



Physicae Organum

Instituto de Física - Universidade de Brasília

2022

Vol. 8

Número 2

Editor Gerente: Olavo Leopoldino da Silva Filho

Editor da Revista: Marcello Ferreira

Editor Convidado: Marcos Rogério Martins Costa

Editores Juniores:

André Luis de Oliveira Batista

Ester Costa Nascimento

Israel da Silva Oliveira

Marcos Vinícius Silva de Paula

Apresentação

Este é um novo número da revista *Physicae Organum*. Nele, os leitores encontrarão, dentre os artigos, alguns dos que foram produzidos no curso de Especialização em Astronomia e Astrofísica ofertado pela Universidade de Brasília, UnB. Esperamos que os leitores possam se nutrir dos conhecimentos aqui apresentados.

Atenciosamente,

Os Editores.

Corpo Editorial

Editor gerente

Olavo Leopoldino da Silva Filho

Editor da revista

Marcello Ferreira

Editor convidado

Marcos Rogério Martins Costa

Editores juniores

André Luís de Oliveira Batista

Ester Costa Nascimento

Israel da Silva Oliveira

Marcos Vinícius Silva de Paula

Composição final

Leonardo Luiz e Castro

Agradecimento

Agradecemos à Biblioteca Central da Universidade de Brasília (BCE/UnB) pelo apoio na configuração e no registro do DOI da revista, em especial à bibliotecária Luísa Chaves Café.

Sumário

1	Cassini-Huygens	1
2	TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA	25
3	O uso do arduino em uma abordagem significativa envolvendo o comportamento dual da luz em experimentos para o ensino médio	48
4	Um Estudo Histórico-Conceitual em Física de Partículas	75
5	Buracos Negros de Schwarzschild e de Kerr	93
6	Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea	118
7	Diagrama espaço tempo de Minkowski	138
8	Reflexões sobre a Natureza do Tempo a partir de Fenômenos Relativísticos	156



Cassini-Huygens: A Sonda Espacial que Mudou a Compreensão Sobre Saturno e Suas Luas Geladas Titã e Encélado

CASSINI-HUYGENS: The Space Probe That Changed Saturns and Its Icy Moons Titan and Enceladus Comprehension

FERNANDO HENRIQUE MARTINS¹, JOSÉ LEONARDO FERREIRA²

¹Instituto de Ciência Tecnologia e Inovação ICTI, Universidade Federal da Bahia, UFBA, 42809-000, Camaçari, Brasil

²Laboratório de Física de Plasma, Instituto de Física, Universidade de Brasília, UnB, 70910-900, Brasília, Brasil

Resumo

Neste ano, a missão Cassini-Huygens completa cinco anos desde seu desfecho quando foi lançada propositalmente para colidir contra a espessa atmosfera do nosso grandioso Senhor dos Anéis. Durante quase vinte anos, esta missão obteve surpreendentes resultados sobre o complexo sistema saturnino revelando mistérios e fenômenos obscurecidos pela enorme distância que separa este planeta da Terra. Nesse contexto, serão apresentados os principais feitos da missão Cassini enviada para investigar Saturno, seus anéis e suas luas dando ênfase aos resultados obtidos sobre as luas Titã e Encélado a partir de uma extensa revisão bibliográfica. Os equipamentos e experimentos que viajaram a bordo da espaçonave Cassini e da sonda europeia Huygens coletaram diversos dados e revelaram correntes de jato na atmosfera de Saturno, longas tempestades que varrem o planeta de leste a oeste e auroras boreais em sua alta atmosfera. Além disso, a missão contribuiu para melhor entendimento sobre as interações que ocorrem entre Saturno, seus anéis e suas luas. Por fim, a espaçonave Cassini revelou que a lua gelada Encélado apresenta atividade geológica como criovulcanismo e Titã possui lagos, rios e oceanos de hidrocarbonetos que sofrem transformações semelhantes àquelas que a água sofre aqui na Terra.

Palavras-chave: Sonda Espacial Cassini-Huygen. Saturno. Titã. Encélado.

Abstract

This year, the Cassini-Huygens mission completes five years since its demise when it was purposely launched to crash into the thick atmosphere of our great Lord of the Rings. For almost twenty years, this mission has obtained surprising results on the complex Saturn system, revealing mysteries and obscured phenomena due to the enormous distance that separates this planet from

Earth. In this context, the main achievements of the Cassini mission sent to investigate Saturn, its rings and moons will be presented, emphasizing the results obtained on the moons Titan and Enceladus from an extensive literature review. The equipment and experiments that traveled aboard the Cassini spacecraft and the European probe Huygens collected data and revealed jet streams in Saturn's atmosphere, long storms that sweep the planet from east to west, and aurora borealis phenomena occurring on its upper atmosphere. In addition, the mission contributed to a better understanding of the interactions that exist between Saturn, its rings and its moons. Finally, the Cassini spacecraft revealed that the icy moon Enceladus presents geological activity such as cryovolcanism and Titan has lakes, rivers and oceans of hydrocarbons that undergo transformations similar to those that water undergoes here on Earth.

Keywords: Cassini-Huygens Spacecraft. Saturn. Titan. Enceladus.

I. INTRODUÇÃO

Quando se observa o planeta Saturno e algumas de suas luas através de um telescópio, não se imagina que este sistema seja dinâmico e apresente alguma atividade. Contudo, ao se fazer uma reflexão sobre o próprio movimento da Lua em torno da Terra, pode-se especular sobre alguma atividade no sistema de Saturno e, assim, se questionar quais mecanismos que poderiam ocorrer neste mundo tão distante de nós. Embora Saturno esteja a aproximadamente a uma distância de 9 UA (cerca de 1277 milhões de km) da Terra, essa escala de distância nada se compara à vastidão do Universo e explorar este sistema começa a se tornar um sonho possível. Este planeta peculiar é bastante interessante pelo fato de possuir anéis e luas tão grandes que se não estivessem próximas de Saturno, seriam elas mesmas outros planetas do Sistema Solar. Os anéis e algumas das maiores luas deste planeta são visíveis quando observados por um telescópio newtoniano comum mesmo a distâncias imensas, mas isso não é suficiente. Queremos chegar mais perto!

O sistema de Saturno pode ser considerado um “mini” Sistema Solar (Johnson, 2009). Neste sistema, o próprio planeta faz o papel do Sol com sua intensa gravidade e campo magnético interagindo com seus anéis e seus satélites que, por sua vez, performatizam os planetas do Sistema Solar. Este arranjo não só expõe as complexas interações envolvidas na formação do Sistema Solar mas também mostra a riqueza fenomenológica de nosso Sistema Solar atual.

Sendo Saturno um planeta gasoso, ele compartilha algumas propriedades que Júpiter também possui tais como o intenso campo magnético (Hubbard et al. 2009) em torno do planeta que é resultado do movimento de íons de hidrogênio localizados em seu interior, tempestades violentas varrem as superfícies de ambos os planetas bem como a presença de diversas luas, algumas delas inclusive com características planetárias que despertam bastante interesse na comunidade científica.

Outro ponto em comum entre os dois planetas é que, devido à intensa força gravitacional, no início da formação do Sistema Solar, eles lançaram cometas e asteroides por todo sistema e provavelmente alguns deles devem ter colidido com a Terra, preenchendo o planeta com água já que os cometas são constituídos de gelo e poeira (Kepler, 2017 e Carrol, 2017). Hoje

em dia, Saturno e os planetas gasosos desempenham papel fundamental para a proteção da Terra contra eventuais colisões com cometas e asteroides, pois, esses planetas atraem para si esses corpos e os mantêm aprisionados no cinturão de asteroides que se localiza na região entre os planetas Marte e Júpiter. É importante também mencionar que vários destes cometas, apesar de estarem gravitacionalmente presos ao Sol, têm suas orbitas perturbadas e são capturados por estes grandes planetas. Desta forma, se tornam cometas periódicos realizando orbitas elípticas de grande excentricidade, como é o caso do famoso cometa Halley.

Saturno impressiona pelo fato de apresentar anéis visíveis, algo que os outros planetas gasosos do nosso Sistema Solar não compartilham. Entretanto, todos os gigantes gasosos apresentam anéis difusos que somente podem ser detectados com instrumentos sensíveis em comprimentos de onda no infravermelho e no ultravioleta. Os anéis de Saturno foram provavelmente formados quando uma lua grande se aproximou muito de Saturno ao ponto deste planeta destroça-las em pedaços devido à intensa interação gravitacional com o planeta.

Tanto Saturno quanto Júpiter estão localizados em regiões do Sistema Solar além da zona habitável, que é definida como sendo a região na qual a temperatura permite que a água seja encontrada em seu estado líquido. Desta forma, suas luas são lugares extremamente gelados. Outra característica dos satélites naturais é o fato de que eles não possuem atmosfera, assim como a nossa Lua. Entretanto, o que se descobriu com as sondas espaciais Voyager é que a maior lua de Saturno, Titã, possui uma intensa atmosfera composta principalmente por nitrogênio, metano e outros hidrocarbonetos e esconde sua superfície contendo rochas congeladas e imensos lagos de metano (Coustenis et al. 2009), o que configura algo extremamente incomum para um satélite natural. Além disso, descobriu-se que a lua Encélado possui uma superfície relativamente nova pelo fato de apresentar poucas crateras de impacto o que despertou ainda mais a curiosidade dos cientistas que se questionaram se ocorre algum mecanismo geológico de renovação da superfície (Vesbicer, 2007). Há algo acontecendo lá e queremos descobrir o que é!

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é explorar os principais resultados científicos obtidos pela missão Cassini-Huygens, primeira espaçonave a orbitar o sistema de Saturno durante sua muito bem-sucedida missão ao longo de 20 anos de operação investigando o sistema de Saturno. Além disso, vale a mencionar a importância de se publicar e divulgar trabalhos sobre astronomia e astrofísica em língua portuguesa uma vez que os temas de pesquisa sobre sondas exploratórias do Sistema Solar são comumente publicados em periódicos de língua inglesa o que prejudica o acesso à informação daqueles que não dominam nenhuma língua estrangeira.

O volume de dados e informações colhidos durante a missão é extremamente grande e sua longa discussão foge do escopo deste trabalho. Portanto, serão abordados alguns fenômenos atmosféricos e de física de plasma que ocorrem em Saturno e em seu ambiente interplanetário, incluindo seus anéis. Serão também investigadas emissões de rádio a partir do plasma nas auroras polares que ocorrem em Saturno, bem como o acoplamento eletromagnético que existe entre o planeta, seus anéis e suas luas. Saturno possui 83 satélites naturais, inclusive algumas dessas luas foram descobertas durante a missão Cassini. Daremos atenção às luas Titã e Encélado. Titã possui uma atmosfera muito espessa e a

sonda europeia Huygens foi desenvolvida para pousar neste ambiente e obter informações geológicas e atmosféricas durante o procedimento de descida. Encélado surpreendeu os pesquisadores devido ao fato de apresentar bastante atividade geológica e interagir fortemente com os anéis de Saturno bem como com a magnetosfera deste planeta, além de possivelmente possuir um imenso oceano de água líquida debaixo de sua superfície gelada.

II. SATURNO: O SENHOR DOS ANÉIS APÓS CASSINI

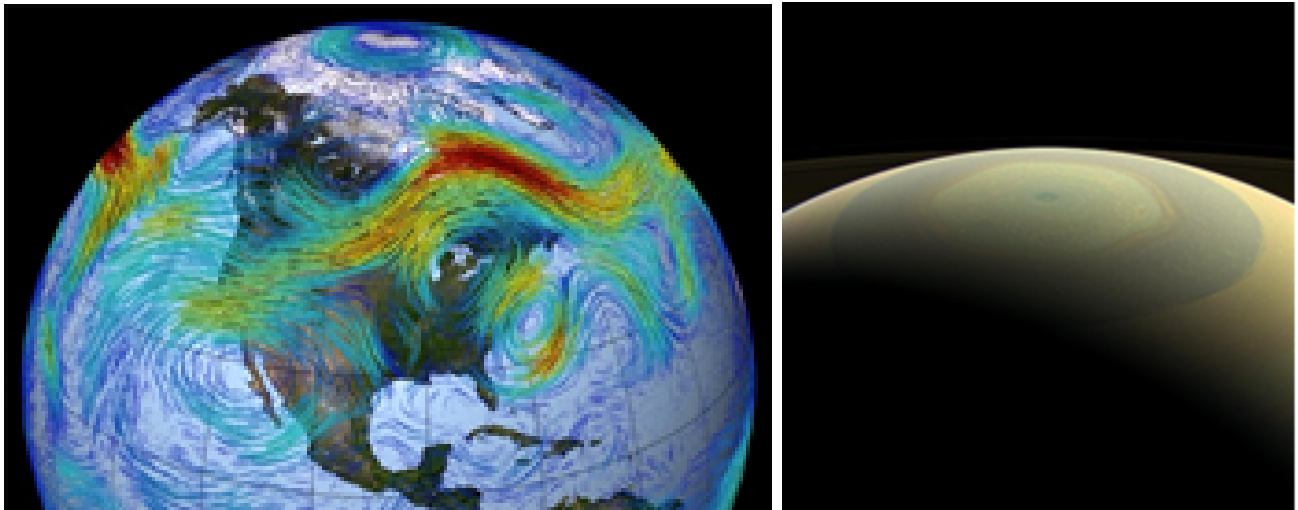
Saturno é um planeta gasoso de um sistema complexo que possui 83 satélites naturais e um conjunto de anéis visíveis e difusos. Este sistema não é complexo apenas devido ao número de luas que orbitam o planeta, mas também devido ao fato de haver bastante interação entre o planeta, seus anéis e suas luas. Suas luas geladas, Titã e Encélado, apresentam muita interação com a magnetosfera deste planeta. A primeira em virtude ao seu tamanho e proximidade ao planeta e a segunda por causa da sua constante manutenção dos anéis a partir de emissão de partículas neutras e carregadas provenientes de gêiseres localizados em seu polo sul. Portanto, o sistema saturnino é complexo por ser dinâmico e os detalhes das interações que ocorrem entre o planeta, seus anéis e suas luas serão apresentados ao longo desta seção.

II.1. Fenômenos atmosféricos em Saturno

Observações deste planeta obtidas por instrumentos localizados na Terra e em sua órbita junto com alguns sobrevoos de espaçonaves Voyagers 1 e 2 foram insuficientes para revelar os mistérios escondidos de Saturno. Entretanto, com a Cassini os cientistas foram capazes de estudar características peculiares que só poderiam ser obtidas estando presente lá, no sistema saturnino, como por exemplo como a composição e a temperatura da alta atmosfera de Saturno é alterada à medida que as estações mudavam. Outra vantagem de se ter um orbitador no sistema de Saturno era a possibilidade de observar de perto as tempestades que ocorrem na atmosfera do planeta, bem como realizar medidas *in situ* de sua magnetosfera e também detectar ondas de rádio e de plasma provenientes do planeta que não podem ser detectadas da Terra. Finalmente, Cassini nos revelou detalhes jamais alcançados sobre os anéis de Saturno, que tanto encantam quando observados por nós daqui da Terra.

A atmosfera de Saturno apresenta bastante atividade assim como a atmosfera terrestre. Entretanto, o polo norte de Saturno possui a corrente de jato mais famosa e visível do planeta, cuja forma geométrica em nada se compara às formas de correntes de jato que ocorrem aqui na Terra, Figura 1. Se trata do então chamado hexágono.

A partir de 1996, a latitude do hexágono permaneceu sobre as sombras até que em 2009 os instrumentos CIRS (sigla do inglês *Composite Infrared Spectrometer*) (Flasar *et al.* 2004) e VIMS (sigla do inglês *Visible and Infrared Mapping Spectrometer*) da Cassini puderam detectar esta estrutura peculiar de Saturno. Neste ano, emissões térmicas foram detectadas por ambos instrumentos mencionados. Mapas de temperatura da troposfera superior do planeta revelaram que o hexágono é mais quente na banda a 79°N e frio na banda a 76°N sugerindo que o hexágono fosse um jato de corrente exceto pelo seu formato (Fletcher, *et al.* 2008). Termografias obtidas pelo VIMS em 5 m revelam que, neste comprimento de



(a) Mapeamento das correntes de jato no hemisfério norte do planeta Terra (b) Imagem no visível da corrente de jato no polo norte de Saturno chamado de Hexágono.

Figura 1: Fonte: NASA (sigla do inglês *National Aeronautics and Space Administration*) e JPL (sigla do inglês *Jet Propulsion Laboratory*) PIA17175.

onda, o hexágono é claramente visível, o que sugere que ele seja formado por nuvens de partículas grandes (Baines *et al.* 2009a). Essa corrente de jato em forma de hexágono, pôde ser explicada a partir da combinação de várias correntes de jato que se combinam para formar o padrão hexagonal como aquele que se estabelece no polo norte de Saturno (Aguilar *et al.* 2010).

Deteccões realizadas pelo instrumento VIMS em 2006 e 2008 mostram que o hexágono está estacionário em relação ao sistema de referência da Voyager (Baines *et al.* 2009a) e que as nuvens de tempestade que se localizam dentro do hexágono se deslocam com velocidades típicas da ordem de 125 m/s enquanto que os fluxos exteriores apresentam velocidades da ordem de 30 m/s. Desde sua detecção pela Voyager 2 até a data das medidas realizadas pelo VIMS mostram que a forma do hexágono aparentemente mudou muito pouco, exceto devido à alteração de cor (Baines *et al.* 2009b).

Saturno tem a peculiaridade de apresentar enormes tempestades que são chamadas de grandes manchas brancas (sigla do inglês *Great White Spot* – GWS). Na Figura 2 é possível ver uma GWS circulando o planeta e encontrando com seu próprio rastro durante o equinócio do planeta quando os dois hemisférios estavam igualmente iluminados pelo Sol e os anéis se encontravam na posição *edge-on*. A imagem em cores reais foi obtida pelo ISS (sigla do inglês *Imaging Science Subsystem*) (Porco *et al.* 2004) da Cassini em 2011 que observou a formação da mancha durante um período de 12 semanas entre a formação da tempestade e seu encontro com o rastro deixado por ela. É possível perceber na imagem que algumas nuvens se deslocaram para o sul e se juntaram com uma corrente que se move para o leste. Esta é uma das maiores e mais intensas tempestades observadas pelas espaçonaves Voyager e Cassini em Saturno e ela ainda está ativa hoje em dia (Del Genio *et al.* 2009). Essas tempestades são periódicas e ocorrem a cada 20-30 anos e oscilam entre equador do planeta e latitudes médias (Li e Ingersoll, 2015).

Foram detectadas descargas elétricas que ocorriam dentro das tempestades observadas

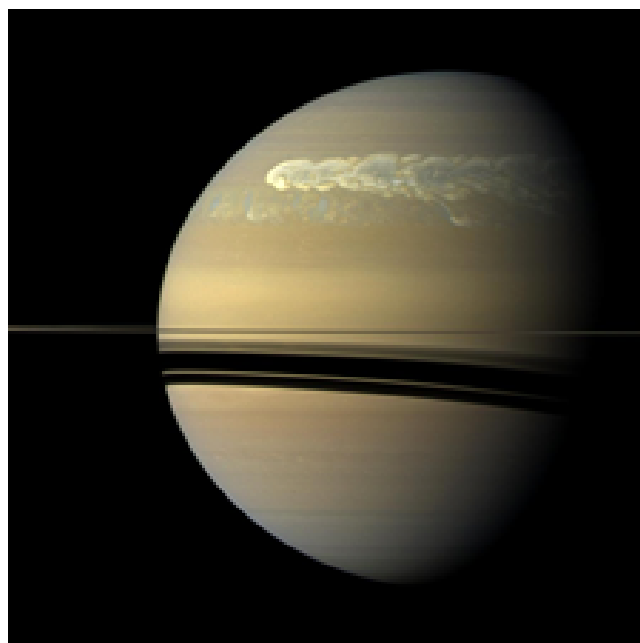


Figura 2: Imagem em cores reais de uma GWS obtida pelo ISS da Cassini em 2011. **Fonte:** NASA/JPL PIA12826.

em Saturno (chamadas de Descargas Eletrostáticas de Saturno – SED) associadas a explosões de emissão de rádio de alta frequência. Existe consenso na comunidade científica de que as SED ocorrem devido à existência de relâmpagos. Entretanto, apesar de todas tentativas, flashes de relâmpagos visíveis não foram observados em Saturno como foram em Júpiter (Dyudina *et al.* 2007). Isto acontece provavelmente pelo fato de que as tempestades que ocorrem em Saturno são originadas em níveis mais profundos da atmosfera de Saturno do que em Júpiter e, desta maneira, sofrem extinção pelas camadas de nuvens superiores e são então obscurecidos à medida que avançam atmosfera acima.

Outro fenômeno atmosférico que ocorre tanto na Terra quanto em Saturno é a emissão de auroras polares. Este fenômeno que ocorre na alta atmosfera pôde ser investigado pelos instrumentos UVIS (sigla do inglês *Ultraviolet Imaging Spectrograph*) (Esposito *et al.* 2000), VIMS e ISS que integraram a sonda Cassini e que foram sensíveis a emissões desde o ultravioleta até comprimentos de onda no rádio (Esposito *et al.* 2004 e Kurth *et al.* 2009). Embora não estejam diretamente relacionadas a emissões de auroras, ondas de rádio quilométricas a partir de distribuição de partículas nas linhas de campo das auroras podem ser utilizadas como indicadores de atividade de auroras e, portanto, podem ser detectadas utilizando o equipamento RPWS (sigla do inglês *Radio and Plasma Wave Science*) da Cassini (Gurnett *et al.* 2004).

As primeiras imagens no ultravioleta obtidas por Cassini foram investigadas por Esposito *et al.* (2004) que descobriram que os espectros das auroras saturninas são semelhantes às que ocorrem em Júpiter e ocorrem devido à excitação de hidrogênio molecular e de hidrogênio atômico a partir de impactos eletrônicos. A Figura 3 mostra duas imagens em cores falsas de auroras polares obtidas pelo UVIS da Cassini. Em azul são as emissões de aurora de gás de hidrogênio excitado por bombardeamento de elétrons e em laranja temos a luz solar

refletida pelo planeta. As duas imagens foram obtidas com uma diferença de uma hora e mostram a resposta da aurora em relação ao aumento de pressão do vento solar incidente sobre Saturno, onde é possível notar mudanças no brilho da aurora oval e em seu interior.

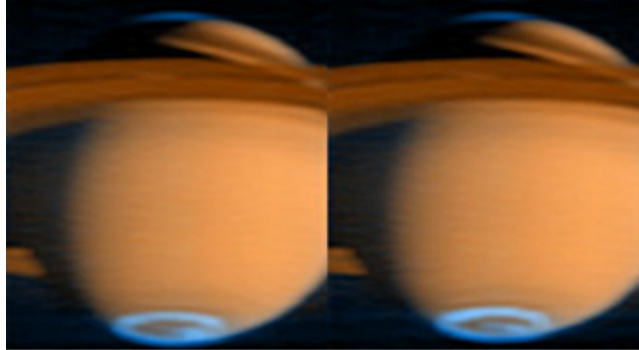


Figura 3: *Imagens em cores falsas de emissões de aurora de gás hidrogênio por bombardeamento de elétrons. Em azul são observadas as emissões em ambos os polos e em laranja temos o reflexo da luz solar sobre o planeta. Fonte: NASA/JPL PIA06436.*

Vale notar que o processo de formação de auroras é igual tanto na Terra quanto em Saturno. Variações no ambiente interplanetário que contém plasma aprisiona elétrons e outras partículas carregadas ao redor das linhas de campo magnético nas camadas atmosféricas mais externas. Esses elétrons aprisionados, por sua vez, colidem com átomos e moléculas os excitando para estados de maior energia. Em seguida, o excesso de energia é liberado na forma de radiação de cores que dependem dos átomos e moléculas excitados (Hultqvist 2007). Aqui na Terra, as excitações ocorrem em átomos de oxigênio e nitrogênio que são elementos abundantes em nossa atmosfera. Já em Saturno, as emissões são decorrentes de excitações de hidrogênio molecular e atômico presentes na alta atmosfera do planeta.

Imagens das auroras que ocorrem em Saturno também foram obtidas através do VIMS (Brown *et al.* 2004) da Cassini utilizando emissão no infravermelho (Stallard *et al.* 2008) do íon H_3^+ . A Figura 4 mostra uma imagem em cores falsas de uma aurora formada a aproximadamente 100 km do topo das nuvens no polo sul do planeta.

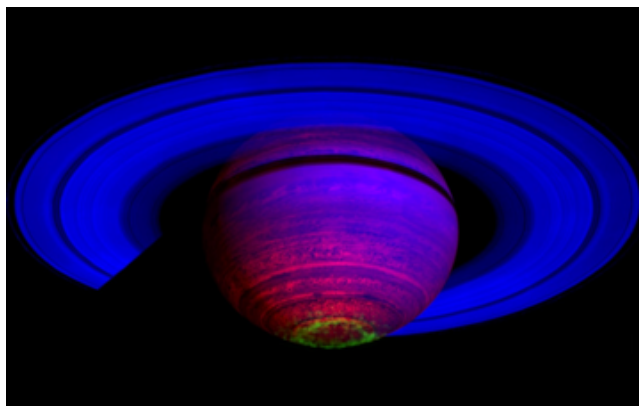


Figura 4: *Imagens em cores falsas de emissões de aurora no polo sul de Saturno obtida pelo VIMS da Cassini em 2009. Fonte: NASA/JPL PIA13402*

II.2. Magnetosfera de Saturno

As missões Pioneer e Voyagers realizaram algumas medidas da magnetosfera de Saturno quando sobrevoaram este planeta (Spilker 1997, Meltzer 2015). Contudo, foi somente após a missão Cassini que se pôde obter uma compreensão mais profunda e mais prolongada das várias seções da magnetosfera e das populações de partículas que povoam o meio interplanetário em torno do planeta anelado. Através da Cassini, foram investigadas as propriedades da magnetosfera tais como correntes elétricas, emissões de rádio, ondas de plasma e interações com os anéis e satélites do planeta.

Os processos dinâmicos que ocorrem na magnetosfera de um planeta são extremamente complexos, como por exemplo, o surgimento de correntes de anel. Quando o plasma magnetizado se movimenta, como é o caso do plasma interplanetário em torno de Saturno, este processo é capaz de produzir corrente elétrica. A corrente de anel equatorial que existe na magnetosfera de Saturno apresenta um fluxo de aproximadamente 10 milhões de ampères que circulam a quase 600.000 quilômetros acima do planeta (Meltzer 2015).

Dados obtidos pelo equipamento MIMI (sigla do inglês *Magnetospheric Imaging Instrument*) da Cassini revelam que o formato da corrente se assemelha ao da aba de um chapéu e apresenta uma espessura de aproximadamente $1,5 R_S$ (raio de Saturno) durante o dia e $\sim 0,5 R_S$ durante a noite. O instrumento MIMI foi essencial para que os cientistas pudessem “visualizar” o plasma interplanetário e os cinturões magnéticos presentes em Saturno a partir de dados coletados *in situ*, até então jamais obtidos, além de proporcionar uma investigação da magnetosfera de dentro do sistema de Saturno.

A corrente de anel é um fenômeno que ocorre tanto na Terra e em Saturno quando o plasma interplanetário fica aprisionado nas linhas de campo magnético dos planetas. Acredita-se que as correntes são originárias a partir do material proveniente dos anéis deste planeta bem como dos gases emitidos pelos gêiseres de sua lua gelada Encélado, evidenciando um acoplamento que existe entre esses objetos, como será detalhado mais à frente na seção 5.

Outro fenômeno que também está diretamente relacionado com o campo magnético é a ocorrência de radiação quilométrica de Saturno (sigla do inglês *Saturn Kilometric Radiation* - SKR) (Desch 1982). Essas emissões podem estar relacionadas com a interação do vento solar que interage com o campo magnético nos polos de Saturno e que também provocam a ocorrência das auroras boreais (Gurnett *et al.* 2004). Essa correlação foi investigada utilizando o equipamento RPWS a bordo da Cassini em conjunto com os dados obtidos pelo satélite espacial Hubble. As observações revelaram que as SKR ocorriam ao mesmo tempo que as auroras.

Além da SKR, ondas de plasma também são fenômenos que envolvem um conjunto de partículas carregadas interagindo com oscilações de campos elétricos e magnéticos. A sonda Cassini obteve os primeiros indícios de ocorrência de ondas de plasma quando se aproximava do planeta em março de 2004 quando detectou uma explosão de plasma de elétrons a aproximadamente $825 R_S$. Isso só foi possível, devido ao fato de que o fluxo de elétrons se alinhou com o vento solar e a frente de choque do campo magnético de Saturno (Gurnett 2005). A frente de choque é uma região de interface onde a velocidade do vento solar sofre um decréscimo abrupto devido ao encontro com a magnetosfera do planeta.

Cassini pôde “ouvir” a passagem através da frente de choque utilizando o instrumento RPWS (sigla do inglês *Radio and Plasma Wave Science*), bem como detectou vários tipos de ondas de plasma dentro e fora da magnetosfera do planeta, sendo a mais intensa detectada a aproximadamente $10 R_S$.

Através dos dados coletados pela Cassini, verificou-se que o sistema de Saturno está interconectado o que significa que seus anéis, satélites e magnetosfera trocam material e influenciam as características e comportamento de uns aos outros. Durante os sobrevoos da Voyager, acreditava-se que a magnetopausa se estendia até $20 R_S$. Com a chegada de Cassini, os dados coletados (Achilleos *et al.* 2008) sugeriam que sua influência estava compreendida na faixa de 22 até $27 R_S$.

Antes de Cassini, as missões Pioneer e Voyager já haviam verificado a ocorrência de interação da magnetosfera de Saturno com suas luas a partir de troca de partículas (Van Allen 1980, Stone 1981, Kaiser 1980). A Cassini corroborou essas observações e ainda mostrou que a magnetosfera interage com a lua gelada Encélado a partir da emissão de partículas de poeira gelada provenientes do fenômeno de criovulcanismo que ocorrer no interior desta lua, como será melhor detalhado na seção 5.

III. ANÉIS DE SATURNO APÓS CASSINI

Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, ampliamos nossa compreensão sobre a composição, dinâmica, origem e evolução dos anéis, obtivemos maior entendimento sobre os anéis difusos e interação dos anéis com a magnetosfera de Saturno e seus satélites como mostrado na Figura 5 onde é possível ver a interação do satélite Prometeus (Meltzer 2015), que tem formato de uma batata, com o anel F. Enquanto Prometeus “rouba” partículas dos anéis, a lua Encélado fornece partículas proveniente de seus gêiseres (Dougherty, 2018), como será discutido na seção V.

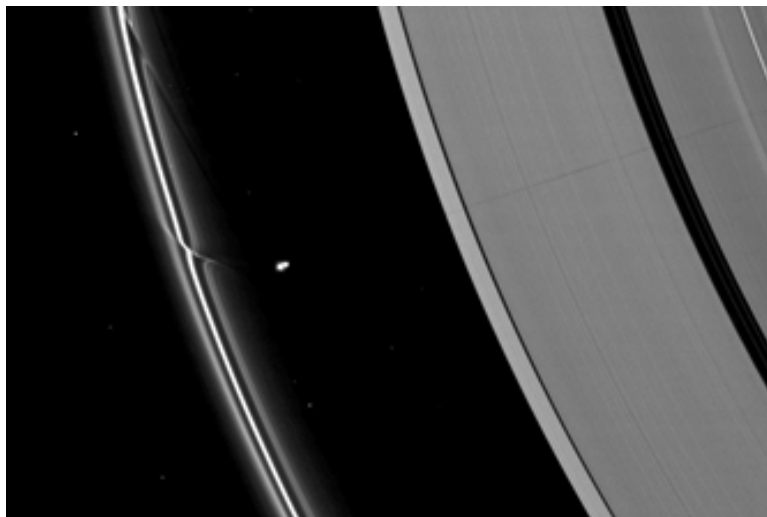


Figura 5: Efeitos da passagem da lua Prometeus de Saturno pelo anel F. **Fonte:** NASA/JPL PIA12537.

Os anéis de Saturno são divididos em dois grupos que exibem propriedades diferentes: o grupo dos anéis principais que compreendem os anéis A, B e C e o grupo dos anéis difusos

com os anéis D, E, G e o anel Phoebe descoberto por Cassini (Vesbicer 2009). O anel F, que se localiza entre os anéis A e G, exibe características dos dois grupos, Figura 6.



Figura 6: Concepção artística dos anéis de Saturno em interação com algumas de suas luas. Note a interação de Prometheus e Pandora com o anel F e a localização de Encélado na região mais densa do difuso anel E. **Fonte:** NASA/JPL PIA03550.

As partículas que formam os anéis de Saturno possuem uma larga distribuição em tamanho desde pequenos grãos de poeira até largas montanhas (Colwell *et al.*, 2009). Através de Cassini, se descobriu bastante interação entre os anéis e os satélites de Saturno, como o que ocorre em Encélado que provém a maior parte do material do anel E a partir de jatos de água que emanam desta lua.

As hipóteses de formação dos anéis levam em consideração o conceito de limite de Roche. Esse limite é definido como sendo a menor distância que um satélite pode se aproximar do centro de um planeta e mantê-lo íntegro devido à ação de sua própria força gravitacional (Kepler, 2017 e Carrol, 2017). Após esse limite, o satélite se despedaça por ação de forças de maré. Para Saturno, o limite de Roche é de 147.000 km. Todos os anéis da Figura 6 estão compreendidos dentro deste limite.

A título de curiosidade, o limite de Roche da Terra é de 18.500 km. Se a nossa Lua se aproximasse de uma distância inferior a essa, ela seria destruída por ação de forças de maré e a Terra seria dotada de anéis assim como Saturno. Algumas teorias de formação dos anéis de Saturno supõem que o planeta tenha sido bombardeado por meteoroides e que alguns satélites do planeta se aproximaram demais de Saturno ao ponto de passar o limite de Roche durante o período de formação do sistema saturnino. Embora essa teoria seja amplamente aceita, ela não explica a ocorrência de alguns anéis difusos fora do limite de Roche. Além disso, a história de formação dos anéis não é a mesma para todos os anéis.

O que se descobriu com Cassini foi que o anel B é formado por material muito massivo, mais até do que foi estimado pela sonda Voyager o que sugere uma origem mais primordial enquanto que os anéis C, D e A foram formados posteriormente por migração de cometas e satélites para dentro do limite de Roche (Meltzer, 2015). Em aproximadamente 300 milhões de anos os anéis de Saturno desaparecerão, pois, o material que os compõe está sendo gradualmente depositado sobre o planeta e, assim como outros planetas gasosos do Sistema Solar, Saturno restará apenas com os anéis difusos.

Os anéis difusos estão associados às pequenas luas de Saturno como Janus, Epimetheus,

Pallene, Methone e Anthe. Alguns fenômenos bastante interessantes ocorrem nos anéis difusos. São processos de plasma de poeira em que grãos de poeira se comportam como detritos de colisão. Como por exemplo, no anel difuso G, as partículas de poeira são influenciadas pela radiação solar e são esculpidas estruturas periódicas, bem como ocorre com o anel D. Desta forma, os anéis difusos foram um excelente laboratório para investigar os fenômenos relacionados com a poeira de plasma.

Vale notar que fenômenos de poeira de plasma também ocorrem no anel B nos assim chamados spokes, que são marcas aproximadamente radiais e intermitentes que são produzidas por pequenas partículas de poeira carregadas que se encontram elevadas do corpo do anel devido à repulsão eletrostática (Horányi *et al.* 2009). A necessidade de explicar como e porque que os spokes ocorriam levaram o surgimento do campo de pesquisa chamado plasma de poeira, outra descoberta da missão Cassini-Huygens. Uma ideia da formação dos spokes é a formação de avalanches induzidas por impactos entre pequenas partículas de poeira de plasma (Tagger *et al.* 1991, Yaroshenko *et al.* 2008, Hamilton 2006).

IV. TITÃ DESVELADA

A maior lua de Saturno, Titã, apresenta uma atmosfera espessa o que dificultava sua investigação a partir de instrumentos localizados na Terra. Entretanto, com a Cassini e seus instrumentos foi possível obter informações inimagináveis a partir de um orbitador no sistema de Saturno, mais perto do que qualquer outro instrumento construído pelo homem. Imagine poder investigar esta lua por uma sonda localizada no próprio satélite. Tal feito foi realizado pela sonda europeia Huygens e neste capítulo será discutido os principais resultados obtidos por essa missão audaciosa.

Esse foi um dos aspectos mais interessantes da missão Cassini: o fato de que sua sonda Huygens seria lançada em direção a Titã para obter dados enquanto estivesse mergulhando dentro de sua atmosfera densa para revelar sua superfície e toda física escondida por debaixo de suas nuvens de hidrocarbonetos.

Antes da chegada de Cassini, tudo que se conhecia sobre Titã era seu tamanho e que sua atmosfera densa era rica em nitrogênio. Os dados obtidos pela missão Cassini-Huygens revelaram que Titã possui mares e lagos de metano e etano líquidos que são reabastecidos por chuvas que precipitam de nuvens de hidrocarbonetos. Além disso, a missão revelou que abaixo da superfície de Titã existe um oceano líquido que contém água e amônia, que são indicativos de que possivelmente há vida neste satélite. Algo meramente especulativo, mas que desperta a curiosidade dos cientistas planetários.

Durante a descida da sonda Huygens pela densa atmosfera de Titã, o instrumento DISR (sigla do inglês *Descent Imager/Spectral Radiometer*) (Tomasko *et al.* 1999) foi importante para determinar as propriedades de espalhamento e absorção da névoa de Titã em função da altitude. Esses dados foram utilizados para modelagem dos sinais utilizados pelos equipamentos VIMS e ISS da Cassini para obter a maior quantidade de dados sobre a superfície deste satélite. A Figura 7 mostra detalhes geológicos de Titã bem como é possível ver rios e afluentes. Entretanto, devido às baixas temperaturas da lua, esses rios não são constituídos de água, mas sim de hidrocarbonetos (Lorenz, 2008).

A descida da sonda Huygens foi uma surpresa devido ao fato de que os cientistas não

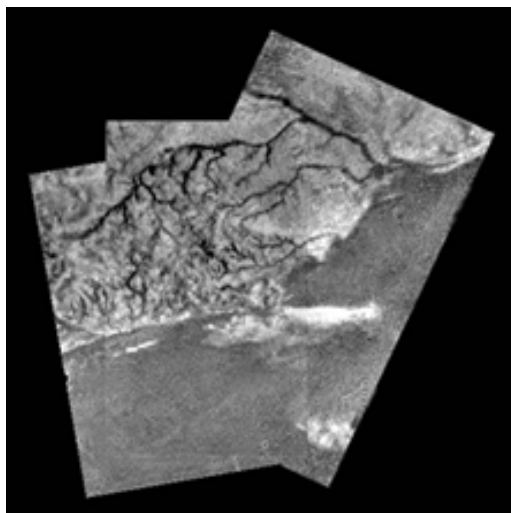


Figura 7: Mosaico de canal de rio e área de cume da superfície de Titã obtidos pela sonda europeia Huygens.
Fonte: NASA/JPL/ESA. PIA07236.

sabiam ao certo onde a sonda iria pousar, se a aterrissagem ocorreria sobre um terreno rochoso ou se ocorreria dentro de um líquido. Por sorte, a sonda aterrissou em terreno rochoso em janeiro de 2005 e, assim, foi possível obter a primeira imagem colorida da superfície de Titã, Figura 8. É possível notar que algumas rochas de gelo localizadas em primeiro plano nesta figura apresentam formato levemente arredondado e se assemelham com seixos presentes aqui na Terra, indicando provavelmente que o local de aterrissagem foi no passado um rio de hidrocarbonetos (Lorenz, 2008).



Figura 8: Primeira fotografia colorida da superfície de Titã. Note a presença de rochas em formato levemente arredondado como seixos. **Fonte:** NASA/JPL/ESA. PIA07232.

Durante a descida, a sonda europeia coletou dados da atmosfera densa e espessa de Titã para melhor compreensão de sua atmosfera bem como fez imagens de sua superfície. Além de “sobreviver” à aterrissagem, a sonda continuou a enviar dados para Cassini após algumas

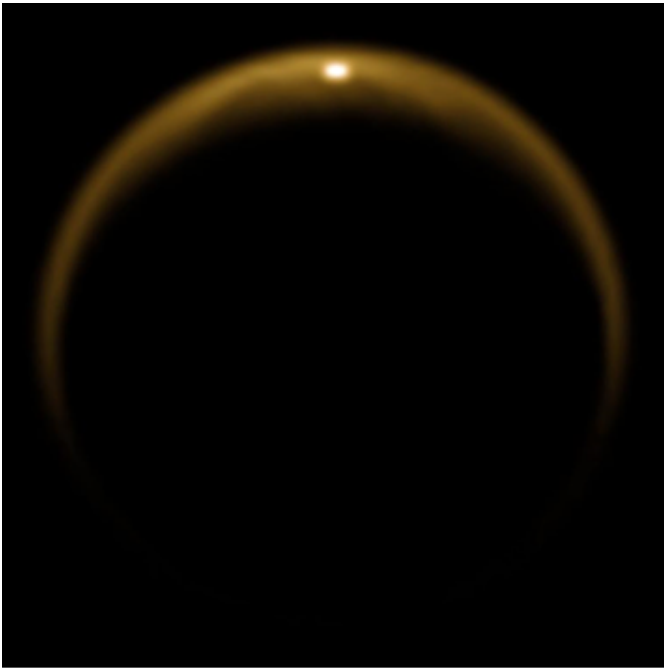


Figura 9: Reflexo da luz solar incidente na superfície de um lago de hidrocarboneto localizado no hemisfério norte de Titã. **Fonte:** NASA/JPL/ESA. PIA12481.

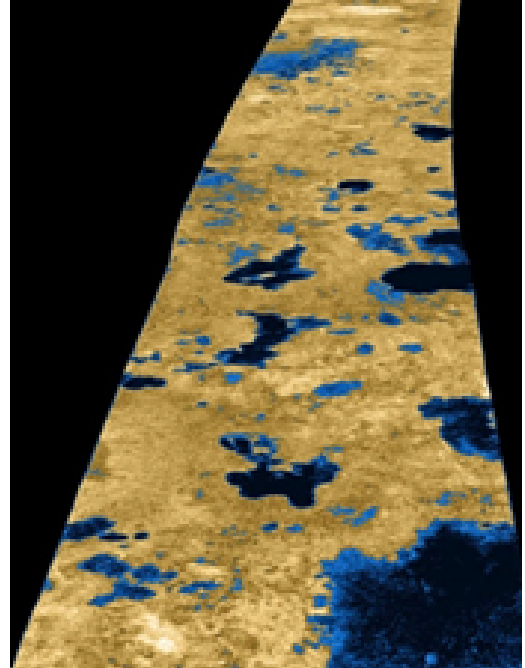


Figura 10: Imagem em cores falsas da superfície do hemisfério norte de Titã onde é possível observar a presença de lagos de diversos tamanhos. A cor azul escura foi usada aqui para realçar a diferença entre o terreno sólido e os entornos dos lagos. **Fonte:** NASA/JPL/ESA. PIA09102.

horas até que a energia de suas baterias fosse esgotada.

Enquanto a sonda Huygens mergulhava a atmosfera de Titã, a nave Cassini realizava sobrevoos sobre a lua e outros corpos do sistema de Saturno. Em um de seus sobrevoos o instrumento VIMS obteve a imagem da Figura 9. Essa imagem mostra a reflexão da luz solar na faixa do infravermelho que incidiu em um lago de hidrocarboneto de Titã confirmando, assim, que haviam lagos de metano e etano líquidos no hemisfério norte desta lua gelada (Lorenz, 2008). A concentração de lagos e oceanos de hidrocarbonetos é maior no hemisfério norte do que no hemisfério sul. Vale notar que atmosfera densa e espessa de Titã absorve e espalha a maior parte dos comprimentos de onda da luz, incluindo o espectro visível. Entretanto, uma pequena parcela desta radiação pôde escapar das nuvens o que permitiu a obtenção desta imagem (Jaumann *et al.* 2009).

Outra constatação de que Titã possui lagos e oceanos de material líquido foi obtido a partir dos dados coletado pelo instrumento RADAR da Cassini (Elachi *et al.* 1999). A Figura 10 mostra uma imagem em cores falsas de lagos de hidrocarbonetos. Essa foi uma das primeiras imagens divulgadas pela NASA sobre o que a sonda Cassini “viu” ao efetuar sobrevoos próximos a maior lua de Saturno. Nesta imagem, é possível ver lagos de diversos tamanhos distribuídos pelo terreno de Titã localizado a aproximadamente 80° do hemisfério

norte.

Uma vez que se tornou possível “visualizar” a superfície de Titã a partir dos dados obtidos por vários instrumentos a bordo da Cassini e instalados na sonda Huygens, se constatou que Titã apresentava algumas poucas crateras o que mostra que sua superfície é recente e sofreu algum processo de renovação ao longo dos anos, o que é um forte indício de alta atividade geológica e uma superfície jovem. Portanto, as crateras de impacto foram apagadas devido a atividades tais como erosão, criovulcanismo e sedimentação de partículas de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera. A partir dos dados obtidos pelo instrumento RADAR da Cassini, foi possível realizar o mapeamento de algumas dessas crateras de impacto, e assim, estimar a idade da superfície desta lua em algo em torno de 200 milhões de anos a 1 bilhão de anos (Lopes, 2020). Outra descoberta obtida pela sonda Cassini em relação à superfície de Titã foi a observação de dunas, de planícies, de montanhas e estruturas em formas de labirintos como constatado na Figura 11.

Além disso, dados de anos de investigação de Titã obtidos pelo orbitador Cassini e pela sonda Huygens revelaram que o metano passa por ciclos semelhante ao ciclo da água na Terra. Existem nuvens de hidrocarbonetos que precipitam em chuvas, rios, lagos, canais fluviais e oceanos de hidrocarbonetos. A geologia desta lua apresenta estruturas de planícies e dunas, Figura 11. Há atividade atmosférica e ventos que sedimentam partículas de gelo e de poeira. Além de montanhas e crateras de criovulcanismo.

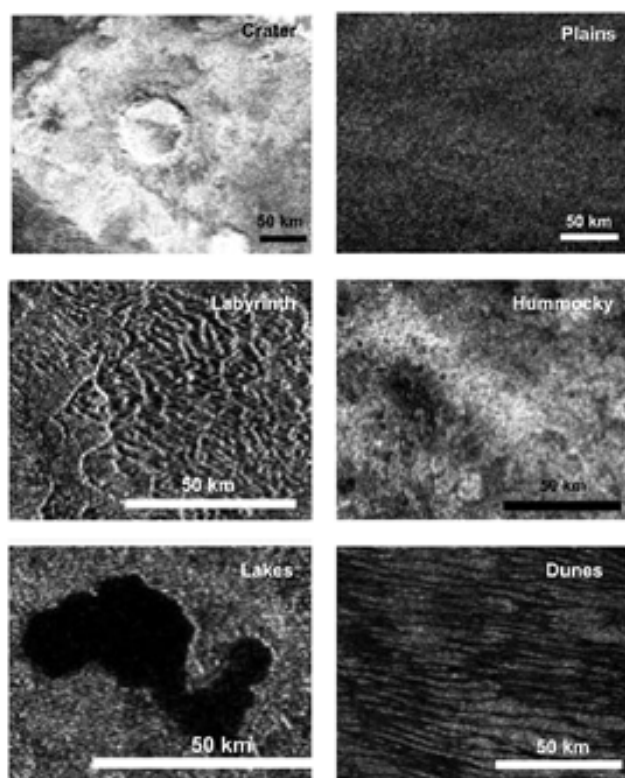


Figura 11: *Imagens de crateras, planícies, labirintos, hummocky, lagos e dunas localizados sobre a superfície de Titã, revelando que a lua apresenta muita atividade geológica. Fonte: Lopes et al. 2020.*

Após a missão Cassini, há indícios de que Titã esconda um oceano líquido debaixo de sua superfície composto principalmente por água e amônia. Sabemos também que o satélite

possui lagos e mares de hidrocarbonetos líquidos localizados próximo aos seus polos e que possui vastas regiões áridas ricas em dunas de hidrocarbonetos.

V. ENCÉLADO: UM MUNDO ATIVO

Assim que a espaçonave Cassini entrou em órbita em torno de Saturno, foi revelado que Encélado é um mundo ativo com jatos de gêiseres no seu polo sul (Schenk, 2018). As somas das descobertas obtidas formaram as correntes de pensamento sobre a origem de Encélado e permitiu a caracterização de sua superfície geoquímica e seu oceano localizado abaixo de sua superfície. Medidas químicas e de propriedades do bulk alimentaram modelos de estado da arte sobre seu interior e seu complexo efeito de maré-térmico que esta lua experimenta e permitiu construir cenários nos quais oceanos sob sua superfície tem bastante tempo de existência e provavelmente constitui ingredientes necessários para a formação de vida.

Acreditava-se que esta lua seria muito pequena para apresentar atividade geológica até mesmo pelo fato de que seu calor interior deveria ter sido perdido para o frio do espaço a bilhões de anos atrás (Meltzer, 2015). As sondas Voyagers possibilitaram a constatação de que a superfície de Encélado apresentava poucas crateras o que sugeria que o satélite experimentava algum tipo de renovação que ocorresse em sua superfície. Essas eram algumas pistas de que havia alguma atividade geológica acontecendo ali.

Com a chegada de Cassini ao sistema de Saturno, pôde-se perceber que de fato Encélado era muito brilhante e quase todas as regiões de sua superfície apresentavam alto albedo sugerindo que a superfície do satélite fosse recoberta por uma camada de neve dando indícios de que esta lua fosse revestida de material fresco (Spencer *et al.* 2006). Essa é uma característica de superfície jovem. Outro fator que corrobora esta evidência é o fato de que a superfície de Encélado tem poucas crateras. Quanto mais crateras, mais velha é a superfície do corpo celeste.

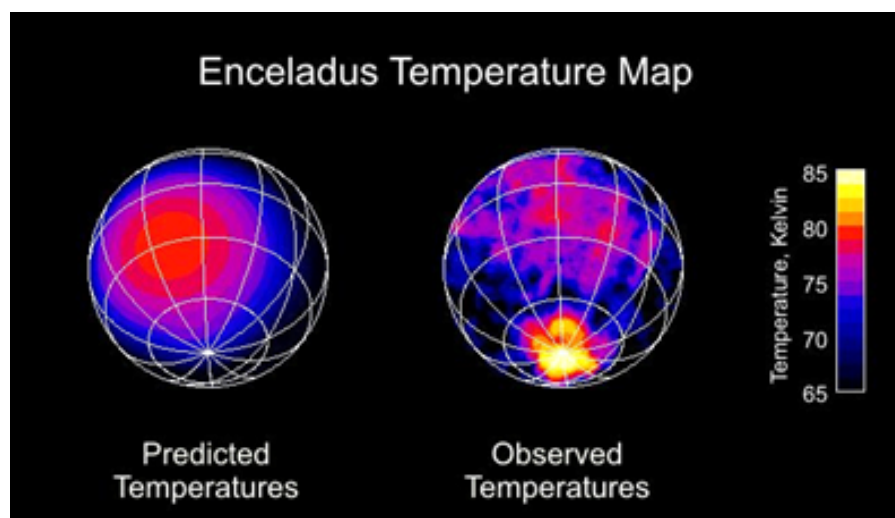


Figura 12: Mapa de temperatura de Encélado obtido pelo CIRS da Cassini. O painel à esquerda mostra a temperatura prevista para o polo sul enquanto que o painel à direita mostra a temperatura observada. *Fonte:* Imagem adaptada de NASA/JPL/GSFC. PIA06432.

A Figura 12 apresenta o primeiro mapa térmico obtido a partir dos dados coletados pelo instrumento CIRS da Cassini. Após os primeiros sobrevoos da Cassini por Encélado, se especulou que o satélite apresentasse temperaturas baixas nos polos como o que ocorre aqui na Terra e em outros corpos celestes devido à incidência oblíqua dos raios solares. Entretanto, o que se observou foi que o polo sul deste satélite apresenta temperaturas mais altas o que sugere que ocorra algum mecanismo de aquecimento em seu interior (Meltzer, 2015), como por exemplo forças de maré entre a lua e Saturno e libração.

Os sobrevoos de Cassini por Encélado diminuíram suas altitudes de 1000 km para 168 km acima da superfície desta lua. Nessas oportunidades, se verificou que havia a ejeção de material enceladeano que emanava do polo sul deste satélite que foram analisados pelo instrumento CDA (sigla do inglês *Cosmic Dust Analyzer*) da Cassini (Srama *et al.* 2002) que por sua vez detectou grão de gelo (Postberg *et al.*, 2018). Ao mesmo tempo, a equipe UVIS realizou a primeira detecção de atmosfera em Encélado quando o satélite atravessou em frente a estrela Gamma Orionis (Hansen *et al.* 2006). Nesta ocasião, foi possível verificar que a luz da estrela diminuiu e seu espectro se modificou ao atravessar a atmosfera da lua, indicando a presença de vapor d'água. Outras ocultações foram investigadas pelo UVIS tais como a da estrela Zeta Orionis, de Épsilon Orionis, e do Sol e todas detectaram de maneira inequívoca a presença de água.

O polo sul de Encélado brilha, aparentemente devido às fontes de calor localizadas nas Listras de Tigre que são fissuras paralelas manchadas com material orgânico de coloração azulada, Figura 13. É através dessas fissuras que vapor d'água, gelo e partículas de poeira são lançadas para fora do satélite (Porco *et al.*, 2014).

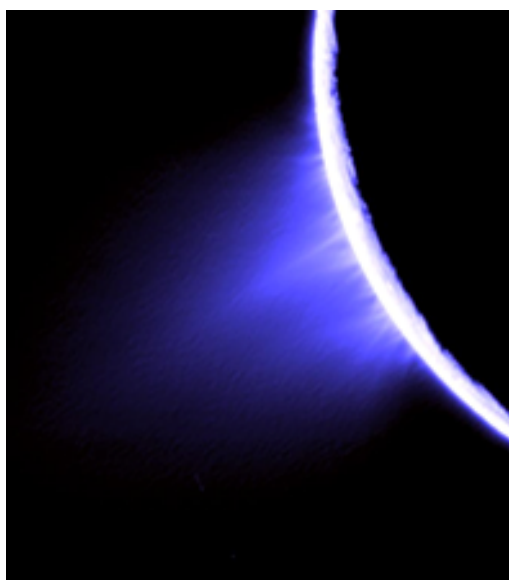


Figura 13: Imagem em cores falsas dos jatos de vapor d'água localizados no polo sul de Encélado que jorram matéria para o espaço em forma de pluma. **Fonte:** NASA/JPL. PIA08386.

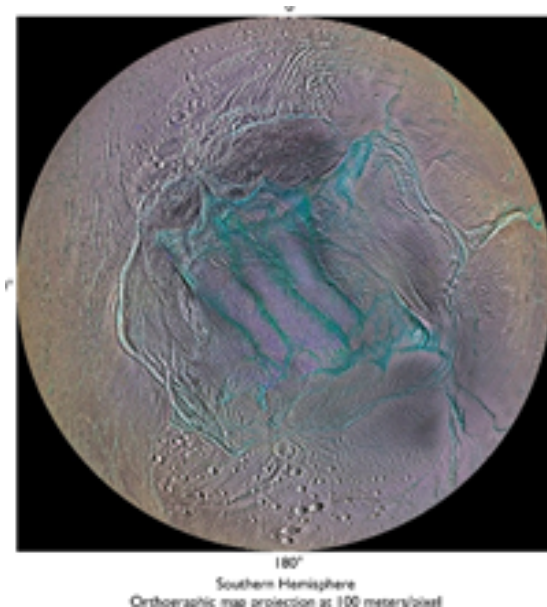


Figura 14: Mapa do polo sul de Encélado obtido pela sonda Cassini onde é possível identificar a região mais ativa desta lua gelada conhecida como listras de tigre. **Fonte:** NASA/JPL/Caltech. PIA18435.

Encélado desempenha um papel importante na conexão com o anel E de Saturno e sua magnetosfera. O que é mais impressionante é o fato do anel E ser mais denso justamente na órbita de Encélado o que sugere que este satélite seja sua maior fonte de partículas. O equipamento CDA da Cassini observou que pequenos grãos de gelo provenientes de erupções do polo sul estavam reabastecendo o anel E, durante o sobrevoo a 168 km acima da superfície de Encélado o que possibilitou medir diretamente as partículas emanadas pelas Listras de Tigre. O que se constatou foi que as partículas mais lentas não eram capazes de vencer a atração gravitacional com a lua, mas as partículas velozes tinham energia suficiente para escapar e compor o anel E (Spahn *et al.*, 2006).

Durante o sobrevoo de maior aproximação da Cassini em direção a Encélado, os instrumentos CDA e INMS (sigla do inglês *Ion and Neutral Mass Spectrometer*) (Waite *et al.* 2004) detectaram ao mesmo tempo um aumento abrupto na taxa de contagem de partículas juntamente com vapor d'água. Em sobrevoos anteriores, os instrumentos UVIS e MAG (sigla do inglês *Magnetometer*) (Dougherty *et al.* 2002) também detectaram a formação de uma pluma (Figura 13). Essas observações só podem ser compreendidas se gás e poeira estiverem sendo ejetadas para fora de Encélado, na região do polo sul do satélite (Spahn *et al.*, 2006). Impactos com micrometeoroides também podem lançar ao espaço partículas de gás e poeira e suas velocidades são condizentes com as velocidades das partículas detectadas pelos instrumentos da Cassini que variam de alguns km/s até dezenas de km/s. Contudo, vale ressaltar que as partículas detectadas acima da região do polo sul apresentavam temperaturas relativamente altas imediatamente acima das fissuras conhecidas com Listras de Tigre (Figura 14), o que suporta a teoria de que ocorra o fenômeno de criovulcanismo no interior desta lua (Spahn *et al.*, 2006).

O instrumento CDA da Cassini analisou a constituição das partículas que compõem o anel E e que são presumidamente provenientes de Encélado. O resultado foi surpreendente: se detectou sais de sódio (Postberg *et al.*, 2018). A maneira mais provável de incorporação de sais nas moléculas de grão de gelo é a partir de minérios localizados no interior de Encélado e que foram depositados no fundo de camadas líquidas localizadas abaixo da superfície desta lua. Deste modo, os instrumentos inferiram a existência de um enorme reservatório de água líquida, talvez até um oceano, por debaixo da superfície de Encélado (Brown 2009).

A suposição de que haja um oceano de água líquida abaixo da superfície de Encélado tem algumas implicações tais como um ambiente adequado para a evolução de elementos precursores que poderiam originar vida, uma vez que os instrumentos da Cassini detectaram compostos orgânicos nas plumas desta lua. Além disso, a energia térmica que emana do polo sul poderia ser um ingrediente a mais para gerar vida neste ambiente. O que ainda não se sabe é a forma deste reservatório de água. Se existem bolsões localizados de água ou se de fato existe um oceano que envolve parte ou todo satélite e que esteja em contato com um núcleo rochoso. Outra incógnita é o mecanismo de aquecimento que fornece energia térmica no polo sul. Como mencionado anteriormente, forças de maré entre a lua e Saturno e libração são exemplos de possíveis mecanismos de aquecimento (Hemingway *et al.* 2018).

Encélado é responsável por bastante material que compõe o anel E. Entretanto, Cassini descobriu que boa parte da massa desta lua também se deposita na parte exterior do anel A localizado a mais de 100.000 km desta lua (Farrel *et al.* 2008). O mecanismo de transporte de partículas de gelo por uma distância tão longa seria devido a ação de campos magnéticos

que fornece o caminho para o acoplamento entre os dois corpos. As partículas de gelo quando são expelidas pelas Listras de Tigre podem eventualmente colidir com outros corpos e sofrer processos de ionização e eletrização ou até mesmo serem ionizadas pela luz solar formando assim um gás de plasma de partículas eletricamente carregadas prontas para serem carregadas pelos intensos campos magnéticos presentes no interior da magnetosfera de Saturno. As partículas que são aceleradas pelos campos magnéticos e podem atingir velocidades altíssimas ao ponto de se tornarem extremamente energéticas e são, então, absorvidas pelo anel A. Essa é uma forte evidência de que os anéis de Saturno funcionam como um escudo protetor do próprio planeta e do ambiente interplanetário uma vez que os anéis atuam mitigando a radiação ao redor do planeta ao absorver partículas de baixa e alta energia (Farrel *et al.* 2008)

As partículas expelidas pelos gêiseres de Encélado interagem com a magnetosfera de Saturno de uma forma bastante interessante. Antes de serem ejetadas, essas partículas podem adquirir carga elétrica através de vários mecanismos como atrito com outras partículas, fotoionização, colisão com elétrons, dentre outros. A pluma de Encélado é constituída tanto por partículas neutras como por íons e essas partículas influenciam a magnetosfera de Saturno em características tais como densidade de massa e padrões de fluxo (Kilveson *et al.* 2006). As linhas de campo magnético se comportam como se estivessem congeladas no plasma. Quando a magnetosfera e seu plasma contorna Encélado, o que se observa é que as linhas de campo parecem desviar do corpo celeste provocando perturbações no ambiente magnético. Foram essas perturbações que foram detectadas pelo instrumento MAG da Cassini e que possibilitou o mapeamento da pluma de vapor d'água e partículas de poeira que emanam desta pequena lua.

Definitivamente, a missão Cassini-Huygens alterou fundamentalmente nossos conceitos sobre onde a vida pode ser encontrada em nosso Sistema Solar e além. Os oceanos de Encélado podem conter os ingredientes para vida microbiana e moléculas orgânicas. Os efeitos de maré, devido à presença de Saturno, mantêm oceanos líquidos por debaixo da superfície gelada dessa lua e permite que ela seja um abrigo para vida extraterrena. Isso abre a janela e possibilidades de se encontrar vida além do planeta Terra.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os sobrevoos realizados pela espaçonave Cassini foram essenciais na investigação de fenômenos atmosféricos que ocorrem em Saturno. As correntes de jatos de ventos produzidos no polo norte do planeta apresentam uma estrutura em forma de hexágono, o que é intrigante já que as correntes de jato que ocorrem aqui na Terra são linhas abertas. Tempestades chamadas de Grande Mancha Branca varrem o planeta em latitudes próximas ao plano equador do planeta.

Campos gravitacionais intensos são produzidos no planeta devido ao movimento de íons de hidrogênio localizados no interior do planeta. Desta forma, a magnetosfera do planeta serve como um escudo protetor contra as partículas carregadas provenientes de ventos solares. Da mesma maneira como ocorre na Terra, as partículas carregadas que compõem o vento solar podem ficar aprisionadas nas linhas de campo magnético e, por sua vez, podem migrar para os polos do planeta e interagir com os elementos que constituem sua

superfície proporcionando emissões de radiação de auroras polares que foram detectadas pelos instrumentos ISS, VIMS e UVIS da Cassini.

Os instrumentos MAG e RPWS da Cassini foram importantes na determinação da estrutura da magnetosfera de Saturno, detectando correntes de anel, interação das partículas dos anéis com a magnetosfera do planeta e interações entre os anéis e as luas do planeta. Com os instrumentos que viajaram a bordo de Cassini, foi possível investigar de perto os anéis de Saturno, a principal característica do planeta que tanto chama atenção.

Ao chegar no sistema de Saturno e se tornar a primeira espaçonave a orbitar o planeta anelado, Cassini começou a realizar sobrevoos pelas luas geladas e deu início ao lançamento da sonda Huygens em direção a Titã. Após vários sobrevoos, a espaçonave conseguiu obter informações valiosas sobre a superfície da maior lua de Saturno, até então velada pela atmosfera espessa de nuvens de hidrocarboneto.

Os instrumentos RADAR e VIMS da nave Cassini foram essenciais na obtenção de mapas geológicos da superfície de Titã. Foram observados dunas, rios, lagos, oceanos, colinas, montanhas, crateras e planícies, revelando que a geologia de Titã apresenta muita semelhança com a geologia da Terra. Entretanto, uma diferença crucial: os rios, os lagos e os oceanos em Titã não poderiam ser formados por água líquida devido às baixas temperaturas do satélite. Outras substâncias fazem o papel da água em Titã: são os hidrocarbonetos metano e etano que podem ser encontrados nos três estados da matéria. Esses hidrocarbonetos sofrem transformações semelhantes às que ocorrem no ciclo da água aqui na Terra. Hidrocarbonetos compõem as nuvens da atmosfera de Titã, precipitam em forma líquida para preencher os rios, lagos e oceanos. Partículas de poeira e gelo de hidrocarbonetos em suspensão na atmosfera se depositam nas planícies de Titã proporcionando o surgimento de estruturas fantásticas na superfície deste satélite.

Enquanto Huygens efetuava sua descida em Titã, Cassini realizava sobrevoos pelas outras luas de Saturno e, ao sobrevoar Encélado, as imagens obtidas pelos instrumentos de sensoriamento remoto ISS, CIRS e VIMS revelaram que este satélite tinha uma superfície com poucas crateras de impacto o que revelava ser um indicativo de atividade geológica nesta lua e seu polo Sul apresentava as maiores temperaturas registradas na lua. Além disso, os instrumentos de campo e de partícula foram capazes de detectar a presença de moléculas de água, amônia e metano que eram expelidas por enormes gêiseres localizadas no polo sul do satélite e de onde era possível ver uma enorme pluma. Essas pistas revelaram que a superfície desta lua também apresenta criovulcanismo e possivelmente esconde um enorme oceano de água líquida por debaixo de sua crosta. Onde tem água, pode haver vida!

O instrumento CDA da Cassini pôde caracterizar as partículas e rastreá-las até os anéis E e A de Saturno além de revelar que o campo magnético deste planeta era ligeiramente perturbado ao redor de Encélado revelando um acoplamento entre o planeta, seus anéis e suas luas, não somente Encélado, mas também aquelas cujas órbitas atravessam os anéis perturbando-os e provocando fenômenos de plasma tais como ondas de plasma que se propagavam pelos anéis.

Cassini foi sepultada na superfície do “Senhor dos anéis” na manobra que ficou conhecida como *Grand Finale*. Ao contrário da sonda Huygens, a espaçonave não foi esterilizada e poderia ainda carregar microorganismos da Terra. Não era possível arriscar que essa nave aterrisasse em alguma lua do sistema de Saturno e a contaminasse com material orgânico

vivo proveniente da Terra. Se por acaso fosse detectada vida nesta lua, não haveria como saber se ela seria originária da Terra ou se de fato era extraterrestre. Deste modo, após todo combustível da espaçonave ter sido esgotado, a espaçonave Cassini encerra sua missão sendo lançada em direção à superfície de Saturno para que a nave fosse totalmente destruída. Assim, este trabalho sintetizou algumas das principais descobertas sobre Saturno e suas luas geladas Titã e Encélado obtidas pela missão Cassini-Huygens que se estendeu por quase vinte anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Astrofísica Gravitacional e Física Espacial (AGFE) realizado pela Universidade de Brasília.

REFERÊNCIAS

- ACHILLEOS, N., et al. (2008). Large-Scale Dynamics of Saturn's Magnetopause: Observations by Cassini, *Journal of Geophysical Research* 113, A11209.
- AGUIAR, A. C. B., et al. (2010). A laboratory model of Saturn's North Polar Hexagon, *Icarus*, 206: 755-763.
- BAINES, K. H., et al. (2009a). *Saturn's north polar cyclone and hexagon at depth revealed by Cassini/VIMS*. Planet. Space Sci., in press.
- BAINES, K. H., et al. (2009b). The deep clouds of Saturn: Morphology, spatial distribution, and dynamical implications as revealed by Cassini/VIMS. *Icarus*.
- BROWN, D., e Agle D. C. (2009). Salt Finding from NASA's Cassini Hints at Ocean within Saturn Moon, *NASA news*.
- BROWN, R. H., et al. (2004). The Cassini Visual and Infrared Mapping Spectrometer (VIMS) Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.
- CARROL, B. W., e Ostlie D. A. (2017). *An Introduction to Modern Astrophysics*, Cambridge University Press.
- COLWELL, J. E., et al. (2009). The Structure of Saturn's Rings. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer.
- COUSTENIS, A., et al. (2009). Earth-Based Perspective and Pre-Cassini-Huygens Knowledge of Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer.
- DEL GENIO, A. D., et al. (2009). Saturn Atmospheric Structure and Dynamics. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*, Springer.

- DESCH, M. D. (1982). Evidence for Solar Wind Control of Saturn Radio Emission, *J. Geo. Res.* 87, 4549–4554.
- DOUGHERTY, M. K., et al. (2002). The Cassini Magnetic Field Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*, Springer.
- DOUGHERTY, M. K., Seidelmann B. J., e Spencer J. R. (2018). Enceladus as an Active World: History and Discovery. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 3-16). Univ. of Arizona, Tucson.
- DYUDINA, U.A., et al. (2007). Lightning storms on Saturn observed by Cassini ISS and RPWS during 2004–2006. *Icarus* 190, 545–555.
- ELACHI, C., et al. (1999). Radar: The Cassini Titan Radar Mapper. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.
- ESPOSITO, L. W., et al. (2000). The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.
- ESPOSITO, L. W., et al. (2004). The Cassini Ultraviolet Imaging Spectrograph Investigation. *Space Sci. Rev.* 115, 299–361.
- FARRELL, W. (2008). *Enceladus is Supplying Ice to Saturn's A-Ring*, Universe Today.
- FLASAR, F. M., et al. (2004). Exploring the Saturn System in the Thermal Infrared: The Composite Infrared Spectrometer. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*, Springer.
- FLETCHER, L. N., et al. (2008). Temperature and composition of Saturn's polar hot spots and hexagon. *Science* 319, 79–81.
- GURNETT, D. A. et al. (2004). The Cassini Radio and Plasma Wave Science Investigation. *Space Sci. Rev.* 114, 395–463.
- GURNETT, D. A. (2005). Radio and Plasma Wave Observations at Saturn from Cassini's Approach and First Orbit, *Science* 307, 1255–1259.
- HAMILTON, D. P. (2006). The collisional cascade model for Saturn's ring spokes. *Bull. Am. Astron. Soc.* 38, 578.
- HANSEN, C. J., et al. (2006). Enceladus' water vapor plume. *Science*, 311, 1423-1425.
- HARTLE, R. E. (1985). Interaction of Titan's Atmosphere with Saturn's Magnetosphere,

Advances in Space Research, 5, 321–332.

HEMINGWAY, D., et al. (2018). The Interior of Enceladus. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 129-162). Univ. of Arizona, Tucson.

HORÁNYI, M. et al. (2009). Diffuse Rings. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

HUBBARD, W. B., et al. (2009). The Interior of Saturn. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

HULTQVIST, B. (2007). The Aurora. In: Y. Kamide/A. Chian, *Handbook of the Solar-Terrestrial Investigations of Jupiter and Saturn Environment*. J. Astron. 67 (??) 333-354.

JAUMANN, R., et al. (2009.) Geology and Surface Processes on Titan. In: *Titan from Cassini Huygens*, Springer.

JOHNSON, T. V. e Estrada P. R. (2009). Origin of the Saturn System. In M. K. Dougherty, L. W. Esposito, S. M. Krimigis, eds. *Saturn from Cassini-Huygens*. Springer.

KAISER, M. L., et al. (1980). Voyager Detection of Nonthermal Radio Emission from Saturn, *Science* 209, 1238.

KEPLER, S. O., e SARAIVA M. F. O. (2017). *Astronomia e Astrofísica*, 4^{ed.}, São Paulo: Editora Livraria da Física.

KIVELSON, M. G. et al. (2006). Does Enceladus Govern Magnetospheric Dynamics at Saturn? *Science* 311, 1391–1392.

LEDVINA, S. A. (2004). Titan's Induced Magnetosphere, *Advances in Space Research* 33, 2092–2102.

LI, C. e INGERSOLL, A. P. (2015), Moist convection in hydrogen atmospheres and the frequency of Saturn's giant storms, *Nature Geoscience*, 8: 398-403.

LOPES, R. M. C., et al. (2020). A Global Geomorphologic Map of Saturn's Moon Titan, *Nat. Astron.*, 4: 228–233.

LORENZ, R., e Mitton, J. (2008). *Titan Unveiled: Saturn's Mysterious Moon Explored*. Princeton University Press.

MELTZER, M. (2015). *The Cassini-Huygens Visit to Saturn: An Historic Mission to the Ringed Planet*, Springer.

- PORCO, C. C., et al. (2004). Cassini Imaging Science: Instrument Characteristics and Anticipated Scientific Investigations at Saturn. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter Remote Sensing Investigations*. Springer.
- PORCO, C., et al. (2014). How the Geysers, Tidal Stresses, and Thermal Emission Across the South Polar Terrain of Enceladus are Related, *The Astronomical Journal*, 148, 45.
- POSTBERG, F., et al. (2018). Plume and Surface Composition of Enceladus. In P. M. Schenk et al., eds. *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*. (pp. 129-162). Univ. of Arizona, Tucson.
- SCHENK, P. M., et al. (2018). *Enceladus and the Icy Moons of Saturn*, Arizona LPI.
- SPAHN, F., et al. (2006). Cassini Dust Measurements at Enceladus and Implications for the Origin of the E Ring, *Science* 311, 1416 – 1418.
- SPENCER, J. R., et al. (2006). Cassini Encounters Enceladus: Background and the Discovery of a South Polar Hot Spot, *Science* 311, 1401 – 1405.
- SPIPKER, L. J. (1997). *Passage to a Ringed World*, NASA SP-533, Washington D.C.: NASA.
- SRAMA, R., et al. (2002). The Cassini Cosmic Dust Analyzer. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*. Springer.
- STALLARD, T., Lystrup, M., Miller, S. (2008). Emission-line imaging of Saturn's H_3^+ aurora. *Astrophys. J.* 675, L117.
- STONE, E. C., et al. (1981). Voyager 1 Encounter with the Saturnian System, *Science* 212, 159–163.
- TAGGER, M., Henricksen, R. N., Pellat, R. (1991). On the nature of the spokes in Saturn's rings. *Icarus* 91, 297–314.
- TOMASKO, M. G., et al. (1999). The Descent Imager/Spectral Radiometer (DISR) Experiment on the Huygens Entry Probe of Titan. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Overview, Objectives and Huygens Instrumentarium*. Springer.
- VAN ALLEN, J. A., et al. (1980). The Energetic Charged Particle Absorption Signature of Mimas, *J. Geophys. Res.* 85(A11), 5709–5718.
- VERBISCER, A. J., et al. (2007). Enceladus: Cosmic Ion and Neutral Mass Spectrometer: Enceladus: Cosmic graffiti artistic caught in the act. *Science*, 315, 815-817.
- VERBISCER A. J., et al. (2009). Saturn's Largest Ring, *Nature* 461, 1098–1100.

WAITE, J. H., et al. (2004). The Cassini Ion and Neutral Mass Spectrometer (INMS) Investigation. In C. T. Russel. *The Cassini-Huygens Mission: Orbiter In-Situ Investigations*. Springer.

YAROSHENKO, V., Horányi, M., Morfill, G. (2008). The wave mechanism of spoke formation in Saturn's rings. In: *Multifacets of Dusty Plasmas, Fifth Int'l. Conf. Physics of Dusty Plasmas. AIP Conf. Proc.* 1041, 215–216.



TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA: Atividades experimentais aplicadas por estudantes do Ensino Médio para a construção do conhecimento dos discentes do Ensino Fundamental

DIDACTIC TRANSPOSITION: Experimental activities applied by high school students to construction Thé knowledge of elementary school students

MANOEL PINTO LEÃO¹, FÁTIMA BARAÚNA MAGNO (*in memoriam*)²

¹Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Profa. Clotilde Pereira, Castanhal, PA, CEP 68742-310

²Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física; Faculdade de Física, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, CEP 66075-110

Resumo

Neste trabalho tem-se como objetivo a construção e aplicação de kits experimentais por estudantes do Ensino Médio para o ensino-aprendizagem de discentes do Fundamental, utilizando a Teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard. Este kit experimental foi produzido com material alternativo, sendo composto de 12 experimentos, relativos a 10 temas de Física contemplando as quatro últimas séries do Ensino Fundamental. Percebeu-se que esta metodologia experimental provoca a aproximação entre os professores de Física e o das outras disciplinas inseridas em Ciências, e os estimulam a desenvolver atividades interdisciplinares, com a criação de projetos que demonstrem conhecimento dos fenômenos e conceitos de ciências em espaços formais e não formais. A aplicação deste trabalho mostrou que os estudantes, com a prática experimental, demonstraram mais interesse pelas aulas, o que comprova que uma abordagem voltada para o cotidiano do aluno contribui para a construção do conhecimento, fazendo do ensino algo mais motivador. A proposta da Transposição Didática foi exitosa pois permitiu aos alunos construir seu conhecimento e fazer a relação entre os conteúdos estudados em sala de aula e o conhecimento científico, ou seja, foi constatado que o saber sábio foi transposto em saber a ensinar, e este se transforma no saber ensinado, como propõe Chevallard.

Palavras-chave: Experimentos de Física. Kit Experimental. Transposição Didática.

Abstract

The objective of this work is the construction and application of experimental kits to be used by high school students in the teaching - learning of elementary students, using Yves Chevallard's Theory of Didactic Transposition. The Project was composed of an experimental kit with alternative materials with of 12 experiments, related to 10 Physics themes covering the last four grades of Elementary School. It was noticed that this experimental methodology brings about the approximation between Physics teachers and those of other disciplines inserted in Sciences, and encourages them to develop interdisciplinary activities, with the creation of projects that demonstrate knowledge of the phenomena and concepts of science in formal and non-formal spaces. The application of this work allowed to notice that the students, through with the experimental practice, showed more interest in the classes, which proves that an approach focused on the student's daily life contributes to the construction of knowledge, making teaching something more motivating. It was noticed that the Didactic Transposition proposal allowed to the students to build their knowledge and make a relationship between the contents studied in the classroom and theoretical scientific knowledge, that is, it was found that wise knowledge was transposed into knowing how to teach, and this becomes the taught knowledge, as proposed by Chevallard.

Keywords: Physics experiments. Experimental Kit. Didactic Transposition.

I. INTRODUÇÃO

Como pode-se definir um Laboratório de Ciências? Ou, algumas vezes, denominado como Multidisciplinar? Seria correto designá-lo como o local adequado para realizar a experimentação, a relação da prática com a teoria, do desenvolvimento da capacidade do saber fazer do aluno, da relação do tema estudado com situações do cotidiano e outras que permeiam nossas vidas como cidadãos? Ou ainda nomeá-lo como o espaço físico onde se propõem atividades que têm como objetivo a exploração de fenômenos que possam ser relacionados à teoria (BORGES, 2002), sendo, então, parte importante do processo ensino-aprendizagem de ciências. As aulas práticas fazem do aluno um investigador que “constrói seu conhecimento, tirando suas próprias conclusões” (LIMA; GARCIA, 2011, pg. 207), permitindo ao estudante desenvolver o senso crítico.

As aulas experimentais podem ser consideradas tanto formas de viabilizar o processo de aprendizagem (VAZ et al., 2012), quanto estratégias de ensino (PEREIRA et al., 2014). Para tanto podem ser utilizadas como ferramentas didáticas pelo professor no processo de construção do conhecimento, destacando-se o seu potencial interdisciplinar, quando as práticas são pensadas e direcionadas para abordar conhecimentos de várias áreas das ciências (BORGES, 2002).

O principal objetivo da experimentação é fazer com que o estudante tenha a oportunidade de exercitar sua mente, fazendo-o descobrir o desconhecido, não importando os recursos disponíveis. Pensando nisso, é

comum confundir atividades práticas com um local específico, e que as atividades aplicadas devem ter um objetivo, buscando respostas e soluções articuladas com as questões em pauta, de forma que prática e teoria não sejam isoladas uma da outra (BORGES, 2002, p.12).

Michel Varret redigiu a Transposição Didática em sua tese “*Le temps des études*”, em 1975, e Yves Chevallard inseriu-a no campo da didática da Matemática em 1980, após analisar como o conceito de distância, que nasce no campo de pesquisa e reaparece no contexto escolar (BROCKINGTON; PIETROCOLA, 2005).

Segundo Chevallard (1991), a Transposição Didática é o ramo metodológico da Didática da Física que investiga estratégias de como o professor deve ensinar para que o aluno evolua nos seus conceitos, habilidades e atitudes, até que um conteúdo de saber, que tenha sido definido como saber a ensinar, torne-se apto a ocupar um lugar entre os objetos de ensino.

Uma nova maneira de ampliar-se a visão dos estudantes em relação a compreensão e análise de determinados fenômenos físicos é investigando como se desenvolveram os conceitos e, assim, ajudar a estabelecer uma conexão entre os conteúdos de Física e suas necessidades de conhecer o universo. Isto deve ser realizado o mais cedo possível, para que os alunos compreendam a evolução dos conceitos mais facilmente e estabeleçam conexões entre os conceitos físicos estabelecidos e sua utilidade na vida cotidiana (ARCANJO FILHO, 2011).

Quanto à História e Filosofia da Física, os conhecimentos relacionados a estas disciplinas podem potencializar o tratamento dos conteúdos científicos e as estratégias ou abordagens estruturadas para a construção do conhecimento destes estudantes, auxiliando na Transposição Didática para uma melhor compreensão real dos fenômenos físicos “a partir de olhares diferenciados e com perguntas que fogem à forma tradicional de apresentar a Física, o que obriga o professor a se distanciar para (re)pensar aqueles conhecimentos que já havia aprendido” (CASTIBLANCO; NARDI, 2014, p.54).

Após análise das constatações mencionadas acima viu-se a necessidade de mudanças no ensino-aprendizagem que não privilegiassem apenas a parte teórica do conteúdo, supervalorizando as “fórmulas matemáticas”, sem, entretanto, prescindir delas. Essas mudanças não podem e nem devem ocorrer sem um respaldo teórico e científico, e sim com investigações que possam contribuir cientificamente com elementos para tais transformações.

Este trabalho decorreu da realização de uma pesquisa científica desenvolvida em duas grandes etapas: a *fase de elaboração das aulas teóricas e experimentais* e a da *transposição didática*.

Ao aplicar este trabalho em uma Escola Pública do Município de Castanhal-PA, em todos os momentos, pretendeu-se responder ao seguinte problema de pesquisa: *Conseguiremos, através desta pesquisa, ajudar os professores do Ensino Fundamental a estimular e motivar os estudantes das turmas do 6º ao 9º ano, despertando o seu interesse em conhecer os fenômenos da natureza, explicados através dos conhecimentos físicos, auxiliando o ensino-aprendizagem; e ainda, com o auxílio da Teoria da Transposição Didática, auxiliar os estudantes do Ensino Médio na construção de conhecimentos, com estes mesmos experimentos?*

Assim, a pesquisa foi desenvolvida tendo como objetivo a construção de kits experimentais, destinados aos alunos do 6º ao 9º ano do Ensino Fundamental, que foram construídos e aplicados pelos estudantes do Ensino Médio, buscando facilitar o ensino-aprendizagem dos discentes do Fundamental, com a utilização da Teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard. Anteriormente, foram ministradas aulas teóricas aos alunos do Ensino Médio dos conteúdos envolvidos pelo professor-pesquisador que deveriam ser transpassadas ao Fundamental, por estes discentes.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

II.1. Laboratório de Ciências no Ensino Fundamental

É indiscutível a importância das aulas experimentais para o ensino de Ciências por várias razões, dentre elas estimular o interesse dos alunos, fato debatido desde o final do século passado (BLOSSER, 1988). Nos tempos atuais, o desafio é que os temas abordados, para que sejam de maior interesse provoquem grande motivação no alunado, estejam relacionados com a cultura e o cotidiano dos estudantes (THOMAZ, 2000).

Quanto a melhoria no processo ensino-aprendizagem, através de reflexões, discussões, elaboração de hipóteses, contextualização do conhecimento, os experimentos são capazes de provocar o interesse dos discentes, como excelente ferramenta didática, auxiliando no entendimento de conceitos mais abstratos e/ou mais longínquos da realidade e, ainda, fazendo a relação entre a teoria e a prática dos conteúdos de Física (ROSA, 2014). Os Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs+) salientam a importância das atividades experimentais no ensino de Física, quando evidenciam:

É indispensável que a experimentação esteja sempre presente ao longo de todo o processo de desenvolvimento das competências em Física, privilegiando-se o fazer, manusear, operar, agir, em diferentes formas e níveis. É dessa forma que se pode garantir a construção do conhecimento pelo próprio aluno, desenvolvendo sua curiosidade e o hábito de sempre indagar, evitando a aquisição do conhecimento científico como uma verdade estabelecida e inquestionável (BRASIL, 2002, p.81).

Um dos objetivos das atividades experimentais, associadas às aulas teóricas, é o estímulo ao amor-próprio e à segurança e convicção do estudante, para que possa corroborar com os conteúdos teóricos e, também, ensinar algo sobre a natureza do conhecimento científico, com o objeto destas aulas abordados como alternativa metodológica, para que se transforme em um instrumento para o ensino, e não seja apenas um utensílio para aprimorar teorias (HODSON, 1988). Além disso, segundo Rosa *et al.* (2013, p. 84), “as atividades experimentais possibilitam a vivência de uma Física mais prazerosa, mais intrigante, mais desafiadora e imbuída de significados”.

Sendo assim, a utilização de atividades experimentais nas aulas de Física revela-se como um recurso capaz de estimular os estudantes, despertar sua curiosidade, romper a sequência de aulas tradicionais, possibilitando que o sujeito se mostre ativo no processo de ensino, ao proporcionar o envolvimento e a troca de saberes.

Para Séré; Coelho; Nunes (2003) e Thomaz (2000) o estudante, ao executar os experimentos, aprende que para entender os fenômenos, são necessários, além destes, a teoria. Esta é uma das maravilhas das aulas experimentais, muitas vezes podendo ser executadas nas salas de aula; o uso de atividades práticas no ensino pode potencializar a aprendizagem das ciências e proporcionar um melhor conhecimento e explicação dos fenômenos.

A realidade da maior parte das escolas públicas é que não dispõem de recursos para o acesso a equipamentos sofisticados, sabendo-se que o uso de atividades experimentais pode

contribuir para a aprendizagem dos estudantes, então,

Recorrer à construção de equipamentos simples com materiais de fácil aquisição e reposição passa a ser uma alternativa para agregar a experimentação ao ensino, de modo a torná-la um instrumento à disposição e ao alcance do professor (DARROZ; ROSA; ROSA, 2016, p. 19).

Os estudantes, durante a preparação da aula com atividades experimentais, já deverão ter o conhecimento prévio fornecido pelas aulas teóricas, para que o professor saiba que irão evidenciar o funcionamento dos experimentos, comprovando, assim, as leis existentes na Física, podendo ser deixados à vontade, para discussão e levantamento de hipóteses que julgarem pertinentes, investigando resultados obtidos, lembrando que o laboratório multidisciplinar é usado para fins didáticos e pedagógicos que servem para comprovações científicas (BRAZ; AGOSTINI, 2017).

A falta das atividades experimentais é sentida pelos estudantes desde o Ensino Fundamental, pois deveria ser iniciado o contato com esta prática nas disciplinas iniciais de Ciências, mas, quando há laboratórios escolares nas escolas, raramente são utilizados. Caso isto acontecesse, estas práticas fariam com que os estudantes se aproximassem do trabalho científico e, muitas vezes, pudessem vivenciar exemplos do dia a dia, melhorando o aprendizado das disciplinas a ela relacionados. Por este e outros motivos o uso de experimentos é defendido na literatura, uma vez que incentiva a motivação dos estudantes comprovando, na prática, o que aprendem na teoria, melhorando a construção do conhecimento.

Sobre a não utilização do laboratório multidisciplinar e/ou não realização de experimentos nas escolas pelos discentes, por não existência de local específico, há muitas alegações, tais como, a falta deste espaço didático, vidrarias e reagentes porque são materiais caros, inexperiência e déficits por parte do docente, oriundos de uma formação inicial insatisfatória, poucos recursos disponíveis na Escola, reduzida carga horária para as aulas de Ciências, carência de pessoal técnico, más condições para a realização dos experimentos, comportamento inadequado dos alunos em um ambiente que requer cuidados extras nas atitudes, turmas com excessivo número de estudantes. (SANTANA *et al.*, 2019).

Entende-se ser urgente dar maior visibilidade para os laboratórios escolares de Ciências, pela sua importância no ensino-aprendizagem, em consonância com o momento atual que a ciência vivencia no mundo, premiando cientistas e valorizando as iniciativas que resultam numa qualidade de vida melhor.

II.2. A Teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard

O sociólogo francês Michel Verret utilizou a teoria conhecida como Teoria da Transposição Didática, termo empregado pela primeira vez na sua tese de Doutorado *Le Temps des Études*, publicada em 1975, onde propõe fazer um estudo sociológico das atividades escolares, visando compreender as funções sociais dos alunos.

Uma nova modificação nesta teoria ocorreu na década de 80, por Yves Chevallard, ao publicar *La transposition didactique: du savoir savant au savoir enseigné* (1985), quando escreveu:

Um conteúdo de saber que tenha sido definido como saber a ensinar, sofre a partir de então um conjunto de transformações adaptativas que irão torná-lo apto a ocupar um lugar entre os objetos de ensino. O “trabalho” que faz de um objeto de saber a ensinar, um objeto de ensino, é chamado de transposição didática. (CHEVALLARD, 1991, p. 39)

Na Teoria da Transposição Didática há três saberes fundamentais: o saber sábio, o saber a ensinar e o saber ensinado. Para Chevallard (1991), o pensar, objeto da didática, se caracteriza como uma relação ou um sistema contendo três elementos, o professor, os alunos e o saber ensinado.

A Transposição Didática é a maneira através da qual o saber sábio é submetido a várias alterações para que, ao final, torne-se o saber ensinado, sendo o saber sábio o de referência para os demais saberes. Este saber é criado por “intelectuais e cientistas que constroem aquilo que também é denominado de conhecimento científico” (ALVES FILHO; PINHEIRO; PIETROCOLA, 2008, p. 03 apud SILVA JR.; SILVA, 2022, p. 263).

Segundo Siqueira e Pietrocola (2006) o saber a ensinar está presente em livros didáticos e programas escolares, sendo responsável pela sapiência presente em materiais voltados a docentes do Ensino Médio e discentes universitários. Quando é feita a Transposição Didática, deverá ser tomado o cuidado de utilizar-se uma linguagem própria, de fácil entendimento do alunado que, após sofrer modificações, obedeça ao sistema didático. Com relação a estes saberes, faz-se o questionamento:

- Como se relacionam o saber ensinado e o ‘saber sábio’?

Chevallard (1991) diz que quando há a passagem do saber sábio para o ensinado, o conceito de Transposição Didática constitui um elemento para responder-se a esta pergunta, sendo necessário que esta unidade do conhecimento sofra algumas transformações para que seja possível ensiná-la no enquadramento escolar, pois estes dois saberes são distintos, embora não haja autonomia entre os sistemas didáticos no que concerne ao saber que deve ser ensinado.

- E a atividade experimental? Conseguirão os experimentos, auxiliados pela Transposição Didática, estimular e motivar os estudantes, despertando o seu interesse em conhecer os fenômenos da natureza, explicados através dos conhecimentos físicos, auxiliando na construção de conhecimentos?

A atividade experimental no Ensino de Física contribui para a Transposição Didática, ou seja, para que ocorram modificações necessárias no processo de divulgação do saber. Onde um saber que foi construído e estruturado (saber sábio) é adaptado para ser apresentado em livros textos e ainda mais, quando passa a ser ensinado em sala de aula (saber a ensinar)? Esse desmonte epistemológico do saber sábio e sua reconstrução através do novo saber, o saber a ensinar, demonstram claramente a valoração equivocada do aspecto empírico, o que faz incutir uma tradição e um sentimento de que o laboratório é imprescindível no processo de ensino (THOMAZ, 2000).

III. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa faz parte de um trabalho desenvolvido no Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF), da Universidade Federal do Pará (Polo 37), e buscou-se fazer a transposição didática do conteúdo aprendido no Ensino Médio para as turmas do 6º ao 9º ano do Fundamental, aplicada não pelo professor de Física, e sim pelos estudantes das turmas do 1º ao 3º ano do Ensino Médio, orientados pelo docente de Física e mestrando do MNPEF, responsável pelo trabalho de pesquisa.

III.1. Local e Participantes da Pesquisa

A pesquisa de campo foi desenvolvida em uma Escola da rede pública de Ensino Fundamental e Médio (Figura 1), localizada no município de Castanhal, no Estado do Pará, Brasil, tendo como sujeitos estudantes do Ensino Médio de três distintas classes, contendo 40 alunos em cada, com idades variando entre 14 e 16 anos, e quatro turmas do Ensino Fundamental com 35 discentes cada, entre 10 e 13 anos, de ambos os sexos, para todas as sete turmas.



Figura 1: Imagem frontal da escola. Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

III.2. Desenvolvimento da Pesquisa

III.2.1 Elaboração das aulas teóricas para desenvolver as atividades experimentais seguindo a Teoria da Transposição Didática

Organizadores prévios são materiais introdutórios apresentados aos estudantes antes do novo material educativo, sempre que os conhecimentos prévios dos alunos sejam insuficientes ou inexistentes para servirem de subsunçores que possam ancorar e facilitar a nova aprendizagem (AUSUBEL, NOVAK E HANESIAN, 1980).

Para efeito de coleta de dados e diagnosticar os conhecimentos prévios dos estudantes em relação aos conteúdos de Física, nesta fase da pesquisa foram usadas planilhas demonstrativas onde poder-se-ia obter informações referentes ao desenvolvimento e desempenho

junto aos estudantes, além da análise de conteúdo dos livros didáticos de Física do Programa Nacional do Livro Didático (PNLD) para o Ensino Médio e Fundamental. Nesses textos do PNLD, foi feita uma pesquisa a fim de encontrar aquele que representasse os eixos temáticos iguais, contemplados em ambos os livros; nessa consulta, foram analisados apenas os textos referentes à Física. Dessa forma, foi organizado um cronograma para a execução das aulas, que abrangesse os dias da semana em que as turmas tivessem, ao mesmo tempo, aulas duplas ou triplas da disciplina Física, o que facilitaria a execução do Projeto.

Assim, foram elaboradas 10 (dez) aulas expositivas e dialogadas, a serem ministradas nas turmas do 1º ao 3º ano do Ensino Médio, do turno vespertino, pelo professor responsável pela pesquisa. Após estas aulas, os estudantes das turmas do Ensino Médio, sob a mediação e supervisão do docente-pesquisador executaram a Transposição Didática do conteúdo programático para as turmas do Ensino Fundamental, também do turno vespertino, do 6º ao 9º ano. Acompanharam as apresentações no Ensino Fundamental, além do professor-pesquisador (mestrando) e da orientadora deste, os professores de Ciências, responsáveis pelas respectivas turmas do Ensino Fundamental II.

III.2.2 Escolha e Elaboração dos experimentos pelos estudantes do Ensino Médio

Os experimentos selecionados para comporem o kit experimental foram de fácil construção, fundamentados em conhecimentos do cotidiano, fenômenos da natureza, para que os estudantes tivessem a percepção da Física Aplicada. Foi feito, para cada experimento, um roteiro de como elaborá-lo, a partir dos conhecimentos contidos nos livros didáticos dos discentes.

Outro fator de relevância foi que na construção do aparato experimental houve a utilização de material alternativo, lembrando que este é um dos objetivos do Projeto, para que os experimentos possam ser reproduzidos nas escolas de Ensino Fundamental da rede pública do Estado.

Após ser feita a análise dos conteúdos apresentados nos livros didáticos do Ensino Fundamental e Médio, foi elaborada uma planilha de ação para os estudos quantitativos e qualitativos, que nortearia a base estrutural ideal para concretizar o Projeto.

Nos laboratórios de Física, normalmente, não se consegue observar, de forma direta, os fenômenos a serem estudados; estes são pressupostos através dos aparelhos de medidas e computadores.

Para obter uma medida e também para fabricar os instrumentos é preciso teoria. Esta foi fornecida aos estudantes do Ensino Médio pelo docente da disciplina, além das diferentes linguagens e simbolismos utilizados em Física, e transposta aos alunos do Ensino Fundamental pelos discentes do Médio.

Houve reunião dos discentes do Ensino Médio com o professor-pesquisador para a construção dos experimentos, com significativa frequência e demonstração de grande interesse na confecção das atividades experimentais da parte dos estudantes (Figura 2).

O papel das atividades experimentais é o de fazer a relação entre o referencial empírico; os conceitos, leis e teorias, e as diferentes linguagens e simbolismos utilizados em Física (MARTINAND, 1996; JOHSUA, 1989).

Foram selecionados, inicialmente, 20 experimentos. Após segunda análise, foram esco-



Figura 2: Alunos do Ensino Médio manipulando os experimentos. Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

lhidos 12 protótipos para fazerem parte do kit experimental, cujo conteúdo já havia sido discutido e analisado no Ensino Médio, e tema constava nos livros didáticos do Ensino Fundamental. Estas práticas estão elencadas, por ordem de conhecimento na Tabela 1, sendo previstos nos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCNs).

No.	Conteúdo de Física	Denominação do Experimento
1	Velocidade Média	Carrinho de Newton
2	Leis de Newton	Moedas Estáticas
3		Cabo de Força
4		Teleférico de Newton
5	Energia Mecânica	Lata Mágica
6	Pressão Atmosférica	Chuveiro Pet
7	Óptica	Disco de Newton
8	Trabalho Térmico	Usina Térmica
9	Ondas	Máquina de Ondas
10	Som e Luz	Enxergar a própria Voz
11	Eletrostática	Eletroscópio
12	Eletromagnetismo	Eletroímã

Tabela 1: Experimentos que compõem o kit experimental. Fonte: Os autores, 2019

Apresenta-se na Figura 3 o Laboratório Multidisciplinar da Escola, onde observa-se a montagem experimental de uma parte dos experimentos, executada por um grupo de estudantes do Ensino Médio.

Entende-se que o Laboratório Multidisciplinar de Ciências tem como objetivo promover a aproximação dialógica entre a teoria ministrada em sala de aula e as experimentações executadas nos laboratórios ou salas convencionais. Isso desperta e aguça o interesse dos alunos em participarem das aulas que, dependendo do professor, das condições dos experimentos das escolas e da estrutura funcional da mesma, pode ter como resultado mais motivação do alunado, melhor ensino-aprendizagem, assimilação do conteúdo de forma mais significativa.



Figura 3: *Laboratório Multidisciplinar da Escola. Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019*

III.2.3 Transposição Didática das Atividades Experimentais pelos estudantes do Ensino Médio para o Ensino Fundamental

Dando continuidade às atividades, os alunos do Ensino Médio iniciaram a transposição didática para os do Fundamental, com a apresentação das atividades práticas e a produção de textos sobre o experimento, relacionando os fenômenos naturais aos do cotidiano; na sequência, foram feitas observações sobre o conteúdo apresentado, explicitando a existência deste tema em seu livro didático, o que facilitaria o ensino-aprendizagem no Ensino Fundamental, já que os assuntos aplicados nos experimentos estavam contidos nestas obras.

Durante estas atividades observou-se o engajamento dos estudantes relativamente às técnicas e estratégias de ensino, elemento crucial para que a construção do conhecimento seja bem-sucedida. O engajamento pode ser compreendido como a disposição em participar da rotina das atividades escolares, realizar as tarefas, seguir as instruções dos professores, ser pontual, interagir positivamente com professores e pares, fazer perguntas para entender conceitos, persistir em tarefas difíceis, buscar materiais para aprofundamento, revisar o material aprendido anteriormente e sentir-se incluído na comunidade escolar.

Destaca-se também que a comunicação com os professores de Ciências é de grande importância para a elaboração das aulas teóricas e experimentais, pois a metodologia aplicada está diretamente conectada aos conhecimentos prévios dos alunos do Ensino Médio, no qual esse saber será transposto para o Fundamental, uma vez que a seguir, no mês de dezembro, encerramento do Período Letivo, houve a culminância do Projeto, consolidando todo o planejamento. Esta finalização foi feita com o PHYSICS DAY (Dia da Física), que foi realizado em uma sexta-feira, dia 13 de dezembro de 2019, às 15h, quando foram apresentadas todas as atividades experimentais (Figura 4).



Figura 4: Ilustração de divulgação do PHYSICS DAY (Dia da Física). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

IV.1. Resultado preliminar

Considerando-se que a Base Nacional Comum Curricular (BNCC) enfatiza a importância do uso de atividades experimentais como uma forma de prática para as ciências da natureza, permitindo aos estudantes do Ensino Médio se aproximar de procedimentos que lhes propiciem identificar informações ou variáveis relevantes, escolher e usar instrumentos de medidas, experimentar e testar hipóteses e chegarem a conclusões (BRASIL, 2018).

Ao ser feita a pesquisa com os estudantes do Ensino Fundamental sobre a execução de atividades experimentais, constatou-se que em torno de 78,75% dos alunos ainda não tinham executado ou presenciado a aplicação de um projeto experimental. Isso causou surpresa, pois a experimentação faz parte do conteúdo didático existente na BNCC.

IV.2. Análise das turmas do Ensino Fundamental

Na pesquisa foi considerada a abordagem dos conteúdos de maneira contextualizada, ao mesmo tempo em que os estudantes eram incentivados a participar das atividades experimentais, tendo sua curiosidade despertada. Quando são unidas atividades teóricas e práticas, aprender a gostar de Ciências/Física é mais fácil, como também promover o envolvimento dos discentes naquilo que lhes está sendo proposto.

Após a transposição de conhecimentos executada pelos estudantes do Ensino Médio, os discentes do Fundamental ficaram mais engajados no Projeto, discutindo os conteúdos apresentados, pesquisando os fenômenos da natureza e antecipando-se aos questionamentos das apresentações.

Para os alunos da 6ª série, após a transposição didática, observou-se que a maioria conseguiu conciliar os saberes teóricos aos experimentos, agregando ainda sua criatividade, fazendo com que as aulas ficassem mais motivadoras e desafiadoras.

Devido a sua relação com outras áreas do conhecimento, o ensino de Ciências ampliou sua importância e permitiu compreender a realidade na qual os alunos estão inseridos e o modo como a sociedade está estruturada. Dentre os diversos aspectos que precisam



Figura 5: *Chuveiro Pet (material utilizado e em funcionamento).*

Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

Figura 6: *Chuveiro Pet (material utilizado e em funcionamento).*

Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

ser discutidos em sala de aula, além dos conteúdos curriculares, está o modo como o conhecimento é produzido, os desdobramentos das relações do ser humano e da sociedade, o papel do cientista, aspectos éticos da Ciência etc.

Notou-se que alguns experimentos despertaram maior interesse nos estudantes do que outros; no 6º ano foi o “Chuveiro Pet”, pois eles ficaram sem entender, quando foi colocada água numa garrafa pet, esta foi fechada e nela colocada uma etiqueta para não abrir, informando que continha água e aquilo era surpresa para, assim, aguçar a curiosidade dos alunos (Figuras 5 e 6).

Essa prática trouxe algumas respostas para questionamentos advindos dos fenômenos da natureza, que foi explicado a eles e discutido por todos.

Dando continuidade ao experimento, foi perguntado aos estudantes da 6ª série do Ensino Fundamental quem gostaria de abrir a garrafa para desvendar o experimento. Um deles se dispôs a fazer isso e verificou que, ao abrir a tampa da garrafa, a água começou a jorrar pelos furos existentes nas laterais da garrafa, feitos propositalmente. Nesse momento, foi explicado aos alunos que a Pressão Atmosférica atua nos corpos em todas as direções; quando a garrafa está fechada, a pressão atua nos furos laterais, impedindo que a água saia pelos furos. Ao abrir a tampa, a pressão atmosférica, empurra a água para baixo fazendo com que ela saia pelos furos

Por meio da experimentação, os estudantes conseguiram estabelecer o vínculo necessário que permeia a teoria e a prática, uma vez que elas complementam-se, tornando a aprendizagem mais significativa do que nos casos em que as informações são apenas reproduzidas em provas e/ou trabalhos, aproximando-o do conhecimento científico. A opção apenas pelo



Figura 7: *Enxergando a própria voz (material utilizado e em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.*



Figura 8: *Enxergando a própria voz (material utilizado e em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.*

experimento ou somente pela teoria pode culminar em abordagens superficiais e/ou na não apropriação efetiva dos conceitos mediados.

Na turma do 7º ano foi possível observar que alguns discentes realizaram uma pesquisa prévia sobre os assuntos que seriam apresentados em sala nas atividades experimentais. O professor de Ciências afirmou que as aulas da disciplina ficaram com melhor frequência e mais dinâmicas; que o comportamento dos alunos em relação aos saberes no ensino da matéria melhorou acentuadamente depois das apresentações teóricas já realizadas pelos estudantes do Ensino Médio.

Nessa série, o experimento que mais dinamizou a sala de aula, foi no que era necessário ser feita uma análise da aprendizagem em torno da parte teórica estudada em Ondas Sonoras. O experimento “Enxergando a própria voz” foi de grande importância para serem mostrados os conceitos e alguns fenômenos associados a este tema da Física.

A idade dos discentes era, em média, de 11 a 13 anos, e muitos estavam na fase de mudança na frequência da voz; a discussão foi associada aos tamanhos das imagens formadas na parede, onde a formação está associada a voz emitida e sua intensidade. Quando foi mencionado o experimento, onde é usado como microfone a membrana elástica (bexiga), que está na borda da latinha formando uma superfície que tem um pequeno espelho que vibra e, nesse momento, o laser já ligado incide luz no espelho que reflete a luz na parede formando as imagens (Figuras 7 e 8).

Percebe-se também que, quando a voz é grave a vibração é maior, formando uma imagem mais deformada, e quando a voz é aguda a vibração é menor, formando uma imagem menos deformada.



Figura 9: Fonte: <https://oglobo.globo.com/epoca/> Acesso: 25/07/2020.

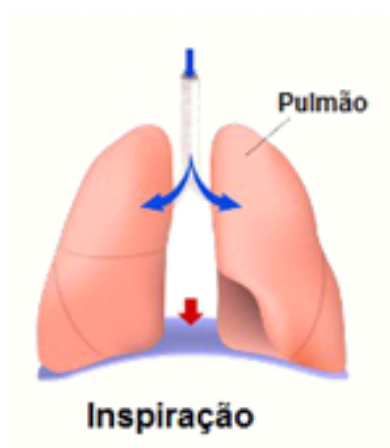
O professor deve utilizar sua criatividade para promover a integração da teoria e da prática por meio de atividades diversas e da interdisciplinaridade, pois desta maneira a aprendizagem de seus educandos é concretizada com maior facilidade e qualidade.

Foi proposto à professora de Ciências, na 8ª série do Ensino Fundamental, elaborar alguns experimentos que pudessem mostrar a Física juntamente com os conceitos básicos de Biologia, de modo que fosse explorada a interdisciplinaridade. Para esta turma, um dos experimentos apresentados foi o “Pulmão Artificial”, onde foi explicado para os alunos, a interdisciplinaridade entre a Física e a Biologia, através de figuras de raio-X, mostrando pulmões humanos infectado pela Covid-19 e saudável (Figura 9A e 9B).

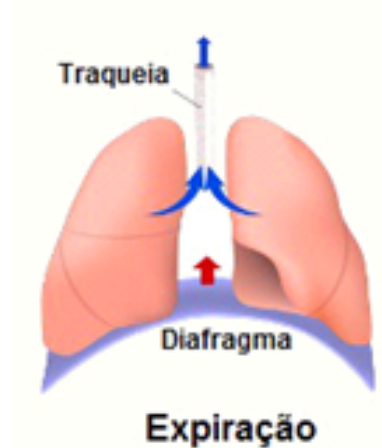
Nesta atividade prática foram explicados, inicialmente, os movimentos respiratórios da inspiração e da expiração e as estruturas envolvidas (Figuras 10A e 10B).

No fenômeno da inspiração, ou seja, a entrada de ar nos pulmões, através da contração do diafragma, ocasionando seu abaixamento, quando o tórax aumenta de tamanho, na sequência a pressão interna dos pulmões torna-se menor que a externa, havendo, então, a redução da pressão intrapulmonar, e o ar acaba entrando pelas vias respiratórias, chegando até os alvéolos para que ocorram as trocas gasosas. Dando continuidade às explicações, através da Figura 10b foi elucidada a expiração ou retirada do ar das vias respiratórias, quando ocorre o relaxamento dos músculos intercostais e do diafragma, a redução do volume da caixa torácica, que volta ao seu tamanho de repouso com a retração dos pulmões, na sequência a pressão interna fica maior que a externa e o aumento da pressão intrapulmonar faz com que o ar seja lançado para fora do nosso corpo.

A atividade prática foi desenvolvida conforme a Figura 11, ao puxar-se a bexiga existente na parte de baixo da garrafa pet; simulando a contração do diafragma, o espaço dentro da garrafa é equivalente à caixa torácica e, neste momento, aumenta. Conforme foi explicado pela professora de Biologia, os estudantes comprovaram que a pressão diminui, pois existiu uma diferença de pressão entre a parte de dentro e a parte de fora da garrafa, através da mangueira. Dando continuidade ao experimento, a pressão atmosférica força o ar a



(a) Movimentos respiratórios e as estruturas envolvidas.



(b) Movimentos respiratórios e as estruturas envolvidas.

Figura 10: Fonte: <https://br.images.search.yahoo.com/search/images> Acesso: 30/06/2022

entrar pela mangueira, que representava a traqueia, e enche as bexigas (pulmões) e, a seguir, os alunos foram orientados a soltar a bexiga, para verificar que o ar sai, pois não haverá diferença de pressão.



Figura 11: Experimento do Pulmão Artificial. Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

A experiência do Pulmão Artificial atingiu seus objetivos; no dia da apresentação em sala de aula, um aluno havia visto um vídeo sobre o Covid-19, que relacionava o problema que uma pessoa poderia ter se tivesse o pulmão comprometido pelo Coronavírus, tendo este discente solicitado à professora que colocasse um pouco de talco nas bexigas que faziam o papel dos pulmões e, a seguir, ela explicou o comprometimento dos pulmões de uma pessoa infectada, sendo mais determinante na exposição.



Figura 12: *Usina Térmica (material utilizado e em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.*



Figura 13: *Usina Térmica (material utilizado e em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.*

Dando continuidade às apresentações, foi aberta uma discussão de como seria o funcionamento do trem que fica exposto na Praça Estrela, principal praça da cidade de Castanhal-PA, explicando sua relação com a Física, através do experimento “Usina Térmica”, que seria executado a seguir; isto criou mais curiosidade a respeito da prática supracitada (Figuras 12 e 13).

Para criar mais expectativa na discussão sobre a atividade experimental, os estudantes do Ensino Médio e, ao final, o professor-pesquisador de Física falou um pouco sobre as locomotivas, citando como exemplo a Maria Fumaça, trem que quando se movimentava, saía fumaça pela chaminé e que tinha como base para o seu funcionamento as transformações de Energia Térmica em Energia Mecânica, através da queima de combustível que ficava em uma fornalha, com a utilização dos conhecimentos básicos de Termodinâmica.

Na turma do 9º ano, com alunos de 13 a 15 anos, em média, percebeu-se um maior envolvimento nas aulas teóricas explicativas. Os estudantes apresentaram poder argumentativo melhor, sendo mais coerentes com as perguntas formuladas, pois têm melhor ajuda do livro didático, que apresenta 50% no conteúdo de Física, o que corresponde ao percentual de 90% do tema de Física Básica contemplado no Ensino Médio. Para o 9º ano do Ensino Fundamental a transposição dos experimentos foi aplicada por todas as turmas do Ensino Médio, da 1ª a 3ª série.

No experimento do eletroscópio foi possível mostrar todo o conhecimento adquirido durante a dinâmica experimental com os canudos e as folhas e lenço de papel. Também foi feita a relação entre os fenômenos da natureza como os raios, relâmpagos e trovões (Figuras 14 e 15).

O Eletroscópio de Folhas desenvolvido teve o objetivo de observar e demonstrar o comportamento das cargas elétricas e corpos eletrizados, a eletrização de materiais por



Figura 14: Eletroscópio (material utilizado).
Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.



Figura 15: Eletroscópio (em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

indução e contato físico e como ocorre a transferência de elétrons de um corpo carregado para um corpo neutro.

Durante a realização desse experimento foram socializadas respostas para alguns questionamentos, tais como o funcionamento do eletroscópio, a aproximação de um corpo de um Eletroscópio de Folhas e a observação de que as folhas se abriram e a diferença entre eletrização por indução, por atrito e por contato e sua aplicação no cotidiano.

Ao iniciar a atividade experimental sobre o eletroímã, os estudantes do Ensino Médio perguntaram aos alunos do Fundamental se alguém já havia visto um ímã; a resposta foi positiva, muitos alunos responderam que um canudo, quando atritado, virava um ímã. Mas um outro discente respondeu que para atrair o canudo, a parede tinha que ser um ímã, ainda durante a dinâmica (Figuras 16 e 17).



Figura 16: Eletroscópio (material utilizado). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.



Figura 17: Eletroscópio (em funcionamento). Fonte: Acervo pessoal dos autores, 2019.

Neste momento, os alunos do Ensino Médio mostraram os conceitos de ímãs e Campo

Magnético que poderia ser criado por ímãs naturais ou artificiais, sendo também explicado que a Terra representa um grande ímã, teoria criada pelo cientista inglês Willian Gilbert, no século XVII (Figura 18).

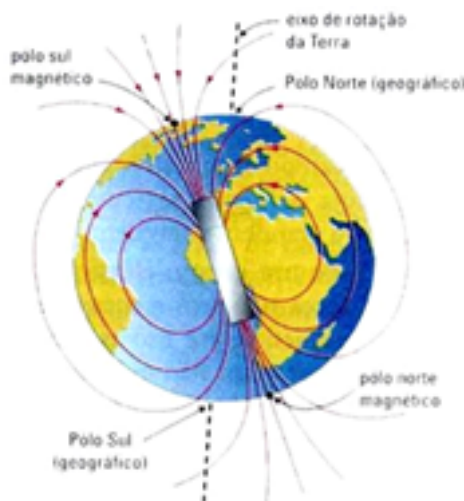


Figura 18: Terra como ímã: Polos geográficos e Polos magnéticos. Fonte: <http://geonaweb.blogspot.com/>, Acesso em: 30/06/2022

Foi esclarecido que, diferentemente do que ocorre para a eletricidade, nunca percebe-se um ímã com somente um polo, pois ele possui dois polos, o norte (N) e o sul (S), com duas polaridades (Figura 19). As polaridades de um ímã são bem observadas quando o primeiro é aproximado de um segundo ímã, sempre observando duas distintas interações, atração ou repulsão, dependendo da maneira como esses são aproximados. Quando dois polos iguais são colocados próximos, temos uma deturpação do campo ali presente, ao passo que o casamento de tais polos, ou seja, a aproximação do polo N e S irá fazer com que as linhas sigam o esperado, orientando e criando uma força de atração entre os polos (HALLIDAY RESNICK WALKER, 2021).

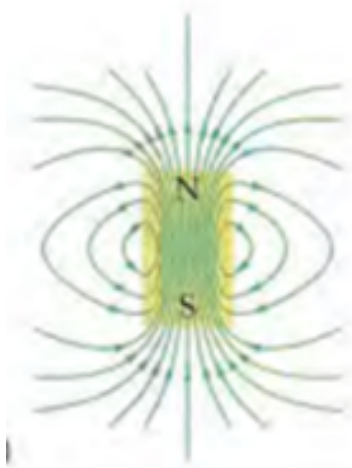


Figura 19: Representação das linhas do campo magnético geradas e polos de um ímã. Fonte: Halliday, Resnick e Walker, 2021.

Foi explicado e mostrado, através de uma figura adaptada à Figura 20 a qual demonstra a inseparabilidade dos polos magnéticos pois, quando um ímã é partido, ele forma uma estrutura com dois polos, em cada novo pedaço. Embora previstos, até hoje os monopolos magnéticos não foram observados; um único polo magnético não pode existir isoladamente. (HALLIDAY RESNICK WALKER, 2021).

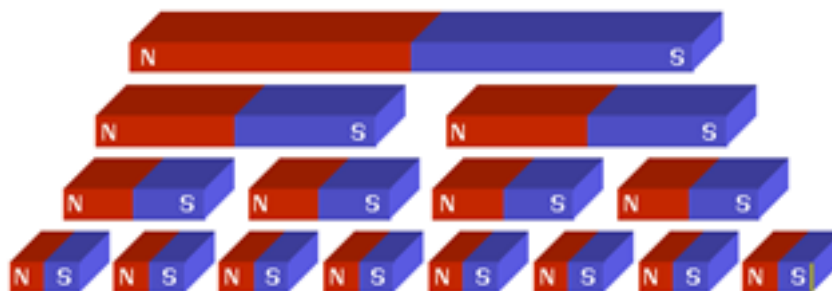


Figura 20: Inseparabilidade dos polos magnéticos. Fonte: <https://profemmanuel.blogspot.com/> Acesso em: 27/07/2022.

Um grupo de alunos da turma do 9º ano do Ensino Fundamental se propôs a apresentar um experimento no Dia da Física. O experimento sugerido foi algo que mostrasse a relação entre o Campo Elétrico e o Campo Magnético, associado ao cotidiano, tal como a Blindagem Eletrostática dos celulares nas penitenciárias públicas, uma vez que está relacionado às Ondas Eletromagnéticas criadas por Campos Elétricos e Magnéticos.

Ao solicitar os depoimentos dos estudantes sobre as aulas experimentais associadas às aulas teóricas, a maioria, nas turmas, relataram que essa prática facilita a aprendizagem e desperta o interesse pelos conteúdos envolvidos. Além disso, percebeu-se que os discentes expressaram-se com maior facilidade e fizeram referências diretas aos conteúdos abordados em sala de aula. Nossa interpretação para essa diferença nos depoimentos é uma consequência da abordagem que foi feita em sala de aula em relação aos experimentos e discussões dos conteúdos de forma a contribuírem com a transposição didática.

Vale ressaltar que não se registrou críticas quanto à aplicação do trabalho, apenas alguns estudantes deixaram o questionário em branco, sem opinar sobre o seu desenvolvimento.

Destaca-se ainda, através das observações e registros pessoais, a participação ativa dos alunos e integração entre eles durante a realização de atividades em pequenos grupos.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como meta principal responder à seguinte pergunta de pesquisa: “Conseguiremos, através desta pesquisa, ajudar os professores do Ensino Fundamental a estimular e motivar os estudantes das turmas do 6º ao 9º ano, despertando o seu interesse em conhecer os fenômenos da natureza, explicados através dos conhecimentos físicos, auxiliando o ensino-aprendizagem; e ainda, com o auxílio da Teoria da Transposição Didática, auxiliar os estudantes do Ensino Médio na construção de conhecimentos, com estes mesmos experimentos?”

Considerando as dificuldades estruturais e humanas apontadas, a construção de experimentos de baixo custo torna-se uma opção que contribui para a aprendizagem dos

alunos, pois é importante destacar que essa opção possui limitações porque, mesmo com custos menores, seria necessário que projetos dessa natureza passem a ser financiados e fomentados pelo Estado para que essa prática possa integrar o conjunto das atribuições dos professores de Ciências/Física e venha a se popularizar.

Levando-se em conta os conhecimentos dos alunos, os resultados constatados na pesquisa pós-apresentação e também nas observações feitas pelos professores nas aulas, esses resultados sugerem que a atividade experimental contribuiu para um avanço na aprendizagem dos alunos. Entretanto, alguns fatores limitaram o processo de ensino e necessitam ser readequados, entre os quais salientamos o tempo de realização das atividades. Apesar dessas limitações, é importante destacar que essa atividade de transposição didática associada às atividades experimentais contemplando, desta maneira, os Ensinos Médio e Fundamental, pode ser vista como uma alternativa didática, tendo em vista que rompe com uma prática de ensino puramente conceitual – baseada em formalismos matemáticos – e sem vínculos com a realidade do aluno.

Considera-se que essa proposta obteve êxito, pelas evidências de aprendizagem significativa, e por ter conseguido, através do eixo temático Experimentação em Física, fazendo uso da Teoria da Transposição Didática, feita através dos discentes do Ensino Médio, estimular e motivar os estudantes das turmas do 6º ao 9º ano do Fundamental, despertando o seu interesse em conhecer os fenômenos da natureza explicados através dos conhecimentos físicos, auxiliando no ensino-aprendizagem, com a apresentação de experimentos, além de resolver as situações-problema.

Conclui-se ainda que, ao selecionar os conteúdos e as atividades experimentais, o docente realizou a primeira Transposição Didática, transformar o saber sábio em saber a ensinar, aplicando-a para os Estudantes do Ensino Médio, para que estes a implementassem para os alunos do Fundamental de forma a facilitar a segunda Transposição Didática, que é transformar o saber a ensinar em saber ensinado; esta troca entre discentes motivou os estudantes, quer do Ensino Médio, quer do Fundamental.

Diante de todo o exposto, verifica-se que a utilização de um kit experimental, contendo experimentos demonstrativos de Física, feitos de materiais alternativos, durante as aulas do Ensino Médio e apresentados, usando a Teoria da Transposição Didática, para as turmas do Fundamental, constituiu-se uma ferramenta viável e de grande ajuda no processo ensino-aprendizagem, pois ela atendeu à demanda do professor em sala de aula e levou os alunos do Ensino Fundamental a compreenderem o conteúdo que, anteriormente, pensavam ser extremamente difícil, promovendo efeitos visuais capazes de tornar o processo de construção do conhecimento de Física mais atrativo e instigante para os estudantes.

Por fim, aponta-se a necessidade de que essas questões pedagógicas sejam objeto de reflexão, com a finalidade de contemplar as carências acadêmicas em relação às pesquisas sobre as políticas curriculares contemporâneas voltadas para o ensino de conteúdos procedimentais na área de Ensino de Física.

V.1. Trabalhos futuros

Nesse estudo, deixa-se como trabalho futuro usar o mesmo instrumento, a Teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard, associada às atividades experimentais, agora

inserindo os alunos do Ensino Fundamental das séries iniciais, e assim contemplar todo o ciclo da Educação Básica referente a ciência Física.

Para se conseguir criar no estudante, principalmente das séries iniciais, mais motivação, interesse e engajamento pelas atividades experimentais, deve-se diversificá-las, sendo uma das formas a mudança de abordagem dando-lhes uma conotação mais de acordo com as atividades científicas, o que se pretende fazer com a atividade experimental através da Teoria da Transposição Didática.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer à direção da Escola Estadual de Ensino Fundamental e Médio Profa. Clotilde Pereira. Rodrigues dos Santos por haver nos acolhido durante o processo e aos professores e alunos participantes da investigação pelo envolvimento voluntário no trabalho.

REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, J. P.; PIETROCOLA, M.; PINHEIRO, T. F. *A Eletrostática como exemplo de Transposição Didática*. Ensino de Física: Conteúdo metodologia e epistemologia em uma concepção integradora. Org. Maurício Pietrocola. Ed: UFSC. 2001.

ARCANJO FILHO, M. *Demanda epistemológica no ensino de física*. 2011. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro. 2011.

AUSUBEL, D. P; NOVAK, J. D.; HANESIAN, H. *Psicologia educacional*. Rio de Janeiro: Interamericana, 1980.

BLOSSER, P. E. Materiais em pesquisa de ensino de física: O papel do laboratório no ensino de ciências. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, Florianópolis, v. 5, n. 2, p. 74–78, 1988.

BORGES, A. T. Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 19, n. 3, p. 291-313, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. *Base Nacional Comum Curricular*. Brasília, DF. 2018. Disponível em: http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518-versaofinal_site.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021.

BRASIL. *PCN+ Ensino Médio*. Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais: ciências da natureza, matemática e suas tecnologias. Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 2002.

BRAZ, D. H. O.; AGOSTINI, D. L. S. Práticas de Laboratório: Uma Estratégia para o Ensino de Física. *Colloquium Exactarum*, v. 9, n. 4, p. 63–71, 2017.

BROCKINGTON, G.; PIETROCOLA, M. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 387-404, 2005.

CASTIBLANCO, O. L.; NARDI, R. *Didática da Física*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2014.

CHEVALLARD, Y. *La Transposición Didáctica: Del Saber Sabio al Saber Enseñado*. Buenos Aires: Aique. 1991.

CHEVALLARD, Y. *La Transposición Didactique*. Tradução: Claudia Gilman. 3 ed. Buenos Aires: Aique Grupo Editor, 2009.

Darroz, L. M. et al. Demonstrações experimentais de óptica geométrica: apresentação de equipamentos construídos com materiais alternativos. *V Encontro Estadual de Ensino de Física - RS*, Porto Alegre, 2013. Disponível em: http://www.if.ufrgs.br/mpef/5eeefis/V_EEEFis-RS/resumos.pdf. Acesso em: 22/01/2017.

DARROZ, L. M.; ROSA, C. T. W. da; ROSA, A. B. Experimentos simples para visualização dos fenômenos de difração e interferência da luz. *Revista Thema*, v. 13, n. 2, p. 18-26, 2016.

HALLIDAY, D. RESNICK, R. WALKER, J. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*. 10 Ed. v.3, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2021.

HODSON, D. Experiments in science and science teaching. *Educational Philosophy and Theory*, v. 20, n. 2, p. 53-66, 1988.

JOHSUA, S.; DUPIN J. J. *Représentations et modélisations: le "débat scientifique" dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne: Peter Lang, 1989.

LIMA de, D. B.; GARCIA, R. N. Uma investigação sobre a importância das aulas práticas de Biologia no Ensino Médio. *Cadernos de Aplicação*, v. 24, n. 1, p. 201-224, 2011.

MARTINAND, J. L. *Rapport de la recherche "Modélisation"*. Paris: INRP, 1996.

PEREIRA, J. E.; LIMA, J. R. de; GALLÃO, M. I. Aulas práticas de Biologia em uma escola pública do Ensino Médio no estado do Ceará: Um Estudo de Caso. *Revista de Ensino de Biologia da SBENBIO*, n. 7, p. 75-85. 2014.

ROSA, C. T. W. et al. Atividade experimental para demonstração dos fenômenos da reflexão, refração e reflexão total. *Rencima*. v. 4, n. 1, 2013.

SANTANA, S. L. C. S.; PESSANO, E. F. C.; ESCOTO, D. F.; PEREIRA, G. C.; GULARTE, C. A. O.; FOLMER, V. O Ensino de Ciências e os Laboratórios Escolares no Ensino Fundamental. *Vittalle*, v. 31, n. 1, p. 15-26. 2019.

SÉRÉ, M. G.; COELHO, S. M.; NUNES, A. D. O papel da experimentação no ensino da Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 20, n. 1, 2003.

SILVA JR., A. C.; SILVA L. L. A Transposição Didática do Fenômeno da Radioatividade em Manuais Escolares de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 39, n. 1, p. 259-287, 2022.

SIQUEIRA, M. R. P.; PIETROCOLA, M. *Do visível ao indivisível: Uma proposta de Física de Partículas Elementares para o Ensino Médio*. 2006. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

THOMAZ, M. F. A experimentação e a formação de professores de ciências: uma reflexão. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, v. 17, n. 3, p. 360–369, 2000.

VAZ, E. L. S.; ACCIARI, H. A.; ASSIS, A.; CODARO, E. N. Uma experiência didática sobre viscosidade e densidade. *Química Nova na Escola*, v. 34, n. 3, p. 155-158, 2012.

VERRET, M. *Le Temps des Études*. 2 tomes. *Thèse présentée devant l'Université de Paris*. Paris: Champion. 1975. 837 pp.



O uso do *arduino* em uma abordagem significativa envolvendo o comportamento dual da luz em experimentos para o ensino médio.

The use of *arduino* in a meaningful approach involving the dual behavior of light in experiments for high school.

JAILSON F. LIMA^{1,2}, SILVÂNIA A. CARVALHO^{*2,3}

¹Colégio Estadual Professor Ney Cidade Palmeiro

²Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal Fluminense

³Escola de Engenharia Industrial Metalúrgica de Volta Redonda, Universidade Federal Fluminense

Resumo

Neste trabalho empregamos um experimento controlado pelo *arduino* na abordagem de tópicos de Física Moderna e Contemporânea, como o comportamento ondulatório e corpuscular da luz, por meio de práticas experimentais envolvendo os fenômenos de polarização da luz e efeito fotoelétrico. Tomando como base conceitos de Aprendizagem Significativa, introduzimos o assunto através de mapas conceituais que auxiliaram na identificação dos subsunçores, empregamos atividades baseadas em Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) com o simulador PhET - Simulações Interativas e o Physics at School Lite para discutir os tópicos, montamos sistemas experimentais com circuitos e, por fim, controlamos os experimentos pelo *smartphone* com o intuito de enriquecer o trabalho através da aquisição de dados quantitativos. Os resultados superaram os objetivos iniciais como ilustrado através das análises dos questionários, concluindo que os estudantes apresentaram uma excelente receptividade aos experimentos realizados, bem como indicaram as ocorrências de diferenciação progressiva e reconciliação integrativa, conceitos inerentes à Teoria da Aprendizagem Significativa.

Palavras-chave: Aprendizagem significativa. Física moderna e contemporânea. TDICs. Experimentação. *Arduino*.

Abstract

In this work we employ an *arduino*-controlled experiment to address Modern and Contemporary Physics, such as the wave and corpuscular behavior of light, by means of experimental practices involving the phenomena of light polarization and photoelectric effect. Based on Meaningful

*silvaniaalves@id.uff.br

Learning concepts, we introduce the subject through of concept maps that helped in the identification of subsumers, we used activities based on Digital Information and Communication Technologies (TDIC) with the PhET simulator - Interactive Simulations and Physics at School Lite to discuss the topics, we set up experimental systems with circuits and, finally, we control the experiments by smartphone in order to enrich the work through the acquisition of quantitative data. The results exceeded the initial objectives as illustrated by the analysis of the questionnaires, concluding that the students showed an excellent receptivity to the experiments carried out, as well as the occurrences of progressive differentiation and integrative reconciliation, concepts inherent to the Theory of Meaningful Learning.

Keywords: *Meaningful learning. Modern and contemporary physics. TDICs Experimentation. Arduino.*

I. INTRODUÇÃO

A proposta do Currículo Mínimo (CM) para o ensino médio na rede estadual do Rio de Janeiro (SEEDUC - SECRETARIA DE ESTADO DE EDUCAÇÃO) passou a apresentar, dentre os conteúdos de Física, abordagens de Física Moderna e Contemporânea (FMC) nas três séries desse nível (SEEDUC, 2012). Entretanto, os principais impecilhos encontrados para essa implementação, por parte dos professores dessa disciplina, situam-se na baixa disponibilidade de materiais didáticos e pouca oferta de insumos para aulas experimentais. Quando abordamos a questão da realização de atividades experimentais em sala de aula, podemos recordar temas relacionados tais como: excelência na aprendizagem e limitações estruturais das instituições de ensino. Com a Física isso não é diferente, uma vez que estes aspectos pesam no momento de propor uma metodologia eficiente aos professores para que uma proposta experimental seja aplicada. Para que haja plenitude na implantação de atividades práticas, devemos refletir sobre algumas questões (RAMOS, 2018). Em função disso, o ensino de Física torna-se cada vez mais dependente, numa realidade atualizada e praticamente irreversível, das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC). No que diz respeito à adoção de atividades experimentais no ambiente escolar, adaptado ou não para a realização de experimentos científicos seja por mera observação conceitual, seja com o objetivo da obtenção de dados experimentais, é imperativo que a atualização dos métodos de aprendizagem da disciplina passem a estabelecer uma nova realidade. No referente ao ensino da Física moderna e contemporânea (FMC) torna-se praticamente imprescindível o uso de meios eletrônicos e digitais nas práticas experimentais. A denominada cultura *maker*, onde a autonomia do estudante nas atividades práticas torna-se mais intensa, fluindo de projetos experimentais de redescoberta para os de investigação, está presente em várias propostas de ensino de ciências em escolas públicas e privadas no Brasil. O acesso à linguagens de programação e a fundamentos de automação e robótica auxiliam não só a compreensão dos fenômenos físicos abordados como também inserem os estudantes em um ambiente de alta tecnologia, que fortalece significativamente a obtenção do conhecimento científico. Motivados em aperfeiçoar nossas aulas para atender à demanda de inserir conceitos de FMC propostos no CM da rede estadual de ensino do estado do Rio de Janeiro, nossa proposta de trabalho de pesquisa tomou como base desenvolver uma sequência

didática com culminância em uma atividade experimental que faz uso da tecnologia *arduino* para obtenção de dados experimentais quantitativos. Através da utilização dessa tecnologia podemos realizar experimentos com enfoque em FMC e associar os resultados previstos em uma sequência didática, para nós inspirada na proposta da Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), onde os alunos são apresentados a um conjunto de recursos didáticos (AUSUBEL, 1993) que constituem um Material Potencialmente Significativo (MPS).

Metodologicamente, essa atividade experimental é precedida por um conjunto de procedimentos onde o cognitivo dos alunos é submetido à inserção de novas informações ao mesmo tempo que seus conhecimentos prévios; os *subsunçores*, são colhidos e analisados mediante o uso de mapas conceituais e aplicação de um pré-teste (MOREIRA; MASINI, 2006). Aliada a essa proposta, a atividade experimental inicialmente é apresentada de modo "prático" ou no estilo "maker", ou seja, a sequência didática propõe aos estudantes os experimentos com uma abordagem inicialmente *qualitativa*, onde as observações do fenômeno da polarização linear da luz, bem como do efeito fotoelétrico e do comportamento dual da luz são verificados através de fotos e/ou filmagens. Uma vez que o experimento é plenamente executado e analisado, são apresentados os kits automatizados com *arduino*, que mediante a uma programação executada através de *smartphones*, repetem os experimentos com obtenção de dados via monitor serial do IDE (ambiente de desenvolvimento integrado). A sequência didática é concluída com base nos dados obtidos, onde tais resultados são utilizados com intuito de encontrarmos indícios de uma aprendizagem significativa.

Os dispositivos automatizados com *arduino* foram concebidos com base na montagem dos experimentos, onde elementos passivos e sensores integram-se em circuitos elétricos montados pelos alunos, de acordo com a orientação de um roteiro. A versão atual da sequência didática é parte integrante de um produto educacional gerado por meio de uma dissertação de mestrado (LIMA, 2020), que teve sua aplicação realizada no mês de novembro de 2019 no Colégio Estadual Professor Ney Cidade Palmeiro, em turmas da 3ª série do ensino médio. Os principais resultados previstos pela TAS foram alcançados, uma vez que a Diferenciação Progressiva e a Reconciliação Integrativa foram verificadas através dos questionários avaliativos preenchidos pelos alunos após as atividades.

Para darmos continuidade a discussão, apresentamos a seção II que versa sobre a fundamentação teórica, a qual tem como objetivo fornecer ao leitor os conceitos de Física necessários à compreensão dos assuntos abordados ao longo do texto. Na sequência, discutimos de maneira direta e sucinta as teorias de aprendizagem e propostas didáticas aplicadas no desenvolvimento do trabalho. Neste ponto, introduzimos a seção III que descreve a inspiração que deu origem à pesquisa, as dificuldades encontradas, a coleta de informações, o desenvolvimento do produto educacional e os momentos de aplicação do produto educacional. Um vez que descrevemos as atividades realizadas, resumimos na seção IV não só os resultados obtidos a partir das respostas dos alunos aos questionários mas também os resultados de testes realizados para justificar a importância da pesquisa e a inferência das teorias e meios empregados ao longo dos momentos de sua aplicação. Por fim, resumimos de modo objetivo se a finalidade da proposta do trabalho foi alcançada, mencionamos os pontos de melhoria que foram necessários e apresentamos as perspectivas futuras do trabalho.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para que nosso trabalho tivesse o suficiente suporte teórico e abordasse adequadamente a proposta mencionada na introdução, apresentamos o embasamento teórico usado nas próximas seções.

II.1. Fundamentos de Física Moderna e Contemporânea

Nesta seção, introduzimos tópicos como o de óptica geométrica, bem como discutimos os conceitos de eletromagnetismo que definem a natureza ondulatória da luz. Em seguida, tratamos dos fenômenos ondulatórios enfatizando a luz como radiação eletromagnética, dispensando atenção especial à polarização das ondas luminosas. Na sequência, introduzimos o tópico da teoria quântica destacando o efeito fotoelétrico e discutindo o tópico de dualidade partícula-onda e dos dispositivos eletrônicos fotossensíveis ativos e passivos.

A aplicação da óptica geométrica simplifica os cálculos devido ao princípio da propagação em linha reta da luz em meios homogêneos e isotrópicos, como o são o ar e a água. Essa proposição tomaria ênfase nos estudos de Isaac Newton (1642-1727), publicados em sua obra *Óptica* de 1704, onde os preceitos da teoria corpuscular da luz tinham como base a propagação luminosa retilínea por intermédio de corpúsculos luminosos, que tornavam possíveis de explicação os fenômenos luminosos da reflexão, refração e dispersão luminosas. Para um melhor entendimento das leis da reflexão e da refração, lançamos mão do princípio estabelecido por Pierre de Fermat (1607-1665), que aplicado em óptica é um princípio do tipo extremo e estabelece que a trajetória percorrida pelos raios de luz ao se propagar de um ponto a outro é tal que o tempo gasto em percorrê-la é o mínimo possível (RODITI, 2005). Aplicando o princípio de Fermat aos feixes refletido e refratado entre dois meios com índice de refração n_1 e n_2 , chegamos a:

$$\alpha = \alpha' , \quad (1)$$

que é a lei de reflexão, com α sendo o ângulo de incidência e α' o ângulo de reflexão. E temos ainda a lei de refração, ou lei de Snell, dada por:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \alpha'' , \quad (2)$$

onde α'' é o ângulo de refração da luz no meio com índice de refração n_2 .

James Clerk Maxwell (1838-1876) nos trouxe como grande contribuição, através da formalização das equações de Maxwell, a indicação que o estudo da luz, comumente chamada de Óptica Física, mostra-se como um ramo do Eletromagnetismo. As quatro equações de Maxwell na forma diferencial, tendo o vácuo como meio de propagação, estão apresentadas pela Tabela 1 (NUSSENZVEIG, 2002).

Nesta tabela, $\vec{E}$ e $\vec{B}$ representam os campos elétricos e magnéticos e ϵ_0 e μ_0 são a permissividade elétrica e a permeabilidade magnética no vácuo, respectivamente. A partir de manipulações algébricas nas equações de Maxwell, Tabela 1, chegamos a equação de

Tabela 1: Ilustração das quatro equações de Maxwell no vácuo em sua forma diferencial.

Leis	Forma diferencial
Lei de Gauss para a eletricidade	$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = 0$
Lei de Gauss para o magnetismo	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
Lei de Faraday	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$
Lei de Ampère-Maxwell	$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$

onda no vácuo para um vetor campo elétrico $\vec{E}(x, y, z, t)$ de acordo com a Lei de Faraday

$$\nabla^2 \vec{E}(x, y, z, t) - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0, \quad (3)$$

e a equação de onda para um campo magnético $\vec{B}(x, y, z, t)$, de acordo com a Lei de Ampère-Maxwell, dada por

$$\nabla^2 \vec{B}(x, y, z, t) - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{B}(x, y, z, t)}{\partial t^2} = 0. \quad (4)$$

Em uma dimensão, a solução da equação de onda para os campos elétrico e magnético assume a forma:

$$\vec{E}(x, t) = E_0 e^{i(\kappa x - \omega t)} \hat{j}, \quad (5)$$

e

$$\vec{B}(x, t) = B_0 e^{i(\kappa x - \omega t)} \hat{k}. \quad (6)$$

onde as amplitudes (E_0 e B_0) estão relacionadas à intensidade da onda, que determina a energia que está sendo transportada.

Como apresentado anteriormente, a luz é uma onda eletromagnética. Entretanto, mediante alguns aspectos, também pode manifestar propriedades de matéria. Essa proposta foi feita por Newton no século XVIII, através de sua teoria corpuscular. Entretanto, esses conceitos encontraram oposição na teoria ondulatória da luz, proposta por Christiaan Huygens (1629-1695), que justificava-se no princípio das frentes de onda e conseguia explicar os fenômenos luminosos da difração, interferência e polarização, algo que a teoria de Newton não logrou êxito. Anos mais tarde, a teoria ondulatória prevaleceu sobre a teoria corpuscular, através de experimentos realizados (BARTHEM, 2005), de maneira independente, por

Thomas Young (1773-1829), Joseph Von Fraunhofer (1787-1826) e Augustin Jean Fresnel (1788-1827), convergindo para sua aceitação. A teoria ondulatória permaneceria plenamente aceita com o advento do eletromagnetismo, porém a natureza corpuscular da luz teria uma nova chance com o surgimento da física quântica.

No que se refere ainda ao comportamento ondulatório, as ondas transversais polarizadas surgem a partir de ondas não polarizadas por fenômenos de absorção, espalhamento, reflexão e birrefringência (HALLIDAY; RESNICK, 1993a; HALLIDAY; RESNICK, 1993b). Para que apenas a parte que se propaga em determinada direção seja observada, os outros feixes não desejáveis devem ser absorvidos, desviados ou refletidos por algum corpo. Existem diversos materiais que, ao serem atingidos pelos feixes de luz, deixam passar apenas uma parte da onda luminosa. Esses são conhecidos como polaróides.

Como estamos interessados nas amplitudes que são valores reais dos campos elétrico e magnético, tomamos a parte real das Eqs. (5) e (6), que leva a:

$$\vec{E}(x,t) = E_0 \cos(\kappa x - \omega t) \hat{j} , \quad (7)$$

e

$$\vec{B}(x,t) = B_0 \cos(\kappa x - \omega t) \hat{k} . \quad (8)$$

Quando analisamos a luz a partir das equações (7) e (8), as amplitudes E_0 e B_0 são as intensidades de vetores reais e constantes e a direção do campo elétrico não se altera com o tempo, ocorrendo apenas variações em sua intensidade. Neste contexto, $\vec{E}$ descreve o campo elétrico em um ponto do espaço como uma função do tempo, sendo a onda luminosa linearmente polarizada (NUSSENZVEIG, 2002). Quando a luz natural incide sobre um cristal polarizador, ele efetua a separação dos feixes luminosos, de modo que os feixes oscilando paralelamente ao seu eixo são transmitidos, enquanto que os feixes que oscilam perpendicularmente são absorvidos. O cientista Étienne-Louis Malus (1775-1812) (RODITI, 2005) enunciou a relação que descreve a razão entre as intensidades de entrada e saída da luz durante sua passagem por um analisador como

$$I = I_0 \cos^2 \theta , \quad (9)$$

com I sendo a intensidade da luz emergente enquanto que a medida I_0 corresponde à intensidade da luz incidente.

Por outro lado, no formalismo de comportamento corpuscular, foi possível observar teorias que auxiliaram no entendimento deste formalismo. Max Planck (1858-1947) mediante um artifício puramente matemático e valendo-se de conceitos clássicos, afirmou que as radiações eletromagnéticas incidentes no interior da cavidade de um corpo negro faziam vibrar os elétrons como se cada um destes fosse um oscilador harmônico simples, onde essas radiações mostram-se com a mesma frequência de vibração. Para obter acordo com a experiência, ele descobriu que podia obter uma função empírica que permitiria calcular a energia média E emitida ou absorvida supondo-a não uma variável contínua, mas "quantizada" em relação a um oscilador de frequência ν e dependente de múltiplos inteiros

de um “*quantum de energia*”, a qual era expressa como

$$E = nh\nu , \quad (10)$$

onde $n = 1, 2, 3, \dots$, ν é a frequência da radiação eletromagnética e h é a constante de Planck cujo valor é $h = 6,63 \times 10^{-34}$ J.s ou $h = 4,14 \times 10^{-19}$ eV.s. A energia radiante fluía na forma de pequenos pacotes, os fótons, e foi descoberto que a energia de movimento de um fóton era proporcional à frequência da radiação. Neste contexto, o efeito fotoelétrico foi investigado. Este fenômeno consiste na liberação de elétrons da superfície de um material metálico após a absorção da energia proveniente de uma radiação eletromagnética incidente sobre ele, de tal modo que a energia total dessa radiação é parcialmente transformada em energia de movimento dos elétrons expelidos desse material.

A partir dos estudos da época, foi possível perceber que a corrente elétrica dependia da frequência da radiação incidente no material metálico e não de sua intensidade, o que indicava observações que não podiam ser explicadas pela teoria clássica. Com isso, ao estudar esse mesmo efeito, Albert Einstein recorreu à teoria corpuscular da luz e aos estudos de Planck, formulando postulados que evidenciavam como agente responsável pela ejeção de cada elétron um único fóton; uma partícula de luz que transferia ao elétron toda a sua energia, ejetando-o do material, desde que sua frequência fosse grande o suficiente para vencer a energia de ligação desse elétron com o átomo do metal. Quando a energia $E = h\nu$ de um desses fótons e uma medida ϕ (conhecida como *função trabalho* do metal; sendo esta uma característica que corresponde à quantidade de energia necessária para ejetar fotoelétrons do material) eram relacionadas de acordo com a Lei da Conservação de Energia, chegava-se a relação

$$K_{max} + \phi = h\nu , \quad (11)$$

onde K_{max} corresponde ao valor máximo da energia de movimento dos *fotoelétrons*. Ficava assim definida a *equação do efeito fotoelétrico*

$$K_{max} = eV_C = h\nu - \phi . \quad (12)$$

Como h e e são constantes universais, como vemos na equação (12), vemos que V_C é uma função de 1º grau da frequência ν da radiação luminosa que incide no material metálico (TIPLER; LLEWELLYN, 2014). Os conceitos de polarização da luz e efeito fotoelétrico foram discutidos com os alunos ao longo da realização dos experimentos para que os alunos pudessem identificar estes fenômenos através das medidas experimentais. Sistemas eletrônicos baseados em sensores semicondutores fotoresistivos (*LDR*) e fotovoltaicos (*LED* e *fotodiodos*), bem como as fotocélulas vieram para resolver questões tecnológicas do século XX. Os sistemas de iluminação pública e a conversão de luz solar em energia elétrica, por exemplo, são algumas dessas aplicações tecnológicas. O produto educacional derivado desse trabalho de dissertação demonstrou algumas aplicações desses elementos semicondutores.

II.2. Teorias de Aprendizagem

Nesta seção, trataremos de maneira breve e sucinta, as teorias de aprendizagem que dão suporte pedagógico ao desenvolvimento de nosso trabalho. Com o intuito de desenvolver um material potencialmente significativo, inicialmente versaremos sobre a Teoria da Aprendizagem Significativa (TAS), que é a principal fonte de conceitos inspiradores de nossa sequência didática, como também trataremos da Aprendizagem Baseada em Projetos (ABP), uma vertente inovadora de ensino que reforça nossa abordagem. Para complementar nossa metodologia de trabalho, descrevemos o uso específico das Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) de acordo com as necessidades de nossa pesquisa, bem como a utilização de microcontroladores *arduino* com o objetivo de aprimorar a análise quantitativa das atividades experimentais do produto educacional.

- Aprendizagem significativa

No que se refere à TAS, Ausubel dizia que, quanto mais sabemos, mais aprendemos. Para que tenhamos isso em mente, a TAS baseia-se na proposta afirmativa que o ato de aprender é muito mais que uma absorção mecânica ou uma execução de comandos (MOREIRA; MASINI, 2006). A utilização de expressões e conteúdos relacionados a essa teoria foram de extrema relevância para nossa pesquisa. Ausubel idealizou que, a todo momento, o aprendiz deverá assumir a posição de protagonista do processo de aprendizagem. Cada indivíduo, conscientemente, traz consigo conhecimentos anteriores sobre diversos saberes. O cotidiano do aluno é a base fundamental para a assimilação desses conceitos, sendo este mais ou menos intenso na construção cognitiva de cada um. Atribui-se ao termo *formação de conceitos* o processo que ocorre na infância do educando, onde através de sua experiência de vida, ocorre a fundamentação desses elementos determinantes. O fato de uma criança associar o fogo e o gelo com o a sensação de quente e frio é um exemplo simples desse prenúncio (AUSUBEL, 2003). Entretanto, a *aprendizagem significativa* ocorre plenamente quando o aprendiz passa a ter a capacidade de receber informações novas e, racionalmente, torna-se capaz de fazê-las interagir com seus conhecimentos prévios. Segundo Ausubel, os *subsunçores* ou *âncoras* nada mais são que as informações já estabilizadas na formação do conhecimento de cada indivíduo. Superado o período pré-escolar do educando, a formação de conceitos é substituída pela assimilação de conceitos, ou seja, uma vez que já existe uma base de compreensão, essa permite às pessoas contrair novos saberes, conhecer novos elementos e discernir entre um ou outro conteúdo. Elas tornam-se capazes de receber novas informações e identificá-las. Ocorre então a proposta do uso dos denominados organizadores prévios, que são estruturas introdutórias de conteúdo, capazes de interligar os conhecimentos prévios com as novas informações apresentadas ao aluno, criando um espaço específico para a compreensão dos conceitos. A TAS prevê a adoção de um dispositivo denominado material potencialmente significativo (MPS), capaz de dar ao aprendiz a relevância concreta do conteúdo abordado, reter sua atenção e fomentar nesse a pré-disposição em aprender, associado a uma estrutura cognitiva preexistente, sem que haja comprometimento no protagonismo do educando.

O conhecimento prévio nunca mais retornará a forma anterior, o que se chama de *assimilação obliteradora*, tornando-se amplo e completo, entretanto anulando algumas partes específicas do todo. A assimilação obliteradora é parte do processo de aprendizagem significativa, ou seja, Ausubel traz a proposta de que ideias mais gerais e inclusivas de

uma matéria sejam logo apresentadas, aprofundando-as em seguida. É o que se chama de *diferenciação progressiva*. Seguindo o processo, a *reconciliação integrativa* indica a necessidade de trazer ao aprendiz através do MPS, elementos que o incentivem a pensar, explorando significados e buscando similaridades e diferenças (MOREIRA, 2012).

Desde a infância, o ser humano classifica os conhecimentos que assimila através de experiências do cotidiano. Os conceitos assumem aspectos denotativos e conotativos. Como proposto por Ausubel, os significados desses conceitos assumem a forma de um *significado fenomenológico*, quando são levados em consideração os aspectos particulares do indivíduo que os formaram. A importância do professor é preponderante em criar mecanismos que organizem melhor a forma de ensinar, dando apoio ao aprendiz na exploração de seus conhecimentos e a maneira mais adequada para assimilá-los (MOREIRA; MASINI, 2006). Uma organização sequencial permite tirar proveito da interdependência dos conteúdos abordados de uma disciplina, de modo que alguns desses conceitos mais abrangentes sejam capazes de auxiliar na assimilação dos demais. Com isso, a inserção dos *mapas conceituais* (MC) surge como uma proposta para expor conceitos, a partir daquele mais abrangente, interligando-o com os menos abrangentes, até que sejam atingidos os conteúdos mais singulares.

Dessa maneira, o professor deve ter o objetivo de organizar as ideias de forma que após sua explicação, o mapa conceitual não se torne um objeto a ser memorizado, mas um instrumento para o aprendizado. O aprendiz deve assumir papel ativo e raciocinar para alcançar o conhecimento. A retenção das informações é fundamental para o sucesso da aplicação do método. Tomaremos contato com indícios das aplicações da TAS ao longo deste trabalho através do uso de mapas conceituais e de perguntas motivadoras.

• TDIC

Nos dias atuais, é possível perceber que a comunicação em tempo real é amplamente dominada pelos jovens em idade escolar e que pensar no mundo atual sem estar globalmente conectado através da grande rede de computadores é algo improvável. Em nosso país, o uso de tecnologias de *tablets* e *smartphones* como instrumentos de aquisição de conhecimento está constituindo-se em um ramo de investigação para o desenvolvimento da educação básica (BAIRRAL, 2017) e passam a fazer parte da realidade escolar, em ritmo acelerado. A aquisição e manuseio desses equipamentos em detrimento aos computadores pessoais, nem sempre disponíveis, viabilizam sua aplicação em sala de aula, onde o professor assume o papel de sugerir e orientar o emprego dessas tecnologias como real fator para o ganho pedagógico, e não como simples instrumento de entretenimento.

Dessa forma, a familiaridade com esses dispositivos deve ser reforçada como um novo paradigma de abordagem educacional. Os aplicativos digitais são capazes de estabelecer a interface entre a aprendizagem tradicional e as novas tecnologias. Com isso, entra em questão o conceito de letramento digital. Nessa proposta, o indivíduo deve ser capaz de ler, interpretar e conduzir as informações e os dados constantes na tela tal como em um material impresso, tornando-se protagonista do gerenciamento desses conteúdos, tal como é feito na simples utilização dos dispositivos por puro entretenimento. No que se refere às TDIC, o fator preponderante não é a tecnologia em si, mas a acessibilidade a ela (JORENTE, 2012). Com isso cabe aos gestores e docentes, serem os facilitadores dessas tecnologias através

do fomento ao letramento digital dos discentes, com o objetivo de que todo o processo de ensino e aprendizagem possa usufruir dessa realidade.

- A automatização como recurso experimental

Quando é abordada a questão de experimentos de Física em sala de aula, podemos recordar temas relacionados tais como excelência na aprendizagem, limitações estruturais e conhecimento do método científico por parte dos alunos. Estes aspectos pesam no momento de propor uma metodologia eficiente aos professores para que uma proposta experimental seja aplicada. Para que haja plenitude na implantação de atividades práticas, devemos refletir sobre algumas questões:

O primeiro passo para a implementação de tais atividades em sala de aula, é analisar tal metodologia em suas várias faces e definir o que queremos com ela: “*como será implementada?*”, “*com quais objetivos?*” e “*em qual espaço físico?*”. Como isso normalmente não é feito, tudo carece de um modo de potencializar seu uso e de entendê-la em sua plenitude. Esta tarefa não é simples, tendo em vista a complexidade das interações entre os sujeitos (professor e estudantes), o conhecimento e a sociedade em sala de aula. Por este motivo, se torna bastante complexo definir os limites, muitas vezes difusos, entre as facetas da experimentação.

No que se refere à adoção de atividades experimentais no ambiente escolar, adaptado ou não para a realização de experimentos científicos, seja por mera observação conceitual, seja com o objetivo da obtenção de dados experimentais, é imperativo que a atualização dos métodos de aprendizagem da disciplina passem a estabelecer uma nova realidade. No referente ao ensino da FMC torna-se praticamente imprescindível o uso de meios eletrônicos e digitais para as práticas experimentais a serem implementadas (CAVALCANTE; BENEDETTO, 1999). A cultura *maker* está presente em várias propostas de ensino de ciências nas redes de escolas públicas e privadas no Brasil. O acesso às linguagens de programação e a fundamentos de robótica auxiliam não só na compreensão dos fenômenos físicos abordados em nossa disciplina, como também inserem os estudantes em um ambiente de alta tecnologia, que fortalece significativamente a obtenção do conhecimento científico (CAVALCANTE M. A.; TAVOLARO; MOLISANI, 2011). Nossa proposta de trabalho de pesquisa toma como base para obtenção de dados experimentais a tecnologia *arduino*. Mesmo não sendo de informação recente e já amplamente difundida numa vertente inovadora de aprendizagem; na cultura *maker* (CARVALHO, A. B. G.; BLEY, 2018), os dispositivos *arduino* são de relativa facilidade de obtenção e de custo razoável. Através da utilização dessa tecnologia pode-se, com excelente aproveitamento, realizar atividades práticas com enfoque em FMC e associar esses resultados previstos em uma sequência didática inspirada parcial ou totalmente nas TAS e ABP, posto que a experimentação obedece a critérios inerentes a essas teorias.

- A experimentação como elemento fundamental

Já foram tentadas várias teorias e tecnologias educacionais para a melhoria do ensino de Física através da experimentação, desde o *Método da Redescoberta*, passando pelos trabalhos de Jean Piaget e Lev Vigotski (GASPAR, 2003) e chegando aos processos orientados pelas TAS e ABP. Em nossa pesquisa, procurando absorver as peculiaridades desses elementos do

processo ensino-aprendizagem de ciências, as atividades experimentais figuraram como algo fundamental uma vez que toda a orientação desse trabalho não poderia prescindir dessa temática. Porém, as dificuldades estruturais e a carência de materiais científicos capazes de dar suporte à aprendizagem dos conceitos de Física e principalmente de FMC, trazem-nos à luz do desafio de ensinar com significância, o que podemos perceber através da seguinte citação (GASPAR, 2003):

Embora as atividades experimentais sejam uma necessidade incontestável para todo professor da área de ciências, sua utilização ainda é inexpressiva no ensino fundamental e raríssima no ensino médio; quando aplicadas, os procedimentos quase sempre são tradicionais.

Através dessa percepção, procuramos dentro da realidade discente e dos recursos disponíveis, atender à exigência de ensinar os fenômenos científicos sem abrir mão das práticas experimentais que os justifiquem. A viabilidade dessas atividades deve buscar transpor os empecilhos estruturais que, em nosso caso, teve como norte elementos de ABP, que é um método de aprendizagem em que os estudantes se deparam inicialmente com um problema, o qual é sucedido por uma investigação em um processo de ensino e aprendizagem que seja centrado no próprio aluno (ANTÔNIO; CALEFI, 2013). Mesmo que esta instituição de ensino contasse com um laboratório científico, na maioria das vezes não havia disponibilidade de equipamentos capazes de suprir a carência técnica e pedagógica, sendo necessário aplicar recursos de mídia disponibilizados pelas TDIC, como também reaproveitar equipamentos descartados, retirando de aparelhos mecânicos e eletrônicos peças e dispositivos, que manuseados pelos alunos ganhavam a forma de experimentos de eletromagnetismo e física ondulatória. Ao fim da atividade, os estudantes respondiam questões propostas pelo professor autor, no formato de relatório experimental, o que não só funcionava como instrumento de avaliação bimestral, bem como formalizava um critério de desenvolvimento da pesquisa. Esses procedimentos solidificaram o ponto de culminância desse trabalho, que veio a tornar-se a sequência didática de nossa proposta experimental.

III. ARRANJO EXPERIMENTAL

Nesta seção, abordamos a confecção e aplicação do produto educacional, destacando a necessidade pedagógica.

III.1. Desenvolvimento do produto educacional

A atual geração de estudantes, principalmente àqueles oriundos da escola pública, convive diariamente com os mais diversos tipos de TDIC, porém sem tomar conhecimento dos processos que determinam suas operações e funcionamento. A ideia original da pesquisa versava no estudo de polarização de luz *laser* e seus efeitos, seguido da análise quantitativa da medida de intensidade da radiação polarizada, mediante o uso de um software específico, como proposto na referência (CAVALCANTE, 2005). Porém, com o intuito de tornar mais abrangente o escopo do produto educacional, uma vez que a temática do artigo restringia-se apenas a um fenômeno ondulatório, tomamos uma direção distinta e eficaz em atender à

pesquisa em todos os seus aspectos, sem deixar de aproveitar a ideia fundamental que era a experimentação de conteúdos de FMC. A princípio, formulou-se um conjunto de fatores para instituir o produto final, torná-los curiosos e através desse sentimento fazer com que eles assumissem o protagonismo da aprendizagem.

Inicialmente, mapas conceituais nortearam a discussão dos tópicos de FMC e auxiliaram na identificação de possíveis subsunçores, que puderam ser percebidos através das respostas das perguntas motivadora (pré-teste). Na sequência, o uso de TDIC através dos aplicativos *Physics at School Lite* e *PhET Interactive Simulations* auxiliaram no melhor entendimento de alguns pontos que ainda não estavam claros. Por fim, uma atividade experimental onde o aluno trava contato direto com *lasers*, filtros polarizadores e circuitos elétricos dotados de elementos passivos de eletrônica, concluem a atividade e possibilitam que os discentes possam na prática identificar os fenômenos até o momento discutidos. Vejamos agora os experimentos montados.

III.2. Descrição do experimento

A atividade experimental deveria ser ágil e incentivadora, além de dar acessibilidade a práticas experimentais de baixo investimento financeiro, porém com aproveitamento pedagógico eficaz, tendo como objetivo produzir um material potencialmente significativo voltado para o ensino de FMC. Buscamos então, o emprego de uma montagem experimental de fácil manuseio, combinando pré-requisitos conceituais de *eletromagnetismo* e *fenômenos ondulatórios*, associando-os com os conceitos do *efeito fotoelétrico* e o *comportamento dual da luz*. Para tal, os alunos de cada turma deveriam ser divididos em grupos heterogêneos que seguiram o roteiro da atividade. Inicialmente, eles obteriam imagens dos fenômenos observados com seus *smartphones*, para poder realizar uma análise *qualitativa* dos experimentos.

A montagem do experimento 1 tem como objetivo verificar a polarização da luz e consiste de um feixe de luz monocromática, proveniente de uma ponteira de *laser* e um conjunto polarizador (fig.1). O feixe irá incidir em um LDR (resistor dependente de luz) que irá facilitar a passagem de corrente elétrica contínua, acionando um circuito elétrico composto por um LDR, um LED e um resistor.

Já no segundo experimento, deverão incidir, dessa vez feixes de luz policromática e fontes *laser* de cores distintas sobre um fotodiodo (fig.2). Além desse elemento, irá compor o circuito simples um motor elétrico alimentado por corrente contínua. Será discutida a emissão de luz intensa, direcional e coerente sob a forma de fótons, tais que esses sejam capazes de transportar energia em maior ou menor quantidade, mediante as diferentes frequências luminosas, evidenciando o efeito fotoelétrico e a dualidade partícula-onda da luz.

Uma vez realizada essa atividade inicial, o experimento seria novamente realizado, dessa vez empregando uma montagem automatizada com *arduino*, onde ocorreria uma nova análise *quantitativa* dos mesmos fenômenos.

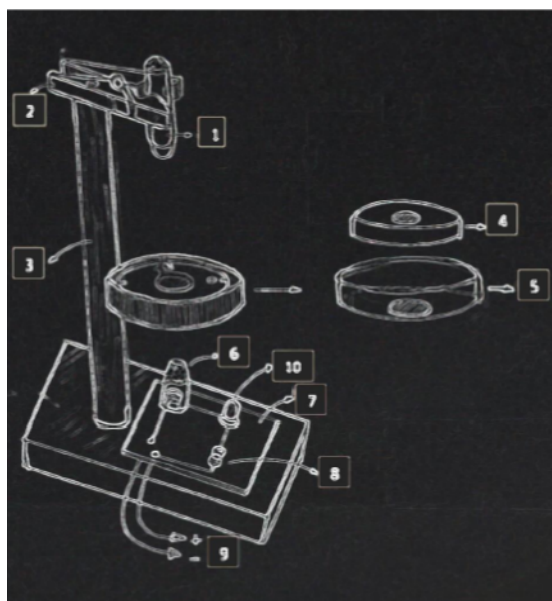


Figura 1: Imagem ilustrando o sistema experimental composto por: ponteira laser (1), pregador de roupas (2), haste de madeira (3), disco polarizador (4), disco analisador (5), LDR com cobertura plástica (tampa de caneta preta) (6), placa de isopor com 8cm × 8cm (7), resistor de 1kΩ (8), fonte de corrente AC/DC DE 5 V (9), LED de alto brilho (10) e fita adesiva (fonte: Autor).

III.3. Automatização do experimento

Com o emprego da tecnologia arduino, buscamos associação dessa com as TDIC que estão ao alcance dos alunos, onde além de podermos utilizá-las com o auxílio de computadores, pode-se executar o *sketch* (programa de carregamento) através de *smartphones* (MONK, 2014), onde os dados quantitativos dos experimentos poderão ser avaliados. Para isso, os alunos deverão possuir o aplicativo *arduinoandroid*, disponível em <https://www.arduinoandroid.info/p/introduction.html> previamente instalado em seu dispositivo, uma vez que esse fornece um IDE.

III.3.1 O experimento 1 automatizado

Com base na montagem do experimento 1, um dispositivo automatizado poderá ser construído com a adoção de uma placa de *arduino NANO*, onde será executado o esquema proposto com o conjunto de materiais: um *arduino NANO*, uma *protoboard*, três fios (*jumpers*), um resistor de 10 kΩ, um sensor de luz *LDR*, um cabo *USB – OTG* e a montagem do circuito sugerido (veja fig. 3).

III.3.2 O experimento 2 automatizado

Com base na montagem do experimento 2, um dispositivo automatizado deverá ser construído com a adoção de uma placa de *arduino NANO*, onde será montado o esquema do circuito com o conjunto de materiais: um *arduino NANO*, uma *protoboard*, três fios (*jumpers*), um motor *DC* de 3 V, um disco *encoder* de 20 furos, um fotodiodo, um sensor

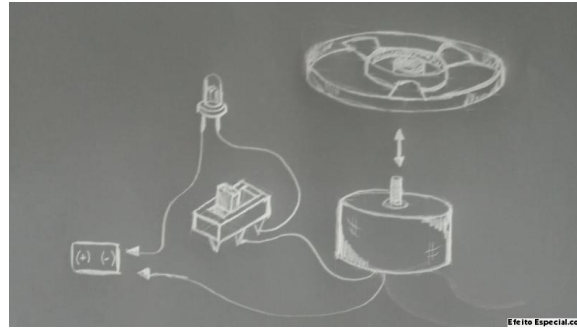


Figura 2: Imagem ilustrando o sistema experimental para ligar o motor com um motor de corrente contínua DC de 3 V, fotodiodo, fonte de energia AC/DC 5 V ou 6 V, chave interruptora liga/desliga e hélice de brinquedo (Fonte: autor).

encoder IR, uma bateria de 9 V com adaptador e um cabo OTG, veja fig.4. Detalhes da programação em arduino pode ser encontrada na referência (LIMA, 2020).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesse seção, apresentamos as análises preliminares dos sistemas experimentais, os resultados da análise das respostas atribuídas aos questionários após a realização das atividades experimentais, assim como a diferenciação entre os experimentos padrão e automatizado através de dados experimentais quantitativos.

IV.1. Avaliação das montagens experimentais

Durante o desenvolvimento dos dispositivos automatizados, nossa pesquisa deparou com um dilema: ao trocarmos as cores da luz laser de vermelho para verde e de verde para azul no experimento 2, esperávamos com o experimento que a incidência desses feixes no fotodiodo resultaria em um aumento do número de rotações do motor DC, em função da maior quantidade de energia transportada por intermédio das ondas luminosas (HEWITT, 2011). Entretanto, uma observação pertinente foi levantada: seria a intensidade luminosa a verdadeira responsável por uma maior ou menor velocidade angular do eixo do motor ou as diferentes frequências de luz? Surgiu com essa questão a necessidade de verificarmos experimentalmente essa questão. De posse de um medidor de potência e de uma montagem experimental semelhante à proposta na atividade, efetuamos comparações práticas entre as potências das luzes laser incidentes no fotodiodo versus as RPM obtidas no monitor serial gerado pelo *sketch* do *arduino*. Inicialmente, medimos as potências em miliwatt (mW) e o valor médio das RPM para os lasers verde e azul provenientes das ponteiras comerciais (Tabela 2). A Figura 5 mostra a relação entre as potências e o número de rotações do motor DC para ambos os lasers. É possível observar que o laser azul apresenta maiores valores de rotação, como esperávamos, pois temos um comprimento de onda λ menor e uma frequência ν maior, ou seja, maior energia associada ao fóton.

Na sequência repetiu-se o experimento para os lasers vermelho e verde (Tabela 3). Figura 6 mostra a relação entre as potências e o número de rotações do motor DC para este caso.

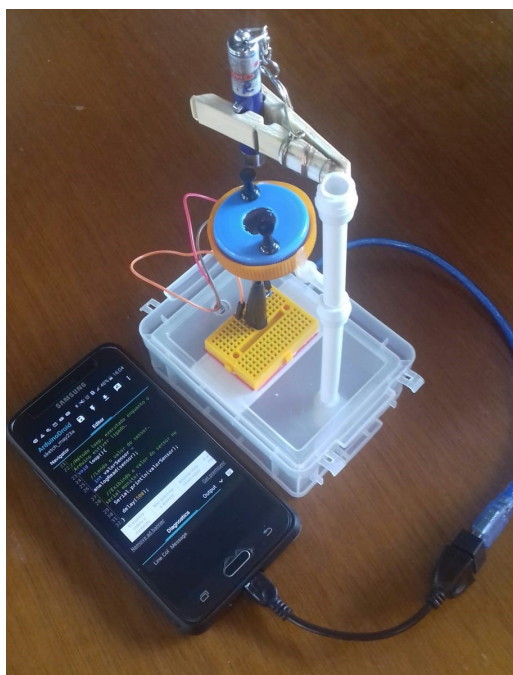


Figura 3: Imagem ilustrando o experimento 1 automatizado com arduino (<https://app.uff.br/riuff/handle/1/16233>).

Tabela 2: Comparação dos dados de potência versus rotação do motor DC (em rpm) para os lasers verde e azul (Fonte: autor).

Potência (mW)	rpm (verde)	rpm (azul)
1,2	585	608
1,3	583	706
1,4	693	731
1,5	749	756
1,6	761	766

É possível observar que o laser verde apresenta maiores valores de rotação, pois temos também um comprimento de onda λ menor e uma frequência ν maior, ou seja, maior energia associada ao fóton. Desta forma, concluímos que a energia das ondas luminosas poderia ser verificada quantitativamente através do experimento 2 automatizado.

IV.2. Análise quantitativa dos questionários

Neste ponto, discutimos os dados coletados ao longo dos dois momentos de aplicação do produto educacional, bem como suas particularidades e como procedemos para que estas não comprometessem, de um modo geral, a análise dos dados coletados.

A primeira aplicação do produto educacional teve orientação meramente qualitativa e foi realizada em duas turmas de 3º ano do ensino médio do Colégio Estadual Professor Ney Cidade Palmeiro, em novembro de 2018. Já a segunda aplicação que ocorreu na mesma unidade de ensino em novembro de 2019, contou com aquisição quantitativa de dados através do sistema automatizado com *arduino*, em duas turmas do 3º ano do ensino médio.



Figura 4: Imagem ilustrando o experimento 2 automatizado com arduino ([https : // app.uff.br/riuff/handle/1/16233](https://app.uff.br/riuff/handle/1/16233)).

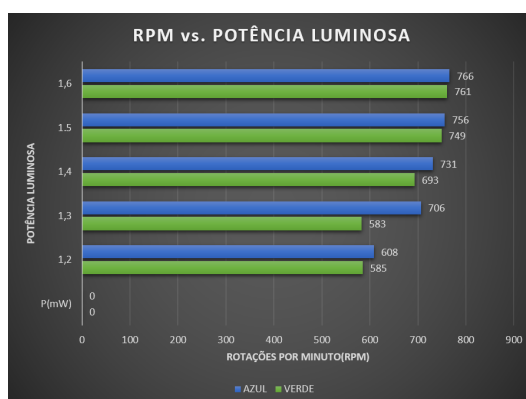


Figura 5: Diagrama de comparação dos dados da potência versus frequência das luzes azul e verde (Fonte: autor).

Para a análise das respostas dos alunos, foram estabelecidas 4 categorias de respostas: satisfatória (RS), parcialmente satisfatória (PS), insatisfatória (IN) e em branco (BR). Veremos esta categorização através de exemplos de respostas apresentadas na primeira aplicação, como segue:

- Categorização de uma pergunta motivadora

1ª pergunta motivadora: *Você já parou pra pensar qual a relação existente entre a dispersão luminosa e as cores que aparecem num arco-íris, em um Compact Disc (CD) e nas bolhas de sabão?*

Resposta satisfatória:

Quando o aluno respondeu que as três situações estão relacionadas com a ocorrência da dispersão luminosa, notabilizada através dos fenômenos luminosos de refração, difração e interferência.

Resposta parcialmente satisfatória:

Se o aluno disse apenas sim.

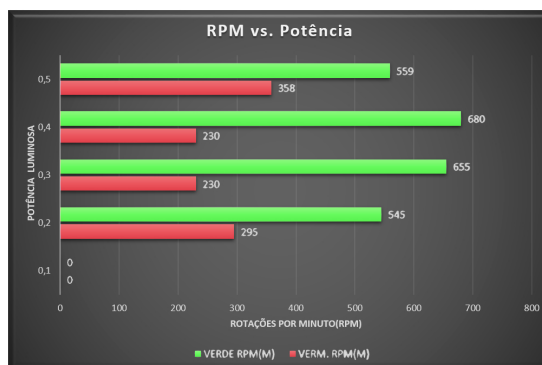


Figura 6: Diagrama de comparação dos dados da potência versus frequência das luzes verde e vermelha (Fonte: autor).

Tabela 3: Comparação dos dados de potência versus rotação do motor DC (em rpm) para os lasers vermelho e verde (Fonte: autor).

Potência (mW)	rpm (vermelho)	rpm (verde)
0,1	0	0
0,2	295	545
0,3	230	655
0,4	230	680
0,5	358	559

Resposta insatisfatória:

Se o aluno disse não.

Nesta etapa, discutimos os diagramas com os resultados da segunda aplicação devido ao fato de ambas aplicações apresentarem resultados semelhantes. Inicialmente, a finalidade dessa análise é verificar como estão os conhecimentos prévios dos discentes através das perguntas motivadoras e, na sequência, apresentamos resultados dos experimentos e da análise da atividade de uma maneira geral.

- Análise das perguntas motivadoras:

1ª Pergunta motivadora (PM1)

A PM1 foi assim proposta: “Você já parou pra pensar qual a relação existente entre a dispersão luminosa e as cores que aparecem num arco-íris, em um Compact Disc (CD) e nas bolhas de sabão?.

De maneira similar à primeira aplicação, o percentual de respostas parcialmente satisfatórias a PM1 foi elevado (fig.7), indicando que existe uma breve noção do conceito de dispersão luminosa.

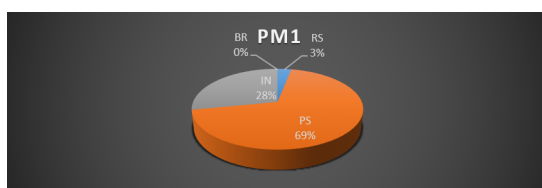


Figura 7: Respostas dadas à PM1 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

2ª Pergunta motivadora (PM2)

A PM2 foi assim proposta: “No contexto dos fenômenos luminosos, você sabe como funcionam o cinema em terceira dimensão (3D) e os óculos que recebemos antes de acessar a sala de projeção?”.

Um percentual um pouco maior atendeu satisfatoriamente à PM2, mais em função do conhecimento dos dispositivos polarizadores presentes no cotidiano dos alunos (fig.8). De uma maneira geral, a captação dos conhecimentos prévios dos estudantes foi muito boa.

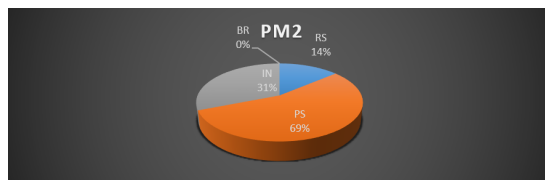


Figura 8: Respostas dadas à PM2 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

3ª Pergunta motivadora (PM3)

A PM3 foi assim redigida: “Os LED são uma realidade tecnológica do nosso cotidiano; na iluminação e em equipamentos eletrônicos. Porém, dentro de sua gênese quântica, eles podem ser considerados simplesmente “lâmpadas em miniatura?”.”.

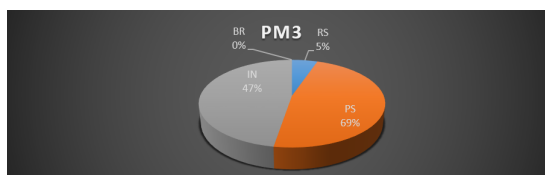


Figura 9: Respostas dadas à PM3 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Os conhecimentos dos alunos sobre LED e outros dispositivos eletrônicos baseados em semicondutores foram parcialmente mostrados na PM3, em um percentual bem mais acentuado em relação à primeira aplicação do produto educacional (fig.9).

4ª Pergunta motivadora (PM4)

Na PM4, foi feita a seguinte proposição: “A partir dos seus conhecimentos do espectro eletromagnético, você saberia diferenciar a luz do Sol que nos ilumina da luz de um feixe de laser?”.

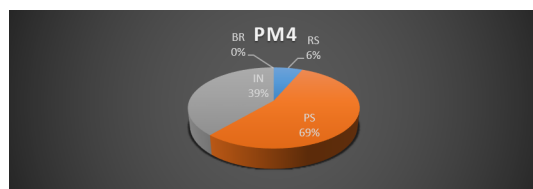


Figura 10: Respostas dadas à PM4 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Dentro da nossa pesquisa, o quantitativo diminuído de respostas satisfatórias dadas à PM4, a respeito das características de um laser em detrimento da luz solar, estava dentro das previsões do trabalho (fig.10). Mesmo assim, os conhecimentos parciais sobre o tema foram bem mais significativos na segunda aplicação.

5ª Pergunta motivadora (PM5)

Nesse diagrama, foi analisada a proposição da PM5, intitulada *Como funciona o acionamento da iluminação pública em sua rua ao anoitecer?*”.

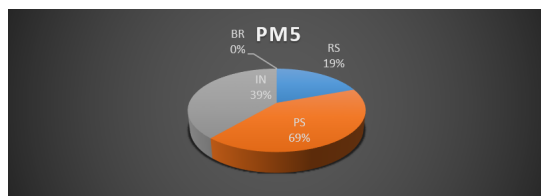


Figura 11: Respostas dadas à PM5 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Nessa nova abordagem da PM5, vê-se uma melhoria do percentual de respostas satisfatórias, associadas a um igual efeito sobre as respostas parcialmente satisfatórias dadas na primeira aplicação do produto (fig.11). Isso evidencia, como um todo, que os conhecimentos prévios dos estudantes podem e devem influenciar positivamente no desenvolvimento da atividade, como amplamente discutido por Ausubel (AUSUBEL, 1993; MOREIRA; MASINI, 2006).

- Análise das respostas às questões experimentais (QE):

Além da atividade experimental propriamente dita, os alunos já haviam feito a aplicação das simulações virtuais com os aplicativos *PhET* e *Physics at School Lite* para verificar conceitos que já haviam sido discutidos através dos mapas conceituais. Com relação as atividades experimentais, os procedimentos foram realizados por 5 cinco grupos de trabalho, mas cada componente, forneceu respostas individuais para as QE1, QE2 e QE3 relativas ao experimento 1. Em seguida, também foram dadas respostas para as QE4, QE5, QE6 e QE7. Foi orientado aos estudantes que participaram da atividade preencher o questionário em anexo após cada uma das observações experimentais, fazendo surgir meios de interação com a aprendizagem, no momento da sua ocorrência, estabelecendo uma sinergia satisfatória com os conhecimentos prévios dos alunos. Em seguida, estabelecemos diagramas para ilustrar o desempenho dos alunos ao responder cada uma das questões experimentais.

1ª Questão experimental (QE1)

Foi proposta aos alunos a QE1, em relação ao experimento 1, com a seguinte redação: “Ligue o circuito e gire o filtro polarizador de modo a obter o máximo brilho do LED. Marque o ângulo de defasagem em 0° no filtro. O que foi observado?”.

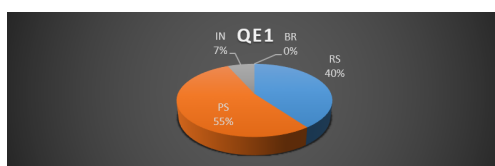


Figura 12: Respostas dadas à QE1 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Nessa QE1 ficou evidenciado que os alunos, em sua maioria, atenderam satisfatoriamente à premissa de que o ângulo de defasagem de 0° permite uma maior passagem de luz *laser*, através dos filtros, para o LDR (fig.12). Especificamente, surge a compreensão que a

intensidade luminosa poderia estar relacionada à corrente elétrica atuante no circuito do experimento 1.

2ª Questão experimental (QE2)

Foi proposta aos alunos a QE2, em relação ao experimento 1, com a seguinte redação: “Ligue o circuito e gire o filtro polarizador de modo a obter o mínimo brilho do LED. Marque o ângulo de defasagem em 90° no filtro. O que foi observado?”.

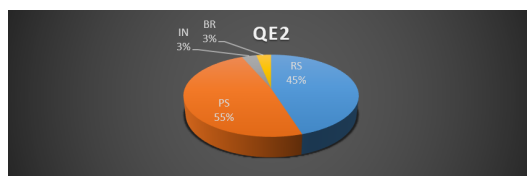


Figura 13: Respostas dadas à QE2 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Nas respostas dos alunos à QE2, houve uma melhoria no percentual daquelas que atenderam satisfatoriamente ao conceito de que o ângulo de defasagem de 90° permite a menor passagem possível de luz *laser* para o LDR (fig.13).

3ª Questão experimental (QE3)

A QE3, última questão do experimento 1, ficou assim proposta: “Estabeleça uma intensidade de 50% na luz transmitida, marcando um ângulo de defasagem de 45° . O que foi observado?”.

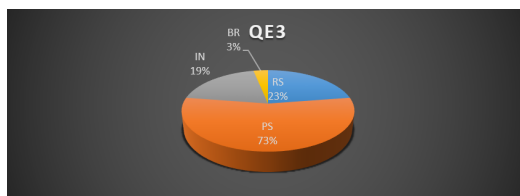


Figura 14: Respostas dadas à QE3 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

A compreensão parcial por parte dos alunos que existe um *meio termo* na transmissão da luz *laser* polarizada sob um ângulo de defasagem de 45° dominou o quantitativo de respostas *parcialmente satisfatórias* da QE3 (fig.14). Esse percentual mostra também que alguns grupos apresentaram alguma dificuldade em manusear o experimento, levando a compreender parcialmente esse questionamento.

4ª Questão experimental (QE4)

A QE4 passa a tratar o experimento 2. Ela foi redigida assim: “Uma vez verificado que o motor não apresenta rotação, incida luz branca da lanterna LED do smartphone no fotodiodo e verifique o comportamento do motor. O que foi observado?”.

Com um percentual satisfatório razoável, a QE4 obteve respostas adequadas sobre todos os aspectos, uma vez que todos os alunos compreenderam que o efeito da luz policromática não foi suficiente para provocar alguma rotação no motor, independente da intensidade da luz (fig.15).

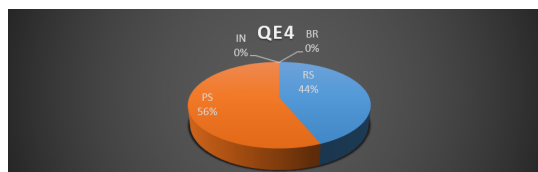


Figura 15: Respostas dadas à QE4 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

5ª Questão experimental (QE5)

Ainda analisando o experimento 2, a QE5 foi assim proposta: “O procedimento anterior (QE4) deverá ser repetido com a luz laser vermelha incidindo no fotodiodo, verificando o comportamento do motor. O que foi observado?”.

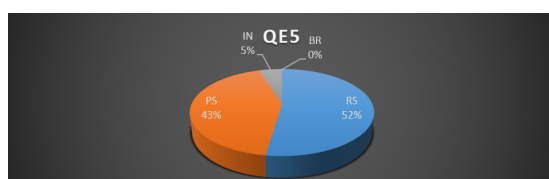


Figura 16: Respostas dadas à QE5 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

A adoção da luz monocromática e coerente do *laser* vermelho no experimento 2 fez com que os alunos respondessem satisfatoriamente à QE5, em sua maioria (fig.16). Já pesava sobre o grupo a compreensão da relação entre a energia transportada pelos fótons e a frequência da onda luminosa.

6ª Questão experimental (QE6)

A QE6 do experimento 2 foi assim proposta: “O procedimento anterior (QE5) deverá ser repetido com a luz laser verde incidindo no fotodiodo, verificando o comportamento do motor. O que foi observado?”.

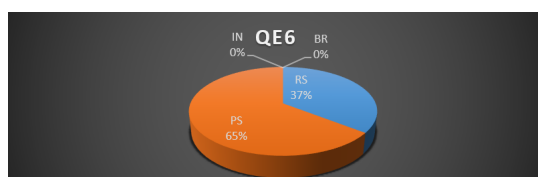


Figura 17: Respostas dadas à QE6 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

A utilização da luz *laser* na cor verde no experimento 2 contribuiu para que o percentual de respostas satisfatórias fosse maior na QE6 (fig.17). Embora na primeira aplicação, o *brilho* mais vibrante da luz verde gerou a ideia de ser essa característica (SILVA, 2007), e não a frequência da luz incidente no fotodiodo, o agente responsável pela maior rotação do motor, foi possível esclarecer este ponto na análise quantitativa do experimento automatizado. O diagrama de percepção do olho às cores justifica essa impressão (SILVA, 2007).

7ª Questão experimental (QE7)

Completamos a análise do experimento 2 com a QE7 assim proposta: “O procedimento

anterior (QE6) deverá ser repetido com a luz laser azul incidindo no fotodiodo, verificando o comportamento do motor. O que foi observado?”.

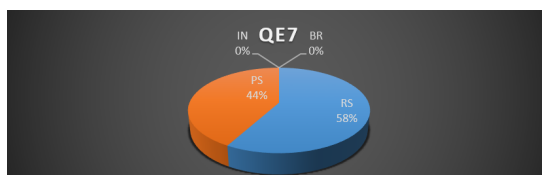


Figura 18: Respostas dadas à QE7 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

A interpretação equivocada ocorrida nas respostas da questão anterior foi reprimida no aproveitamento bastante satisfatório da QE7, posto que a frequência da luz *laser* azul é superior a da verde, mesmo não impressionando tanto a visão humana, como pode ser constatado no Curva Internacional de Luminosidade Espectral Relativa de um Olho Padrão. Essa foi a radiação luminosa onde o motor executou a rotação mais intensa (fig.18).

- Análise das respostas às perguntas avaliativas (RA):

Os diagramas a seguir forçam as análises correspondentes à avaliação do material utilizado para discutir os tópicos de FMC.

1ª Resposta avaliativa (RA1)

A proposição da RA1 era assim descrita: “Ao verificar o fenômeno da polarização da luz laser no experimento 1, quão próximos os resultados teóricos da aplicação da Lei de Malus se aproximaram dos efeitos observados para os ângulos de 0° , 45° e 90° ?”.

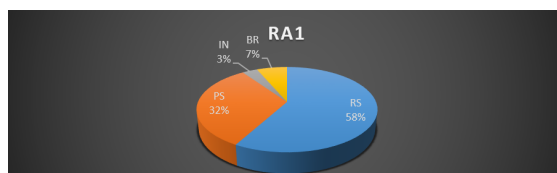


Figura 19: Respostas dadas à RA1 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

As respostas dadas individualmente pelos alunos à RA1 mostraram-se bastante satisfatórias, uma vez que a relação imposta pela Lei de Malus ficou, em grande maioria, compreendida pelos estudantes (fig.19).

2ª Resposta avaliativa (RA2)

RA2 foi assim redigida: “Em que ponto do experimento foi possível observar uma luz policromática como a luz solar responsável pelo “arco-íris?”.

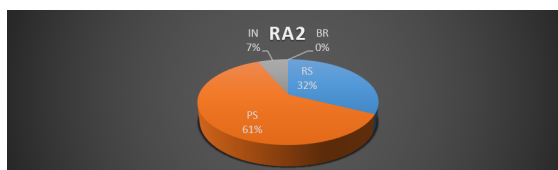


Figura 20: Respostas dadas à RA2 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

Ao observar a luz policromática transmitida através do conjunto de filtros polarizadores componentes do *kit* experimental, os alunos compreenderam parcialmente, em grande maioria, que mesmo a luz branca pode ser polarizada e que ela era similar a luz do Sol (fig.20).

3ª Resposta avaliativa (RA3)

Essa pergunta RA3, foi assim descrita: “Qual fenômeno observado no experimento é responsável pela compreensão do funcionamento dos óculos 3D que você utiliza no cinema? Justifique sua resposta”.

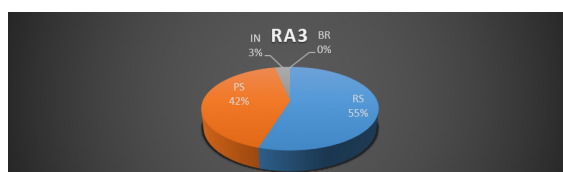


Figura 21: Respostas dadas à RA3 da 1ª aplicação (Fonte: autor).

A grande maioria de *respostas satisfatórias* mostradas para a RA3 indicam que grande parte do grupo de alunos compreendeu ser a polarização das ondas luminosas o fenômeno responsável pela sensação de profundidade (tridimensional) conferida ao cérebro por tais dispositivos ópticos (fig.21).

4ª Resposta avaliativa (RA4)

Continuamos, analisando a RA4 que foi redigida da seguinte maneira: “Como você pode descrever os sistemas de iluminação pública, uma vez que teve contato com o funcionamento de elementos eletrônicos tais como LED, LDR e fotodiodos?”.

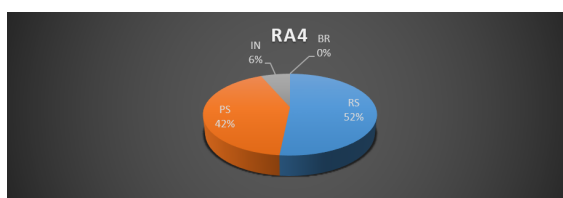


Figura 22: Respostas dadas à RA4 da 1ª aplicação (Fonte: autor).

A relação estabelecida entre os dispositivos passivos baseados em semicondutores com o efeito fotoelétrico foi satisfatoriamente demonstrada, como visto nos percentuais das respostas da RA4 (fig.22). Essa proposição basea-se principalmente no conhecido fato desse fenômeno independer da intensidade da onda luminosa, e sim de sua frequência.

5ª Resposta avaliativa (RA5)

Concluindo nossa análise, temos a RA5, com a seguinte proposição: “A partir de que grandezas físicas observadas nos experimentos aplicados, você poderá diferenciar as luzes policromática (solar) e monocromática (laser)?”.

Por uma diferença percentual muito pequena, a maioria das respostas dadas à RA5 surtiram *parcialmente satisfatórias* (fig.23). Entretanto, isso positivamente indica a nova

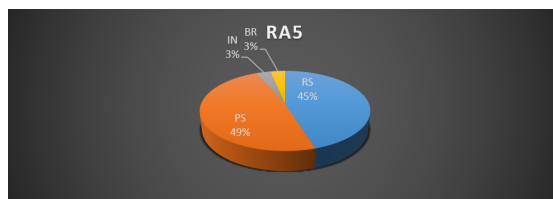


Figura 23: Respostas dadas à RA5 da 2ª aplicação (Fonte: autor).

habilidade adquirida pelos alunos em estabelecer corretamente a diferença entre a luz branca solar incoerente e a luz *laser* coerente, intensa e direcional.

Concluindo nossa análise, os resultados presentes nos diagramas das *perguntas motivadoras* indicaram que os alunos traziam um razoável conhecimento relativo às questões do pré-teste, onde os quantitativos das respostas parcialmente satisfatórias foram superiores a 50% na primeira aplicação e acima de 60% na segunda, assim como ocorreu um baixo percentual de respostas em branco em ambos os momentos. De uma maneira geral, isso denota algo previsível dentro da proposta do trabalho, onde os conhecimentos prévios dos discentes puderam ser relativamente identificados. Também percebeu-se através dos diagramas que as questões experimentais mostraram um maior percentual de respostas satisfatórias em relação ao pré-teste, uma vez que a sintonia entre as informações dos padrões de resposta obtidas nas simulações dos aplicativos *PhET* e *Physics at School Lite*, somados às observações feitas nas atividades experimentais, reforçaram a proposta de *Diferenciação Progressiva* prevista na TAS (AUSUBEL, 1993; MOREIRA; MASINI, 2006). Um ponto relevante a ser observado entre os dois momentos de aplicação, foi onde o grupo de alunos da segunda aplicação demonstrou certa dificuldade em manusear os *kits* experimentais, fato esse que talvez possa ter comprometido o desenvolvimento das respostas de uma ou outra questão experimental, remetendo-nos à necessidade de reforçar a realização de procedimentos experimentais nas aulas de Física, uma característica inerente aos objetivos da ABP. Na abordagem das *respostas avaliativas*, comparando-se os dois momentos da aplicação, a análise dos dados mostrou uma sensível melhoria nas respostas satisfatórias, mesmo com alguma intercorrência nas atividades experimentais durante a aplicação dos experimentos automatizados que, ainda assim, atenderam ao propósito da pesquisa. A parte mais importante é perceber que a *Reconciliação Integrativa* ocorreu como previsto na TAS, posto que houve evolução da percepção dos alunos em relação aos novos conceitos aplicados em nossa sequência didática, demonstrando a fixação cognitiva desses e a geração de novos saberes.

V. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentamos o processo de desenvolvimento e aplicação de um produto educacional cujo objetivo era oferecer aos professores e alunos da escola média uma abordagem significativa de conteúdos de FMC. Os resultados dos questionários aplicados demonstraram que o objetivo foi atingido com êxito. De uma forma realmente eficaz, através do emprego de um material didático potencialmente significativo, de fácil aquisição, baixo custo, efetiva aplicabilidade e associado às TDIC, percebeu-se uma clara evolução entre os

dois momentos de aplicação. As aplicações ocorreram nos anos de 2018 e 2019 em uma mesma unidade pública de ensino, com turmas concluintes do ensino médio. A atividade experimental associada ao MPS revelou-se inovadora para os estudantes, que puderam envolver-se em discussões relativas à novos conceitos práticos, como o uso de lasers e dispositivos móveis, assim como programação em microcontroladores *arduino*.

As TDIC foram de vital importância para o emprego do produto educacional, como comentado pelos alunos nas respostas dos questionários, além de ter levado a diversas discussões que auxiliaram a aprofundar o conhecimento sobre tópicos de FMC relacionados a fenômenos comumente observados em nosso cotidiano, como por exemplo, o simples acender de uma lâmpada em um poste de via pública. Além disso, podemos citar os testes realizados em laboratórios que auxiliaram na conclusão de que a frequência da luz interferia na rotação do motor e que um sistema automatizado poderia auxiliar na observação deste resultado.

Podemos ainda citar a dificuldade de alguns discentes de manipular e montar os experimentos, o que demonstrou a importância do docente como mediador da experiência. No entanto, este fato não foi recorrente e o uso do roteiro foi fundamental para que os grupos desenvolvessem a atividade independentemente, ilustrando a importância de um MPS.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física (MNPEF - Polo 15 UFF/IFRJ), à Sociedade Brasileira de Física e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento e pela estrutura disponibilizada para a realização do experimento.

REFERÊNCIAS

ANTÔNIO, M.; CALEFI, P. S. Concepções de professores de biologia , física e química sobre a aprendizagem baseada em problemas (ABP). p. 1–8, 2013. 58

AUSUBEL, D. Teoria da aprendizagem significativa. *PELIZZARI, A. et al*, 1993. 50, 66, 71

AUSUBEL, D. P. *Aquisição e Retenção de Conhecimentos : Uma*. 1ª. ed. Lisboa: PARALELO EDITORA-PORTUGAL, 2003. 243 p. ISBN 972-707-364-6. 55

BAIRRAL, M. A. As Manipulações em Tela Compondo a Dimensão Corporificada da Cognição Matemática. *Jornal Internacional de Estudos em Educação Matemática*, v. 10, n. 2, p. 99, 2017. ISSN 2176-5634. 56

BARTHEM, R. *A Luz*. São Paulo-SP: Livraria da Física Editora, 2005. ISBN 9788588325302. 52

CARVALHO, A. B. G.; BLEY, D. P. Cultura Maker e o uso das tecnologias digitais na educação: construindo pontes entre as teorias e práticas no Brasil e na Alemanha. v. 26, n. 10, p. 21–40, 2018. 57

- CAVALCANTE, M. A.; BENEDETTO, A. D. Instrumentação em Física Moderna para o Ensino Médio : uma Nova Técnica para a Análise Quantitativa de Espectros. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 21, n. 3, p. 437–446, 1999. 57
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R.; GUIMARÃES, D. Construção de equipamentos didáticos para o estudo da polarização intrínseca do LASER. In: *XVI Simpósio Nacional de ensino de Física*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 7–10. 58
- CAVALCANTE M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. Física com Arduino para iniciantes. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 33, n. 4, 2011. ISSN 01024744. 57
- GASPAR, A. *Experimentos de Ciências*. 1ª. ed. São Paulo-SP: Ática, 2003. ISBN 8508089171. 57, 58
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física 3: Eletromagnetismo*. 3ª. ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 1993. ISBN 8521607059. 53
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R. *Fundamentos de Física 4: Ótica e Física Moderna*. 3ª. ed. Rio de Janeiro-RJ: LTC, 1993. ISBN 8521607083. 53
- HEWITT, P. G. *Física Conceitual*. 11ª. ed. Porto alegre-RS: Bookman Editora, 2011. ISBN 9788577808908. 61
- JORENTE, M. J. V. Impacto das tecnologias de informação e comunicação: Cultura digital e mudanças sócio-culturais. *Informacao e Sociedade*, v. 22, n. 1, p. 13–25, 2012. ISSN 01040146. 56
- LIMA, J. F. d. *O laser e os conceitos de polarização e efeito fotoelétrico em uma abordagem significativa no ensino médio*. Dissertação (Mestrado) — MNPEF-IF/UFF, 2020. 50, 61
- MONK, S. *Projetos com Arduino e Android*. 1ª. ed. Porto alegre-RS: Bookman Editora, 2014. ISBN 9788582601211. 60
- MOREIRA, M. A. Aprendizagem significativa, Organizadores prévios, Mapas conceituais, Diagramas V e Unidades de ensino potencialmente significativas. *Revista Quirriculum, La Laguna*, v. 25, p. 29–56, 2012. ISSN 2175-8042. 56
- MOREIRA, M. A.; MASINI, E. F. *Aprendizagem Significativa- A Teoria de David Ausubel*. 2ª. ed. São Paulo-SP: Centauro, 2006. 114 p. ISBN 9788588208766. 50, 55, 56, 66, 71
- NUSSENZVEIG, H. M. *Curso de Física Básica: Volume 3 - Eletromagnetismo*. 1ª. ed. São Paulo-SP: Editora Edgard Blücher, 2002. ISBN 85-212-0298-9. 51, 53
- RAMOS, D. *Uma proposta para demonstrações experimentais no ensino de Física: roteiro de experimentos de baixo custo*. Uberlândia-MG: [s.n.], 2018. 40 p. 49
- RODITI, I. *Dicionário Houaiss Física*. [S.l.]: Objetiva, 2005. 264 p. ISBN 9788573026948. 51, 53
- SEEDUC. Currículo mínimo 2012. 2012. 49
- SILVA, M. F. d. Esclarecendo o significado da "cor" em física. *A Física na Escola*, v. 8, n. 1, p. 25–26, maio 2007. 68

TIPLER, P. A.; LLEWELLYN, R. A. *FÍSICA MODERNA*. 6^a. ed. Rio de Janeiro-RJ: GEN LTC, 2014. ISBN 9788521626077. 54



UM ESTUDO HISTÓRICO-CONCEITUAL EM FÍSICA DE PARTÍCULAS

A HISTORICAL-CONCEPTUAL STUDY IN PARTICLE PHYSICS

Vinícius Cerqueira Silva ^{*1}, Vanessa Carvalho de Andrade ^{†1}

¹Instituto de Física - Universidade de Brasília

Resumo

Este artigo é resultado de um projeto de iniciação científica desenvolvido na Universidade de Brasília sob orientação da professora Vanessa Carvalho de Andrade do Instituto de Física, no período de 2020 à 2021. É um estudo histórico-conceitual em Física de Partículas com foco na cronologia de descobertas e propostas de partículas elementares capazes de explicar os experimentos de altas energias da época. Trata-se de uma introdução ao tema, sem se aprofundar na matemática. Ao decorrer desta linha do tempo são apresentadas as novas teorias e conceitos relacionados às propriedades intrínsecas desta partículas; no geral isso toma forma como o Modelo Padrão de Física de Partículas. Ademais, este texto tem potencial didático para apresentar a temática.

Palavras-chave: Física de Partículas, Partículas Elementares, Modelo Padrão, Interações Fundamentais, História da Física.

Abstract

This article is the result of a scientific initiation project developed at the University of Brasilia under the guidance of Professor Vanessa Carvalho de Andrade of the Physics Institute from 2020 to 2021. It is a conceptual-historical study in particle physics with a focus on the chronology of discovery and proposals of elementary particles capable of explaining the high energy experiments of the time. It is an introduction to the subject, without delving into the mathematics. Throughout this timeline, new theories and concepts related to the intrinsic properties of these particles are presented; in general, this takes shape as the Standard Model of Particle Physics. Moreover, this text has didactic potential to present the theme.

Keywords: Particle Physics, Elementary Particles, Standard Model, Fundamental Interactions, History of Physics.

*vini3129@gmail.com

†vcandrade@unb.br

I. Introdução

O que é a Física de Partículas? Física de Partículas é um ramo da Física que se dedica ao estudo das partículas elementares, como elas interagem entre si ou deixam de interagir. No entanto, o que é uma partícula elementar? É a menor unidade de matéria conhecida até o momento.

Este estudo fixa-se em compreender mais profundamente a natureza da matéria que compõe o universo conhecido e, conseqüentemente, as implicações destes conhecimentos a curto e médio prazo. A título de exemplo, a descoberta do elétron por Thomson em 1897, pela Ampola de Crookes, impactou prontamente na melhor execução do experimento que, com melhorias, permitiram depois que essa tecnologia, usada para acelerar elétrons por campos elétricos e curvar suas trajetórias com campos magnéticos, fosse utilizada para a confecção de televisões de tubo. O interesse pelo tema dá-se a pela diversidade de possibilidades de novas configurações de matéria que possam existir e pelo entendimento das "elementaridades" que compõem o universo.

II. Metodologia

Esta Iniciação Científica foi puramente teórica, sem práticas experimentais. A metodologia utilizada foi estudar os conceitos em Física de Partículas a partir de três principais bibliografias.

A primeira literatura que guiou esta Iniciação foi o livro *O discreto charme das partículas elementares* [1], que apresenta a cronologia de descoberta e proposta das partículas em uma linha do tempo e as teorias físicas e matemáticas relacionadas. O livro recorre a ilustrações únicas, bem coloridas, pouco convencionais, cujo diferencial é representar cada partícula com seu respectivo "avatar", inspirado nas propriedades físicas da partícula, ao contrário do usual, em mostrá-las como "bolinhas".

A autora se utiliza de uma linguagem simples, sem deixar de usar os devidos termos técnicos para descrição de conceitos, quando necessário. Não há o uso frequente de expressões matemáticas, e as que são apresentadas são simples. O livro ainda possui um extenso glossário para consulta de termos e conceitos.

A segunda referência bibliográfica considerada foi o livro *Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores* [4], que faz um aprofundamento conceitual e teórico no tema, assim como diz o título, a partir do ponto de vista do desenvolvimento das teorias físicas por trás das interações fundamentais.

E por último, utilizou-se uma referência como primeiro aprofundamento matemático no tema, o livro *Introdução à Física de Partículas* [2], com o uso de conceitos de cálculo diferencial, mecânica quântica e álgebra linear.

Paralelamente, estudou-se também sobre alguns conceitos base para a temática como relatividade restrita.

Além disso, foram feitas reuniões periódicas com a orientadora, e a participação no grupo de pesquisa, com seminários adjacentes ao tema.

III. Resultados

Nesta seção, serão apresentadas, em uma linha do tempo, a descoberta e proposta das partículas, em sua maioria no século XX, salvo algumas exceções, e nem todas com caráter elementar. O conceito de elementar aqui se dará por qualquer partícula que não seja composta por outras; o fato de ser estável ou instável não necessariamente implica na elementaridade da partícula.

III.1. A descoberta do Elétron (e^-) em 1897

Descoberto por J.J. Thomson, pelo experimento da Ampola de Crookes.

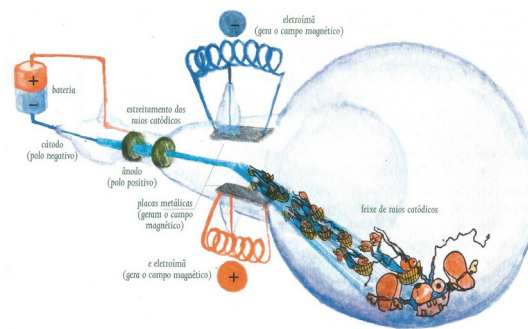


Figura 1: Representação da ampola de Crookes. [1]

Quando se aplica uma suficiente diferença de potencial entre duas placas metálicas de um dado material, forma-se um intenso campo elétrico, capaz de atrair elétrons. Este movimento de aceleração configura-se como emissão de raios catódicos do cátodo (placa negativa). Os raios passam pela cavidade circular no ânodo (placa positiva) que formam um feixe estreito, onde sua trajetória é curvada por um campo magnético, caso contrário o feixe seguiria reto. Pela deflexão do feixe, infere-se que ele possui carga negativa, e por ela foi calculado a massa das partículas que compõem o feixe $m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ Kg} = 0,511 \text{ MeV}/c^2$ e a carga $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$. Isso é observado na tela fluorescente no fim do tubo.



Figura 2: Representação do elétron tendo trajetória curvada sob ação do Campo Magnético. [3]

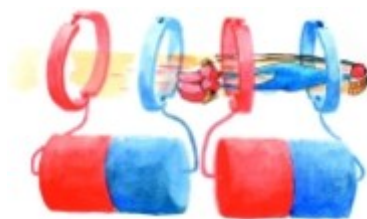


Figura 3: Representação do elétron sendo acelerado sob ação do Campo Elétrico. [3]

III.2. A proposta do Fóton (γ) em 1905



Figura 4: Representação do Fóton. [1]

O fóton foi descoberto a partir do experimento do Efeito Fotoelétrico. Na época sabia-se que certos metais, quando iluminados com determinada frequência, emitiam elétrons. Max Plank propôs que os elétrons, ao ganhar energia dos "pacotes de energia" chamados *quanta*, são ejetados. Isso depende da frequência da luz f que incide sobre a placa metálica, dada pela equação $E = hf$, sendo h a constante de Planck. Pelo Modelo Atômico de Rutherford-Bohr, sabia-se que um elétron só passa de uma camada para outra ao receber uma quantidade determinada de energia (quantum de luz).

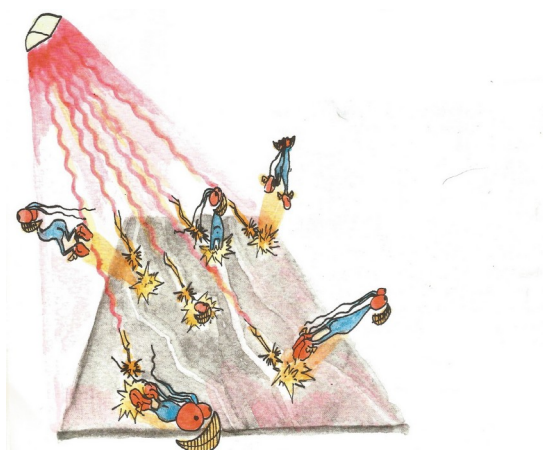


Figura 5: Representação do Efeito Fotoelétrico. [1]

A experiência do Efeito Compton mostra um elétron em repouso que, ao ser atingido por um fóton, ganha velocidade e o fóton que o atingiu se espalha (perde energia).



Figura 6: Representação do Efeito Compton. [1]

III.3. A descoberta do Próton (p) em 1919

Não é uma partícula elementar, mas foi considerada por um período. Mostrou-se importante na descoberta de outras partículas elementares. Como se sabia que o átomo (matéria comum) era neutro, e da existência do elétron com carga negativa, presumiu-se que existisse uma partícula de carga oposta.

Eugen Goldstein percebeu, ao se introduzir um furo no cátodo, um feixe de raios de luz na direção contrária ao dos raios catódicos, denominando-os de raios canais. No entanto, o campo magnético usado não foi suficiente para deformar o feixe. Wilhelm Wien percebeu ser preciso um campo eletrostático muito mais intenso do que aquele usado por Goldstein para deformar os raios, assim calculou a massa da partícula e concluiu que se tratava de hidrogênio ionizado (próton). Foi no experimento de Rutherford, no qual partículas alfas (α) atingem átomos leves emitindo prótons (átomos de hidrogênio ionizado), que a descoberta se concretizou.

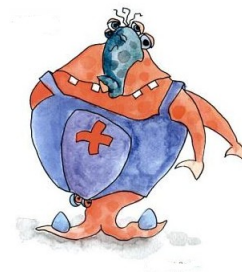


Figura 7: Representação do Próton. [1]

III.4. A proposta do Neutrino do elétron (ν_e) em 1930

Advém da proposta teórica de uma partícula leve, sem carga, que pouco interage com a matéria, por Wolfgang Pauli, motivada pela falta da conservação de energia no decaimento β , visto que os elétrons eram ejetados do núcleo com energia indefinida, de valores altos a

nulos. É importante ressaltar que mais à frente, com a descoberta do nêutron e melhoria dos métodos de aproximação, observou-se que não se tratava do neutrino e sim do antineutrino.



Figura 8: Representação do Neutrino do elétron. [3]

Com a descoberta do nêutron ficou claro que não havia elétrons no núcleo. Logo, essa nova proposta teve que incluir o desbalanceamento de spin na conversão de nêutron em um próton e um elétron, pois ambos são férmions (spin semi-inteiro), ou seja, "a conta não fechava". O nêutron, próton e elétron possuem spin $\frac{1}{2}$, que podem ser positivo ($\uparrow; +\frac{1}{2}$) ou negativo ($\downarrow; -\frac{1}{2}$). assim, todas as combinações de próton e elétron convergem para 1,-1 e 0, de modo que jamais seria possível obter spin $\frac{1}{2}$ ao final, violando a conservação do momento angular. Isto pode ser visto por:

$$|\{n\}\rangle_{spin\frac{1}{2}} \rightarrow |\{p\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{e\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}}.$$

O problema foi resolvido adicionando uma partícula de spin $\frac{1}{2}$, carga elétrica 0, massa de repouso nula (m_0):

$$|\{n\}\rangle_{spin\frac{1}{2}} \rightarrow |\{p\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{e\}\rangle_{(\pm)\,spin\frac{1}{2}} + |\{\bar{\nu}\}\rangle_{spin\frac{1}{2}}.$$

III.5. A descoberta do Pósitron (e^+) em 1931

Paul Adrien Maurice Dirac usou a relação entre energia, momento e massa em repouso $E = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$, mostrando que a mecânica relativística permitiria então dois níveis separados de energia, um positivo e outro negativo. Uma forma de interpretar isso é quando um elétron de um nível negativo ganha energia e é "promovido" ao nível positivo, ele deixa um "buraco" no "mar", que se comporta como um elétron com carga positiva. Mais à frente isso foi denominado de mar de Dirac.

Foi detectado com auxílio de uma Câmera de Wilson sobre influência de campo magnético, usando raios cósmicos. Numa câmara com vapor supersaturado de álcool, quando partículas carregadas passam por ela, perdem energia ionizando átomos, o que deixa traços pelo caminho. Pela manipulação de campos magnéticos, foi possível verificar que algumas partículas tinham carga positiva. E que apresentavam massa aproximada de um elétron.

A descoberta em laboratório correspondia ao modelo previsto por Dirac, onde a colisão de dois raios γ (dois fótons) formaria uma par elétron-pósitron.

A partir daqui, um novo paradigma é estabelecido, em que cada partícula possui sua antipartícula.

III.6. A descoberta do Nêutron (n) em 1932

Não é uma partícula elementar. Como já se sabia que o núcleo possuía cargas positivas, sabendo que as mesmas se repelem, seria necessária uma partícula que mantivesse os prótons juntos e consequentemente o átomo estável, e completasse a massa de átomos mais pesados que o Hidrogênio.

O nêutron foi descoberto a partir do experimento de Walther Boethe e Herbert Becker e do casal Joliot-Curie. Nele, partículas alfas atingem átomos leves como o berílio (Be), restando da reação átomos de carbono e partículas com massa similar à do próton e sem carga. Isso correspondia a uma radiação muito penetrante, que foi inicialmente interpretada como raios-X. A reação nuclear da colisão da partícula alfa (${}_2\text{He}^4$) com o Be produz um átomo de Carbono (C) e um nêutron (n) altamente energético:



No entanto, coube a James Chadwick refazer o experimento e reinterpretar os dados, assumindo que não se tratava de radiação gama, já que a amostra de polônio emitia partículas alfas extremamente energéticas e seria, na verdade, uma "versão neutra do próton". Essa descoberta é complementar a do neutrino do elétron.

III.7. A descoberta do Múon (μ) em 1937

É uma partícula elementar, instável, pois decai em partes menores, com tempo de vida média de 10^{-6} segundos. Neste ponto é importante ressaltar a diferença entre conceitos, ou seja, estável e elementar: uma partícula é elementar quando não possui mais constituintes, e é estável quando não há possibilidade de decair em outras partículas elementares, desde que as leis de conservação permitam. A reação de decaimento do múon apresenta-se como:

$$\mu \rightarrow e + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_\mu.$$

Hideki Yukawa propôs uma partícula intermediária que carregaria a força forte, responsável por manter o núcleo estável. Dado que nem a força eletromagnética, nem a força gravitacional ambas com constante de acoplamento muito pequenas, não seriam suficientes, a massa seria de $m_\mu \approx 200m_e$. No entanto, após observações experimentais, Seth H. Neddermeyer e Carl David Anderson concluíram que se tratava de outro tipo de partícula, com massa $m_\mu \approx 207m_e$, com duas cargas elétricas possíveis μ^+ e μ^- e spin $\frac{1}{2}$, características semelhantes a do elétron. Logo sofria ação da força nuclear fraca, eletromagnética e não nuclear forte.

A detecção se deu a partir da radiação cósmica. Outra característica que torna o múon semelhante ao elétron é que ao encontrar matéria ordinária, ele orbita o núcleo por alguns segundos antes de decair, já adiantando a descoberta do neutrino do múon. A reação de colisão do múon com o próton:

$$\mu^- + p \rightarrow n + \nu_\mu.$$



Figura 9: Representação do Múon. [3]

III.8. A descoberta do Píon (π) em 1947

Não é uma partícula elementar, mas configura-se como partícula subnuclear. A teoria proposta por Yukawa que permitiria a estabilidade do núcleo, seria a força forte, que atuaria a curtas distâncias resultando na massa $m_\pi = 200m_e$. Analogamente à força eletromagnética, expressa pelo fóton que, com massa nula, consequentemente de longo alcance, interage imediatamente com o núcleons, sendo absorvido em 10^{-23} segundos.

O fenômeno de formação aconteceria na atmosfera pela colisão de prótons advindos da radiação cósmica. Por esse motivo, os píons não eram detectados em superfície. Foi necessário fazer o uso de balões meteorológicos e visitas a montanhas altas, esta última feita pelo Físico Brasileiro César Lattes que, ao fazer o uso de emulsões com bórax, permitiu a detecção do π^- . As outras partículas π^+ e π^0 foram detectadas no acelerador Cosmic. A reação de decaimento do píon em múon é dada por:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm.$$



Figura 10: Representação do Píon. [3]

III.9. A proposta da Estranheza (s) em 1955

É importante salientar que, neste momento a estranheza é proposta como uma lei de conservação, e não como partícula. Eventualmente, com a proposta e descoberta dos quarks, o quark strange será descoberto.

Com o uso da câmera de nuvens para detecção de raios cósmicos, foram descobertas novas partículas, em especial, bárions pesados das famílias K, Λ , Δ , Ξ , que tinham como característica principal serem produzidas em pares e decaírem em partículas carregadas. São produzidas abundantemente no intervalo de 10^{-23} segundos, enquanto o decaimento 10^{-8} segundos, produzindo duas partículas carregadas. Hoje se sabe que as partículas estranhas são criadas pela força forte e regidas pela força fraca. A partir disso, deu-se um novo número quântico, a Estranheza (S), consequentemente como uma nova lei de conservação

relacionada ao quark strange. Deu-se então o valor de $S = 1$ para os Káons, $S = -1$ para Λ e Σ , $S = 0$ para as outras partículas.



Figura 11: Representação do Quark Strange. [3]

III.10. A descoberta do Neutrino do Múon (ν_μ) em 1962

Dada a existência do neutrino do elétron, que formava então a primeira geração de léptons, de formar similar, um novo neutrino foi pressuposto a fim de completar a segunda geração, onde o múon faz parte. Confirmou-se então a existência de outros neutrinos. O experimento AGS usou um feixe de prótons energéticos para produzir um chuveiro de mésons π que atravessaram placas densas de aço, decaindo em múons e por conseguinte o neutrino do múon; estes últimos são os únicos a chegarem no detector, pois os múons são muito pesados.

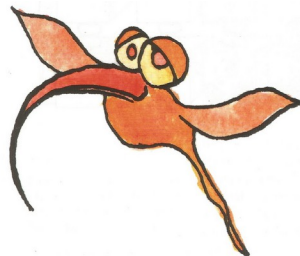


Figura 12: Representação do Neutrino do Múon. [1]

III.11. A proposta dos Quark Up (u) e Quark Down (d) em 1964

Com a descoberta de uma grande diversidade de partículas, bárions e mésons, Gell-Man propôs que os hádrons fossem formados por partículas mais elementares. Dado que já havia a proposta da estranheza; uma partícula poderia explicar as reações que envolviam esse fenômeno. Surgiu a primeira proposta dos quarks e seus antiquarks, nos sabores (tipos) up, down e strange, sendo os dois primeiros formadores da matéria comum, o próton (uud) e o nêutron (ddu). Os bárions são formados por três quarks ou antiquarks, e os mésons por um par quark-antiquark; este último configura-se um estado ligado.

Conhecendo as massas do próton, nêutron, quark up e quark down, $m_u = 3\text{MeV}/c^2$ e $m_d = 6\text{MeV}/c^2$, observou-se uma grande discrepância na massa do próton (uud), pois a soma dos quarks equivale a $12\text{MeV}/c^2$, e o próton tem massa de $938,272\text{MeV}/c^2$, o que significa que a massa restante seria advinda da energia de ligação (energia que mantém os

quarks em confinamento) de $918,272 \text{ MeV}/c^2$, ou seja, a energia é contada ao se medir a massa.

Os quarks estariam nadando num emaranhado de glúons energéticos, como um plasma, pois os eles interagem entre si.



Figura 13: Representação do Quark Down e Quark Up. [1]

III.12. A proposta do Charme (c) em 1964

Seguindo a simetria dos léptons com quatro partículas (e^- , μ , ν_e , ν_μ) esperava-se que o mesmo fenômeno se repetisse com os quarks. Um novo número quântico foi proposto, e seria apenas violado nas interações fracas. O charme foi observado pela partícula J/ψ^{2s} ($c\bar{c}$) no decaimento:

$$J/\psi^{2s} \rightarrow J/\psi^{1s} + \pi^+ + \pi^-$$

$$J/\psi^{1s} \rightarrow e^+ + e^-.$$



Figura 14: Representação do Quark Charm. [1]

III.13. A proposta dos Bósons de Gauge Z^0 , W^+ , W^- em 1967

A partir da Teoria Eletrofraca (unificação da interação fraca e interação eletromagnética) mostrou-se que as interações fracas seriam mediadas pelos bósons de gauge ou vetoriais intermediários (Z^0, W^+, W^-, γ). Foram detectados a partir da colisão ($p\bar{p}$), onde procuraram-se os seguintes decaimentos:

$$W^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e$$

$$W^- \rightarrow e^- + \nu_e$$

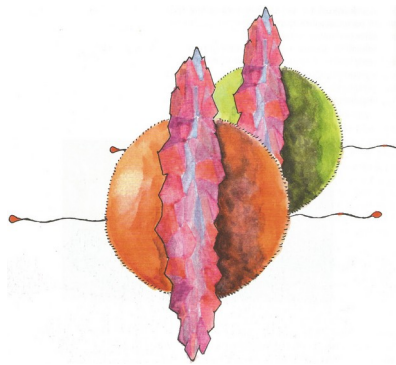


Figura 15: Representação dos Bósons W^+ e W^- . [1]

o Z^0 foi detectado a partir dos decaimentos:

$$Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$$

$$Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-.$$



Figura 16: Representação do Bóson Z^0 . [1]

Um dado bastante relevante é que este bóson pode decair de muitas formas diferentes e todas elas incluem neutrinos. Isto está ligado a uma simples relação da Teoria Eletrofraca, entre a vida média e número possível de neutrinos existentes na natureza. Observou-se também que os bósons carregados $W^\pm$ estão relacionados ao decaimento de partículas carregadas, e o bóson neutro Z^0 relacionado ao decaimento de partículas neutras.

III.14. A proposta dos Glúons ($g_{cor,anticor}$) em 1973

Como não eram encontrados quarks livres, pensou-se então que não existissem nesse estado ou que seriam raros, ou que estariam livres dentro de um determinado espaço, como se o hádron fosse uma bolsa. Tal fenômeno é a liberdade assintótica. Então presumiu-se que existisse uma "cola" entre os quarks, o Glúon, bóson mediador da QCD, que medeia a força forte entre os quarks. Quando dois quarks estão se afastando, "a cola se estica tanto" que do ponto de vista energético é mais fácil (econômico) criar um par(es) partícula(s)-antipartícula(s). Os quarks estariam "nadando" num emaranhado de glúons energéticos, como um plasma, já que interagem entre si.

A força forte que inter-relaciona os quarks tem origem na "carga cor" e no consequente "campo de força cor". A partir da QCD, essa interação é intermediada por oito glúons distintos, sem massa, carga neutra, spin 1, com um número quântico para cores (vermelho, verde e azul) e anti-cores (magenta, ciano e amarelo). O que gera nove tipos diferentes de glúons (cada glúon formado por uma cor e uma anti-cor), que seriam separados em dois grupos diferentes. Um octeto com seis deles mudam a cor do quark e dois deles chamados de diagonais, aniquilam a mesma cor que produzem e um singleto, glúon solitário, pois a soma de todas as cores é branca.

Em uma interação forte, o glúon muda-lhe a cor do quark que interage, aniquilando a cor e anti-cor da reação, a que restar será a cor do quark. Por exemplo, o glúon azul/magenta ao interagir com um quark vermelho, as cores magenta e vermelho aniquilam-se (torna-se branco), resta a cor azul não aniquilada do glúon, tem-se então o quark azul.

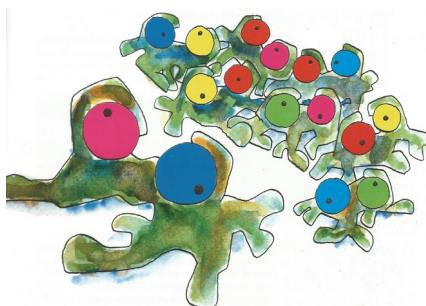


Figura 17: Representação dos Glúons. [1]

III.15. A descoberta do Tau (τ) em 1975

Observando a colisão elétron-pósitron, descobriu-se uma terceira geração de léptons, o τ com massa de aproximadamente dois prótons, o que preconizou a existência do neutrino do tau ν_τ foram os decaimentos:

$$e^+ + e^- \rightarrow \tau^- + \tau^+$$

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau.$$



Figura 18: Representação Tau. [1]

III.16. A descoberta do Quark Bottom (b) em 1977

Depois da descoberta de partículas geradas pela primeira e segunda gerações de quarks, e com descoberta da terceira geração de léptons, preconizou-se também uma terceira geração de quarks. O quark bottom foi encontrado pela evidência do méson úpsilon [$\Upsilon(1S)$] o estado ligado $b\bar{b}$. No início da década de 1980 outros mésons com esse quark foram descobertos. Por simetria então, pode-se prever a existência de um sexto quark, já que se esperava a detecção do neutrino do tau.

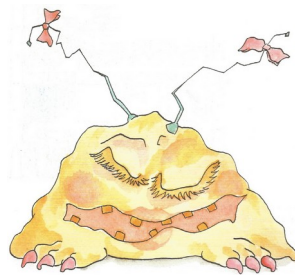


Figura 19: Representação Quark Bottom. [1]

III.17. A descoberta do Quark Top (t) em 1995

E por final, esse quark foi descoberto através da colisão extremamente energética próton-antipróton. O quark top é muito massivo, com massa equivalente a um átomo de ouro. Foi detectado no acelerador Tevatron, no FermiLab pelas seguintes reações:

$$p + \bar{p} \rightarrow t + \bar{t}$$

$$t \Leftrightarrow \bar{t} \rightarrow b + \bar{b} + W^+ + W^-.$$

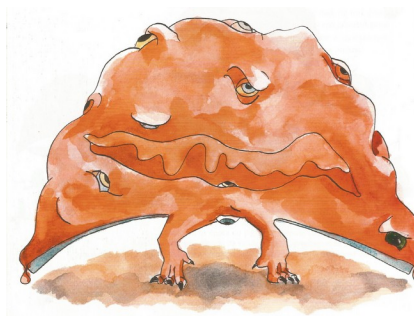


Figura 20: *Representação do Quark Top.* [1]

III.18. A descoberta do Neutrino do Tau (ν_τ) em 2000

A penúltima partícula a ser descoberta, a partir de um feixe intenso de neutrinos, que passavam por um grande alvo de ferro e camadas adequadas de emulsão. Apenas poucos neutrinos interagem com os átomos de ferro e se transformam em neutrino do tau.



Figura 21: *Representação do Neutrino do Tau.* [1]

III.19. A descoberta do Bóson de Higgs (H) em 2012



Figura 22: *Representação do Bóson de Higgs.* [1]

Foi proposto por Peter Higgs em 1964. Seria a partícula que gera a massa dos bósons de gauge. Na década de 1960 havia o problema da geração de massa dos bósons vetoriais responsáveis pela interação fraca. Foi proposto que um campo escalar poderia ser responsável pela geração de massa dos mediadores; esse mecanismo é a quebra espontânea da simetria de calibre (QES), e foi a partícula escalar de Higgs que explicaria o fenômeno.

Restava uma pergunta na época, a razão de algumas partículas terem massa como os quarks e léptons, mas fótons e glúons não tinham massa. A proposta de Peter Higgs em

1964, seria uma partícula que gera a massa dos bósons de gauge, através de um Campo de Higgs que permeia todo o espaço, em que algumas partículas interagem em dado grau, e a partir dele adquirem massa. Ou seja, o quark top interage muito mais com o campo de higgs, do que o elétron. O Bóson de Higgs seria uma excitação desse campo, assim como o fóton para o Campo Eletromagnético. A massa prevista e detectada do Higgs, foi de 125GeV, 100 vezes a massa do próton, e mais massiva do que qualquer outra partícula detectada. O que explica sua enorme dificuldade em produzir e detectar, tal feito realizado pelo LHC.



Figura 23: Representação do Mecanismo de Higgs. [1]

III.20. Simetrias e Leis de Conservação

Para resolver o problema da partícula $\Omega^-(sss)$ formada por três quarks strange, por serem férmions, o princípio da exclusão de Pauli não permitiria que ocupassem a mesma vizinhança, ou seja, dentro de um raio limite (o mesmo não acontece para os bósons, com spin inteiro). Assim surgiu a classificação por cores (vermelho, azul e verde) para ser possível diferenciar os quarks, e no caso do $\Omega^-(s_{vermelho}, s_{azul}, s_{verde})$. Essa relação é guiada pelo esquema de cores complementares da luz. A partir daí nasce a QCD (*Quantum Chromodynamic*), em português Cromodinâmica Quântica.

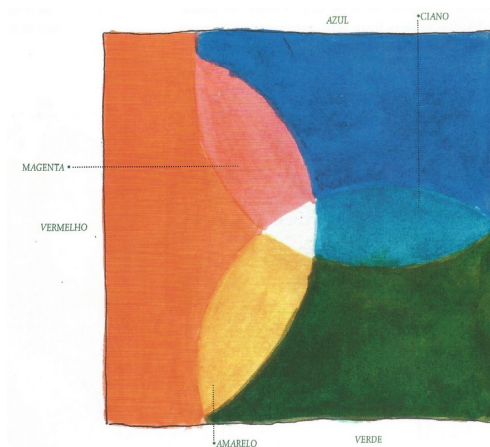


Figura 24: Cores dos quarks e antiquarks. [1]

Com o advento de novos tipos de emulsões e aceleradores de partículas mais sofisticados, foi possível a detecção de uma enorme diversidade de partículas. Então surgiu a necessidade de classificá-las a partir de outras leis de conservação que já não fossem quantidades conservadas como massa, carga, momento linear e spin. Por exemplo, nas reações $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$, Carga Elétrica ($0 \rightarrow +1 - 1$) e $\bar{\nu}_e + n \rightarrow p + e^-$, Carga Elétrica ($0 \rightarrow +1 - 1$).

Questionou-se como seria possível distinguir o neutrino do antineutrino, já que a segunda reação nunca foi vista. Ficou óbvio que não se tratava da mesma partícula. Formulou-se uma nova lei de conservação, Número Leptônico (L): $L = 1$ para léptons, $L = -1$ para antiléptons e $L = 0$ para todas as outras partículas. Essa lei explica porque o próton não decai em elétron e fóton. Da mesma forma foi proposto o Número Bariônico: $A = 1$ para bárions, $A = -1$ para antibárions e $A = 0$ para as outras partículas.

Além de outras leis de conservação baseadas em simetrias, como a (T) inversão temporal: reação ao contrário, (C) conjugado da carga: inversão da carga, (P) paridade: a abstração de observar a reação em frente ao espelho.

III.21. Interações Fundamentais

As interações entre as partículas são descritas por modelos matemáticos muito bem definidos. Em um jogo de ping-pong a bola é o meio de interação, e a forma como jogador (partícula) age, implica na forma como o outro jogador age. As constantes de acoplamento (parâmetro físico que expressa a intensidade da força de interação) são importantes a considerar.

As forças nucleares forte e nuclear atuam exclusivamente no mundo microscópico, ou seja, em distâncias menores que o raio nuclear (10^{-13} cm). As outras duas manifestam-se em curto e longo alcance. A partir da troca de partículas intermediadoras é estabelecida a interação entre as partículas interagentes, bósons, tal que algumas não vivem mais do que o suficiente para transmitir a informação.

Interação Gravitacional é a força de atração entre porções de matéria, que seria mediada pelo gráviton (ainda não detectado). Por enquanto, a Teoria da Relatividade Geral é a que mais bem descreve a interação gravitacional.



Figura 25: Representação da troca de Grávitons. [1]

Interação Eletromagnética é mediada através do fóton, não afeta o gráviton e o neutrino, e é responsável pela interação entre partículas carregadas. A força eletrostática é atrativa com cargas de sinais opostos e repulsiva em cargas de mesmos sinais, que são características de interações mediadas por spin 1.

No eletromagnetismo, a corrente elétrica gera campo magnético, e fluxo magnético gera campo elétrico, ou seja, essas forças são dois aspectos do mesmo fenômeno.



Figura 26: Representação da troca de Fótons. [1]

Interação Fraca é responsável pela troca de "sabores" das partículas. É transmitida pelos bósons de gauge W^- , W^+ , Z^0 , que possuem alcance ($10^{-17}m$) devido serem muito massivos.

Explica os processos nucleares de decaimento radioativo. Um exemplo disso é o decaimento β , que pode ser reinterpretado pela ótica das partículas elementares, quando um nêutron fora do átomo, o bóson W^- interage com quark down transformando em quark up (muda o sabor do quark), o hádron torna-se um próton, depois o bóson decai em elétron e neutrino do elétron.

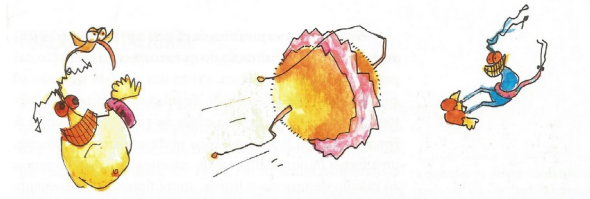


Figura 27: Representação da troca de bósons W. [1]

Interação Forte mantém a coesão nuclear e os núcleons juntos. Atua em curtas distâncias no interior do núcleo e é explicada pela QCD. A título de exemplo, os prótons do núcleo iam se repelir devido a força eletromagnética se não fosse a força forte. É intermediada pelos glúons.

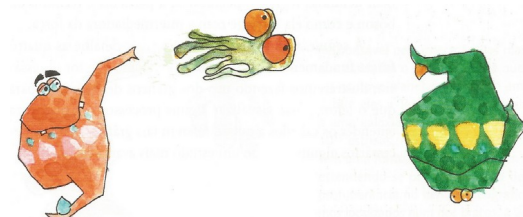


Figura 28: Representação da troca de Glúons. [1]

IV. Conclusão

A Física de Partículas teve início no século XX, no qual houve a descobertas de partículas elementares, ao passo que eram desenvolvidas teorias físicas capazes de descrevê-las. A Eletrodinâmica Quântica, a mais bem sucedida no século XX, portanto, o Modelo Padrão da Física de Partículas é considerado um pilar da Física Teórica.

Ela pode inclusive levar à reformulação da Relatividade Geral como teoria gravitacional. Ainda com lacunas a serem trabalhadas, uma delas é a Força Gravitacional, que a priori, sem comprovação experimental, seria intermediada pelo Gráviton.

V. Agradecimentos

Deixo meus agradecimentos à professora Vanessa Carvalho de Andrade do Instituto de Física da Universidade de Brasília pela orientação. Também a universidade, o Programa de Iniciação Científica vinculado ao Decanato de Pós-Graduação pela oportunidade de

trabalhar como não bolsista. E por fim o grupo de orientandos da professora pelas reuniões e *feedbacks*.

Referências

- [1] Maria Cristina Batoni Abdalla. *O discreto charme das partículas elementares*. 1ª ed. Ilustrações de Sérgio Kon. São Paulo: Editora Unesp, 2006. isbn: 85-7139-641-8.
- [2] Anna Maria Freire Endler. *Introdução à Física de Partículas*. 1ª ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2010. isbn: 978-85-7861-066-1.
- [3] Maria Cristina Batoni Abdalla. *Sobre o discreto charme das partículas elementares*. Disponível em: <<https://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/charme.pdf>> – acesso em 05 de Outubro de 2022.
- [4] José Abdalla Helayel-Neto Thales Costa Soares Humberto Belich Jr. *Física de Partículas vista pelas Interações Fundamentais e Formação de Professores*. 1ª ed. Ilustrações Adriano dos Santos. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2018. isbn: 978-85-7861-526-0.



Buracos Negros de Schwarzschild e de Kerr: uma abordagem usando Python

Schwarzschild and Kerr black holes: an approach using Python

GILSON WURZ^{*1}, VANESSA CARVALHO ANDRADE^{†2}

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília

Resumo

Apresentamos nessa pesquisa os principais apontamentos históricos acerca da importância do estudo dos quatro modelos de buracos negros. Mais adiante poderá entender como funciona a evolução estelar, formação e estrutura dos buracos negros analisando as componentes da métrica de Schwarzschild, a circunferência do horizonte de eventos, a distância própria, o tempo próprio, horizonte de eventos, a esfera de fótons, o disco de acreção, singularidade e singularidade nua, anel de Einstein e cruz de Einstein para esse modelo geométrico. Já para o modelo com simetria axial de Kerr será estudada as componentes da métrica que levam ao tempo próprio, a distância própria, a órbita de partículas, horizonte de eventos, a ergoregião, superfície de redshift infinito, censura cósmica para o caso em que $r > 2M$, o limite estático, a sombra de um buraco negro de Kerr. Disponibilizou-se um filtro para análise do perfil de um buraco negro de Schwarzschild e de Kerr da Agência Espacial Européia. As simulações foram criadas em Python por meio de alguns pacotes especiais para a Teoria da Relatividade Geral e estão inseridas na íntegra no apêndice para eventual consulta. Adotou-se ainda as unidades naturais para descrever as métricas de Schwarzschild e de Kerr, sendo ambas munidas de assinatura métrica $(-, +, +, +)$.

Palavras-chave: Schwarzschild. Kerr. Buraco Negro.

Abstract

In the present work, the reader will be able to study the main historical notes about the importance of studying the four models of black holes. Later you will be able to understand how stellar evolution, formation and structure of black holes works by analyzing the components of the Schwarzschild metric, the circumference of the event horizon, the proper distance, the proper time, the event horizon, the photon sphere, the disk accretion, singularity and naked singularity, Einstein ring and Einstein cross for this geometric model. For the Kerr axial symmetry model, the components of the metric that lead to eigentime, eigendistance, particle orbit, event horizon, ergoregion, infinite redshift surface, cosmic censorship will be studied in the case where $r > 2M$, the static limit, the shadow of a Kerr black hole. A filter for analyzing the profile of a Schwarzschild

^{*}gilsonwurz@gmail.com

[†]vcandrade@unb.br

and Kerr black hole from the European Space Agency was made available. The simulations were created in Python using some special packages for the General Theory of Relativity and are fully included in the appendix for possible consultation. The natural units were also adopted to describe the Schwarzschild and Kerr metrics, both with the metric signature $(-, +, +, +)$.

Keywords: Schwarzschild. Kerr. Black Hole.

I. INTRODUÇÃO

Em 1783, o físico inglês John Michell (1724-1793) propôs que uma estrela possui massa suficientemente grande havendo um limite onde a luz não pode escapar, ou seja, quanto maior o planeta ou estrela, maior será a sua velocidade de escape até alcançar a velocidade da luz. A estrela emanará tanto brilho que será impossível de enxergá-lo. Essa foi a primeira definição de um buraco negro curvando o trajeto da luz.

Michell postulou que a estrela teria massa igual a

$$M_{\text{estrela negra}} = (500)^3 M_{\text{Sol}} = 1,25 \times 10^8 M_{\text{Sol}}. \quad (1)$$

Na equação (1), M_{Sol} é igual a $1,99 \times 10^{30}$ kg.

O tamanho de uma estrela é proporcional ao seu raio e haverá uma distância radial máxima para que a curvatura da luz surja. Michell descobriu a ideia primeva do horizonte de eventos

A hipótese de Michell de uma estrela que deformasse a geometria local foi negligenciada, pois objetos que possuem tanto brilho que nem podem ser vistos foi algo inaceitável para a época.

Sob a orientação de Leonhard Euler, Lagrange desenvolveu as equações que hoje são muito usadas em Mecânica Analítica e chamadas de Equações de Euler-Lagrange e muito utilizadas em Mecânica Relativística por meio do estudo do cálculo da geodésica, que é o caminho mais curto entre dois pontos podendo ser uma linha reta ou ainda uma curva geométrica.

No século XIX percebeu-se que os conceitos de espaço e tempo absolutos da Teoria da Gravitação Universal seriam melhor formulados após a unificação das equações do eletromagnetismo pelo físico britânico James Clerk Maxwell (1831-1879) e isso ocorreu em um momento em que nascia um novo ramo da Matemática que estava sendo formulada pelo matemático Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866), a geometria riemanniana como mencionado.

A geometria euclidiana faz uso de uma ferramenta muito importante para calcular a distância entre dois pontos em um espaço tridimensional, mas utilizando a notação diferencial, de modo que a distância entre dois pontos muito próximos é dada pela soma dos quadrados dos deslocamentos infinitesimos projetadas em cada eixo ortogonal.

Albert Einstein formulou sua Teoria da Relatividade Restrita (TRR) para descrever a estrutura espaço-tempo sentindo a necessidade de extrapolar suas ideias colocando a gravidade em sua teoria, formulando em 1915 a TRG, dando conta de explicar como os

corpos massivos deformam a geometria local e como a gravidade pode alterar a noção de tempo para um corpo nas proximidades desse objeto massivo. Einstein levou um certo tempo para adequar a gravidade usando geometria diferencial de Riemann em sua Teoria da Relatividade Geral (TRG), mas obteve êxito tão profundo que suas teorias são provadas a todo momento.

Karl Schwarzschild, que trabalhava nas trincheiras da Primeira Guerra Mundial, usou seu tempo vago para descobrir qual seria a geometria mais simples que desse conta de explicar as equações de campo de Einstein e verificou que a esfera perfeitamente simétrica e estática e sem carga elétrica seria a mais ideal. Os cálculos apresentados por Schwarzschild corroboraram com as ideias primitivas de Michell.

Devido a essa solução simétrica e estática para um corpo perfeitamente esférico, estipulamos que haverá uma região ou um limite geométrico onde nada ou nem mesmo a luz consegue escapar, causando fortes forças de maré e fazendo com que o tempo para quem estivesse nas suas proximidades passasse mais devagar podendo até parar, devido os postulados pela TRG. A essa região limite, chamamos de *horizonte de eventos*. Na região interior ao horizonte de eventos chamamos de singularidade e percebemos que temos dificuldades em provar quais são os fenômenos que ali ocorrem, pois os nossos instrumentos conseguem observar somente até o horizonte de eventos desse corpo simétrico e estático.

Objetos mais próximos ao horizonte de eventos terão uma velocidade de escape próxima a da velocidade da luz ou igual a da luz, enquanto que objetos muito mais afastados, velocidades muito mais baixas. A essa região geométrica, limite para uma velocidade de escape igual a da velocidade da luz, que também chamamos de horizonte de eventos chamaremos de *raio de Schwarzschild*, que pode ser extraído de um dos coeficientes da métrica que Schwarzschild derivou das equações de campo de Einstein, cuja equação é dada por

$$r_{\text{Sch}} = 2M, \quad (2)$$

onde na equação (2) M é a massa do buraco negro.

O raio de Schwarzschild para $M_{\text{Sol}} = 1,9891 \times 10^{30}$ kg é de 2,9542 km, para 2 massas solares igual a 5,9084 km e assim por diante.

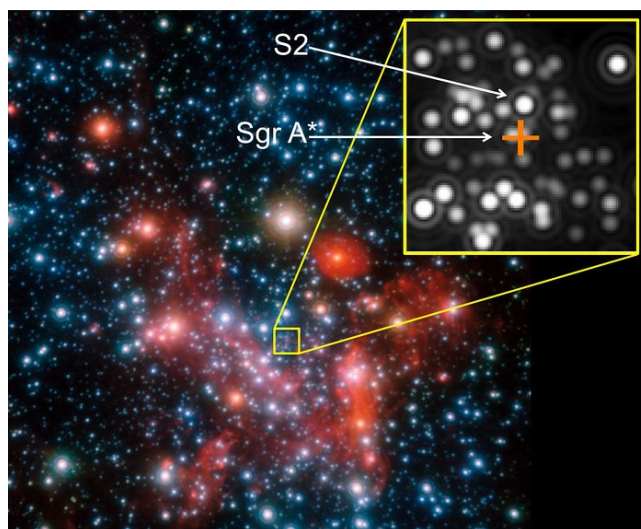
Em 1916, os físicos Hans Jacob Reissner e Gunnar Nordström encontraram de forma totalmente independente uma outra solução para as equações de campo de Einstein, mas para o caso de um buraco negro perfeitamente esférico, simétrico, e com carga elétrica.

Três anos mais tarde, em 29 de maio de 1919 duas equipes estavam prontas para testar a TRG formando duas expedições, uma em Sobral, executadas por Andrew Claude de la Cherois Crommelin e Charles Rundle Davidson e outra na Ilha de Príncipe, liderada por sir Arthur Eddington com a ajuda de Edwin Turner Cottingham e a expedição que teve seus equipamentos instalados em Sobral conseguiu registrar suas fotos com os equipamentos levados a campo.

As equipes perceberam que as estrelas da constelação das Híades estavam deslocadas de 1,75 segundos de arco. Esse ângulo de deflexão dos raios provenientes das Híades eram os mesmos previamente calculados meses antes da caravana se instalar nas cidades onde o eclipse foi visto.

Uma outra solução para buracos negros com momento angular foi solucionada por Roy

Figura 1: As regiões centrais da nossa Galáxia sendo observadas pelo instrumento NACO montado no Very Large Telescope do ESO. O objeto central possui massa de 4 milhões de vezes a massa do Sol e está sinalizada com uma cruz na cor laranja.



Fonte: Créditos: ESO/MPE/S. Gillessen et al.

Patrick Kerr em 1963. Sua geometria recai no espaço-tempo de Schwarzschild, apresentando simetria esférica e um horizonte próximo do horizonte de eventos para um raio de Schwarzschild. Porém, quando o buraco negro de Kerr mantém seu momento angular, apresenta um anel girante que faz com que o próprio espaço-tempo se deforme tão severamente que nessa região qualquer objeto que entre nele observa a criação da formação do próprio buraco negro antes mesmo do colapsado.

Em seu processo evolutivo, os buracos negros estelares se formam a partir de estrelas supermassivas que entram em colapso e isso é um forte indicador de que buracos negros também podem ter rotação, pois todas as estrelas apresentam certa quantidade de momento angular. Os buracos negros supermassivos podem ser encontrados no interior de diversas galáxias e especialmente nas Galáxias de Núcleo Ativo (GNA).

No interior da nossa galáxia, a Via Láctea, existe uma fonte de rádio compacta chamada de Sgr A* que está associada a um buraco negro supermassivo. A observação de estrelas próximas dessa região indica fortemente um buraco negro de Kerr que está submetendo-as a um campo gravitacional gerado por um objeto compacto de milhões de massas solares.

As observação de Sgr A*, com a ajuda do telescópio Chandra de raios X, nos ajudou a entender o seu comportamento. A figura (1), em infravermelho, possui cerca de 2 anos-luz em cada lado. A região central foi ampliada para visulizar mais claramente a estrela Sgr A* e percebemos que houve uma mudança repentina no brilho dos raios X que provavelmente veio da energia liberada por um pedaço de algum material do tamanho de um cometa que havia sido dilacerado por forças de maré antes de desaparecer da frente do buraco negro.

Em 1960, enquanto as observações acerca de Sgr A* ocorrem, uma candidata a buraco

Figura 2: A esquerda a estrela Cygnus X-1 registrada pelo telescópio Chandra na faixa do óptico e ao lado uma representação artística de Cygnus X-1. A estrela azul perde sua massa, que se dirige para o plano do disco de acreção e apresenta sua coloração em tons de laranja e vermelho em torno do horizonte de eventos, região limite, onde a massa canibalizada é sugada.



Fonte: Créditos: NASA.

negro, a estrela Cygnus X-1, é descoberta pelo satélite de raios-X Uhuru, sendo composta de um conjunto binário de estrelas, uma com 19 massas solares e outra com 15 massas solares.

Assim, como apresentado na figura 2, Cygnus X-1 é uma estrela binária cuja interação com sua companheira, variável gigante, apresenta um disco de acreção muito destacado. Seu plano de ejeção de material nuclear é dado perpendicularmente ao plano do disco.

A figura acima e a esquerda mostra a região do óptico obtida pelo telescópio espacial CHANDRA e a direita podemos visualizar uma representação artística da estrela, na qual é possível identificar o disco de acreção gerado pelo buraco negro.

Podemos afirmar que a década de 1960 foi considerada a década de ouro para as pesquisas acerca dos buracos negros, até então, considerados apenas curiosidade geométrica.

No ano de 1970, uma equipe de astrônomos conseguiu registrar o quasar Q0957+561 e perceberam que o espaço-tempo não era plano em sua volta, mas arqueado, sendo o primeiro sinal de uma curvatura causada por uma lente gravitacional.

Na mesma década, Stephen Hawking desenvolveu seus estudos sobre o que é conhecido hoje por *temperatura de Hawking*, cuja equação é dada por:

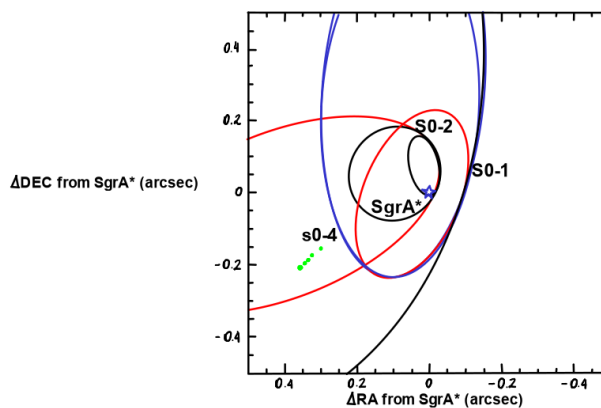
$$T = \frac{\hbar}{4kM}, \quad (3)$$

como

- k é a constante de Boltzmann;
- $\hbar$ é a constante de Planck dividida por 2π ;
- M é a massa do corpo que emite a temperatura T

Hawking explicou a relação da entropia com a temperatura de um buraco negro. Jacob David Benkentein, tido como o *patriarca da termodinâmica de buracos negros*, postulou que bu-

Figura 3: Soluções orbitais para as estrelas S0-1, S0-2 e S0-4 em torno da região dinâmica da Via Láctea, Sgr A.



Fonte: Créditos: ESO/MPE/S. Gillessen et al.

racos negros deveriam possuir entropia e, portanto, temperatura, porém Benkenstein jamais forneceu uma explicação fundamentada nas bases da Física para melhor entendimento da teoria dos buracos negros.

Nas proximidades do horizonte de eventos ocorre a aniquilação de partículas reais por partículas virtuais provenientes do interior do buraco negro formando o que chamamos de *aniquilação por flutuações quânticas*. Nessa região o campo gravitacional é tão intenso que ocorrem perturbações no vácuo em escalas subatômicas formando a criação de pares de partículas-antipartículas.

Na figura (3) mostramos a solução orbital das estrelas S0-1, S0-2 e S0-4 em torno de Sgr A*. Por meio da dinâmica apresentada por essas três estrelas conseguimos determinar a massa do buraco negro usando a terceira lei de Kepler.

Enquanto Hawking publicava seus estudos sobre os processos termodinâmicos relacionados aos buracos negros, em 1988 foi detectada a primeira observação de um anel de Einstein pela fonte de rádio MG1131+0456 e após isso, mais de vinte desses anéis de Einstein também foram detectados pelo Telescópio Espacial Hubble em conjunto com radiotelescópio Merlin ¹.

O anel de Einstein é gerado por uma lente gravitacional perfeitamente esférica na qual uma galáxia de fundo está perfeitamente alinhada com o sistema observador-fonte-galáxia. Como o alinhamento é quase perfeito forma-se um objeto na forma de anel e muito brilhante, sendo possível de observar apenas com telescópios de grande abertura, tal como o Hubble.

As ondas gravitacionais são ondulações geradas no espaço-tempo devido a colisão de duas fontes supermassivas e podem ser detectados em superfície terrestre usando interferometria a laser.

Fazendo uso desse aparato científico, no ano de 2015, o experimento LIGO ², em consonância com a Teoria da Relatividade Geral de Einstein registrou as primeiras ondas

¹Multi-Element Radio Linked Interferometer Network, do inglês.

²Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

Figura 4: Buraco negro da galáxia M87.



Fonte: Créditos: Event Horizon Telescope (EHT).

gravitacionais geradas por dois buracos negros de massas distintas. Um com 36 massas solares e outro com 29 massas solares.

A figura (4) mostra o resultado obtido pela equipe do EHT. Nela verificamos a existência de um buraco negro com carga polarizada.

A equipe de cientistas do Evento Horizon Telescope, EHT, levantou uma série de dados do buraco negro existente na constelação M87 e obteve a sombra do corpo massivo, mostrando que esse objeto colapsado possui cerca de seis bilhões de massas solares, a aproximadamente 33 milhões de anos-luz do Sistema Solar.

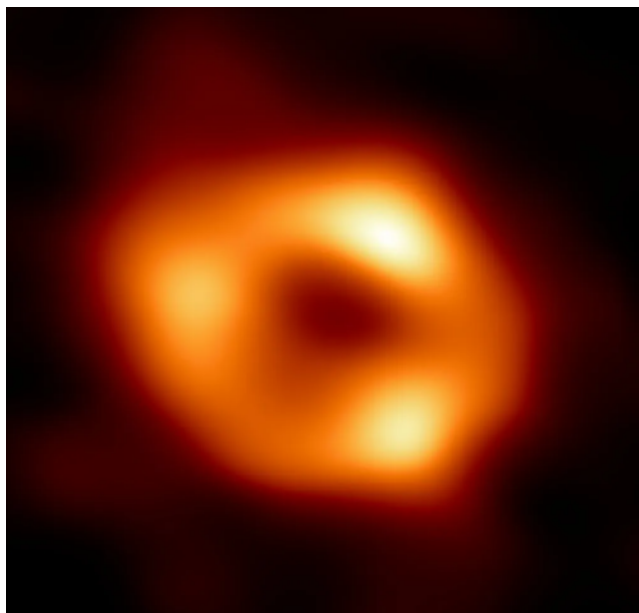
A figura (4) obtida pela equipe do EHT possibilita um estudo mais ampliado sobre o campo elétrico do buraco e foi desenvolvido por cerca de 300 colaboradores que fazem parte dos cientistas por trás da obtenção da primeira imagem de M87.

Assim, a luz que vemos próxima do horizonte de eventos ocorre devido as cargas polarizadas e chegam aos nossos olhos diferentemente daquelas que orbitam um buraco negro de Schwarzschild, sem carga e rotação.

A imagem (5) é a segunda fotografia de um buraco negro supermassivo e a primeira imagem de SgrA*. É a última fotografia mais atual acerca das pesquisas relacionadas a buracos negros pelo EHT. A fotografia, em si, revelou uma baixa atividade em torno do buraco negro em SgrA* com respeito a fotografia de M87, confirmando os cálculos da TRG de Einstein, onde o corpo deve possuir simetria mais próxima a de uma esfera, caso sua rotação seja mais lenta que em buracos negros com grande momento angular. Percebemos também que o buraco negro apresenta-se um pouco inclinado em relação ao ângulo de visada dos observatórios astronômicos usados para a coleta de dados, o que também é descrito pela TRG.

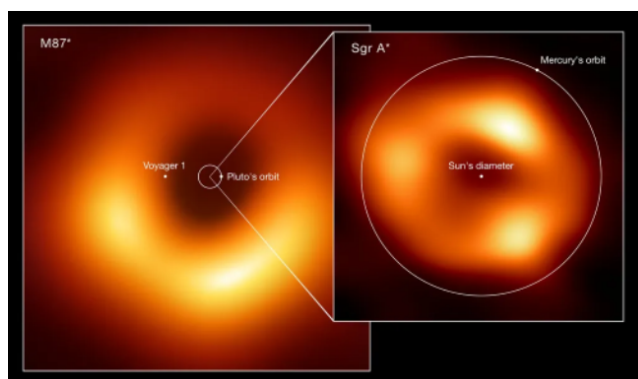
A imagem (6) mostra o tamanho das sombras dos buracos negros M87 e SgrA*. M87

Figura 5: Primeira fotografia de um buraco negro referente a SgrA* e segunda de um buraco negro supermassivo.



Fonte: Créditos: ESO.

Figura 6: Comparação entre os tamanhos das sombras dos buracos negros M87 e SgrA*.



Fonte: Créditos: ESO.

possui seu horizonte de eventos próximo da distância da sonda Voyager com relação ao Sol, enquanto que o horizonte de eventos de SgrA* é inferior a órbita de Mercúrio.

Abordaremos, a seguir, os diferentes tipos de buracos negros, apresentando a estrutura que os diferenciam, os fenômenos físicos envolvidos para a sua formação e quais são suas respectivas métricas usando a assinatura métrica $(-, +, +, +)$.

II. BURACO NEGRO DE SCHWARZSCHILD

O buraco negro de Schwarzschild possui simetria esférica e estática. Não apresenta carga nem momento angular e foi descrito pela primeira vez por Karl Schwarzschild. Em sua estrutura encontramos um horizonte de eventos, singularidade, disco de acreção e esfera de fótons. É o tipo de buraco negro mais simples para o estudo das equações de campo de Einstein, porém é o caso mais irrealista de um buraco negro, pois grande parte das estrelas antes do colapso gravitacional apresenta algum tipo de rotação.

III. BURACO NEGRO DE REISSNER-NÖRDSTROM

O buraco negro de Reissner-Nördstrom possui simetria esférica e também é estática, porém apresenta carga em sua estrutura. Sua descoberta ocorreu de forma simultânea por Hans Reissner e Gunnar Nördstrom. Apresenta um horizonte de eventos, uma singularidade, um disco de acreção e esfera de fótons. Sendo uma extensão de um buraco negro de Schwarzschild, também não apresenta muita significação para estudo de estrelas após o seu colapso devido a rotação que é preservada.

IV. BURACO NEGRO DE KERR

O buraco negro de Kerr possui simetria axial e não é estático. Em sua morfologia não é possível encontrar quaisquer tipos de cargas elétricas, mas apresenta momento angular característico. Foi descrito pela primeira vez pelo astrofísico Roy Kerr. Apresenta dois horizontes (um horizonte de Cauchy e um horizonte de eventos), singularidade, ergoregião, disco de acreção e duas esferas de fótons. É o modelo mais real de buraco negro para estudos em astrofísica, uma vez que após o colapso das estrelas é conservada sua rotação, mas não conservam grande parte da sua carga elétrica.

V. BURACO NEGRO DE KERR-NEWMAN

O buraco negro de Kerr-Newman é uma extensão do buraco negro de Kerr, pois apresenta em sua constituição carga elétrica. Possui em sua estrutura simetria axial, momento angular e carga elétrica. Foi descrito por Roy Patrick Kerr em conjunto com Ezra Newman. Apresenta dois tipos de horizonte de eventos, singularidade, ergoregião, disco de acreção e duas esferas de fótons. Buracos negros desse tipo não possuem grande relevância para estudos em astrofísica, uma vez que estes objetos não apresentam grandes quantidades significativas de carga elétrica.

Tabela 1: Coeficientes da métrica de Schwarzschild.

$g_{\mu\nu}$	Expressão	$g_{\mu\nu}$	Expressão
g_{tt}	$-\left(1 - \frac{r_S}{r}\right)$	g_{rr}	$\left(1 - \frac{r_S}{r}\right)^{-1}$
$g_{\theta\theta}$	r^2	$g_{\varphi\varphi}$	$r^2 \sin^2 \theta$

VI. BURACO NEGRO DE SCHWARZSCHILD

Adotamos a assinatura métrica $(-, +, +, +)$, onde a coordenada temporal possui sinal negativo, enquanto que as demais coordenadas espaciais, positivo. Assim, a métrica de Minkowski será dada por

$$ds^2 = -dt^2 + dr^2 + d\theta^2 + d\varphi^2. \quad (4)$$

No caso do espaço-tempo simetricamente esférico, o mesmo deve ser invariante sob rotações ou mudança de coordenadas. Na solução de vácuo de Schwarzschild devemos observar a condição que o tensor de energia momento deve ser nulo, ou seja, $T_{\mu\nu} \equiv 0$, o mesmo deve ser válido para a constante cosmológica e essas condições implicam que o tensor de Ricci, $R_{\mu\nu}$ seja nulo, bem como seu escalar, R .

Escreveremos o raio de Schwarzschild como

$$r_S = 2M \quad (5)$$

e a métrica escreveremos como sendo

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_S}{r}\right)dt^2 + \left(1 - \frac{r_S}{r}\right)^{-1}dr^2 + r^2d\theta^2 + r^2\sin^2\theta d\varphi^2. \quad (6)$$

Os coeficientes da métrica de Schwarzschild são apresentados na tabela 1

VII. A DISTÂNCIA PRÓPRIA PARA O ESPAÇO-TEMPO DE SCHWARZSCHILD

Agora, para determinar a distância própria adotaremos $dt = d\theta = d\varphi = 0$, e substituiremos na métrica de Schwarzschild do seguinte modo

$$\begin{aligned} ds^2 &= g_{tt}(0)^2 + g_{rr}dr^2 + r^2(0)^2 + r^2\sin^2\theta(0)^2 \\ \Delta s &= \sqrt{r^2 - r_{Sch}r} + r_{Sch} \ln \left| \frac{\sqrt{r - r_{Sch}} + \sqrt{r}}{\sqrt{r_{Sch}}} \right|, \end{aligned}$$

que explica a deformação da geometria proveniente do colapso gravitacional de uma estrela em seu estágio final.

VIII. O TEMPO PRÓPRIO PARA O ESPAÇO-TEMPO DE SCHWARZSCHILD

Determinaremos o tempo próprio $\Delta\tau$ considerando $dr = d\theta = d\phi = 0$ e calcularemos do seguinte modo

$$\Delta\tau = \int d\tau$$

$$\Delta\tau = \sqrt{1 - \frac{2M}{r}} \Delta t.$$

Percebemos que o tempo passa mais devagar perto do horizonte de eventos.

Consideremos agora as coordenadas 3km e 4km. A primeira referente ao raio de Schwarzschild de uma estrela qualquer e uma segunda coordenada afastada apenas 1 km desse horizonte de eventos. Para entendermos como o tempo se passa nas proximidades do horizonte de eventos realizamos o seguinte cálculo.

$$\Delta\tau = \sqrt{1 - \frac{r_{\text{Sch}}}{r}} \Delta t$$

$$\Delta\tau = 0,5h.$$

Ou seja, nas proximidades do horizonte de eventos se passaram apenas 30 minutos enquanto que outro relógio mais afastado já marcou em seus ponteiros 1 hora.

Se o relógio for afastado do horizonte de eventos e for colocado na coordenada $r = 12$ km, o tempo será mais próximo de uma hora e para ser mais exato, será de 0,86 horas, ou um pouco mais de 51 minutos.

Se o relógio for afastado mais ainda, chegará um ponto em que $\Delta\tau \rightarrow \Delta t$ e isso ocorrerá quando $r \rightarrow +\infty$.

IX. HORIZONTE DE EVENTOS DE SCHWARZSCHILD

Na proximidade de um buraco negro de Schwarzschild, o forte campo gravitacional distorce o espaço-tempo de modo que a distância até o seu centro tende ao infinito.

O horizonte de eventos é uma região geométrica imaginária que separa o Universo observável da parte interna de sua estrutura. A essa região imaginária chamaremos de horizonte de eventos, local ao qual toda a informação do Universo é perdida, em princípio.

Nas proximidades do horizonte de eventos muitos fenômenos físicos ocorrem. O forte campo gravitacional se dilata tão acentuadamente que o tempo nessa região tende a zero. Assim, se estamos infinitamente distante desse local, o tempo passará de forma que estamos habituados em nosso dia a dia. No entanto, se estamos próximo do horizonte de eventos, o nosso relógio apresentará seus tic tacs um pouco mais espaçados para quem nos observa de um local muito longe dali e conforme o tempo vai tendendo a zero, o nosso corpo vai se tornando cada vez mais delgado, espaguetificando-se devido as enormes forças de maré geradas pelo forte campo gravitacional gerado pelo buraco negro. Um fio cilindro de

Figura 7: Buraco negro de Schwarzschild mostrando seu disco de acreção, horizonte de eventos e singularidade.



Fonte: Créditos: ESO, ESA/Hubble, M. Kornmesser.

diâmetro igual a sua longitude, poderá se tornar um fio bastante delgado se a região inferior do cilindro estiver voltada para o centro do buraco negro. Essa deformação será maior a medida que o mesmo avança na direção do centro quando passa pelo horizonte de eventos.

Considerando a simetria radial existente em um buraco negro, admitimos que a velocidade de escape nas redondezas do horizonte de eventos será igual a velocidade da luz e quando um fóton se aproxima do horizonte e atinge a velocidade da luz, seu tempo próprio deverá passar muito mais lentamente do que para um corpo mais afastado daquela região.

IX.1. Horizonte de eventos para o buraco negro de Schwarzschild

O horizonte de eventos é igual ao raio de Schwarzschild para buraco negros estáticos e sem carga elétrica.

O raio de Schwarzschild é definido pela equação

$$r_{Sch} = 2M, \quad (7)$$

que possui dependência da massa do objeto colapsado.

Símbolos e seus significados

- r_{Sch} : raio de Schwarzschild;
- M : massa do buraco negro.

Acima, apresentamos uma figura que mostra um buraco negro de Schwarzschild com o horizonte de eventos, o disco de acreção e singularidade. Essas duas últimas características físicas abordaremos em seguida.

X. DISCO DE ACREÇÃO

Daremos o nome de disco de acreção à estrutura que é formada pela matéria em movimento orbital em torno do buraco negro.

XI. SINGULARIDADE

Nessa região, devido o campo gravitacional intenso, toda a matéria do buraco negro é concentrada em uma região geométrica tão pequena que a densidade tende ao infinito devido o raio ser tão pequeno dessa esfera gravitante.

O espaço-tempo onde a singularidade está representada é tão deformado que cria um poço tão profundo que qualquer corpo que cruza o horizonte de eventos trará para dentro dessa singularidade. Na singularidade, muitas propriedades geométricas tendem ao infinito.

Dizemos que a singularidade é a parte principal do buraco negro devido toda sua massa se encontrar nessa região.

XII. SINGULARIDADE NUA

Todo buraco negro deve conter um horizonte de eventos que permita indicar o ponto de não retorno para o mundo real, porém existe o conceito de um buraco negro que colapsou e não deu conta de formar esse perímetro limite para que a luz entenda até onde possa ir. Assim, existe a possibilidade da luz se aproximar da singularidade de uma estrela colapsada e ainda conseguir retornar para o mundo real devido a ausência do horizonte de eventos. A esse fenômeno damos o nome de singularidade nua, pois o horizonte de eventos não está escondendo a singularidade existente, mas tornando-a visível para qualquer observador distante.

XIII. ESFERA DE FÓTONS PARA O ESPAÇO-TEMPO DE SCHWARZSCHILD

Uma esfera de fótons é uma região geométrica onde a gravidade é tão fortíssima que os fótons são obrigados a viajar em órbitas. O raio da esfera do fóton, que também é o limite inferior de qualquer órbita estável, é, para um buraco negro de Schwarzschild:

$$R_{\text{Esf.}} = 3M = \frac{3}{2}R_{\text{Sch.}} \quad (8)$$

A equação (8) é também chamada de *Equação da órbita do último fóton*, pois depois disso não há mais meios físicos que façam com que esse último fóton consiga retornar.

Entretanto, como percebemos, há uma região geométrica entre a órbita do último fóton com o raio de Schwarzschild que é dada pela média aritmética entre as duas regiões.

Em uma órbita específica a luz descreverá uma órbita circular. Se o fóton se aproximar mais um pouco do horizonte de eventos surgirá uma órbita espiralada. Enquanto que se o mesmo se afastar do horizonte de eventos um pouco mais poderá ter uma órbita hiperbólica na qual será lançado novamente para o espaço.

XIV. ANEL DE EINSTEIN

O anel de Einstein, também chamado de anel de Einstein-Chwolson ou anel de Chwolson, é formado quando a luz de uma galáxia passa por uma região de campo gravitacional intenso devido a um objeto massivo a caminho da Terra. Devido ao efeito de lenteamento gravitacional, a luz deverá ser defletida, fazendo com que seus raios pareçam vir de lugares distintos. Se o conjunto fonte/lente/observador estiverem todos alinhados, a luz formará um anel.

Na década de 1912, Einstein previu a curvatura da luz por um objetivo massivo, porém o físico russo Orest Chwolson foi o primeiro cientista a mencionar o efeito de anel em 1924 e por esse motivo, os anéis de Einstein são também chamados de anéis de Einstein-Chwolson.

Entretanto, devido o alinhamento fonte/lente/observador nunca ser perfeito, os anéis de Einstein-Chwolson apresentam anéis incompletos. São raros os anéis completos devido o alinhamento não ser perfeito.

O tamanho do anel é calculado por meio do raio de Einstein, cuja equação é dada, em radianos, por

$$\theta = \sqrt{\frac{4MD_{LF}}{D_L D_F}}. \quad (9)$$

onde

- M é a massa da lente;
- D_L é a distância do diâmetro angular da lente;
- D_F é a distância do diâmetro angular à fonte e
- D_{LF} é a distância angular do diâmetro entre a lente e a fonte.

Devido a curvatura da geometria espaço-temporal $D_{LF} \neq D_F - D_L$

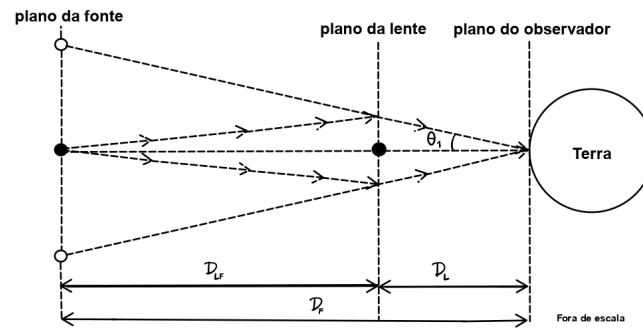
O fenômeno do lenteamento gravitacional prova que a TRG está correta e nos fornece imagens espetaculares e que dizem respeito a quantidade de massa existente para a formação desse conjunto.

Um dos muitos anéis de Einstein foi estudado pela Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2) e Wide Field Camera 3 (WFC3) para um levantamento de dados sobre as lentes gravitacionais.

XV. CRUZ DE EINSTEIN

A cruz de Einstein também é formada pela efeito do lenteamento gravitacional, porém o efeito forma quatro pontas bem distintas, indicando que a lente seja formada por mais corpos massivos colapsados.

Figura 8: Esquema mostrando alinhamento entre fonte/lente/observador para a formação do anel de Einstein.



Fonte:

XVI. BURACO NEGRO DE KERR

Considerando uma esfera simétrica de baixa rotação com tensor energia-momento independente do tempo dentro do objeto teremos um buraco negro estacionário. Nesta circunstância consideraremos perturbações na métrica devido a sua simplicidade, assumindo que o objeto rotaciona rigidamente com velocidade angular $\vec{\Omega}$ e apontando na direção do eixo z positivo e ainda considerando seu momento de inércia I e após algumas simplificações chegaremos na métrica de Kerr para campo fraco:

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{R}\right)dt^2 + \left(1 + \frac{2M}{R}\right)(dR^2 + R^2d\theta^2 + R^2\sin^2\theta d\varphi^2) \quad (10)$$

$$- \frac{4Ma}{R} \sin^2\theta d\varphi dt, \quad (11)$$

onde

$$a \equiv \frac{S}{M} = \frac{I|\vec{\omega}|}{M} \quad (12)$$

é o momento angular por unidade de massa.

Para campos mais fortes a métrica será apresentada em termos das coordenadas de Boyer-Lindquist. Assim,

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{r_{\text{Sch}}r}{\Sigma}\right)dt^2 + \frac{\Sigma}{\Delta}dr^2 - \frac{4Mra\sin^2\theta}{\Sigma}dtd\varphi + \Sigma d\theta^2 + \frac{\mathcal{A}}{\Sigma}\sin^2\theta d\varphi^2,$$

onde Σ, Δ e $\mathcal{A}$ são funções das coordenadas (r, θ) . Trocamos os termos por suas abreviações correspondentes, sendo:

$$\Sigma \equiv r^2 + a^2 \cos^2 \theta \quad (13)$$

$$\Delta \equiv r^2 - 2Mr + a^2 \quad (14)$$

$$\mathcal{A} \equiv (r^2 + a^2)^2 - \Delta a^2 \sin^2 \theta, \quad (15)$$

e

$$r_{\text{Sch}} = 2M \quad (16)$$

representa o raio de Schwarzschild.

Faremos algumas considerações:

- Se o momento angular for idênticamente igual a zero, a solução reduz-se a geometria espaço-temporal de Schwarzschild;
- M represente a massa do buraco negro, tal como representada na geometria de Schwarzschild.
- O parâmetro a corresponde momento angular por unidade de massa do buraco negro.
- No caso em que $r \gg a$ a métrica de Schwarzschild com as coordenadas de Boyer-Lindquist recaem no limite de campo fraco.

Os buracos negros de Kerr não possuem carga elétrica, mas rotacionam em torno do seu eixo, ou seja, possuem momento angular e simetria axial.

XVII. IMPORTÂNCIA DA SOLUÇÃO DE KERR

A solução de Kerr representa um importante avanço para a astrofísica, pois muitos corpos, não compactos antes de colapsarem formando um buraco, apresentam rotações. Desde um asteroide até o buraco negro mais massivo existente no interior da galáxia M87 ou ainda no caso mais recente, o buraco negro SgrA*.

Devido a sua simplicidade, a métrica de Schwarzschild descreve apenas uma curiosidade geométrica para o estudos em astrofísica, pois todos os corpos celestes apresentam rotações em torno de seus eixos imaginários.

A solução de Kerr é uma solução exata de vácuo para as equações de Einstein e representa uma solução mais próxima do real para objetos compactos ou massivos, tais como os buracos negros estelar ou supermassivos existentes no interior das galáxias.

Enquanto a solução de Schwarzschild descreve a geometria espaço-temporal para um objeto esfericamente simétrico, a solução de Kerr descreve a geometria espaço-temporal de um objeto axialmente simétrico.

XVIII. HORIZONTE DE EVENTOS PARA O BURACO NEGRO DE KERR

Como r diminui dentro da região de superfície infinita, a coordenada temporal do tensor métrico será positiva (MOORE, 2013).

A superfície dada por $(g_{t\varphi})^2 - g_{tt}g_{\varphi\varphi} = 0$ corresponde ao horizonte de eventos em um buraco negro de Kerr e reescreveremos para $(r^2 + a^2 - 2Mr) \sin^2 \theta = 0$ ou ainda, percebemos que a coordenada radial é dada por $r_{\pm} = M \pm \sqrt{(M)^2 - a^2}$.

Demonstração:

$$\begin{aligned}(r^2 + a^2 - 2Mr) \sin^2 \theta &= 0 \\ (r^2 + a^2 - 2Mr) \sin^2 \theta &= 0 \sin^2 \theta.\end{aligned}$$

Ajustando os termos obteremos

$$r^2 - 2M \cdot r + a^2 = 0.$$

Os coeficientes para essa equação quadrática são $a_r = 1, b_r = -2M$ e $c_r = a^2$.

Substituindo-os na fórmula de Bháskara encontraremos:

$$r_{\pm} = M \pm \sqrt{M^2 - a^2}.$$

Há duas soluções para o horizontes, uma interior a outra. Considerando que uma é interna a outra, então o horizonte de eventos mais interno será inacessível a um observador. Perceberemos, que se $a \rightarrow 0, r = 2M$ em r_+ .

Variamos o momento angular para identificar como o horizonte de eventos varia e esses resultados são apresentados na tabela 2.

Percebemos que $a \rightarrow 0, r_- \rightarrow 0M$, enquanto que para $a \rightarrow M, r_- \rightarrow 1M$. Assim, para momentos angulares mais proeminentes observamos que o horizonte de eventos de Cauchy, r_- , será maior.

Para esse caso, $a \rightarrow 0, r_+ \rightarrow 2M$, enquanto que $a \rightarrow M, r_+ \rightarrow M$.

XIX. SOMBRA DE UM BURACO NEGRO DE KERR

XIX.1. Observadores locais na geometria de Kerr

A sombra (veja a figura 9) do buraco negro perde seu achatamento conforme reduz seu momento angular. No caso limite, com $a \rightarrow 0$, obtemos um buraco negro de Schwarzschild.

Investigando a sombra de um objeto colapsado, admitiremos que a fonte que emana os raios de luz está infinitamente longe do observador e que seus raios são distribuídos de maneira uniforme. As coordenadas celestes (α, β) do observador são distâncias angulares aparentes da imagem de uma esfera medida da direção da linha de visada. α e β são medidos na direção perpendicular e paralela ao eixo de rotação da esfera celeste, respectivamente.

a	$M - \sqrt{M^2 - a^2}$	a	$M + \sqrt{M^2 - a^2}$
$a = 0,0M$	$0,000M$	$a = 0,00M$	$2,000M$
$a = 0,05M$	$0,001M$	$a = 0,05M$	$1,999M$
$a = 0,10M$	$0,005M$	$a = 0,05M$	$1,995M$
$a = 0,15M$	$0,011M$	$a = 0,15M$	$1,989M$
$a = 0,20M$	$0,020M$	$a = 0,20M$	$1,980M$
$a = 0,25M$	$0,032M$	$a = 0,25M$	$1,968M$
$a = 0,30M$	$0,046M$	$a = 0,30M$	$1,954M$
$a = 0,30M$	$0,063M$	$a = 0,30M$	$1,937M$
$a = 0,40M$	$0,083M$	$a = 0,40M$	$1,917M$
$a = 0,45M$	$0,107M$	$a = 0,45M$	$1,893M$
$a = 0,50M$	$0,134M$	$a = 0,50M$	$1,866M$
$a = 0,55M$	$0,165M$	$a = 0,55M$	$1,835M$
$a = 0,60M$	$0,200M$	$a = 0,60M$	$1,800M$
$a = 0,65M$	$0,240M$	$a = 0,65M$	$1,760M$
$a = 0,70M$	$0,286M$	$a = 0,70M$	$1,714M$
$a = 0,75M$	$0,339M$	$a = 0,75M$	$1,661M$
$a = 0,80M$	$0,400M$	$a = 0,80M$	$1,600M$
$a = 0,85M$	$0,473M$	$a = 0,85M$	$1,527M$
$a = 0,90M$	$0,564M$	$a = 0,90M$	$1,436M$
$a = 0,95M$	$0,688M$	$a = 0,95M$	$1,312M$
$a = 1,00M$	$1,000M$	$a = 1,00M$	$1,000M$

Tabela 2: Tabela mostrando os cálculos para r_- e r_+ .

As coordenadas estão relacionadas a dois parâmetros ξ e η (e ângulo de inclinação i). No espaço-tempo de Kerr, existem duas regiões assintoticamente planas; $r \rightarrow +\infty$ e $r \rightarrow -\infty$.

Assim, uma vez que os raios de luz cruzam para a região de $r < 0$ e vão para o outro infinito ($r = -\infty$), eles nunca voltarão a Terra ($r > 0$).

Como resultado, encontramos uma pequena mancha escura, na direção em que os fótons escapam para $r = -\infty$.

Encontraremos uma curva muito estreita, que corresponde à órbita esférica instável externa. Há outra região escura no caso de uma singularidade nua. Alguns raios de luz que atingem uma singularidade, nunca alcançarão o observador. Na esfera celeste veremos um ponto escuro na direção em que os fótons atingem a singularidade.

Para encontrar a forma aparente, primeiro analisaremos as órbitas dos fótons em um espaço-tempo de Kerr. Existem duas classes importantes de órbitas de fótons para órbitas-sombra que discutiremos.

Se a órbita está no plano equatorial, há uma órbita circular. A órbita é dada pela equação

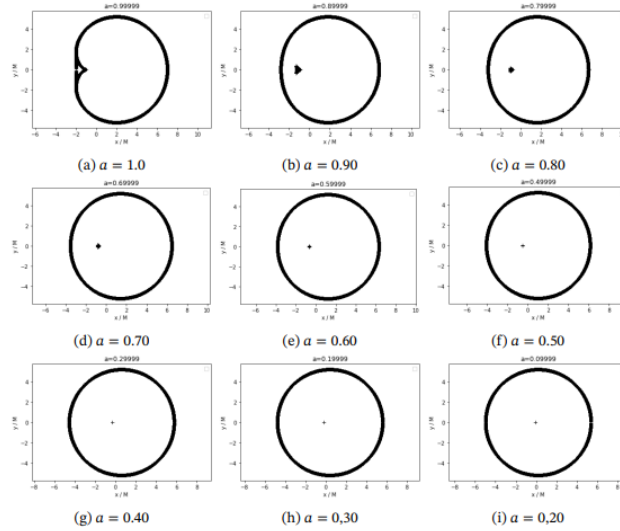
$$\theta = \pi/2, \quad (17)$$

$$\mathcal{R}(r) = 0, \frac{d\mathcal{R}}{dr} = 0. \quad (18)$$

Para um buraco negro, a equação (18) dá o raio da órbita como

$$r = r_{\text{Circ}}^{\pm} := 2M \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2}{3} \cos^{-1} \left(\mp \frac{a}{M} \right) \right] \right\}, \quad (19)$$

Figura 9: A sombra de um buraco negro de Kerr. As coordenadas celestes são medidas em unidades de massa (M) de um buraco negro de Kerr. Para estes subgráficos variamos o momento angular a .



Fonte:

$$\xi_{\text{Circ}}(r_{\text{Circ}}, a, M) = \frac{(r_{\text{Circ}}^{\pm})^2 + a^2}{a} - \frac{2r_{\text{Circ}}^{\pm} \Delta(r_{\text{Circ}}^{\pm}, a, M)}{a(r_{\text{Circ}}^{\pm} - M)}. \quad (20)$$

onde o sinal superior se aplica a órbitas progressivas e o sinal inferior a órbitas retrógradas. Neste caso, o outro parâmetro conservado η desaparece.

As equações (19) obedecem a seguinte equação cúbica (JUNIOR, 2020)

$$r^3 - 6Mr^2 + M^2r - 4a^2M = 0. \quad (21)$$

Apresentamos um gráfico com subgráficos para identificar a variação da órbita esférica de fótons para $a \rightarrow 0$ e para $M \rightarrow 0$.

Se for uma singularidade nua, obtemos uma órbita circular, que é uma órbita retrógrada com raio :

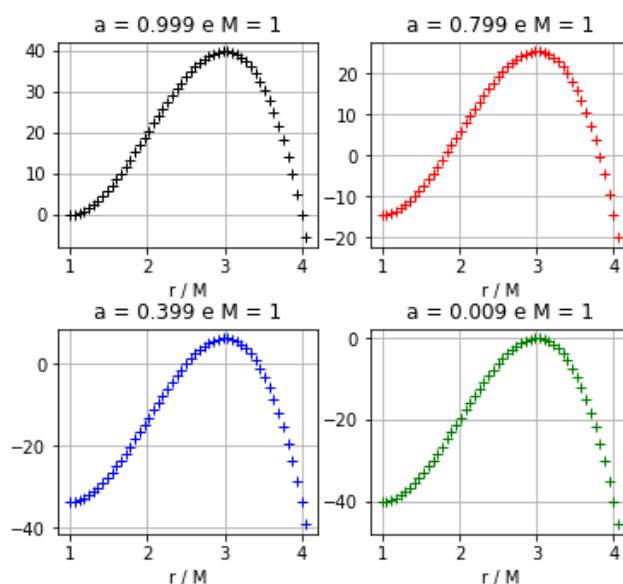
$$r = \tilde{r}_{\text{Circ}}^{(-)} := 2M \left\{ 1 + \cosh \left[\frac{2}{3} \cosh^{-1} \left(\frac{a}{M} \right) \right] \right\}. \quad (22)$$

Com este parâmetro ξ_{Circ} , o fóton pode realizar uma infinita quantidade de voltas no círculo com raio r_{Circ} .

Se $|\xi|$ é ligeiramente maior que $|\xi_{\text{Circ}}^{\pm}|$, o fóton do infinito se aproxima dessa órbita circular, mas volta ao infinito. Por outro lado, se $|\xi|$ é ligeiramente menor que $\xi_{\text{Circ}}^{\pm}$, então o fóton do infinito entra no horizonte (ou atinge um anel de singularidade). Nunca voltará ao infinito ($r = +\infty$). Portanto, ξ_{Circ} fornece uma parte do limite da sombra no plano equatorial.

Para órbitas de fótons mais genéricas, a constante de Carter $\mathcal{Q}$ não desaparece. Tais

Figura 10: *Parâmetro η em termos do raio das órbitas esféricas de fótons ao redor do buraco negro de Kerr. Nesta figura adotamos em a) $a = 0,999$ e $M = 1$, b) $a = 0,799$ e $M = 1$, c) $a = 0,399$ e $M = 1$ e d) $a = 0,009$ e $M = 1$*



Fonte: Simulação em Python. Disponível em <<https://bit.ly/3ptrNeq>>.

órbitas não estão em um plano bidimensional, mas são tridimensionais. Mesmo nesse caso, definiremos uma órbita crítica que nos fornece o limite de uma sombra. Esta órbita crítica é a órbita esférica (instável). Tal órbita será dada por

$$\mathcal{R}(r) = 0, \frac{d\mathcal{R}(r)}{dr} = 0. \quad (23)$$

A solução dessa órbita, r_{Esf} , indica que r deve ser uma constante. Embora a órbita seja tridimensional e possa ser muito complicada, descreverá um movimento com distância radial fixa. Chamamos de órbita esférica as soluções dessas órbitas formando uma família de parâmetros. Portanto, adotando r_{Esf} como o "parâmetro", encontramos dois parâmetros conservados das órbitas esféricas de

$$\zeta_{\text{Esf}}(r_{\text{Esf}}, a, M) = \frac{(r_{\text{Esf}}^{\pm})^2 + a^2}{a} - \frac{2r_{\text{Esf}}^{\pm}\Delta(r_{\text{Esf}}^{\pm}, a, M)}{a(r_{\text{Esf}}^{\pm} - M)}. \quad (24)$$

$$\eta_{\text{Esf}}(r_{\text{Esf}}, a, M) = -\frac{r_{\text{Esf}}^3(r_{\text{Esf}}(r_{\text{Esf}} - 3M)^2) - 4Ma^2}{a(r_{\text{Esf}} - M)^2}. \quad (25)$$

O parâmetro r_{Esf} é formado pela condição existente nas equações (24) e (25).

Inserindo as equações (25) e (24) em

$$\mathcal{J}(\zeta, \eta) := \eta + (a - \zeta)^2. \quad (26)$$

encontra-se a expressão

$$\mathcal{J}(r, M) = \mathcal{J}(r, M) = \frac{4r_{\text{Esf}}^2\Delta(r_{\text{Esf}})}{(r_{\text{Esf}} - M)^2}. \quad (27)$$

Portanto, para órbitas esféricas reais, necessitaremos da condição $\Delta(r_{\text{Esf}}) > 0$, isto é, $r_{\text{Esf}} > r_+$ para um buraco negro, onde

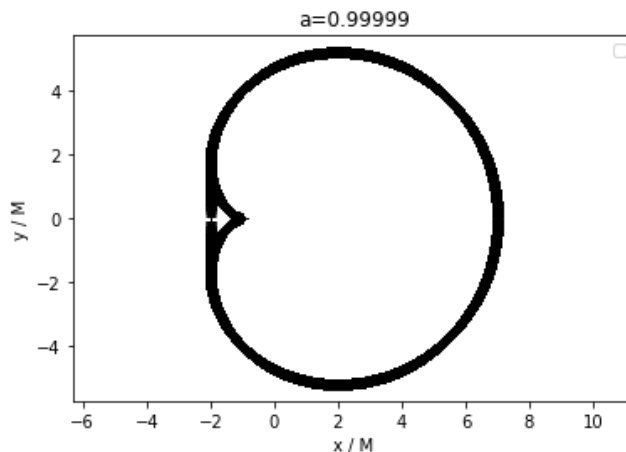
$$r_{\pm} := M \pm \sqrt{M^2 - a^2} \quad (28)$$

são os raios do horizonte, e qualquer raio r_{Esf} para uma singularidade nua. Como não é condição suficiente para a existência de uma órbita esférica, quando desenhemos a sombra do objeto colapsado, verificamos numericamente se a solução de

$$\mathcal{R}(r) = 0, \frac{d\mathcal{R}(r)}{dr} = 0. \quad (29)$$

Segundo Lima Junior et al. (2020) (JUNIOR, 2020) a constante η_{Circ} está relacionada ao movimento na direção da coordenada θ e ζ_{Circ} é o momento angular do fóton em torno do eixo z , por unidade de energia. Quando $\eta_{\text{Circ}} = 0$, as órbitas esféricas de fótons têm seu movimento restrito ao plano equatorial. Além disso, estas órbitas, restritas ao plano equatorial, são descritas no mesmo sentido de rotação do buraco negro, no caso em que $\zeta_{\text{círculo}} > 0$, e no sentido oposto, no caso em que $\zeta_{\text{círculo}} < 0$, constituindo as chamadas órbitas co-girantes e contra-girantes, respectivamente.

Figura 11: A sombra de um buraco negro de Kerr. As coordenadas celestes são medidas em unidades de massa (M) de um buraco negro de Kerr.



Fonte: Simulado em Python e disponível em <<https://bit.ly/3ptrNeq>>.

Os subgráficos menores são as sombras de um buraco negro de Kerr para um observador localizado em uma galáxia muito distante do buraco negro e a 90 graus com relação ao seu plano equatorial.

XIX.2. Observadores locais na geometria de Kerr

O estudo do artigo de Lima et al (2020) (JUNIOR, 2020) fornece-nos as características físicas para observadores locais na geometria de Kerr. no sentido de compreender as características físicas para observador locais na geometria de Kerr e serão apresentadas nessa sessão.

Descreveremos como o observador medirá o quadri-momento de um fóton singular, bem como este observador analisará a sombra de um buraco negro segundo a geometria de Kerr.

Descrevemos um observador com momento angular nulo pela base tetrada

Tabela 3: Base tetrada.

$\hat{e}_t$	$\zeta \partial_t + \gamma \partial_\varphi$	$\hat{e}_r$	$\frac{1}{\sqrt{g_{rr}}} \partial_r$
$\hat{e}_\theta$	$\frac{1}{\sqrt{g_{\theta\theta}}} \partial_\theta$	$\hat{e}_\varphi$	$\frac{1}{\sqrt{g_{\varphi\varphi}}} \partial_\varphi$

Tabela 4: Símbolos e suas respectivas representações.

Símbolo	Expressão
ζ	$\sqrt{\frac{g_{\varphi\varphi}}{(g_{t\varphi})^2 - g_{tt}g_{\varphi\varphi}}}$
γ	$-\frac{g_{t\varphi}}{g_{\varphi\varphi}} \sqrt{\frac{g_{\varphi\varphi}}{(g_{t\varphi})^2 - g_{tt}g_{\varphi\varphi}}}$

Tabela 5: Componentes da métrica de Kerr e suas respectivas expressões.

$g_{\mu\nu}$	Expressão	$g_{\mu\nu}$	Expressão
g_{tt}	$\left(1 - \frac{2Mr}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}\right)$	g_{rr}	$\frac{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}{r^2 - 2Mr + a^2}$
$g_{t\varphi}$	$-\frac{2Mra \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta}$	$g_{\theta\theta}$	$r^2 + a^2 \cos^2 \theta$
$g_{\varphi\varphi}$	$\frac{(r^2 + a^2) - \Delta a^2 \sin^2 \theta}{r^2 + a^2 \cos^2 \theta} \sin^2 \theta$		

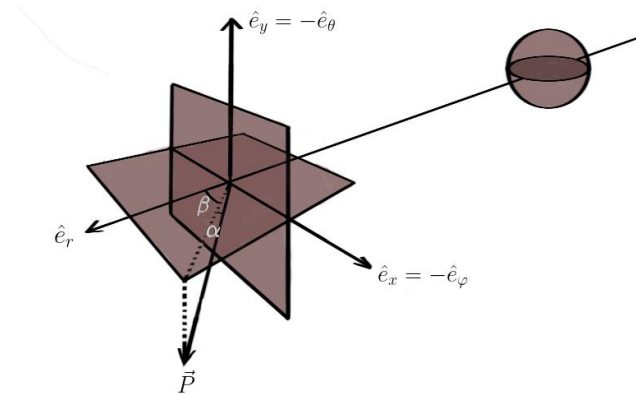


Figura 12: Representação da decomposição do momento linear de um fóton na base $(\hat{e}_r, \hat{e}_\theta, \hat{e}_\varphi)$. Essa decomposição é feita em função dos ângulos (α, β) , onde α é o ângulo formado entre o tri-momento linear $\vec{P}$ e o plano gerado pelos versores $\hat{e}_r$ e $\hat{e}_\varphi$, enquanto que β é o ângulo que a projeção vertical de $\vec{P}$ no plano $\hat{e}_r \perp \hat{e}_\varphi$ faz com o versor $\hat{e}_r$ segundo (JUNIOR, 2020). A esfera encontra-se no infinito para que os fótons cheguem no observador de forma paralela.

XX. PROGRAMAÇÃO EM PYTHON

O Python é uma ferramenta de fácil acesso e gratuita, podendo ser usada nas suas mais variadas formas dentro da Ciência.

Suas bibliotecas são importadas por meio de comando simples e que são similares aos comandos existentes no preâmbulo dos textos acadêmicos escritos em LaTeX.

Por meio do Python podemos testar a velocidade da internet importante a biblioteca *speedtest-cli* e instalando-a em sua conta do *Google Colab* por meio do comando *pip install*

speedtest-cli. A partir desse teste você poderá se certificar do desempenho e do tempo gasto para simular seus scripts computacionais.

Todos os scripts que foram desenvolvidos por (ANDRADE; WURZ, 2022) encontram-se em <<https://bit.ly/3ptrNeq>>.

Com o Python podemos:

- Calcular a trajetória de fótons próximos de um objeto massivo;
- Determinar todos os coeficientes necessários para as equações de campo de Einstein introduzindo uma métrica adequada ao estudo;
- Determinar a curva de luz de um buraco negro;
- Determinar a órbita de precessão do planeta Mercúrio.
- Calcular a sombra de um buraco negro de Kerr e
- Determinar equações da geodésica.

As aplicações do Python para análise da fenomenologia é bastante ampla. Em nosso estudo, optamos por determinar alguns dos exemplos acima importando as biblioteca *matplotlib* que apresenta em seu output os resultados finais do processamento, *pylab* que é similar ao *matplotlib*, o *numpy* que possibilita trabalhar com dados numéricos, *math* que possui todas as ferramentas matemáticas que dão suporte aos dados gerados numericamente e *scipy* que é uma biblioteca avançada e mais robusta que possibilita a obtenção e manipulação de dados científicos.

XXI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho foi dedicado a estudar os diferentes tipos de buracos negros investigados pela comunidade científica até o momento.

Observou-se que existe um limite de velocidade para que qualquer objeto possa escapar da sua superfície e essa velocidade limite deve ser igual a velocidade da luz. Assim, uma estrela supermassiva que está colapsando conseguirá curvar seus últimos raios para o seu interior. Essa estrela seria tão brilhante que não poderia ser vista por qualquer observador localizado em uma galáxia distante. Contudo essa explicação ficou sem estudos mais profundos até que fosse formulada a Teoria da Relatividade Geral, pois há uma relutância da comunidade científica no estudo de fenômenos que carecem de comprovação direta.

Tanto a Primeira quanto a Segunda Guerra Mundial acabaram trazendo grandes infortúnios para os estudos da Teoria da Relatividade Geral, quando a primeira caravana para os estudos da deflexão da luz acabou resultando no confisco dos telescópios, pois pensou-se que estes seriam usados para serviço de espionagem.

Mais tarde, verificou-se que o modelo descrito por Karl Schwarzschild não descreve modelos reais de estrelas existentes no Universo, uma vez que estes objetos colapsados acabam conservando seu momento angular.

Com o advento da física para o estudo dos quasares verificou-se a necessidade de estudo dos buracos negros rotativos, surgindo o modelo mais realístico de buraco negro existente no universo, pois seu momento angular deve ser conservado após o colapso da estrela.

Considera-se ainda mais relevante o uso de métodos computacionais para o entendimento da estrutura desses objetos colapsados, pois descrevem com mais rapidez e eficiência a geometria de um buraco negro de Schwarzschild ou de Kerr, por exemplo.

Utilizou-se pacotes prontos desenvolvidos em Python voltados para o estudo de buracos negros de Schwarzschild e de Kerr facilitando o estudo desses fenômenos intrigantes. Verificou-se que um buraco negro que apresenta momento angular deverá se aproximar do modelo estudado por Schwarzschild se este apresentar um momento angular que diminui com o tempo.

Há ainda modelos de buracos negros que são esfericamente simétricos, estáticos e que apresentam a conservação da carga, bem como existem buracos negros de Kerr com carga elétrica conservada após o seu último suspiro como estrela supermassiva.

Considerou-se, em primeiro momento o estudo dos modelos mais simples, porém observa-se a necessidade de um estudo mais detalhado dos outros modelos não apresentados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, V. C.; WURZ, G. *Buracos Negros de Kerr e de Schwarzschild: uma abordagem por meio do Python*. 103 f. Monografia (Especialização em Astrofísica Gravitacional e Física Espacial) — Universidade de Brasília, Brasília, 2022. 116

JUNIOR, H. C. L.; CUNHA, P. V. da; HERDEIRO, C. A.; CRISPINO, L. C. Sombras de buracos negros: desvendando a física por detrás da imagem de M87. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, SciELO Brasil, v. 43, 2020. 111, 113, 114, 115

MOORE, T. A. *A general relativity workbook*. [S.l.]: University Science Books Mill Valley, 2013. 109



Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea

Anomalous microwave emission in the Milky Way

JOSÉ RICARDO P. MELO¹, THYRSO VILLELA^{1,2}

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília (UnB)

²Divisão de Astrofísica – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)

Resumo

É apresentada uma revisão sucinta do fenômeno conhecido como Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, da sigla em inglês para Anomalous Microwave Emission), que representa um desafio interessante para a astrofísica moderna. Desde a identificação dessa emissão, em 1996, ainda não foi dada uma explicação definitiva sobre os mecanismos físicos responsáveis por tal emissão, apesar dos vários estudos dedicados ao tema.

Palavras-chave: Emissão anômala de micro-ondas. Emissão de micro-ondas na Galáxia. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos. Poeira em rotação.

Abstract

In this work, it is presented a brief review of the phenomenon known as Anomalous Microwave Emission (AME) in the Milky Way. AME represents an interesting challenge for modern astrophysics. Since the identification of this emission in 1996, and despite several studies dedicated to this subject, no definite explanation has yet been given about the physical mechanisms responsible for such emission.

Keywords: Anomalous microwave emission. Galactic microwave emission. Polycyclic aromatic hydrocarbons. Spinning dust.

I. INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos dos últimos dois séculos permitiram uma grande revolução na maneira como o ser humano percebe o Universo. A Figura 1 é um exemplo disso e mostra a Via Láctea, a nossa galáxia, observada por diferentes instrumentos que captam radiação eletromagnética em diferentes comprimentos de onda (diferentes frequências). É possível perceber que em cada imagem captada em um determinado comprimento de onda são mostrados detalhes que muitas vezes não são visíveis em outros comprimentos de onda

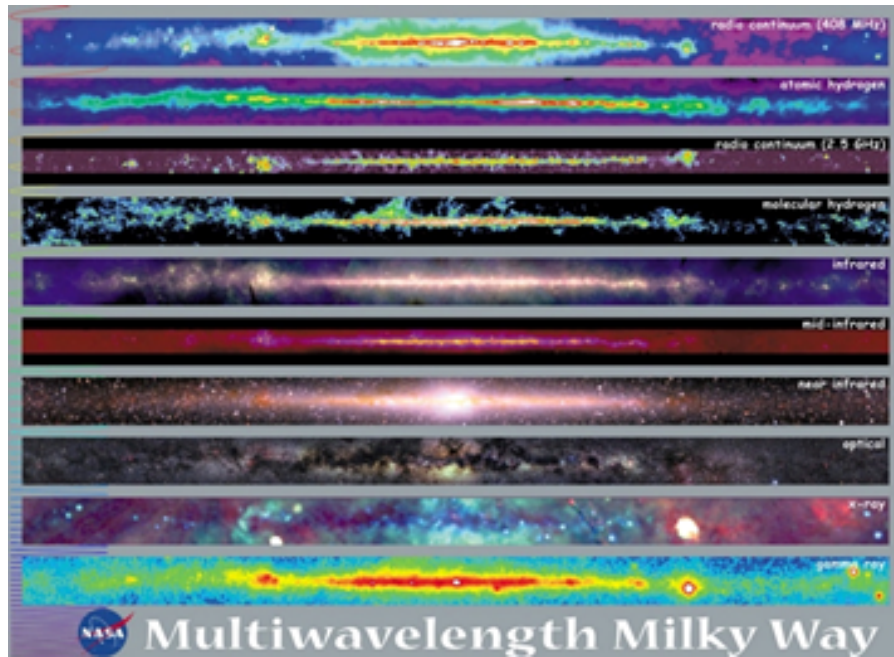


Figura 1: Imagens da Via Láctea em diferentes comprimentos de onda. Fonte: NASA/Goddard Space Flight Center: *The Multiwavelength Milky Way*, 2018. Disponível em: < https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmww_sci.html >.

(Weaver et al. 2022). Assim, não mais restrito apenas ao espectro visível, que é cerca de 0,004% do espectro eletromagnético, foi possível ao ser humano explorar o cosmos com novos instrumentos e identificar novos fenômenos e objetos que expandem os limites do conhecimento humano.

Nas imagens mostradas na Figura 1, são destacadas algumas regiões do espectro eletromagnético, como raios gama, raios X e boa parte do espectro infravermelho, que não são detectados a partir de observatórios que operam no solo, em virtude do bloqueio dessas radiações promovido pela atmosfera da Terra. Assim, tais radiações emitidas por fontes astrofísicas só podem ser detectadas por meio de telescópios espaciais.

Por outro lado, ao analisar a Figura 2, que relaciona a opacidade atmosférica com os comprimentos de onda das radiações do espectro eletromagnético, pode-se notar uma grande janela de observação na faixa espectral de ondas de rádio e, por esse motivo, radiotelescópios têm sido largamente utilizados para estudos astrofísicos.

Como exemplo de exploração dessa janela em rádio frequências, vale destacar que há uma previsão para o segundo semestre de 2023 do início das atividades do radiotelescópio BINGO (sigla em inglês para *Baryon acoustic oscillations from Integrated Neutral Gas Observations*) no sertão da Paraíba (Abdalla et al. 2022; Wuensche et al. 2022). Com dois principais objetivos, o BINGO deve detectar a radiação com comprimento de onda de 21 cm, originada na inversão do spin do elétron do hidrogênio neutro (HI), e detectar rajadas rápidas de rádio (FRB, sigla em inglês para *Fast Radio Burst*). A partir dessas observações, pretende-se fazer uma estimativa mais apurada da distribuição da matéria em diversas regiões do cosmo, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais abundante do Universo e, também, entender os mecanismos responsáveis por FRB.

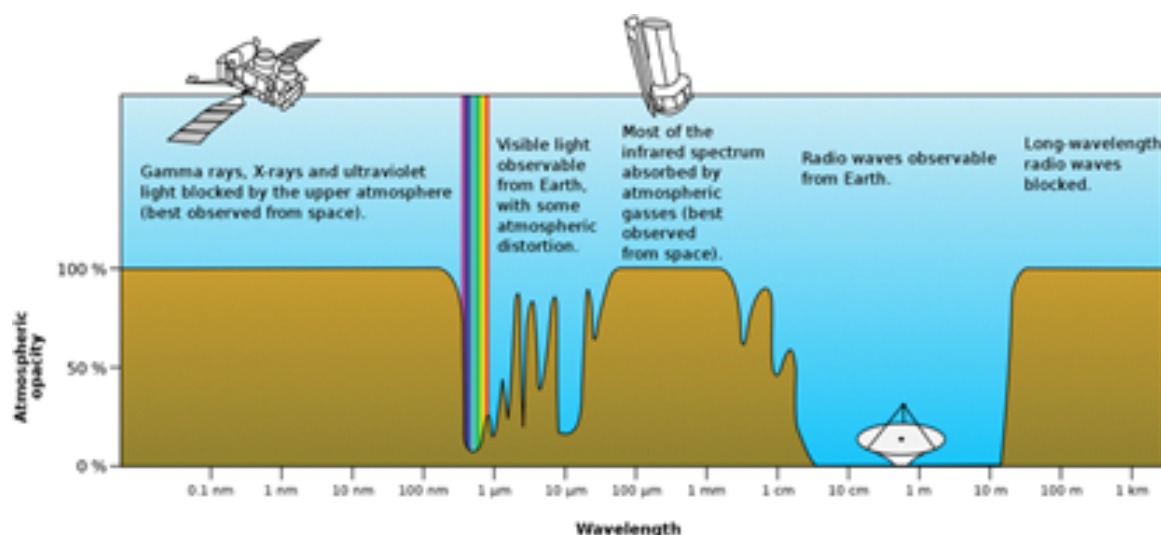


Figura 2: Janelas atmosféricas em diferentes comprimentos de onda. Fonte: ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: <<https://astroparsec.com/2021/05/19/o-por-que-dos-observatorios-espaciais>>.

Neste contexto de desenvolvimento de novas tecnologias para detecção da radiação eletromagnética emitida por fontes astrofísicas, a Emissão Anômala de Micro-ondas na Via Láctea (AME, sigla em inglês para *Anomalous Microwave Emission*) representa um desses novos desafios.

A AME foi descoberta como um subproduto das observações da Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (CMB, sigla em inglês para *Cosmic Microwave Background*). Como tais observações exigem medições muito sensíveis, é necessário que sejam removidas quaisquer outras radiações contaminantes (CMB *foregrounds*) que têm suas origens em fontes da Galáxia ou extragalácticas (e.g. Bennett et al. 2003).

A CMB é um resquício do Universo primordial, quando toda a matéria estava condensada formando um plasma de altíssima densidade e temperatura, em que prótons, elétrons e fótons interagiam constantemente, impedindo que átomos fossem formados, ou seja, matéria e radiação estavam fortemente acopladas.

À medida que o Universo expandiu, a temperatura desse plasma diminuiu, aumentando a possibilidade de elétrons livres serem capturados pelos prótons para formar o hidrogênio neutro (recombinação). Com o passar do tempo, o número de elétrons livres diminuiu e a interação entre a matéria formada e a radiação se tornou cada vez menor, iniciando uma fase da evolução do Universo conhecida como desacoplamento.

Quando o Universo atingiu cerca 350 mil anos de idade, houve o desacoplamento entre a radiação e a matéria. Essa época é chamada de superfície de último espalhamento. É neste momento da evolução que o Universo se torna transparente para a radiação eletromagnética. Os fótons dessa época, que viajam pelo Universo e que agora chegam até nós, compõem a CMB. Portanto, a CMB pode ser descrita como um resquício da formação do Universo e o permeia completamente. Para maiores detalhes acerca da história, investigações experimentais e a significância da CMB para a Cosmologia, ver, por exemplo, Durrer (2015) e Villela (2016).

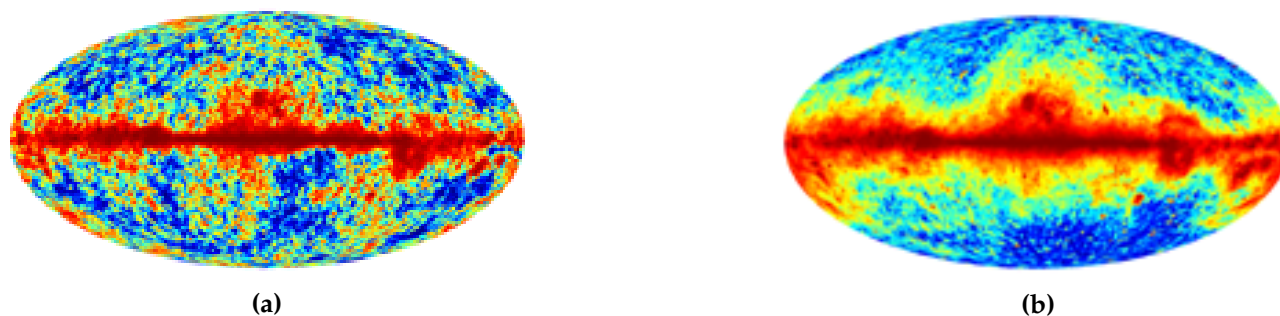


Figura 3: Mapas do céu obtidos com o telescópio espacial Planck. No mapa (b) foi efetuada a subtração da CMB. Fonte: Dickinson (2018).

Já a AME é fruto de um processo de emissão de radiação eletromagnética que, inicialmente, teve sua origem associada à Via Láctea. Porém, a AME também pode ocorrer em outras galáxias, mas esse assunto não será tratado no presente trabalho. Nesse contexto, o telescópio espacial Planck, por meio de seus diversos sensores de detecção de radiação eletromagnética na forma de micro-ondas (Planck Collaboration 2006), coletou dados que permitiram produzir, por exemplo, mapas em 44,1 GHz, com a CMB presente no mapa superior e subtraída no inferior, mostrados na Figura 3. É possível perceber que a subtração do sinal da CMB revela a radiação galáctica difusa fraca em altas latitudes (Dickinson 2018). A escala de cores foi equalizada no histograma para destacar tanto a emissão mais brilhante quanto a mais fraca.

O mapa (b) da Figura 3, com a CMB subtraída, tem grande relevância porque mostra as radiações difusas emitidas por fontes que pertencem à Via Láctea e que têm suas origens e mecanismos de emissão bem conhecidos. Tais radiações são conhecidas como livre-livre, síncrotron e térmica de poeira.

Porém, Kogut et al. (1996) e Leitch et al. (1997) perceberam que, ao medir a radiação total emitida pelas fontes da Galáxia, existia um excesso que não poderia ser explicado pelos mecanismos usuais até então conhecidos e o denominaram de AME.

O termo “anômala”, usado para denominar o excesso de emissão observada nas medidas da emissão de micro-ondas do céu, está relacionado ao fato de que essa emissão não é devida aos mecanismos conhecidos de emissão de micro-ondas pela Via Láctea.

Dessa forma, com o objetivo de melhor compreender a AME, e por uma questão didática, serão apresentados os principais mecanismos de emissão difusa de rádio frequências e micro-ondas na Galáxia, seguidos de uma breve discussão sobre as possíveis fontes de emissão da AME e estudos baseados em observações de algumas regiões da Via Láctea.

Este artigo está dividido em quatro seções. Além dessa primeira seção, são apresentados, na segunda seção, os três mecanismos de emissão de radiação difusa de rádio frequências e micro-ondas na Via Láctea. Na terceira seção, são apresentados alguns estudos que mostram possíveis fontes e mecanismos da emissão da AME. E, finalmente, na quarta seção, são feitas considerações acerca de algumas pesquisas recentes sobre esse tema.

Este artigo é baseado em um trabalho de conclusão de curso (Melo 2022) relacionado ao curso de pós-graduação *lato sensu* Astrofísica Gravitacional e Física Espacial, da Universidade de Brasília.

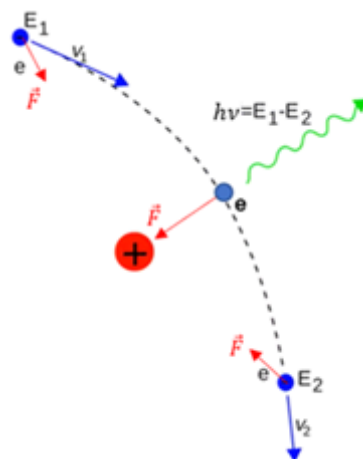


Figura 4: A interação de um elétron livre (e) com um íon (+) sem que ocorra a captura do elétron é conhecida como *Bremsstrahlung* ou emissão livre-livre. Fonte: *Bremsstrahlung.svg*, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >.

II. MECANISMOS DE EMISSÃO GALÁTICA DIFUSA EM RADIO FREQUÊNCIAS E MICRO-ONDAS

II.1. Emissão livre-livre

A emissão livre-livre é também conhecida como *Bremsstrahlung* (do alemão *Bremsen* (frear) mais *Strahlung* (radiação)) e corresponde à emissão de radiação eletromagnética associada geralmente à frenagem (aceleração) que um elétron é submetido quando está sujeito à ação de uma força central Coulombiana (de natureza elétrica), sendo a potência irradiada dada por:

$$P = \frac{2}{3} \frac{e^2 \dot{v}^2}{c^3},$$

em que e é a carga elementar, $\dot{v}$ é a aceleração instantânea e c é a velocidade da luz no vácuo.

O Universo contém regiões de plasma (gás ionizado) difuso e quente (da ordem de 10^4 K) que emitem radiação eletromagnética continuamente. Apesar de o somatório das cargas de um plasma por definição ser igual a zero (neutro), há uma grande quantidade de partículas carregadas em constante movimento.

Na Figura 4, é ilustrada a interação de um elétron livre com um íon, tendo o elétron uma energia cinética inicial E_1 e velocidade de módulo v_1 . A força de natureza elétrica provoca um desvio na trajetória do elétron e uma diminuição no módulo da velocidade, que passa a ser v_2 . Consequentemente, a energia cinética do elétron diminui e passa a ser E_2 , sendo a energia perdida pelo elétron, $\Delta E = E_1 - E_2$, emitida na forma de radiação eletromagnética com uma determinada frequência $\Delta E = h\nu$, em que h é a constante de Planck e ν é a frequência da radiação.

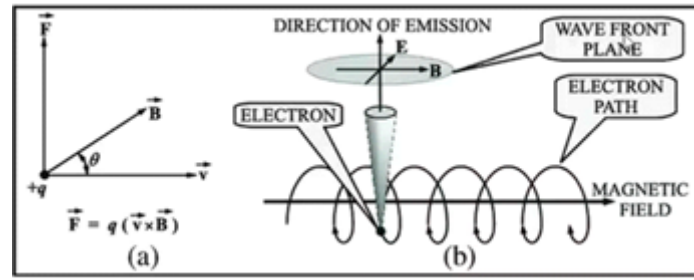


Figura 5: (a) Força resultante (F) sobre uma carga (q) em movimento (velocidade v) num campo magnético (B); (b) movimento em espiral de um elétron em um campo magnético gerando radiação sincrotron. Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >.

II.2. Emissão sincrotron

A radiação sincrotron é produzida pelo movimento de elétrons relativísticos (que viajam a velocidades próximas à da luz no vácuo) que acabam por espiralar ao redor de linhas de campo magnéticos, por ação da força magnética de Lorentz. A potência irradiada por um único elétron é dada por:

$$P = 2\sigma_T \beta^2 \gamma^2 c U_B \sin^2 \alpha,$$

em que σ_T é a seção transversal de Thomson, β é a razão entre os quadrados da velocidade do elétron e a velocidade da luz no vácuo, γ é o fator de Lorentz, c é a velocidade da luz no vácuo, U_B é a densidade de energia magnética e α é o ângulo formado entre a direção da velocidade do elétron e o campo magnético.

Na Figura 5, é mostrada a trajetória espiralada percorrida por um elétron que viaja ao redor da linha de um campo magnético e que, devido à ação da força de Lorentz, emite radiação sínroton na direção que é perpendicular ao plano da frente de onda formada pelos campos magnético e elétrico.

II.3. Emissão térmica de poeira

O meio interestelar é permeado por poeira que pode ser formada por grafite e silicatos cobertos por uma camada de gelo, e pode, também, ser formada por outros tipos de moléculas como os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH, do inglês *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon*), por exemplo.

Parte da radiação eletromagnética estelar que atravessa esse meio difuso de grãos de poeira pode ser absorvida e reemitida em outros comprimentos de onda pelos grãos. A energia absorvida provoca o aumento da temperatura do grão e a maior parte dessa energia absorvida é irradiada em frequências do infravermelho com comprimentos de onda de cerca de $10 \mu\text{m}$ e, para os grãos frios, a radiação pode atingir picos ao redor de $100 \mu\text{m}$. Grande parte dos dados usados para o estudo desse tipo de emissão é oriunda de medidas efetuadas pelo satélite IRAS (*InfraRed Astronomy Satellite*), pelos experimentos FIRAS (*Far Infrared Absolute Spectrophotometer*) e DIRBE (*Diffuse Infrared Background Experiment*), que voaram a bordo do satélite COBE (*COsmic Background Explorer*), e pelos espectrômetros

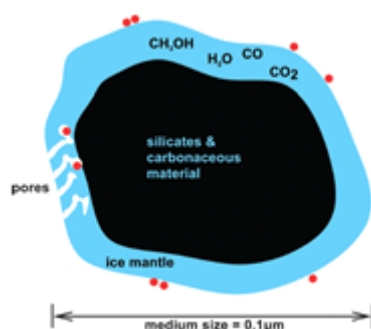


Figura 6: Exemplo de grão de poeira do meio interestelar. Fonte: Karssemeijer et al. 2012.

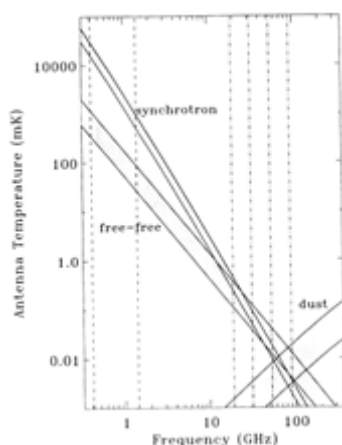


Figura 7: Espectros da radiação síncroton, livre- livre e poeira térmica. Fonte: Bennett et al. 1992

MIRS (Mid-Infrared Spectrometer) e NIRS (Near-Infrared Spectrometer) do satélite IRTS (InfraRed Telescope in Space).

Na Figura 7, são mostradas as radiações síncroton, livre-livre e térmica de poeira, medidas em diversas frequências e latitudes galácticas. De acordo com Bennett et al. (1992), a radiação síncroton é dominante até cerca de 400 MHz, a radiação livre-livre é dominante até 53 GHz e a emissão térmica de poeira domina a partir de 90 GHz. A borda superior de cada curva sombreada corresponde a latitudes galácticas $15^\circ < |b| < 20^\circ$ e a borda inferior a latitudes $60^\circ < |b| < 70^\circ$. As linhas verticais pontilhadas correspondem às frequências de 0,408; 1,420; 19,2; 31,5; 53 e 90 GHz.

III. EMISSÃO ANÔMALA DE MICRO-ONDAS NA VIA LÁCTEA

Quando radiotelescópios são apontados para várias regiões do espaço, os dados captados pelos sensores neles instalados podem conter uma variedade muito grande de sinais em diferentes frequências (ou comprimentos de onda). Na Figura 8, é mostrada uma miríade de sinais emitidos por diversas fontes, não somente por objetos extraterrestres, mas, também, aqueles emitidos pela atividade humana.

Desse modo, se faz necessário buscar uma maneira de separar esses sinais por meio de suas respectivas assinaturas espectrais. Para desvendar tais assinaturas, é preciso estudar os espectros eletromagnéticos das fontes observadas, que pode ser contínuo, de emissão ou de

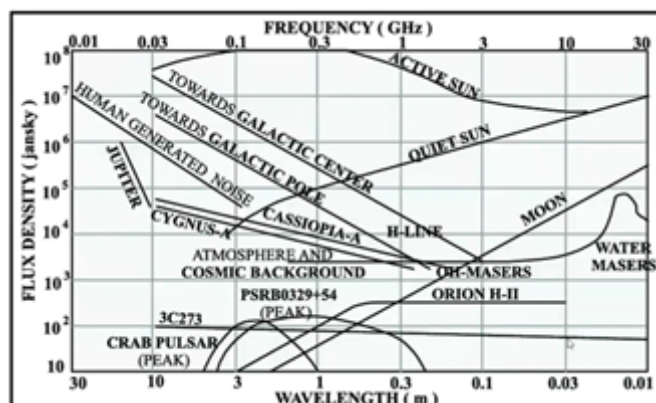


Figura 8: Sinais provenientes de fontes terrestres e de diversas fontes extraterrestres que são detectados por radiotelescópios. Fonte: RADIO ASTRONOMY AND SUPER-SYNTHESIS: A SURVEY, 2010. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >.

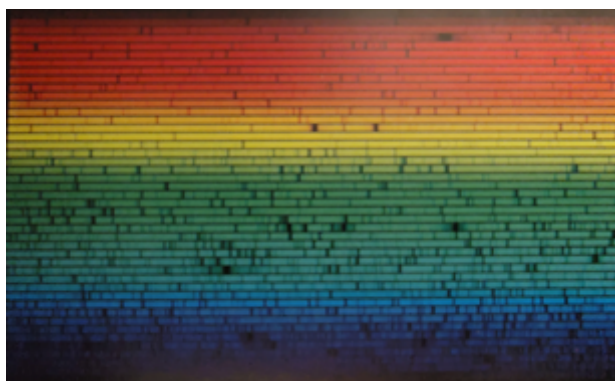


Figura 9: Linhas de absorção do espectro do Sol. Fonte: Comins, N. F.; Kaufmann, W. J. (2010).

absorção.

No início do século XIX, o físico alemão Joseph von Fraunhofer observou o espectro da luz solar ao passar por um prisma. Ao expandir aquele espectro, percebeu a presença de uma grande quantidade de linhas negras, que seriam batizadas de linhas de absorção, como mostrado na Figura 9.

Mais tarde, Robert Bunsen e Gustav Kirchhoff descobriram que poderiam produzir linhas espectrais em laboratório, ao produzir a queima de pequenas porções de elementos químicos em uma chama de um bico de Bunsen, sendo a luz da chama colorida dirigida para um prisma. Acabaram por descobrir que existia um padrão de linhas espectrais brilhantes que era único para cada elemento que as produzia. Essas linhas espectrais foram chamadas de linhas de emissão e denotavam uma assinatura para cada elemento químico que as emitia.

Ao comparar as linhas de absorção do espectro solar e as linhas de emissão de um elemento químico, como, por exemplo, o ferro (Figura 10), percebe-se que as informações de cada um desses espectros são complementares e é possível deduzir que deve existir ferro na atmosfera do Sol. Estava inaugurada a espectroscopia. A partir de então, foi possível fazer uma comparação com medidas astrofísicas e definir uma assinatura típica da fonte em estudo.

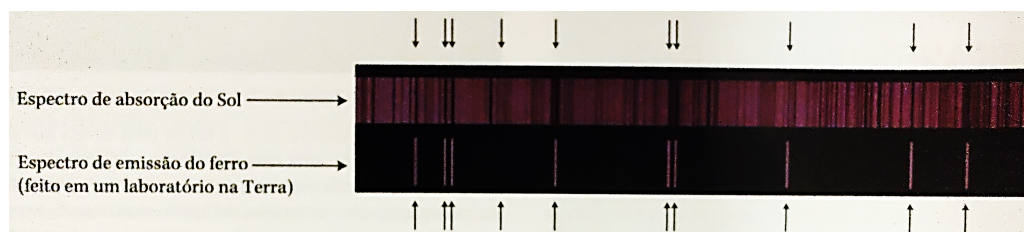


Figura 10: Comparação entre as linhas de absorção do espectro do Sol e as linhas de emissão do ferro produzidas em um laboratório na Terra. Fonte: Comins, N. F.; Kaufmann, W. J. (2010).

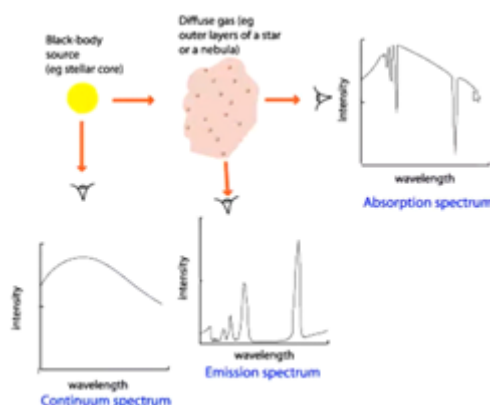


Figura 11: Espectros eletromagnéticos originados por uma fonte astrofísica. Fonte: *Types of Astronomical Spectra*. Australia Telescope National Facility. Disponível em: <https://www.atnf.csiro.au/outreach/education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar>.

Na Figura 11, são mostrados os diversos espectros já discutidos anteriormente e mostrado um espectro contínuo de uma fonte (núcleo estelar) que é detectada diretamente.

Assim, utilizando as informações coletadas pelos radiotelescópios e conhecidas as respectivas assinaturas espectrais de diversas fontes de radiação, é possível fazer a filtragem dos vários sinais recebidos.

Como visto, existem três mecanismos dominantes para as emissões Galácticas em rádio frequências e micro-ondas. São eles: a emissão livre-livre de regiões ionizadas, a emissão síncroton, gerada por elétrons relativísticos que se movem ao longo do campo magnético da Via Láctea, e a emissão térmica por poeira. Porém, desde meados dos anos 1990 um novo tipo de emissão passou a ser considerado (AME). Na Figura 12, são mostrados os espectros da CMB, da radiação síncroton, da radiação livre-livre e da radiação térmica de poeira medidos por alguns experimentos, que são representados pelas faixas verticais em diferentes cores. Nesse gráfico, também é mostrado o espectro da AME.

Kogut et al. (1996) e de Oliveira-Costa et al. (1997), por exemplo, ao investigarem cuidadosamente a CMB, encontraram uma boa correlação entre as micro-ondas e o infravermelho distante (FIR, sigla em inglês para *Far InfraRed*) em grandes escalas angulares, dando continuidade aos estudos sobre esse fenômeno.

A AME é um componente das radiações difusas da Galáxia e é observada aproximadamente em uma faixa de frequências compreendida entre 10 e 60 GHz. Desde sua detecção e comprovação como um componente da emissão Galáctica, a AME tem sido estudada por uma variedade de experimentos e em diversos ambientes da Galáxia e correlacionada

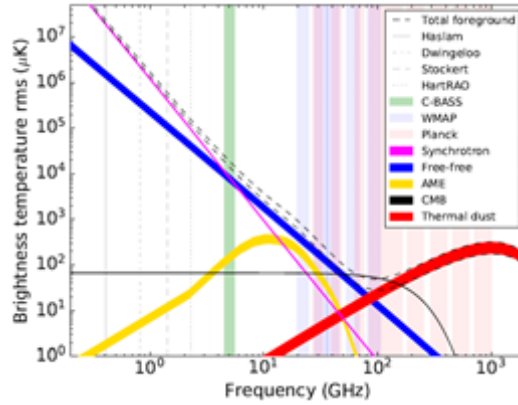


Figura 12: Espectros da CMB, das radiações síncrotron, livre-livre e poeira térmica e da AME medidos por alguns experimentos. Fonte: Jones et al. 2018.

especialmente com o infravermelho distante da emissão térmica de poeira. Ela, no entanto, não pode ser explicada pelos mecanismos de emissão síncrotron ou livre-livre e está muito acima da contribuição de emissão térmica de poeira para frequências abaixo de ~ 50 -60 GHz.

A questão subsequente à descoberta da AME está relacionada com a sua origem. Qual é a fonte, ou fontes, de emissão dessa radiação e quais são os respectivos mecanismos físicos responsáveis por essa emissão? A seguir, serão apresentadas algumas possibilidades de resposta para essas questões.

III.1. Poeira em rotação (*spinning dust*)

A primeira possível resposta para explicar essa emissão anômala de radiação eletromagnética em micro-ondas pode ser o mecanismo formulado por Erickson (1957), em que a emissão de radiação seria proveniente de grãos de poeira de pequenas dimensões em rotação, com momento de dipolo elétrico ou magnético.

Para exemplificar (ver Dickinson et al. 2018), considere um grão de poeira com momento de dipolo elétrico permanente, girando com uma frequência angular ω , que produzirá uma emissão de acordo com a fórmula de Larmor:

$$P = \frac{2}{3} \frac{\omega^4 \mu^2 \sin^2 \theta}{c^3},$$

em que P é a potência total emitida com uma frequência $\nu = \frac{\omega}{2\pi}$ e θ é o ângulo formado entre $\mathbf{e}$ e $\mathbf{r}$, conforme mostrado na Figura 13.

Obviamente, no meio interestelar não existe apenas um grão de poeira, portanto, há que se considerar que o espectro de emissão depende da distribuição das frequências de rotação e dos momentos de dipolo dos inúmeros grãos. Desta forma, vários modelos teóricos foram produzidos com o intuito de calcular as razões de distribuições de rotações, de tamanhos dos grãos e de composições que se encaixam nas observações.

Na Figura 14, são mostrados espectros de emissão de poeira em rotação previstos por Ali-Haïmoud et al. (2009) para diversos ambientes: meio neutro frio (CNM, sigla em inglês

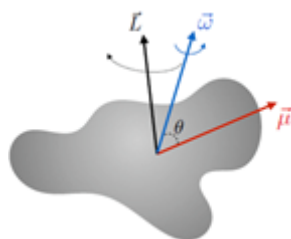


Figura 13: Representação esquemática de um grão de poeira em rotação com momento de dipolo elétrico μ , velocidade angular ω e momento angular L . Fonte: Dickinson et al. (2018).

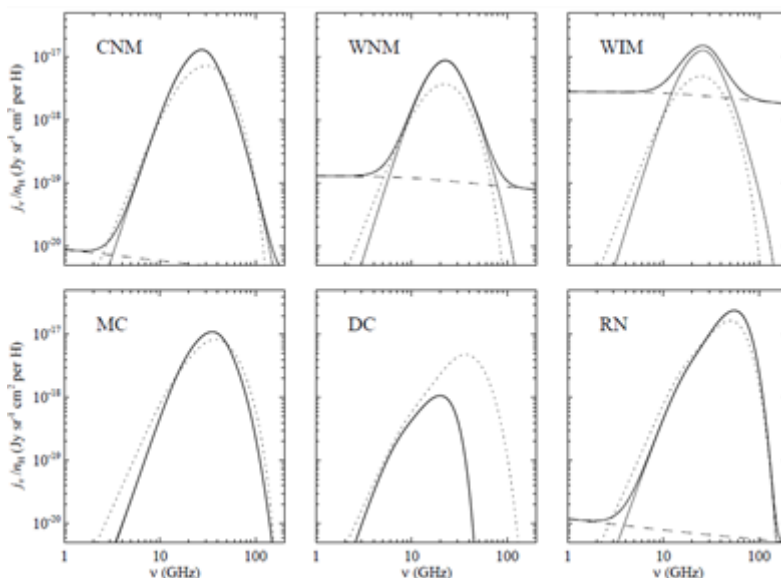


Figura 14: Espectros de emissão de poeira em rotação. A linha sólida é o resultado dos cálculos de Ali-Haïmoud et al. (2009); a linha pontilhada é a previsão dada por Draine e Lazarian (1998); e a linha tracejada representa a emissão livre-livre. Fonte: Ali-Haïmoud et al. 2009.

para Cold Neutral Medium), meio neutro quente (WNM, sigla em inglês para Warm Neutral Medium), meio ionizado quente (WIM, sigla em inglês para Warm Ionized Medium), nuvem molecular (MC, sigla em inglês para Molecular Cloud), nuvem escura (DC, sigla em inglês para Dark Cloud) e nebulosa de reflexão (RN, sigla em inglês para Reflection Nebula).

Alguns trabalhos, como os de Ysard e Verstraete (2010), Tibbs et al. (2011) e Hensley et al. (2016), que utilizaram dados do *Spitzer Space Telescope* (SST), do satélite *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* (WMAP), dos últimos mapas de céu inteiro (*all-sky maps*) do satélite Planck e de vários radiotelescópios terrestres, apontam uma forte correlação entre a emissão de poeira em rotação e a AME.

III.2. Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos

Por outro lado, Draine e Lazarian (1998) propuseram que PAH poderiam, em rotação, gerar as emissões correspondentes à AME. Tielens (2013), Ali-Haïmoud (2014) e Andrews et al. (2015) argumentaram que poucas espécies seriam altamente estáveis e resistentes às condições adversas do meio interestelar. Foram usados nesses estudos dados de infravermelho

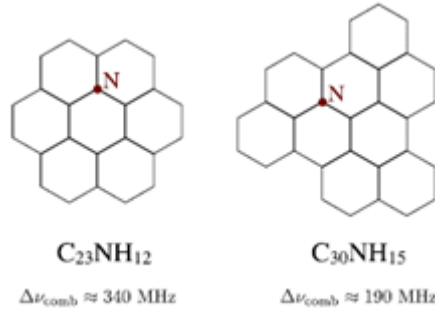


Figura 15: Exemplos de dois PAH com nitrogênio. Essas moléculas são alvo de pesquisas sobre AME. Fonte: Dickinson et al. (2018).

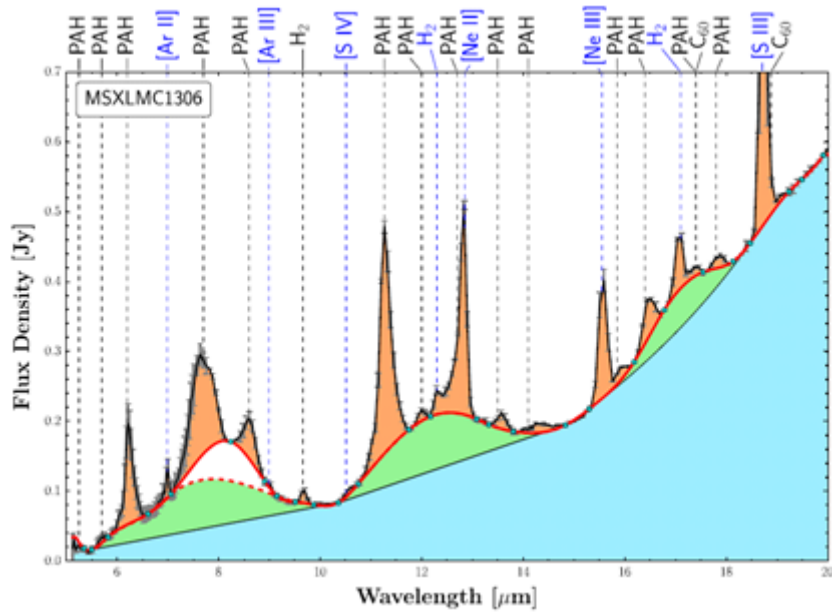


Figura 16: Espectro de baixa resolução obtido com o espectrógrafo de infravermelho IRS, proveniente da região LMC HII MSX 1306. Fonte: Shannon, M. J. et al. (2015).

que sugerem que um número limitado de PAH altamente compactos e simétricos poderia dominar a família de PAH interestelar, sendo chamados de grandPAH.

O espectro de baixa resolução, apresentado na Figura 16, foi obtido pelo espectrógrafo de infravermelho (IRS, sigla em inglês para *Infrared Spectrograph*) a bordo do Telescópio Espacial Spitzer, proveniente da região LMC HII MSX 1306, pertencente à Grande Nuvem de Magalhães (LMC, sigla em inglês para *Large Magellanic Cloud*). A LMC é uma das cerca de 40 galáxias satélites pertencentes ao Grupo Local, em que a Via Láctea e a galáxia de Andrômeda são as maiores e as mais massivas. O presente trabalho se restringe à AME na Via Láctea, mas deve-se ressaltar que há evidências de que emissões semelhantes ocorram em outras galáxias.

Características proeminentes de PAH e linhas de emissão atômica/molecular são visíveis e indicados nos rótulos da parte superior da Figura 16. Três faixas de frequência em que essas emissões ocorrem são identificadas abaixo das bandas de emissão de PAH (regiões sombreadas em verde).

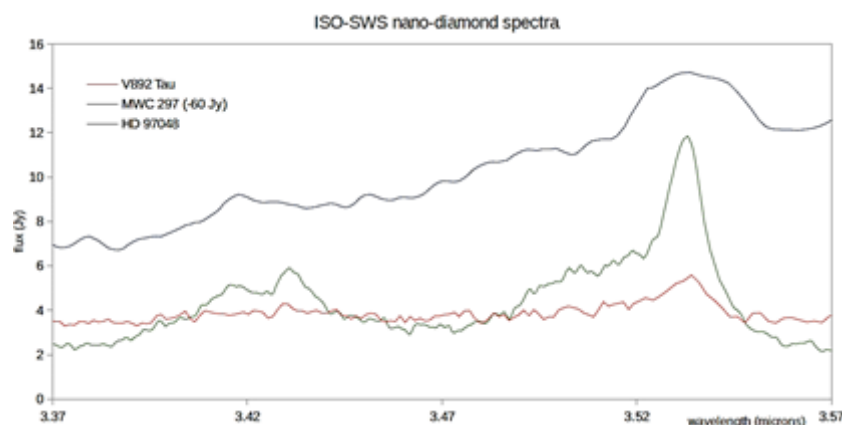


Figura 17: Espectros de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 identificam emissões compatíveis com as emissões de nanodiamantes. Fonte: Greaves et al. 2018

III.3. Nanodiamantes

Em outro estudo, Greaves et al. (2018) identificaram emissões anômalas de micro-ondas em três discos protoplanetários, sendo esses os únicos sistemas conhecidos que hospedam nanodiamantes hidrogenados, em que as ligações C-H podem fornecer os momentos de dipolo elétrico adequados. Por meio de espectroscopia, foi possível detectar nanodiamantes próximos às estrelas hospedeiras.

Na Figura 17, são mostrados os espectros obtidos pelo espectrômetro infravermelho de ondas curtas (SWS, sigla em inglês para *Short Wavelength Spectrometer*) do Observatório Espacial de Infravermelho (ISO, sigla em inglês para *Infrared Space Observatory*) para os três discos estelares de V892 Tau, MWC 297 e HD 97048 que hospedam nanodiamantes. Para maior clareza, os dados V892 Tau foram agrupados em quatro canais espectrais de 0,3 nm, e 60 Jy foram subtraídos em toda a banda para MWC 297. Os comprimentos de onda do pico de emissão dos nanodiamantes variam em aproximadamente ± 1 nm. Embora isso esteja próximo do limite da resolução espectral do instrumento, essas mudanças podem indicar diferenças de temperatura de aproximadamente 100 K, dentro da faixa de 800 a 1400 K, onde os nanodiamantes hidrogenados são estáveis.

Com o desenvolvimento de modelos de discos circunstelares, a AME foi reproduzida com nanodiamantes de 0,75 a 1,1 nm de raio. Como as taxas de luminosidade estelar são aproximadamente constantes, é possível que os nanodiamantes estejam presentes em muitos sistemas estelares, mas emitam radiação abaixo dos limiares de detecção. Isso pode ser de especial interesse, já que pode haver uma conexão com as descobertas de nanodiamantes em meteoritos do Sistema Solar.

Essas partículas podem ter sido formadas em condições de grande pressão, colisões ou por deposição de vapor interna ou externamente à nebulosa protossolar (Hueso e Guillot 2003). Como a absorção espectral do nanodiamante é vista em linhas de visada interestelares, essas nanopartículas acabam sendo candidatas a gerar AME em escala galáctica, diferentemente do que ocorre com os PAH.

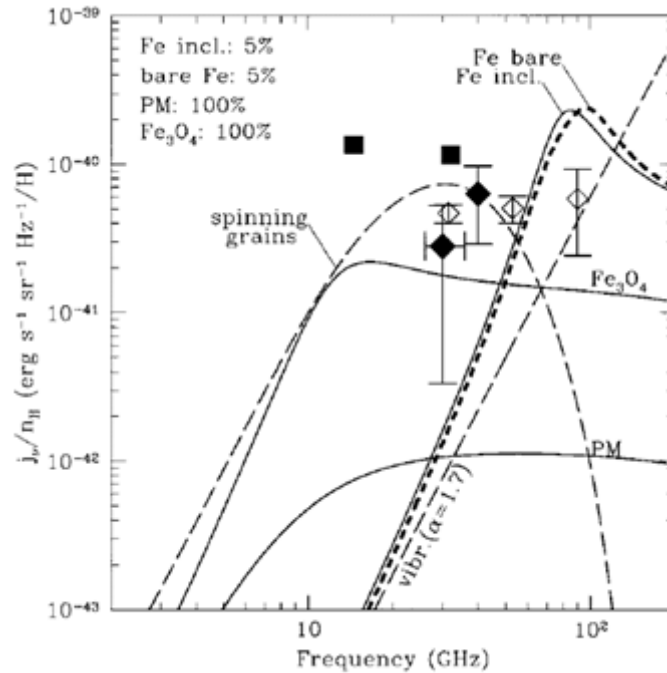


Figura 18: Emissividade de dipolo magnético para cada componente do grão. As emissividades observadas são inferidas a partir dos dados de Kogut et al. 1996 (losangos abertos); de Oliveira-Costa et al. 1997 (diamantes cheios); e Leitch et al. 1997 (quadrados preenchidos). Fonte: Draine e Lazarian 1999.

III.4. Dipolos magnéticos

Além das hipóteses já relatadas, há a possibilidade de serem encontrados grãos de poeira impregnados de ferro, tal como comumente encontrado em meteoritos de ferro e níquel, na forma de ferro metálico (Fe), óxido férrico (Fe_2O_3) ou hematita (Fe_3O_4). Tais materiais são suscetíveis à magnetização espontânea pelo alinhamento natural dos spins dos elétrons, ou seja, mesmo que não exista um campo magnético externo pode ocorrer o emparelhamento dos spins.

Variações de temperatura podem provocar mudanças na magnetização dos materiais, variando seus estados entre aquele de mínima energia e o excitado. É justamente nesse processo de excitação e relaxamento, provocado pela flutuação térmica, que ocorre a emissão de radiação. Cabe notar que o processo aqui descrito é puramente térmico e se diferencia da emissão de poeira em rotação.

A emissividade de dipolo magnético para cada componente do grão é mostrada na Figura 18. Estudos do brilho do céu em micro-ondas revelaram a emissão de micro-ondas da matéria interestelar. A emissividade por núcleo de H foi deduzida da correlação cruzada do brilho do céu em micro-ondas com a emissão no infravermelho distante de grãos de poeira, usando medições do COBE DMR (Kogut et al. 1996). Foram usados também dados do experimento terrestre Saskatoon (de Oliveira-Costa et al. 1997) e Owens Valley Radio Observatory (Leitch et al. 1997).

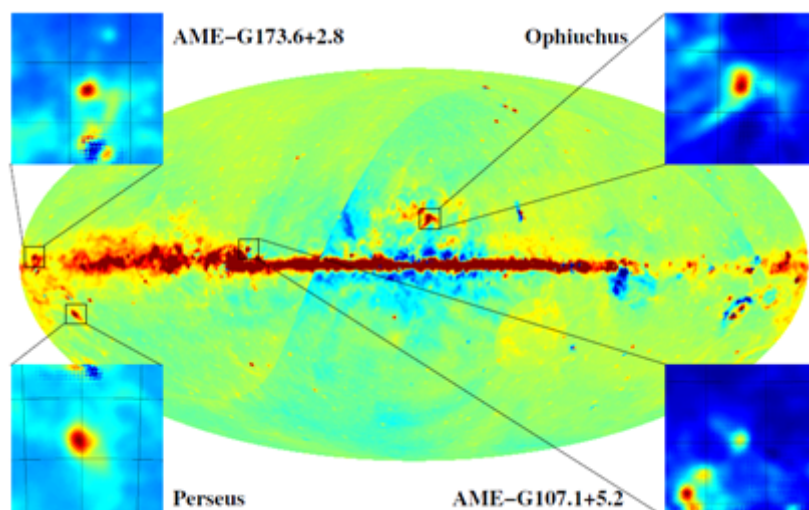


Figura 19: Mapa do Plano Galáctico em 28,5 GHz. Fonte: Planck Collaboration (2011).

IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma vez apresentadas as principais fontes e mecanismos teóricos que buscam explicar a origem da AME, serão apresentados alguns estudos que analisaram os dados coletados de diversas regiões que são candidatas a emissoras de AME.

IV.1. Uma nova ideia sobre a AME de grãos de poeira giratórios

A AME se tornou uma emissão característica da Via Láctea (Dickinson et al. 2013; Dickinson et al. 2018). Esta afirmação pode ser confirmada por meio da análise detalhada dos dados do satélite Planck, os quais mostram um excesso de emissão do tipo AME próxima de 30 GHz ao longo do Plano Galáctico (Planck Collaboration 2011).

No mapa da Figura 19, extraído de Planck Collaboration (2011), são mostrados os resíduos de observação do Plano Galáctico após a subtração das emissões síncrotron, livre-livre e de poeira. São identificadas, nos destaques, as regiões das nuvens moleculares de Perseus e ρ Ophiuchi e duas novas regiões de AME, que mostram um excesso de emissão na faixa de 20 a 60 GHz.

Com os dados dos mapas do satélite Planck e de dados auxiliares multifrequências, foram construídos espectros para duas regiões de AME, conhecidas como as nuvens moleculares de Perseus e de Ophiuchi. Os espectros são bem ajustados por uma combinação de radiação livre-livre, CMB, poeira térmica e radiação de dipolo elétrico de pequenos grãos de poeira giratórios. Os espectros têm um pico na faixa de 20 a 40 GHz e são detectados com altas significâncias em ambas as regiões. Também foram pesquisadas outras regiões candidatas a emissoras de AME, depois de terem sido subtraídas as radiações síncrotron, livre-livre e poeira térmica. Foram apresentados espectros para duas das candidatas, AME-G107.1+5.2 e AME-G173.6+2.8, que são regiões HII (hidrogênio ionizado) brilhantes que mostram evidências de AME e são bem ajustadas pelo modelo de poeira giratória. Dessa forma, as observações favorecem fortemente o mecanismo da poeira giratória (radiação de dipolo elétrico).

IV.2. Um estudo da AME em nuvens Galácticas

Em Planck Collaboration (2014), foi realizado um estudo estatístico das propriedades básicas das regiões AME e do ambiente em que elas emitem. Foram utilizados diversos mapas dos satélites WMAP e Planck, combinados com dados auxiliares de rádio e infravermelho, objetivando construir uma amostra de 98 fontes candidatas a emissoras de AME.

Para as fontes candidatas, foram criados espectros de distribuição de energia (SED, sigla em inglês para *Spectral Energy Distribution*), sendo cada espectro comparado com um modelo simples de componentes de emissões livre-livre, sincrotron, CMB, poeira e poeira giratória.

Das 98 fontes, 42 apresentaram excesso de emissão significativo em frequências entre 20 e 60 GHz. Uma análise da contribuição potencial da emissão livre-livre opticamente espessa de regiões HII ultracompactas, usando critérios de cor IR, reduziu a amostra significativa de AME para 27 regiões, sendo que os espectros de AME para essas regiões foram consistentes com os espectros do modelo de poeira giratória. As frequências de pico observadas estão na faixa de 20 a 35 GHz, exceto para a nebulosa da Califórnia (NGC1499), que parece ter uma frequência de pico de poeira giratória de $50 (\pm 17)$ GHz.

IV.3. Investigação sobre a origem da AME em Lambda Orionis

Bell et al. (2019) investigaram a AME na região de Lambda Orionis (λ Orionis) utilizando principalmente os dados da câmera de infravermelho (IRC) do satélite AKARI, que têm uma cobertura completa da banda das emissões de PAH e, também, das emissões em infravermelho médio e infravermelho distante. Os dados foram comparados com aqueles obtidos por Planck Collaboration (2014) para Orionis em escala angular de aproximadamente 1° .

A partir dos dados obtidos, chegou-se à conclusão de que a massa de poeira em λ Orionis certamente está relacionada com a AME e que a emissão na banda de 9 μ m (AKARI/IRC) correlaciona-se um pouco mais fortemente com PAH. Usando inferência Bayesiana hierárquica e modelagem de distribuição de energia espectral total, foi argumentado que a AME em Orionis se correlaciona mais fortemente com a massa de PAH do que com a massa total de poeira, dando suporte para uma hipótese giratória de PAH nessa região.

IV.4. COMAP *Galactic Plane Survey*

Rennie et al. (2022) apresentaram os primeiros resultados do CO-Mapping Array Project (COMAP) *Galactic Plane Survey*, realizado entre junho de 2019 e abril de 2021, que abrangeu a faixa compreendida entre $20^\circ < \ell < 40^\circ$ e $|b| < 1,5^\circ$, com uma resolução angular de $4,5'$. Os resultados iniciais da primeira parte dessa pesquisa incluem emissões difusas e SED de regiões HII e restos de supernovas. Usando dados de baixa e alta frequências para filtrar as contribuições das emissões livre-livre e térmica de poeira, foram encontradas evidências de excesso de densidade de fluxo em 30 GHz em seis regiões, que foram interpretadas como AME e estão mostradas na Figura 20.

Considerando que o COMAP *Galactic Plane Survey* é um estudo recente e em andamento, os primeiros dados coletados e analisados representam uma pista sobre as possíveis fontes e mecanismos relacionados à AME. Preliminarmente, o mecanismo de poeira giratória é um forte candidato, mas ainda carece de investigação o que está impulsionando a poeira. Com

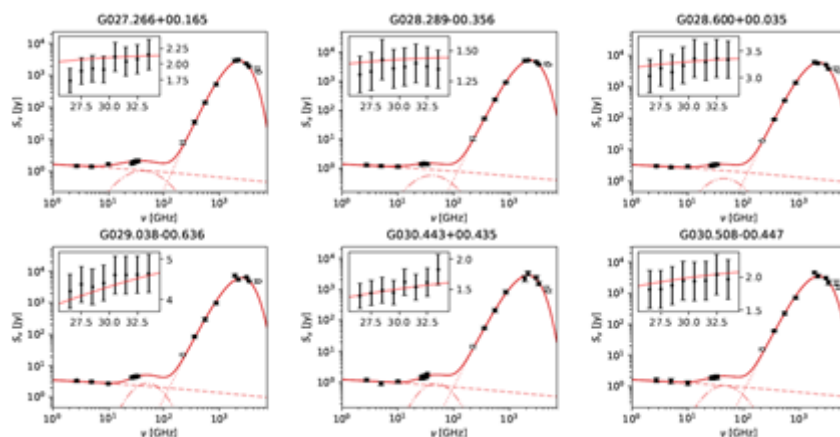


Figura 20: Espectros de distribuição de energia (SED) de seis regiões HII. Os círculos preenchidos são usados no ajuste, enquanto os círculos abertos não. As componentes livre-livre, poeira giratória e poeira são mostradas como linha tracejada, linha tracejada-pontilhada e pontilhada, respectivamente. O modelo de emissão total é mostrado como a linha vermelha grossa. O recorte mostrado no canto superior esquerdo de todos os gráficos mostra o espectro da banda de 26 a 34 GHz. Fonte: Rennie et al. (2022).

uma grande coleta de dados relacionados a um maior número de detecções de AME e de suas diversas fontes, talvez seja possível desvendar esse mecanismo de impulso dos grãos de poeira.

Atualmente, radiotelescópios continuam a coletar dados sobre a emissão de micro-ondas na Via Láctea com o objetivo de desvendar o desafio que representa a AME. Novos estudos devem explorar novos modelos teóricos e novas técnicas observacionais, principalmente para o preenchimento das lacunas em diversas faixas de frequência entre 1 e 100 GHz que ainda não foram exploradas.

Os trabalhos aqui citados representam uma parcela dos diversos estudos relacionados ao tema e não esgotam ou representam uma resposta definitiva sobre a origem da AME.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à coordenação do curso *lato sensu* de Astrofísica Gravitacional e Física Espacial do Instituto de Física da Universidade de Brasília, aos demais professores e a todos os alunos pelo apoio constante recebido e pela convivência proveitosa ao longo de todo o curso.

REFERÊNCIAS

- ABDALLA, E. et al. (2022). The BINGO Project I: Baryon Acoustic Oscillations from Integrated Neutral Gas Observations. *Astronomy & Astrophysics*, 664, A14. arXiv:2107.01633.
- Ali-Haïmoud, Y., Hirata, C. M., Dickinson, C. (2009), A refined model for spinning dust radiation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395(??): 1055–1078.

- Ali-Haïmoud, Y. (2014), Rotational spectroscopy of interstellar PAHs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 437: 2728–2743.
- Andrews, H., et al. (2015), PAH Emission at the Bright Locations of PDRs: the grandPAH Hypothesis. *The Astrophysical Journal*, 807:9.
- ASTROPARSEC: O porquê dos observatórios espaciais, 2021. Disponível em: < <https://astroparsec.com/2021/05/19/o-porque-dos-observatorios-espaciais> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.
- Bell, A. C. et al. (2019), Investigation of the Origin of the Anomalous Microwave Emission in Lambda Orionis, *Astronomical Society of Japan Volume 71, Issue 6, December 2019*, 123.
- Bennett, C.L. et al. (1992), Preliminary separation of Galactic and cosmic microwave emission for the COBE differential microwave radiometer. *The Astrophysical Journal Letters*. v. 396, n. 1, Part. 2, L7-L12.
- Bennett, C.L. et al. (2003), First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Foreground Emission, *Astrophysical Journal Supplement Series*, 148, 97.
- Bremsstrahlung.svg, Wikimedia Commons, 2007. Disponível em: < <https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Bremsstrahlung.svg> >. Acesso em: 12 de maio de 2022.
- Comins, N. F.; Kaufmann, W. J. (2010). *Descobrindo o Universo*. 8ª edição. Porto Alegre: Bookman.
- de Oliveira-Costa, A. et al. (1997), Galactic Microwave Emission at Degree Angular Scales, *The Astrophysical Journal*, 482, L17.
- Dickinson, C. et al. (2013), Anomalous Microwave Emission: Theory, Modeling, and Observations, *Advances in Astronomy*, Volume 2013, Article ID 134979.
- Dickinson, C. (2018). Large-Scale Features of the Radio Sky and a Model for Loop I, *Galaxies* 6, no. 2: 56.
- Dickinson, C. et al. (2018), The State-of-Play of Anomalous Microwave Emission (AME) Research, *New Astronomy Reviews*, Volume 80, February 2018, Pages 1-28.
- Draine, B. T.; Lazarian, A. (1998), Electric Dipole Radiation from Spinning Dust Grains, *The Astrophysical Journal*, 508, 157.
- Draine, B. T.; Lazarian, A. (1999), Magnetic Dipole Microwave Emission from Dust Grains, *The Astrophysical Journal*, 512, 2.

- Durrer, R. (2015). The cosmic microwave background: the history of its experimental investigation and its significance for cosmology, *Classical and Quantum Gravity*, 32(??), 124007.
- Erickson, W.C. (1957), A Mechanism of Non-Thermal Radio-Noise Origin, *The Astrophysical Journal*, 126:480.
- Greaves, J. S. et al. (2018), Anomalous Microwave emission from spinning nanodiamonds around stars, *Nature Astronomy* 2, pp. 662-667.
- Hensley, B. S.; Draine, B. T.; Meisner, A. M. (2016), A Case Against Spinning PAHs as the Source of the Anomalous Microwave Emission, *The Astrophysical Journal*, 827:45.
- Hueso, R., Guillot, T. (2003), Evolution of the protosolar nebula and formation of the giant planets, *Space Science Reviews*, 106(??), 105-120.
- Jones, M. E. et al. (2018), The C-Band All-Sky Survey (C-BASS): Design and capabilities, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 480, 3.
- Karssemeijer, L. J.; Pedersen, A.; Jónsson, H.; Cuppen, H. M. (2012), Long-timescale simulations of diffusion in molecular solids, *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2012,14, 10844-10852.
- Kogut, A. et al. (1996), High-latitude galactic emission in the COBE differential microwave radiometer 2 year sky maps, *The Astrophysical Journal*, 460, 1.
- Leitch, E.M.; Readhead, A.C.S.; Pearson T.J.; Myers, S.T. (1997), An Anomalous Component of Galactic Emission, *The Astrophysical Journal*, 486, 1.
- MELO, J. R. P. (2022), Emissão anômala de micro-ondas na Via Láctea, Trabalho de Conclusão de Curso, curso de pós-graduação lato sensu Astrofísica Gravitacional e Física Espacial, Instituto de Física, Universidade de Brasília.
- NASA/Goddard Space Flight Center: The Multiwavelength Milky Way, 2018. Disponível em: < https://asd.gsfc.nasa.gov/archive/mwmw/mmww_sci.html >. Acesso em: 12 de maio de 2022.
- Planck Collaboration (2006). The scientific programme of Planck, arXiv:astro-ph/0604069v1.
- Planck Collaboration (2011). Planck early results. XX. New light on anomalous microwave emission from spinning dust grains, *Astronomy & Astrophysics*, 536, A20.
- Planck Collaboration (2014), Planck intermediate results. XV. A study of anomalous microwave emission in Galactic clouds, *Astronomy & Astrophysics*, 565, A103.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey (2010). Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/a-Force-on-a-moving-charge-in-a-magnetic-field-b-An-electron-at-relativistic-speed_fig4_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Radio Astronomy and Super-Synthesis: A Survey (2010). Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Flux-density-measured-on-Earth-as-a-result-of-radio-emission-from-different-astronomical_fig2_228678515 >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

Rennie, T. J. et al. (2022), COMAP Early Science: VI. A First Look at the COMAP Galactic Plane Survey, arXiv:2111.05932.

Shannon, M. J.; Stock, D. J.; Peeters, E. (2015), Probing the ionization states of polycyclic aromatic hydrocarbons via the 15–20 m emission bands, *The Astrophysical Journal*, 811, 2.

Tibbs, C. T. et al. (2011), Spitzer characterization of dust in an anomalous emission region: the Perseus cloud, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 418:1889–1900.

Tielens, A. G. G. M. (2013), The molecular Universe. *Reviews of Modern Physics*, 85:1021–1081.

Types of Astronomical Spectra. Australia Telescope National Facility. Disponível em: < https://www.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/spectra_astro_types.html#spectypestar >. Acesso em: 18 de maio de 2022.

VILLELA, T. (2016). A Brief History of the Brazilian Participation in CMB Measurements, *The Cosmic Microwave Background*, pp 299-319, *Astrophysics and Space Science Proceedings book series (ASSP, volume 45)*, 2016. DOI: 10.1007/978-3-319-44769-8_9.

Weaver, J. R. et al. (2022), COSMOS2020: A Panchromatic View of the Universe to $z \sim 10$ from Two Complementary Catalogs, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 258, 1, id 11.

Wuensche, C. A. et al. (2022), The BINGO Project II: Instrument Description, *Astronomy & Astrophysics*, 664, A15. arXiv:2107.01634.

Ysard N.; VERSTRAETE, L. (2010), The long-wavelength emission of interstellar PAHs - characterizing the spinning dust contribution, *Astronomy & Astrophysics*, 509, A12.



Diagrama espaço tempo de Minkowski: uma abordagem para o Ensino Médio

Minkowski spacetime diagram: an approach to high school.

P. M. BARROS¹, V. C. ANDRADE¹

¹Instituto de Física – Universidade de Brasília

Resumo

Este trabalho apresenta inicialmente uma explicação sobre a teoria da Transposição Didática de Yves Chevallard, que discute os níveis de saberes e suas transformações. Após, é realizada uma discussão da métrica de Minkowski e sua relação com a relatividade de Einstein. Em seguida os diagramas espaço-tempo de Minkowski são apresentados. Por fim, baseado nas discussões anteriores, é apresentada uma sequência didática onde o diagrama Espaço Tempo de Minkowski é discutido com uma linguagem adequada para estudantes do Ensino Médio.

Palavras-chave: Minkowski. Relatividade. Transposição Didática.

Abstract

This work initially presents an explanation of Yves Chevallard's Didactic Transposition theory, this theory discusses the levels of knowledge and their transformations. Afterwards, a discussion of the Minkowski metric and its relationship with Einstein's relativity is carried out. Next, Minkowski space-time diagrams are presented. Finally, based on the previous discussions, a didactic sequence is presented where the Minkowski Space-Time diagram is discussed in a language suitable for high school students.

Keywords: Minkowski. Relativity. Didactic Transposition.

I. INTRODUÇÃO

Observa-se uma dificuldade em desenvolver temas da Física Moderna no Ensino Médio. Mesmo após vários trabalhos acadêmicos sugerindo formas de inserção destes tópicos na educação básica, ainda não se verifica, seja nos livros didáticos ou na própria sala de aula, uma forma onde professores e estudantes se sintam confortáveis no processo de ensino e aprendizagem.

Pietrocola (2005) discute se as regras da transposição didática são aplicáveis para a Física Moderna. No seu trabalho são apresentados os conflitos da adequação da matemática necessária para desenvolver alguns temas e o nível matemático do estudante do Ensino Médio.

Silva (2017) traz, no seu artigo publicado na Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, a importância da contribuição de Minkowski para a Relatividade de Einstein como também o sentido dado para Relatividade a partir do diagrama espaço-tempo de Minkowski.

A teoria da transposição didática foi objeto de discussão de vários trabalhos acadêmicos, Weckerlin, E. R; Machado, V. M. (2013), realizaram uma análise de publicações em revistas on-line classificadas com estrato A1. Eles encontraram 43 trabalhos com citações das teorias de Chevallard. Mesmo sendo repetidamente aplicada, Weckerlin defende a importância da transposição didática, uma vez que o professor traz um novo ângulo de observação do ensino.

Neste trabalho será proposta uma discussão sobre a transposição didática, de forma geral e também de forma específica para conceitos da física moderna.

No primeiro capítulo serão analisados os pontos mais relevantes sobre a teoria da transposição didática de Yves Chevallard.

No capítulo seguinte será descrita a métrica de Minkowski. E no próximo o diagrama espaço-tempo. Neste capítulo são inseridos exemplos que já favorecem o processo de ensino-aprendizagem.

No capítulo 4 será apresentada uma proposta de transposição didática a partir de uma sequência didática do diagrama espaço-tempo de Minkowski aplicada ao Ensino Médio.

II. TRANSPOSIÇÃO DIDÁTICA – YVES CHEVALLARD

Yves Chevallard (1991) evidencia que o saber que chega à sala de aula sofre deformações em relação ao saber científico. Isto porque ele passa por uma transformação, ou melhor, uma adequação visando o estudante. Os protagonistas da transposição didática são os pesquisadores, professores, técnicos, especialistas, ou seja, aqueles que irão escolher os saberes que serão ensinados e como serão ensinados. Este grupo constitui a Noosfera.

A Figura 1 mostra o caminho e as transformações do saber. Quando produzido é chamado de Saber Científico/Sábio, quando chega à escola, Saber a ser Ensinado, e por fim, dentro da sala de aula, Saber Ensinado. Este terceiro e último processo é o momento em que o professor é responsável por um novo momento de transformação, realizando mais uma transposição. Chevallard (1991) denomina este processo como trabalho interno de transposição.

É nesta última etapa em que o professor decide como ensinar, quais aspectos serão considerados, aspectos particulares e subjetivos. Segundo Câmara dos Santos (1995, 1997a apud BRITO MENEZES 2006) “o professor dá uma nova roupagem ao saber, cria um texto didático impregnado pela sua relação ao saber e pela sua subjetividade.” (p. 85).

Porém deve-se tomar cuidado com o processo da transformação didática, a fim de que ela não se resuma apenas a uma mera adaptação de um nível complexo, mais elevado,

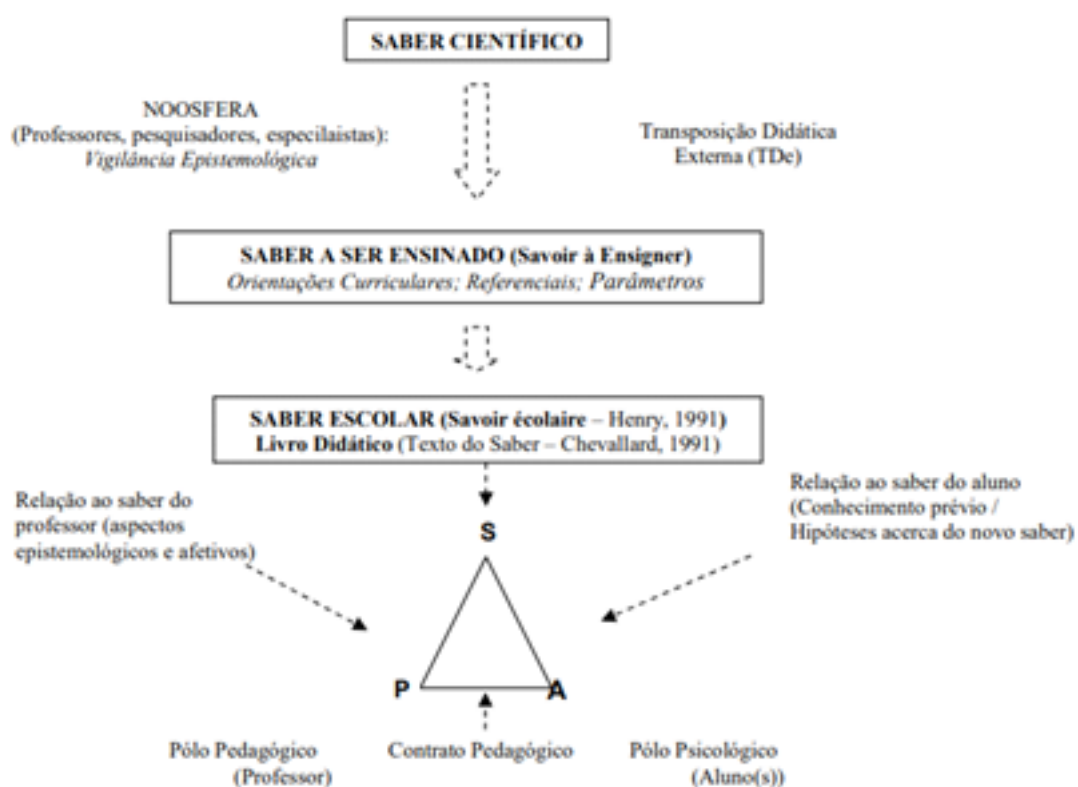


Figura 1: Esquema da trajetória do Saber na Transposição Didática. Fonte: Esquema da trajetória do Saber na Transposição Didática MATOS FILHO, et al, 2008

para um nível mais baixo que será ensinado aos estudantes. No trabalho de Brockington e Pietrocola (2005) é colocado que:

Para o aluno, esta ideia de simplificação do conhecimento transforma-se em um obstáculo ainda maior. A imensa maioria dos conceitos apresentados aos alunos tem pouco (às vezes nenhum) significado para eles. Assim, aquilo que lhes é ensinado difere totalmente do que vivenciam fora da escola. Com isso, raramente conseguem aplicá-los em qualquer outra situação que não sejam aquelas fornecidas dentro da sala de aula. (BROCKINGTON e PIETROCOLA, 2005, p.2)

Por fim, segundo Weckerlin, E. R; Machado, V. M. (2013), após a análise dos 43 artigos que evidenciam a teoria da transposição didática, concluem que apesar de ser aplicada em diversos trabalhos de pesquisa em ensino, a transposição didática é ainda uma alternativa para pesquisa em ensino de ciência, pois traz um novo olhar sobre o saber sábio que permite a consideração do processo social na construção do saber ensinado.

Na próxima seção, será discutido o formalismo da métrica de Minkowski.

III. MÉTRICA DE MINKOWSKI

A teoria da Relatividade Especial exige uma nova estrutura que descreva o tempo e o espaço. As transformações de Lorentz mostram uma interdependência entre o espaço e tempo, onde a antiga estrutura newtoniana, onde são válidas as transformações de Galileu, não é mais suficiente. Minkowski em 1908 propõe essa nova estrutura (MINKOWSKI, 1952).

Nesta seção será desenvolvida a estrutura algébrica da Métrica de Minkowski.

Considere um sistema de referência S , definido em um espaço quadridimensional. Pode-se representar suas componentes por:

$$x^0 = ct \quad (1)$$

$$x^1 = x \quad (2)$$

$$x^2 = y \quad (3)$$

$$x^3 = z \quad (4)$$

em que c representa a velocidade da luz no vácuo.

Considere dois referenciais, o referencial S representa um referencial fixo em relação à Terra e o S' um referencial que se move com velocidade constante em relação a S . Segundo Neto (2017), podemos relacionar dos sistemas S e S' por:

$$x'^0 = x'^0(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad (5)$$

$$x'^1 = x'^1(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad (6)$$

$$x'^2 = x'^2(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad (7)$$

$$x'^3 = x'^3(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad (8)$$

Sua diferenciação total é:

$$dx'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^0} dx^0 + \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^1} dx^1 + \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^2} dx^2 + \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^3} dx^3 \quad (9)$$

Podendo ser compactada em

$$dx'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} dx^\nu \quad (10)$$

Para um campo escalar arbitrário φ

$$\varphi(x^\mu) = \varphi(x'^\mu) \quad (11)$$

Derivando o campo escalar arbitrário em relação à

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x'^\mu} = \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\mu} \frac{\partial \varphi}{\partial x^\nu} \quad (12)$$

A equação (12) e a equação (10) representam duas maneiras diferentes a uma transformação. Respectivamente denominadas de covariante e contravariante. Para um vetor V qualquer:

$$V'_\mu = \frac{\partial x^\nu}{\partial x'^\mu} V_\nu \quad (13)$$

$$V'^\mu = \frac{\partial x'^\mu}{\partial x^\nu} V^\nu \quad (14)$$

O elemento de comprimento é expresso por:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu \quad (15)$$

O mesmo pode ser representado por um produto escalar.

$$ds^2 = d_\mu dx^\mu \quad (16)$$

Ou seja,

$$dx_\mu = g_{\mu\nu} dx^\nu \quad (17)$$

em que $g_{\mu\nu}$ é chamado de tensor métrico. Assim, o tensor métrico relacionado a métrica de Minkowski é

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Desta forma, a métrica de Minkowski é definida como:

$$ds^2 = dx_0 dx^0 + dx_1 dx^1 + dx_2 dx^2 + dx_3 dx^3 \quad (19)$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \quad (20)$$

Aplicando o tensor métrico associado ao elemento de linha de espaço tridimensional euclidiano nas equações (19) e (20), obtemos como resultado a métrica do espaço euclidiano.

$$\delta_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (21)$$

$$ds^2 = dx^1 dx^1 + dx^2 dx^2 + dx^3 dx^3 \quad (22)$$

$$ds^2 = (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \quad (23)$$

No trabalho de Silva (2017) cujo título é A Estrutura erigida para a Relatividade de Einstein: o espaço-tempo de Minkowski, ele afirma:

O espaço-tempo de Minkowski é $\mathbb{R}^4$, que contém uma métrica de Lorentz. Vale ressaltar que foi Minkowski quem traduziu à teoria da relatividade restrita a linguagem do espaço-tempo, em 1907, isto é, foi ele que reconheceu a real consequência da teoria: unificação do espaço e do tempo em uma só unidade. (SILVA, 2017, p.69).

IV. DIAGRAMAS ESPAÇO-TEMPO DE MINKOWSKI

Albert Einstein apresentou a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) em 1905. Logo após, seu antigo professor Hermann Minkowski mostrou que a TRR poderia ser representada geometricamente como uma teoria do espaço-tempo tetradimensional, sendo três coordenadas espaciais e uma temporal.

De acordo com Polito (2016), Minkowski observou que o espaço e o tempo podiam ser interpretados como coordenadas em um espaço pseudo-euclidiano de quatro dimensões.

O espaço tetradimensional da TRR é chamado de espaço-tempo de Minkowski, cuja métrica é dada pela distância entre dois eventos

$$\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad (24)$$

Nesta métrica se faz $c = 1$, e o sinal negativo é adotado por convenção e conveniência. O espaço-tempo pode ser classificado em: tipo espaço, tipo tempo e tipo luz.

- Se $\Delta s > 0$, é classificado como tipo espaço, ou seja, separa eventos que não podem comunicar-se entre si.
- Se $\Delta s = 0$, o intervalo é classificado como tipo luz e correspondem, por exemplo, a um pulso de luz.

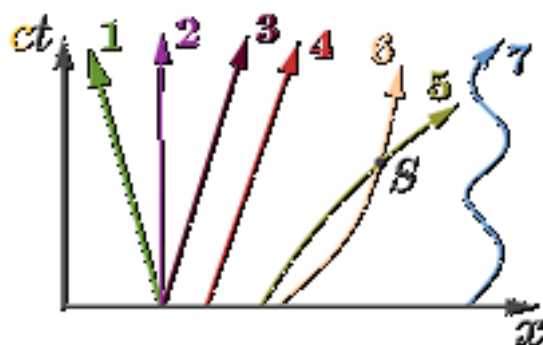


Figura 2: Sete linhas mundo. Fonte: <https://en.universaldenker.org/illustrations/552>

- Se $\Delta s < 0$, o intervalo é classificado como tipo tempo. Considerando que nenhuma partícula material foi observada se movendo com uma velocidade mais rápida do que a luz no vácuo, todas as linhas mundo das partículas são do tipo tempo.

Uma linha mundo pode ser definida como uma curva no espaço-tempo em que as posições de uma partícula são plotadas ao longo de sua existência. Cada objeto tem sua própria linha mundo dentro de um sistema de referência. A linha mundo descreve assim todo o passado e o futuro do objeto (Henning 2019)

A figura 2 ilustra sete linhas mundo em que algumas possibilidades são exploradas.

- Linha Mundo 1 - este corpo se move para a esquerda com velocidade constante.
- Linha Mundo 2 - este corpo está em repouso em uma determinada posição.
- Linha Mundo 3 - este corpo se move com velocidade constante para longe do corpo 2 e para a direita.
- Linha Mundo 4 - este corpo se move com a mesma velocidade que o corpo da linha mundo 3. Ele se move para a direita com uma distância fixa em relação a linha mundo 3.
- Linha Mundo 5 - este corpo é bastante rápido e acelera quase à velocidade da luz no vácuo. No evento S encontra o corpo 6.
- Linha Mundo 6 - este corpo se move quase à velocidade da luz e desacelera até parar.
- Linha Mundo 7 - este corpo balança para frente e para trás da direita para a esquerda.

V. SEQUÊNCIA DIDÁTICA - DIAGRAMA ESPAÇO-TEMPO DE MINKOWSKI: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO MÉDIO.

Nesta seção, será desenvolvida uma proposta de transposição didática do Espaço de Minkowski para estudantes do Ensino Médio. Conforme discutido no capítulo 1, deve-se ter o cuidado para que na transposição os conceitos não sofram deformações que os descaracterize. Ainda sobre os princípios da teoria da transposição didática, o professor do

Ensino Médio fará a última transposição considerando a realidade social do estudante bem como os objetivos da instituição de ensino.

É evidente que a álgebra que descreve a Métrica de Minkowski, aqui apresentada na seção III, está acima dos temas desenvolvidos pela matemática do Ensino Médio. O que poderia ser visto como um impasse para a transposição didática.

Na seção IV, a partir das linhas mundo, uma representação gráfica, visual, parece ser uma boa saída para esse impasse matemático. Gráficos $S \times t$ (posição versus tempo) são largamente discutidos nas aulas de física desde o 9º ano do ensino fundamental. Deve-se utilizar este domínio como ponto de partida para introduzir o diagrama espaço tempo de Minkowski.

Para exemplificar, será resolvida a questão P2.3 do livro “A General Relativity Workbook”, de Thomas A. Moore.

A transposição didática se dará por meio de uma sequência didática, pois esta forma organiza o processo de início, meio e fim, sendo então uma facilitadora da aprendizagem. Zabala define a sequência didática como:

Uma sequência didática se refere a um conjunto de atividades, estratégias e intervenções planejadas etapa por etapa pelo docente para que o entendimento do conteúdo ou tema proposto seja alcançado pelos discentes. São planejadas e desenvolvidas atividades para a realização de determinados objetivos educacionais, com início e fim conhecidos tanto pelos professores, quanto pelos alunos. (ZABALA, 1998, p.28).

1. Objetivo Geral: Apresentar o diagrama espaço-tempo de Minkowski como uma alternativa para a compreensão da Relatividade Especial.
2. Conteúdo:
 - Noções de Cinemática: trajetória, origem, referencial, posição, velocidade e aceleração. Gráfico de Posição x Tempo.
 - Diagrama de Minkowski
 - Linha Mundo
 - Aplicação do diagrama de Minkowski na resolução de um exercício do livro “A General Relativity Workbook”, de Thomas Moore.
3. Público-alvo: Estudantes do Ensino Médio
4. Motivação (objetivos específicos):
 - Contribuir com o letramento científico a partir de conceitos da Relatividade Especial.
 - Apresentar uma alternativa para a discussão da Relatividade.
 - Aumentar o interesse dos estudantes do Ensino Médio por temas contemporâneos da Física.

5. Duração: 3 aulas de 40 minutos.

Nos apêndices A-C apresentamos a organização das aulas.

V.1. Resolução do exercício proposto

V.1.1 Enunciado original:

P2.3 At $t = 0$, an alien spaceship passes by the earth: let this be event A. At $t = 260 \text{ Gm}$ (according to synchronized clocks on earth and Mars) the spaceship passes by Mars, which is 100 Gm from the earth at the time: let this be event B. (Note that $18 \text{ Gm of time} = 1.8 \times 10^{10} \text{ m} \approx 1 \text{ minute}$).

Radar tracking indicates that the spaceship moves at a constant velocity between the earth and Mars. Just after the ship passes the earth, people on the earth launch a probe whose purpose is to catch up with and investigate the spaceship. This probe accelerates away from the earth, moving slowly at first, but moves faster and faster as time passes, eventually catching up with and passing the alien ship just as it passes Mars. In all parts of this problem, you can ignore the effects of gravity and the relative motion of the earth and Mars (which are small) and treat the Earth and Mars as if they were both at rest in the inertial reference frame of the solar system. The probe takes some pictures of the alien spacecraft at event B, and immediately sends them encoded as in a burst of laser light back to the earth. The burst arrives at the earth at event C.

a. Use graph paper to draw a quantitatively accurate two-dimensional spacetime diagram of the situation in the solar system frame, showing the worldlines of the earth, Mars, the alien spacecraft, the probe, and the flash of laser light (which you can treat as if it were a particle). Let the position of the earth define $x = 0$ in that frame. Note that it is conventional in spacetime diagrams to calibrate the t and x axes so that they have scales of the same size expressed in the same units (in this case, steps of 20 Gm will probably be appropriate). Also note that the probe's worldline can never have a slope less than 1 (because it cannot move faster than light).

b. Explain how you determined the time coordinate of event C.

c. Use the metric equation to calculate the time that elapses between events A and B in the alien space-ship's frame. (Hint: Note that since the spaceship is present at both events, they occur at the same place, the spaceship's location, in the spaceship's frame.)

V.1.2 Enunciado traduzido:

Em $t = 0$, uma nave alienígena passa pela Terra: seja este o evento A. Em $t = 260 \text{ Gm}$ (de acordo com os relógios sincronizados na Terra e em Marte), a nave passa por Marte, que está a 100 Gm da Terra no momento: seja este o evento B. (Observe que $18 \text{ Gm de tempo} = 1,8 \times 10^{10} \text{ m}$ é aproximadamente 1 minuto). O rastreamento do radar indica que a espaçonave se move a uma velocidade constante entre a Terra e Marte. Logo depois que a nave passa pela Terra, as pessoas na Terra lançam uma sonda cujo objetivo é alcançar e investigar a espaçonave. Esta sonda acelera para longe da Terra, movendo-se lentamente no início, mas se move cada vez mais rápido com o passar do tempo, eventualmente alcançando

e passando pela nave alienígena assim que ela passa por Marte. Em todas as partes deste problema, você pode ignorar os efeitos da gravidade e do movimento relativo da Terra e de Marte (que são pequenos) e tratar a Terra e Marte como se ambos estivessem em repouso no referencial inercial do sistema solar. A sonda tira algumas fotos da espaçonave alienígena no evento B e as envia imediatamente codificadas como em uma explosão de luz laser de volta à Terra. A explosão chega à Terra no evento C.

1. Use papel milimetrado para desenhar um diagrama de espaço-tempo bidimensional quantitativamente preciso da situação na estrutura do sistema solar, mostrando as linhas de mundo da Terra, Marte, a espaçonave alienígena, a sonda e o flash de luz laser (que você pode tratar como se fosse uma partícula). Deixe a posição da Terra definir $x = 0$ nesse quadro. Não que seja convencional em diagramas de espaço-tempo calibrar os eixos t e x de modo que eles tenham escalas do mesmo tamanho expressas nas mesmas unidades (neste caso, passos de 20 Gm provavelmente serão apropriados). Observe também que a linha de mundo da sonda nunca pode ter uma inclinação menor que 1 (porque ela não pode se mover mais rápido que a luz).
2. Explique como você determinou a coordenada de tempo do evento C.
3. Use a equação métrica para calcular o tempo que decorre entre os eventos A e B na estrutura da nave alienígena. (Dica: Observe que, uma vez que a espaçonave está presente em ambos os eventos, eles ocorrem no mesmo lugar, a localização da espaçonave, no quadro da espaçonave.)

V.1.3 Resolução:

Começamos analisando a afirmação “Observe que 18 Gm de tempo = $1,8 \times 10^{10}$ m é aproximadamente 1 minuto”. Esta igualdade pode gerar um desconforto inicial nos estudantes. Uma vez que há uma igualdade entre grandezas físicas diferentes, distância e tempo. Esse incômodo pode ser sanado executando o cálculo para determinar qual distância é percorrida pela luz num intervalo de tempo igual a 1 minuto.

Assim, o tempo é medido em quantos metros a luz viajaria neste intervalo de tempo. Matematicamente: sendo $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, em um intervalo de tempo de 1 minuto (60 segundos) a luz percorre:

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (25)$$

$$3 \cdot 10^8 = \frac{\Delta x}{60} \quad (26)$$

$\Delta x = 18 \cdot 10^9$ m. Usando o múltiplo Giga, 1 giga = 10^9 , temos a correspondência 1 minuto = 18 Gm.

Mesmo assim é provável que o estudante questione como podemos igualar minuto com metros. Mais uma vez fica evidenciado a dificuldade em realizar uma boa transposição didática.

a) Considerando a sugestão do autor do livro é importante fazer o uso de um papel milimetrado. Considere que alguns estudantes ainda possam apresentar dificuldade em

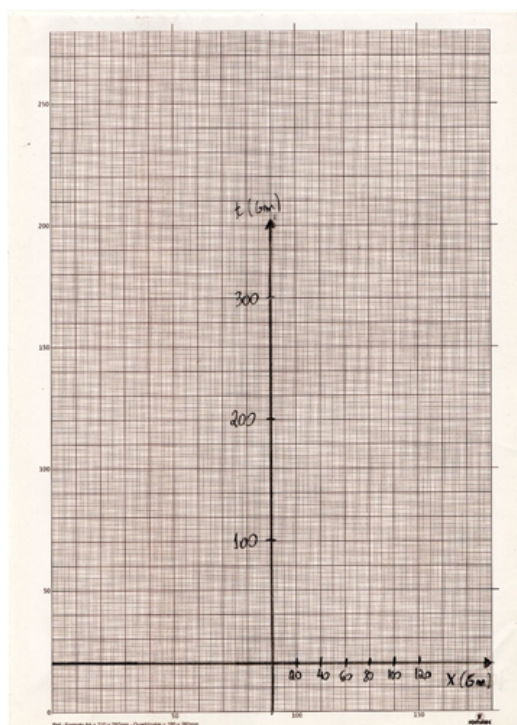


Figura 3: Eixos para o diagrama de Minkowski. Fonte: Elaboração dos autores.

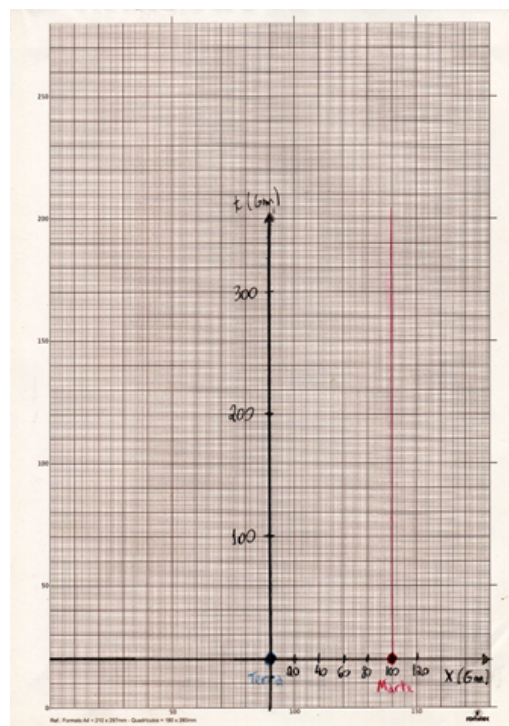


Figura 4: Linha Mundo de Marte. Fonte: Elaboração dos autores.

plotar os pontos para desenhar as linhas mundo. A construção do gráfico na aula 1 da sequência didática teve também como objetivo preparar os estudantes para este momento. Utilize a seguinte escala: 1 cm no papel milimetrado corresponde a 20 Gm.

Considerando a Terra e Marte em repouso, conforme o enunciado proposto, as linhas mundo, preta e vermelha respectivamente, ficam sendo retas verticais no diagrama de Minkowski.

A linha mundo da Nave, linha verde, é uma reta, pois o enunciado afirma que o movimento é uniforme, passa pela Terra no instante $t = 0$ Gm e alcança Marte no instante $t = 260$ Gm.

A linha mundo da Sonda, linha cinza, não é uma reta, pois o movimento é acelerado. O desenho da linha quase vertical, vai inclinando, indicando a aceleração. Observe que a inclinação não pode ser menor do que 1, pois indicaria que a Sonda se movimenta mais rápida do que a luz.

A linha mundo do Laser, linha amarela, esta reta possui inclinação igual a 1, pois a informação com a fotografia viaja com a velocidade da luz.

a) O evento C corresponde a chegada das fotos tiradas pela Sonda na Terra. Pelo gráfico construído é fácil perceber que a linha mundo da Terra, linha preta, intercepta a linha mundo da Sonda, linha amarela, no instante $t = 360$ Gm

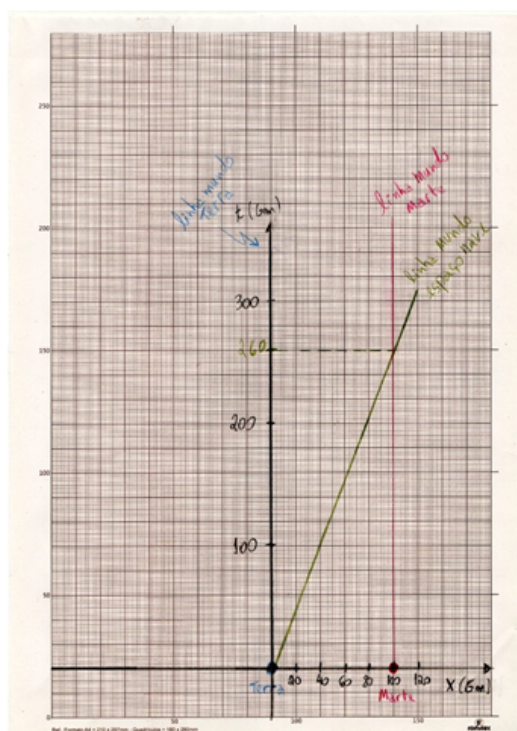


Figura 5: Linha Mundo da Espaçonave. Fonte: Elaboração dos autores

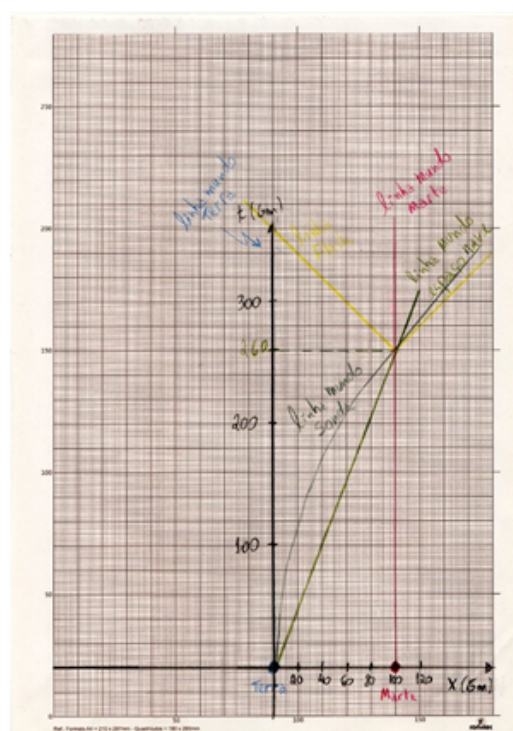


Figura 6: Linha Mundo do Laser. Fonte: Elaboração dos autores.

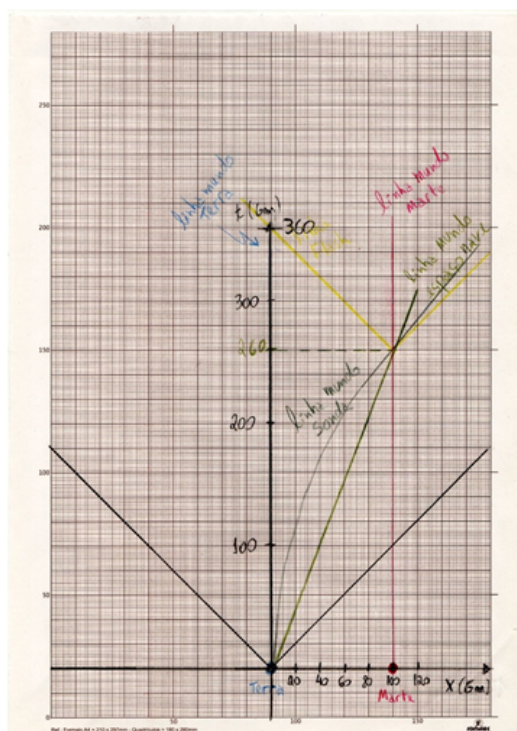


Figura 7: Linha Mundo Flash. Fonte: Elaboração dos autores.

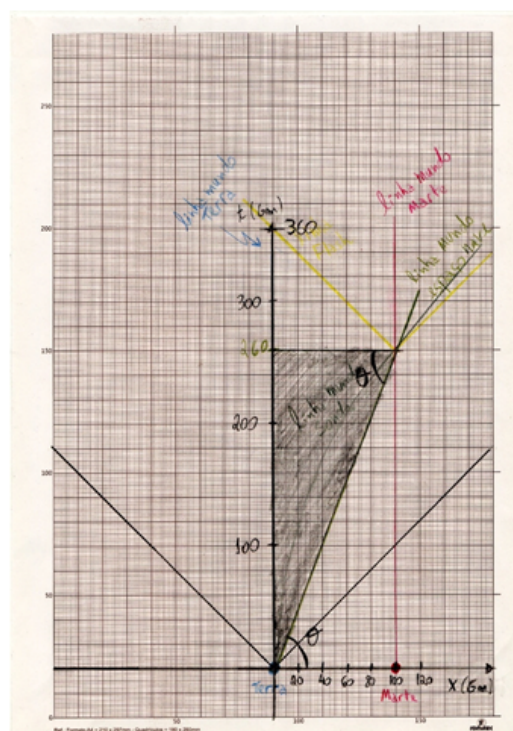


Figura 8: Linhas Mundo. Fonte: Elaboração dos autores.

1. Começamos calculando o fator de Lorentz, fator γ .

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (27)$$

Para determinar a velocidade v da espaçonave podemos fazer a cotangente do ângulo da reta que representa a linha mundo da espaçonave. Neste ponto os estudantes podem questionar o uso da cotangente, uma vez, que no gráfico $S \times t$, a tangente corresponde a velocidade. Vale lembrar aos estudantes que no espaço de Minkowski o eixo y corresponde ao tempo e o eixo x corresponde às posições.

Pode-se observar na figura 8. No triângulo hachurado:

$$\cot \theta = \frac{100}{260} \quad (28)$$

$$v = \cot \theta \quad (29)$$

$$v = 5/13 \quad (30)$$

Como $c = 1$, temos que

$$\beta = \frac{v^2}{c^2} \quad (31)$$

$$\beta = \frac{25}{169} \quad (32)$$

Assim,

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{25}{169}}} \quad (33)$$

$$\gamma = \frac{13}{12} \quad (34)$$

Fazendo o uso da transformação de Lorentz, e fazendo $\Delta y = 0$ e $\Delta z = 0$

$$\Delta t' = \gamma \Delta t - \gamma \beta \Delta x \quad (35)$$

$$\Delta t' = \frac{13}{12} 260 - \frac{13}{12} \frac{5}{13} 100 \quad (36)$$

$$\Delta t' = 240 \text{ Gm} \quad (37)$$

Neste momento vale a pena usar a relação do enunciado que diz: “18 Gm de tempo = $1,8 \times 10^{10}$ m é aproximadamente 1 minuto” e calcular quantos minutos equivale a 240 Gm.

$$\Delta t' = \frac{240}{18} \quad (38)$$

$$\Delta t' = 13 \text{ minutos e } 20 \text{ segundos} \quad (39)$$

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Realizar a transposição didática da Teoria da Relatividade para o Ensino Médio deve ser vista com uma atividade complexa, porque de um lado se tem o rigor epistemológico inerente da Física, que está muito distante do entendimento do senso comum. E por outro lado temos as exigências do sistema educacional, com um currículo extenso e, considerando as dimensões continentais do Brasil, há uma enorme diversidade cultural, o que cria uma dificuldade na transposição adequada a todos os estudantes.

Acredita-se que o trabalho aqui desenvolvido seja uma possibilidade plausível para a discussão de linhas mundo do espaço de Minkowski no Ensino Médio uma vez que, apesar da simplificação dos conceitos, foi preservada a Física e seus resultados teóricos.

Por fim, este trabalho tem também como objetivo ser aplicado para estudantes e, após análise dos resultados, poderá se tornar um artigo científico mostrando a eficácia (ou não) dessa transposição didática.

REFERÊNCIAS

BRITO MENEZES, A.P.A.. Contrato Didático e Transposição Didática: Inter-Relações entre os Fenômenos Didáticos na Iniciação á Álgebra na 6ª Série do Ensino Fundamental. Tese de Doutorado não publicada, UFPE, 2006.

BROCKINGTON, Guilherme; PIETROCOLA, Maurício. Serão as regras da transposição didática aplicáveis aos conceitos de Física moderna? *Investigações em Ensino de Ciências*, v. 10(3), p. 387-404, 2005.

CHEVALLARD, Y. *La Transposition Didactique: Du Savoir Savant au Savoir Enseigné*. Grenoble, La pensée Sauvage, 1991.

COUTO, A. O.F.; ANDRADE, A.F.A estrutura do espaço de Minkowski. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA E INOVAÇÃO (SemPI), III., 2019. Formiga. Anais eletrônicos[...]. Formiga: IFMG –CampusFormiga, 2019.

MATOS FILHO, M. A. S.; et al. A Transposição Didática em Chevallard: As Deformações/Transformações Sofridas pelo Conceito de Função em Sala de Aula. In: Congresso Nacional de Educação, 8, 2008, Curitiba.

MOORE, Thomas A. (Thomas Andrew) *A general relativity workbook* / Thomas A. Moore, Pomona College.

MINKOWSKI, H. Space and Time. In: LORENTZ, H. A.; EINSTEIN, A.; MINKOWSKI, H.; WEYL, H. *The Principles of Relativity: a collection of original memoirs on the Special and General Theory of Relativity*. New York: Dover Publications, 1952. p. 73-91.

NETO, J. B. *Teoria de Campos e a Natureza: parte quântica*. 1ª ed. São Paulo: Livraria da

Física, 2017.

POLITO, A. M. M. A construção da estrutura conceitual da física clássica. São Paulo: Livraria da Física, 2016.

R. HENNING, S. JEGLINSKI, D. MORSE, A Oldenburg Introduction to Spacetime diagrams in Special Relativity. 2019

SILVA, J. J. A estrutura erigida para a relatividade de Einstein: o espaço-tempo de Minkowski. Revista Brasileira de Física Tecnológica Aplicada, vol. 4, n. 2, dezembro, 2017. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/rbfta/article/download/7155/4682>>. Acesso em: 12 de dezembro de 2018.

TAYLOR, E.; WHEELER, J. A. Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity. 2nd. Edition, Freeman, 1992.

WECKERLIN, E. R; MACHADO, V. M. A Teoria da Transposição Didática: uma análise de periódicos CAPES na área do ensino de ciências, 2013.

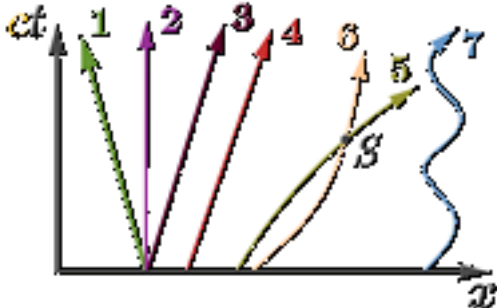
A. 1A. AULA

Retomada dos conceitos de cinemática.

Objetivo	Nivelar os conceitos básicos entre os estudantes a fim de que todos possam participar de forma efetiva do processo de ensino-aprendizagem.
Conteúdo	Cinemática
Assunto relevante	Conceitos Básicos: trajetória, origem, referencial, posição, velocidade e aceleração
Tempo de aula	40 min
Recurso didático a ser abordado.	Computador/Projetor
ATIVIDADES PARA O DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	
Aula 1	A <u>primeira etapa</u> consistirá em um bate-papo sobre situações do cotidiano dos estudantes. Considerando aqui a forma de locomoção entre a casa e a escola, os meios de transportes usados para suas viagens. Neste momento é importante que o professor faça uma leitura assertiva do perfil da turma, isto é, quais conceitos físicos relacionados ao movimento estão bem definidos e quais precisam de uma atenção maior. Na <u>segunda etapa</u> os estudantes serão convidados a pensar na seguinte questão-problema: Questão-problema Como descrever graficamente a posição ocupada por mim desde acordar até a chegada na escola em função do tempo? Questões motivadoras Se o meu transporte é o carro ou o ônibus, meu gráfico seria diferente? Podemos representar no mesmo sistema de coordenadas os gráficos de dois alunos? Caso esses gráficos tivessem pontos em comum, o que isto significaria? Qual o significado físico da inclinação da reta tangente em relação à curva em qualquer ponto do gráfico? Atividade Cada estudante deverá construir um gráfico Posição versus Tempo que represente seu deslocamento entre sua e casa e a escola.

B. 2A. AULA

Diagrama Espaço Tempo de Minkowski

Objetivo	Apresentar o diagrama de Minkowski, definir intervalo: tipo-tempo, tipo-espaço tipo-luz e traçar linhas mundo.
Conteúdo	Diagrama Espaço-Tempo
Assunto relevante	Relatividade Especial, Espaço-Tempo de Minkowski
Tempo de aula	40 min
Recurso didático a ser abordado.	Computador/Projektor
ATIVIDADES PARA O DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	
Aula 2	A primeira etapa consistirá em resgatar os gráficos realizados pelos estudantes na aula 1. Usando um ou dois como exemplos para apreciação da turma. A segunda etapa será a apresentação do Espaço-Tempo de Minkowski. Enfatizar as grandezas físicas representadas em cada eixo. Com uma simplificação, escrever a métrica de Minkowski: $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$ Considerando apenas a direção x $\Delta s^2 = -\Delta t^2 + \Delta x^2$ Introduzir o conceito de intervalo (tipo-tempo, tipo-espaço ou tipo-luz) Desenhar no diagrama uma linha mundo para cada tipo de intervalo. Atividade A partir da figura abaixo, os estudantes devem sugerir movimentos que estão representados em cada linha mundo 

C. 3A. AULA

Resolução de uma questão de Relatividade Especial proposta no livro: “A General Relativity Workbook”, de Thomas Moore.

Objetivo	Resolver um exercício em busca da sistematização do diagrama de Minkowski.
Conteúdo	Diagrama Espaço-Tempo – Resolução de exercício
Assunto relevante	Relatividade Especial, Espaço-Tempo de Minkowski
Tempo de aula	40 min
Recurso didático a ser abordado.	Computador/Projektor
ATIVIDADES PARA O DESENVOLVIMENTO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA	
Aula 3	A <u>primeira etapa</u> consistirá na leitura do enunciado da questão proposta. A <u>segunda etapa</u> será uma breve discussão com os estudantes sobre o problema proposto. Buscando instigá-los para possíveis soluções. Distribuição do papel milimetrado, conforme sugerido pelo autor do exercício, Thomas Moore. Atividade Resolver a questão proposta. Construir o diagrama de Minkowski. Desenhar as cinco linhas mundo: Terra, Marte, Nave, Sonda e Laser. Calcular o tempo que decorre entre os eventos A e B na nave alienígena.



Reflexões sobre a Natureza do Tempo a partir de Fenômenos Relativísticos

Reflections on the Nature of Time Based on Relativistic Phenomena

TARIC DE OLIVEIRA SOUSA¹, NADJA SIMÃO MAGALHÃES²

¹Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações.

²Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas, Universidade Federal de São Paulo

Resumo

O trabalho pretende refletir sobre a natureza do tempo a partir dos conceitos elencados por Newton e dentro da cinemática de referenciais em movimento abordados na relatividade especial de Einstein. Para tal, exploramos todos os experimentos mentais propostos em seu trabalho original de 1905. Uma vez que Einstein usa o relógio como ferramenta fundamental de sua análise, procuramos trazer a origem do relógio para entender o que é registrado como tempo e por fim analisamos este registro para entendermos como a dilatação do tempo pode nos guiar no que é entendido como tempo em si.

Palavras-chave: Tempo. Relatividade Especial.

Abstract

This work intends to reflect on the nature of time from the concepts listed by Newton and within the kinematics of moving references addressed in Einstein's special relativity. To this end, we explored all the thought experiments proposed in his original work from 1905. Since Einstein uses the clock as a fundamental tool in his analysis, we seek to bring the origin of the clock to understand what is recorded as time and finally we analyze this record. to understand how the dilation of time can guide us in what is understood as time itself.

Keywords: Time. Special Relativity.

*nadja.magalhaes@unifesp.br

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho concentra-se, inicialmente, na análise e interpretação de fenômenos introduzidos pela relatividade especial, proposta por Albert Einstein no seu trabalho original publicado em 1905, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, na revista *Annalen der Physik*, que trata sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Especificamente, a análise é feita sobre a natureza do tempo, observando-o tanto em referenciais estacionários quanto em referências em movimento relativístico.

Porém, a base deste pensamento exige o entendimento da física explicada por Isaac Newton no seu trabalho *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1686) onde temos o alicerce da mecânica.

Após a análise de como o tempo em relatividade é alterado, partimos para refletir como os efeitos desta dissincronia podem dar respostas sobre o que é o tempo. Nem Newton nem Einstein explicam o que é o tempo e por isso compreender o relógio de sol como a origem da marcação do tempo pode nos ajudar a entender o tempo na física. Entender a construção do relógio e a evolução desse mecanismo nos permite achar respostas dentro de diversas vertentes da física que precisam de altíssima precisão no tempo para desenvolver seus estudos.

II. AS PERSPECTIVAS DE NEWTON E DE EINSTEIN

II.1. As definições de Newton

Quando estudamos os textos clássicos de Isaac Newton sobre mecânica temos a percepção imediata de que o movimento rege aquela base fundamental da física, não à toa é a primeira vertente de ensino nos cursos básicos.

Newton (1686) define a quantidade de matéria, quantidade de movimento, força inata da matéria, força imprimida, força centrípeta, dentre outras. As explicações de várias formas de movimentos e suas aplicações constroem leis que regem a mecânica clássica e suas aplicações, porém, temos o tempo como uma entidade que sempre existiu no mundo físico.

Pelas próprias palavras de Newton:

Eu não defino tempo, espaço, lugar e movimento, sendo bem conhecidos por todos. Eu apenas posso observar o que pessoas comuns podem conceber dessas quantidades sob nenhuma outra noção a não ser da relação com que eles têm com os objetos sensíveis. Daí surgem certos preconceitos para cuja remoção será conveniente distingui-los em absolutos e relativos, verdadeiros e aparentes, matemáticos e comuns. NEWTON (1686, p. 6) Tradução do autor.

II.2. A dinâmica fundamental

O movimento consiste numa mudança de posição de um corpo ou de um sistema, em relação ao tempo, quando medido por um dado observador num referencial determinado.

É a base da dinâmica, que determina que a força é a relação entre massa e aceleração de um corpo.

Assim, pela segunda Lei de Newton

$$\vec{F} = m \vec{a}. \quad (1)$$

Sabemos também que velocidade é dada pela variação do espaço e pela variação do tempo quando temos os valores definidos para essas grandezas como dado pela expressão abaixo.

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}. \quad (2)$$

A expressão (2) traz uma das relação mais fundamental do movimento de uma partícula sensível, onde sensível deve ser entendido como observável, como disse Barbour (2008). Para que haja movimento (deslocamento desde um ponto s_1 para um ponto s_2), temos associada a passagem do tempo (marcando o início do movimento no instante t_1 e o final no instante t_2). Todo movimento associa-se intrinsecamente nessa relação de percurso de espaço num dado intervalo de tempo.

II.3. O tempo para Newton

Aqui temos a base fundamental da mecânica newtoniana tendo o espaço e o tempo como grandezas físicas inerentes ao universo e existentes por si só. Ou seja:

Tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só, é detentor da sua própria natureza, flui igualmente sem relação com nada externo e é por outro nome chamado: Duração. Tempo relativo, aparente e comum é algo sensível e externo (seja preciso ou não). Mensura a duração pelo significado do movimento que é comumente usado em vez do tempo verdadeiro como hora, dia, mês ou ano. (NEWTON, 1686, p. 6) Tradução do autor.

Para Newton o tempo não é apenas absoluto, verdadeiro e matemático. Esse tempo é o tempo que flui independente de algo externo e sua natureza não é compreendida. O que julgamos compreender em nosso entendimento comum é o tempo relativo, aparente e comum. O que vemos no relógio é a própria mensuração da duração do movimento, porém não é o tempo verdadeiro, mas sim, a duração associada a algum movimento.

III. SIMULTANEIDADE LOCAL DE EINSTEIN

Albert Einstein (1905) construiu uma estrutura para a análise dos fenômenos que envolvem o tempo partindo do relógio parado no referencial de um observador. Einstein precisou definir, fisicamente, o sistema de mensuração do tempo e para isso ele determinou que o tempo medido é o tempo observado nos ponteiros do relógio do observador.

Assim, os eventos locais são simultâneos, pois ocorrem no mesmo instante de todos os relógios sincronizados. Por exemplo, a chegada de um trem à estação às 7 horas. Este evento - chegada do trem na estação às 7 horas - é simultâneo ao ponteiro do relógio marcando 7 horas na estação. Dessa forma definimos, objetivamente, os eventos de chegada do trem à estação e a observação da marcação do relógio. Esses eventos são simultâneos localmente.

Notamos que a física newtoniana se remete a eventos observados dentro da simultaneidade local e compreendidos no tempo comum.

Eventos que ocorram em pontos diferentes da Terra também poderão ter simultaneidade para relógios que estão em repouso entre si, mas será necessário sincronizá-los.

III.1. Sincronia em relógios estacionários

O tempo de um evento é o que é dado simultaneamente com o evento do relógio estacionário localizado no local do evento, esse relógio sendo síncrono e de fato síncrono por todas as determinações de tempo, especificado com o relógio estacionário. Einstein (1905, p. 3) Tradução do autor.

Quando colocamos relógios em locais distintos do espaço e que estão em repouso entre si, será necessário sincronizá-los. Um evento x' que ocorra na vizinhança do observador $\mathcal{A}$ será coincidente e simultâneo com a vizinhança de $\mathcal{A}$, o que define a simultaneidade local, porém, no geral, não será simultâneo com o tempo marcado em outro ponto do espaço. Imaginemos que este evento x' seja observado desde a origem do sistema coordenado $\mathcal{B}$ e que este possua um relógio sincronizado com o relógio de $\mathcal{A}$. A observação do evento x' em $\mathcal{A}$ a partir da origem de $\mathcal{B}$ demanda o percurso da luz do ponto x' até a origem de $\mathcal{B}$. Esse exemplo mostra a necessidade de uma trama de relógios para a marcação do tempo em sistemas distintos no espaço.

Uma vez que os relógios estão sincronizados eles registram uma passagem de tempo similar, levando-se em consideração que os mecanismos foram construídos da mesma forma e com a mesma escala de marcação.

Porém, registrar o evento no relógio em $\mathcal{A}$ não é simultâneo com o registrar em $\mathcal{B}$. A informação precisará viajar desde o local do evento até aquele outro ponto do espaço para que haja o registro do evento.

Seguindo o exemplo do trem, no instante da sua chegada à plataforma em $\mathcal{A}$ será marcado o instante de tempo $t_{\mathcal{A}}$. Assim que ocorrido esse evento, será enviada a informação para o observador em $\mathcal{B}$ que marcará, olhando em seu relógio, o instante que a informação chegar como o instante $t_{\mathcal{B}}$. Cada observação será registrada no relógio próprio de cada observador. Para que o observador em $\mathcal{A}$ tenha nota de que o evento foi observado em $\mathcal{B}$, a informação precisa ser enviada de volta de $\mathcal{B}$ para $\mathcal{A}$, e este observador em $\mathcal{A}$, ao receber a informação registrará o instante $t'_{\mathcal{A}}$.

Para que haja a sincronia dos relógios, Einstein propõe:

$$t_{\mathcal{B}} - t_{\mathcal{A}} = t'_{\mathcal{A}} - t_{\mathcal{B}} . \quad (3)$$

Partindo dessa expressão podemos criar uma trama de relógios sincronizados em vários

pontos do espaço.

III.2. Definição da velocidade da informação

Dois postulados vão fundamentar a relatividade de Einstein:

1 – Princípio da Relatividade: As leis pelas quais os estados dos sistemas físicos sofrem mudanças não são afetadas, sejam essas mudanças de estado referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento translacional uniforme. Einstein (1905, p. 4) Tradução do autor.

e

2 – Princípio da constância da velocidade da luz: Qualquer raio de luz se move no sistema "estacionário" de coordenadas com a velocidade c determinada, seja o raio emitido por um aparelho estacionário ou por um corpo em movimento. Einstein (1905, p. 4) Tradução do autor.

Por isso, velocidade da luz é igual ao caminho da luz dividido pelo intervalo de tempo. Partindo da sequência de eventos para a sincronia dos relógios e tendo c como a velocidade da luz, podemos usar a função horária dos espaços uma vez que c é constante no vácuo:

$$S - S_0 = vt, \quad (4)$$

Então, imaginemos o evento x' ocorra em $\mathcal{A}$ no ponto S_0 . O feixe de luz viaja até o ponto S que coincide com a origem de $\mathcal{B}$. Assim, $S - S_0 = S_{AB}$.

Cada evento de emissão e recepção será registrado no relógio do espaço coordenado $\mathcal{A}$ ou $\mathcal{B}$ que estarão previamente sincronizados pela expressão (3).

Os momentos da saída da informação de $\mathcal{A}$ e da chegada da informação a $\mathcal{B}$ (Figura 1) têm como intervalo de tempo o termo da esquerda da equação (3). Assim:

$$S_{AB} = c(t_B - t_A), \quad (5)$$

Para o momento da saída da informação de $\mathcal{B}$ e retorno para $\mathcal{A}$ utilizaremos o termo da direita da equação (3). Assim, temos:

$$S_{AB} = c(t'_A - t_B), \quad (6)$$

Somando (7) e (8) e isolando para c , definimos a constante universal da velocidade da luz no espaço vazio.

$$c = \frac{2S_{AB}}{t'_A - t_A}. \quad (7)$$

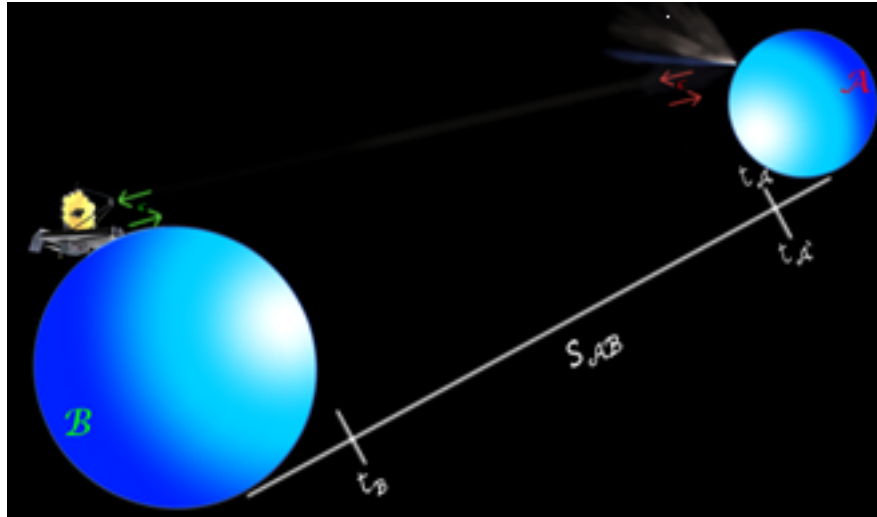


Figura 1: Emissão: envio da informação. Fonte: produzida pelo autor.

Temos, portanto, que o evento registrado tem sincronidade de relógios nos pontos $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$, a definição de c como a velocidade da informação e que essa velocidade está associada à distância S_{AB} e dividida pela diferença de tempo $(t'_A - t_A)$.

Einstein aponta que:

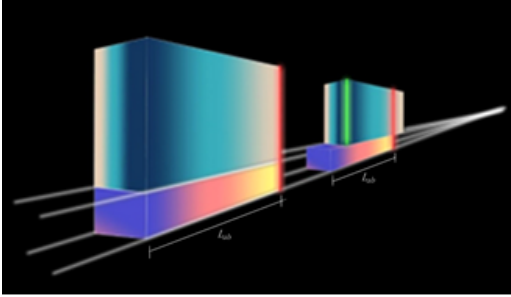
(...) é imprescindível ter o tempo definido por meio de relógios estacionários em sistemas estacionários e o tempo sendo definido e apropriado para este sistema, o que será chamado de "o tempo do sistema estacionário. EINSTEIN, (1905, p. 3)

III.3. Haste fixa e definição da passagem do tempo para diferentes observadores

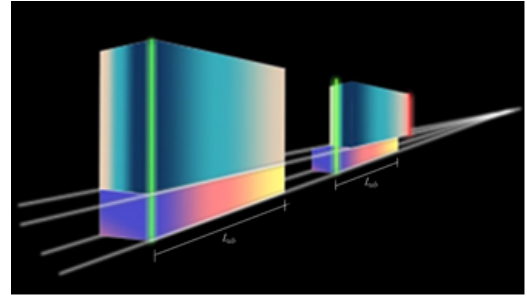
Tendo como base os postulados da relatividade especial, colocaremos uma haste rígida ao longo da superfície de um trem e em cada extremidade colocaremos um relógio, tendo o cuidado de fazer com que esses relógios estejam sincronizados localmente com o relógio na estação. Teremos um observador na plataforma e outro viajando junto com a haste no trem. Quando esse trem estiver em movimento uniforme e o ponto a extremidade frontal, $\mathcal{A}$, passar pelo observador na plataforma, um feixe de luz será emitido para a extremidade traseira, $\mathcal{B}$, e que logo após refletirá o feixe de luz de volta para a extremidade frontal.

É simples observar que o feixe de luz percorrerá o comprimento da haste em $\overline{AB}$ e em $\overline{BA}$. Assim como na sincronia dos relógios, no momento da emissão do feixe, o relógio na extremidade $\mathcal{A}$ registrará um tempo t_A , no instante que o feixe atingir a extremidade $\mathcal{B}$ será registrado um tempo t_B e no retorno da informação para a extremidade $\mathcal{A}$ teremos t'_A . A haste terá um comprimento fixo, que suporemos, como Newton, não variar com o movimento e que chamaremos de $\mathcal{L}_{AB}$

Aplicando a função horária dos espaços, associando $S - S_0 = \mathcal{L}_{AB}$, tendo o trem ve-



(a) Emissão de um feixe de luz na parte frontal do bloco (barra vermelha). Fonte: produzida pelo autor.



(b) Reflexão de um feixe de luz na parte traseira do bloco (barra verde). Fonte: produzida pelo autor.

Figura 2

locidade v no sentido positivo de eixo x e que a extremidade $\mathcal{A}$ está na frente (Figura 2a).

Analisando as Figuras 2a e 2b, vemos que o trem se desloca no sentido positivo do eixo x , porém a emissão de $\mathcal{A}$ para $\mathcal{B}$ vai no sentido oposto. Supondo um observador na plataforma, este verá que a velocidade da luz será c menos a velocidade v do trem.

$$(t_B - t_A) = \frac{\mathcal{L}_{AB}}{(c - v)}. \quad (8)$$

O divisor $(c - v)$ corresponde a dizer que a luz percorreu $\mathcal{L}_{AB}$ mais rápido que a velocidade da luz, se pensarmos de forma clássica.

Ao chegar a $\mathcal{B}$, o feixe de luz é refletido de volta para $\mathcal{A}$ (Figura 2b) que registra o evento do retorno em t'_A . Como o trem continua em movimento o observador na plataforma observa que os valores de c e v estão indo no sentido positivo do eixo x . Dessa forma, para esse trecho, temos:

$$(t'_A - t_B) = \frac{\mathcal{L}_{AB}}{(c + v)}. \quad (9)$$

Aqui o divisor $(c + v)$ corresponde a dizer que a luz precisa percorrer o comprimento $\mathcal{L}_{AB}$ mais a distância que o trem percorreu por conta da sua velocidade. Nesse trecho, uma vez que $\mathcal{L}_{AB}$, classicamente, é imutável, o tempo do percurso da luz é maior.

É importante trazer a definição clássica de Newton para o espaço:

Espaço absoluto, em sua própria natureza, sem relação com nada externo, permanece sempre similar e imóvel. Espaço relativo é algo móvel, dimensional e mensurável do espaço absoluto (...). Newton (1686, p. 6) Tradução do autor.

Porém, a equação (8) mostra que o feixe de luz viajou até a extremidade traseira numa velocidade maior que a da luz e, pela equação (9), ao voltar para a extremidade frontal a velocidade da luz foi menor. Temos uma contradição com o que diz o postulado do princípio da velocidade da luz, que anuncia que a luz se desloca sempre com velocidade c

independente da velocidade da fonte emissora.

Se os postulados estão certos, então é necessário entender o que ocorre com os tempos e os espaços das equações (8) e (9). Classicamente esperaríamos que os eventos (emissão da luz na frontal, reflexão traseira e retorno para a parte frontal) fossem simultâneos e síncronos, porém, segundo a relatividade especial, a luz é definida como a entidade física com a velocidade limite e nada poderia viajar mais rápido. Então uma correção é necessária.

IV. CONSTRUINDO A RELATIVIDADE ESPECIAL

IV.1. Definindo as equações em $\xi || x, \eta || y$ e $\zeta || z$

Entendemos na equação (3) como se dá a sincronia de relógios em sistemas estacionários e podemos associar esses sistemas com o tempo relativo de Newton. Porém, ao considerarmos o tempo absoluto como algo que flui igualmente dentro da sua própria natureza, incorremos numa inconsistência com os postulados *einstenianos*. Se o tempo flui igualmente para todos os observadores em todas as condições de movimento, então a luz pode se mover mais rápido do que o valor determinado para c , o que, pelo postulado da constância da velocidade da luz é absurdo.

Então, partindo do pressuposto de que c é a velocidade limite, as componentes de espaço e tempo precisam ser reavaliadas. Einstein propõe uma análise mais aprofundada na experiência da haste rígida:

Dois sistemas de coordenadas, cada uma com uma régua na direção do eixo x . Um estacionário chamado de $\mathcal{A}$ e outro com velocidade de módulo v constante e em direção ao sentido positivo do eixo x do sistema estacionário, chamado de $\mathcal{B}$. O sistema $\mathcal{B}$ possui uma fonte luminosa que emite um raio de luz. Essa emissão será registrada em $\mathcal{B}$ no seu relógio local. Como exposto nas expressões (8) e (9), é aqui que precisamos nos atentar para a inconsistência entre as visões de Newton e Einstein.

Os registros de tempo em $\mathcal{B}$ serão relacionados à letra grega tau (τ). O instante da emissão do feixe de luz será registrado como τ_0 . Um feixe de luz viajará até o ponto x' determinado como um ponto qualquer sobre uma régua no eixo x do sistema $\mathcal{A}$ e esse evento será registrado como τ_1 . O feixe de luz será refletido para a origem da emissão e, ao retornar, será registrado o momento da chegada como τ_2 . Até aqui a construção de emissão, reflexão e retorno do feixe são idênticos aos exemplos que foram construídos no capítulo anterior.

Os eixos ortogonais do sistema $\mathcal{B}$ serão nomeados como csi (ξ), eta (η) e zeta (ζ). No sistema $\mathcal{A}$ os eixos ortogonais serão x, y, z . Desta forma, $\xi || x, \eta || y$ e $\zeta || z$ e:

$$\mathcal{A}(t, x, y, z), \quad \mathcal{B}(\tau, \xi, \eta, \zeta). \quad (10)$$

Os sistemas $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$ devem respeitar a homogeneidade do espaço e do tempo, como diz o postulado 1 e, por isso, as funções expressas para qualquer um dos sistemas deve ser linear.

Como foi identificado x' como um ponto qualquer sobre a régua, para que esse seja o nosso ponto de referência no sistema estacionário, então esse ponto será $x = x - vt$ que é a transformada de Galileu. Isso, pois a régua em $\mathcal{B}$ se afasta com velocidade constante

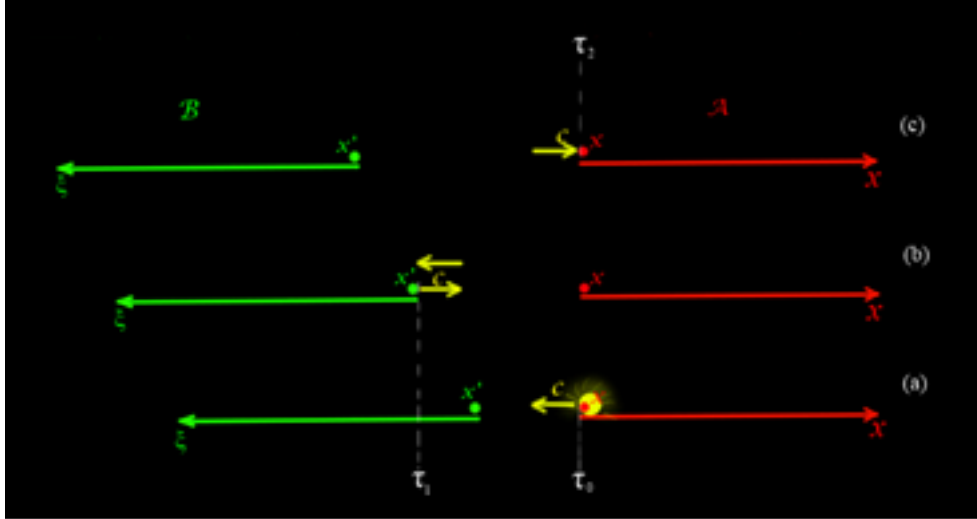


Figura 3: Representação dessa experiência mental proposto por Einstein. Fonte: produzida pelo autor.

ao sentido positivo do eixo x . O sinal negativo representa que a origem de $\mathcal{B}$ se afasta da origem de $\mathcal{A}$.

Ao assumir $x' = x - vt$, temos que um ponto em repouso no sistema $\mathcal{B}$ terá valores x' , y e z independentes do tempo. Precisamos, também, definir τ em função de x' , y , z e t .

Na figura 3, em a) temos a emissão de um feixe de luz na origem de um sistema estacionário (registro de τ_0); b) temos a recepção e reflexão do feixe de luz no sistema em movimento (registro de τ_1) e em c) temos a recepção no sistema estacionário (registro de τ_2).

Podemos definir os tempos registrados em $\mathcal{B}$ como:

$$\frac{1}{2}(\tau_0 + \tau_2) = \tau_1. \quad (11)$$

Admitindo a constância da velocidade da luz no sistema estacionários, admitindo $\tau(x', y, z, t)$, as expressões de tempo definidas no capítulo anterior (expressões 8 e 9) associadas à expressão (11), chegaremos na expressão

$$\tau = a \left(t - \frac{v}{c^2 - v^2} x' \right), \quad (12)$$

Para um raio de luz emitido em $\tau = 0$ na direção crescente de ξ , temos que:

$$\xi = \tau c. \quad (13)$$

Tendo em vista que o raio de luz é emitido de x' em $\mathcal{A}$ e que se move na direção de $\mathcal{B}$, a medida feita por $\mathcal{A}$ para esta velocidade é dada por $c - v$. Assim:

$$t = \frac{x'}{c - v}, \quad (14)$$

Então, combinando (12), (13) e (14), temos:

$$\xi = a \frac{c^2}{c^2 - v^2} x'. \quad (15)$$

É importante observar que para η e ξ ; as alterações possíveis se darão por um termo que chamaremos de $\phi(v)$.

Assim:

$$\eta = \phi(v) y, \quad \xi = \phi(v) z. \quad (16)$$

Ao observar as expressões (12) e (15), precisamos encontrar $\phi(v)$.

Realizando a álgebra necessária, temos que:

$$\begin{aligned} \tau &= \phi(v) \gamma \left(t - vx/c^2 \right), \\ \xi &= \phi(v) \gamma (x - vt). \\ \eta &= \phi(v) y \\ \xi &= \phi(v) z \end{aligned} \quad (17)$$

onde a expressão abaixo é chamada de Fator de Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (18)$$

Com a expressão (17) fica claro que existe uma alteração importante no comportamento do espaço e do tempo que está associada a esta função γ . As concepções de espaço e tempo de Newton onde o “tempo absoluto (...) flui igualmente” ou “espaço absoluto (...) permanece sempre similar e imóvel” não são observadas na mecânica relativística.

Dependendo da velocidade entre os observadores em $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$, existe uma correção γ que deve ser considerada por conta de uma velocidade relativa entre os dois, o que impactará as medidas que $\mathcal{A}$ fizer de duração e distância medidas pelo viajante no plano coordenado $\mathcal{B}$.

IV.2. O espaço corrigido

Einstein (1905, p. 8) propõe outro experimento mental com o objetivo de interpretar o que ocorre com o espaço para cada observador em cada referencial.

Como foi definido que um raio de luz vindo do sistema em movimento $\mathcal{B}$ se propaga com velocidade c e que esta velocidade é um limite e que independe do valor da velocidade relativa entre os referenciais $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$, v , precisamos provar que o princípio da constância da velocidade da luz é compatível com o princípio da relatividade.

Para tal, usando a equação (17) e fazendo $t = \tau = 0$, nesse instante, uma onda esférica parte da origem de $\mathcal{B}$ com velocidade de propagação c . Podemos definir que essa esfera no sistema $\mathcal{A}$ tem forma:

$$x^2 + y^2 + z^2 = c^2 t^2. \quad (19)$$

Uma onda esférica também ocorrerá no sistema $\mathcal{B}$, após um rearranjo algébrico simples

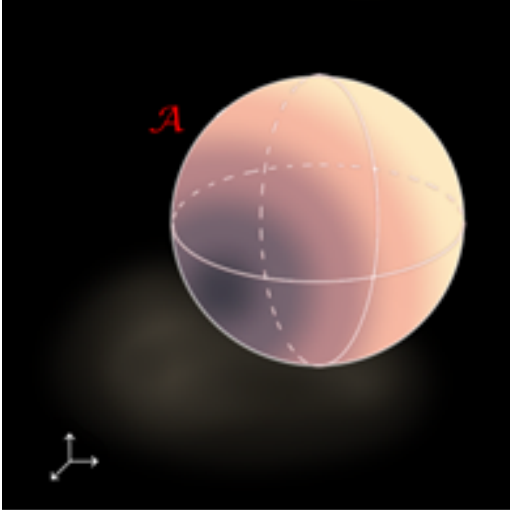


Figura 4: Esfera no sistema estacionário vista por Catarina. Fonte: produzida pelo autor.

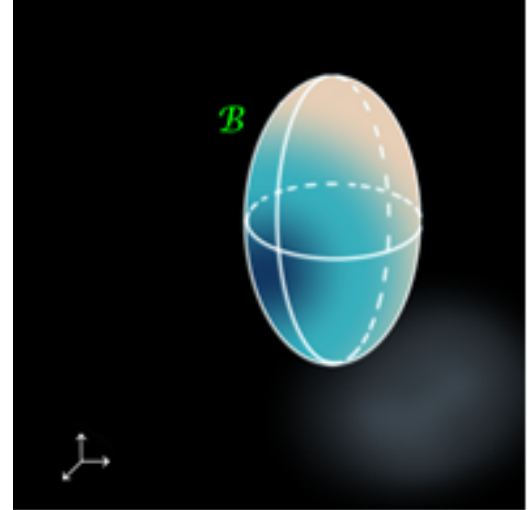


Figura 5: Esfera no sistema em movimento vista por Catarina. Fonte: produzida pelo autor.

da equação (19) ficará:

$$\xi^2 + \eta^2 + \zeta^2 = c^2 \tau^2. \quad (20)$$

Cada um desses sistemas terá um observador fixo. Em $\mathcal{A}$ estará Catarina e em $\mathcal{B}$ estará Lucas. Como Catarina está localmente em repouso com a esfera em $\mathcal{A}$, ela verá uma esfera como a dada pela equação (19). Porém, ao olhar para referencial $\mathcal{B}$, onde está Lucas, Catarina verá a esfera com uma correção espacial. Essas expressões se relacionam, uma vez que a expressão (20) mostra como as variáveis ξ , η e ζ se comportam quando submetidas a uma velocidade. Pelo princípio da relatividade as expressões (19) e (20) demonstram que as esferas são compatíveis e estão impostas às leis físicas.

Porém, como Catarina observará a esfera dada pela equação (20)?

Se “as leis pelas quais os estados dos sistemas físicos sofrem mudanças não são afetadas (...)”, Einstein (1905, p. 4), então a física que acontece no eixo coordenado de Catarina e que define a esfera com a equação (19) é a mesma física que acontece no sistema coordenado de Lucas e que define a esfera com a expressão (20). O que temos de alteração para cada observador se dá pela correção que ocorre na transformação em ξ , mas a física nos dois sistemas é a mesma.

Ou seja, uma esfera que esteja parada para Catarina terá forma de esfera, porém, uma esfera que viaja com Lucas, quando vista do sistema estacionário, terá a forma de uma elipse com semieixos:

$$R\sqrt{1 - v^2/c^2}, R, R. \quad (21)$$

Na Figura 8 temos que, visto por Catarina, os semieixos da elipse ficam nas direções dos eixos η e ζ não possuem alteração, porém o semieixo ξ se achata na razão de $1 : \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Como os únicos valores que não são passíveis de alteração são R e v quanto maior o valor de v , maior será o achatamento do raio em no eixo $x \parallel \xi$. Mas quando Lucas, no sistema em

movimento, olha para a esfera que está parada no seu referencial, ele verá:

$$R_{\xi} = R_{\eta} = R_{\zeta} = R. \quad (22)$$

onde R_{ξ} , R_{η} e R_{ζ} são os raios da esfera vistos do referencial em movimento

Esta relação que se remete à alteração do comprimento do espaço pode ser associada com as sombras projetadas na origem dos relógios solares. Sistemas em movimento, observado por um sistema estacionário medem comprimentos distintos e isto afetaria o comprimento medido na projeção da sombra de um relógio solar

Na equação (17) também temos uma correção para o tempo como discutimos a seguir.

IV.3. O tempo corrigido

Na seção II.7 vimos que as equações (8) e (9) possuem incompatibilidades com os postulados da relatividade. Já que foram colocados relógios nas extremidades da régua no trem, podemos usar esse experimento mental de Einstein para corrigir o tempo. Colocaremos Lucas na extremidade frontal da haste e Catarina sobre a plataforma.

A expressão (17) traz que $\tau = \phi(v) \gamma (t - vx/c^2)$. Todos os termos estão em razão da velocidade.

Considerando $\tau = t_B$ e $t = t_A$, teremos que para cada instante registrado em t , uma correção $\phi(v) \gamma$ se dará em τ . Resolvendo a expressão (17) vemos que o registro do tempo em τ é menor do que o marcado em t .

Assim, Catarina ao observar o relógio na extremidade traseira, verá que o relógio perde sincronia com o da extremidade frontal que teve uma passagem de tempo maior, mas para Lucas, que está viajando junto dentro do trem, não é observada nenhuma alteração na passagem do tempo. Para ele, os relógios continuam síncronos.

Novamente há incompatibilidade com as definições newtonianas pois se o “tempo absoluto (...) flui igualmente sem relação com nada externo,” este não deveria ser alterado com a velocidade, pois o observador mede o tempo por meio de relógios, este é relativo e “(...) mensura a duração pelo significado do movimento.”

Quando o relógio atrasa, o que vemos é o tempo relativo de Newton atrasar. Newton não define o tempo absoluto, apenas apresenta seus sinônimos e seu modo de fluir. O que podemos dizer a partir dos experimentos mentais relativísticos é que o tempo absoluto de Newton não pode fluir igualmente para todos os observadores, pois existe uma correção que deve ser feita dependendo dos fatores relativísticos de Einstein. Precisamos ter cuidado com a passagem de tempo na relatividade pois quando Einstein usa relógios, ele não está usando o tempo absoluto de Newton. Ele está usando o tempo relativo que “(...) é comumente usado em vez do tempo absoluto.” Newton (1686, p. 6).

A mecânica relativística adota a forma de medir o tempo, mecanicamente, construído a partir de relógios solares. Assim, quando falamos que um objeto relativístico possui um relógio a bordo, estamos falando de um mecanismo que poderia ter como escala as sombras projetadas pela haste fincada no chão, se tal precisão bastasse. Notemos o importante detalhe de que este tempo é uma derivação de medidas de distâncias uma vez que a alteração do comprimento das sombras é o que aprendemos a registrar como passagem de tempo. Isto é

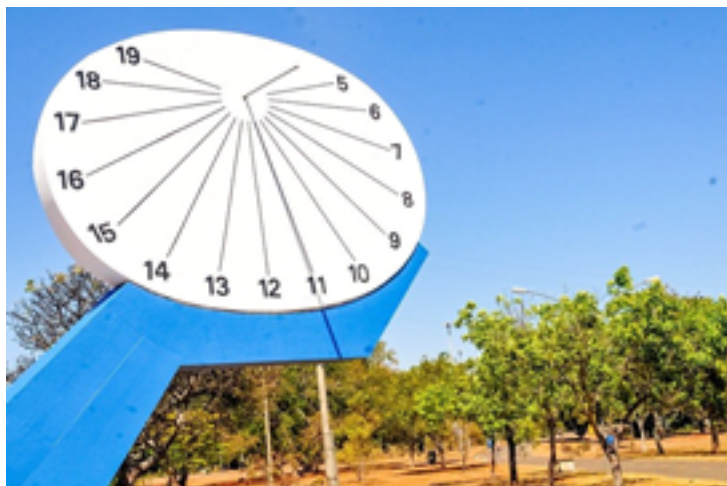


Figura 6: O relógio de Sol. Parque da Cidade de Brasília. Fonte: <https://gpslifetime.com.br/conteudo/república/brasil/96/na-hora-certa-relogio-de-sol-do-parque-da-cidade-e-restaurado>

válido para qualquer outro tipo de relógio: o tempo medido deriva, em última análise, de medidas de distâncias.

Ao medir o tempo que Lucas utiliza, Catarina nota que a marcação mecânica que ele faz do tempo tem um atraso com relação à marcação do relógio dela, o que está relacionado com a velocidade do referencial $\mathcal{B}$. O tempo marcado no relógio em $\mathcal{A}$ é diferente do tempo marcado em $\mathcal{B}$ pelo fator $1 - \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Porém em $\mathcal{B}$, Lucas observa que a passagem do tempo não tem alteração. Para ele, um segundo continua valendo um segundo. A diferença se dá na comparação dos relógios em movimento relativo.

O relógio funciona como uma régua que tem sua escala definida localmente e ele determina a hora local a qual é aceita socialmente como tempo. Novamente lembrando de Newton, ele não define “tempo, (...) como não sendo bem conhecido” e pondera sobre o tempo relativo, pois este “mensura a duração pelo significado do movimento que é comumente usado em vez do tempo verdadeiro”

Einstein (1905) define o tempo como sendo existente e marcado pelo relógio. Para todos, localmente, o tempo passará de forma igual. Essa é a definição de tempo usada na relatividade.

Ao adotarmos essa definição podemos estabelecer a ideia de rede de relógios sincronizados numa grande trama. Relógios sincronizados em locais distintos demandam referenciais parados entre si. No entanto esses relógios precisam ser sincronizados de acordo com a equação (3) e a luz é o que permite enviar e receber essa informação.

A evolução da marcação do tempo traz a subdivisão de segundos, próximo ao tic – tac do relógio comum. Quando falamos que um corpo tem velocidade relativística obtemos que o tempo no referencial comóvel¹ passa diferente com relação ao outro referencial. Estamos falando exatamente deste tic – tac passando de forma diferente. Ou seja, Catarina, parada em $\mathcal{A}$, observando uma espaçonave onde esta seu irmão Lucas (parado em $\mathcal{B}$) movendo-se com uma velocidade v consideravelmente alta (da ordem de c) verá o tempo para ele passar de forma diferente. Para ela, o tempo de Lucas passa mais devagar.

¹ Comóvel é o que se move junto num mesmo referencial.

Quando esses relógios voltam a estar localmente próximos e com velocidade próxima, observamos que as marcações nos relógios voltam a ter a mesma constância de passagem de tempo, os relógios, em $\mathcal{A}$ e em $\mathcal{B}$, voltam a ter o mesmo ritmo, porém há uma diferença no tempo registrado, na comparação do relógio em $\mathcal{A}$ com relação ao relógio em $\mathcal{B}$. O relógio que estava em $\mathcal{B}$ terá e manterá uma defasagem com relação ao relógio em $\mathcal{A}$.

Os relógios marcam essa diferença da passagem do tempo que está associada com o nosso processo de envelhecimento. Ou seja, na hipótese do tempo relativo de Newton, o evento relativístico com uma velocidade consideravelmente alta alterou a passagem do tempo para Lucas e esse tempo não se repôs por conta do retorno à Terra. O viajante, em $\mathcal{B}$, é mais novo agora comparado à observadora em $\mathcal{A}$, mas isso não significa falar que este viajante viajou para o futuro. Ele apenas teve os movimentos, dos quais a medida do tempo é uma consequência, realizados de forma mais lenta quando comparado com o referencial de Catarina.

O tempo de Lucas observado por Catarina como τ , tem uma correção em função de v , a velocidade relativa dele com relação a ela. Se fizermos $x=vt$ que é a distância que ela vê Lucas percorrer no intervalo de tempo que ela mede t , teremos:

$$\tau = t \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (23)$$

Ao resolvermos as expressões (17) fazendo as considerações matemáticas necessárias, descobrimos que:

$$\phi(v) = 1. \quad (24)$$

Então, o conjunto de expressões de (17) fica na forma:

$$\begin{aligned} \tau &= \gamma \left(t - vx/c^2 \right), \\ \xi &= \gamma (x - vt), \\ \eta &= y, \\ \zeta &= z. \end{aligned} \quad (25)$$

No momento da realizar esta análise de $\phi(v)$, além de simplificar as equações, explica que os fenômenos relativísticos estão compreendidos apenas na direção do movimento. Os comprimentos medidos ao longo dos eixos y e z se mantêm inalterados. Os fenômenos relativísticos se mantêm apenas no eixo que se dá o movimento.

A construção do pensamento relativístico é delimitada pelas ferramentas que Einstein usa para determinar as suas equações.

IV.4. Quando $v = c$

Segundo Einstein (1905, p. 10) objetos com velocidade v tendendo a c teriam largura apenas nas direções perpendiculares ao movimento, e tendendo a zero na direção do movimento quando observadas pelo referencial parado.

O mesmo efeito ocorre na equação (25). Um corpo com velocidade $v \rightarrow c$, terá $\tau \rightarrow 0$ com relação ao referencial parado. É como se, da perspectiva do sistema estacionário, o tempo

não passasse para algo viajando a esta velocidade. É importante ter em mente que o objeto móvel vê seu relógio comóvel continuar funcionando no ritmo normal, marcando o tempo no compasso esperado.

Fisicamente apenas a luz e outras partículas sem massa viajam à velocidade c , de modo que, se elas forem o referencial $\mathcal{B}$, do ponto de vista de $\mathcal{A}$, as distâncias e os intervalos de tempo medidos por $\mathcal{B}$ são nulos dentro desta concepção algébrica.

Ao considerarmos que a luz não tem massa e que os resultados das equações (23) e (25) são zero para $v=c$, há de se considerar que dentro do nosso entendimento algébrico, para que se tenha uma conceituação mais aprofundada da natureza do tempo e do espaço pode ser útil, por exemplo, olhar com outras lentes matemáticas para as equações.

Quais respostas podemos obter usando outras variáveis? Amorim et al (2018), por exemplo, exploraram uma abordagem dentro dos números perplexos.

IV.5. O tempo

Compreender o relógio como o marcador do tempo não o traduz exatamente nem o define. O exemplo do relógio de sol ou de qualquer outro relógio rústico que a humanidade tenha criado mostra o movimento como o arcabouço do tempo. A projeção da sombra de um gnômon ou o fluir do líquido um relógio de água são mecânicos. Como expressa na equação (2), tempo e espaço se associam ao movimento, logo, num universo estático, não há concepção de tempo, pois não há registros de eventos em momentos diferentes.

Estritamente, o tempo está associado ao movimento e se dá dentro de um espaço possível onde a mecânica *newtoniana* é uma ferramenta para estudar os fenômenos no espaço e no tempo. e que passa a ser um caso particular da mecânica *einsteiniana*. Newton estudou a velocidade, o espaço e o tempo para todo o cosmos como se fosse uma aproximação local. Einstein concebeu que quando tratamos da velocidade limite c observada, o espaço e o tempo de um referencial em movimento se moldam quando medidos pelo referencial parado, resultando na contração do espaço relativo e na dilatação do tempo relativo de Newton.

V. O PARADOXO DOS GÊMEOS E QUESTÕES MODERNAS DO TEMPO

V.1. Referenciais na relatividade

Dentro da teoria da relatividade restrita, a forma de medir o tempo precisou ser definida com precisão para que pudéssemos analisar a cinemática; no processo foi evidenciado o fenômeno da dilatação do tempo. Trazendo novamente a concepção de Newton, o relógio mede o tempo relativo. Assim, é importante construir uma outra abordagem que não seja apenas na visão da defasagem dos relógios para que possamos tentar compreender a natureza do tempo.

Para um melhor entendimento sobre a medida da passagem do tempo para cada observador, autores como Martins (2012) ou Schutz (2009) explicam o fenômeno de como um irmão gêmeo observa a passagem do tempo comparando o seu com o de seu irmão.

É importante fundamentar essa construção, pois se entende que, como mostrado pelas equações de Einstein, um dos irmãos envelhecerá mais rapidamente que o outro. Porém, uma vez que não há referenciais preferenciais na relatividade, não há de se falar que um gêmeo observará o outro envelhecendo mais rápido enquanto ele se observar envelhecer no ritmo normal.

Desta forma, imaginemos que Lucas e Catarina resolvem que Lucas realizará uma viagem para observarem este fenômeno relativístico. Ele entra em um foguete e viaja a $0,6c$.

Cada irmão está em um referencial inercial com sistema rígido de eixos. Para Catarina, Lucas está viajando com a velocidade determinada, mas isto vale para Lucas da mesma forma. Para ele é Catarina que está viajando a uma velocidade de $0,6c$ em sentido oposto. Cada um dos irmãos ao olhar para o irmão viajante tem a observação de que o tempo está passando mais lentamente para este, ou seja, uma vez que algo viaja a uma velocidade significativamente alta, ocorrerá esta percepção de passagem de tempo mais lenta num fator de $1 - \sqrt{1 - v^2/c^2}$. Isso implica que quando Lucas olha para Catarina a partir do referencial onde ele está parado, ele observa que o tempo passou mais devagar para ela do que o tempo que ele marcou em seu relógio.

Já quando Catarina mede o tempo que passa para Lucas, ela observa que o tempo para ele é que passou mais devagar.

Aqui observamos o paradoxo. Para qual irmão, efetivamente, o tempo passou mais devagar?

A viagem do gêmeo demonstra que o tempo passa de forma particular para cada indivíduo. A essa particularidade, podemos associar a de *linha de mundo* que é o nome comumente dado ao eixo temporal do sistema de referência de qualquer sistema sendo observado.

V.2. Construindo a Linha de mundo

Quando analisamos à luz da mecânica *newtoniana*, observamos o movimento de um corpo num gráfico de espaço percorrido no tempo.

Classicamente, quando se trata de movimento uniforme, temos uma reta com crescimento constante. (Figura 10)

Analisando o gráfico, teremos que a inclinação da reta corresponde à velocidade deste corpo ao longo desta trajetória. Se tivermos um movimento acelerado, observaremos mudanças gráficas que se remeterão às alterações da velocidade deste corpo ao longo do percurso. Sabemos, também, que a derivada da posição com relação ao tempo, expressão (3), determina a velocidade instantânea $v_{ins} = \frac{ds}{dt}$. Essa função representa uma reta tangente ao gráfico x vs t e determina a velocidade naquele instante de tempo específico que será dado pelo coeficiente angular da reta tangente.

No caso relativístico, observamos que este mesmo gráfico tem uma importância significativa na análise do fenômeno.

Um corpo com velocidade baixa, com relação a c , terá o gráfico da função horária com uma inclinação mais próxima ao eixo t . O inverso também ocorre, ou seja, um corpo com velocidade alta terá a inclinação do gráfico mais próxima do eixo do espaço.

Ao considerarmos que esse gráfico é de um corpo com velocidade constante, teremos

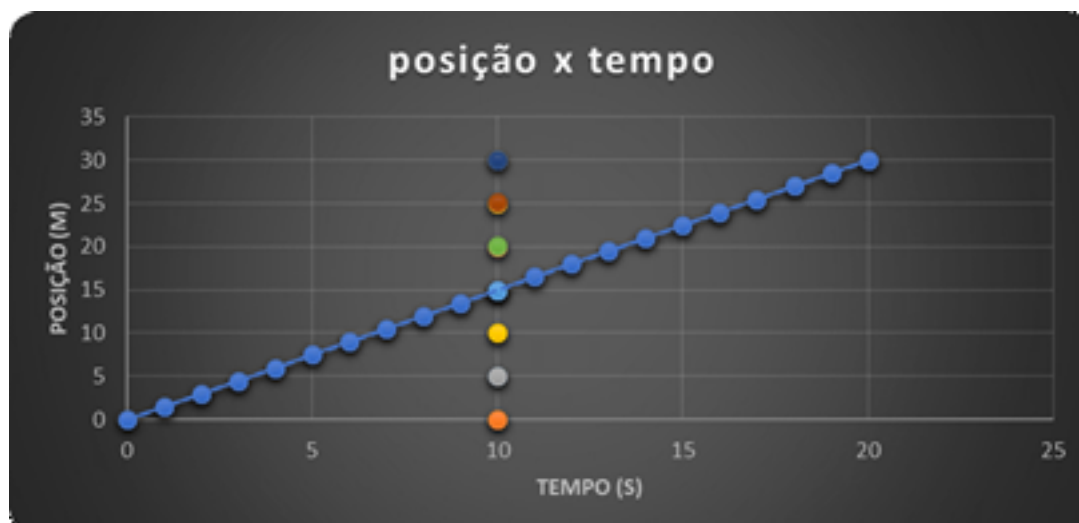


Figura 7: Eventos simultâneos num dado instante. Fonte: Produzida pelo autor.

uma reta e a inclinação desta com relação ao eixo horizontal será o próprio coeficiente angular.

Em relatividade chamamos c de velocidade limite e, por essa razão, podemos determinar que $c = 1$. Com esta construção em mente, a maior inclinação que esse gráfico da função horária poderá ter será a de 45° , pois o coeficiente angular da reta tangente terá valor 1. Nas equações em (25), com $c = 1$, qualquer valor de v será uma fração da velocidade da luz. A análise gráfica de uma velocidade alta ou baixa estará limitada num cone com limite máximo de angulação em 45° . Então teremos $\tan 45^\circ = 1$ que será o limite máximo de velocidade fisicamente conhecida.

É fundamental observar que, como $x=vt$, uma vez que $v = c = 1$, o tempo passa a ter dimensão de espaço.

Como a velocidade máxima que um corpo pode ter é a velocidade da luz, a reta $v = c$ passa a ser a bissetriz do quadrante no plano cartesiano e em observância às equações (25), um corpo com velocidade v constante tem esse valor como percentual da velocidade da luz, de modo que sua trajetória estará registrada dentro deste cone. A inclinação dessa reta que representa a trajetória, com relação ao eixo coordenado t , terá ângulo que determinará a velocidade deste corpo, lembrando que estamos tratando de velocidades constantes.

Essa reta com inclinação φ com relação a t (o eixo temporal do observador parado) é chamada de **linha de mundo**, onde essa é a curva dentro do cone de luz, e que não necessariamente é uma reta constante. Em caso de acelerações esta reta apresentará variações na velocidade registrada pelo corpo. Ela é uma ilustração gráfica do corpo em $\mathcal{B}$ que se movimenta e com relação ao sistema de coordenadas $\mathcal{A}$ (Figura 11).

Em Relatividade Restrita, a convenção utilizar o eixo x na abcissa e o eixo do tempo na ordenada, o oposto do que se faz comumente nas análises gráficas de mecânica.

Pela equação (25), observamos que, à medida que v é alta, a passagem do tempo para o observador em movimento, com relação ao observador parado, tem um espaçamento maior a cada segundo medido. A velocidades baixas observamos o limite da mecânica *newtoniana* como mostrado na Figura 12. As porcentagens da velocidade da luz estão demonstradas na

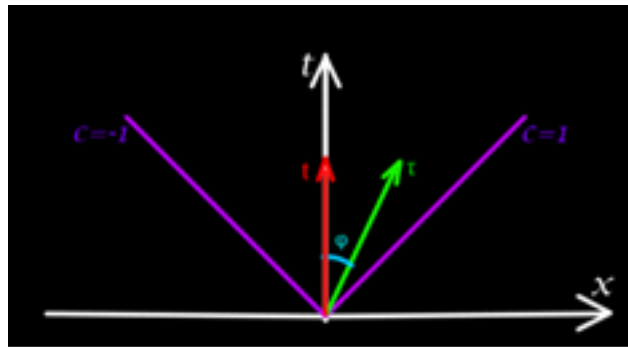


Figura 8: Linha de mundo τ . C Corresponde à inclinação de 45° . Fonte: produzida pelo autor.

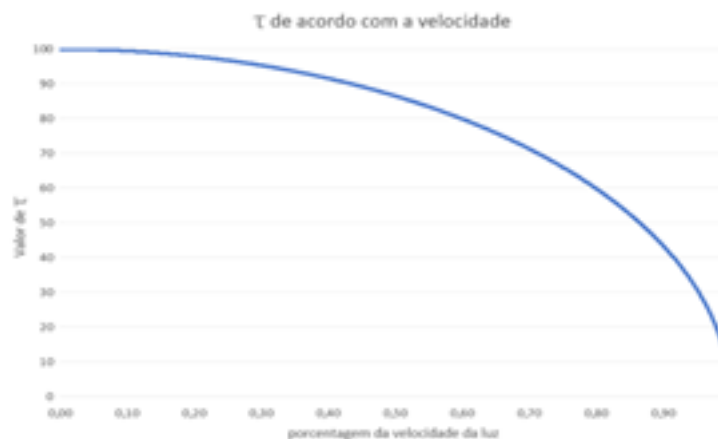


Figura 9: Relação entre a velocidade e o valor de τ (tempo marcado no referencial em movimento). Figura produzida pelo autor.

Tabela 1.

Como a inclinação da reta determina o coeficiente angular e uma vez que o corpo em movimento uniforme cria um ângulo na representação gráfica, precisamos analisar com atenção como se dão os eventos observados por $\mathcal{A}$ e $\mathcal{B}$, dentro deste diagrama.

Schutz (2009) explica as relações de emissão e reflexão da luz para entendermos as relações de simultaneidade de eventos. Porém, vale ressaltar que eventos simultâneos e síncronos são distintos em relatividade. A simultaneidade se remete a eventos que acontecem no mesmo instante de tempo em locais distintos.

Estando no mesmo referencial, a ocorrência do evento será vista por qualquer observador no mesmo instante, desde que estejam a mesma distância do evento de emissão.

Podemos fazer um paralelo com a descarga elétrica de um raio. A visão do raio é simultânea para os observadores, respeitada a distância do evento, porém, o som do trovão não é. Outro exemplo é a emissão de um fóton vindo do sol. A emissão não é simultânea com a chegada à Terra.

O matemático Hermann Minkowski desenvolveu um diagrama de espaço-tempo que sobrepõe um quadro em movimento e um quadro estacionário para representar as transformações de Lorentz em um modelo geométrico.

A simultaneidade em um gráfico x vs t é uma reta paralela ao eixo do espaço e isso será

Porcentagem da velocidade da luz.		
Velocidade (c)	Velocidade (m/s)	τ para $t=100$ (s)
0,1	299.792.45,8	99,50
0,2	599.584.91,6	98,00
0,3	899.377.37,4	95,40
0,4	119.916.983,2	91,65
0,5	149.896.229	86,60
0,6	179.875.474,8	80,00
0,7	209.854.720,6	71,41
0,8	239.833.966,4	59,99
0,9	269.813.212,2	43,59
0,999	299.492.665,5	4,471

Tabela 1: Porcentagens da velocidade da luz.

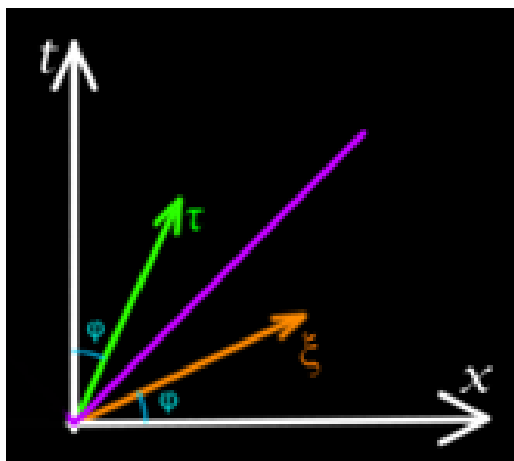


Figura 10: Diagrama de Minkowski com espelhamento. Fonte: produzida pelo autor.

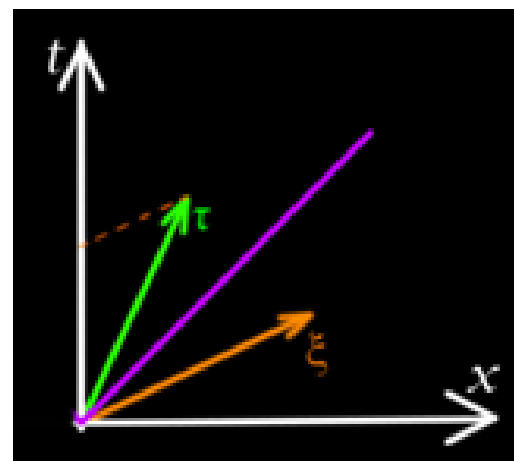


Figura 11: Linha de simultaneidade (reta tracejada). Fonte: produzida pelo autor.

igual no diagrama de Minkowski.

Apenas o eixo do tempo do sistema em movimento $\mathcal{B}$ foi ilustrado exemplificado na Figura 11. Schutz (2009) mostra como ocorre a construção do eixo espacial de $\mathcal{B}$ (ξ) no diagrama de Minkowski e ele é um espelhamento do eixo τ com relação à bissetriz (Figura 14).

Então, a simultaneidade do ponto de vista de $\mathcal{B}$, em relatividade, ocorre, no diagrama de Minkowski, como uma reta paralela ao eixo ξ (Figura 15).

V.3. O Paradoxo dos gêmeos dentro do diagrama de Minkowski

Reconstruindo o paradoxo dos gêmeos dentro do diagrama de Minkowski, precisamos definir o sentido do movimento de cada um dos irmãos. Assim, definimos que Lucas está se deslocando no sentido positivo de $\vec{c}$. Desta forma, a velocidade de Lucas é positiva. Catarina observa Lucas deslocar-se afastando da origem, do referencial parado

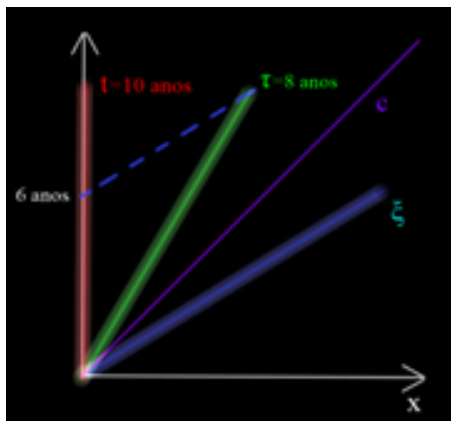


Figura 12: Diagrama Catarina.
Fonte: produzida pelo autor.

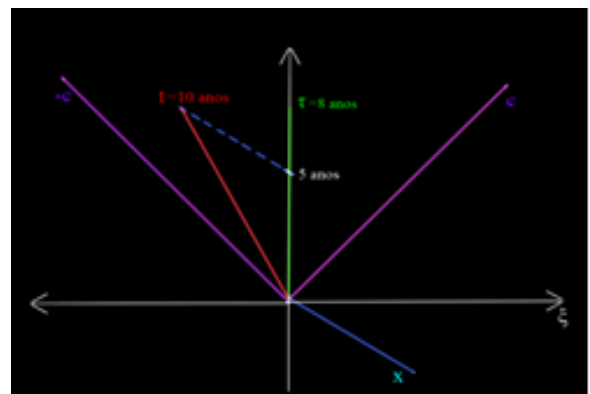


Figura 13: Diagrama Lucas. Fonte: produzida pelo autor.

com velocidade positiva.

Para esse exemplo, consideraremos que Catarina, no instante $t = 0$, terá 4 anos. Lucas, neste mesmo instante, mas no seu referencial $\tau = 0$ terá 8 anos.

No diagrama (Figura 16), temos que o ângulo entre t e τ define a velocidade com que Lucas se desloca em relação à Catarina. A escala da passagem de tempo em τ não corresponde à mesma escala no referencial parado. Isso quer dizer que para cada velocidade teremos uma alteração na escala de tempo em τ que será definida pela equação (??).

Já na Figura 17 invertermos a observação, ou seja, para Lucas é Catarina quem está se movendo, neste caso, Lucas verá Catarina se deslocando no sentido negativo de $\vec{c}$ ($v = -c$). Essa nova configuração altera a estrutura do diagrama.

Pelo diagrama temos a noção de como se dá a passagem do tempo relativo de Newton para cada um dos gêmeos no decorrer da viagem e temos a visão de que o paradoxo está no fato de que quando um irmão olha para o referencial do outro não saberemos quem envelheceu mais pois a reta de simultaneidade é que indicará o que o irmão viajante vê do outro. Neste ponto o diagrama auxilia no entendimento.

Pelas expressões (25) temos a impressão de que quem está se movendo é quem tem a passagem de tempo alterada, mas todos estamos nos movendo em alguma medida. Desta forma, uma vez que é Lucas quem se move, é ele quem terá envelhecido menos, com relação à Catarina. Se Lucas viajar 8 anos na velocidade de $0,6c$, para Catarina terão passado 10 anos. Porém, quando Lucas, 8 anos depois de sua partida, olha para Catarina (Figura 16), ele observará que ela envelheceu algo em torno de 6 anos. Para Catarina, após a passagem de 10 anos, ela observará que, para Lucas, passou-se algo em torno de 5 anos (Figura 17). Para cada irmão, foi o outro que envelheceu menos.

Essa construção da passagem do tempo demonstra que observar e medir são ações diferentes.

Vale notar que nenhum dos irmãos observa de fato a passagem do tempo que realmente ocorreu para o outro. Como apontado por Martins (2012) um outro viajante é necessário para poder ter uma melhor mensuração sobre como o tempo passa para cada um dos viajantes. Os irmãos apenas saberão quem envelheceu mais quando o Lucas voltar para o

referencial de sua irmã. A Figura 18 mostra o trajeto completo de Lucas. Após 8 anos de viagem, ele começa seu caminho de volta para encontrar sua irmã. Instantaneamente ele mudará o sentido do seu movimento para que não tenhamos que lidar com acelerações.

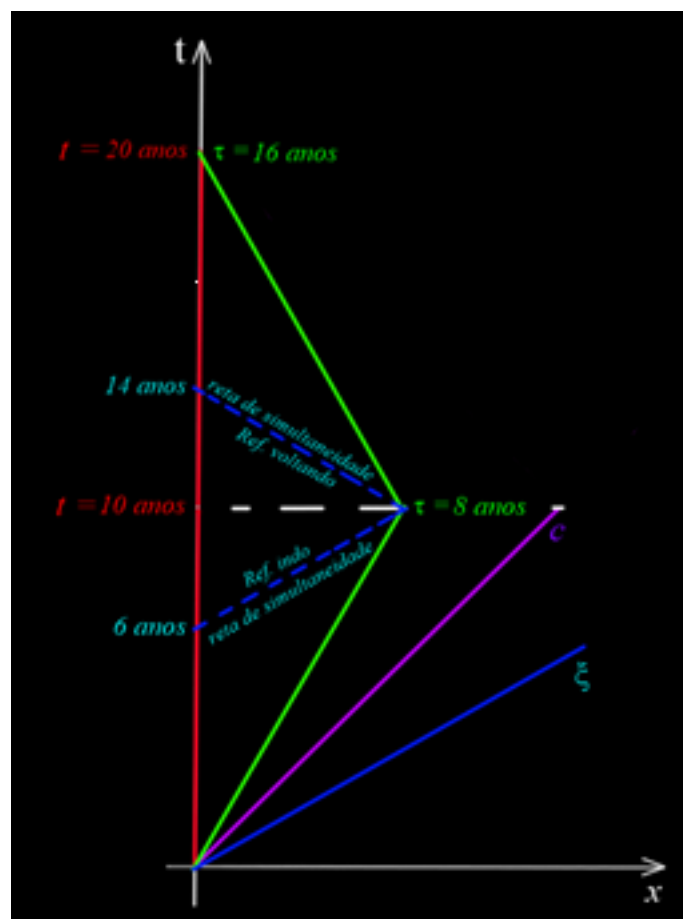


Figura 14: A viagem completa dos irmãos. Fonte: produzida pelo autor.

Vale notar que nenhum dos irmãos observa de fato a passagem do tempo que realmente ocorreu para o outro. Como apontado por Martins (2012) um outro viajante é necessário para poder ter uma melhor mensuração sobre como o tempo passa para cada um dos viajantes. Os irmãos apenas saberão quem envelheceu mais quando o Lucas voltar para o referencial de sua irmã. A Figura 18 mostra o trajeto completo de Lucas. Após 8 anos de viagem, ele começa seu caminho de volta para encontrar sua irmã. Instantaneamente ele mudará o sentido do seu movimento para que não tenhamos que lidar com acelerações.

Na Figura 16, quando Lucas olha para Catarina ele verá que para ela passaram 6 anos. Já na Figura 17, quando Catarina olha para Lucas ela verá que para ele passaram 5 anos.

No momento de mudança de sentido, para Lucas, existe um apagão de informação que vem de Catarina. Ele só voltará a observá-la quando fizer 14 anos da sua partida no referencial dela. À medida com que ele se aproxima do referencial parado, sempre observa uma pequena passagem de tempo, porém a informação entre os 6 e 14 anos no referencial de Catarina se perde.

Ela também terá um apagão de informação vinda dele. Quando Lucas mudar o sentido



Figura 15: *Detector de múons no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF. Fotografia produzida pelo autor.*

do seu movimento, Catarina passará a observar que seu irmão passou a ter 11 anos marcado no relógio dele.

Quando Lucas finalmente retornar para o referencial de sua irmã, na comparação dos relógios eles verão que Catarina envelheceu 20 anos (estando com 24 agora) e Lucas envelheceu 16 anos (estando com 24 anos agora). Nesse exemplo eles se tornarão gêmeos no retorno (Figura 18) e os relógios passam a funcionar no mesmo ritmo.

O fato de vermos tempos diferentes sendo marcados para cada um dos observadores não contradiz o tempo absoluto de Newton pois o que sabemos marcar é o que Newton definiu como tempo relativo, aparente e comum. O tempo absoluto soa como uma caracterização matemática abstrativa e que não é observado dentro da nossa limitação humana. Mesmo usando como relógio o envelhecimento de pessoas, não fica claro para este autor o que é que caracteriza, de uma maneira fundamental, a passagem do tempo para cada indivíduo dentro da sua linha de mundo.

Um outro exemplo clássico é a observação do tempo de vida de um múon parado ou em movimento relativístico.

V.4. Medição do tempo próprio do múon

O paradoxo dos gêmeos é uma experiência mental que se remete a observar eventos relativísticos dentro de uma concepção macroscópica e que utiliza o tempo de envelhecimento como o relógio. É importante frisar que, independentemente de usarmos pessoas ou relógios, estes são tempos relativos e mensuram “(...) a duração pelo significado do movimento”, como disse Newton (1686, p. 6).

As equações (25) de Einstein permitem responder sobre fenômenos que apresentam este caráter de dilatação do tempo e um caso é o do tempo de vida do múon. Bailey et al. (1977) realizaram um experimento para mensurar a dilatação do tempo em múons com velocidade de $0,9994c$ e o resultado do experimento está de acordo com os dados calculados pelas equações de Einstein.

A tabela 2 demonstra os valores mesurados por Bailey et al. (1977, p. 303)

O experimento demonstra que as equações se encaixam em eventos observados na natureza e que a velocidade da partícula altera seu tempo de vida de forma significativa. A velocidade de $0,9994c$ faz com que a partícula, vista no referencial parado, tenha um tempo de vida 29,33 vezes maior do que a partícula em repouso.

	μ^+	μ^-
Tempo de vida do muon em movimento (t)	64,419	64,368
Tempo de vida do muon em repouso (t)	2,1966	2,1948

Tabela 2: Resultados de tempos de vida (μs)

Se tivermos algo que viaja à velocidade da luz, teremos que: Isso corresponde a dizer que o intervalo entre um evento e outro para luz visto do referencial parado demora um tempo infinito. Neste ponto é possível concluir que o tempo passa para partículas massivas, mas não ocorre o mesmo para a luz.

$$\lim_{v \rightarrow c} \frac{\tau}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \infty. \quad (26)$$

Ryden (2017, p. 122) explica a concepção de que um universo apenas de radiação teria um formato plano. Segundo Einstein (1905, p. 10), objetos com velocidade $v=c$ teriam formas planas quando observadas do referencial parado.

Na Figura 19 temos o instante em que um múon atravessa um detector. O múon é o feixe luminoso com velocidade relativística e com o seu tempo, com relação ao referencial parado, dilatado.

V.5. Relógio de luz

A expressão (26) mostra um resultado importante. No limite da velocidade da luz, um intervalo de tempo tende a demorar infinitamente para acontecer. Ou seja, como entendemos que o tempo é uma marcação de intervalos de eventos, então, para a luz é como entendêssemos que houve um evento, por exemplo a sua emissão no instante τ_1 e o instante τ_2 não chegasse nunca. Para a luz não há passagem de tempo.

Imaginemos que Catarina, no seu referencial parado, vê um trem se deslocar com uma velocidade v no sentido positivo do eixo x . Dentro do trem, seu irmão Lucas instala um sistema de laser e espelhos que funcionará como um relógio. A experiência será emitir um feixe de luz do assoalho do trem para o teto e refleti-lo de volta para o assoalho.

Quando Lucas coloca o relógio para funcionar e estando o trem parado com relação à plataforma, tanto ele quanto Catarina verão o feixe de luz se deslocar perpendicularmente entre o assoalho e o teto (Figura 20).

Porém se o trem estiver em movimento, Catarina terá outra visão do feixe luz. Como ela está parada na plataforma, verá o feixe de luz inclinado, enquanto Lucas, que está no referencial em movimento, continuará visualizando o feixe com deslocamento perpendicular ao assoalho e teto (Figura 21).

À medida que a velocidade é aumentada, e considerando que o pulso de luz emitido-refletido corresponde a um intervalo de tempo, a inclinação mensurada por Catarina será



Figura 16: Relógio de luz comóvel ao observador pelo referencial no referencial parado. Fonte: produzida pelo autor.

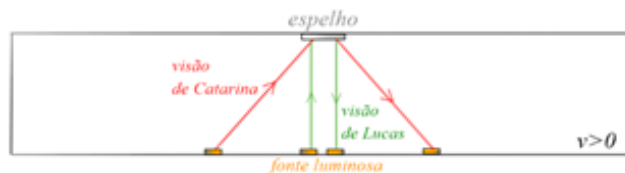


Figura 17: Lucas visualizando o feixe de luz (linhas verdes) e Catarina, parada na plataforma, vendo o feixe de luz ao longo da trajetória do trem (linhas vermelhas). Fonte: produzida pelo autor.

igualmente maior.

A Figura 22 mostra que a velocidade altera o tempo de Lucas medido por Catarina na plataforma. Como estamos querendo analisar o limite c da velocidade, veremos que no $\lim_{v \rightarrow c} t$, o tempo tende ao infinito no intervalo de emissão-reflexão da luz.

Na Figura 23, a altura do trem (h) não se altera, mas a razão entre a altura do trem e a distância S_∞ diminui à medida que a velocidade do trem é grande. Se a velocidade do trem pudesse ser igual à velocidade da luz e tendo o princípio da constância da velocidade da luz em mente, veríamos que o feixe de luz emitido demoraria um tempo infinito para percorrer todo o seu percurso S_∞ .

V.6. Relógios super precisos com registro em $10^{-18}s$

Relógios atômicos de alta precisão (com precisão de 18 casas decimais) são ferramentas que possuem uma ampla gama de aplicações na física. Hinkley et al. (2013) indicam que essa ferramenta pode ser utilizada para cálculo da “geodésica relativística, navegação telescópica na Terra e no espaço e novos testes de física além do modelo padrão.”

Um exemplo de navegação telescópica é o telescópio espacial James Webb, que estará posicionado no ponto de Lagrange 2, que fica a 1,5 milhões de quilômetros da Terra. Nesse ponto, o telescópio orbitará o Sol com velocidade de aproximadamente 30.105 m/s. Em

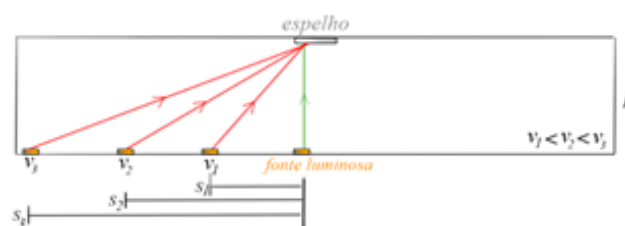


Figura 18: Medida do feixe de luz por Catarina com o trem a velocidades diferentes. Fonte: produzida pelo autor.

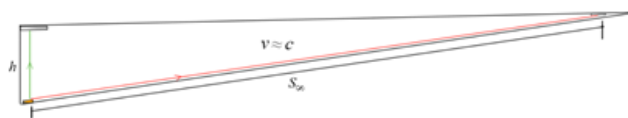


Figura 19: Visão do trem em perspectiva representando uma velocidade próxima de c . Fonte: produzida pelo autor.

comparação com a velocidade de translação da Terra, que é de aproximadamente 29.800 m/s, a diferença de tempo estará na ordem de 10^{-9} , que indica que o tempo τ no telescópio atrasará 1 segundo a cada 31 anos.

Este relógio seria capaz de detectar a diferença de tempo em pequenas variações de alturas na Terra ou em mudanças de latitudes como foi proposto por Einstein no seu trabalho original, uma vez que alteraria a velocidade linear do corpo.

V.7. Tempo na quântica e na Relatividade Geral

O tempo na física caracteriza a marcação de movimentos que Newton chamou de duração. Porém, segundo Giovannetti (2015), nos limites da mecânica quântica existe a necessidade de criar um relógio que seja capaz de quantizar o tempo. Esse autor descreve que o “tempo em mecânica quântica aparece como um parâmetro clássico na equação de Schrödinger. Fisicamente isto representa o tempo mostrado por um relógio clássico no laboratório.”

Outra abordagem aparece numa explicação sobre Teoria da Relatividade Geral onde:

“(…) dado um campo gravitacional (…) a dinâmica da teoria não possui variável preferencial de tempo, mas, no entanto, temos uma noção de espaço-tempo para cada solução dada. Mas na teoria quântica não há a configuração de um campo clássico, assim como não há trajetória de uma partícula. Desta forma, na gravitação quântica a noção de espaço-tempo desaparece da mesma maneira que a noção de trajetória desaparece da teoria quântica de partículas.” Rovelli (2004, pg. 21) Tradução do autor.

Sendo assim, entender a natureza do tempo poderia dar respostas que podem ajudar a compatibilizar a mecânica quântica com a gravitação.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho partimos da definição de tempo relativo, aparente e comum de Newton para estruturar a concepção de tempo que é marcada no relógio. Por essa razão nos remetemos ao relógio solar, que fundamenta a noção mais básica que temos de passagem de tempo.

Concluimos que o tempo só é possível de ser definido num universo dinâmico, e dentro dessa percepção analisamos como o movimento altera a passagem do tempo para os observadores em referenciais distintos, a partir da relatividade restrita.

Posteriormente analisamos, também, a partir da perspectiva da relatividade restrita, uma possibilidade para a resposta do que é o tempo. Pensando estritamente por esse prisma, a expressão (26) leva a crer que o tempo não tem uma natureza em si, mas que emerge de outra entidade física: a matéria.

Por fim, vimos como a criação de relógios extremamente precisos permite medir intervalos de tempo extremamente pequenos, o que poderia ajudar na exploração de fenômenos quânticos e a achar respostas que poderiam auxiliar numa grande unificação na física.

REFERÊNCIAS

CALIL, Marcos Rogério. **Anamela de Vitruvius: dos relógios solares até o relógio de Sol plano horizontal**. São Paulo. 2008. Disponível em <https://tede2.pucsp.br/handle/handle/13383>. Acessado em 07/09/2021.

EINSTEIN, Albert; **On the electrodynamics of moving bodies**. 1905. Tradução de John Walker Disponível em http://hermes.ffn.ub.es/luisnavarro/nuevo_maletin/Einstein_1905_relativity.pdf. Acessado em 11/07/2021.

EINSTEIN, Albert; **The meaning of relativity**. 1922. Tradução de Edwin Plimpton Adams 2003. Routledge Classics

NEWTON, Isaac; **Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica**. 1687. Tradução para o inglês por Florian Cajori. 1966. Vol. 1. The Motion of the bodies. University of California Press.

MAGALHAES, Nadja S; Motion, Time and Gravity. In: Christopher Duston; Marc Holman. (Orgs.) "Spacetime Physics 1907-2017". 1a ed. Montreal: Minkowski Institute Press, 2019, v., p. 93-104.

NICHOLSON, T., CAMPBELL, S., HUTSON, R. et al. **Systematic evaluation of an atomic clock at 2×10^{-18} total uncertainty**. Nat Commun 6, 6896 (2015). Disponível em <https://doi.org/10.1038/ncomms7896>. Acessado em 09/01/2022

NUSSENZVEIG, Herch Moysés. **Curso de Física Básica Vol. 4**, 11ª edição 1998, 8ª reimpressão 2010. Editora Edgard Blücher LTDA

SCHUTZ, Bernard Frederick. **A First Course in General Relativity**. 2009. Cambridge University Press.

SOUSA, Taric de Oliveira. **Reflexões sobre a Natureza do Tempo a partir de Fenômenos Relativísticos**. 2022. Biblioteca Central da UnB – BCE.

RYDEN, Barbara Sue. **Introduction to Cosmology**. 2017. Cambridge University Press.