



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO – UFMA
COORDENAÇÃO DE CIÊNCIAS NATURAIS – FÍSICA
CAMPUS III – BACABAL

ALEX SANDRO DE NEGREIROS MAGALHÃES

**O CONTEXTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA: DO
PRINCÍPIO A EINSTEIN**

BACABAL – MA

2022

ALEX SANDRO DE NEGREIROS MAGALHÃES

**O HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA: DO PRINCÍPIO A
EINSTEIN**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à coordenação de ciências naturais – Física da universidade federal do maranhão, campus III – Bacabal, como requisito para a obtenção do título de licenciado em ciências naturais - Física.

Orientador: Antônio Jeferson De Deus Moreno

BACABAL – MA

2022

ALEX SANDRO DE NEGREIROS MAGALHÃES

**O CONTEXTO HISTÓRICO DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA: DO
PRINCÍPIO A EINSTEIN**

Trabalho de conclusão do curso apresentado à coordenação de ciências naturais – Física da universidade federal do maranhão, campus III – Bacabal, como requisito para a obtenção do título de licenciado em ciências naturais - Física.

Orientador: Antônio Jeferson De Deus Moreno

BANCA EXAMINADORA:

Orientador: Prof. Dr. Antônio Jeferson de Deus Moreno

Universidade Federal do Maranhão

Prof^o. Dr. Guillermo Lazar Mentech

Universidade Federal do Maranhão

Prof^o. Dr. Ariel Nonato de Abreu Silva

Universidade Federal do Maranhão

BACABAL-MA

2022

A

Dedico a minha mãe, Maria José de Negreiros Magalhães, que sempre me ensinou a buscar os melhores caminhos da vida e sempre fez de tudo para conseguir o melhor para seus filhos. Dedico também ao meu Pai, Orlando do Nascimento Magalhães, que sempre me apoiou nos estudos. A minha vó, Luzia Aragão Ximenes, sempre humilde, sincera e valente me deu coragem pra lutar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força e por me dar perseverança para trilhar o caminho universitário.

Agradeço a Rosilene Leite de Brito, que foi a luz na minha vida e sempre me incentivou a continuar estudando, sem ela dificilmente teria cursado um ensino superior.

Ao professor Antônio Claudio que sempre me fascinou com as suas aulas de Matemática.

Aos professores da UFMA, em especial, ao professor Antônio Jeferson de Deus Moreno pela sua compreensão, didática e por ser sempre solícito.

Aos professores, Guillermo Lazar, Diego Barbosa, Ariel Nonato, Hawbertt Rocha e Freud Sebastian e a professora Daulinda que muito contribuíram para o meu aprendizado.

Aos meus amigos e parentes e a todos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o meu percurso universitário.

*“Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade indesejável para aprender a conhecer a beleza libertadora do intelecto para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer” **Albert Einstein.***

*“Se eu vi mais longe, foi por está sobre ombros de Gigantes” **Isaac Newton.***

RESUMO

O trabalho com a temática, O Contexto Histórico Da Teoria Da Relatividade Restrita: Do Princípio a Einstein é fruto de revisões literárias de uma grande quantidade de obras. Este assunto é bastante extenso e busquei relatar os fatos mais relevantes para a construção da Teoria da Relatividade. O contexto se desenvolve principalmente quando o conhecimento sobre o movimento terrestre era apenas uma incógnita. Muitos séculos depois, pensadores e filósofos foram muito além de apenas indagações e hipóteses a serem descobertas. O método científico surgiu com Galileu Galilei, e foi aplicado por uma vasta gama de cientistas, incluindo Albert Einstein. No final do século XIX, a comunidade científica pensava que não havia mais nada para ser descoberto na Física, acreditavam que os problemas que restavam seriam resolvidos apenas com empenho dos cientistas. Um dos principais problemas da Física do fim do século XIX era a inconsistência entre o eletromagnetismo e a teoria da relatividade de Galileu. Os físicos daquela época acreditavam que as ondas eletromagnéticas de Maxwell, assim como as ondas mecânicas, precisavam de um meio para se propagar. Da mesma forma, acreditavam que a Terra movia-se nesse meio, o qual foi chamado de Éter. A busca pelo Éter foi feita incansavelmente sem sucesso, até que, em 1887, Michelson-Morley refinaram o interferômetro idealizado por Michelson e conseguiram mostrar que o Éter não existia. Surgiam experimentos e hipóteses que foram refutadas por não possuírem embasamento. Surgiam experimentos e hipóteses que foram refutadas por não possuírem embasamento. Somente no ano de 1905 os postulados de Einstein surgiram como forma de explicar os resultados de Michelson-Morley, através desses postulados, que diz que não existe referencial privilegiado, as leis da física são iguais para todos os observadores e a luz é considerada uma constante universal para qualquer observador, dessa forma a mecânica de Newton foi generalizada e esta trata da importância do referencial para observadores, o que difere da Teoria da Relatividade. A visão que se tinha da inconsistência da Relatividade não perdurou muito, a radioatividade foi descoberta em 1896 e trouxe experiências com partículas de alta energia que não obedeciam à Mecânica Newtoniana e sim a uma nova mecânica chamada Mecânica Relativística. A radioatividade também permitiu a descoberta do núcleo atômico e, como consequência, possibilitou o surgimento da Mecânica Quântica. Desse modo, a Mecânica passou a ser subdividida em Mecânica Clássica (Mecânica das baixas energias), Mecânica Relativística (Mecânica das altas energias) e Mecânica Quântica (Mecânica que estuda sistemas em escalas atômicas e subatômicas).

Palavras-chaves: Relatividade; Éter; Eletromagnetismo; Experimento; História.

ABSTRACT

The work with the theme, The Historical Context of the Special Theory of Relativity: From Principio to Einstein is the result of literary reviews of a large number of works. This subject is quite extensive and I sought to report the most relevant facts for the construction of the theory of relativity. This subject develops mainly when the knowledge about the terrestrial movement was only an unknown. Many centuries later, thinkers and philosophers went far beyond just questions and hypotheses to be discovered. The scientific method hypothetically originated with Galileo Galilei, and has been applied by a wide range of scientists, including Albert Einstein. At the end of the 19th century, the scientific community thought that there was nothing more to be discovered in physics, they believed that the remaining problems would only be solved with the commitment of scientists. One of the main problems in late 19th century physics was the inconsistency between electromagnetism and Galileo's theory of relativity. Physicists at that time believed that Maxwell's electromagnetic waves, like mechanical waves, needed a means of propagation. Likewise, they believed that the earth moved in this medium, which was called ether. The search for the ether was made relentlessly without success, until, in 1887, Michelson-Morley refined the interferometer devised by Michelson and managed to show that the ether did not exist. Experiments and hypotheses emerged that were refuted for not having any basis. It was only in 1905 that Einstein's postulates emerged as a way of explaining Michelson-Morley's results, but he ended up successfully generalizing to Newton's mechanics, which deals with the importance of the frame of reference for observers who meet the same requirement, which differs from the theory of relativity, which says that there is no privileged frame of reference and the laws of physics are the same for all observers of light and considered a universal constant for any observer, after many years the ether was recognized as important in Einstein's vision. This wrong view did not last long, radioactivity was discovered in 1896 and brought experiments with high energy particles that did not obey Newtonian mechanics but a new mechanics called relativistic mechanics. Radioactivity also allowed the discovery of the atomic nucleus and, as a consequence, made possible the emergence of quantum mechanics. Thus, mechanics came to be divided into classical mechanics (low-energy mechanics), relativistic mechanics (high-energy mechanics) and quantum mechanics (mechanics that study systems at atomic and subatomic scales).

Keywords: Relativity; Ether; Electromagnetism; Experiment; History.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA: ANTESCEDENTES HISTÓRICOS ...	15
3. A RELATIVIDADE NEWTONIANA.....	28
4. UM ENFOQUE HISTÓRICO SOBRE O ELETROMAGNETISMO.....	32
5. O ELETROMAGNETISMO E MAXWELL	37
5.3 A BUSCA PELO ÉTER LUMINÍFERO	47
6. ABERRAÇÃO ESTELAR	48
6.3 STOKES E O ÉTER VISCOSO.....	53
6.4 FIZEAU E FRESNEL.....	55
6.5 O MOVIMENTO DA TERRA EM RELAÇÃO AO ÉTER	57
8. O EXPERIMENTO DE MICHELSON	62
8.1 A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON-MORLEY	66
8.2 HIPÓTESES PARA O SALVAMENTO DO ÉTER.....	67
8.3 TEORIAS DE EMISSÃO.....	69
9. LORENTZ E HENRI POINCARÉ E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL	71
10. A RELATIVIDADE ESPECIAL	76
CONSIDERAÇÕES FINAIS	79
REFERÊNCIAS.....	82

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Observador verá uma trajetória vertical.	24
Figura 2. Observador No Solo Verá Uma Trajetória Parabólica Do Projétil	24
Figura 3. Representação gráfica do movimento da partícula.	26
Figura 4. Região De Magnésia Onde Foram Observados Os Primeiros Fenômenos Magnéticos.	34
Figura 5. Representação Da Onda Eletromagnética	40
Figura 6. Experimento de Hertz.....	40
Figura 7 Observação do Ponto Luminoso..	43
Figura 8. Experimento de Fizeau	56
Figura 9. Interferômetro usado no ano de 1881 por Michelson	64
Figura 10. (Visão Esquemática Do Funcionamento Do Interferômetro De Michelson, 1881).	65
Figura 11. (Sistema De Franja Visto Pelo Telescópio, Por Ilustração).....	65

1. INTRODUÇÃO

A Física, sendo uma ciência que retrata a natureza, não diferente de outras áreas, sofreu modificações com novas descobertas ao longo do tempo. Dessa forma, a importância desse trabalho está relacionada dentro dessa perspectiva, na construção do contexto histórico de uma das áreas da Física de total importância para a sociedade, a Relatividade, pois foi através da Relatividade que conseguimos o aprimoramento da tecnologia e de uma gama de aplicações na ciência. De acordo com SANTANA, SANTANA (2018, p. 6), a história da ciência permite o desenvolvimento do pensamento crítico, e pode ajudar na compreensão do conhecimento científico podendo proporcionar sentido, dando um significado para a ciência (apud QUINTAL, GERRA, 2009, p. 21). É fundamental então construir uma base sólida para o entendimento de algo tão importante e dessa forma construir o entendimento da ciência, o objetivo deste trabalho é acima de todas as outras, referenciar a importância do contexto histórico para a ciência e compreender a ciência como uma construção histórica, humana, viva, e, portanto, caracterizada como proposições feitas pelo homem ao interpretar o mundo a partir de seu olhar imerso em seu contexto sócio cultural.

(MARTINS, 2008, p. 4) “Todos nos aprendemos na escola que a Terra gira ao redor do seu próprio eixo e que, além disso, ela se move em torno de uma estrela, o Sol”. Segue ainda Martins, (2008) afirmando que isso é verídico, mas nós não sentimos o movimento e não notamos nenhum efeito disso, a exemplo, dos corpos sendo lançados para alguma direção. O princípio da relatividade surgiu há muitos séculos, a ideia para isso era conciliar o estado de repouso da Terra com a teoria astronômica de que ela se movia, embora parecesse contraditório. Para isso é necessário então buscar uma resposta, que logicamente não foi rapidamente encontrada. Há muito tempo (séculos), se vem discutindo a relatividade no âmbito da ciência e vários pensadores tiveram a sua contribuição para tal feito, Aristóteles foi um deles, do ponto de vista científico ele foi muito importante.

Galileu Galilei no ano de 1632 apresenta uma ideia generalizada e bem mais profunda com relação à problemática ao afirmar que não sentimos tal movimento porque é comum a nós. Isaac Newton apresentou uma nova visão e chamou

atenção para uma diferença entre movimentos. “A rotação produz efeitos absolutos, mas a translação é comum a todos, e não consegue alterar seus fenômenos internos” (UCHOA, 2013, p. 40).

A Mecânica Clássica de Isaac Newton permaneceu firme até final do século XIX, ou seja, muito tempo se passou e durante todo esse percurso temporal, muita coisa foi feita, Newton e Huygens tiveram um embate a respeito do que seria constituída a luz. O mesmo afirmava que a luz era constituída de feixes de partículas originadas na fonte. Huygens pensava diferente, para ele a luz era uma perturbação que fluía em uma suposta matéria invisível, como acreditavam vários filósofos gregos o chamado Éter. Hoje nos sabemos que a luz apresenta comportamento dualístico.

Até o final do século XIX todos os fenômenos mecânicos eram explicados com base na Mecânica Clássica. E isso era válido tanto para queda dos corpos perto da superfície da Terra como para o movimento dos corpos em altas velocidades. O tempo e o espaço eram conceitos totalmente independentes e absolutos, isso significa que não dependiam de um referencial adotado e que as medidas seriam sempre iguais, mesmo que fossem feitas em diferentes lugares, sendo um deles em movimento uniforme e o outro parado. (SANTOS, 2013, p.10) “A visão de mundo, transformada pelas descobertas da Física moderna baseava-se no modelo mecanicista newtoniano do universo, este modelo era considerado forte”. Complementa Santa (2013), A mecânica newtoniana na qual aconteciam todos os fenômenos físicos, era tratada em um espaço tridimensional, com geometria euclidiana e espaço e tempos absolutos.

Na segunda metade do século XIX, o físico James Clerk Maxwell conseguiu sintetizar os conhecimentos já adquiridos por vários outros físicos na área do eletromagnetismo em apenas quatro equações, conhecidas hoje como equações de Maxwell. Manipulações das equações de Maxwell mostram que a luz é uma onda eletromagnética que se propaga com velocidade $c = 299.792.458$ m/s. Uma grande questão parecia óbvia, se as ondas mecânicas necessitam de um meio para se propagarem a luz também necessitaria. Esse suposto meio de propagação da luz foi chamado de Éter.

Dessa forma o Éter possuía três qualidades especiais:

“I - era muito delicado ao ponto de não prejudicar nenhum movimento. II - ser capaz de transmitir as ondas em uma velocidade alta. III - capaz de transmitir ondas transversais no meio” PIETROCOLA e col. (2016).

Era necessário encontrar o Éter, e no ano de 1887 um experimento feito por Michelson-Morley, considerado muito sofisticado para a época não conseguiu detectá-lo. Uma interpretação possível era a negação da existência de um meio para a propagação da luz. Outra interpretação foi dada por Fitzgerald, 1892. Este cientista postulou que os comprimentos ao longo da direção dos movimentos se contraíam. Essa contração é real e ficou conhecida como contração de Lorentz-Fitzgerald. Esse postulado explicaria o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley e mantinha viva a ideia da existência do Éter. As transformações de Lorentz-Fitzgerald substituem as transformações de Galileu que formam a base da mecânica newtoniana. Tais transformações preveem a contração do espaço e a dilatação do tempo, dependendo referencial adotado.

Foi no século XX, no ano de 1905, que Albert Einstein, publicou um trabalho dando uma solução final para a interpretação dos resultados do experimento de Michelson e Morley. Fazendo uma síntese clara e sem objeções das varias reflexões feitas pelos cientistas, apresentou dois postulados, um que já havia sido apresentado por Galileu e Newton, no entanto, eram válidas até um limite, ou seja, para velocidades baixas. Embora com uma motivação de conseguir explicitar de forma mais profunda o eletromagnetismo, Einstein, com seus postulados conseguiu agregar, também à mecânica de Newton, sendo que ele previu, que os resultados das experiências feitas com razão $\frac{u}{c} \gg 0$, que são experimentos considerados de primeira ordem, obedeciam a certos parâmetros complexos de observar naquela época. A Mecânica Newtoniana passou a ser um caso especial da Teoria Relativística (RESNICK, 1997).

A metodologia usada para a construção desse trabalho foi uma revisão literária em artigos, revistas, trabalhos acadêmicos e livros de referência no assunto. O presente trabalho bibliográfico que tem como finalidade reescrever o contexto histórico da teoria da relatividade especial e foi construído através de uma ordem cronológica de narrativa a respeito dos acontecimentos. Inicialmente, foi feita uma pesquisa bibliográfica a respeito do assunto e dessa forma pude organizar as ideias

de uma forma sequencial. As referências, além das variadas obras colocadas durante o trabalho, contam com obras especializadas e artigos científicos. Para a organização do trabalho, os capítulos iniciais irão retratar a narrativa dos antecedentes da teoria da relatividade, e por fim no capítulo final são feitas as considerações finais do trabalho.

2. TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA: ANTESCEDENTES HISTÓRICOS

Historicamente Galileu, Newton, Maxwell, Einstein e tantos outros cientistas foram de fundamental importância para o desenvolvimento do conhecimento e da humanidade, no entanto seus pontos de vista não foram apresentados de forma individual e de qualquer maneira, ou seja, o conhecimento dos fenômenos da natureza passou e passa por modificações, o que nos garante que nenhum tipo de teoria pode ser desconsiderada, a menos que se prove o contrário, e que cada teoria que surge é resultado de uma já existente, ou é uma aliada para o desenvolvimento de uma ainda mais completa.

Segundo MORS e WOLFF (2005, p. 12), Galileu Galilei (1564 – 1642) foi um homem com grande habilidade para a ciência, considerado o primeiro a observar os astros com um telescópio, e aderiu ao sistema que considerava o Sol como elemento central dos planetas (heliocêntrico) que havia sido proposto por Copérnico. Galileu contribuiu para o desenvolvimento Física, e estabeleceu as leis da queda livre de um corpo e introduziu o método do experimento em Física. Dentre os seus diversos conhecimentos e observações, a sua contribuição para entendimento da gravidade iniciou-se quando em um de seus experimentos na torre de Pisa, ele deduziu que ao abandonar dois objetos de massas diferentes de certa altura as velocidades desses corpos não dependiam dos seus pesos, logicamente se não houvesse um meio de resistência uma pena e uma pedra não apresentariam diferença nos seus tempos de quedas.

Para estudar mais precisamente a gravidade, Galileu pegava bolas e colocava-as para rolar em planos para observar o movimento o seu movimento e também tentar atenuar o efeito da gravidade e, dessa forma, tirar alguma conclusão das observações do experimento. Galileu, através das suas observações, chegou à conclusão que uma bola em um plano perfeitamente horizontal e sem atrito iria rolar

para sempre. Ele também concluiu que uma bola que rolasse dentro de um plano inclinado com certa concavidade chegaria até o cume de onde partiu e, uma bola que rolasse em um plano menos inclinado percorreria um espaço mais longínquo horizontalmente antes de chegar a mesma altura de onde saiu. Diante do resultado do experimento de Galileu é válido concluir que objetos movendo-se de forma horizontal e em linha reta com velocidade constante, permanecerão em movimento a menos que uma forma modifique seu movimento, dessa forma, diminuindo ou aumentando a velocidade e conseqüentemente poderá mudar a sua direção.

Para Rival (1997), tem-se que Galileu fez a esfera rolar por entre um sulco cavado sobre a superfície de uma tábua de madeira e mediu o tempo do percurso quando a esfera descia por todo o seu comprimento. Depois mediu o tempo de percurso até a metade do seu comprimento. Depois até um quarto, até dois terços, etc. Das diversas medidas obtidas, segundo o próprio Galileu, pela repetição de umas cem vezes do experimento, ele constatou que a queda dos corpos se dá segundo um movimento uniformemente variado e também teria descoberto a relação entre a distância e o tempo de queda, formulando, então, a lei da queda livre dos corpos.

(...) De modo particular fica claro estabelecer que o estado de repouso e o estado do movimento retilíneo uniforme correspondem à situação em que não atuam forças. Em palavras mais sucintas o papel da força é de alterar ou de produzir aquilo que em nossos dias, chamaríamos de aceleração. Essa observação tão importante contraditava e substituíu a errônea análise aristotélica a propósito das forças e das relações entre elas e os movimentos. Estava então formado o palco para a síntese aristotélica (SANTOS, 2009, p. 15).

Da obra de Bernstein (1995), das várias contribuições de Galileu que a ciência pôde receber podemos citar duas mais importantes que atendem o quesito dessa monografia e o conhecimento já explicitado acima. A primeira é que, a conjectura de que não havendo a resistência do ar, todos os objetos com a mesma massa ou não, cairiam com a mesma aceleração. A segunda e a mais interessante é a ideia de inércia no movimento. Na Física aristotélica, para que um objeto se mantivesse em movimento, era necessária a ação do que hoje é chamado de força. Neste aspecto, Galileu imaginou a situação de que todos os obstáculos que pudessem impedir o movimento tais como os atritos estavam afastados, desta forma o objeto posto em movimento assim permaneceria.

2.1 MECÂNICA E RELATIVIDADE: O MOVIMENTO TERRESTRE

O estudo do movimento terrestre é bem antigo e houve vários pensadores que contribuíram para o entendimento do movimento do planeta, mas, como em quase todos os estudos sobre fenômenos que exigem um vasto tempo de dedicação, não foi diferente com planeta Terra, havia pensadores que diziam que a Terra estava parada, a exemplo de Aristóteles, e outros que diziam e acreditavam que a Terra estava em movimento, à ressalva é que, em princípio a Terra estava totalmente parada e isso era uma questão de total respeito com o conhecimento científico discutido e instalado na época.

(...) Nem sempre se pensou que a Terra estivesse em movimento. Na Antiguidade pensava-se que ela estivesse parada, evidentemente (ver MARTINS, 1994a). Nenhuma observação astronômica permitia determinar se a Terra está realmente parada. Para explicar o movimento diário (em 24 horas) dos astros, pode-se tanto supor que a Terra está girando de oeste para leste (que é a explicação que aceitamos hoje em dia) como supor que todo o céu está girando de leste para oeste, completando uma volta em um dia. Os detalhes dos movimentos dos planetas também podem ser explicados tanto do ponto de vista geocêntrico quanto heliocêntrico (MARTINS, 1994 2003, 2008).

Na época, o modo como se observavam os astros era rudimentar, o que dificultava a obtenção de respostas astronômicas acreditando que o céu girava de leste para o oeste e a Terra estava parada. Em sua obra sobre a origem da teoria da relatividade, Martins (1994, 2003, 2008), expõe que não há conhecimento dos detalhes e das propostas da estática da Terra, porém existe uma dúvida imensa em saber se esses pensadores discutiam o real motivo de não conseguirmos sentir o efeito do movimento da Terra, o que se tem conhecimento é que a maior parte dos filósofos e astrônomos aceitava que a Terra estava parada no centro do universo e sem girar, a teoria Geocêntrica. As discussões experimentais sobre o movimento terrestre iniciaram com Aristóteles no século IV a. c, em sua tese, Aristóteles defendeu em argumentos o seguinte experimento. Caso fosse jogada uma pedra de certa altura e sem vento, conseqüentemente a pedra cairia no mesmo lugar, porém o homem não conseguiria observar a descida da pedra de onde fora lançada, pois a Terra havia se deslocado a certa distância.

(...) No século IV a. C. o filósofo Aristóteles apresentou um forte argumento experimental para mostrar que a Terra estava parada. Se jogarmos verticalmente para cima uma pedra (e se não houve vento), ela cairá

exatamente no ponto de onde foi lançado, mesmo se ele for atirado a uma grande altura. Se a Terra estivesse girando, isso não poderia acontecer, porque a superfície da Terra (e a pessoa que lançou o objeto) se moveria, enquanto a pedra estivesse no ar; e, quanto ela caísse, a pessoa já não estaria no mesmo lugar e, portanto, veria que o objeto não retornou ao ponto de lançamento (MARTINS, 1986, 1994, 2003,2008).

Hoje, facilmente sabe-se a resposta para tal problema e porque a pedra cai em determinado lugar de lançamento, mesmo sendo lançada de uma altura considerada grande. A velocidade tangencial terrestre, no equador, é de aproximadamente 1.700 km/h ou 460 m/s, mesmo não estando no equador a velocidade tangencial terrestre nos outros pontos é bem considerável, porém menor. Devido a esse conhecimento atual, esperaríamos mesmo que após lançar uma pedra para cima, já estaríamos a uma distância da base de lançamento. O argumento apresentado por Aristóteles perdurou por muitos séculos, sendo apoiado por Ptolomeu (II D. C) até Tycho Bhahe (século XVI). Muitos outros experimentos apoiaram a ideia apresentada inicialmente por Aristóteles, que caso ela “a Terra” girasse; os pássaros, as nuvens e tudo que estava na sua superfície mudaria de estado rapidamente e no caso dos objetos tudo seria lançado a algum lugar.

É normal que o argumento feito por Aristóteles tenha sido motivo de aceitação e também de contradição, exemplo de Nicole d`oresme; este defendeu a ideia de que era impossível saber se a Terra estava parada ou em movimento. De acordo com a obra de (MARTINS), temos que:

(...) Durante a Idade Média, vários pensadores discutiram a argumentação de Aristóteles. A maioria deles concordou com o filósofo, mas houve outros que se posicionaram contra ele. Nicole d'Oresme (1320-1382), no século XIV, defendeu a ideia de que era impossível saber se a Terra estava parada ou em movimento, por qualquer tipo de experimento que fosse realizado (MARTINS, 1986, 1994, 2003, 2008).

Nicole d'Oresme não parou por aí e usou às ideias de um pensador chamado Witelo, aproveitando-se das ideias dos navios já discutidas pelo mesmo, no qual afirma que: durante a aproximação de navios o observador que está no navio vê o outro se aproximar e vice e versa, e no caso do navio saindo do porto a sensação é diferente, nos pensamos que o porto está se afastando. Dessa forma ele afirmou que a tendência é pensarmos que estamos parados e as coisas se movendo, mesmo sabendo que estamos sobre algo em movimento.

A afirmativa de Nicole d'Oresme é que se a Terra realmente estivesse em movimento, tudo que estava nela também iria junto, ou seja, com a mesma velocidade. Ele fez alusão ao movimento do navio, sendo que, este em movimento, tudo que estivera nele também iria apresentar o mesmo movimento. Aristóteles respondeu, argumentando e fazendo também alusão ao movimento do navio. Aristóteles usou como estratégia para refutar a ideia de d'Oresme o experimento com uma flecha tal que; se uma pessoa lançasse uma flecha para cima, esta não cairia no navio, mas fora dele. Caso a Terra estivesse em movimento, tudo que fosse lançado de forma vertical também cairia para o oeste. E mais uma vez d'Oresme responde Aristóteles, afirmando que a flecha não se move somente na forma vertical mais acompanha o movimento da Terra para o leste. Os argumentos apresentados por d'Oresme, na época não foram aceitos, justamente pelo motivo de não está de acordo com a Física já instalada na época.

(...) Nicole d'Oresme, discípulo de Buridan, deu continuidade aos trabalhos do mestre, tendo, inclusive, discutido a possibilidade do movimento de rotação da Terra com argumentos que pressupunham a teoria do "impetus"; séculos mais tarde Galileu usaria argumentos do mesmo tipo para desarmar as "provas" anti copernicas relativas à imobilidade da Terra (ZYLBERSZTAJN, 1988, pag. 40).

Nicolau Copérnico, no século XVI, aproximadamente duzentos anos depois de d'Oresme, propôs sua teoria heliocêntrica, e o motivo de não sentirmos o movimento da Terra. Segundo Copérnico, nós não conseguimos sentir o movimento terrestre, porque estamos sendo submetidos à mesma rotação natural do planeta. Nicolau Copérnico descreveu que os objetos lançados de forma vertical possuem dois movimentos; um que ocorre no sentido do lançamento e o outro no sentido de acompanhar o movimento terrestre, dessa forma, somente conseguimos observar o objeto em uma direção, já que estamos com a mesma velocidade do planeta.

(...) Um deles será o movimento vertical, para baixo; o outro será o movimento natural de rotação em torno do eixo da Terra, que fará com que a pedra acompanhe o movimento do solo. Assim, o único movimento que observaremos será o vertical e parecerá que a Terra está parada – mas ela estará em movimento. Por outro lado, o fato de que o movimento de rotação da Terra seja "natural" impede que os corpos em sua superfície sejam atirados para longe dela (MARTINS, 2003, 2008).

As ideias de Copérnico pareceram estranhas da mesma forma como as de d’Oresme e também pareceram absurdas, mais uma vez se encaixaram como simples hipóteses, e suas versões não faziam parte de uma teoria aceita. Somente entre os anos de 1548 – 1600 uma ideia parecida com a lei da inércia de Newton e os argumentos também quase que semelhantes aos de d’Oresme ganhou força e tivera uma breve aceitação. Giordano Bruno defendeu os argumentos propostos por Copérnico apresentando também seus argumentos através do movimento de objetos dentro de um navio, em sua análise do fenômeno, ele observou: se uma pedra for lançada de uma ponte e um navio passar por baixo, logicamente essa pedra não atingirá determinado local escolhido, mais um local posterior à passagem do navio. O outro argumento é intrínseco ao próprio navio, pois se for lançado uma pedra do mastro do navio, ela atingirá o lugar ideal da queda, e não posterior ao mesmo, segundo Giordano, a pedra está com a mesma velocidade do navio além de adquirir também uma velocidade de queda. Bruno deu o nome de “virtude impressa” à qualidade de movimento natural da Terra. Como podemos acompanhar nesta citação de Bruno:

(...) [Aristóteles] diz que seria impossível que uma pedra lançada para o alto pudesse pela mesma retidão perpendicular retornar para baixo; mas seria necessário que o movimento velocíssimo da Terra deixasse-a muito para trás em direção ao ocidente. Porque, realizando-se essa projeção dentro da Terra, é necessário que com o movimento desta acabe-se por mudar toda relação de retidão e obliquidade; porque existe uma diferença entre o movimento do navio e o movimento daquelas coisas que estão no navio: do que, se não fosse verdadeiro, seguir-se-ia que, quando o navio corre pelo mar, jamais alguém poderia deslocar em linha reta alguma coisa de uma borda à outra e não seria possível que alguém saltasse e retornasse com os pés de onde os tirou (BRUNO, 1995, p. 183).

A partir dessa análise a respeito da obliquidade dos movimentos e do movimento dos objetos a partir de certo referencial, feitas por Giordano Bruno. Esta pode ser a primeira citação a respeito da relatividade dos movimentos, nessa época Giordano garantiu um profundo avanço no conhecimento científico e, sobretudo, uma boa ideia sob o ponto de vista da Física atual, mas no período em que foi exposta, essa interpretação era problemática ou difícil de ser aceita.

O conhecimento sobre relatividade dos corpos é bem antigo, contudo, só foi usado com maior intensidade na segunda metade do século XIX, historicamente o nome relatividade foi iniciado somente na época de Einstein (no século XIX).

Galileu Galilei em seus estudos sobre o movimento terrestre também quis discutir sobre a problemática inerente de Copérnico sobre o movimento do planeta e o novo entendimento de não sentirmos o movimento da Terra começou a surgir. Em seu trabalho, Santos explica a seguinte situação avaliada e também já conhecida sobre o movimento da terra na ideia de Galileu, Santos (2009), visto que nós e tudo que está sobre a Terra compartilhamos o mesmo movimento e continuam se movendo em um sentido e estado de movimento que não requer outras explicações, dessa maneira não conseguimos sentir o movimento da Terra, pois estamos compartilhando com ela o seu movimento, portanto, estamos em repouso em relação a Terra, ainda que no esquema de Copérnico nós e a Terra estamos nos movendo intrinsecamente juntos.

Completando a ideia de Santos em sua revisão literária, Galileu e posteriormente Newton sabiam que as leis de movimento não favoreciam uma abordagem de lugar ou movimento específico. E mais uma vez Galileu trouxe a ideia do movimento do navio e lançamento de uma pedra a partir de um local específico, esse local era o mastro do navio, Galileu argumentou que uma pedra quando lançada do mastro do navio em repouso iria ter o mesmo comportamento se o navio também estivesse em movimento, nos dois casos a pedra iria cair na base do mastro.

Uma ideia bem genérica sobre a teoria da relatividade de Galileu está formada: as leis do movimento atuam de forma igual para qualquer observador em movimento uniforme. Formalmente pode-se dizer que nos referenciais inerciais “locais”, a relatividade de Galileu afirma que as leis de movimento são válidas em qualquer referencial que tem movimento uniforme.

René Descartes (1596-1649) foi um importante pensador sobre a teoria do movimento terrestre e defendeu a teoria de Copérnico, porém com uma diferença.

(...) Para Descartes, todo movimento é mudança de posição em relação a algum objeto (só existem movimentos relativos). Assim, cada corpo possui um enorme número de movimentos diferentes, em relação a cada objeto do universo. Porém, nem todos os movimentos possuem a mesma importância. Somente o movimento em relação ao meio imediato (aquilo que toca o corpo) produz efeitos físicos. Assim, um peixe que esteja sendo levado pela correnteza de um rio está parado em relação à água que o cerca e, por isso, pode-se dizer que ele está parado, embora tenha movimentos em relação à margem do rio e a outros corpos (MARTINS, 1986, 1994, 2003,2008).

Para Descartes, os planetas tinham o seu movimento envolvido por um meio material invisível e que giravam em torno do sol. Em seu entendimento, o movimento da Terra não é sentido pelo fato de não estar inserida no meio que a cerca, no caso o ar e a matéria que está totalmente invisível.

A versão final para essa problemática secular foi formulada por Isaac Newton. Nem a abordagem de Galileu ou a de Descartes são totalmente corretas, no entanto foram de fundamental importância. Newton chamou a atenção para o movimento de translação e de rotação, fazendo alusão a uma experiência de um balde contendo água. A água colocada inicialmente no balde fica parada, se o balde começar a girar, não é de imediato que o conteúdo do balde terá a mesma iniciativa, somente depois de algum tempo, a “associação água e balde” apresentará a mesma condição Física de rotação. A água que inicialmente estava em formato plano no balde, muda seu formato para côncava, mais baixa no centro e mais alta nas bordas do balde. Para Descartes era normal que não surgisse efeito algum e para Galileu não haveria mudança ou efeito.

(...) Suponhamos que temos um balde cheio de água, preso ao teto por uma corda. Quando tudo está parado, a superfície da água é plana e horizontal. Se o balde for colocado em rotação, a água não começará imediatamente a girar com ele; porém, depois de algum tempo, o balde e a água estarão girando juntos. Nesse momento, será possível ver que a superfície da água não fica plana e sim côncava (mais baixa no centro do balde e mais alta junto às paredes do balde). Porém, tanto antes de colocar o balde em movimento quanto agora, a água está parada em relação ao balde, que é aquilo que está em contato com ela. Assim, de acordo com Descartes, não deveria surgir nenhum efeito físico e a água deveria continuar plana. De acordo com Galileu, também, “o movimento comum é como se não existisse”; portanto, quando a água e o balde estão se movendo juntos, esse movimento é como se não existisse e não poderia produzir efeitos. Porém, vemos que a água adquire uma forma diferente quando ela e o balde estão girando juntas (MARTINS, 1986, 1994, 2003, 2008).

Através dessa observação Newton concluiu que a rotação produz efeitos absolutos, em contrapartida o movimento de translação é comum em todas as partes do sistema e não altera seus fenômenos internos, logo concluiu que a Terra gira, todavia não o suficiente pra jogar os objetos da superfície para longe. No século XIX, Léon Foucault mostrou de forma esplêndida através de um giroscópio e também de um pêndulo conhecido como “pêndulo de Foucault” os efeitos da rotação da Terra, confirmando as observações feitas por Newton. CAMENIETZKI (2021)

comenta em um contexto histórico as imposições feitas o conhecimento da rotação da Terra e também da participação de Foucault:

(...) Ainda não havia demonstração astronômica definitiva em favor das teses de Copérnico. O silêncio sobre o tema, que a Igreja Católica procurou impor, ainda limitava seriamente os debates científicos. Já em meados do século 19, os astrônomos contemporâneos de Foucault haviam acumulado evidências numerosas da rotação da Terra (CAMENIETZKI, 2021, p.1).

Newton logo depois de observar os efeitos da rotação, admitiu a existência de um espaço que chamou de absoluto e concluiu que as velocidades absolutas de translação não produzem efeitos, e todos os sistemas que estão em estado de translação uniforme através do espaço absoluto são equivalentes, porém as velocidades absolutas de rotação provocam efeitos. Na época de Galileu e Newton, os cientistas já acreditavam que as leis do movimento poderiam explicar toda a realidade. Essa nova realidade de espaço absoluto foi criticada por outros pensadores, questionando a rotação já explicada anteriormente por Newton, porém em suas rasas afirmações nenhuma apresentou argumentos suficientes para cancelar o que já estava fixado, essa concepção de espaço absoluto foi aceita pelos físicos no início do século XX. Issac Newton propôs uma ideia finalística para o princípio da relatividade que já estava instaurada por séculos.

2.2 A RELATIVIDADE DE GALILEU: TRANSFORMAÇÕES GALILEANAS

Para Fragata (2013), O princípio da relatividade foi inicialmente apresentado por Galileu e este mantém-se até hoje, é uma das leis fundamentais da Física. Na época ele afirmava que não era possível efetuar uma experiência mecânica que pudesse revelar o movimento uniforme, como um exemplo de um barco.

A afirmação acima significa que os valores das grandezas fisicamente observáveis em diferentes posições, apresentam valores diferentes para os observadores, mas mantêm as mesmas relações independentemente de onde são observadas, ou seja, dos observadores que contemplam tal movimento. Historicamente isso não foi atribuição de Galileu e sim de Albert Einstein muitos anos depois.

Discutimos uma situação Física utilizada por Galileu para mostrar que um fenômeno que ocorre em apenas um local possui duas interpretações Física de

acordo com diferentes observadores. Galileu tentou mostrar a equivalência entre os diferentes observadores, analisando o movimento.

Uma pessoa parada observa o movimento de uma bola e está em movimento com relação a um homem em repouso em um trem.

Suponha que o homem A no trem lança a bola para cima e o homem B que está na superfície terrestre acompanha o movimento da bola. A trajetória da bola vista pelo homem no trem é totalmente vertical, porém o homem que está fixo na Terra observado que a bola apresenta trajetória parabólica. Observando as figuras 1 e 2 podemos entender o que Galileu propôs para explicar sua concepção a respeito do movimento: na figura 1 o observador é A e na figura 2 o observador é B, ambos estão atendendo as condições para serem considerados inerciais, pois estão em repouso.

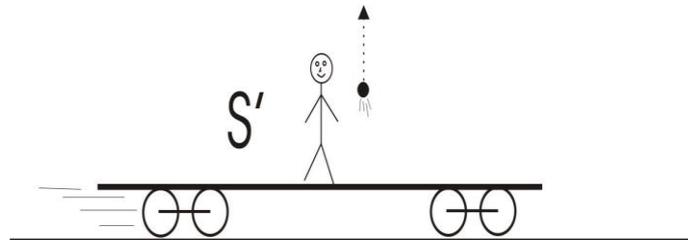


Figura 1. Observador verá uma trajetória vertical.

Fonte: Texto De Apoio Ao Professor De Física. Disponível em: < https://www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5_Wolff_Mors.pdf > acesso em 10 de janeiro de 2022.

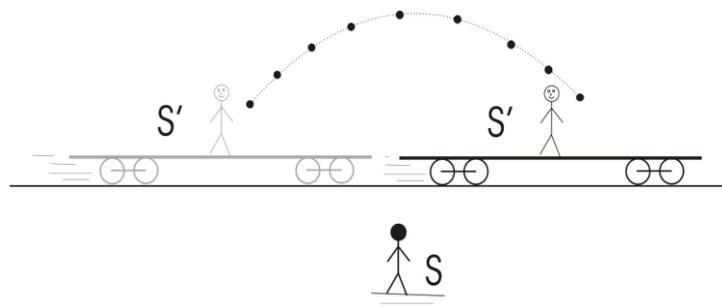


Figura 2. Observador No Solo Verá Uma Trajetória Parabólica Do Projétil

Fonte: Texto de Apoio ao professor de Física. Disponível em: < https://www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5_Wolff_Mors.pdf > acesso em 10 de janeiro de 2022.

A ilustração da figura mostra como os movimentos ocorreram e demonstra claramente o princípio da independência dos movimentos, é necessário deixar claro que, de acordo com Galileu, o tempo não depende dos referenciais e os relógios marcam os mesmos intervalos de tempo:

$$t_a = t_b$$

Esse tipo de análise minuciosa levou Galileu a seguinte conclusão: o movimento é relativo e que as percepções de movimentos são diferentes para ambos os observadores, porém algumas características como as grandezas Físicas medidas pelos próprios observadores são as mesmas para ambos e não dependem do referencial adotado. Em mais uma noção sobre movimento, eis a dúvida de estar em repouso ou movimento, para Galileu isso é uma característica do próprio observador e isso deveria estar claro na escolha de um referencial apropriado.

Considerando o que foi exposto acima podemos ter uma definição simples de sistema inercial, sabendo que os eventos ocorrem em algum lugar de um sistema de referência. Um sistema inercial é definido como sendo um sistema de referencia, para qual a lei da inercia vale – como é conhecida a primeira lei de Newton. Em um sistema não acelerado, um corpo sobre o qual atuam forças externa com somatório nulo, se movimentará com velocidade constante ou permanecerá em repouso. A escolha do referencial é arbitrária, o que interessa são somente as medições das grandezas relacionadas ao fenômeno. Podemos acompanhar uma descrição do que seria o sistema inercial:

(...) definimos um sistema inercial como sendo um sistema de referência, no qual vale a lei da inércia – primeira lei de Newton. Em tal sistema, o qual podemos também descrever como sendo um sistema *não acelerado*, um corpo sobre o qual atua uma força externa total nula, mover-se-á com uma velocidade constante. Corpos acelerados em relação a tais sistemas não são inerciais (RESNICK, 1971, P.5).

As transformações Galileanas são observações feitas quando há movimento relativo entre referenciais inerciais, são na verdade um conjunto de equações que permitem relacionar as coordenadas temporais e espaciais do movimento de corpos com relação a dois referenciais inerciais diferentes.

(FRAGATA, 2013), Considere dois sistemas inerciais s e s' e suponhamos um corpo imóvel no sistema S , este formado por eixos cartesianos e todos os pontos desse corpo podem ser expressos pelas suas coordenadas cartesianas (x, y, z) . Exprimindo todos os pontos do sistema agora no s' o faremos também através das suas coordenadas cartesianas (x', y', z') . As transformações das coordenadas

esaciais de s para s' e vice versa são feitas através de uma equação que podem criar uma correlação com facilidade desde que conhecemos os sistemas usados. Se os sistemas s e s' se encontrarem em repouso, um relativamente ao outro, estamos diante apenas de um sistema geométrico, porém se um move-se com velocidade v relativamente ao outro, devemos considerar que este se faz de forma retilínea e uniforme e, dessa forma, todos os pontos de s' tem relativamente à s uma velocidade no sentido horizontal da coordenada cujo eixo foi posto na direção da velocidade relativa dos dois sistemas.

Corroborando Resnick (1971) que considerando um sistema inercial s e outro s' , o primeiro se movendo com velocidade constante v em relação ao segundo, por conveniência, nós escolhemos os três conjuntos de eixos como sendo paralelos entre si, com os eixos comuns x e x' com mesma direção da velocidade relativa entre os dois sistemas. Observemos as transformações de Galileu através de um evento que ocorre no ponto p , e que as coordenadas de espaço e tempo são medidas no próprio sistema inercial, sendo que um observador ligado a S especifica por meio de relógios e instrumentos de medidas localizados em seu referencial, as coordenadas espaciais e temporais do evento p . Essas coordenadas são representadas por x, y, z e t .

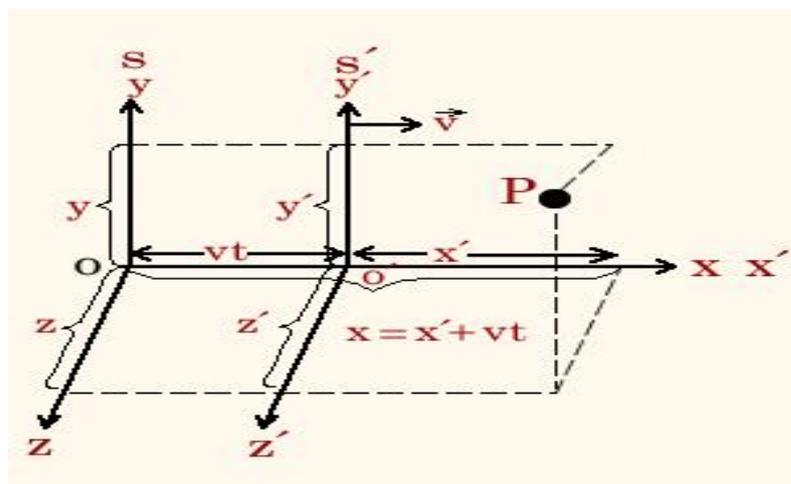


Figura 3. Representação gráfica do movimento da partícula.

Fonte: O conflito com a mecânica clássica < disponível em: https://www.if.ufrgs.br/tapf/v16n5_Wolff_Mors.pdf > acesso em 11 de janeiro de 2022.

O outro observador que está em s' , usando seus próprios instrumentos de medida, específica ao mesmo evento, as coordenadas x', y', z' e t' . Fisicamente, as coordenadas medidas em ambos os referenciais darão com precisão a mesma posição espacial do evento p . Os tempos t e t' também serão os mesmos se os relógios forem sincronizados quando as origens dos dois sistemas coincidem. A igualdade dos tempos t e t' é uma premissa da relatividade de Galileu.

Considerando uma análise particular de cada lado dos referenciais s e s' pode-se concluir que os comprimentos e intervalos de tempo são absolutos, portanto, eles são os mesmos para todos os observadores inerciais do evento.

Ao fazer $t = t'$ (os relógios em sincronização). Isto, porque para Galileu o tempo é absoluto, independente do referencial, o que chamamos de invariância do tempo. Isto está de acordo com o nosso senso comum, pois se não fosse assim, teríamos que sincronizar os nossos relógios constantemente (MORS e WOLFF, 2005, p.15).

Segue ainda Mors e Wolff (2005).

Uma consequência direta da invariância do tempo, segundo as transformações galileanas, é a invariância do comprimento. Explicitando melhor, pelas transformações de Galileu concluímos que o comprimento, assim com o tempo, é absoluto, independente do referencial em que é medido (MORS e WOLFF, 2005, p.15).

Encontrar as equações que relacionam as coordenadas medidas pelos dois observadores é trivial e valem:

$$\begin{cases} x = x' + v \cdot t \\ y = y' \\ z = z' \\ t = t' \end{cases} \quad (1)$$

Caso considerarmos igualmente s se movendo com velocidade v e no sentido inverso em relação a s' , assim podemos obter as novas equações para as transformações das coordenadas.

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ z' = z \\ t = t' \end{cases} \quad (2)$$

De acordo com Mors e Wolf (2005), uma consequência da invariância temporal, de acordo com a mecânica de Galileu é também a invariância da extensão (comprimento), dessa forma, conclui-se que o tempo e o comprimento são absolutos, e não tem dependência do local adotado (referencial). Conclui Resnick (1971), De acordo com a mecânica clássica, (pré-relativística) e as transformações galileanas o comprimento, massa e tempo às três grandezas básicas da mecânica são todas independentes do movimento relativo de quem mede, no caso, o observador.

3. A RELATIVIDADE NEWTONIANA

Aristóteles ao longo de sua vida formulou filosoficamente ideias empíricas sobre o mundo terrestre, no qual afirmava que era composto por uma quantidade de elementos básicos: a Terra, água, fogo e ar e estudou também sobre o movimento apresentando o movido do acontecimento de alguns fenômenos, a exemplo do movimento vertical e dos corpos que se movimentavam quando submetidos a alguma força. Para ele o movimento tem significado de mudança e para isso era necessário uma causa. O cosmo para Aristóteles existia e era constituído por dois alicerces, o primeiro era a sua constituição no qual afirmava que o universo era preenchido por uma matéria, ou seja, essa impossibilidade lógica era uma corroboração da inexistência do vácuo, o outro alicerce ressalta que o universo era preenchido por uma quantidade de matéria que viria ser finita, a existência de um espaço cósmico infinito era descartada (PORTO, 2009).

A rejeição ou o abandono de um de seus elementos principais acarretou em consequências que impediram uma nova discursão dos seus ideais, desta forma, o abalo das concepções do cosmos de Aristóteles pela astronomia copernicana que viria ser vigente, transmitiu uma coletividade também à Física de Aristóteles (PORTO, 2009). As ideias aristotélicas já não possuíam tanta influência. As críticas sobre as ideias de Aristóteles permitiram o surgimento de uma nova ciência e, dessa vez, o conhecimento empírico já estava sendo substituído por uma metodologia mais abstrata com a utilização da Matemática para descrever os fenômenos da natureza

(PORTO, 2009). A nova Física instalada era radicalmente diferente da Física de Aristóteles pelo seu caráter eminentemente quantitativo.

(...) A nova Física, surgida nos alvares da revolução científica suscitada pelo copernicanismo, adquiriu uma feição completamente distinta da ciência aristotélica: pela adoção da linguagem matemática, passou a constituir uma forma quantitativa de conhecimento, caracterizada por uma concepção mecanicista, apoiada exclusivamente na ideia de causas eficientes e onde os conceitos de causas formais e finais deixam de desempenhar qualquer papel (PORTO, 2009, p.7).

Isaac Newton nasceu no ano de 1642, no condado de Lincoln Shire. Na época do seu nascimento, a ciência estava em uma instabilidade e passavam por grandes transformações. Newton desenvolveu seu trabalho usando conhecimentos já discutidos por pensadores anteriores a sua existência, Galileu, Kepler e Descartes. O mesmo disse que o motivo de ter visto longe foi porque estava em ombros gênios da ciência. Sem dúvidas, foi um dos pilares da ciência. Segundo Cohen (1967, p.1) "(...) Newton era adepto do empirismo e a ciência era composta por um conjunto de verdades que devem ser absolutas onde a explicação para os fenômenos e tudo que era desconhecido teria que está adaptado em razão da experiência".

Isaac Newton publicou em 1687 a sua obra de maior impacto, "Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural", onde expôs a cinemática de Galileu para formular as leis que regem a mecânica (Pré-relativística). Para Newton e Galileu o espaço e o tempo são independentes. Ainda nessa obra abordou o movimento planetário descrito anteriormente por Kepler.

As leis de Newton foram apresentadas no livro já apresentado no texto e trata da essência das três leis: a lei da inércia, que está relacionada com a inércia dos corpos e sua associação com o movimento retilíneo uniforme; a segunda lei que relaciona a força com a razão entre a variação da quantidade de movimento com a variação do tempo necessária para ocorrer a referida variação da quantidade de movimento e a terceira é que toda ação causa uma reação.

Segundo Balchin (2009), Newton trabalhou com as observações feitas anteriormente por Galileu e expôs as leis de movimento que consolidou a base para a construção da mecânica. Concluímos das leis de Newton que massa e aceleração de um corpo não dependem do sistema de referência utilizado e, e de acordo com a

segunda lei já exposta, a força resultante é independente do referencial adotado, por conseguinte, as leis de Newton são iguais para todo sistema de referência.

(PORTO E PORTO 2008), A Física newtoniana não só é coerente, mas a sua estrutura é dependente da ideia de um espaço absoluto, onde distingue dois tipos de observadores: aqueles para os quais são corretas e válidas as três leis fundamentais da mecânica, chamados de inerciais e os não inerciais, para quem os fenômenos mecânicos não obedecem às Leis de Newton. Em uma colocação simples, no espaço absoluto de Newton os fenômenos ocorriam com total liberdade e o tempo era tido como absoluto: Os eventos físicos se desenvolvem de forma independente sem nenhuma interferência externa.

(...) Para Newton, o espaço era uma enorme caixa, contendo materiais e objetos, onde os fenômenos físicos aconteciam. Este espaço era tridimensional, contínuo, imóvel (não variava com tempo), infinito, uniforme e possuía as mesmas propriedades em todas as direções. Newton também defendia a ideia de um tempo absoluto, o qual era unidimensional, contínuo, infinito e possuía as mesmas propriedades em todos os locais do universo (RIFFEL, 2010, p. 6).

Partindo do preceito exposto na citação de Riffel, a relação da velocidade e aceleração de um ponto p pode ser encontrada facilmente fazendo sucessivas diferenciações no tempo através das transformações galileanas e considerando que o objeto está se movimentando em relação ao referencial s' .

Resnick (1971) no seu livro, "introdução à relatividade especial", faz um estudo da base experimental partindo da primeira transformação encontrada por Galileu.

$$x' = x - v \cdot t \quad (3)$$

As diferenciações em relação a t dá origem a:

$$\frac{dx'}{dt} = \frac{dx}{dt} - \frac{d(vt)}{dt}$$

Considerando que $t = t'$ e as diferenciações de $\frac{dx'}{dt} = \frac{dx'}{dt'} = u_{x'}$ e $\frac{dx}{dt} = u_x$, o resultado final é:

$$u_{x'} = u_x - v \quad (4)$$

Eis a fórmula clássica para adição de velocidades pela mecânica newtoniana. Efetuando o mesmo procedimento para as outras componentes, nesse caso y e z, percebe-se que elas permanecem inalteradas, já que são ortogonais à direção do movimento.

$$u_{x'} = u_x - v, \quad u_{y'} = u_y, \quad u_{z'} = u_z \quad (5)$$

Através das transformações das velocidades conseguimos encontrar a aceleração, também por diferenciação.

$$[ax' = ax, \quad ay' = ay, \quad az' = az] \text{ O que implica que } \vec{a}' = \vec{a} \quad (6)$$

Isso porque a diferencial, $\frac{du}{dt}$, é uma constante, logo $\frac{d}{dt} \left(\frac{du}{dt} \right) = 0$.

De acordo com Resnick (1971), as componentes medidas da aceleração de uma partícula não são afetadas pelos sistemas de referência adotados. A aceleração permanece a mesma em todos os referenciais inerciais, o que mostra que a variação da velocidade percebida por um observador, irá ser a mesma percebida por qualquer observador em outro referencial inercial. A aceleração é uma quantidade absoluta na mecânica de Newton.

A relatividade de Galileu é considerada em princípio a chave de entrada para se estabelecer esse conhecimento tão valioso. Na mecânica clássica a massa não é afetada pelo movimento relativo e também é igual para todos os observadores inerciais. A aceleração e a massa são invariantes, a segunda lei de Newton que é definida como $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ pode ser considerada uma invariante perante as transformações de Galileu.

A conclusão imediata desse fato é que diferentes observadores inerciais compartilham a mesma Física, os mesmos resultados de experimentos mecânicos, ou seja, utilizam representações matemáticas iguais ou equivalentes. É necessário frisar que os valores das grandezas Físicas, observados e medidos nos referenciais s e s' podem ser diferentes e que normalmente são, porém a aceleração

permanecerá igual. Isso não significa que irão apresentar resultados diferentes, visto que, as equações que surgem são as mesmas equações de movimento e são advindas da segunda lei de Newton. Este cenário é correto, pois pelas leis da mecânica, não há nenhum sistema inercial privilegiado em relação ao outro, os fenômenos físicos vão se manifestar de forma idêntica para todos eles.

Nenhum sistema inercial pode ser considerado privilegiado, pois as leis da mecânica são iguais em todos eles, porém se a segunda lei de Newton mudasse em alguma transformação, a Física observada por um referencial em MRU seria totalmente diferente daquela observada por um observador que estivesse em repouso. Newton expressou seu princípio da relatividade na seguinte ideia, Resnick (1968, p.19) “(...) os movimentos dos corpos contidos em um espaço qualquer são os mesmos entre si, este corpo estando em repouso ou movendo-se com velocidade de forma uniforme”. Uma afirmação de quais são essas quantidades invariantes é o princípio da relatividade; considerando que para tais quantidades, todos os sistemas de referência apresentam uma equivalência de validade entre si, e mais uma vez é necessário enfatizar que nenhum deles é privilegiado em relação ao outro.

4. UM ENFOQUE HISTÓRICO SOBRE O ELETROMAGNETISMO

A Eletricidade e Magnetismo tiveram seus alicerces desenvolvidos de forma individualista até meados do século XIX. Oersted verificou uma relação entre a Eletricidade e o Magnetismo. No ano de 1819, Oersted notou que a agulha de uma bússola mudava sua direção, quando se aproximava de um condutor, sendo este tendo uma corrente elétrica. Quando o eletromagnetismo foi desenvolvido, a mecânica clássica predominava e detinha as explicações para descrever os fenômenos que regem a natureza.

(...) A primeira evidência da relação entre o magnetismo e o movimento de cargas elétricas foi observada no século XIX. Em 1819, o professor dinamarquês Hans Christian Oersted verificou que a agulha de uma bússola pode ser desviada de sua orientação na proximidade de um condutor percorrido por corrente elétrica. Dessa forma, Oersted provou que um condutor percorrido por corrente elétrica é capaz de criar um campo magnético. Entre 1821 e 1825 na França, André Marie Ampère analisou o efeito de uma corrente sobre um ímã e a reação oposta, de um ímã sobre uma corrente (MUSSOI, 2016 p. 7).

Com base nas ideias de CHAVANTE (2016), a eletricidade teve seu início no século VI a. c, na Grécia antiga quando Thales de Mileto, após descobrir que uma resina chamada âmbar apresentava a propriedade de atrair objetos leves como pedaços de papel ou lã. Durante milênios os fenômenos ligados à eletricidade, ficaram restritos apenas à curiosidade. Somente no século XVI, Willian Gilbert retorna a experiência inicialmente com o âmbar, surgindo pela primeira vez às palavras eletricidade e eletrização.

Uma busca ainda mais completa sobre os fenômenos das cargas elétricas foi realizada por Von Guerick.

(...) Em 1672 Von Guericke publicou o livro *Experimenta nova, Ut Vocantur, Magdeburgica de vacuo spatio*, onde descreveu, entre outras coisas, uma série de experimentos realizados com uma esfera de enxofre giratória. A máquina eletrostática criada por ele constituía-se de uma esfera de enxofre que podia ser girada em torno de um eixo, enquanto era friccionada pela mão. O atrito fazia a esfera acumular eletricidade estática, que podia ser descarregada na forma de faíscas (CARVALHO; CALDAS; FACCIN, 2015, p. 45).

O físico alemão Otto Von Guericke (1602 – 1686) procurou um modo de obter corpos com maior carga elétrica, construindo um aparato que possibilitou eletrizar uma esfera de enxofre, seguindo o processo de eletrização por friccionamento colocar ponto. Esse aparato era capaz de gerar faíscas.

Um grande número de físicos e estudiosos, por exemplo, Charles Du Fay, Benjamim Francklin, Charles August Coulomb, o físico italiano Alessandro, dentre outros, formaram um conjunto de personalidades de fundamental importância para o estudo da eletricidade. André Maria Ampere 1820 demonstrou a capacidade de fios condutores desenvolverem forças de atração ou repulsão quando era percorrido por uma corrente elétrica e, no ano de 1827, elaborou uma das leis do eletromagnetismo, a “lei de Ampere”.

Segundo Mors e Wolf (2005), as pesquisas relacionadas a eletricidade e seus fenômenos avançou no século XVIII, nessa época, eram feitos os estudos para observar a existência de cargas diferentes, não obstante era dado início para o estudo do movimento das cargas, conhecidamente como corrente elétrica. É notório que os estudos da corrente elétrica, sem dúvidas foi substancial para o desenvolvimento do eletromagnetismo.

Há relatos que o primeiro contato com os ímãs aconteceu na Grécia antiga; uma pedra tinha características “maravilhosas” e que fora encontrada por um pastor chamado Magnes. Outros questionam que o nome veio de uma pedra que por ventura foi encontrada numa região da Turquia chamada Magnésia, era uma época onde o conhecimento era dominado pelos pensadores animalistas e logo depois pelos mecanicistas. O surgimento da bússola pode ser datado pelo ano de 1100 AC na china e no ano de 1637 DC na Europa, no século XIV ela já era bastante usada.



Figura 4. Região De Magnésia Onde Foram Observados Os Primeiros Fenômenos Magnéticos.

Fonte: Grécia Antiga. Disponível em: < <https://greciantiga.org/arquivo.asp?num=1094>> acesso em 15/12/2021

Segundo Mors e Wolff (2005), “os chineses foram os iniciadores a utilizar as propriedades magnéticas, eles construíam bússolas, os registros de início do uso da bússola no, ocidente, são datados feitos entre os anos de 1100 a 1200 DC”. Em 1269, o engenheiro e também militar de nacionalidade francesa Pierre de Maricourt, descreveu e evidenciou em um trabalho a questão mais interessante do magnetismo; os monopólios magnéticos são inseparáveis, não há como separar um polo do outro (sul e norte). Willian Gilbert, em sua obra, De Magnete, descreveu a relação de atração inevitável entre um ímã e um ferro quando colocados próximos, para ele existia uma formação circular de influencia no ímã que garantia tal característica. Hoje, isso é atribuído ao campo magnético. Dentre as suas contribuições para o Magnetismo foi fazer sua observação sobre o comportamento característico da Terra como um ímã gigante.

(...) A obra, publicada em 1600, em Londres, reuniu os conhecimentos da época sobre a atração do ímã, fenômeno que fascinava a humanidade desde a Antigüidade, e apresentou novos fenômenos magnéticos, inclusive a idéia de que a própria Terra seria um grande magneto. Mais do que isso, inaugurou uma nova metodologia no estudo do magnetismo, ao realizar um tratamento sistemático desses fenômenos, (...) Gilbert utiliza, em muitos experimentos, uma pedra-ímã (ímã natural) torneada no formato de uma

esfera, para representar a Terra, e por isso a chama de “terrella”, ou pequena Terra em um dos primeiros exemplos de modelo experimental em escala. (GUIMARÃES, 2020, v.28, p.74).

Após os conhecimentos e experiências introduzidos por Gilbert, o magnetismo e seus desdobramentos avançaram muito pouco e durante os 200 anos de intervalo entre os séculos, somente a eletricidade ganhou um impulso considerável. No século XIX o estudo da eletricidade que seguia paralelo ao magnetismo permitiu um avanço do conhecimento sobre as propriedades Magnéticas, isso só foi possível através da descoberta das relações entre as duas áreas, as reflexões sobre magnetismo foram retomada por Oersted (1777 – 1851) na Dinamarca. Os avanços no conhecimento sobre o magnetismo nos séculos posteriores juntamente com o descobrimento de novos fenômenos com propriedades iguais ao do ímã natural é testemunha do olhar brilhante de Willian Gilbert.

Três séculos anteriormente a Oersted, já existia evidências de uma relação entres as duas áreas (Eletricidade e Magnetismo), porém era necessária uma explicação coerente e técnica entre essas duas áreas da Física. Benjamim Franklin dizia que bússolas sofriam algum tipo de perturbação em seu ponteiro em tempestades com raios.

(...) Benjamin Franklin (1706-1790) chegou a estudar relatos que indicavam que faíscas e raios durante tempestades modificavam agulhas de bussolas e que objetos metálicos como facas e garfos se tornavam magnéticos (estes acontecimentos foram de modos triviais interpretados como um possível casamento entre a Eletricidade e o Magnetismo), (PASCOAL, 2013, p. 40).

Segundo PASCOAL, (2013, pag. 40, apud PIETROCOLA, 2010, p. 166), muitas observações e experimentos foram realizados nas épocas anteriores a Oesrted, porém não tinham aceitação, mesmo que não aceitas elas já elencavam que havia uma extensa relação de união entre as duas partes da Física. No ano de 1819, Hans Cristhian Oersted fez uma conferência e colocou em pauta os efeitos elétricos e magnéticos a uma plateia composta de pessoas que já possuía um grau de conhecimento sobre os fenômenos expostos.

(...) a experiência realizada por Oersted consistia em colocar uma bússola com seu ponteiro perpendicular a um fio por onde passava uma corrente elétrica. Com esta configuração nada poderia ser observado de anormal. Ao colocar o ponteiro paralelamente ao fio, Oersted percebeu que, com a passagem de uma corrente, o ponteiro era desviado em noventa Graus. Se o

sentido da corrente fosse invertido, o ponteiro girava em seu sentido oposto (MORS e WORLF, 2005, p. 19).

Anteriormente a esse experimento o cientista Charles Augustin de Coulomb acreditava que essa relação não poderia existir:

(...) Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) publicou que não podia existir relação entre a eletricidade e o magnetismo, que considerava como dois fenômenos naturais totalmente diferentes, Oersted provou que uma corrente elétrica faz desviar a agulha de uma bússola provando a inter-relação entre esses dois importantes ramos da Física (SILVA, 2014, p. 12).

Contudo, a ideia central já estava formada e ganhou força dentre a comunidade científica, André Marie Ampère, que era matemático, logo descobriu os efeitos da corrente elétrica posta juntas e percebeu que estas apresentavam uma característica de se repelirem se colocadas próximas e no mesmo sentido, e se colocadas no sentido contrário, elas se atraíam mutuamente. Ampère formulou uma lei matemática para este fenômeno, observou também que uma corrente posta para percorrer um fio em forma de espiras, as “transformavam” em ímãs.

(...) Ampère não só imaginou a possibilidade da ação entre os fios condutores com corrente, como realizou experiências minuciosas, observando, entre outros fenômenos, que quando as correntes em fios retos paralelos fluem no mesmo sentido, os fios se atraem, e quando fluem em sentidos opostos, eles se repelem (ASSIS E CHAIB, 2017, p. 87).

Karl Friedrich Gauss publicou um importante trabalho chamado “Teoria Geral do Magnetismo” no ano de 1839, a sua teoria teve uma abrangência maior, pois serviu como modelo para muitas outras áreas da Física. Passado algum tempo do trabalho de Oersted, PASCOAL (2013, p. 44 apud ROCHA et al (2002 pag. 253), já havia na França Michael Faraday (1791 – 1864), que também já possuía conhecimentos do eletromagnetismo, para Faraday, existia uma dúvida se a corrente elétrica ao percorrer um fio condutor poderia produzir magnetismo, e o que poderia acontecer se fosse o contrário? Isso levou tanto o próprio Faraday como vários outros cientistas a buscarem eletricidade a partir do magnetismo.

(...) Em 1825 o inglês Michael Faraday intuiu que, se uma corrente elétrica produzia um campo magnético, então o inverso também poderia ser verdadeiro. Para comprovar sua hipótese montou o seguinte experimento: enrolou duas espirais de fio em um anel de ferro, ligando uma delas numa bateria e a outra num galvanômetro (STORI, 2018, p. 5).

Esse efeito observado por Faraday era algo que ocorria no vácuo e acontecia com a participação de uma ação a distância, esse efeito intrigava Faraday, o que despertou a introduzir o conceito de linhas de força e também de campo magnético. Para Faraday, as linhas de campo estariam distribuídas no espaço e adquiriam a característica de quanto mais próxima maior a sua intensidade. Ele concluiu essas observações através de seus resultados experimentais (STORI, 2018, p. 6, apud RONAN, 1987, p. 226-241).

Faraday contribuiu de forma significativa para com seus trabalhos na época e para os dias atuais. Com seus experimentos, Faraday pôde comprovar a validade da corrente elétrica induzida e percebeu que está tinha seu percurso (sentido) variável, porém não conseguiu formular uma lei que explicasse com detalhe o fenômeno que indicasse o sentido.

(...) Num experimento típico para a indução de corrente numa espira, faz-se aproximar ou afastar um ímã da espira. Nota-se que ao inverter o sentido de movimento, há a inversão do sentido da corrente induzida na espira. Isto fez com que Heinrich Friedrich Emil Lenz (1804 – 1865) criasse uma regra, conhecida como Lei de Lenz. Essa lei estabelece o sentido da corrente induzida numa espira devido à variação de fluxo magnético, e para isso considera-se que o campo magnético induzido (B^{ind}) se opõe à variação de fluxo magnético imposta pela movimentação do ímã (REIS, 2018, p. 28).

Heinrich F. E. Lenz, físico Russo, foi o detentor da explicação da variabilidade do sentido da corrente. Repetindo o trabalho do Físico Faraday, ele observou que quando uma corrente elétrica é produzida por um campo magnético variável, o mesmo campo magnético produzido pela corrente elétrica se opõe ao campo magnético gerado pela corrente. Lenz determina o sentido do percurso da corrente elétrica que surge no circuito a partir da indução eletromagnética. Este resultado é devido à conservação da energia, e para que isso ocorresse certa quantidade de energia deveria ser usada, é considerado um pequeno trabalho para afastar ou até mesmo aproximar o ímã da espira.

5. O ELETROMAGNETISMO E MAXWELL

Nos anos posteriores às descobertas incríveis que vários cientistas fizeram sobre a eletricidade e o magnetismo, um físico e matemático chamado James Clark

Maxwell (1831 – 1879) obteve destaque em relação aos demais. No ano de 1873 ele conseguiu unificar todo o conhecimento já descoberto sobre a eletricidade, o magnetismo e também da óptica. Isso aconteceu até meados do século XIX. Maxwell unificou as equações primordiais que ficaram conhecidas como equações de Maxwell, as quatro equações que regem o eletromagnetismo foram escritas por Oliver Heaviside na notação vetorial, mas que adquirem o mesmo significado físico das outras equações sendo ditas auxiliares.

(...) As equações que levam o nome de Maxwell, ficaram assim conhecidas uma vez que foi ele quem as sintetizou, juntando todas as equações que descreviam a Eletricidade e o Magnetismo. Elas aparecem juntas pela primeira vez no artigo "A Teoria Dinâmica do Campo Eletromagnético" em 1864 num conjunto de 20 equações que Maxwell escreveu na forma de componentes. As quatro equações que regem o eletromagnetismo que conhecemos hoje foram escritas por Oliver Heaviside na notação vetorial, mas que apresentam o mesmo significado, onde as outras equações são ditas auxiliares (OLIVEIRA, 2015, p. 43).

As quatro equações fundamentais do eletromagnetismo possibilitam explicar todos os fenômenos eletromagnéticos, desde a condição de movimentação da agulha em uma bússola que aponta para o norte até o motivo de um carro "ligar" quando giramos a chave de ignição, ou seja, é a base para a explicação e o funcionamento de dispositivos eletromagnéticos. Maxwell deduziu que a carga elétrica vibrando iria produzir um campo magnético ao seu redor. O campo magnético será variável e, desta forma, induziria um campo elétrico também variável. A repetição desse fenômeno acarretou como resultado uma onda eletromagnética (figura 5) se propagando pelo espaço.

Conseqüentemente essas descobertas foram primordiais também para a explicação e a consolidação da natureza ondulatória da luz. Segundo Pietrocola (2010), A natureza da luz era palco para discussões e existências de controvérsias entre os cientistas: Newton e Huygens engastalhavam um duelo rígido sobre a real natureza da luz. Newton afirmava que a luz era constituída inteiramente de um feixe de partículas que tinham origem na fonte da luz. Huygens acreditava que a luz era na verdade uma perturbação que ocorria em um espaço preenchido por uma matéria sutil (Éter) no qual filósofos e ele acreditavam existir, isso era uma evidencia que já existia desde os escritos antigos de Platão.

Maxwell investigou a ideia de Faraday que tratava da relação entre eletricidade e magnetismo, no qual interpretou em termos de campo de força, e

começou a procurar uma explicação para a relação que existia entre as duas áreas. Maxwell percebeu que era simples e mostrou que elas são apenas duas expressões ou formas alternativas de explicar o mesmo fenômeno, conseguiu prever ondas magnéticas e elétricas se deslocando juntas no espaço com velocidade igual a c . Maxwell também concluiu que as luzes infravermelha, ultravioleta e outros tipos de onda possuíam a mesma natureza como ondas eletromagnéticas (SANTOS, 2009, pag. 18-19 apud BALCHIN, 2009, p. 244-245).

(...) Maxwell demonstrou matematicamente que estas forças elétricas e magnéticas não se originam das partículas agindo diretamente uma força sobre a outra; pelo contrário, cada carga e corrente elétrica cria um campo no espaço circundante que exerce uma força sobre a outra carga e corrente localizada nesse espaço. Ele (Maxwell) constatou que um mesmo campo transporta as forças elétricas e magnéticas; portanto constatou que ambos são aspectos inseparáveis da mesma força (SANTOS, 2009, p. 19).

Maxwell foi responsável por uma das descobertas mais brilhantes e importantes da Física ao conseguir calcular a velocidade das ondas eletromagnéticas no vácuo. Dessa forma, as teorias da óptica estão inteiramente contidas no mesmo conjunto de equações que compõe o eletromagnetismo, sem necessidade de uma nova teoria ou uma explicação separada. A parte mais importante das equações de Maxwell é que elas apresentavam uma maneira de detalhar como era o comportamento do campo magnético e também podia dar informações a respeito da velocidade com que o campo se propaga no espaço onde é inserido.

(BEM-DOV, 1996). Bibliograficamente, a certeza da hipótese da luz ter origem eletromagnética foi feita no ano de 1887, pelo físico alemão Heinrich Rudolf Hertz. A confirmação foi feita e verificada por um circuito, figura 6. Ou seja, essas ondas apresentam a característica de ser refletidas, refratadas e polarizadas da mesma forma que a luz.

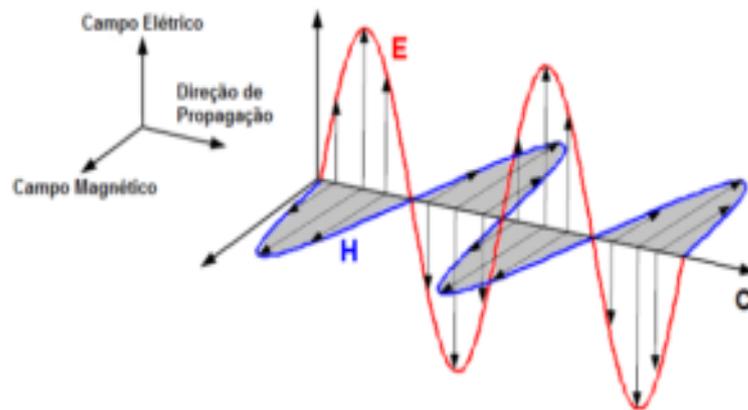


Figura 5. Representação Da Onda Eletromagnética

Fonte: Blog IPv7. Disponível em: < <https://www.blog.ipv7.com.br/tecnica/ondas-eletromagneticas-em-sistemas-de-radio/> > acesso em: 31 de dezembro de 2021.

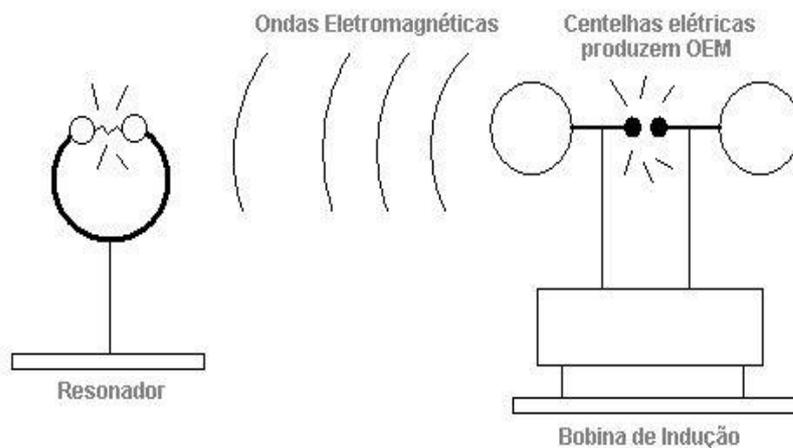


Figura 6. Experimento de Hertz

Fonte: Grupo Espirita São Miguel Arcanjo. Disponível em < http://gemarj.org/artigos/ga_30_11_06.htm > Acesso em 11 de março de 2022.

Maxwell teve êxito em unificar três áreas do conhecimento científico da sua época em apenas uma teoria, que pudesse explicar a natureza e o significado físico das ondas eletromagnéticas. Com o passar dessa revolução, no final do século XIX já era notório que todo o conhecimento a respeito do eletromagnetismo e da relatividade newtoniana já não possuía mais o que ser acrescentada e pareciam ter todo o aparato de explicar toda a Física. Historicamente, a mecânica de Newton é bem mais antiga e veio primeiro em relação ao eletromagnetismo (1600-1750), e a unificação da eletricidade e do magnetismo só foi possível no intervalo de tempo que vai de 1750 até 1900. Houve então a indagação a respeito da propagação das ondas. Ora se as ondas mecânicas precisam de um meio (meio mecânico) para se

propagar parecia óbvio que também era necessário existir um meio para possibilitar a propagação. Era necessário então a partir dessa nova abordagem, determinar o meio que fazia tal função de transporte.

5.1 O ELETROMAGNETISMO DE MAXWELL E A PROBLEMÁTICA COM A MECÂNICA NEWTONIANA

Foi descrito no tópico acima que as equações de Maxwell descreviam que as ondas eletromagnéticas se propagavam sem especificar o meio em que elas viajavam. Existiam duas opções, na primeira opção as ondas eletromagnéticas necessitavam de um meio de propagação como as ondas mecânicas e na segunda opção, as ondas eletromagnéticas se propagavam no vácuo. Isso gerou uma das maiores discussões científicas do século XIX. Naquela época, era difícil conceber ondas se propagando sem meio. Desse modo, foi iniciada a busca do meio que permitiam a propagação das ondas eletromagnéticas. Esse meio foi chamado de Éter. A priori, esse deveria apresentar algumas curiosidades. Esse meio deveria ser elástico, invisível e inodoro, algo ainda mais curioso sobre o Éter é que ele conseguia penetrar locais fechados, porém não era notado por nada SANTOS (2009, pag. 18-19 apud ZEILINGER, 2005).

Documentadamente, o Éter sempre existiu, pelo menos no que tangia o pensamento dos filósofos, como já foi discutido anteriormente, Aristóteles acreditava que o mundo tinha em sua composição de construção os quatro elementos de Empédocles: Terra, fogo, água e o ar. Após esses elementos, o Éter era o quinto, ele acreditava que foi o responsável pela existência de todos os corpos celestes, estando em movimento contínuo, e levando ao estado de movimento todos os planetas. A descrição do Éter de Aristóteles era naturalmente perfeita e incorruptível. A Concepção garantia a não existência do vácuo, teoricamente esse pensamento de Aristóteles foi aceito até a idade média OLIVEIRA (2015, p. 65 apud CAMPOS, 2014, p. 5).

De acordo com oliveira (2015, P.65) “O Éter de Aristóteles viria a falhar para as ondas eletromagnéticas” (APUD CHERMAN, 2005). No século XVII, a teoria do Éter Aristotélico teve sua importância cancelada, isso foi uma atribuição dos estudos dos discípulos de Galileu que acreditavam na existência do vácuo (vazio), eles buscaram produzir este vazio. No ano de 1643, Evangelista Torricelli fez uma

experiência com o tubo de vidro e o mercúrio, no qual fez produzir o vácuo. Outros físicos posteriormente também obtiveram hesito na produção do vácuo, a exemplo de Robert Boyle e Otto Von Guericke, e colocaram o Éter em desuso. Porém o Éter ressurgiria no cenário, isso devido à aceitação da natureza da luz ser uma onda. Essa ideia teve a consolidação por Augustin Fresnel (1788-1827) e por Thomas Young com os fenômenos de interferência em 1801; como já discutido, toda onda necessita de um meio para se propagar, no caso da luz, seria pelo Éter luminífero, esse composto foi proposto por Huygens. Após a determinação de que a luz seria um tipo de onda eletromagnética, houve a redução para um único meio de propagação desse tipo de onda, o Éter eletromagnético. (Oliveira, p. 66, 2015 apud Martins, 1993) “Até o final do século XIX, o Éter era considerado existente e amplamente aceito, o que faltava era comprovar como a Terra realizava seu ciclo viajando pelo Éter”.

5.2 A VARIÂNCIA DO ELETROMAGNETISMO E AS LEIS DE NEWTON

Ao considerar a situação sob o ponto de vista da Eletrodinâmica, que é a área da Física que estuda os fenômenos relacionados aos efeitos dos movimentos das cargas elétricas em determinados circuitos, devemos observar o que acontece quando aplicamos as transformações de Galileu (coordenadas) às equações de Maxwell. As aplicações das transformações de Galileu às equações de Maxwell as diferenciam das equações da mecânica. As equações da mecânica são invariantes às transformações de Galileu, mas o mesmo não acontece com as equações de Maxwell, pois essas não preservam a sua padronização quando submetidas a uma transformação de coordenadas, o que evidencia que o princípio da relatividade de Galileu não tem validade para o eletromagnetismo de Maxwell, demonstrando ser válida somente para as leis de Newton (RESNICK, 1971).

Para validar que a observação tem fundamento e que a teoria eletromagnética difere da mecânica, no que concernem as transformações de Galileu, podemos considerar um pulso de luz que se move no sentido da direita em relação ao meio no qual irá se propagar, com velocidade constante e igual a c . Consideraremos um sistema inercial S e este está vinculado ao meio de propagação no qual a velocidade da luz como já sabemos vele c , e S' será considerado o

sistema que está em movimento no mesmo sentido da direção do pulso de luz, porém este difere em velocidade apresentando notação u em relação ao sistema S .

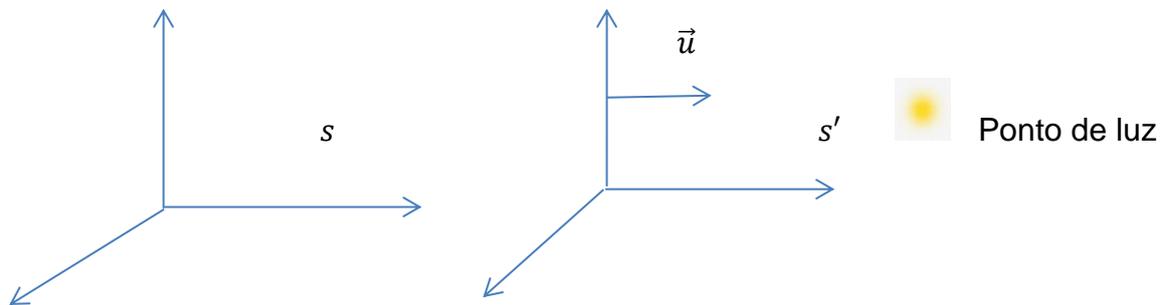


Figura 7 Observação do Ponto Luminoso; criação própria (2022). Fonte: Disponível em: < [HTTPS://toppng.com/ponto-de-luz-amarelo-PNG-free-PNG-Images_91930](https://toppng.com/ponto-de-luz-amarelo-PNG-free-PNG-Images_91930) > acesso em 05 de janeiro de 2022.

O observador que estivesse localizado no sistema s automaticamente teria que o valor da velocidade da luz seria exatamente igual a c , o observador que estivera situado no sistema s' mede outro valor para a velocidade c , que neste caso será $c' = c - u$ (lei galileana da composição de velocidade). Os observadores que estão em posições diferentes mediram valores também diferentes para a velocidade da luz. E no sistema S' se o movimento fosse contrário ao pulso luminoso teríamos uma velocidade $c' = c + u$ isso implica uma grande diferença.

Segundo Resnick (1971), se as transformações se aplicam realmente ao sistema de fenômenos óticos e eletromagnéticos, então existe um referencial inercial específico no qual somente neste referencial a velocidade da luz medida pode ser exatamente c , ou seja, existe um único sistema inercial chamado Éter que é um referencial privilegiado, também dito sistema de referência absoluto. Logicamente era necessário haver um modo de identificar o sistema absoluto e de determinar por experiências óticas, feitas em algum outro sistema, para saber qual a velocidade relativa em relação ao sistema absoluto. Podemos demonstrar através de evidências matemáticas que as equações de Maxwell não se conservam pelas transformações galileanas, mas as leis de Newton permanecem intactas, isso é observado quando há uma mudança de referencial inercial. De fato uma das consequências mais relevantes das equações de Maxwell é a demonstração que as ondas eletromagnéticas viajam no espaço-tempo com velocidade constante $c = 299.792.458$ m/s. Devido à dificuldade de demonstrar tal feito, é normal que isso seja feito focando diretamente sobre a equação de onda satisfeita pelo potencial

escalar e a variação sofrida sobre a ação das transformações de coordenadas. Partindo então das equações de onda do eletromagnetismo, essas equações são fundamentais para a evolução do campo eletromagnético e de suas ondas. A lei de indução de Faraday é dada na seguinte maneira.

Equação de Faraday para o eletromagnetismo:

$$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial(\vec{B})}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

Aplicando o operador rotacional na equação acima obtemos:

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right) &= 0 \rightarrow \nabla \times (\nabla \times \vec{E}) + \nabla \times \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \\ \nabla(\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E} + \frac{\partial(\nabla \times \vec{B})}{\partial t} &= 0, \end{aligned}$$

Na ausência de fontes de carga e corrente, temos: $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ e $\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$. Se usarmos esse resultado na expressão acima, obtêm-se.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (8)$$

A expressão que encontramos acima representa a equação de uma onda tridimensional para o campo elétrico.

A forma geral da equação de onda, considerando uma onda unidimensional, é da seguinte forma: $\frac{\partial^2 f}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} = 0$, v é a velocidade de propagação da onda.

Comparando a eq. (1.8), com a forma geral da equação de onda, obtemos a relação:

$$\frac{1}{v^2} = \mu_0 \epsilon_0 \rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \text{essa relação pode nos oferecer } v = 2,997925 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

v corresponde a velocidade da luz (c) no vácuo. O potencial escalar (ϕ) também pode satisfazer uma equação de onda.

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}, t) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \phi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0,$$

Podendo ser escrita da seguinte maneira.

$$\left(\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\partial^2}{\partial x^2} - \frac{\partial^2}{\partial y^2} - \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi(\vec{r}, t) = 0 \quad (9)$$

Fica claro que essa equação pode ser multiplicada por -1 sem alterar suas soluções. Vamos supor que esta equação de onda seja escrita por um observador que está em repouso em um sistema de referencia s que, por sua vez, está em repouso em relação ao Éter. Iremos submeter a equação às transformações de coordenadas de Galileu, com a intenção de mudar para um observador em repouso no referencial S' que se move com velocidade \vec{u} em relação ao sistema s .

$$\{x' = x - vt, y' = y, z' = z, t' = t \}.$$

A eq. 9 é uma diferencial parcial, então para escrevê-la em outro referencial é necessário antes escrever as derivas parciais, usando a regra da cadeia.

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial x'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial y'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial y'} + \frac{\partial z'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\partial t'}{\partial x} \frac{\partial}{\partial t'}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial x'}{\partial y} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial y'}{\partial y} \frac{\partial}{\partial y'} + \frac{\partial z'}{\partial y} \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\partial t'}{\partial y} \frac{\partial}{\partial t'}, \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial x'}{\partial z} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial y'}{\partial z} \frac{\partial}{\partial y'} + \frac{\partial z'}{\partial z} \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\partial t'}{\partial z} \frac{\partial}{\partial t'}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial x'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial x'} + \frac{\partial y'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial y'} + \frac{\partial z'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial z'} + \frac{\partial t'}{\partial t} \frac{\partial}{\partial t'}. \quad (13)$$

Tendo em vista que

$$\frac{\partial y'}{\partial x} = \frac{\partial z'}{\partial x} = \frac{\partial t'}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial x'}{\partial y} = \frac{\partial z'}{\partial y} = \frac{\partial t'}{\partial y} = 0 \text{ e } \frac{\partial x'}{\partial z} = \frac{\partial y'}{\partial z} = \frac{\partial t'}{\partial z} = 0,$$

Obtemos o resultado:

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x'}, \quad \frac{\partial}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y'}, \quad \frac{\partial}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z'}, \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t'} - u \frac{\partial}{\partial x'}.$$

O resultado implica que:

$$\frac{\partial}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x'^2}, \quad \frac{\partial}{\partial y^2} = \frac{\partial}{\partial y'^2}, \quad \frac{\partial}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z'^2}, \quad \frac{\partial}{\partial t^2} = \frac{\partial}{\partial t'^2} - 2u \frac{\partial^2}{\partial x' \partial t'} + u^2 \frac{\partial^2}{\partial x'^2}. \quad (14)$$

Fazendo a substituição do conjunto de eq. (14) na equação de onda eq. (9).

$$\left[\frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial^2}{\partial t'^2} - 2u \frac{\partial^2}{\partial t' \partial x'} + u^2 \frac{\partial^2}{\partial x'^2} \right) - \frac{\partial^2}{\partial x'^2} - \frac{\partial^2}{\partial y'^2} - \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right] \phi(\vec{r}, t) = 0,$$

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} - \frac{2u}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t' \partial x'} - \left(1 - \frac{u^2}{c^2} \right) \frac{\partial^2}{\partial x'^2} - \frac{\partial^2}{\partial y'^2} - \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right] \phi(\vec{r}, t) = 0.$$

Ao usar o fator de Lorentz $\gamma^2 = \frac{1}{1 - u^2/c^2}$, para a equação obtemos a Eq. 15.

$$\left[\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t'^2} - \frac{2u}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t' \partial x'} - \frac{1}{\gamma^2} \frac{\partial^2}{\partial x'^2} - \frac{\partial^2}{\partial y'^2} - \frac{\partial^2}{\partial z'^2} \right] \phi(\vec{r}, t) = 0 \quad (15)$$

Essa Eq. 15 corresponde à equação de onda para o potencial escalar observada no referencial s' . É totalmente diferente, em sua forma, da equação primordial, que é válida no Sistema s' . Logicamente, ocorre uma mudança significativa no comportamento físico, e isso é uma discordância perante a relatividade clássica.

De acordo com Resnick 1971, existiriam três possibilidades teóricas para a validade do fenômeno descrito.

- (...) a) Um princípio da relatividade existe para a Mecânica Clássica, mas não para o Eletromagnetismo Clássico; existe um sistema inercial privilegiado (Éter) onde as leis de Maxwell são válidas na sua forma usual e a velocidade da luz vale exatamente c .
- b) Um princípio da relatividade existe tanto para a Mecânica Clássica como para o Eletromagnetismo Clássico, mas as leis do Eletromagnetismo, como são dadas por Maxwell, não são corretas, pois não permanecem invariantes perante as transformações de coordenada de Galileu.
- c) Um princípio da relatividade (diferente do de Galileu) existe tanto para a Mecânica Clássica como para o Eletromagnetismo Clássico, porém as leis da Mecânica enunciadas por Newton e as transformações de Galileu não são corretas. Neste caso, uma nova mecânica, diferente da newtoniana,

compatível com o novo princípio da relatividade, deveria ser formulada e testada (RESNICK, 1971, p. 20-21).

A primeira possibilidade explica que pode existir uma relatividade especial para a mecânica, porém para a eletrodinâmica existe um referencial inercial privilegiado, o sistema do Éter. A surpresa é: que se isso estivesse realmente de acordo, as transformações de coordenadas de Galileu seriam também aplicáveis, o que de fato seria possível localizar de forma experimental o sistema do Éter. Na segunda possibilidade Resnick (1971) explica que um princípio de relatividade deve existir para ambos os sistemas, no entanto, as leis encontradas por Maxwell não são corretas. Em sua análise, se a segunda alternativa fosse correta, poderíamos executar experiências na eletrodinâmica onde notaríamos a necessidade de reformular as leis que regem o eletromagnetismo. Essas novas equações deveriam ser invariantes com relação às transformações de Galileu. Na terceira possibilidade, Resnick (1971) infere que um princípio da relatividade (diferente da de Galileu) pode existir para a mecânica como para o eletromagnetismo, somente havendo a discrepância de que as leis da mecânica enunciadas por Newton e as transformações de Galileu ficam incorretas. Dessa maneira uma nova teoria de relatividade deveria ser descrita e testada para ser compatível com a nova observação de fenômeno. Esta terceira possibilidade era a menos crível, devido ao patrimônio de conhecimento Newtoniano. Veremos que essa era a opção correta e sua aceitação resultou no surgimento da relatividade de Einstein.

5.3 A BUSCA PELO ÉTER LUMINÍFERO

Historicamente, esse dilema começou pela aceitação do Éter, considerado o sistema de referencial privilegiado. O Éter teve a sua importância até o final do século XIX, era considerado um fluido translúcido, e que preenchia todos os espaços, não possuía peso e era o meio que as ondas eletromagnéticas usavam para se propagarem. Dessa forma, a detecção do Éter era uma necessidade.

(...) Até o final do séc. XIX acreditava-se piamente na existência do Éter luminífero, fluido translúcido, sem peso, que preencheria os espaços vazios existentes tanto entre os átomos quanto entre os corpos celestes, e que serviria como o meio de propagação das ondas eletromagnéticas, assim como o ar é o meio mecânico que permite a propagação das ondas sonoras (PONCZEK, 2009, p. 352).

De acordo com Swenson, (1972) conforme foi citado por Martins, (2012, p. 54), a busca pelo Éter durou séculos e não terminou com os experimentos de Michelson 1881 e logo depois Morley 1887. Historicamente, houve muitas tentativas de medir a velocidade da Terra através do Éter antes do experimento de Michelson-Morley.

Compreender esse experimento é fundamental para que se possa compreender o contexto histórico de alguns fatos que precederam a teoria da relatividade. Nesta parte do trabalho quero destacar a participação da contribuição e esclarecimentos de aspectos da óptica no estudo dos corpos em movimento, muito antes dos experimentos mais relevantes para a teoria da relatividade “Michelson-Morley”.

6. ABERRAÇÃO ESTELAR

Iniciando pela ideia de Stewart (1964, p. 100-107) como citou Martins, (2012 p.56), os copernicanos defendiam que a Terra gira ao redor do sol, e é o que acreditamos até hoje por ser válido. Devido a esse acontecimento natural, efeitos desse movimento deveriam aparecer. Exemplo de paralaxe estelar, no qual em distintas épocas do ano, estariam sendo observadas as estrelas de vários lugares da Terra em sua orbita natural, isso iria produzir algumas mudanças de ângulos em suas posições.

RESNICK (1971) as primeiras observações da aberração estelar partiram do principio da observação de paralaxe feita por James Bradley no ano de 1725. Nesta época a busca dos astrônomos era provar com a paralaxe e se isso fosse verdadeiro seria uma prova de confirmar o modelo heliocêntrico de Nicolau Copérnico, que até então não havia sido confirmado.

Durante muitos meses de observações, o que aconteceu foi a variação da posição estelar, porém a direção desse deslocamento estelar não ocorreu como era esperado. No ano de 1727, Bradley, explicou o fenômeno. A explicação foi “um efeito devido ao movimento da Terra, mas que não ocorria devido à mudança de posição do observador, isso era um efeito mútuo da velocidade da Terra, que

passou a ser conhecido por aberração” (MARTINS, 2012, p. 56 apud PEDERSEN, 1980).

Na época e até o final do século XVIII, o modelo vigente de constituição da luz era o corpuscular. Bradley apresentou então uma explicação para o efeito da aberração baseada na característica corpuscular da luz. “a direção aparente da luz em cada momento poderia ser dada pela velocidade resultante dos corpúsculos, isso seria o fruto da soma da velocidade da luz menos a velocidade da Terra”. A aberração estelar pode ser entendida também em termos de teoria ondulatória da luz, com a ressalva de que o Éter seja considerado parado no espaço. Devemos a partir de esse momento discutir qual a relação da aberração estelar com o Éter no espaço e seu possível deslocamento pelos corpos. No caso, a velocidade resultante da luz em relação ao observador que está na Terra, é fornecida como uma soma galileana da velocidade da própria luz relativa ao Éter, e com a velocidade da Terra através do Éter MILLER (1981).

Desde a descoberta de Bradley no século XVIII, a aberração estelar teve sua confirmação por diversos astrônomos sendo medida e verificada. E o Éter e a sua possível problemática do arrastamento pelos corpos de massa extrema? Uma análise concreta é que se o Éter fosse realmente arrastado pela Terra, a Terra estaria parada com relação ao mesmo e de fato a velocidade da luz seria medida como c e, de fato, não haveria o fenômeno de aberração estelar. Como já observamos, no caso da velocidade da Terra relativa ao Éter ser nula, logicamente não era preciso fazer a composição de velocidades e um telescópio não precisaria ser colocado inclinado, para observar estrelas. Vale lembrar aqui, que a aberração estelar existe, porém ela não é compatível com a existência do Éter como um referencial. Isso não foi o suficiente para descrever e ver se o Éter realmente existia. No ano de 1804, Young, fez uma analogia para a resposta de Huygens a respeito da teoria corpuscular.

(...) Considerando-se o fenômeno da aberração das estrelas, eu estou pronto a acreditar que o Éter luminoso penetra a substância de todo corpo material com pouca ou nenhuma resistência, talvez tão livre quanto o vento passe através de um bosque de árvores (PIETROCOLA, 1993, p.161 apud YOUNG, 1804,).

Segundo Pietrocola (1993) é válido frisar que a grande separação de tempo entre as observações de Bradley no ano de 1728 e a interpretação de Young 1804, dentro da perspectiva ondulatória deve-se ao fato de esse período ser considerado

praticamente um período de difícil expressão dos trabalhos em óptica elaborados dentro da lógica de Huygens. Os trabalhos de Young foram duramente criticados, pois o cenário que dominava na época era da teoria corpuscular da luz.

6.1 O EXPERIMENTO DE DOMINIQUE ARAGO

No ano de 1809, Dominique Arago (1786 – 1853) executou um experimento sobre a deflexão da luz provinda de estrelas ao passarem por de um prisma, este buscava medir algum resultado encontrado do movimento terrestre analisando o ângulo de refração que formariam quando a luz advinda das estrelas passasse pelo prisma fixado na superfície da Terra. (MARTINS, 2012, p. 59 apud, OLIVEIRA, 1993).

Ele se baseava em pressupostos: considerou que a velocidade da luz, dentro de um prisma, seria sempre a mesma, independentemente do movimento que a Terra fizesse, porém exterior ao prisma essa velocidade era maior ou menor caso a Terra estivesse chegando perto da estrela ou se afastando de uma estrela, respectivamente. O desvio da luz quando penetra no Prisma ou meio transparente, este depende exclusivamente da velocidade que a luz, ao mudar de meio circundante. Arago raciocinou que este desvio que a luz sofria poderia resultar do movimento terrestre em relação aos pontos brilhantes, (estrelas). Tal feito poderia medir a velocidade da Terra em relação às estrelas e não violaria a teoria da Relatividade. No entanto, ao proceder do experimento, o resultado esperado de medir essa variação, não foi concretizado, Martins (2012).

A instrumentação de Arago foi feita de acordo com Pietrocola (1993), da seguinte forma:

(...) Para instrumentalizar essa verificação, Arago vale-se do fato que o movimento da Terra podia ser composta com a velocidade da luz para produzir variações na velocidade relativa medida num prisma terrestre. O movimento de translação possuindo a maior velocidade que se podia obter produziria efeitos experimentais da ordem de 10^{-4} (v/c). Segundo Arago, essa variação apesar de pequena poderia ser detectada pelos aparelhos da época, e mostraria de maneira indiscutível se uma variação na velocidade da luz medida sobre um prisma produziria modificação nos desvios da mesma (PIETROCOLA, 1993, p. 102).

Os experimentos foram o ápice para a revelação de um ponto fraco na teoria corpuscular, nas situações onde podia existir uma importante influência do movimento dos corpos ditos ponderáveis, isto é, a matéria que não podemos tocar, ou seja, o caso do fenômeno da aberração das estrelas e da experiência já executada por Arago, essa teoria não foi capaz de fornecer uma interpretação para o real comportamento da luz. Esse problema não foi o suficiente para anular a visão que se tinha da característica da luz proposta por Newton, contudo foi o necessário para abrir uma brecha na credibilidade já depositada em tal teoria Pietrocola (2012).

Isso foi necessário para que Fresnel tivesse a oportunidade de poder explicar esse mesmo seguimento de resultados, agora dentro da visão que ganhava força, a teoria ondulatória da luz, dessa forma promovendo um avanço para a teoria de Huygens, que já havia sido discutida.

(...) Nas duas primeiras décadas do século XIX estava acontecendo uma mudança nas teorias sobre a natureza da luz. Embora, até o fim do século XVIII, quase todos os físicos aceitassem a teoria corpuscular, começaram a surgir no início do século XIX importantes evidências favoráveis à hipótese ondulatória. Os principais responsáveis por essa mudança foram Thomas Young e Augustin Jean Fresnel (1788-1827) (MARTINS, 1994, 2003, 2008).

A importância da teoria de Fresnel, no século XIX, está relacionada tanto com a questão da aberração estelar e natureza da luz, quanto com a relação de matéria ponderável com o Éter, e o possível arrastamento. A teoria de Fresnel teve notoriedade ao propor que o Éter seria arrastado de forma parcial pelos meios físicos transparentes “um prisma” obtendo êxito ao conciliar a teoria ondulatória da luz com já observada aberração da luz e o experimento de Arago.

(...) Aparentemente a explicação dos fenômenos de aberração e o resultado da experiência de Arago de 1810 necessitavam de suposições opostas sobre a relação entre Éter e matéria: o resultado experimental de Arago em 1810 parecia reclamar um Éter fixo à superfície da Terra, enquanto que a interpretação da aberração das estrelas devia ser interpretada através da hipótese que propunha a independência entre Éter e os corpos materiais (PIETROCOLA, 1993, p. 164).

Fresnel supôs que o Éter conseguia preencher todos os espaços vazios do universo. O Éter não seria movido pelo que passasse por ele, a Terra por exemplo. E nestas regiões a luz propagava-se como ondas no Éter que estava parado. Então é normal que haja uma interação entre o Éter e os corpos transparentes. Considerando que a luz é realmente uma onda do Éter, e se a velocidade da luz é

bem menor dentro dos corpos transparente (defesa dos que acreditavam na teoria ondulatória da luz), o Éter deveria apresentar características diferentes fora do prisma Martins (2008).

Fresnel realizou experimentos de difração da luz das estrelas na água, também repetiu e analisou os resultados do experimento de Arago. Ele calculou detalhadamente o que acontecia quando a luz penetrava na água (no caso o telescópio cheio de água) ou no prisma. Em ambos os casos nenhum, efeito foi observado e, ao final de tudo, não foi possível observar nenhum efeito relacionado ao movimento da Terra em relação ao Éter.

(...) Os cálculos feitos por Fresnel são altamente complicados e, em vários pontos, ele fez uma simplificação: levou em conta apenas termos em que aparecia a razão entre a velocidade da Terra e a velocidade da luz (v/c) elevada à primeira potência e desprezou termos de segunda ordem $(v/c)^2$ ou de ordens superiores. Ou seja: a teoria de Fresnel é uma teoria de primeira ordem em v/c (MARTINS, 1994, 2003, 2008).

No limite das análises feitas por Fresnel, como já foi exposto acima, nenhum efeito do movimento da Terra através do Éter foi detectado. Para ele, esse resultado foi totalmente inesperado devido à suposição do que esperava acontecer. No caso, se o Éter realmente existisse, e se a luz fosse uma onda que necessitasse do meio Éter para deslocar-se, era plausível que fenômenos óticos pudessem revelar os efeitos do movimento da Terra através do Éter (MARTINS, 1994).

6.2 JACQUES BABINET E SEU EXPERIMENTO

Jacques Babinet (1784-1872) fez um experimento considerado de primeira ordem, ou seja, mostrariam resultados à primeira potencia da velocidade da terra através do Éter. Este compararia pelo método chamado interferométrico, quando a luz passasse pelo bloco de vidro no caso em que a luz se movesse no sentido que a Terra estivesse se movendo ou no contrário deste movimento. Uma análise quantitativa do ocorrido, expressada pela teoria ondulatória deveria surgir algum resultado que de alguma forma poderia ser medido. Nenhum efeito pode ser notado. Babinet não usou a teoria de Fresnel ao seu experimento, mas já era possível estimar que devido ao arrastamento do Éter pelo vidro, não poderia aparecer efeito algum, conseqüente o efeito teria que ser nulo (MARTINS, 2008).

De acordo com Pietrocola (1993), Babinet procurava evidenciar os efeitos do movimento da Terra através do Éter, utilizando o fenômeno de difração. Em uma carta depositada na *Academia de ciências de Paris* ele enfatiza determinar o movimento próprio da Terra. Babinet declarava em suas palavras que:

(...) Encontrando no desvio produzido pelas redes (de difração) um desvio constante que desse agora tornará sensível o deslocamento do micrômetro e o movimento da Terra no espaço qualquer que seja a natureza desse movimento (BABINET, 1862, p. 2).

Em seu raciocínio quando os fenômenos estudados envolviam efeitos de aberração, reflexão e aberração da luz, não se poderia medir o movimento da Terra por compensação de efeitos que surgiam. Diferentemente da deflexão da luz por rede de difração que é um fenômeno físico considerado diferente e independente dos outros e não deveria ocorrer compensação (UCHÔA, 2013).

PIETROCOLA (1993) mediu as variações na difração da luz, para Babinet, através de uma rede de difração em movimento com a Terra era apenas um meio de evidenciar o movimento da Terra em relação ao Éter, que para Babinet estaria totalmente imóvel em relação às estrelas paradas. Para Babinet e para vários outros homens o estudo do Éter na sua época, estava visionado para o desenvolvimento da astronomia. Tal influência do movimento sobre a propagação da luz seria um meio de manifestar o movimento terrestre em relação às estrelas, resultando uma extrema importância para a astronomia.

6.3 STOKES E O ÉTER VISCOSO

O experimento de Fresnel ganhou destaque por conseguir explicar o resultado de alguns experimentos, mas a teoria era considerada extremamente complicada. No ano de 1845, Gabriel Stokes, decidiu propor teoria nova, essa considerada simples em relação a de Fresnel em vários âmbitos.(MARTINS, p.62, 2012 apud SWENSON, 1972).

(...) A teoria de Stokes propunha que o Éter seria semelhante a um líquido viscoso, que aderiria à superfície dos corpos, sendo quase totalmente arrastado pela Terra, ficando em repouso em relação a ela na região próxima ao solo. Tal arrastamento faz com que qualquer experimento óptico puramente terrestre independa do movimento da Terra, o que explica de

forma direta e simples o resultado nulo dos experimentos de Boscovich, Arago e Babinet (MARTINS, 2008, p. 14).

Stokes acreditava que o Éter era como um líquido com certa viscosidade e que aderiria a superfície dos objetos, e sendo arrastado pela Terra, de acordo com isso, o Éter ficava em repouso em relação a Terra na região onde fosse próximo ao solo. O arrastamento fazia com que os experimentos em que a óptica estivesse participando não fazia parte do movimento da Terra, ou seja, a óptica não tinha uma ligação com o movimento terrestre. Partindo dessa ideia, considerada simples e direta, ela conseguiria explicar os resultados negativos dos demais pensadores que estavam ligados a descobrir o Éter luminífero.

Então, por que isso não tivera sido pensado antes? Uma resposta para isso é que anteriormente acreditava-se que a teoria que pregasse que o Éter era arrastado pela Terra não teria a capacidade de explicar o fenômeno de aberração estelar. Esse raciocínio usado é explicado da seguinte maneira: se a Terra realmente arrastasse o Éter em seu alcance, os fenômenos ópticos que ocorriam próximos ao corpo celeste, a Terra e também um telescópio, iriam apresentar um comportamento de estática, ou seja, nenhum movimento, e, por conseguinte, a aberração estelar não poderia ser observada. Esse raciocínio é bastante errôneo e estranho.

No entanto, Stokes em sua teoria explicou que seria sim possível explicar o fenômeno de aberração estelar, MARTINS et al. (2012). Mostrando que existiria uma progressiva alteração da direção da luz conforme ela atravessando camadas de Éter com velocidades diferentes. Dessa forma, Stokes conseguiu transparecer que essa teoria era de acordo e findava poria fim a todos os fenômenos até então conhecidos.

Stokes mesmo tendo apresentado uma nova perspectiva para o Éter, ele mesmo considerou que Fresnel possuía uma teoria respeitosa e de grande valia, pois explicava os experimentos anteriormente feitos por Arago e também o resultado nulo do experimento da água junto com o telescópio, a sua teoria do arrastamento do Éter poderia também explicar o fenômeno de interferência do experimento feito por Babinet. Nesse caso e de muitos outros, um cunho qualitativo muito complexo está envolvido. No ano de 1846, o próprio Stokes generaliza uma ideia para os resultados que obtivera, ainda que a Terra realize o movimento através do Éter e a

luz seja transmitida através do Éter, os fenômenos ópticos como a reflexão, refração e a propagação, não dá a permissão de detectar esse movimento” (STOKES, 1966).

6.4 FIZEAU E FRESNEL

No ano de 1850, Jean-Bernard-leon (1819 – 1869) e então Armand-Hippolyte-louys Fizeau (1819 – 1896) deram os primeiros passos para medir a velocidade da luz, usando diferentes métodos, estes apresentaram resultados não invariantes. Foucault obteve êxito em medir a velocidade da luz no meio líquido, mostrando também que a luz possuía uma diferente velocidade quando mudava de meio, dessa forma, havia confirmado a teoria ondulatória. No ano de 1851, Fizeau, com a ajuda de Foucault, realizaram um experimento, o objetivo era observar a teoria de Fresnel. Martins et al. (2012). O experimento tinha a finalidade de medir as consequências do arrastamento da luz por meio de um meio que não poderia ser visto (transparente).

Fizeau estava destinado a testar a hipótese do arrastamento do Éter pelos corpos em movimento.

(...) No ano seguinte (1851), Fizeau fez um experimento destinado a testar a hipótese do arrastamento do Éter pelos corpos em movimento. O princípio básico do experimento era fazer a luz atravessar um tubo com água em movimento, e medir a velocidade da luz nos dois sentidos, para ver se existia o arrastamento parcial da luz previsto por Fresnel. No entanto, como a variação prevista para a velocidade da luz era muito pequena, seria impossível fazer as medidas e compará-las diretamente. Assim, Fizeau elaborou uma aparelhagem que permitia comparar as velocidades nos dois sentidos através de um fenômeno de interferência, sem precisar medir efetivamente as duas velocidades (MARTINS, 1994, 2003, 2008).

O experimento tinha como princípio básico fazer a luz atravessar um tubo preenchido com água e em movimento, a atividade era medir a velocidade nos dois sentidos, com isso ele supôs que poderia ser observado o possível arrastamento da luz como fora previsto por Fresnel. A variação que era prevista para a velocidade da luz era quantitativamente muito pequena, o que seria muito difícil fazer as medidas e comparações.

Fizeau então elaborou um aparelho que facilitasse comparar as velocidades nos dois sentidos através do fenômeno de interferência, sem a necessidade de medi-las. Podemos acompanhar o sistema utilizado por Fizeau através da figura 8. No experimento uma corrente de água percorre um tubo em U, e os dois feixes

passam livremente pela água, em sentido contrário. Logo depois os dois feixes são reunidos e obtém-se a interferência.

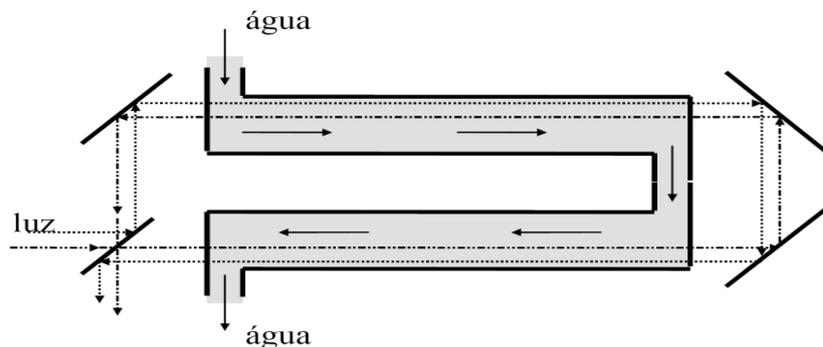


Figura 8. Experimento de Fizeau

Fonte: O Éter E A Óptica Dos Corpos Em Movimento: A Teoria De Fresnel E As Tentativas De Detecção Do Movimento Da Terra, Antes Dos Experimentos De Michelson E Morley (1818-1880). < <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29n1p52> > acesso em 24 de janeiro de 2022.

Um feixe de luz, no caso monocromático, foi dividido antes de entrar no aparelho, e cada uma de suas metades percorrem o mesmo trajeto dentro do líquido, no entanto, em sentidos contrários. O esperado era que se um feixe de luz tem o mesmo sentido da água, então essa deveria ter uma velocidade maior, de acordo com a teoria de Fresnel, e o outro feixe, estando no outro sentido deveria ter uma velocidade menor.

De acordo com Martins (2012), o experimento era uma observação detalhada do fenômeno. No caso, primeiramente ele deveria analisar a interferência entre os dois feixes com a água parada, e depois a água em movimento, e se investigava se ocorria o deslocamento das franjas de interferência. Então duas possibilidades surgiam: se a teoria fosse correta, haveria um deslocamento das franjas de interferência que poderia ser achado, no entanto, se estivesse errada, efeito nenhum não ocorreria. O resultado experimental foi um deslocamento de 0,23 franjas, confirmando assim a teoria. Eis então a confirmação a previsão da teoria, o resultado mostra o efeito fora entendido como devido ao arrastamento parcial do Éter pelo meio líquido (SELLERI, 2002).

(...) O experimento de Fizeau proporcionou uma impressionante confirmação da teoria de arrastamento do Éter, de Fresnel. Como a teoria do Éter de Stokes não previa o fenômeno observado, ela foi deixada de lado por quase todos os físicos, a partir desse momento. Parecia, portanto, que tudo estava claro, em meados do século XIX: a luz era realmente uma onda

do Éter, e o Éter se comportava, nos corpos transparentes, exatamente como Fresnel havia previsto (MARTINS, 1994, 2003, 2008).

O experimento de Fizeau foi muito importante e impressionou a todos os cientistas da época. Ele proporcionou uma pseudoconfirmação do arrastamento do Éter, teoria de Fresnel. Parecia que tudo estava se elucidando no século XIX: a luz era uma onda do Éter, e este se comportava, nos meios transparentes de acordo como Fresnel havia pensado, ou seja, se um meio transparente estiver se movendo no Éter, este arrasta também a própria luz.

6.5 O MOVIMENTO DA TERRA EM RELAÇÃO AO ÉTER

De acordo com a teoria de Fresnel, o Éter poderia existir, então, Fizeau se dedicou a tentar outras maneiras experimentais que pudessem evidenciar os efeitos da velocidade da Terra com relação ao Éter (MARTINS, 2012, p. 65 apud FIZEAU, 1854; ACLOQUE, 1884). No ano de 1859, Fizeau após observar os resultados de um de seus experimentos, afirmou que obtivera resultados convincentes.

(...) O experimento, difícil de ser descrito, envolvia a observação da rotação do plano de polarização da luz ao passar por uma pilha de placas de vidro inclinadas em relação ao feixe incidente. A própria previsão quantitativa do fenômeno era difícil. Fizeau previu, para seu arranjo, que haveria um efeito total de aproximadamente 2° , e que o efeito mudaria quando a aparelhagem mudasse de posição pela própria rotação da Terra em torno do seu eixo. Fazendo um total de 2.000 observações, notou efeitos sistemáticos bastante regulares, que variaram entre 1,3 o e 2,6 o, estando, portanto, próximos ao efeito esperado (MARTINS, 2012, p. 65).

Para Martins (2008), o experimento era considerado difícil, e este deveria envolver a observação da rotação de polarização da luz à medida que esta passava por um sistema de pilhas de placas de vidro, o vidro era inclinado em relação ao feixe de luz que incidia. A previsão do resultado era considerada difícil. Em sua previsão, ele concluía que haveria um possível resultado de 2° , este efeito iria mudar quando fizesse a mudança do objeto (da aparelhagem). Numa contagem de 2.000 observações, os valores variavam em uma numeração que era considerada o próximo do ideal. MARTINS (2012) acrescenta que outros cientistas procuraram detectar o movimento terrestre ao passar pelo Éter, usando métodos diferentes. Com a singularidade de já era esperado encontrar resultados nulos para

experimentos que envolviam em especial a reflexão, aberração, e a refração, procuraram buscar respostas com outros tipos.

Para a época, o resultado encontrado por Fizeau era motivo para outros cientistas também procurarem medir os efeitos do movimento onde estavam envolvidos os fenômenos luminosos. Em meados do século XIX, sugeriu Babinet que, possivelmente, o desvio que a luz viesse sofrer por uma rede de difração pudesse clarear e trazer uma evidencia para o movimento da Terra (MARTINS, 2012, p. 65 apud BABINET, 1862).

(...) O objetivo de Babinet, claramente indicado na carta depositada na Academia de Ciências de Paris 28, era determinar o movimento "próprio" da Terra através da observação de efeitos desse movimento em fenômenos onde as compensações existentes na refração não se manifestassem (PIETROCOLA, 2016, p.8).

PIETROCOLA (2016) enfatiza que o seu objetivo era demonstrar o movimento próprio da Terra, porém as observações desses efeitos deveriam ser feitas sem que a refração se envolvesse. No ano de 1864, o famoso espectroscopista Anders Jonas Angstrom, publicou os resultados das medidas, já que Babinet não realizou o experimento, mas previa o que deveria a vir acontecer (Martins, 2012 apud Angstrom, 1864).

(...) Ela foi materializada por Angström em 1864 e seus resultados pareceram confirmar as previsões de Babinet, indicando um efeito do movimento terrestre sobre os raios difratados. Com essa experiência, o movimento "próprio" da Terra (como era referido em alguns textos da época) parecia ter sido determinado. Nesse contexto as leis da óptica não respeitavam o princípio de Relatividade Física, apresentando resultados diferentes em função da orientação que o sistema experimental assumisse em relação ao movimento terrestre (PIETROCOLA, 2016, p. 9).

As leis da óptica divergiam, e não respeitavam os mesmos princípios estabelecidos da Física quando estes assumiam uma orientação diferente em relação ao movimento da Terra. Uma serie de experimentos delicados que haviam galhardo resultados bem elaborados, dessa forma bons motivos existiam para acreditar na teoria de Fresnel, na época. A notória participação de James Clerk Maxwell também não pode passar despercebida já que, além dos seus trabalhos sobre o eletromagnetismo ele investigou também experimentalmente os trabalhos e queria saber se o movimento da Terra afetaria a luz quando esta passasse por um prisma, e mais uma vez como resultado, a nulidade, isso não é de se espantar,

como já vimos isso aconteceu com o experimento de Arago décadas passadas MARTINS (2012).

No ano de 1861, Lorenzo Respighi (1824-1889) realizou uma experiência de aberração. Ele observou uma fonte de luz através do telescópio completo de água. No que tange a teoria de Fresnel, o fenômeno da aberração não deveria sobrevir. O que Respighi detectou foi apenas pequenos afastamentos que apresentavam leve perturbação na direção da fonte de luz. Esses resultados confirmaram as ideias de Fresnel (Martins, 2012 apud RESPIGHI, 1861).

KLINKERFUES (2016), outra experiência realizada pelo então astrônomo Ernest Friedrich Wilhelm Klinkerfues datada em 1867, propôs uma interpretação contrária ao que Fresnel acreditava.

(...) realizou a experiência de aberração astronômica com o telescópio contendo o tubo cheio d'água. Antecipou que, se não ocorresse o cancelamento dos efeitos previstos pela teoria de Fresnel, deveria ser observada uma variação de 8" de arco na ascensão reta de certas estrelas, e afirmou ter observado efeitos de aproximadamente 7", contrários à teoria de Fresnel (MARTINS, 2012, p.66).

Em sua discussão, klinkerfues colocou em pauta o os efeitos seriam cancelados, como já previstos, deveria então ser observadas uma variação numérica estipulada, no seu experimento ele afirmou ter encontrado 7" um valor abaixo do que o previsto, e contrariou a teoria de Fresnel.

Complementa MATINS (2012, p. 66), tempos depois, Martinus Hoek realizou dois experimentos que apresentaram valores considerados favoráveis à teoria de Fresnel. A primeira foi feita no ano de 1868, e foi semelhante ao de Babinet, e suas observações concordaram no resultado nulo. Logo no ano seguinte, mais uma vez ele realizou o experimento do telescópio com água, e aceitou que existe o arrastamento do Éter, também como fora previsto por Fresnel, (apud HOEK, 1868; 1869 et al. p. 180-185, 443-450).

O astrônomo, George Biddell Airy, secundou o feito de Klinkerfues (aberração), utilizando também um telescópio preenchido com água, em sua medida da declinação da estrela Delta de Draco no intervalo de seis meses. Contrariando a afirmação de Klinkerfues, ele concluiu que a aberração estelar seria a mesma, essa sendo medida com água ou não (MARTINS, 2012, p. 66 apud AYRI, 1872). Um fato

importante em relação ao ato científico é a confirmação dos fenômenos através das observações e medições. Essas confirmações requerem muito tempo e dedicação.

7. MAXWELL E SUA CONTRIBUIÇÃO

A relatividade, na óptica ondulatória, é muito desafiadora no sentido de complexidade do que na mecânica, pois é impossível encontrar o movimento relativo a Terra e o Éter responsável por ser o transmissor da luz no meio invisível (MARTINS, 2012).

No ano de 1878, o físico J. C Maxwell, viera a publicar novos métodos de experiência para determinar a velocidade da Terra através do Éter. Esse método era baseado na ideia de medir o tempo que a luz levaria para percorrer a ida e vinda entre dois pontos, o deslocamento da luz deveria ter direções paralelas e perpendiculares à direção da qual a Terra movia-se.

(...) Maxwell concluiu: “Se fosse possível determinar a velocidade da luz observando o tempo que ela gasta para ir de uma estação até outra sobre a superfície da Terra, poderíamos, comparando as velocidades observadas em direções opostas, determinar a velocidade do Éter com relação a essas duas estações terrestres” (MARTINS, 2008, 2012).

É extremamente difícil conceber esse método porque a luz é muito rápida. Considerando eventos de segunda ordem em v/c , ou seja, da ordem 10^{-8} . Essas condições eram extremamente difíceis de medir naquela época. Como foi feito tal observação? Martins (2008), usando métodos desenvolvidos anteriormente por Foucault e Fizeau, usava espelhos para refletir a luz fazendo-a percorrer certa distância em caminho de ida e volta a conclusão: se existisse um “vento de Éter”, entre a fonte e o espelho isso acarretaria numa diferença, sendo a velocidade da luz maior em um sentido e menor no outro.

Vamos esclarecer esse aspecto importante. Se a luz percorre uma distância D no sentido a favor do vento de Éter que tem velocidade u e a mesma distância D no sentido contrário ao vento do Éter, então os tempos de ida e volta valem respectivamente.

(tempo de ida)

$$t_1 = D / (c + u)$$

(tempo de volta) $t_2 = D / (c - u)$

Diferença entre os tempos se comparados. Se u é menor do que c , o resultado Δt seria diferente e próximo de $2Du/c^2$, sendo considerado um efeito de primeira ordem u/c .

$$\Delta t = t_1 - t_2 = \frac{D}{(c-u)} - \frac{D}{(c+v)} = \frac{2Du}{(c^2 - u^2)}$$

Sem o vento de Éter, o tempo do percurso de ida e volta seria:

$$t_0 = 2D/c$$

Se fizermos uma comparação entre o Δt com o tempo inicial t_0 , temos:

$$\frac{\Delta t}{t_0} = \frac{[2Du/(c^2 - u^2)]}{(2D/c)} = \frac{uc}{(c^2 - u^2)} \cong u/c$$

Nessa expressão temos um detalhe para observar, se considerarmos u sendo igual à velocidade de órbita da Terra (1.675 km/h), u/c valerá $1.675/300.000 \approx 0,005$ ou da ordem de $5/1000$. Não é fora de sentido dizer que u/c é da ordem de $1/1000$. Ou seja, é um efeito muito pequeno, quase insignificante.

O tempo de ida e volta da luz entre os pontos vale:

$$t' = t_2 + t_1 = \frac{D}{c-u} + \frac{D}{c+u} = 2Dc/(c^2 - u^2)$$

O tempo de ida e volta sem o Éter, como já foi citado é:

$$t_0 = 2D/c$$

Então a diferença entre t' com o vento de Éter e o tempo t_0 é:

$$\Delta t' = t' - t_0 = \frac{2Dc}{c^2 - u^2} - \frac{2D}{c} = 2Du^2/c(c^2 - u^2)$$

Esse valor é muito pequeno porque $c \gg u$. Comparando $\Delta t'$ e t_0 , dá um termo em segunda ordem em u/c .

$$\frac{\Delta t'}{t_0} = \frac{\left[\frac{2Du^2}{c(c^2 - u^2)} \right]}{\frac{2D}{c}} = u^2 / (c^2 - u^2) \cong u^2 / c^2$$

Lembrando que u foi tomado igual à velocidade da Terra, então teremos que u^2/c^2 é um valor muito pequeno, da ordem de 10^{-8} , sendo muito menor do que o que já tinha sido observado antes.

(...) O único método praticável de determinar diretamente a velocidade relativa do Éter e do sistema solar é comparar os valores da velocidade a luz deduzida das observações dos eclipses dos satélites de Júpiter, quando Júpiter é visto da Terra em pontos aproximadamente opostos da eclíptica (Martins, 2012, p. 68 apud Maxwell, 1880, p. 108-110).

Talvez houvesse uma possibilidade de encontrar um efeito de primeira ordem, fazendo uma associação com os estudos dos eclipses dos satélites de júpiter, porém isso também se tornou um desafio que não seria concretizado. No ano de 1879, Maxwell escreveu uma carta ao astrônomo David Peck Todd, indagando se haveria dados para fazer tal análise. No entanto, Todd logo respondeu que não era possível, pois não tinha equipamentos suficientemente precisos para tais medidas.

8. O EXPERIMENTO DE MICHELSON

No ano 1880, logo depois da Morte de Maxwell, a carta de que houvera escrita antes foi publicada e posteriormente o astrônomo Todd discutiu o conteúdo da carta com Albert Abraham Michelson (1852 – 1931). Justamente porque Michelson era o cientista que obtivera os melhores resultados da medida da velocidade da luz. Naquela época, ano de 1873, Michelson obteve o valor de $c = 299.853 \text{ m/s}$ para a velocidade da luz. Valor bem próximo do atual, $c = 299.793 \text{ m/s}$, Todd discutiu a possibilidade de determinar a velocidade da Terra através do Éter usando a velocidade da luz. Seguindo a concordância histórica, Michelson decidiu estudar as ideias que fora deixadas anteriormente por Maxwell e considerou difícil encontrar a variação no tempo de ida e volta da luz. Uma brilhante ideia de Michelson foi pensar que a única maneira de medir uma variação de velocidade tão

minuciosa seria usando métodos ainda mais complexos usando interferômetros, no qual ele mesmo diz que não estava tão familiarizado. MARTINS (2008).

(...) O primeiro uso de seu interferômetro por Michelson foi para testar a velocidade relativa da Terra e do Éter. Foi enquanto ele ainda estava na Europa aos vinte e oito anos que ele fez sua primeira tentativa neste experimento que marcou época. Ele relata isso em o American Journal of Science 22, 120 a 129, 1881 (MILLIKAN, 1938, p. 137).

O interferômetro foi construído no ano de 1881 com o propósito de medir a velocidade da Terra em relação ao Éter. Segundo Heichit (1993), historicamente, o interferômetro tornou-se o mais conhecido e importante aparelho usado com esse fim. Baseando-se na ideia de Maxwell, Michelson supunha que deveria haver uma diferença de tempo já estipulada de $\frac{\Delta t'}{t_0} \cong \frac{u^2}{c^2}$, isso quando o percurso fosse paralelo à direção do vento de Éter. Também supôs que quando o percurso da luz fosse perpendicular ao vento do Éter, não existiria nenhuma mudança no tempo de ida e volta da luz (isso é errôneo). Essas suposições que ele fez foram base para suas previsões teóricas. Em tais previsões, ele acreditava que, após girar todo o aparato, encontraria um padrão de interferência de 0,08 franjas. Nada foi encontrado. Michelson pediu permissão para instalar o aparelho no observatório astronômico de Potsdam, afirmando que naquele local não existiriam interferências que pudessem causar mudanças quantitativas. E mais uma vez ao girar o espelho, ele observou variações que desobedeciam a um padrão regular esperado, as franjas variaram entre 0,02 a 0,03, chegou a acreditar que fora erros experimentais, porém concluiu que haveria algum problema com a hipótese do Éter estacionário de Fresnel. MARTINS (2008).

Conclui então (MICHELSOM, 1881), que não existiam deslocamentos das franjas de interferência. Então a hipótese do Éter estacionário é incorreta. No artigo de sua autoria publicado no ano de 1881, Michelson chegou a citar a teoria de Stokes, no qual parecia acreditar que tivera descoberto uma experiência crucial para diferenciar a hipótese do Éter da hipótese do “Éter viscoso”. De fato, Michelson nada concluiu a respeito da existência ou não existência do Éter. Ele concluiu que o Éter comportava-se conforme a teoria de Stokes, isto é, era arrastado pelo planeta Terra (MARTINS, 2008).

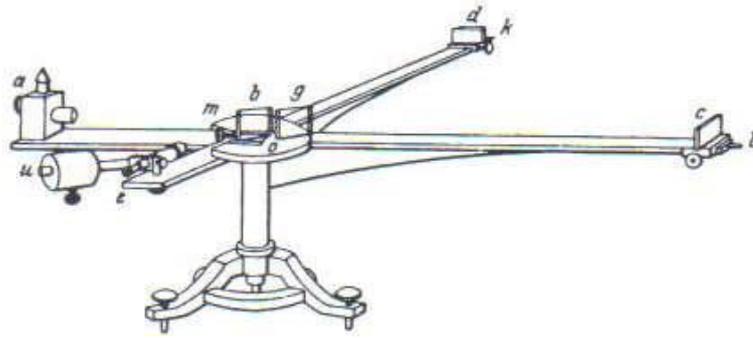


Figura 9. Interferômetro usado no ano de 1881 por Michelson

Fonte: Origens Da Teoria Da Relatividade Restrita

Houve então a correção da teoria, o que acarretou nas fórmulas que usamos até hoje. Na verdade a diferença entre o tempo de ida e vinda da luz nos dois braços do interferômetro seria a metade e não o que ele tinha dito anteriormente. A previsão mais correta seria então 0,04 franjas, e não 0,08 franjas. Michelson considerou seu experimento inválido, acreditando não ter uma sensibilidade suficiente para detectar o efeito que já estivera pensado antes atribuído a erros experimentais, as franjas foram 0,02 a 0,03, o mais interessante é que, os erros experimentais eram praticamente o próprio efeito que ele queria medir, por isso considerou que seu experimento era inválido, garantindo que não tinha a sensibilidade adequada para relatar o efeito (MARTINS, 2008).

A experiência de Michelson (fig. 7 e 8) não é algo trivial de compreender. Sendo o interferômetro fixo na Terra, e considerarmos o Éter fixo em relação ao sol ou qualquer objeto, então a Terra e o interferômetro se movem através do possível Éter, com velocidade já conhecida de 30 km/s caso o Éter estivessem em repouso e relação ao Sol. Essa velocidade muda de direção em função das mudanças de estação. Desprezando em um momento o movimento de rotação da Terra. O feixe de luz da fonte S, que está no laboratório é separada pelo espelho M, ligeiramente prateado, a luz é dividida em dois feixes iguais e ortogonais, o feixe 1 é refletido no espelho M_1 e o feixe 2 é refletido no espelho M_2 . Os dois feixes de luz produzem figura de interferência ao chegarem ao observador (RESNICK, 1971).

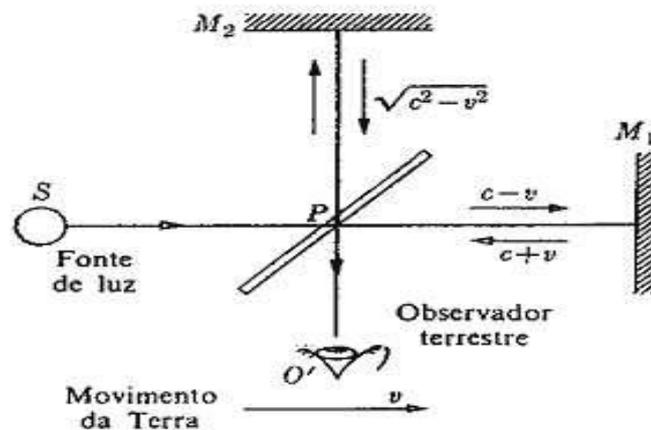


Figura 10. (Visão Esquemática Do Funcionamento Do Interferômetro De Michelson, 1881).

Fonte: Origens Da Teoria Da Relatividade Restrita



Figura 11. (Sistema De Franja Visto Pelo Telescópio, Por Ilustração).

Fonte: Origens Da Teoria Da Relatividade Restrita

No ano de 1884, Lord Kelvin e Lord Rayleigh estimularam Michelson a retornar seus estudos, já que tinha demonstrado não haver mais interesse pela problemática da Terra e o Éter. Eles consideraram o experimento de 1881, interessante e importante, e sugeriram que era necessário realizar medidas mais complexas e mais precisas. Michelson voltou então para a problemática. Devo citar aqui que antes dele aperfeiçoar o seu experimento do interferômetro, decidiu repetir o experimento de Fizeau sobre o arrastamento do Éter pela água.

(...) Em 1886, Michelson conseguiu reproduzir o experimento de Fizeau que nunca havia sido repetido antes – e obteve resultados que confirmavam a teoria de Fresnel. Nas condições estudadas, a teoria levava à previsão de um coeficiente de arrastamento de 0,438. O resultado experimental foi de

0,434 – quase exatamente igual ao previsto, com uma diferença de apenas 1% (Martins, 2008 p. 23).

A situação então era mais complexa do que se esperava, já que no ano de 1881 o experimento discordava da teoria de Fresnel, agora a situação tinha mudado e já era o contrário. Como corrobora na própria obra de (MICHELSON E MORLEY, 1886) todo o experimento de Michelson apresentou resultados não esperados. Então no ano de 1886, ele retomou o problema da detecção do Éter refazendo o experimento de Fizeau, experimento este que ainda não havia sido feito, chegando às mesmas conclusões que obterá teoricamente Fizeau.

8.1 A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON-MORLEY

Em 1887, Michelson, com o auxílio de Edward W. Morley (1838-1923) prepararam um interferômetro melhor. Neste novo aparato, não usaram a estrutura de aço como no anterior, mais sim uma placa cilíndrica em um bloco de pedra de mármore flutuante sobre mercúrio líquido. Essa nova estrutura buscava maior estabilidade, diminuição das vibrações, e ao mesmo tempo permitir que todo o aparato conseguisse girar em torno de um eixo central sem causar perturbação no fenômeno de interferência. Além disso, outra parte foi alterada, os braços do aparelho foram aumentados para garantir maior precisão do efeito resultante.

Nesse novo aparato, o efeito previsto pela teoria de Fresnel seria um deslocamento de franja de 0,04. Esse resultado podia ser detectado e medido facilmente. Michelson e Morley realizaram as medidas por um tempo de 4 dias. Nesse intervalo de tempo, concluíram que, o efeito era zero e que não havia como medir a velocidade da Terra através do Éter, como esperado pela teoria de Fresnel.

Os deslocamentos observados foram inferiores a 0,02 da distancia entre as franjas e foram associados ao erro do experimento. O experimento foi repetido exaustivamente sem êxito. Houve uma crítica importante sobre esses resultados no artigo publicado sobre o título “ON the motion of the Earth and luminiferous ether”. Segundo essa crítica, se houvesse realmente movimento da Terra em relação ao tal Éter luminífero, ele deveria ser insignificante o suficiente para refutar totalmente a explicação de Fresnel para o fenômeno de aberração (MICHELSON; MORLEY, 1887, p. 341).

O equipamento construído possuía boa sensibilidade e era capaz de detectar o desvio esperado se ele realmente existisse. Poderiam existir duas interpretações para esses resultados: a teoria de Fresnel para o arrastamento do Éter pelos objetos transparentes seria confirmada e, essa teoria seria refutada. Uma dúvida surgiu, era possível explicar essas duas vertentes com apenas uma teoria? A resposta é não. Segundo a teoria de Stokes, o Éter é arrastado pela vizinhança da Terra justificando o resultado nulo do experimento do interferômetro de Michelson-Morley, com isso o vento de Éter não existia. Em relação aos corpos transparentes, a teoria não previa o arrastamento parcial do Éter. Seria preciso elaborar novas teorias de modo a conciliar os resultados obtidos com a teoria do Éter (MARTINS, 2008).

Uma maneira de interpretar os resultados do experimento de Michelson-Morley, o resultado nulo, é aceitar que a velocidade da luz é sempre a mesma c para todas as direções, indiferentemente de qualquer sistema inercial. O experimento sem dúvida tinha um elevado grau de precisão (segunda ordem), e o resultado obtido não podia ser colocado em dúvida, ou seja, se o Éter não estava sendo detectado no experimento ou ele não existia como um referencial privilegiado ou algo estava impedindo a detecção. É importante destacar neste trabalho que tal conclusão, não sendo compatível com as transformações galileanas para a velocidade, parecia ser filosoficamente muito drástico para época.

Segundo Santos (2009) no seu trabalho ele resume isso de uma forma específica. “possui sentido perguntar se a Terra move-se através de um meio chamado Éter? Mas a Terra tem movimento, a aberração da luz confirma isso e ela não pode estar em repouso em relação ao Éter, ela se move! Os experimentos anteriores não foram precisos, o de 1887, sim, esse foi, pois Michelson-Morley construíram um aparato muito sensível para determinar algo que deva existir, no entanto o experimento não mostrou consequências mensuráveis. A Terra está se movendo através do Éter, mais o experimento mostra que não. Essa foi uma contradição que deixou os alicerces da Física do século XIX abalados”. Houve então alternativas para explicar o resultado de Michelson-Morley e salvar o Éter.

8.2 HIPÓTESES PARA O SALVAMENTO DO ÉTER

Na época os físicos consideraram a inexistência do Éter algo inacreditável, não era possível acreditar na propagação da luz sem um meio para viajar pelo

espaço. Quando ocorreu o conhecimento dos resultados dos experimentos de alta precisão e sensibilidade de Michelson-Morley, que, foi confirmado diversas vezes após varias repetições, houve a aparente necessidade de buscar hipóteses necessárias para explicar o resultado nulo, ou seja, salvar o Éter.

Em 1892, Fitzgerald e Hendrik Anton Lorentz propuseram sem saber o trabalho de ambos, uma possível solução para o intrigante resultado. Segundo Resnick, (1971) a hipóteses deles é que todos os corpos teriam uma contração no sentido do movimento relativo ao Éter por um fator $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Lorentz tentou explicar tal contração em termos de seu trabalho sobre teoria eletrônica da matéria. A teoria eletrônica de Lorentz era muito sofisticada e apresentava resultados que foram considerados artificiais e, além disso, os resultados experimentais esperados não foram encontrados. A hipótese da contração para justificar os resultados do interferômetro foi destruída com uma explicação correta e bem elaborada.

Na época não existia nenhum motivo físico para pensar na ideia de que corpo em movimentos através do Éter teria suas dimensões alteradas. Lorentz e Fitzgerald estavam, na mais sincera das possibilidades e provavelmente, guiando-se simplesmente pelo raciocínio de que algo poderia está causando o cancelamento do vento de Éter, então imaginaram que seria essa contração (MARTINS, 2008).

Michelson em busca de informações e detectar o Éter decidiu testar a teoria de Stokes e viu se podia ter um resultado satisfatório.

Na sua obra MARTINS (2008) cita em suas próprias palavras que:

(...) De acordo com essa teoria, o Éter só seria totalmente arrastado a pequenas distâncias da superfície da Terra; a grandes distâncias, o arrastamento seria pequeno. Assim, à medida que se considerasse altura cada vez maior em relação à superfície terrestre deveria ter um vento de Éter que iria aumentando com a altitude (MARTINS, 2008, 2012).

Essa teoria dizia que se o Éter é arrastado em grande quantidade na superfície da Terra, ou seja, quanto mais próximo da superfície maior poderia ser a sua presença, caso contrário, quando aumentamos a distância em relação à superfície, o arrastamento seria em uma quantidade menor. Devido a essa curiosidade, no ano de 1897 Michelson interessou-se em formular um novo aparato que pudesse detectar o vento de Éter a certa altitude.

(...) Ele construiu um aparelho que pode ser descrito como um interferômetro vertical, retangular, constituído por tubos evacuados de grande comprimento. Os tubos horizontais, na direção leste-oeste, tinham 60 metros de comprimento. Os tubos verticais tinham comprimento de 16 metros. O retângulo formado por esses tubos era percorrido por dois feixes luminosos que caminhavam em sentidos opostos, interferindo entre si depois de completar o percurso (MARTINS, 2008, 2012).

Consideradas todas as precauções ao realizar o experimento, os resultados tiveram efeitos irregulares e vagos no ponto de vista experimental. A conclusão foi que as velocidades da luz no tubo vertical e no tubo horizontal poderiam ter diferença máxima de um bilionésimo da velocidade da luz (10^{-9}).

A conclusão final de Michelson foi que ou o Éter é arrastado (teoria de Stokes), mas com a condição de que ele se estende até uma considerável distancia da Terra, ou não é arrastado (teoria de Fresnel), mas os corpos se contraem como fora sugerido por Lorentz e Fitzgerald.

No ano de 1932, Kennedy e Thorndike tiveram a curiosidade de buscar respostas para essa teoria, realizaram um experimento com um interferômetro, porém dessa vez os braços do interferômetro eram desiguais. De fato era de se esperar que em decorrência da diferença dos braços houvesse um deslocamento de franjas de interferências quando a velocidade do aparato tivesse variações de maneira significativa na direção em relação ao Éter. Mantendo o aparato fixo e sem realizar o giro de 90° A resposta das observações ao longo de 12 horas não revelou nenhum deslocamento de franjas, isso demonstrava que a rotação diária da Terra nada implicava. Dessa forma a hipótese de Lorentz-Fitzgerald foi totalmente descreditada (RESNICK, 1971). Didaticamente o experimento realizado por Kennedy e Thorndike foi mais um entre tantos outros que veio explicitar um resultado não favorável ao que se acreditava na época, o Éter e seu movimento relativo a Terra.

8.3 TEORIAS DE EMISSÃO

Segundo Resnick (1971), diante do fracasso da tentativa de encontrar o Éter, a hipótese de um referencial privilegiado tornava-se vaga entre a comunidade científica. O que parecia existir era um principio de relatividade que se enquadrava em toda a Física. Então algo deveria se elucidar para dar explicação. Uma das possibilidades diante do cenário foi tentar desvirtuar a teoria eletromagnética de Maxwell de modo que se tornasse invariante diante das transformações de (Galileu). Fazendo a análise do real aspecto da ideia, o status da mecânica newtoniana teria

que permanecer inabalado, ou seja, uma nova teoria teria que ser construída e logicamente a teoria eletromagnética seria reformulada.

É importante ressaltar aqui a solidez da obra de Maxwell. Suas teorias eram altamente bem sucedidas nas explicações de fenômenos eletromagnéticos.

Algumas teorias de emissão foram criadas a fim de tentar cumprir o propósito. Mas como funcionam tais teorias?

Logicamente uma interpretação plausível do possível resultado do experimento do interferômetro em 1887 (contradiz ao princípio da relatividade clássica) é que a velocidade da luz possui o mesmo valor em todos os sistemas inerciais. Sendo isso verdade, então a velocidade da luz não precisaria depender da velocidade da fonte luminosa relativa ao observador. RESNICK (1971) Se é necessário, portanto uma modificação do eletromagnetismo que aparentemente se sugere por si só, e deseja-se realmente evitar o princípio da não variância da luz como interpretação correta dos resultados do experimento do interferômetro, deve-se admitir que a velocidade de onda de luz é ligada ao movimento da fonte de emissão ao invés de um Éter. Então vincular a velocidade da luz ao referencial da fonte, em vez de associar ao meio de propagação. Comum a todas as teorias de emissão é a hipótese de que a velocidade da luz é c em relação ao emissor (fonte original), e essa velocidade não depende do estado de movimento do meio em que a luz percorre. Essa teoria de emissão explicaria facilmente o resultado nulo do interferômetro, teoria da Ritz.

Como tudo na Física precisa de um embasamento teórico e experimental que entre de acordo com toda a comunidade. As teorias da emissão não prosperaram.

(...) tais teorias não prosperaram na época, principalmente por entrarem em direta contradição com dois tipos de fenômenos: as observações de estrelas duplas e o experimento de Michelson-Morley usando como fonte de luz um objeto fora do referencial da Terra (fonte extraterrestre: Sol ou outra estrela qualquer), que de acordo com as teorias de emissão, deveria proporcionar deslocamento de franjas (RESNICK, 1971, p. 38).

A teoria de emissão deveria proporcionar deslocamentos de franjas. No ano de 1924 tais experimentos foram feitos por Tomaschek usando luz estelar e também por Miller em 1924, usando luz solar, o resultado de ambos foi nulo. Para tais teorias, um sistema de estrelas binárias deveria exibir uma excentricidade nas orbitas estelares, tais orbitas deveriam ter a aparência elíptica para observadores distantes, mesmo que na realidade parecessem círculos quando fosse analisada por

observadores no centro do sistema. O efeito é basicamente uma consequência do tempo de propagação da luz, que no caso varia se a estrela estiver se afastando ou se aproximando da Terra no instante da sua emissão. As observações de estrelas binárias, feitas por Sitter, nunca relataram ou apresentaram evidências na excentricidade nas orbitas das estrelas.

RESNICK (1971) detalha tal feito “se a velocidade da fonte (devido aos movimentos de rotação e/ou translação relativos ao interferômetro) realmente afetasse a velocidade da luz, seria possível observar variações da franja complicadas”. A título de curiosidade, não há nesta linha de pesquisa argumentações que tentam salvar ou inventar novas explicações das teorias de emissão, uma vez que estas realmente falham na descrição de partículas com altas velocidades, isso foi observado em aceleradores e colisões relativísticas.

A hipótese do Éter tornou-se insustentável, e pelo método científico da experiência fomos forçados a acreditar que as leis da eletrodinâmica estão corretas e, dessa forma não necessitavam de modificações. Uma consequência desses resultados é que a velocidade da luz é a mesma em todos os sistemas inerciais, e não depende nem do observador e nem da fonte. Portanto, o princípio da relatividade deve ser aplicado aos dois ramos, à mecânica e ao eletromagnetismo. Então a opção correta era considerar que o princípio da relatividade é válido para toda a Física, tomando como certas as leis de Maxwell, e ao mesmo tempo incorretas as transformações de Galileu e, como consequência, as leis da mecânica newtoniana precisavam ser modificadas (RESNICK, 1971).

9. LORENTZ E HENRI POINCARÉ E A TEORIA DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Historicamente as contribuições para a construção da sólida teoria da relatividade restrita foram sustentadas por vários pesquisadores, nesta parte do trabalho quero frisar as contribuições do físico Hendrik Antoon Lorentz e do matemático Henri Poincaré.

De imediato quero lembrar a participação e importância também de Waldemar Voigt que publicou um trabalho do efeito Doppler para a luz. Para fazer a sua análise, ele estudou as propriedades das ondas luminosas nos diferentes sistemas inerciais. “O efeito Doppler para luz é a variação de frequência e comprimento de onda da

radiação, quando a fonte ou quando o observador se move em relação ao Éter” (MARTINS, 2008, p. 28).

Em seu trabalho meticuloso e muito bem elaborado, Voigt impôs a condição de que a equação de onda deveria seguir todos os parâmetros de igualdade em todos os referenciais. Ele logo percebeu que era necessário usar um tipo especial de transformação de coordenadas. Voigt impôs duas especificações para conseguir tais equações de transformações de coordenadas. Na primeira, a equação da onda teria que obedecer à mesma equação em relação aos referenciais. E a segunda foi que em relação à coordenada x obedecesse à transformação clássica ($x = x' - v \cdot t$) essa transformação é a mais conhecida na mecânica clássica (Martins, 2008). As demais coordenadas y , z e t adquiriam um aspecto novo e teriam como resultado final.

$$x = x' - v \cdot t$$

$$y' = y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = y' = y \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

$$z' = z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = z' = z \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

$$t' = t - \frac{vx}{c^2}$$

Sendo consideradas como antecedente histórico do trabalho de Lorentz, o trabalho tão criativo de Voigt deve ter sido do conhecimento do criador da moderna teoria da relatividade, pois foi citado no ano de 1903 no ANNALEN DER PHYSIK. A partir das transformações de Voigt é possível ter uma correlação dos resultados corretos que foram depois deduzidos das transformações de Lorentz.

Anteriormente, no ano de 1892, Fitzgerald e Lorentz apresentaram a hipótese de contração dos objetos que se moviam no suposto Éter para tentar salvar a teoria do Éter. É interessante apresentar essa parte, pois posteriormente essa contração apresentada e que foi descreditada, ganhou uma nova visão e foi considerada uma consequência das transformações de Lorentz, nessa época ele ainda não havia proposto nada a respeito dessas coordenadas (MARTINS, 2008).

Surgindo mais uma tentativa de explicação para o resultado negativo da existência do Éter, Joseph Lamor apresentou uma resposta trivial. MARTINS (2008) explica que, Joseph Lamor publicou seu trabalho no ano de 1893, esse trabalho também era a respeito do Éter e consistia na expectativa de explicar, a partir das equações do eletromagnetismo, os resultados apresentados pelas experiências ópticas feitas anteriormente. Ao considerar a luz como um fenômeno eletromagnético, ele justificou que a aparente impossibilidade de não ter o êxito de conseguir medir a velocidade da Terra em relação ao Éter, usando a óptica, poderia significar que todos os fenômenos eletromagnéticos ocorriam da mesma maneira, claramente isso devia ocorrer em um referencial parado em relação ao Éter ou em um referencial em movimento (MARTINS, 2008).

Então foi necessário dispensar atenção para as forma das equações do eletromagnetismo em diferentes referenciais inerciais em movimento com relação ao Éter e descobrir as equações que são válidas em cada referencial. Essas novas relações poderiam mudar de forma e alterar grandezas do eletromagnetismo. MARTINS (2008) explica que Lamour tentou realizar o feito anteriormente descrito, apresentando certas transformações de coordenadas de forma semelhante às que Lorentz propôs. O que diferenciou foram as transformações das grandezas eletromagnéticas que se apresentaram erradas.

Acrescenta Martins (2008), ainda que Maxwell acreditasse que suas equações eram válidas apenas em referenciais parados em relação ao Éter, com um pouco mais de sutileza Lorentz argumentou que elas poderiam ser usadas em outros referenciais e procurou demonstrar isso usando a sua própria análise, (força de Lorentz) $\vec{F} = q(\vec{E} \times \vec{B})$ ele conseguiu provar que as equações de Maxwell eram válidas, em primeira ordem em referenciais distintos, mas para isso era necessário utilizar certas transformações de coordenadas, isso para o tempo e para os campos eletromagnéticos.

(SILVA E FILHO, 2010) a ideia por trás das novas transformações é ao mesmo tempo engenhosa e interessantíssima, o que merece atenção. Pois, embora a matemática usada seja relativamente simples, essas transformações trazem consigo efeitos até então desconhecidos como dilatação do tempo, contração do espaço e dependência entre espaço e tempo. A nova dependência entre espaço e tempo reformulou o conceito de simultaneidade. Então no ano de 1904, como afirma Renn (2004), Lorentz e sua mais brilhante versão final de seu trabalho juntamente

com suas equações de transformações, que foi intitulado de (fenômenos eletromagnéticos num sistema que se move com qualquer velocidade inferior à da luz). Em seu trabalho constava ainda uma proposta sobre a forma e estrutura do elétron. Em seu trabalho constava ainda uma série de estranhos fenômenos, que conhecemos hoje como a contração do comprimento bem como a retardação de processos como função de um sistema inercial do observador, e até mesmo o aumento da massa de um objeto com sua velocidade.

$$x' = \gamma(x - v \cdot t)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \gamma \left[t - \frac{vx}{c^2} \right]$$

$$\vec{B}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{B}' = \vec{B} = \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c^2}$$

γ É o fator de contração de Lorentz valendo, então, $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$.

Um aspecto importante que é necessário deixar claro, como afirma Reen (2004) diferentemente do que se acredita na atualidade, para Lorentz suas transformações não tinham o objetivo de garantir que as leis que valessem num referencial fixo também valessem num referencial que se move em movimento uniforme. Na sua maior expectativa, e acima de tudo, as transformações de Galileu tinha uma importância, que, no entanto, só garantem o princípio da relatividade na mecânica para corpos com baixa velocidade.

No ano de 1895, o matemático Henri Poincaré publicou um trabalho que discutia a proposta de Lamour. Ele lançou um princípio que nortearia a partir daquele momento todas as pesquisas relacionadas ao movimento, Éter e matéria (MARTINS, 2008). Em seu princípio básico, ele explicitou que é impossível medir o movimento absoluto da matéria, explicando melhor, o movimento relativo da matéria em relação ao Éter. Só é possível evidenciar o movimento da matéria em relação a outra matéria (MARTINS, 2008).

No, 1899, quando ele voltou com o assunto, deu o nome de lei da relatividade, considerando este princípio que somente os movimentos entre corpos materiais podem produzir efeitos. Comenta que todos os efeitos que de alguma forma pudessem depender do movimento do sistema em relação ao Éter, estes se cancelariam de forma que não é possível detectar o Éter por qualquer experiência.

Em 1900 Poincaré publicou um trabalho e deu o nome de “princípio do movimento relativo” e não “lei da relatividade” neste artigo ele deu uma interpretação para o “tempo local” de Lorentz. As novas fórmulas de transformação tiveram como uma consequência uma lei de soma de velocidades não iguais a das de Galileu. Isso não foi notado por Lorentz, mas Poincaré notou. Dessa forma, observou um conceito para o tempo local de Lorentz, ele mostrou que essa nova variável iria representar o tempo medido quando os relógios eram sincronizados (o sincronismo pode ser por meio de sinais luminosos) (MARTINS, 2008). Isso tem um significado físico muito complexo e interessante, o tempo local significava usar a velocidade como um padrão, e por esse motivo ela se torna uma invariante, tem o mesmo valor em todos os referenciais, podendo este estar em movimento em relação ao Éter ou não. “pouco nos importa que o Éter exista realmente; este é um tema para os metafísicos. O relevante para nós é que tudo ocorra como se ele existisse, e que esta hipótese se mostre cômoda para a explicação dos fenômenos” (POINCARÉ, 1902, p. 157).

A importância do Éter já estava totalmente sendo deixada de lado e tudo deveria ocorrer como se ele não existisse, que é a verdade. Não é sabido que Einstein chegou a conhecer e ler as obras anteriores de Poincaré, mas é bem provável que não tenha realmente lido. Em relação ao livro “ciência e hipótese” Einstein e seus amigos leram e discutiram muito a obra. É datado que ele tenha lido a obra entre os anos 1902 e 1903 de acordo com os seus amigos, Maurice Solovine e Conrad Habicht (UCHÔA, 2013).

A teoria de Poincaré tem estrutura e conceitos diferentes daqueles da obra de Einstein. Poincaré produziu em fórmulas, consequências equivalentes aos efeitos encontrados nos trabalhos de Einstein. Ele não detalhou as implicações no tempo e no espaço na sua nova lei de adição de velocidades. É provável que isso não tivesse importância pra ele que estava preocupado apenas com a dinâmica (Ferreira, 2013, p. 20 apud Paty, 2010, p. 157-193).

10. A RELATIVIDADE ESPECIAL

É necessário compreender o que é realmente a relatividade na concepção de Einstein, devemos recordar como a ele se representava a Física, ao fim do século passado (Bernstein, 1995). A Física do Universo funciona de igual maneira em qualquer ponto, ou seja, as leis da Física são as mesmas em todos os lugares. A ideia de que o movimento, como remonta a Galileu e Isaac Newton, que foram os primeiros a formular leis quantitativas, não importa em algum sentido absoluto, essa ideia de fato encontrou uma completa realização com o Físico Albert Einstein, a teoria da relatividade se baseia na simples afirmação de que o movimento não tem importância, as leis que governam a realidade Física são iguais, quer neste planeta quer em um planeta distante que se afasta. A teoria da relatividade restrita ou especial de Einstein evidenciou como os observadores em movimento relativo com velocidade constante podem comparar suas medidas (SANTOS, 2009).

Então vamos partir para o fato histórico da publicação do trabalho de Einstein, no qual publicou dois trabalhos.

(...) Um deles, mais extenso, discutia a mecânica e o eletromagnetismo dos corpos em movimento. Obtinha essencialmente os mesmos resultados que já haviam sido obtidos por outros autores, porém utilizando uma forma diferente de deduzi-los (muito mais simples). No segundo trabalho ele apresentou a relação entre massa e energia, para um caso particular (Martins, 2008, p. 35).

O trabalho de Albert Einstein discutia a mecânica e o eletromagnetismo dos corpos em movimento, o mais interessante é que os resultados encontrados por ele eram basicamente os mesmos já encontrados anteriormente pelos outros autores. A diferença era a maneira simples como os encontrou. No seu segundo trabalho ele apresenta a relação entre massa e energia. Sob um ponto de vista da ciência o trabalho de Einstein não era uma novidade surpreendente. Como já ficou claro, a maneira epistemológica de discutir os resultados encontrados eram diferentes.

No ano de 1905, Albert Einstein, como já citei, aparentemente descobridor das outras obras publicadas, forneceu uma solução completa para os dilemas da Física do início do século XX. O seu trabalho foi intitulado, “sobre a Eletrodinâmica de corpos em movimento” (RESNICK, 1971). Em uma citação da obra de Einstein ele comenta: nenhuma propriedade dos fatos corresponde ao conceito de repouso absoluto;... Para todos os sistemas de coordenadas para quais valem as equações

da mecânica, valem também as equações equivalentes da eletrodinâmica e ótica (Einstein, 1905).

O trabalho foi feito na forma de postulados, e isso são afirmações que devem ser acreditadas como verdade, porém não são demonstradas ou testadas pela própria teoria. Isso é complexo, mais também não significam que não podem ser realmente testadas, na verdade ao ser testado os resultados experimentais da teoria podem validar os postulados.

O primeiro postulado foi “O princípio da relatividade”: Este postulado foi observado na obra de Henri Poincaré, A Ciência E Hipótese, com o nome lei da relatividade, e logo depois em O Valor Da Ciência, só que, como o nome de princípio da relatividade.

I) O princípio da relatividade:

(...) As leis segundo as quais modificam os estados dos sistemas físicos são as mesmas, quer sejam referidas a um determinado sistema de coordenadas, quer o sejam a qualquer outro que tenha movimento de translação uniforme ao primeiro (Einstein, 1905, p. 895).

Podemos dizer a partir da citação acima referida e de acordo com esse postulado, ele declarava que as leis da ciência deveriam ser iguais para todos os observadores inerciais, sem restrição, que estivessem se movimentando livremente, não importando qual fosse a velocidade. Fisicamente a relatividade de Galileu deveria ser algo mais generalizador (geral), tendo que ser válido para toda a Física e não somente para a mecânica.

II) A constância da velocidade da luz:

(...) Qualquer raio de luz move-se no sistema de coordenadas “em repouso” com uma velocidade determinada V , que é a mesma, quer esse raio seja emitido por um corpo em repouso, quer seja por um corpo em movimento (Einstein, 1905, p. 895).

No segundo postulado, Einstein estende o postulado para poder incorporar a teoria de Maxwell, no qual implica em que a velocidade da luz tenha um valor, e todos os observadores em movimento ou não devem medir o mesmo valor para a velocidade da luz, sem dar importância para distância, se está se aproximando da

fonte ou se afastando dela. Inclui também as observações dos experimentos feitos sobre a natureza da luz, que faz parte o resultado de Michelson-Morley. (NUNES, 2021) “uma das razões para o segundo postulado como o princípio da constância da luz pode ter sido influencia da obra do físico Woldemor Voigt”.

De acordo com Muniz (2015) uma consequência dos dois postulados é deixar no esquecimento o conceito de referencial absoluto, que foi adotado por Newton, no qual ele afirma que não é possível realizar nenhum sequer experimento, (mecânico, eletromagnético, óptico e etc.), que possa diferenciar dois referenciais inerciais, em movimento relativo ao outro. E uma consequência analisada por ele, é que o tempo anteriormente sendo considerado absoluto, agora é função da posição e da velocidade relativa dos referenciais.

(MUNIZ, 2021, p. 6), “Na teoria da relatividade a passagem do tempo depende da velocidade do referencial, seguindo exatamente a relação espaço temporal proposta por Lorentz, e ligando de forma inseparável o espaço e o tempo”.

Os dois postulados causaram um impacto de mudança e mudaram de forma radical os conceitos de espaço e tempo. Como já foi visto na mecânica clássica, o tempo e o espaço eram considerados elementos distintos, diferentemente da teoria da relatividade especial, que nos obriga a pensar agora numa nova maneira de enxergar o tempo e espaço. De fato, precisamos então não negar que o tempo ou o espaço não podem mais ser analisados separadamente, e sim com uma combinação para formar um conjunto único espaço-tempo.

(SANTOS, 2009, p. 37), “admitir que o espaço e tempo não sejam mais ontologicamente independentes, não podem ser compreendidas como entidades separadas, devendo ser consideradas como uma única entidade, o espaço-tempo”.

Seguindo essa ideia, uma nova maneira de ver os fenômenos e muitas outras particularidades surgem de imediato, Einstein então entendeu um ponto fundamental que todos anteriormente a ele não tiveram êxito em perceber. Por exemplo, dois fenômenos que acontecem de forma simultânea para um observador, podem ocorrer em momentos diferentes para outro observador. Considerado um evento absoluto na mecânica clássica, torna-se um conceito relativo na teoria relativística. Além de outras consequências como, para movimentos com velocidades muito próximas da luz, ocorre uma contração do comprimento enquanto o tempo se dilata. Ou seja, o surgimento de conceitos de tempo e comprimento próprios.

Dessa forma essa teoria que é tão importante descarta a necessidade do Éter. Segundo (Martins, 2008) “para Lorentz e Poincaré o Éter era aceito e tinha um conceito útil, no qual era capaz de propiciar uma compreensão dos fenômenos, contudo não fosse possível identificar”, segue Martins (2008) que para Einstein, o Éter seguia o contrário, era um conceito inútil, devido a sua indetectabilidade. Adotando uma rígida posição de que aquilo que não podia ser detectado deveria ser excluído da Física (posição considerada epistemológica empirista, ou positivista).

(Santos, p. 37, 2009) complementa essa ideia empirista, no qual diz: “na relatividade, não existe necessidade de introduzir a ideia de um Éter, cuja presença, como mostrou experimentalmente o interferômetro de 1887, não foi detectada”. (MARTINS, 2008, p.40) “Um fato histórico é que muito tempo depois Albert Einstein mudou sua posição e passou a pensar ao contrário, e defendeu a existência do Éter”.

A teoria da relatividade especial tem sua derivação diretamente das duas hipóteses. Sua simplicidade, o arrojo e generalidade são logicamente oriundos de uma mente brilhante. Ela por si só, foi capaz de explicitar todos os resultados experimentais existentes, como também foi sagas em prever novas fronteiras que posteriormente veio a ser confirmadas (RESNICK, 1971).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O contexto histórico da teoria da relatividade é um vasto horizonte de ideias e filosofias que permeiam a atualidade, seria totalmente ilógico afirmar que somente Albert Einstein foi importante para a teoria. Não foi uma tarefa simples chegar a uma Física complexa e ao mesmo tempo genial que vivia no estreito limite da observação.

Este trabalho escrito totalmente em forma de revisão literária tem como fundamental objetivo demonstrar como foi o processo histórico para a formulação da teoria da relatividade de Einstein, que se originou nos primórdios do tempo com a questão do movimento da Terra, dessa forma constituindo um dos primeiros indícios da relatividade, existia uma profunda dúvida se a Terra estava parada ou em movimento, hoje sabemos que ela gira ao redor do sol e faz uma translação em um período de 365 dias, no entanto, informações como essas não existiam com clareza e o conhecimento empírico que pairava sobre os ideais, mas as discursões feitas já

iniciavam um método científico. Na ciência tudo é feito através de experimentos e hipóteses que precisam ser comprovadas, e foi daí que iniciou a busca de evidenciar se a Terra estava realmente em movimento ou estava estática.

O princípio da relatividade de Galileu e Newton foi apresentado, no qual ele introduz a ideia de referenciais, que na sua concepção os eventos ocorrem de forma simultânea, mas, além disso, Newton considera o espaço absoluto, isso mudou no século XX.

Pouco tempo depois, Newton apresentou que a luz seria constituída por partículas muito pequenas (teoria corpuscular) e ele argumentou que esta deveria também fazer parte do princípio da relatividade. Christian Huygens sugeriu que a luz poderia também ser constituída por ondas. É importante notar que a história dos processos de descobrimento das particularidades da Física sempre existe um questionamento que permite descobrir o que é o certo. A luz passou a ser então uma incógnita. Bradley com seus estudos com a luz das estrelas fez a descoberta da aberração estelar e pode confirmar que a Terra girava em relação ao sol.

Faraday foi muito importante para Maxwell, pois com seus trabalhos ele observou que a eletricidade e o magnetismo apresentavam as mesmas expressões do mesmo fenômeno, e provou ao produzir essas ondas a partir de uma corrente elétrica oscilante, isso foi o ápice, pois descobriu que as ondas produzidas eram semelhantes à da luz, concluindo que a luz era uma onda eletromagnética.

Como estas ondas se transportam, deveria existir algum sistema privilegiado para que as ondas, tipo a da luz se propagassem no espaço, da mesma forma que o som se transporta por um meio, o Éter então entra para a história, pois este era o responsável por tal função, este deveria então estar em repouso. Devemos lembrar que o Éter já era discutido muito anteriormente a isso, e houve vários cientistas tentando comprovar a sua existência. Inicialmente foi suposto o Éter em repouso em relação à Terra. Ou se ele se movia, então era normal que fosse em relação a algo, e que existisse um referencial em relação ao qual estivesse parado.

Informalmente isso foi resolvido com o início da procura por esse referencial privilegiado, Michelson inicialmente com um interferômetro simples, logo depois com a ajuda de Morley apresentaram os dados definitivos para acabar com a discussão do Éter, o mais importante disso é que a presença do Éter não foi confirmada.

E mais uma vez surge a necessidade de encontrar a explicação para a não detecção do Éter, Lorentz-Fitzgerald acreditava que isso não foi possível devido a

contração dos objetos, porém tal argumento não foi possível para desmitificar o mistério. Henri Poincaré, também foi um importante físico que decidiu buscar explicação para a relatividade e publicou inúmeras obras. Neste contexto, Albert Einstein surge com a brilhante ideia de explicar tudo isso com a apresentação dos postulados da relatividade, ao afirmar que as leis da Física são iguais para todos os observadores, e que a velocidade da luz é a mesma para todos os referenciais, além disso, o Éter não tem uma importância e nunca foi dito que ele não existia, o que ocorre é que nunca foi possível encontrá-lo, no entanto é necessário continuar assim. Outra consequência da relatividade é o surgimento do espaço-tempo, no qual são considerados interdependentes. Isso mudou a mecânica newtoniana, pois nela o espaço é considerado absoluto. Muitos outros fatos ocorreram com a nova visão da relatividade de Einstein, a dilatação do tempo, a contração do espaço, a relatividade da simultaneidade e várias outras que não são quesitos deste trabalho.

Por fim é necessário frisar que a teoria da relatividade especial não é particularmente de Einstein, não surgindo de forma aparentemente mágica, isso ocorreu de maneira gradual e em um tempo extenso, pois Aristóteles, Galileu Galilei, Newton e tantos outros defensores da relatividade clássica fizeram parte, além de um grande número de colaboradores que estão apenas nos ideais da teoria. A evolução da ciência é coletiva e não individual.

REFERÊNCIAS

BALCHIN, J. *Ciência: 100 cientistas que mudaram o mundo*. Trad. Lúcia Sano. São Paulo: Madras, P. 244, 2009.

BRUNO, G. **La cena de le ceneri**. In: Hersant, Y. & Ordine, N. (Ed.). *Oeuvres Complètes de Giordano Bruno*. Textos estabelecidos por G. Aquilecchia. Paris: Les Belles Lettres, v. 2, P. 183, 1995.

BERNSTEIN, J. **As ideias de Einstein**. Trad. Leônidas Hegenberg e Octanny Silveira da Motta. 10 Ed. São Paulo: Cultrix, 1995.

BABINET, J. **Expérience pour rendre sensible le mouvement ou plutôt les mouvements divers de la terre. Pli cacheleté nº 2073, déposé à L'Academie des Sciences de Paris, le 01/09/1862**. Manuscrit aux Archives de L'Académie des sciences. P. 2, 1968.

BEM-DOV, Y. **Convite à Física**. Trad. de Maria Luiza X. De A. Borges; revisão técnica de Henrique Lins de Barros. Rio de Janeiro: Jorge Zahar Ed., p. 103, 1996.

BLAIDI, S. et al. **Conexões com a Física**. São Paulo: Ed. Moderna, 1 ed. 2010.

CARVALHO, L. M, MARCOS. J A, HERIQUE. F; **Os estudos Sobre Eletroquímica e Eletricidade no Renascimento: Seus Protagonistas, Suas Obras e influências**, pub. 15-09- 2014. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/11067/1115> > acesso em fev. 2022.

COPERNICUS, N. **On the revolution of the heavenly spheres (De revolutionibus)**. Trad. Charles G. Wallis. Chicago: Encyclopaedia Britannica, 1952. (Great books of the western world, 16).

COHEN, B. I. **O Nascimento de Uma Nova Física**. Traduzido por Gilberto de Andrada e Silva. São Paulo: Edart, P. 1, 1967.

CHAIB, J. P. M. DE C. ASSIS, A. K. T. **Revista da SBHC, Sobre os efeitos das correntes elétricas – Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica**, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 85-102, p. 87. Jan. | jul. 2007

CARVALHO, FACCINE, HENRIQUE; **Os estudos sobre química e eletricidade no Renascimento: seus protagonistas, suas obras e influências**: Lusíada. História. - ISSN 0873-1330. - S. 2, n. 9-10 (2013). - < <http://hdl.handle.net/11067/1115> > p. 39-62. CAMENIETZKI, C. Z. **A Incessante Mobilidade Da Terra**. Museu de astronomia e Ciências afins/MCT. P. 1, Abr. de 2021.

CARVALHO, L. M, CALDAS, M. J. A. FACCIN, H. **os resultados sobre química e eletricidade no renascimento: seus protagonistas, suas obras e influencias**. P. 45, 9 de set. 2014. Disponível em: < <http://hdl.handle.net/11067/1115> > acesso em 04 de fevereiro de 2022.

D'ORESME, N. em **Só Matemática**. Virtuoso Tecnologia da Informação, 1998-2021 Disponível na Internet: < em <https://www.somatematica.com.br/biograf/oresme.php>.> Consultado em 12/11/2021.

EINSTEIN, A. **Zur Elektrodynamik Bewegter Korper**. *Ann Phys.* 17, P. 895, 1905.

FERREIRA, D. A. **Percursos Para A Construção Da Teoria Da Relatividade Restrita Nas Abordagens Dos Livros Didáticos De Física**. CAMPINA GRANDE-PB, P. 20, 2013.

Fukui, Ana. Molina, Madson de Melo. Oliveira, venerando Santiago. **Ser Protagonista**, Física 3. 2ª. Edição. São Paulo: Editora S M, LTDA, 2013. Volume 1, p. 219.

GUIMARÃES, A. P.. **Os 400 anos do De magnete**, CIÊNCIA HOJE • vol. 28 • nº 167, P. 74, 2020.

GUIMARÃES, O. PIQUIRA, J. R, CARRON. W. **Física**. 2. Ed. São Paulo: Ática, 2016.

Grupo Espirita São Miguel Arcanjo; disponível em < http://gema-rj.org/artigos/ga_30_11_06.htm > Acesso em 11 de março de 2022.

Há 150 Anos, Foucault Demonstrava Com Seu Pêndulo A Rotação Da Terra. A incessante mobilidade da Terra. Abril de 2001 • CIÊNCIA HOJE Disponível em:< <https://www.todamateria.com.br/isaac-newton/>> acesso em: 26 de novembro de 2021 às 16h36min.

HECHT, E. **Optics**. Addison-Wesley. 1993, Second Edition.

KOHL, EMIL, “**Über ein Integral der Gleichungen für die wellenbewegung, Welches dem Dopplerschein Prinzip entspricht**”, *Annalen der Physik* 11 (5), P. 96-113, 1903.

MARTINS, R. A. **Galileu E O Principio Da Relatividade**. *Cadernos de historia e filosofia da ciência* (9): 1986.

MARTINS, R. A. **Galileu E A Rotação Da Terra**. V. 11, n. 3, P. 196-211, dez. 1994: disponível em: < [file:///C:/Users/alex%20sandro/Downloads/Dialnet-GalileoEARotacaoDaTerra-5165964%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/alex%20sandro/Downloads/Dialnet-GalileoEARotacaoDaTerra-5165964%20(1).pdf) > acesso dia 04 de fev. de 2022.

MARTINS, R. A. **O Surgimento Da Teoria Da Relatividade Restrita**. *Grupo de historia e teoria da ciência* P. 1-41, 2008. Disponível em: < <http://www.ghhc.usp.br/server/pdf/RAM-Relatividade-livro.pdf> > acesso em 09 de nov. 2021.

MARTINS, R. A. **O Éter E A Óptica Dos Corpos Em Movimento: A Teoria De Fresnel E As Tentativas De Detecção Do Movimento Da Terra, Antes Dos Experimentos De Michelson E Morley (1818-1880)**. *Cad. Bras. Ens. Fis.*, V.29, n. 1, P. 52-80, abr. 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2012v29n1p52>> acesso em 07 de fev. 2022.

MUSSOI, F. L. R. **Fundamentos de Eletromagnetismo** VERSÃO 5.0 FLORIANÓPOLIS – OUTUBRO, 2016, p. 7.

MICHELSON, A. A. **The relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether.** American Journal of Science, 22; 120-129, 1881.

MILLER, A. I. **“Albert Einstein Special Theory of Relativity – Emergence and Early interpretation”**, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts (1981).

MICHELSON, A. A e MORLEY, E. W. **The Relative Motion Of The Earth And The Luminiferous Ether.** AMERICAN JOURNAL OF SCIENCE. P. 341, 1887.

MILLIKAN, R. A. **Memoria Bibliográfica De Albert Abraham Michelson 1852 – 1931.** Apresentado a Academia na Reunião Anual, volume XIX, (1938), p. 136- 137.

MUNIZ, S. R. **Introdução À Teoria Da Relatividade Restrita.** Universidade de São Paulo, IFSC-USP, Escola de Física Contemporânea, P. 6, jul. 2015.

NOVAK, M. A. **Introdução ao Magnetismo:** Universidade Federal do Rio de Janeiro, IF-UFRJ.

O Conflito Com a Mecânica Clássica Disponível: <https://moodle.ufsc.br/mod/book/tool/print/index.php?id=504254> acesso em 24/11/2021.

OLIVEIRA, A. S. **Contribuições De Maxwell Para o Eletromagnetismo,** Cuité - PB – 2015. P. 43, 65 -66.

Prof. Manoel M Ferreira Junior – UFMA. **Origens Da Teoria Da Relatividade Restrita** (revisão bibliográfica).

POINCARÉ, H. **A Ciência e a Hipótese.** Brasília, universidade de Brasília, P. 157, 1984.

PASCOAL, A. S. **Origem E Evolução Do Eletromagnetismo** Cuité – PB, P. 40-44, 2013.

PEDERSEN, K. M. **Roger Boscovich and John Robison on terrestrial aberration.** *Centaurus*, v. 24, p. 335-345, 1980.

PIETROCOLA, O. M. **Fresnel e o Arrastamento Parcial do Eter: A Influência do Movimento da Terra Sobre a Propagação da Luz** Cad. Cat. Ens. Fís., v.10, n.2: p.157 – 172. Ago.1993. P. 102-161.

PIETROCOLA, M... (et al). **Física em Contextos**, 3: ensino medio – 1. Ed. – São Paulo: Editoria do Brasil, 2016.

PIETROCOLA, O. M. **A Extensão do Princípio de Relatividade e Óptica.** 2016, P. 8-9. Disponível em < http://www.hu.usp.br/wp-content/uploads/sites/293/2016/05/Pietrocola_A_EXTENSAO_DO_PRINCIPIO_DE_RELATIVIDADE_A_OPTICA.pdf > aceso em 10 de janeiro de 2022.

PIBID FÍSICA, **A Física Ontem e hoje**, Dez. de 2015: 16ª Ed.

Porto 1. C. M. e Porto 2. M. B. D. S. M. **Uma Visão do Espaço na Mecânica Newtoniana e na Teoria da Relatividade de Einstein**. Historia da Física e ciências afins, Rev. Bras. Ensino de Física (30) 1 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1806-11172008000100017> > acesso em 07 de fevereiro de 2022.

PORTO, C.M.; **A Física De Aristóteles: Uma Construção Ingênua?** Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 31, n. 4, 4601, p. 1 (2009).

PONCZEK, R.L. **Deus Ou Seja, a Natureza: Spinoza e os Novos Paradigmas da Física [online]**. Salvador: EDUFBA, P. 352, 2009. ISBN 978-85-232-0608-6.

RESNICK, R. **Introdução À Relatividade Especial**, Jonh Wiley & Sons, inc. New York, 1968. Editora Polígono, S.A, São Paulo, P. 5,19,20-21, 38, 1971.

RESPIGHI, L. **Intorno L'influenza Del Moto Dei Mezzi Rifrangenti Sulla Direzione Dei Raggi Luminosi**. Memorie della Reale Accademia dell Scienze dell' Istituto di Bologna, v. 2, p. 279-304, 1861.

REEN, J. **A Fisica De Cabeça Para Baixo: Como Einstein Descobriu A Teoria Da Relatividade Especial**. Revista Brasileira De Ensino De Fisica, v.27, n.1, p. 27-36, 2004.

RIFFEL, R. A. **Uma Introdução À Teoria Da Relatividade Restrita**. Universidade Federal De Santa Maria. Centro De Ciências Naturais Exatas, p. 6, 2012.

REIS, T. O. **Estudo Experimental da Lei de Faraday da Indução Eletromagnética Utilizando um Smartphone e um Computador**. P. 28, Março de 2018.

STEWART, A. b. **The Discovery of Stellar aberration**. Scientific American, V. 210, n. 3, p. 100-107, 1964.

STOKES, G. G. **Mathematical and physical papers**. New York: Johnson Reprint, 5 v, 1966.

STORI, A. Material Pedagógico: Unidade Didática “**uma proposta de abordagem do tema eletromagnetismo: lei de Faraday**” Curitiba, P. 5-6, 2009.

SANTOS, M. **Princípio da teoria da relatividade restrita: Um paralelo de Galileu a Einstein**. Ji-paraná-RO, P. 18-19, 37, 2009.

SILVA, F. E. **Resgatando A Importância Do Experimento De Hans Cristian Oersted**. Universidade Federal Do Ceará. Instituto UFC Virtual, Licenciatura Em Física Semipresencial. P. 12, 2014.

UCHÔA, A. **A história da Relatividade Antes de Einstein: Elaboração de uma Proposta Para o Ensino Superior**. Campina grande, 2013.

WOLFF E MORS. **A Passagem Do Enfoque Galileiano Para O Enfoque De Einstein**. Textos de Apoio ao Professor de Física, v. 16 n. 5, P. 15-19, 2005.

X colóquio internacional “**educação e Contemporaneidade**” 22 a 24 de setembro de 2016, São Cristóvão/SE – Brasil. Disponível em <http://anais.educonse.com.br/2016/a_importancia_da_historia_no_ensino_de_ciencias_analise_do_livro.pdf> acesso em fev. de 2022.

ZYLBERSZTAJN, A. **GALILEU – Um Cientista e Várias Versões**. CAD. CAT. Ens. Fís., Florianópolis, 5 (NÚMERO ESPECIAL): p.36, 40-48, JUN. 1988.