que os alunos têm guardado desses conhecimentos nas suas mentes, através do filme assistido e dos vídeos que já deram uma introdução a esse assunto. Podendo também fazer um comparativo da gravitação newtoniana com a gravitação einsteiniana; que diferente da teoria de Newton, Einstein trata a gravidade não mais como uma força, mas como uma consequência da deformação do espaço-tempo, além de dar margem para o surgimento desse fenômeno. E apesar de a teoria de Einstein estar mais correta, as equações e os conceitos de Newton são mais fáceis de serem trabalhadas no Ensino Médio, mas como os alunos podem presenciar, a teoria da Relatividade pode ser aprendida de forma que não envolvam cálculos e que não seja muito abstrata.
- Chegando na segunda parte do tema da aula, o professor faz uma breve menção as equações de campo de Einstein, para contextualizar a parte em que elas são responsáveis por descrever a interação entre matéria e gravidade, e como que uma das suas resoluções trouxeram resultados estranhos, como a existências de objetos de gravidade tão intensa, que nem mesmo Einstein acreditava na sua existência, nesse caso, os buracos negros. Mostrando informações dos buracos negros, como sua estrutura, funcionamento, surgimento, tipos, sua primeira imagem assim como marco que foi esse acontecimento. Tudo isso ao mesmo tempo que se é dialogado sobre os acontecimentos relacionados ao buraco negro do filme “Interestelar” e os assuntos visto

até então. O site da NASA<sup>6</sup> fornece uma boa simulação de como um buraco se comporta no espaço-tempo e como ele o deforma, facilitando o entendimento desse fenômeno. As matérias trazidas pela Revista Galileu<sup>7</sup> e pelo Jornal USP<sup>8</sup> trazem textos sobre como foi a obtenção das fotos dos buracos negros e os impactos desse feito; o professor pode fazer uma leitura acompanhada com os alunos e discutir com eles sobre o marco na história da ciência que foi esse feito.

- Por último, o professor esclarece que além de que o espaço possa ser deformado, ele também pode apresentar propriedades ondulatórias de forma análoga ao vídeo curto (**vídeo 10**), e com um exemplo mais palpável, semelhante a superfície da água – quando jogamos uma pedra em um lago com a água parada, o impacto da pedra vai gerar diversas ondas que se propagarão pela superfície do lago –. O **vídeo 11** ainda apresenta um experimento que permite simular a propagação dessas ondas no espaço-tempo.
- A nossa tecnologia atual (citando os interferômetros, a primeira detecção desse fenômeno e as notícias envolvendo esse marco) só consegue detectar ondas gravitacionais envolvendo escalas gigantescas, como foi no caso da colisão de dois buracos negros. A matéria<sup>9</sup> do portal da IFUSP (Instituto de Física da Universidade de São Paulo) tem um ótimo texto com informações que podem ser utilizadas pelo professor durante a aula e o **vídeo 12** pode ser usado como complemento final para ser mostrados aos alunos, que traz o som característico que surgiu da primeira detecção das ondas gravitacionais.

---

<sup>6</sup> Disponível em: <https://svs.gsfc.nasa.gov/13326>. Acesso em: 27 de março, 2022.

<sup>7</sup> Disponível em: <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/Espaco/noticia/2019/04/primeira-foto-de-um-buraco-negro-um-dia-historico-para-ciencia.html>. Acesso em: 4 de maio, 2022.

<sup>8</sup> Disponível em: <https://jornal.usp.br/ciencias/rede-internacional-de-telescopios-capta-primeira-imagem-do-buraco-negro-que-fica-no-centro-da-via-lactea/>. Acesso em 19 de maio, 2022.

<sup>9</sup> Disponível em: <https://portal.if.usp.br/imprensa/pt-br/node/1183>. Acesso em: 4 de maio, 2022.

- A atividade será lúdica, e para esse momento será reservado uma aula inteira, em que se trata de um jogo de equipes envolvendo toda a sala, em que os alunos se dividirão em 4 ou 5 grupos. O professor com a ajuda de um projetor, vai passar um quiz de múltiplas escolhas envolvendo todos os assuntos trabalhados até esse momento, e após 3 minutos após a divulgação de cada pergunta, os grupos levantarão, simultaneamente, uma folha com a resposta que eles acharem correta. O grupo vencedor, ou os grupos vencedores, poderão receber uma recompensa a cargo do professor. No entanto, o foco será no feedback do professor em relação a participação dos alunos e na resolução das respostas em com os grupos.

#### Detalhes do Quiz:

- As questões vão ser baseadas e adaptadas do livro-texto “*Física Conceitual*” de Paul G.Hewitt, encontradas no capítulo 36, pág 698-699;
- Cada questão correta valerá um certo valor de pontuação, podendo variar de acordo com a dificuldade que o professor determinar;
- Será utilizado o site do Quizur<sup>10</sup> para a criação e apresentação das perguntas;
- O link<sup>11</sup> possui um exemplo e sugestão de como as perguntas podem ser exibidas para os alunos, e o professor pode se sentir livre para se utilizar. A ordem das perguntas exibidas na página do site segue níveis de dificuldades: 1ºfácil, 2ºfácil, 3ºmédia, 4ºdifícil, 5ºmédia, 6ºdifícil e 7ºmédia. Como sugestão, as perguntas de níveis médio podem valer o dobro da pontuação das fáceis, e as de níveis difíceis, podem valer o triplo do valor das fáceis.

---

<sup>10</sup> Disponível em: <https://pt.quizur.com>. Acesso em: 26 de abril, 2022.

<sup>11</sup> Disponível em: <https://pt.quizur.com/trivia/relatividade-geral-NNPs>. Acesso em: 26 de abril, 2022.

**Materiais para Utilizar:**

- Projetor multimídia, imagens, quadro, textos e vídeos.
- **vídeo 7** – “Espaço-Tempo Explicado” - YouTube. Duração: 11min58s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=kJ5xNaSleTI&t=582s>.
- **vídeo 8** – “CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO (ponto parado em relação ao espaço)” - YouTube.  
Fonte: [https://www.youtube.com/shorts/\\_SxldwIKWD8](https://www.youtube.com/shorts/_SxldwIKWD8).
- **vídeo 9** – “CURVATURA DO ESPAÇO-TEMPO (ponto em movimento em relação ao espaço)” - YouTube.  
Fonte: <https://www.youtube.com/shorts/uoOTsYQ6mKI>.
- **vídeo 10** – “Simulação de como seriam as ondas gravitacionais” - YouTube. Duração: 15s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=vwmDCAKgJhI>.
- **vídeo 11** – “Simulamos um CHOQUE DE BURACOS NEGROS! Einstein estava certo?” - YouTube. Duração: 14min15s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=cCRThAGdyVE>.
- **vídeo 12** – “Ondas Gravitacionais | Nerdologia - YouTube. Duração: 8min09s.  
Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=z71O5cHTOvM>.

## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

Com a proposta de SD apresentada, cabe agora a discussão de como os conceitos trazidos por Zabala (1998), em relação a criação da SD, e da Transposição Didática de Yves Chevallard foram contemplados no decorrer da apresentação desse material didático.

No decorrer de toda a SD são abordados diversos recursos tecnológicos, que em sua maioria são materiais didáticos que já estão transpostos para conseguirem ser compreensíveis (vídeos, imagens e links), e por conta das suas características de praticidade e usabilidade, coisa que não se encontra facilmente nos materiais mais tradicionais (como o livro didático), se optou por usá-los bastante para a formação da programabilidade desse material. O professor, com isso em mãos, irá elaborar o saber ensinado dos temas, através desses recursos na sala de aula, para que se desenvolva as atividades adaptadas ao seu cotidiano escolar, a fim que se possibilite chegar nos objetivos de ensino e aprendizagem. Além de tudo, os recursos trazem elementos modernos e de contextualização histórica, para que, de fato, o conhecimento seja visto pelos alunos como algo próximo deles, significativo e fruto de um empreendimento humano, moderno e atual.

A primeira atividade, como início de todo o conteúdo que vai ser apresentado, estabelece o procedimento para se obter os conhecimentos prévios dos estudantes, para que, em seguida, se possa relacioná-los com os temas apresentados pelo professor, de acordo com o que Zabala (1998) propõe. Durante todo o detalhamento da dinâmica das aulas, procuramos sempre sugerir que os conteúdos (livros-textos recomendados, vídeos, imagens e textos) fossem transpostos durante vários momentos das aulas, com o intuito de que os professores se sintam livres sobre quais métodos adotar, de acordo com os fatores da *noofera* que cerca o seu local de trabalho. Houve a articulação de conhecimentos “antigos” com os “novos”, para que esse novo conhecimento consiga ter mais relevância para os estudantes, como por exemplo, quando se propõe relacionar o Princípio da Equivalência com a gravitação de Newton. As atividades procuram contemplar o conflito cognitivo do aluno, como na elaboração de perguntas e na investigação de fenômenos vistos no filme

proposto, onde os possíveis modelos dos estudantes são colocados à prova, para gerar a necessidade de uma nova aprendizagem.

Com tudo, todas as atividades buscaram promover a autonomia dos estudantes, com a utilização desses materiais transpostos. No caso da última atividade, foi onde ficou mais explícito o método de abordagem que privilegiasse o conforto e uma atmosfera favorável para que o aluno observe quais foram os resultados da sua obtenção dos conhecimentos durante essa SD.

Tendo essas características apresentadas, a Relatividade Geral em união com suas consequências e os fenômenos da Astronomia, ofereceram uma ótima gama de atividades, e com possibilidades de ir muito além do que foi apresentado. A Transposição Didática, junto com a imensa quantidade de informações que nos é disponibilizado na internet, fornece diversas formas de se modernizar o ensino de Física e das demais áreas, e com isso, ajudar as diferentes formas de abordagens didáticas mais atrativas e criativas que se inclinam a receber os assuntos da FMC, e para que de fato façam parte constantemente no nosso sistema de ensino.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No decorrer deste estudo observou-se que vários trabalhos envolvendo o ensino da FMC relatam as dificuldades e desafios de se implementar tais assuntos de maneira definitiva no Ensino Médio, não só pelo fato de que a grade curricular de Física está sobrecarregada de conteúdos da Física Clássica, deixando bastante de lado a FMC, mas também pelas práticas de ensino que não valorizam a aprendizagem envolvendo aspectos atitudinais, emocionais e comportamentais dos alunos. Na Educação Básica, os conteúdos da Física deveriam estar mais próximos do cotidiano e da ciência atual, para que eles façam parte da vida do aluno de maneira significativa e o estimule a querer descobrir e aprender mais.

Diante desses fatos, o presente TCC analisou e aplicou os elementos da Transposição Didática para a construção de uma proposta de intervenção educacional, de modo que possa contribuir em diminuir a precariedade do ensino da FMC no Ensino Médio.

O objetivo principal foi estruturar uma SD que conseguisse possibilitar o ensino de tópicos da Relatividade Geral ligados à Astronomia. A SD tem um tempo previsto de aplicação de 10 aulas, e cada tema das aulas foi pensado de uma maneira que englobasse atividades diversificadas, e que se utilizasse bastante de recursos tecnológicos, para que as aulas se tornassem mais práticas, atrativas e com conteúdos mais acessíveis para todos, sempre dialogando com os domínios epistemológicos da sala de aula e ciência, de uma maneira que fosse cativante para os alunos, assim como a teoria da Transposição Didática de Yves Chervallard estabelece.

No detalhamento das aulas, primeiro nos preocupamos em apresentar uma parte chamativa e interessante dentro dos temas, uma espécie de aplicação contemporânea dos conteúdos físicos, para que os alunos pudessem se sentir estimulados e curiosos. A partir disso, seria possível nascer um sentimento de querer almejar um conhecimento mais aprofundado. Dessa maneira, posteriormente, acredita-se que a explicação de um certo tópico poderá acontecer com uma maior garantia de que os alunos irão aceitar que aquilo tem um significado mais concreto e pode estar mais próximo do que eles já sabem sobre as ciências e auxiliar na

construção da explicação do mundo e dos fenômenos atualmente estudados pelos cientistas. Ainda dentro desse modelo de planejamento das aulas, ressaltamos a importância de recordar ou abordar de maneira rápida e concisa certos conceitos, considerados como requisitos e que podem fazer o aluno estagnar no entendimento do que está sendo apresentado.

Como o foco desse trabalho é fornecer um material que possa ser aplicado ou que sirva como inspiração, existe o fator usabilidade a ser considerado. Os desafios de se aplicar algo nesse nível no Ensino Médio sem comprometer o restante dos conteúdos de Física do bimestre ou do ano letivo, é algo a se planejar tanto pelo próprio professor e quanto pela coordenação pedagógica escolar.

Essa SD também pode se adequar e ser aplicada durante abordagem de alguns tópicos da Física Clássica (como na gravitação de Newton), ou logo após ter passado pelos assuntos que funcionam como um pré-requisito (como o eletromagnetismo e as leis de Newton), favorecendo um entendimento geral e complexo. Mas a parte fundamental é que essa SD contribua para que os assuntos da FMC sejam implementados em conjuntos com os demais conteúdos da Física, conectando-os com metodologias educacionais que possam suprir as dificuldades de ensino da Física citados durante todo este trabalho. Em outras palavras, esse trabalho se dirige a favor de uma reestruturação do currículo de Física na Educação Básica.

Dessa forma, compreende-se que os objetivos desse TCC foram alcançados, a SD desenvolvida almejou cumprir os procedimentos que fornecem condições para se alcançar os objetivos que uma SD se propõe a alcançar, dentro dos referenciais utilizados. Foram abordadas atividades que levassem em conta o conhecimento prévio do aluno, o levando a reflexão, e a possibilidade de se fazer ligação entre esses conhecimentos com os temas tratados nas aulas anteriores. As atividades foram elaboradas de forma tal que permitissem se relacionar com a vida do aluno, com desafios alcançáveis de modo que fosse motivacional. As abordagens foram escolhidas para que fizessem o aluno sentir que o esforço valeu a pena, visto os fenômenos que aparentam serem tão abstratos e longe de uma compreensão conceitual, pudessem explicar fatos do mundo contemporâneo e se aproximassem do trabalho dos cientistas atualmente. As atividades visavam desenvolver a prática

de aprender a aprender, inclusive para que futuramente eles consigam se aproximar de temas científicos em discussão nas grandes mídias por conta própria.

Claro que para uma SD se provar ser eficaz e mostrar que ela cumpriu o que se propôs a almejar, dentro de uma perspectiva de ensino, ela precisa ser aplicada, e após isso, ser feita uma coletados dados para análise. Futuramente, esse trabalho terá a possibilidade de ser aplicado e passar pelo processo de reelaboração depois que os dados a seu respeito forem examinados. Neste momento, priorizou-se a sua elaboração enquanto proposta teórica e referenciada, considerando os pressupostos teóricos e educacionais que foram aprendidos ao longo do curso de Licenciatura em Física.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, O. D. **Astrofísica de Ondas Gravitacionais**. INPE. Maio de 2018. Disponível em: [http://mtcm21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21c/2019/01.31.16.38/doc/10\\_Astrofisica%20de%20Ondas%20Gravitacionais\\_2018.pdf](http://mtcm21c.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtcm21c/2019/01.31.16.38/doc/10_Astrofisica%20de%20Ondas%20Gravitacionais_2018.pdf). Acesso em 11 de dezembro de 2021.
- ALBRECHT, E.A.; VOELZKE, M.R.V. Ensino de Astronomia no Ensino Médio, uma proposta. In: **IV Simpósio Nacional de Educação em Astronomia**, SNEA, Goiânia, 2016.
- BERTOLAMI, O.; GOMES, C. Ondas Gravitacionais. **Revista de Ciência Elementar** – Vol. 5, n. 4, pp. 1-4, 2017.
- BRASIL. Ministério da Educação. **Base Nacional Comum Curricular**. Brasília, 2018
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros curriculares nacionais: ensino médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, DF: MEC/SEMTEC, 2000. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2022.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCN+ Ensino Médio: orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília, DF: MEC/SEMTEC, 2002. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2022.
- BROCKINGTON, G; PIETROCOLA, M. Serão as regras da Transposição Didática aplicáveis aos conceitos de Física Moderna?. **Investigações em Ensino de Ciências**, v. 10, n. 3, p. 387-404, 2016.

COUTO, R. V. L. **Astronomia no Ensino Médio: Uma Abordagem Simplificada a Partir da Teoria da Relatividade Geral**. 2020. 190f. Dissertação (Mestrado Profissional de Ensino de Física) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2020.

ALVES FILHO, J.P. Regras da transposição didática aplicadas ao laboratório didático. **Caderno brasileiro de ensino de Física** – Vol. 17, n. 2 p. 44-58, 2004.

DE SOUZA, D. C. **Uma Construção Didática do Conceito de Espaço-tempo da Teoria da Relatividade Restrita Visando Alfabetização Científica no Ensino Médio**. 2019. 158f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2019.

GONZALEZ, E. A. M. et al. A Astronomia como ferramenta motivadora no ensino das ciências. In: **Congresso Brasileiro de Extensão Universitária**, 2., Belo Horizonte, 2004.

GUIMARÃES, Y. A. F; GIORDAN, M. Elementos para validação de sequências didáticas. **Encontro Nacional de Pesquisa Em Educação Em Ciências**, v. 9, p. 1-8, 2013.

HELERBROCK, R. **Física Moderna**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/fisica-moderna.htm>. Acesso em 5 de novembro de 2021.

HEWITT, P. G. **Física Conceitual**. 12. ed. Porto Alegre: editora Bookman, 2015.

LEMOS, J. P. S; HERDEIRO, C. H. S; CARDOSO, V. Einstein e Eddington e as consequências da relatividade geral: Buracos negros e ondas gravitacionais. **Gazeta de Física** - Vol. 42 - n. 2, pp. 36-42, 2019.

LOURENÇO, R. E. **Inserção de Tópicos de Física Moderna e Contemporânea no Ensino Médio: Uma Proposta Didática para o 2º Ano**. 2019. 77f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Licenciatura em Física do Departamento Acadêmico de Física) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

MATSUURA, O. T. O Eclipse de Sobral e a Deflexão Gravitacional da Luz Predita por Einstein. **Khronos, Revista de História da Ciência**, n. 7, pp. 81-139, 2019.

MONTEIRO, M.A.M; NARDI, R.D; FILHO, J.B.B.F. Física Moderna e Contemporânea no ensino médio e a formação de professores: desencontros com a ação comunicativa e a ação dialógica emancipatória. **Revista Electrónica de Investigación en Educación en Ciencias**, v. 8, n. 1, pp. 1-13, junho de 2013.

PIRES, A. S. T. **Evolução das Idéias da Física**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2011.

PIVETTA, M.; ANDRADE, R. O. **Quando a Luz se Curvou**. Revista Pesquisa FAPESP. 28 de junho de 2019. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/quando-a-luz-se-curvou/>. Acesso em 12 de outubro de 2021.

SÁ, M. R. R. **Teoria da Relatividade Restrita e Geral ao Longo do 1º Ano do Ensino Médio: Uma Proposta de Inserção**. 2015. 318f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação de Mestrado Profissional em Ensino de Física) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2015.

SALOMÃO, J.P.Q.C.S.; ARAÚJO, R.R.A.; MACKEDANZ, L.F.M. Um Estudo Bibliográfico Sobre Metodologias no Ensino de Física Moderna e Contemporânea. **Arquivos do Mudi**, v. 24, n. 3, p. 233-243, ano 2020.

SANTOS, F. E. D. Lentes Gravitacionais. In: **Tópicos em Física C**, UFMG, Minas Gerais, 2010.

SANTOS, V.P.S. Componentes Curriculares e a Física no Ensino Médio das Escolas Públicas. **BOCA**, v. 2, n. 5, pp. 36-50, 2020.

SOUZA, D. R. **Uma Construção Didática do Conceito de Espaço – Tempo da Teoria da Relatividade Restrita Visando Alfabetização Científica no Ensino**

**Médio.** 2019. 159f. Dissertação (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2019.

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6. ed. Rio de Janeiro: editora LTC, 2014.

TRIVIÑOS, A.N.S.T. **Introdução à Pesquisa em Ciências Sociais: A Pesquisa Qualitativa em Educação**. São Paulo: Editora Atlas S.A., 1987.

ZABALA, A. **A prática educativa: como ensinar**. Porto Alegre: Editora Artmed, 1998.