

DEIVY MARCK PETRESCU

ESTUDO DA CAUSALIDADE E DE EXPERIMENTOS "CRUCIS"
NA TEORIA DA RELATIVIDADE E TEORIAS ALTERNATIVAS

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto
de Física da Universidade
de Campinas

CAMPINAS, OUTUBRO 1981

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador José Bellandi Filho, a quem devo este trabalho.

Ao Prof. Erasmo Recami pelas sugestões e discussões.

Ao CNPq e à UNICAMP pelo apoio financeiro.

A Neusa pelo trabalho de datilografia.

Aos amigos.

ABSTRACT

The physical meaning of the postulates of the special Relativity Theory and Lorentz Transformations is carefully investigated and clarified. Two alternatives theory are also studied from the causal point of view.

We show, in particular the impossibility of an "experimentum crucis" which can distinguish between those theories and special relativity.

RESUMO

É mostrado o significado físico dos postulados da teoria da Relatividade Especial e das Transformações de Lorentz. Estudamos também duas teorias alternativas do ponto de vista causal.

Em particular mostramos a impossibilidade de um "experimento crucis" que possa distinguir entre essas teorias e a relatividade especial.

INDICE

INTRODUÇÃO..... 1

CAPÍTULO

I - A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA DE EINSTEIN. 6

II - A TEORIA ALTERNATIVA DE IVES..... 15

III - A TEORIA ALTERNATIVA DE MARINOV..... 21

DISCUSSÕES..... 28

APÊNDICE..... 30

...Brasil é o beco do Mota.

Viva o meu país!

I. Brand

INTRODUÇÃO

Este trabalho é um estudo simples sobre a teoria da relatividade restrita, proposta por Einstein em 1905.

A luz dessa teoria faremos um estudo de duas teorias alternativas, as propostas por H.E. Ives e S. Marinov.

A escolha dessas duas teorias alternativas é arbitrária, pois não são as únicas que surgiram em contraposição à teoria de Einstein.

Historicamente, consideramos hoje como a primeira teoria da Relatividade, a que foi proposta por Galileu (sec. XVII). Nessa teoria não se diferenciam os sistemas de referência que se movem entre si com velocidades constantes, os chamados referenciais inerciais.

Na realidade quem deu forma de teoria às idéias de Galileu foi Newton que axiomatizou e aprofundou os estudos de Galileu, assim a teoria da Relatividade Galileana está contida na primeira das três leis de Newton. Essa lei não permitia que se identificasse o espaço absoluto dos demais sistemas inerciais a partir de fenômenos mecânicos, ou seja, criava um grupo de simetria para a teoria.

Em 1860, Maxwell obteve as equações do eletromagnetismo, unificando os conceitos de campo elétrico e magnético. Essas equações davam para a luz um caráter ondulatório, mostrando ser ela uma propagação eletromagnética, o que foi verificado experimentalmente por Hertz em 1888.

As equações de Maxwell não possuem como grupo de simetria o grupo das transformações de Galileu. As equações de Maxwell transformadas mediante este grupo de transformações apresentam termos adicionais que não são verificados experimentalmente.

A atribuição de um caráter ondulatório à luz, fez com que por analogia a outros fenômenos ondulatórios (mecânicos) se procurasse um meio preferencial de propagação para a luz.

Tal meio seria o éter (conceito introduzido por Descartes no século XVII) e imaginava-se que ele seria o espaço absoluto da Mecânica Clássica.

A determinação da velocidade da Terra através do éter, tornou-se crucial para o desenvolvimento da Mecânica e do Eletromagnetismo, e aqui entra a importância da experiência de Michelson e Morley (1887), que com uma incrível precisão para a época pretendia medir efeito de segunda ordem nessa velocidade $(\frac{v^2}{c^2})$.

A experiência tinha como aparato um interferômetro e a idéia era dividir um feixe de luz monocromática em dois feixes de luz, que percorreriam caminhos perpendiculares entre si, fazendo com que esses feixes após percorrerem distâncias iguais interferissem em um telescópio, onde era possível notar com precisão um deslocamento de 0,01 de uma franja.

Esse deslocamento das franjas poderia ocorrer por duas razões; se o aparelho estivesse fixo, pela variação da velocidade da Terra em relação ao éter (movimento de translação e rotação); ou girando-se o aparelho de noventa graus, nesse caso, de-

vido a variação da posição do telescópio em relação à direção da velocidade do éter.

Os resultados experimentais foram nulos, o que causou grande estupefação na época, pois nenhuma teoria previra tal resultado. Experiências semelhantes sucederam-se e os resultados nulos persistiram. Entre as teorias pré-Einstenianas que apareceram para explicar o resultado nulo, a que ainda hoje persiste é a de Lorentz-Poincaré (1903).

Esta teoria está baseada na hipótese "ad hoc" introduzida por Fitzgerald, Larmor e Lorentz, da contração dos corpos que se movem paralelamente em relação ao éter, por um fator $(1 - \frac{v^2}{c^2})^{\frac{1}{2}}$.

A hipótese da dilatação do tempo foi introduzida "ad hoc" para explicar a experiência de Kennedy-Thorndyke, que é análoga à de M - M só que com braços diferentes.

Partindo dessas duas hipóteses Lorentz e Poincaré buscaram uma nova formulação dinâmica, que contivesse essas duas hipóteses e conseqüentemente explicasse satisfatoriamente a experiência de Michelson e Morley. Tal resultado foi conseguido com as chamadas transformações de Lorentz, e o grupo das transformações de Lorentz passou a ser o grupo de simetria dessa nova mecânica e do eletromagnetismo.

As transformações de Lorentz, que dão origem à teoria da Relatividade Restrita e à própria teoria de Lorentz-Poincaré, poderiam nos fazer crer numa aparente similitude entre as duas teorias, mas elas são radicalmente diferentes

A teoria de Lorentz-Poincaré pressupõe a existência de um espaço absoluto (o éter), e efeitos de contração dos corpos e dilatação do tempo sendo efeitos absolutos.

A teoria da Relatividade Restrita proposta por Einstein será estudada no capítulo I, onde mostraremos que seu desenvolvimento foi puramente teórico e quais as consequências desse desenvolvimento. Obteremos a partir dos postulados da teoria as transformações de Lorentz.

No capítulo II estudaremos a teoria proposta por H.E. Ivez para explicar os resultados da experiência de Michelson e Morley.

No capítulo III estudaremos a teoria de Marinov e a sua experiência dos "espelhos acoplados" para medir a anisotropia da velocidade unidirecional da luz, na Terra.

Mostraremos em ambos os capítulos que tais teorias não contradizem a teoria de Einstein e tampouco possuem diferenças que possam ser verificadas experimentalmente. Na realidade as transformações de tais teorias formam um subgrupo das transformações de Lorentz, estando assim contidas na Relatividade Restrita de Einstein.

BIBLIOGRAFIA - INTRODUÇÃO

Para um aprofundamento histórico veja, por exemplo:

- A History of the Theories of Aether and Electricity - Thomas Nelson and Sons - Sir E. Whittaker.

Para uma descrição da experiência de Michelson Morley , seus resultados e experiências posteriores veja:

- Introdução à Relatividade Especial - Ed. Polígono - R. Resnick

Dois trabalhos de H.A. Lorentz podem ser encontrados em:

- The Principle of Relativity - Dover Publications - vários

CAPÍTULO I - A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA DE EINSTEIN

Vamos apresentar a teoria da R.R. proposta por Einstein, fazendo-a ligeiramente diferente de seu trabalho original (1905).

Einstein parte da inconsistência das transformações de Galileu aplicadas às equações de Maxwell e do insucesso das tentativas de descobrir a velocidade da Terra em relação ao éter (não são mencionados os experimentos) para sugerir que os fenômenos mecânicos e eletromagnéticos não possuem propriedades compatíveis com a idéia de um espaço absoluto.

Assim, são enunciados dois postulados para essa teoria:

- a) As leis da Mecânica e do Eletromagnetismo tomam a mesma forma (são covariantes) em todos os sistemas de referência inerciais.
- b) A velocidade da luz, no vácuo, tem o mesmo valor em todos os sistemas de referência inerciais.

É importante notar que este segundo postulado não dá um caráter absoluto para a velocidade da luz, mas sim confere-lhe um caráter de velocidade padrão.

Vamos estudar o significado desses postulados e para isso lançaremos mão de uma expressão bastante conhecida.

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t)$$

onde $dx(t)$, é uma variação na posição duma partícula que se desloca no tempo; dt é o tempo gasto para a partícula cumprir esse deslocamento e v , é a velocidade medida para essa partícula por

determinado observador.

Esta expressão traz consigo uma relação causal entre dois pontos distintos de um mesmo sistema de referência; essa ligação causal chamaremos de sincronização.

Por exemplo; seja uma partícula que no instante t passa pelo ponto x de um determinado sistema de referência e que um observador na posição x desse sistema de referência, dotado de um relógio, observa que a coincidência da passagem da partícula por essa posição é dada temporalmente pela marca t de seu relógio. Quando a partícula passa pela posição $x+dx$, um outro observador, desse sistema procede da mesma maneira, i.e. anota temporalmente a passagem da partícula por essa posição com seu relógio. Para que os dois observadores cheguem a alguma conclusão sobre a velocidade da partícula eles precisam estar ligados causalmente, ou seja, precisam ter seus relógios sincronizados, caso contrário o tempo marcado por um dos relógios não tem significado para o observador de um segundo relógio.

Em suma, eles precisam receber uma informação de uma posição onde a partícula passou para saber o que aconteceu com a partícula naquela posição, e ainda saber traduzir essa informação para seus instrumentos de medida.

Einstein resolveu esse problema com o segundo postulado. Se a velocidade da luz é uma velocidade padrão, então todas as informações devem ser passadas com sinal de luz, o que equivale a dizer que os relógios devem ser sincronizados com sinais de luz, assim o tempo e o espaço deixam de ser padrão cedendo esse privilégio para a luz.

Uma vez que a velocidade da luz é a velocidade padrão tudo deve ser medido a partir dela, assim por exemplo, a distância entre dois pontos estacionários entre si é medida através do tempo que a luz leva para percorrer essa distância.

Para sincronizarmos dois relógios, A e B, afastados e estacionários entre si, o procedimento é o seguinte; num determinado instante de tempo t_A^1 um raio de luz é emitido de A para B, onde será refletido de volta, e recebido pelo relógio A no instante t_A^2 . O relógio B é dito sincronizado com A se no instante da reflexão ele aponta

$$t_B = t_A^1 + \frac{1}{2} (t_A^2 - t_A^1)$$

Este processo de sincronização é responsável pelos efeitos de dilatação do tempo e contração das distâncias paralelas ao movimento. Mostraremos como obter as transformações de Lorentz a partir dessa sincronização.

Estudaremos o caso da sincronização na direção paralela ao movimento e numa direção perpendicular a ele.

Sejam dois sistemas de referência A e B dotados de relógios, réguas e fontes de luz. Esses sistemas têm seus relógios sincronizados da maneira descrita acima, que chamaremos sincronização com luz ou à Einstein, em todas as direções.

Vamos analisar a sincronização de dois relógios do sistema B, visto pelo sistema A. Vamos supor que esses sistemas se locomovem com velocidade relativa v ao longo do eixo dos x .

Para a direção paralela ao movimento: seja x a distância entre os dois relógios de B, medida por A. O tempo que a luz leva para percorrer a distância x e voltar será

$$\frac{x}{c-v} + \frac{x}{c+v} = \frac{2x}{c(1 - v^2/c^2)}$$

Pelo método de sincronização o tempo que o segundo observador em B coloca em seu relógio de acordo com A será a metade desse tempo,

$$T = \frac{x}{c(1 - v^2/c^2)}$$

dizendo que ambos estão sincronizados.

O observador em A, por sua vez discordaria desse processo, pois sob seu ponto de vista, a velocidade da luz não é isotrópica no referencial B. Segundo A, a velocidade da luz indo de um relógio a outro de B é $c-v$ ($c+v$) e portanto, para A, o tempo que a luz leva para chegar até o segundo relógio é

$$T' = \frac{x}{c(1 - \frac{v}{c})}$$

Os observadores de A discordariam do processo de sincronização adotado por B, pois eles veriam uma defasagem entre os tempos marcados nos relógios de B e o que eles deveriam efetivamente marcar, dada por:

$$\delta_{AB} = \frac{x}{c} \left[\frac{1}{(1 - \frac{v}{c})} - \frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})} \right] = \frac{vx}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

com $\delta_{AB} = -\delta_{BA}$.

Na direção perpendicular à direção de movimento, A veria o mesmo processo de sincronização adotado por B, da seguinte maneira (agora $x \rightarrow y$). O tempo para luz ir e voltar ao longo de y será

$$\frac{y}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} + \frac{y}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}} = \frac{2y}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

o relógio de B colocaria a metade desse tempo, dada por

$$T = \frac{y}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2}}$$

como o tempo de ida e volta é o mesmo, A concordaria que nesse caso, os relógios de B estão sincronizados, e logicamente não notaria nenhuma defasagem.

Para seu próprio referencial, B veria a luz percorrer 2 vezes a mesma distância $y = y_B$ num tempo dado por:

$$T_B = \frac{2y_B}{c}$$

e a razão entre os tempos é dada por

$$\frac{T}{T_B} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \leftrightarrow T_B = T\sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Podemos usar $y = y_B$ pois, foi mostrado que A vê a sincronização de B na direção y como uma "boa" sincronização, i.e., os relógios de B na direção y estão sincronizados de acordo com A e B, portanto se para B, $y = y_B$, A concorda com o fato, já que

para comparar essa distância poder-se-ia usar duas barras; uma estacionária em cada um dos sistemas; e a coincidência de seus extremos no mesmo instante.

Para a direção paralela ao movimento B, veria a luz percorrer 2 vezes a distância $x = x_B$, em seu próprio referencial num tempo dado por

$$T_B = \frac{2x_B}{c}$$

e a razão entre os tempos é dada por:

$$\frac{T}{T_B} = \frac{1}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

Devido a defasagem, porém, A discordaria que $x_B = x$, já que um procedimento análogo ao descrito acima nos levaria facilmente a essa conclusão.

T_B foi medido num mesmo relógio de B e T é o tempo, que A veria determinado relógio de B marcar para um determinado intervalo de tempo, assim usando o resultado anterior $T_B = T\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ podemos escrever

$$2T\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{2x_B}{c} = \frac{2x\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{c\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}$$

ou

$$x_B = \frac{x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Do que foi mostrado, vemos que quando um sistema de referência faz medida sobre o outro (no caso, A sobre B), os inter

valos de tempo medidos por um mesmo relógio de A sobre um intervalo de tempo medido por relógios de B, para eventos que ocorrem em B, sofrem uma aparente dilatação, e que intervalos de distância em B, quando medidas por A sofrem uma aparente contração, fenômenos estes que decorrem, como vimos, do método de sincronização.

Para que obtenhamos agora as transformações de Lorentz entre dois sistemas de referência, vamos usar o que obtivemos acima e a transformação de Galileu, dada por

$$x = x' - vt'$$

$$t = t'$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

As duas últimas equações como vimos são idênticas às transformações de Lorentz, e sua dedução já foi feita.

Para a transformação do tempo usamos o fator da dilatação do tempo, o fator de defasagem e a contração das distâncias. Para a defasagem temos:

$$\delta_{AB} = \frac{vx}{c^2(1 - \frac{v^2}{c^2})} = \frac{vx_B}{c^2\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

portanto teremos para o tempo, a seguinte expressão

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2} x}{\sqrt{(1 - v^2/c^2)}}$$

Para a transformação de x devemos nos lembrar que a contração do comprimento na direção do movimento só tem sentido quan

do a medida é feita no mesmo instante de tempo, e que a transformação de Galileu deve ser boa em primeira aproximação, portanto:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Logo as transformações de Lorentz serão:

$$x = \frac{x' - vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t = \frac{t' - \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$y = y'$$

$$z = z'$$

As transformações de Lorentz foram obtidas teoricamente, usando-se somente o fato de que é a luz que estabelece a ligação causal entre dois pontos de um mesmo sistema de referência.

Uma distância invariante por essas transformações tem a forma

$$ds^2 = cdt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 .$$

Particularmente para o caso da luz $ds^2 = 0$. Em uma direção teremos

$$dt = \frac{dx}{c} .$$

O que quer dizer que o intervalo de tempo medido por dois relógios distintos num mesmo sistema de referência são dependentes de coordenadas internas do sistema.

BIBLIOGRAFIA - CAPÍTULO I

Veja "On the Electrodynamics of Moving Bodies"

A. Einstein.

- The Principle of Relativity - Dover Publications

vários.

CAPÍTULO II - A TEORIA ALTERNATIVA DE IVES

Não obstante a teoria da Relatividade Restrita de Einstein ser compatível com os resultados experimentais, novas tentativas de interpretação das exp. tipo Michelson-Morley surgiram. Em 1937 Ives propõe uma teoria alternativa e sugere uma experiência, realizada em 1938, para decidir qual das teorias deve ser aceita.

Segundo Ives, a experiência de M.M. pode ser explicada fazendo-se a hipótese de que o aparato se contrai na direção do movimento na razão

$$\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2} \right]^{n+1} : 1$$

e na direção perpendicular ao movimento na razão

$$\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2} \right]^n : 1$$

Para o experimento de KT, onde os braços do aparelho são diferentes, a frequência dos relógios devem ser alteradas na razão

$$\left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2} \right]^{n-1} : 1$$

Não obstante essas experiências não determinem o valor de n, Ives particulariza para n=1. Nessa situação as transformações entre sistemas de referência serão:

$$\begin{aligned} t' &= \tau_e \\ x' &= \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) (x_e - v \tau_e) \\ y' &= \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2} y_e \\ z' &= \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) z_e \end{aligned}$$

onde (τ_e, X_e, Y_e, Z_e) são as coordenadas do éter, (t', x', y', z') são coordenadas de um sistema S' que se move com velocidade $v (= v_x)$ em relação ao éter. Chamaremos essas transformações de transformações de Ives.

Em sua experiência de determinação de n Ives estuda o efeito Doppler em tubos de raio canal.

A partir das transformações de Ives para o efeito Doppler obtemos

$$\nu' = \nu \frac{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right) \cos \phi}{1 - \left(\frac{v_s}{c}\right) \cos \phi}$$

onde ν' é a frequência observada por S' , de uma onda emitida por S_s , sistema de referência que se move com velocidade v_s em relação ao éter, ϕ é o ângulo entre o eixo do movimento dos corpos se deslocando e a direção dos raios entre eles.

Assim para o caso de $\phi=0$,

$$\nu' = \left[1 + \frac{v_c}{c} + \frac{v_c^2}{c^2} + \frac{v_0 v_c}{c^2} + \dots \right] \nu_0$$

onde $v_c = (v_s - v_0) (1 - v_0^2/c^2)^*$

Para o caso de $\phi = \pi$, temos:

$$\nu' = \left[1 - \frac{v_c}{c} + \frac{v_c^2}{c^2} + \frac{v_0 v_c}{c^2} + \dots \right] \nu_0$$

Para o caso de $\pi/2 = \phi$, devido a aberrações teremos $\cos \phi = v_0/c$ portanto:

* Em seu trabalho Ives escreve $v_c = (v_s - v_0)$ um deslize que não compromete efeitos até segunda ordem.

$$v = v_0 \left[1 + \frac{v_0 v_c}{c^2} \right]$$

levando em conta efeitos até segunda ordem.

Os resultados previstos pela Relatividade Restrita, para o efeito Doppler são:

$$\phi = 0, \quad v' = v_0 \frac{1 + v_c/c}{\sqrt{(1 - v_c^2/c^2)}};$$

$$\phi = \pi, \quad v' = v_0 \frac{1 - v_c/c}{\sqrt{(1 - v_c^2/c^2)}}$$

e

$$\phi = \pi/2, \quad v' = v_0 \left(1 - \frac{v_c^2}{c^2}\right)^{1/2}$$

onde v_c é dado por

$$v_c = \frac{v_0 \pm v_s}{1 \pm \frac{v_0 v_s}{c^2}}$$

Segundo Ives, notamos algumas diferenças entre as duas teorias. No caso do efeito Doppler para direções perpendiculares ($\phi = \pi/2$) a frequência observada é reduzida para o caso da Relatividade Restrita e aumentada no caso das transformações de Ives. No caso da Relatividade Restrita a velocidade do observador em relação ao éter é eliminada, e isto só ocorre para o caso $n=0$, o que torna o efeito invariante com respeito a translações no éter, mas não nulo.

No caso da experiência de Michelson-Morley esse efeito é não só invariante mas também nulo, o que, segundo Ives lhe dá o caráter de indeterminação do número n .

Vamos analisar as transformações de Ives, e mostraremos que nenhuma experiência determinaria esse fator n , que pode ser introduzido com qualquer valor sem alterar o conteúdo físico das transformações.

Quando escrevermos $t' = \tau_e$, relacionamos as coordenadas de um sistema de referência inercial qualquer, com as do éter (a temporal, no caso). Mas vejamos o que acontece quando escrevermos em função de suas próprias coordenadas. Sabemos que para o éter vale, no caso da luz

$$ds^2 = 0 = c^2 d\tau_e^2 - dX_e^2 - dY_e^2 - dZ_e^2$$

e usando as transformações de Ives temos:

$$c^2 dt'^2 - \left(\frac{dx'}{(1 - \frac{v^2}{c^2})} - v dt' \right)^2 = 0$$

para a direção paralela ao movimento. Resolvendo para cdt' obtemos:

$$cdt' = \left(\frac{dx'}{c} + \frac{v}{c^2} dx' \right) \frac{1}{(1 - \frac{v^2}{c^2})^2}$$

Nada foi dito a respeito da relação causal entre dois pontos de um sistema qualquer, exceto para o éter que vê a luz propagar-se isotropicamente e portanto pode usá-la como conexão causal.

Podemos dizer então, que a expressão acima nos fornece essa relação, e notamos que dt' tem o mesmo caráter de dt do capítulo anterior, com a diferença que, supondo a existência do éter, a velocidade de qualquer sistema em relação a ele, aparece como

um fator intrínseco dessa relação causal. Portanto podemos dizer que essa relação causal leva à existência de um "efeito Doppler" entre dois pontos de um mesmo sistema.

A sincronização implícita nas transformações de Ives, nos diz que o éter tem seus relógios sincronizados com luz e os demais sistemas de referência usam o relógio do éter para sua leitura de tempo.

Consideremos o exemplo da partícula e dos observadores em x_1 e x_2 de um sistema inercial que não o éter. Quando a partícula que se move em relação a esse sistema passa pelo observador em x_1 , este anota temporalmente esta coincidência espacial, dando a coordenada τ_e , que ele observa em um relógio estacionário no éter que, juntamente com a partícula, coincide espacialmente com o observador em x_1 . Cada coincidência espacial de um ponto de um sistema inercial e partículas determinadas, implica na coincidência desse ponto com relógios estacionários no éter. O mesmo se daria para o observador em x_2 e assim esses observadores não poderiam independentemente medir a velocidade da partícula.

Numa experiência não existe uma "calibração externa", tudo é medido e comparado com outras experiências feitas em laboratório, eliminando-se assim o papel intermediário do éter, tornando-se impossível detetar nessas experiências qualquer efeito etéreo, obtendo-se assim os resultados da relatividade restrita. Veja apêndice I.

BIBLIOGRAFIA - CAPÍTULO III

- J.O.S.A. 27, 177 (1937) - H.E. Ives.
- J.O.S.A. 27, 389 (1937) - H.E. Ives.
- J.O.S.A. 28, 215 (1938) - H.E. Ives e G.R. Stilwell.

CAPÍTULO III - A TEORIA ALTERNATIVA DE MARINOV

Marinov publica em 1974 um trabalho citando uma experiência por ele realizada em que foi medida uma anisotropia na velocidade da luz, em outras palavras, mediu-se a velocidade da Terra em relação ao éter.

Em vários trabalhos que se seguiram, Marinov desenvolveu uma teoria que explicava a experiência de Michelson - Morley e uma experiência por ele realizada; a experiência dos "espelhos acoplados".

É suposto por Marinov que de acordo com a sincronização utilizada, somos levados às transformações do tipo Lorentz ou do tipo Galileu. Pressupõe ainda Marinov, a existência de um espaço absoluto.

Algumas das conclusões a que chega Marinov são:

- a) A dilatação do tempo é um fenômeno absoluto (como supunha Lorentz) e não relativo (como acreditava Einstein).
- b) A contração do comprimento é pura ficção, i.e., não é nem um fenômeno absoluto (como supunha Lorentz) nem um fenômeno relativo (como supunha Einstein).

O estudo detalhado dessa teoria foge ao escopo deste trabalho, nós vamos nos ater a um estudo da experiência dos "espelho acoplados" e mostrar que nenhum resultado é teoricamente previsto ainda que usemos o que vamos chamar de as transformações de Marinov.

Na figura 1 temos o esquema da experiência de Marinov.

O EXPERIMENTO DE MARINOV

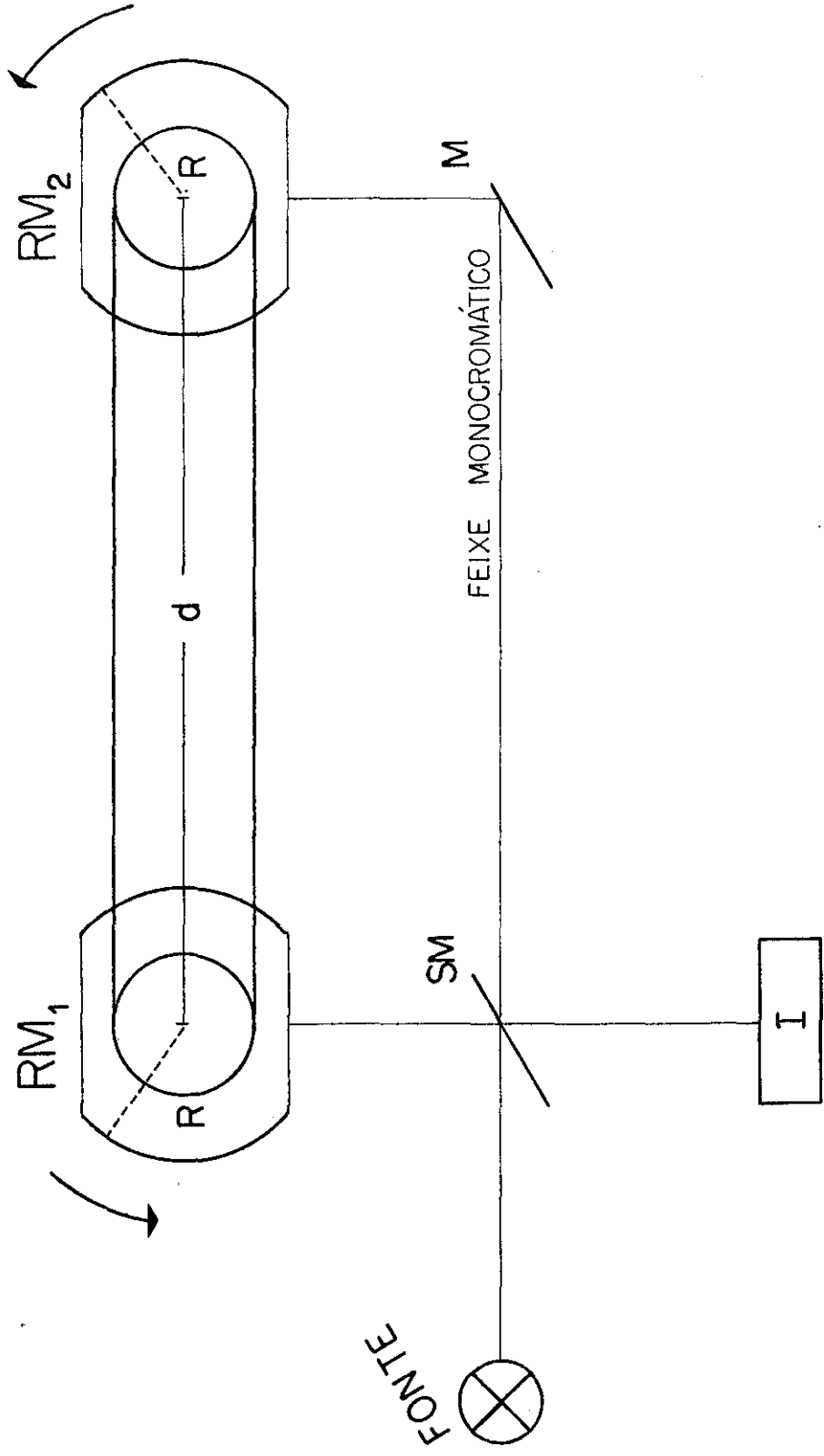


FIG. 1

S.M. é um semi espelho, F um feixe de luz monocromática e RM_1 e RM_2 são cilindros parcialmente espelhados que podem girar sobre seu eixo, e são acoplados por uma corréa e I é um interferometro.

As transformações de Marínov são dadas por

$$x' = \frac{x_e - vt_e}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t' = \frac{t_e}{(\sqrt{1 - v^2/c^2})^{-1}}$$

$$y' = y_e$$

$$z' = z_e$$

onde as coordenadas com e representam o éter e as com ' representam um sistema de referência inercial com velocidade $v(=v_x)$ em relação ao éter.

Quando o aparato estiver estacionário no éter, a figura de interferência é causada pela diferença de caminhos, e o tempo que a luz demora para percorrer essa diferença é dada por

$$\delta t_e = \frac{2d_e}{c}$$

Se os cilindros forem postos a girar em torno de seu eixo teremos então, como diferença de caminho entre os dois casos (o cilindro parado ou girando)

$$\delta p_e = \frac{2\Omega_e R d_e}{c}$$

onde Ω_e é a velocidade angular (constante) com que os espelhos são postos a girar (para Marínov essa propagação é instantânea, ou

seja os dois espelhos giram simultaneamente), o fator 2 entra pois quando um espelho gira de α , o raio refletido gira de 2α ; R e d são mostrados na figura 1.

Quando o aparelho se move em relação ao éter, e não há espelhos girando, um observador no éter verá essa defasagem dada por:

$$\delta t_e = \frac{2d_e}{c(1 - \frac{v^2}{c^2})}$$

Fazendo os espelhos girar, devido à propagação instantânea da rotação dos dois espelhos, RM₂ vai causar uma deflexão que só depende do raio transmitido, portanto da velocidade em um sentido da luz.

Nesse caso o tempo de rotação do espelho RM₂, visto pelo referencial que se move, é dado por

$$\delta t' = \frac{d'}{c-v} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} = \frac{d'}{c} \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

e a diferença de caminho óptico é dada por

$$\delta p' = 2 \frac{d'}{c} \Omega' R \left(1 + \frac{v}{c}\right)$$

haveria um deslocamento das franjas da mesma maneira, mas o deslocamento seria distinto pois as diferenças de caminho óptico diferem entre si por:

$$\Delta = \frac{2vd\Omega R}{c^2}$$

que depende da velocidade da Terra em relação ao éter, que deve variar com o passar do dia, sendo portanto um efeito observável.

Exatamente como fizemos nos capítulos anteriores, vamos verificar como se dá a conexão causal. Usaremos o fato que ds^2 no éter tem valor zero para a luz. Então

$$c^2 dt_e^2 - dx_e^2 - dy_e^2 - dz_e^2 = 0$$

Logo para uma direção;

$$\frac{c^2 dt'^2}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} - \left[dx' \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2} + \frac{v dt'}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{1/2}} \right]^2 = 0$$

Desenvolvendo e resolvendo para cdt' chegamos

$$cdt' = dx' + \frac{v}{c} dx'$$

Novamente na ligação causal aparece um "efeito Doppler" intrínseco.

A sincronização nesse caso seria feita da seguinte maneira, os relógios dos sistemas inerciais, ajustar-se-iam no instante $t=0$, marcado pelos relógios do éter; o único sistema que tem seus relógios sincronizados por luz. Isto quer dizer que quando um observador passasse por um relógio do éter que marcasse $t=0$, ele colocaria em seu relógio $t'=0$ e depois o deixaria seguir em sua frequência natural, dilatada em relação ao éter. Para esse tipo de sincronização a simultaneidade é absoluta, pois novamente o éter faz um papel intermediário entre as medidas de um mesmo sistema.

Portanto as experiências feitas sem levar em conta o papel intermediário do éter em suas medidas, estão fadadas a cair no vazio em suas medidas.

No Apêndice I vamos mostrar como essa transformação e a de Ives recaem no caso da Relatividade Restrita e que o valor de Δ previsto para o caso do aparato estar no éter ou em um outro sistema inercial qualquer anula-se.

Sobre o valor de Δ podemos verificar que ele é análogo ao caso de dt' pois

$$dt' = \frac{dx'}{c} + \frac{v}{c^2} dx'$$

$$dt_e = \frac{dx_e}{c}$$

e o Δt nesse caso é dado por

$$\Delta t = \frac{v dx'}{c^2}$$

e Δ tem a expressão

$$\Delta = 2 \left(\frac{dv}{c^2} \right) R$$

mas o valor $\frac{dv}{c^2}$ é exatamente Δt , portanto a explicação de Δt acarreta na aplicação de Δ

BIBLIOGRAFIA - CAPÍTULO III

- Czech J.Phys. B 24 (1974) S. Marinov.

- Found. of Phys Vol. 9 n°s 11/12 (1979) S.J.Proklovnik.

- Found of Phys Vol. 8 n°s 9/10 (1978) S. Marinov.

- Found of Phys Vol. 8 n°s 7/8 (1978) S. Marinov.

- Int. Journal of Theoretical Phys. Vol. 13 n° 3 (1975) S. Marinov.

- Found of Phys. Vol 9 n°s 5/6 (1979) S. Marinov.

* Este trabalho é um comentário a respeito de uma crítica a sua teoria. Para consultas a referência é

- Found of Phys. Vol. 8 n°s 9/10 (1978) - Zoran Vrcelj.

DISCUSSÕES

Fizemos um breve relato histórico do desenvolvimento das teorias de relatividade. Demos especial ênfase a experiência de Michelson-Morley e as quatro teorias distintas que explicam os resultados dessa experiência - Lorentz-Poincare, Einstein, Ives e Marinov.

O resultado efetivo desta experiência foi o de que o tempo que a luz demora a percorrer uma determinada distância, ida e volta, quando medido num só ponto do espaço, é independente da direção percorrida.

As quatro teorias, sobre as quais discorreremos, criam modelos para explicar tal fato; contrações ou a constância da velocidade da luz, portanto, não podem ser verificados por esta experiência.

Outras experiências tampouco as diferenciariam, pois se medissem o tempo de ida e volta recairiam no caso da experiência anterior, se visassem medir a velocidade da luz num só sentido, deveriam fazer uma hipótese sobre a propagação da luz nesse sentido.

Ora, uma hipótese é uma arbitrariedade imposta "a priori" para tal experiência (ou seja, a velocidade da luz é, ou não é, isotrópica) e logicamente não se pode medir tal hipótese, atribuindo-lhe um caráter "a posteriori".

Sem que se imponha uma conexão causal entre dois pontos, não é possível medir uma velocidade qualquer. Só impondo-se uma velocidade é que se estabelece essa conexão causal en-

tre dois pontos de um mesmo sistema.

Exatamente por esta lacuna não pode haver um caráter crucial em experiência alguma.

Salientamos que a diferença básica entre as teorias, é o fato de que as teorias de Ives e Marinov não possuem métricas diagonais ($n_{\nu\mu} \neq \delta_{\nu\mu}$), portanto o trabalho desenvolvido no apêndice, nada mais é, que a diagonalização de uma matriz por argumentos físicos.

APENDICE I

Mostraremos como uma transformação geral recai no caso das transformações de Lorentz; quando se elimina o papel intermediário do éter.

As transformações de Ives e Marinov tem a forma de

$$x' = (X - vT) b(v)$$

$$t' = a(v) T$$

$$y' = d(v) Y$$

$$z' = d(v) Z$$

onde a, b, d são funções da velocidade e as coordenadas maiúsculas indicam o éter.

Lembrando que no éter temos para a luz $ds^2 = 0$; unidirecionalmente podemos resolver $ds^2 = 0$, analogamente ao que fizemos no texto e obteremos

$$cdt' = \frac{(1 + \frac{v}{c}) dx' a(v)}{(1 - \frac{v^2}{c^2}) b(v)}$$

para a direção x e;

$$cdt' = \frac{a(v)}{d(v)} dy'$$

para a direção y. Usando os valores de a, b, d para a transformação de Marinov obtemos

$$a(v) = \frac{1}{b(v)} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad \text{e} \quad d(v) = 1$$

$$dt' = \frac{dx'}{c} + \frac{v}{c^2} dx'$$

$$\frac{dx'}{c} = dt = dt' - \frac{v}{c^2} dx'$$

$$dt = a(v) T - \frac{v}{c^2} dx'$$

onde dt é a nova coordenada temporal que elimina o papel do éter. É fácil verificar que a transformação de dt é a de Lorentz para o tempo.

Para o caso das transformações de Ives teremos

$$a(v) = 1, \quad b(v) = d^2(v) = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^2 dt' = \frac{dx'}{c} - \frac{v}{c^2} dx'$$

para a direção x e

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

se fizermos $\frac{dy'}{c} = dt$, sendo dt novamente a coordenada temporal que elimina o papel do éter teremos

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

donde se conclue que então $y = Y$. Para a expressão de x teremos

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^2 dt' = \frac{dx'}{c} - \frac{v}{c^2} dx'$$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left[\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) dt' - \frac{v}{c^2} dx' \right] = \frac{dx'}{c}$$

$$\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \left[dT - \frac{v}{c^2} X \right] = \frac{dx'}{c} \quad (*)$$

Lembrando que quando $y=Y$ e que para $dt = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} dT$ quando o éter faz a medida implica em $dT = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{1/2} dt$ quando o sistema inercial faz a medida.

Usando essa reversibilidade, o fato de que em (*) quem faz a medida é o sistema inercial e ainda que o relógio na origem pode marcar tanto o tempo na direção x , como na y , temos, por coerência que dividir (*) por $(1 - \frac{v^2}{c^2})^{3/2}$.

A expressão (*) toma a forma de:

$$\frac{\left[dT - \frac{v}{c^2} X \right]}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2}} = dt = \frac{1}{c} \frac{dx'}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{3/2}}$$

teremos então a nova transformação

$$\frac{T - \frac{v}{c^2} X}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2}} = t'$$

$$Y = y'$$

$$Z = z'$$

e finalmente para x teremos

$$x' = \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) (X - vT) = x \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{3/2}$$

$$\therefore x = \frac{X - vT}{\left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)^{1/2}}$$

onde x é a nova coordenada tipo espaço, que independe da calibração externa, recaindo assim na transformação de Lorentz.

Assim o papel do éter depende da transformação utilizada, a Física não.