

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO ARAGUAIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA – LICENCIATURA**

ANA CAROLINA VENANCIO TAVARES

EXPERIMENTOS DE MICHELSON- MORLEY NA LITERATURA

BARRA DO GARÇAS - MT

2023

ANA CAROLINA VENÂNCIO TAVARES

EXPERIMENTOS DE MICHELSON- MORLEY NA LITERATURA

Trabalho de Curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso - Campus Universitário do Araguaia - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, como parte dos requisitos para obtenção do título de Graduado em Física - Licenciatura.

Orientador: Dr. Adellane Araújo Sousa

BARRA DO GARÇAS

2023



Ana Carolina Venâncio Tavares

EXPERIMENTOS DE MICHELSON-MORLEY NA LITERATURA

Trabalho de Curso aprovado, como parte dos requisitos para obtenção do título de Graduado em Física – Licenciatura, pela comissão avaliadora:

Documento assinado digitalmente
 ADELLANE ARAUJO SOUSA
Data: 29/05/2023 20:06:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Adellane Araújo Sousa
(orientador)

Documento assinado digitalmente
 EDIRON LIMA VERDE
Data: 26/05/2023 20:51:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ediron Lima Verde

Documento assinado digitalmente
 GEORGE BARBOSA DA SILVA
Data: 29/05/2023 23:06:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. George Barbosa da Silva

Barra do Garças, 26 de maio de 2023.

Dedico este trabalho a todos os que me ajudaram ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força por superar cada dificuldade.

A minha família pelo incentivo, apoio, amor incondicional.

A todo corpo docente por me proporcionar o conhecimento não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, por tanto que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender e terão meus eternos agradecimentos.

Ao meu orientador por ser o professor incrível que algum dia eu conheci e por isso quero te agradecer. Mais do que aquela pessoa que transmite conhecimento na sala de aula, você cria empatia com seus alunos! Obrigado por me exigir mais do que eu acreditava que seria capaz de realizar.

Aos meus amigos que a Universidade me proporcionou aos longos dos anos!

A todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a minha formação.

*" Na vida, não existe nada a temer, mas a
entender."*

(Marie Curie)

RESUMO

O interferômetro de Michelson-Morley foi desenvolvido com o objetivo de detectar pequenas variações na velocidade de propagação da luz enquanto a Terra se movimentasse em relação ao éter luminífero. O resultado “nulo” do experimento é um dos mais famosos da história da física. O experimento foi muito importante como um dos alicerces experimentais da teoria da relatividade especial de Albert Einstein apresentada em 1905. Contudo, ao longo de décadas existiram diversos experimentos do tipo Michelson-Morley e no presente trabalho fizemos um levantamento na literatura apresentando diversos resultados destes experimentos ao longo da história.

Palavras chave: Relatividade Especial, Éter Luminífero, Experimento Michelson-Morley, Interferômetro de Michelson-Morley.

ABSTRACT

The Michelson-Morley interferometer was developed with the aim of detecting small variations in the propagation speed of light as the Earth moved in relation to the luminiferous ether. The "null" result of the experiment is one of the most famous in the history of physics. The experiment was very important as one of the experimental foundations of Albert Einstein's theory of special relativity presented in 1905. However, over the decades there have been several experiments of the Michelson-Morley type and in the present work we surveyed the literature presenting the different results of the experiments. experiment throughout history.

Key-words: Special Relativity, Luminiferous Ether, Michelson-Morley Experiment, Michelson-Morley Interferometer.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	11
2.1 Objetivo geral.....	11
2.2 Objetivos específicos.....	11
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO	12
3.1 Interferências construtiva e destrutiva.....	13
3.2 O interferômetro de Michelson e a relatividade.....	17
4 METODOLOGIA	21
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1 Experimentos Semelhantes	22
5.1.1 Experimento de Fizeau (1851)	22
5.1.2 Experimento de Michelson-Morley (1887)	23
5.1.3 Experimento de Michelson-Gale-Pearson (1925)	23
5.1.4 Experimento de Miller (1925)	23
5.1.5 Experimento de Kennedy-Thorndike (1932).....	23
5.1.6 Experimento de Brillet e Hall (1979)	24
5.1.7 Experimento de Schiller, Eisele e Nevsky (2009)	24
5.2 TABELA EXPERIMENTAL.....	25
6 CONCLUSÕES	27
REFERÊNCIAS.....	28

INTRODUÇÃO

A relatividade especial estabelece que as leis da física são válidas em todos os referenciais inerciais e que algumas medidas como o intervalo de tempo, simultaneidade entre dois eventos e o comprimento são relativas a esses referenciais dependendo das velocidades dos observadores envolvidos nas medidas. Estas relatividades das medidas ficam bem caracterizadas quando as velocidades envolvidas são grandes em comparação com a velocidade da luz. Na mecânica, quando as velocidades dos observadores co-movendo com as partículas são pequenas quando comparadas à velocidade da luz, os efeitos relativísticos não podem ser observados. A relatividade de Galileu que estabelece a velocidade relativa entre partículas em referenciais inerciais na mecânica clássica deixa de ser válida, sendo substituída pelas equações de Lorentz. Nas equações de Lorentz, está implícito que a velocidade da luz é a mesma em todos os referenciais inerciais e não depende por exemplo da velocidade da fonte de luz. (FIGUEIRA, J., 2010)

No século XIX, alguns físicos defendiam a existência do éter, pois acreditavam que ondas eletromagnéticas descobertas por Maxwell se propagavam neste meio material assim como as ondas mecânicas necessitavam de um meio material para se propagarem. Este éter deveria preencher todo o espaço e a luz deveria se propagar nele, não existindo um vácuo. (SANTOS, R. B. B., 2002)

Em 1887, o físico americano Albert Michelson com o auxílio do físico Edward William Morley, construiu um interferômetro, onde seria um experimento que pudesse detectar o éter luminífero. Este interferômetro consistia de um separador de feixe (espelho semirefletor) e de dois espelhos planos (um fixo e um móvel) – todos dispostos sobre uma mesma base. A ideia central do experimento era detectar uma diferença entre distâncias percorridas pela luz nos braços do interferômetro através da medida da diferença de fase entre os raios de luz. Devido a existência do éter, essa diferença poderia ser detectada através de um padrão de figura de interferência sendo que a diferença de fase medida deveria estar em torno de $0,4$, por se o desvio que se esperava obter. No entanto, o valor medido para o desvio foi menor que $0,01$. Sendo o resultado nulo mais famoso da história dos experimentos de física. (IFSC/USP, 2013). Michelson e Morley tentava obter várias explicações para os diferentes valores para essa velocidade, dependendo do movimento do observador relativo ao meio no qual a luz se propaga. Não satisfeitos com o resultado, Michelson e Morley repetiram os experimentos durante um tempo, mas os resultados continuaram nulos (UFABC, 2022).

Outros físicos ao longo da história do século XXI também realizaram tais experimentos como vamos ver neste trabalho. Uma das ideias centrais deste trabalho é mostrar como funciona o interferômetro de Michelson-Morley em um nível de graduação, pois muitos detalhes interessantes da física envolvida podem estar insuficientes em muitos textos didáticos de Física devido à escassez de tempo e espaço. Outra ideia central é apresentar uma cronologia com os resultados dos principais experimentos do tipo Michelson-Morley na literatura ao longo dos anos. Ao final deste trabalho, didaticamente, apresentamos uma tabela em que os resultados de alguns experimentos podem ser classificados em termos de franjas claras (centro claro no anel de franjas) na figura de interferência (interferência construtiva) e, portanto, sem o éter detectado ou uma franja escura caracterizando uma interferência destrutiva e com detecção do éter. Estas franjas são conhecidas como padrão de interferência. Essa classificação é pertinente pois alguns experimentos, notadamente os controversos experimentos de Miller resultaram em um padrão de franjas sugerindo a existência do éter e portanto, o que corresponderia à uma franja escura no centro do padrão de anel circular.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Compreender o funcionamento do interferômetro de Michelson-Morley e verificar os resultados do experimento envolvendo este aparato ao longo dos anos.

2.2 Objetivos específicos

Explicar fisicamente a nível de graduação em física, o funcionamento do experimento de Michelson-Morley.

Identificar os resultados do experimento de Michelson-Morley no decorrer dos anos realizado por estes autores.

Realizar um levantamento de outros experimentos semelhantes que testaram a ideia dos físicos Michelson e Morley.

Construir uma tabela apresentando as datas, experimentos e resultados: claro ou escuro (com os valores das diferenças de fase), comparando os resultados desses experimentos ao longo da história.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO

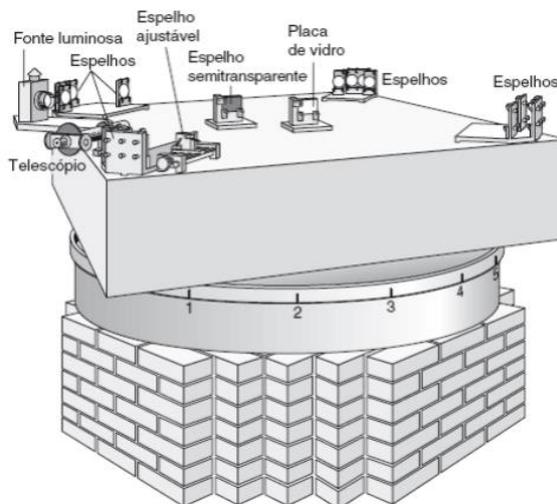
As equações de Maxwell permitem que as ondas eletromagnéticas viajem pelo vácuo com uma velocidade aproximadamente de 3×10^8 m/s e de certa forma a velocidade depende de um referencial, e a pergunta é: qual seria este referencial? Desse modo deveria existir um meio material, ou seja, ter algo no espaço para proporcionar estas oscilações. Um bom exemplo seria o som, que é uma onda que necessita de um meio para se propagar, e neste caso temos o ar que oscila e a partir dessa oscilação é que tem a propagação da onda sonora. A ideia da época era que a luz necessitava de um meio material que preenchesse o espaço e que servisse como um sistema de referência absoluto que estaria acoplado ao próprio espaço.

Atualmente se sabe que o éter luminífero não existe e a luz é uma onda eletromagnética, isto é, uma onda que surge através da variação de um campo elétrico e magnético mesmo estando no vácuo. Essa variação do campo elétrico gera a oscilação no campo magnético e vice-versa, e essa propagação da onda é o mesmo que acontece com as demais ondas eletromagnéticas como a luz. Essa propagação é diferente das ondas mecânicas, como por exemplo, o som de uma água, as ondas eletromagnéticas não necessitam de um meio para se propagar. Mas é claro que isso não se sabia da época, pois os físicos achavam que deveria existir esse meio material chamado éter. O desafio era provar a existência dele e provar que a velocidade da luz é uma velocidade que era medida apenas em relação ao éter. Mas como seria possível provar a existência desse meio material misterioso?

O interferômetro de Michelson, inventado pelo físico americano Albert Abraham Michelson e por Edward Morley é um instrumento de precisão que produz padrão de interferência, ele divide um feixe de luz em duas partes e depois as recombina após de terem percorrido diferentes caminhos ópticos.

Na prática, o interferômetro de Michelson consiste de um separador de feixe (espelho semi refletor) e de dois espelhos planos (um fixo e um móvel) – todos dispostos sobre uma mesma base como apresentados na Figura 1 (TIPLER, P. A., LLEWELLYN, R. A. (2017)).

Figura 1 - Representação do interferômetro de Michelson e seus principais componentes.



Fonte: TIPLER, P. A., LLEWELLYN, R. A. (2017).

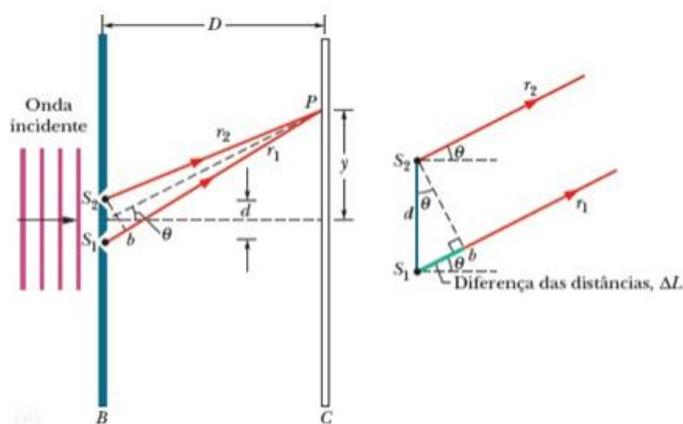
O interferômetro de Michelson-Morley (assim como qualquer interferômetro) pode ser usado para determinar: variações do caminho geométrico (e óptico), bem como o índice de refração do meio de propagação da radiação (IFSC/USP, 2013).

O princípio da superposição afirma o seguinte: quando duas ou mais ondas se superpõem, o deslocamento resultante em qualquer ponto em um dado instante pode ser determinado somando-se os deslocamentos instantâneos que seriam produzidos no ponto pelas ondas individuais se cada onda estivesse presente sozinha (Marques, 2022).

3.1 Interferências construtiva e destrutiva

Veremos nessa seção como a figura de interferência é formada a partir da diferença de caminho percorrido pela luz. Para isso considere a Figura 2.

Figura 2 - Diferença de caminho entre as ondas de fontes S1 e S2.

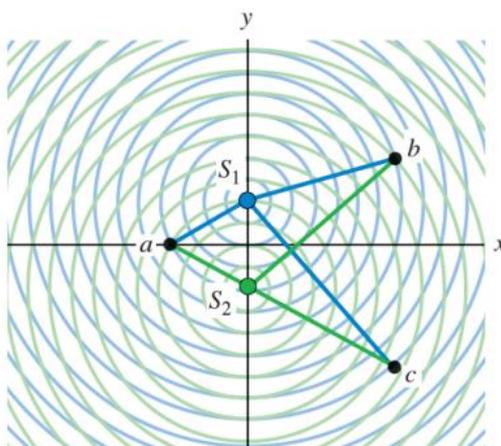


Fonte: Marques, 2022.

Na figura, após a onda plana atravessar as duas fendas, é formado duas novas frentes. Essas duas ondas difratadas pelas duas fendas (ficam encurvadas) se superpõem até chegar no anteparo. Quando elas chegam em fase no mesmo ponto do espaço, as amplitudes se somam, resultando numa interferência construtiva e um padrão de franjas claras podem ser visualizadas no anteparo. Caso as ondas cheguem defasadas (por terem percorrido caminhos diferentes, chegando com os picos e vales atrasados, de uma onda em relação a outra onda) as amplitudes se cancelam resultando num padrão de franjas escuros.

Interferência construtiva: quando ondas provenientes de duas ou mais fontes chegam a um ponto em fase, elas se reforçam mutuamente: a amplitude resultante é a soma das amplitudes das ondas individuais. Seja r_1 a distância entre qualquer ponto P e S_1 e seja r_2 a distância entre qualquer ponto P e S_2 . Para que ocorra interferência construtiva no ponto P, a diferença de caminho $r_2 - r_1$ para as duas fontes deve ser um múltiplo inteiro do comprimento de onda. Quando a diferença de caminho é um múltiplo (ver segunda equação) do comprimento de onda, tem interferência construtiva e isso pode ser visto em pontos como no ponto b da figura (MARQUES, N. L. R.), sendo representada pela Figura 3:

Figura 3 – Interferência Construtiva



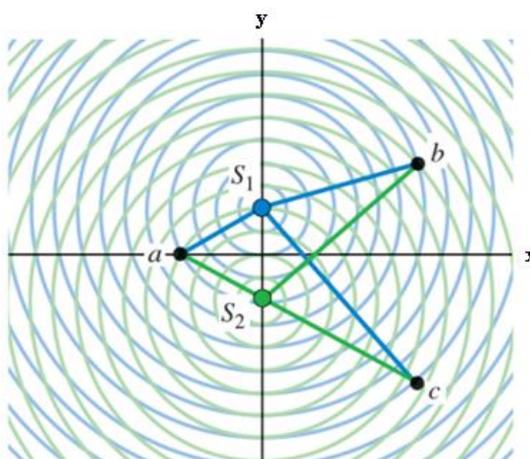
Fonte: MARQUES, 2022.

$$r_2 - r_1 = m\lambda \rightarrow (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \rightarrow (m = \text{número inteiro})$$

$$r_2 - r_1 = m\frac{\lambda}{2} \rightarrow (m = \text{número par})$$

Interferência destrutiva: quando ondas provenientes de duas ou mais fontes chegam a um ponto em oposição de fase. Uma crista de onda chega a um ponto ao mesmo tempo que uma crista invertida (ou seja, um “vale”) da outra onda. A amplitude resultante é a diferença das amplitudes das duas ondas individuais. Se as amplitudes das ondas individuais são iguais, então a amplitude resultante é igual a zero. Seja r_1 a distância entre qualquer ponto P e S_1 e seja r_2 a distância entre qualquer ponto P e S_2 . Para que ocorra interferência destrutiva no ponto P, a diferença de caminho $r_2 - r_1$ vai ser dada, e quando a diferença de caminho é um múltiplo ímpar (ver segunda equação) de meio comprimento de onda, a interferência é destrutiva e isso acontece em pontos como o ponto c da figura. Na verdade, existem diversos pontos destes tipos tanto construtivo (pontos de máximo) quanto destrutivo (pontos de mínimo) assim resultando num padrão de franjas claras e escuras que são observadas em um anteparo (MARQUES, N. L. R.), ao qual é representado pela Figura 4:

Figura 4 – Interferência Destrutiva



Fonte: MARQUES, 2022.

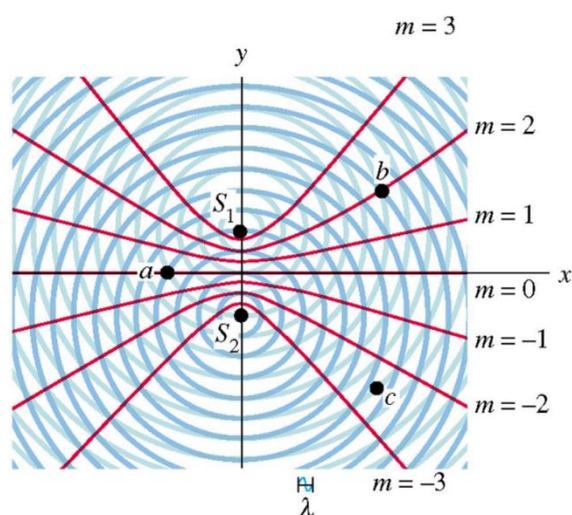
$$r_2 - r_1 = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \rightarrow (m = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots) \rightarrow$$

$(m = \text{número inteiro})$

$$r_2 - r_1 = m \frac{\lambda}{2} \rightarrow (m = \text{número ímpar})$$

As curvas que cortam as circunferências concêntricas indicam curvas que ligam os pontos onde ocorrem interferências construtivas. Em cada uma dessas curvas, a diferença de caminho $r_2 - r_1$ é igual a um inteiro m vezes o comprimento de onda. Essas curvas são chamadas de curvas antinodais. As curvas nodais (não mostradas na Figura 5) correspondem aos pontos nos quais ocorre interferência destrutiva. (MARQUES, N. L. R.)

Figura 5 - Curvas antinodais



Fonte: Marques, 2022.

3.2 O interferômetro de Michelson e a relatividade

O mais notável e famoso experimento para detectar pequenas variações na velocidade de propagação da luz, foi realizado em 1881. O experimento consistiu em medir a velocidade da luz aproveitando-se do movimento e da velocidade de translação da Terra utilizando-se um aparato que ficou conhecido como interferômetro de Michelson-Morley, consistindo de dois braços de mesmo comprimento, dispostos perpendicularmente entre si. (UFABC, 2022)

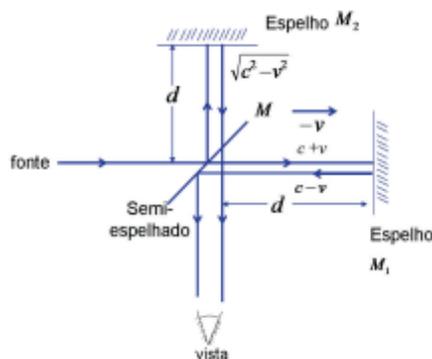
Na extremidade de um dos braços, uma fonte emissora de luz. Na intersecção dos braços um conjunto de espelho semi-transparentes posicionados de forma angulada em 45° . Nas extremidades dos dois braços espelhos refletores e um anteparo que permitia enxergar o feixe de luz refletido. A ideia era separar em dois feixes de menor intensidade o feixe principal, fazendo com que refletissem separadamente e no seu percurso de volta, se unissem novamente exibindo no anteparo o feixe de luz re-combinado. Como os braços do interferômetro possuíam mesmo comprimento, a intensidade do feixe quando incidisse sobre o anteparo dependeria das interferências construtivas ou destrutivas apenas. Se os feixes de luz tivessem diferentes velocidades em ambas as direções, padrões de interferência deveriam ser observados nos anteparos. Era isso que o experimento buscava comprovar. (UFABC, 2022)

Considerando que um dos feixes se mover numa direção paralela à de propagação do Éter. A velocidade medida para a luz deveria se mover contra o Éter, como a Figura 6 apresenta. (UFABC, 2022)

$$u = c - v$$

$$u = c + v$$

Figura 6 – Feixes se movendo em direção paralela a propagação do éter.



Fonte: ROTH, A. G. (2018).

Tomando L como sendo o comprimento dos braços, obtém-se para o intervalo de tempo de ida do feixe de luz. (UFABC, 2022)

$$t_1 = \frac{L}{c-v}$$

Tomando o tempo para o caminho de volta:

$$t_2 = \frac{L}{c+v}$$

O tempo total seria, portanto:

$$\Delta t_1 = \frac{L}{(c-v)} + \frac{L}{(c+v)} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

Calculando o tempo total para o feixe de luz que viaja perpendicularmente com relação ao Éter, obtém-se:

$$\Delta t_2 = \frac{2L}{(c^2 - v^2)^{-\frac{1}{2}}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

No caso do braço 2, aquele no qual a luz viaja perpendicularmente ao Éter, o valor para a velocidade resultante foi obtido utilizando-se o triângulo pitagórico. A diferença de tempo para que os dois feixes percorrem os seus respectivos caminhos, deverá ser dada pela diferença entre as expressões para cada braço (UFABC, 2022):

$$\Delta T = \Delta t_1 - \Delta t_2 = \frac{2L}{c} \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \right]$$

Pelo fato de termos $v^2/c^2 \ll 1$, é utilizada uma expansão binomial descartando os termos de grau maior do que 2.

$$(1 - x)^n \approx 1 - nx$$

Por causa dessa substituição $x = v^2/c^2$, se tem:

$$\Delta T = \frac{2L}{c} \left[\left(1 + x\right) - \left(1 + \frac{1}{2}x\right) \right] = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{2}x = \frac{2L}{c} \cdot \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} = \frac{L \cdot v^2}{c^3}$$

Que é a diferença de tempo entre a chegada ao anteparo dos dois feixes de luz.

Cálculos mais precisos (não mostrados neste trabalho), envolvendo uma rotação de 90° do interferômetro, indicam que a diferença de caminho corresponde ao dobro da expressão obtida.

$$\Delta d = c(2\Delta t) = 2L \frac{v^2}{c^2}$$

Essa diferença de caminho percorrida pelos dois feixes forma um desvio no padrão de interferência como explicado na seção 3.1. Assim, é possível escrever a partir da expressão acima:

$$\frac{\Delta d}{\lambda} = \frac{2Lv^2}{\lambda c^2}$$

Se o éter luminífero existisse, o movimento da Terra em relação a ele deveria afetar a velocidade da luz em relação ao interferômetro em diversas direções do movimento da Terra em relação ao éter. Mais especificamente, a velocidade da luz na direção do movimento da Terra seria maior do que a velocidade da luz na direção perpendicular ao movimento da Terra. Para detectar essa diferença de velocidade, Michelson e Morley giravam o interferômetro em diferentes direções ao longo do ano, para que a velocidade da Terra em relação ao éter luminífero mudasse. No entanto, o experimento não mostrou nenhuma diferença significativa na velocidade da luz medida, independentemente da direção em que o interferômetro estava apontado. Eles esperavam que a diferença de caminho percorrido pela luz resultasse em um desvio padrão de interferência, com o valor de diferença de fase efetivo em torno de 0,4 comprimentos de onda. Contudo, eles encontraram um valor próximo de zero, ou seja, um resultado nulo, sem diferença na velocidade da luz nos dois braços e em qualquer outra direção. Isso foi uma surpresa para os cientistas da época, e levou à teoria da relatividade de Einstein. Convém reforçar que devido à uma quase imperceptível diferença entre os comprimentos dos dois braços do interferômetro e um alinhamento entre os raios que chegam ao anteparo vindos de cada braço, o padrão de franjas observados no experimento é uma série de círculos concêntricos de franjas claras e escuras. Após o experimento ser girado, é esperado que a luz detectada no anteparo fique defasada em relação a luz no experimento antes do giro. Isso resultaria em um novo padrão de franjas de interferência deslocado lateralmente em relação as franjas do padrão encontrado antes do experimento ser girado. O desvio entre essas franjas é que deveria de ser 0,4 (resultando em um centro escuro devido à interferência destrutiva). Contudo como descrevemos acima, o resultado para esse desvio foi praticamente nulo, pois foi encontrado um desvio lateral tal que o anel de franjas caísse sobre si mesmo, com um centro claro, característica de interferência construtiva.

A explicação física para o resultado nulo do experimento é que a velocidade da luz é constante em qualquer referencial inercial, independentemente do movimento da fonte de luz ou do observador. Isso é conhecido como o princípio da relatividade, um dos pilares da teoria da relatividade de Einstein. Como a velocidade da luz é sempre a mesma, independentemente

da direção em que o interferômetro está apontado, não há nenhuma diferença observável na interferência dos raios de luz. Em outras palavras, não há um éter luminífero que afete a velocidade da luz. Ao invés disso, a velocidade da luz é constante em todos os referenciais inerciais, o que levou a uma revolução na compreensão da natureza da luz e do espaço-tempo. O experimento de Michelson-Morley é considerado um dos experimentos mais importantes da história da física.

É importante ressaltar que o resultado nulo do experimento de Michelson-Morley foi um grande desafio para a física da época, que estava baseada na ideia do éter luminífero. A ausência de um éter luminífero foi um dos fatores que levou Einstein a desenvolver a teoria da relatividade especial, que revolucionou a compreensão da natureza da luz e do espaço-tempo. Além disso, o experimento de Michelson-Morley também teve um grande impacto na física experimental, pois mostrou a importância da precisão das medidas e da instrumentação. O interferômetro de Michelson-Morley era extremamente preciso para a época, e Michelson continuou a aperfeiçoar o aparelho ao longo de sua carreira, chegando a realizar medidas da distância entre a Terra e a Lua com uma precisão nunca antes alcançada.

4 METODOLOGIA

A metodologia consiste em fazer primeiramente, um levantamento histórico das ideias que levaram Michelson e Morley a realizarem seus experimentos passando pelos bastidores do experimento em si. Após isso, é apresentado o experimento através de figuras. Também são usadas equações para explicar a ideia por trás do interferômetro. Uma pesquisa bibliográfica foi feita com o intuito de verificar os resultados posteriores dos experimentos realizados pelo próprio Michelson, bem como experimentos similares de outros autores ao longo dos anos. Ao final apresentar uma tabela contendo as datas, experimentos e resultados dos valores das diferenças de fase da luz (e em termos de franjas claras ou escuras), comparando os resultados desses experimentos ao longo da história.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O experimento de Michelson-Morley foi realizado em 1887, e os resultados obtidos foram surpreendentes para a época. Os cientistas Michelson e Morley esperavam detectar uma diferença na velocidade da luz medida em diferentes direções, devido ao movimento da Terra em relação ao éter luminífero, uma substância hipotética que se acreditava preencher o espaço e ser responsável pela propagação da luz.

No entanto, os resultados do experimento mostraram que não havia nenhuma diferença observável na velocidade da luz medida, independentemente da direção que o interferômetro estava apontado. Esse resultado nulo foi um grande desafio para a física da época, que estava baseada na ideia do éter luminífero. Ao longo dos anos seguintes, outros cientistas tentaram reproduzir o experimento de Michelson-Morley e verificar seus resultados.

Em geral, essas tentativas confirmaram os resultados originais de Michelson e Morley, mostrando que não havia nenhuma diferença observável na velocidade da luz medida. No entanto, outras medidas mais precisas da velocidade da luz e de outros fenômenos físicos, como a dilatação do tempo e a contração do comprimento, confirmaram a teoria da relatividade de Einstein, que substituiu a ideia do éter luminífero pela noção de que a velocidade da luz é constante em todos os referenciais inerciais.

Hoje, o experimento de Michelson-Morley é considerado um dos experimentos mais importantes da história da física, e seu resultado nulo foi fundamental para o desenvolvimento da teoria da relatividade e para a compreensão da natureza da luz e do espaço-tempo.

5.1 Experimentos Semelhantes

Vários experimentos semelhantes ao de Michelson-Morley foram realizados ao longo do século XX e continuam sendo realizados até hoje, utilizando tecnologias cada vez mais avançadas. Citamos aqui também o experimento de Fizeau que levou a um melhor entendimento da natureza da luz. Alguns desses experimentos são:

5.1.1 *Experimento de Fizeau (1851)*

Foi conduzido por Hippolyte Fizeau em 1851 e utilizou um feixe de luz que passou por um equipamento óptico especialmente projetado para medir a velocidade da luz através da água. Fizeau observou que quando a água estava em repouso, o feixe de luz passava pelo equipamento com certa velocidade, mas quando a água estava em movimento, a velocidade medida era diferente. Esse resultado foi consistente com a ideia de que a luz se move com uma velocidade

finita, e que a velocidade da luz é afetada por meios materiais pelos quais ela passa. (FIZEAU, H. (1851))

5.1.2 Experimento de Michelson-Morley (1887)

Por sua vez, foi conduzido por Albert Michelson e Edward Morley em 1887, e foi projetado para medir a velocidade da luz em diferentes direções, com o objetivo de detectar o éter luminífero, um meio através do qual a luz deveria se propagar. Os resultados do experimento foram surpreendentes: não foi detectada nenhuma diferença na velocidade da luz medida em diferentes direções, o que indicava que o éter luminífero não existia. Esse resultado foi um dos principais motivadores do desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein, que explicou esses resultados sem a necessidade do éter luminífero. (A. MICHELSON and E. Morley (1887)).

5.1.3 Experimento de Michelson-Gale-Pearson (1925)

Esse experimento foi uma tentativa de repetir o experimento de Michelson-Morley, mas levando em conta o movimento da Terra em torno do Sol. Para isso, Michelson se uniu a Henry Gale e Frederick Pearson, e o experimento foi realizado em um túnel subterrâneo de 3 km de comprimento. O experimento queria descobrir a velocidade de rotação da Terra em relação ao éter. Os resultados obtidos foram consistentes com a teoria da relatividade, e não com a teoria do éter luminífero pois a velocidade de rotação da Terra em relação ao éter encontrada foi zero. (MICHELSON, A.A., Gale, H.E., Pearson, F. (1925))

5.1.4 Experimento de Miller (1925)

Esse experimento foi uma tentativa de detectar uma variação na velocidade da luz devido ao movimento da Terra em relação ao éter luminífero. Miller utilizou um interferômetro de alta precisão e realizou medições em diferentes épocas do ano e em diferentes locais. No entanto, os resultados foram inconclusivos e contraditórios com outros experimentos, o que gerou controvérsias e críticas. (MILLER, D.C. (1934))

5.1.5 Experimento de Kennedy-Thorndike (1932)

Esse experimento foi uma tentativa de medir a variação na velocidade da luz em relação a um referencial em movimento. Para isso, Kennedy e Thorndike utilizaram um interferômetro em forma de L, que permitia medir o tempo que a luz levava para percorrer diferentes caminhos.

Os resultados confirmaram a teoria da relatividade e descartaram a teoria do éter luminífero. (KENNEDY, R.J., Thorndike, E.M. (1932))

5.1.6 Experimento de Brillet e Hall (1979)

O experimento de Brillet e Hall usou um interferômetro de Fabry-Perot, que consiste em um par de espelhos paralelos com um espaço vazio entre eles. Um raio de luz é dividido em dois por um divisor de feixe e é refletido pelos espelhos, encontrando-se novamente no divisor de feixe. Se a velocidade da luz for constante, o raio viajando em direção ao espelho movendo-se na direção da Terra levaria mais tempo para viajar do que o raio viajando em direção ao espelho se afastando da Terra. Isso produziria um desvio de interferência que poderia ser medido. O experimento de Brillet e Hall mostrou que a velocidade da luz é constante e não depende do movimento da fonte de luz ou do observador. Ele também mediu a velocidade da Terra ao redor do Sol com uma precisão de 1 metro por segundo. Isso foi importante porque mostrou que a teoria da relatividade de Einstein estava correta no que diz respeito à invariância da velocidade da luz. Em resumo, o experimento de Brillet e Hall de 1979 foi uma importante confirmação da teoria da relatividade de Einstein e demonstrou a constância da velocidade da luz. (BRILLET, A., Hall, J.L. (1979))

5.1.7 Experimento de Schiller, Eisele e Nevsky (2009)

O experimento foi conduzido pelos físicos Stephan Schiller, Christian Eisele e Alexander Nevsky, no laboratório da Universidade de Heinrich-Heine em Düsseldorf, realizado por 13 meses. Eles aprimoraram o experimento de Michelson-Morley fazendo com que o aparelho flutuasse sobre uma fina almofada sobre uma mesa de granito. O experimento foi uma variação do experimento de Michelson, usando uma cavidade óptica para alterar a distância percorrida pela luz. Nesse experimento, um feixe de luz era refletido entre dois espelhos, criando uma série de interferências. O comprimento da cavidade óptica foi então modificado, alterando a distância percorrida pelo feixe de luz. Essa variação no comprimento da cavidade óptica permitiu aos pesquisadores medir a velocidade da luz com uma precisão ainda maior do que o experimento original de Michelson. O experimento confirma a inexistência do éter luminífero com grande precisão. (JOHNSTON, H. (2009))

Esses experimentos foram muito importantes para a compreensão da natureza da luz e da física em geral. O Experimento de Fizeau ajudou a confirmar a ideia de que a velocidade da luz é afetada pelos meios materiais pelos quais ela passa, e o Experimento de Michelson-Morley ajudou a refutar a ideia do éter luminífero, que era um conceito fundamental da física na época. Ambos os experimentos contribuíram significativamente para a evolução da teoria da relatividade, que é um dos pilares fundamentais da física moderna.

Cada um desses experimentos contribuiu para a compreensão da natureza da luz e do espaço-tempo, e para o desenvolvimento da física experimental como um todo. Eles demonstram a importância da pesquisa contínua e da realização de experimentos precisos e rigorosos para testar as teorias científicas e expandir nosso conhecimento sobre o universo.

5.2 Tabela Experimental

Aqui nessa seção, colocamos uma tabela com os resultados dos experimentos em termos de diferenças de fase (em radianos) e centros claros ou escuros.

DATA	EXPERIMENTO	DIFERENÇAS DE FASE	CENTRO CLARO OU ESCURO (CONSTRUTIVA OU DESTRUTIVA)
1851	Experimento de Fizeau	Não se aplica	Não se aplica
1887	Experimento de Michelson-Morley	Nenhuma diferença de fase detectada, conclusão de que não há éter luminífero.	Claro

1925	Experimento de Miller	Diferença de fase encontrada	Escuro
1926	Experimento de Michelson- Gale-Pearson	Diferença de fase de 0,015.	Claro
1932	Experimento de Kennedy Thorndike	Nenhuma diferença de fase detectada, confirmação do experimento de Michelson-Morley	Claro
1979	Experimento de Brillet e Hall	Diferença de fase de 3,5 em 10^{15} , confirmação da relatividade de Einstein.	Claro
2009	Experimento de Schiller, Eisele e Nevsky	Nenhuma uma violação da mudança da velocidade da luz em qualquer direção de 0,6 partes em 10^{17}	Não se aplica

De acordo com o deslocamento deduzido anteriormente, o resultado da diferença de fase para caracterizar a existência do éter, deveria ter um valor perceptível, mas alguns dos experimentos realizados mostraram um valor bem baixo, para a diferença de fase, praticamente nulos.

6 CONCLUSÕES

O experimento de Michelson-Morley foi uma das mais importantes experiências da física, pois levou a uma grande revolução no conhecimento científico. O experimento mostrou que não há um éter luminífero que permeia o universo e que o espaço vazio não é uma entidade passiva, mas sim uma entidade dinâmica que pode ser afetada pela presença de matéria e energia.

Além disso, outros experimentos foram realizados ao longo dos anos para testar a teoria da relatividade e confirmar os resultados obtidos no experimento de Michelson-Morley. Esses experimentos incluem o experimento de Kennedy-Thorndike, o experimento de Brillet e Hall, e o Experimento de Schiller, Eisele e Nevsky. Todos esses experimentos confirmaram as previsões da teoria da relatividade de Einstein e reforçaram a ideia de que o espaço e o tempo são entidades dinâmicas e inter-relacionadas.

Em resumo, o experimento de Michelson-Morley e seus sucessores nos mostram que a física é uma ciência dinâmica, que está em constante evolução. Essas experiências não apenas expandem nosso conhecimento, mas também nos ajudam a compreender a natureza fundamental do universo.

REFERÊNCIAS

EINSTEIN, A., "**Zur Elektrodynamik bewegter Körper**," Annalen der Physik, vol. 17, pp. 891-921, 1905. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053221004>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2023.

A. MICHELSON and E. Morley, "**On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether**," American Journal of Science, vol. 34, pp. 333-345, 1887. Disponível em: <https://history.aip.org/exhibits/gap/PDF/michelson.pdf>. Acesso em: 22 de fevereiro de 2023.

BRILLET, A., Hall, J.L. (1979). "**Improved Laser Test of the Isotropy of Space**," Physical Review Letters, 42, pp. 549-552. Disponível em: https://www.mahag.com/download/brillet_hall.pdf. Acesso em: 10 de março de 2023.

EVERITT, C.W.F., et al. (2011). "**Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity**," Physical Review Letters, 106, 221101. 2011. Disponível em: <https://link.aps.org/accepted/10.1103/PhysRevLett.106.221101>. Acesso em: 03 de março de 2023.

FIGUEIRA, J. **Introdução a Relatividade Especial**. Setembro de 2010. Disponível em: <http://www.pb.utfpr.edu.br/jalves/Aulas/Relatividade/RelatividadeApresentacao2.pdf>. Acesso em: 02 de dez. de 2022.

FIZEAU, H. (1851). "**Note sur une expérience relative à la vitesse de propagation de la lumière**". Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 1851. Disponível em: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fizeau/Fizeau_pdf/CR1849_p90.pdf. Acesso em: 03 de março de 2023.

IFSC/USP. **Interferômetro de Michelson**. Maio de 2013. Disponível em: https://www3.ifsc.usp.br/~lavfis/images/BDApostilas/ApMichelson/Michelson_1.pdf. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

LOYD S. SWENSON, Jr. **THE MICHELSON-MORLEY-MILLER EXPERIMENTS BEFORE AND AFTER 1905**. Disponível em: http://ether-wind.narod.ru/Swenson_1970/Swenson_1970.pdf. Acesso em: 12 de março de 2023.

JOHNSTON, H.. **O experimento de Michelson-Morley é o melhor até agora**. Physics World. 2009. Disponível em: <https://physicsworld.com/a/michelson-morley-experiment-is-best-yet/>. Acesso em: 02 de maio de 2023.

KENNEDY, R.J., Thorndike, E.M. (1932). "**Experimental Establishment of the Relativity of Time**," Physical Review, 42, pp. 400-418. 1932. Disponível em: https://virgilio.mib.infn.it/~oleari/public/elementi_fis_teorica/materiale_didattico/Kennedy-Thorndike_PhysRev.42.400.pdf. Acesso em: 13 de março de 2023.

MARQUES, N. L. R. **Interferência: Sears –capítulo 35**. Disponível em: https://nelsonreyes.com.br/Parte%203%20SEARS%20CAP%2035_Interf.pdf. Acesso em: 27 de nov. de 2022.

MICHELSON, A.A., Gale, H.E., Pearson, F. (1925). "**The Effect of the Earth's Rotation on the Velocity of Light: II**," Astrophysical Journal, 61, pp. 140-145. Disponível em: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-article_query?1925ApJ....61..140M&defaultprint=YES&page_ind=0&filetype=.pdf. Acesso em: 01 de março de 2023.

Michelson, A. A., Pease, F. G., & Pearson, F. "**Measurement of the velocity Of Light In A Partial Vacuum**". 1935. Disponível em: <https://adsabs.harvard.edu/full/1935CMWCI.522....1M>. Acesso em: 01 de abril de 2023.

MILLER, D.C. (1934). "**The Ether-Drift Experiment and the Determination of the Absolute Motion of the Earth**," *Reviews of Modern Physics*. 1934. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/133162a0.pdf>. Acesso em: 04 de março de 2023.

ROTH, A. G. (2018). **INTRODUÇÃO AO ESTUDO DA TEORIA DA RELATIVIDADE I**. São Paulo: Blucher, 2018. Disponível em: <https://docplayer.com.br/191161429-Introducao-ao-estudo-da-teoria-da-relatividade-i-origem-e-evolucao-das-ideias-sobre-a-relatividade.html>. Acesso em: 05 de maio de 2023.

SILVA, R. M. M. da. **Experiencias históricas para a determinação da velocidade da luz**. Disponível em: https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/9581/2/4786_TM_01_C.pdf. Acesso em: 08 de março de 2023.

SANTOS, R. B. B. **Relatividade Restrita–Teoria**.2002. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/31467/mod_resource/content/1/Apostila_Relatividade_e_Fisica2.pdf. Acesso em: 02 de dez. de 2022.

TIPLER, P. A., LLEWELLYN, R. A. **Física Moderna**. 6ª ed.. Grupo Editorial Nacional, 2017. Disponível em: https://www.academia.edu/49273042/F%C3%ADsica_Moderna_6a_Edi%C3%A7%C3%A3o. Acesso em: 22 de abril de 2023.

UFABC. **O Experimento de Michelson-Morley: A Velocidade da Luz**. 2022. Disponível em: <https://propg.ufabc.edu.br/mnpef-sites/relatividade-restrita/o-experimento-de-michelson-morley/>. Acesso em: 27 de nov. de 2022.