



MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUIÇÃO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
AMAZONAS

MESTRADO NACIONAL PROFISSIONAL EM ENSINO DE FÍSICA

POLO 04

Emerson Bruno Oliveira Castro

PRODUTO EDUCACIONAL

Cinemática Relativística: Construção de uma UEPS para o Novo Ensino Médio por um olhar
histórico e com o uso de simulações

Manaus - AM

2024

Emerson Bruno Oliveira Castro

Cinemática Relativística: Construção de uma UEPS para o Novo Ensino Médio por um olhar histórico e com o uso de simulações

Dissertação apresentada ao Polo 04 do Programa de Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física da Universidade do Estado do Amazonas e do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ensino de Física. Área de concentração:

Orientador: José Ricardo de Sousa

Manaus - AM

2024

Biblioteca do IFAM – Campus Manaus Centro

C355c Castro, Emerson Bruno Oliveira.
Cinemática Relativística: construção de uma UEPS para o novo ensino médio por um olhar histórico e com o uso de simuladores / Emerson Bruno Oliveira Castro. – Manaus, 2024.
64 p. : il. color.

Produto educacional proveniente da dissertação - Cinemática Relativística: construção de uma UEPS para o novo ensino médio por um olhar histórico e com o uso de simuladores (Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física). – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, *Campus Manaus Centro*; Universidade Federal do Amazonas, 2024.

Orientador: Prof. Dr. José Ricardo de Sousa.
ISBN 978-65-85652-79-7

1. Cinemática relativística. 2. Simulações interativas. 3. Aprendizagem significativa. 4. Avaliação formativa. I. Sousa, José Ricardo de (Orient.). I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. II. Universidade Federal do Amazonas. III. Título.

CDD 531.112

Elaborada por Márcia Auzier CRB 11/597

Dedico este trabalho a toda à minha família.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela dádiva da vida, pela coragem e saúde e também à espiritualidade amiga que blindou de qualquer espírito que pudesse me desviar deste caminho.

À minha família, à minha mãe, ao meu falecido pai e aos meus irmãos.

Ao meu orientador, pela dedicação, paciência, ensinamentos e comprometimento que foram fundamentais para nortear minhas atividades e a conclusão desta dissertação.

Aos professores da UFAM e do IFAM/POLO 04 por partilhar seus conhecimentos acadêmicos e suas experiências.

Estendo meus agradecimentos à Sociedade Brasileira de Física pela oportunidade concedida e pelo desenvolvimento do Mestrado Nacional Profissional em Ensino de

À CAPES, o presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Agradeço pelo apoio a esse programa de mestrado.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte dessa formação, o meu muito obrigado!

Lista de abreviaturas

BNCC Base Nacional Comum Curricular

FMC Física Moderna e Contemporânea

MNPEF Mestrado Profissional em Ensino de Física

PCN's Parâmetros Curriculares Nacionais

PCP-EM Proposta Curricular e Pedagógica do Ensino Médio do Estado do Amazonas.

RCA Referencial Curricular Amazonense

SBF Sociedade Brasileira de Física

UEPS Unidade de Ensino Potencialmente Significativa

Sumário

1 Introdução	6
MATERIAL PARA AUXÍLIO AO PROFESSOR	7
Mecânica Relativística	7
CAPÍTULO 1	7
HIPÓTESE DE FRESNEL	7
CAPÍTULO 2	11
EXPERIMENTO DE MICHELSON-MORLEY	11
2.1 - POINCARÉ, LORENTZ E OS CONFLITOS NA FÍSICA	12
CAPÍTULO 3	18
TEORIA DA RELATIVIDADE - Os Postulados da Teoria da Relatividade Restrita	18
3.1 - A experiência de Michelson-Morley e o pensamento de Einstein	19
3.2 - AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ	22
3.2.1 - Conseqüências das transformações de Lorentz	26
3 - PARADOXO DO GÊMEOS	28
4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS	29
5 - SEQUÊNCIA DIDÁTICA	29
5.1 - Aula 01 - Tempo de 48 minutos	29
5.2 - Aula 02 - Tempo de 48 minutos	36
5.3 - Aula 03 - Tempo de 48 minutos	46
5.4 - Aula 04 - Tempo de 48 minutos	51
Considerações finais	55
Referências Bibliográficas	56

1 Introdução

No primeiro momento, o Professor deve comentar sobre as curiosidades da relatividade a fim de desenvolver a curiosidade dos alunos, falar sobre super velocidades, viagens no tempo etc. Uma dica importante é indicar filmes que tratam o tema. Tudo isso leva poucos minutos e pode ser feito no fim de uma aula de um outro assunto.

Logo abaixo há um texto exclusivo ao professor e logo depois um outro texto que deve que deve ser repassado aos alunos para leitura prévia a aula de cinemática Relativística. Trata-se do desenvolvimento da Relatividade Restrita com um olhar histórico.

A ideia neste ponto é introduzir as concepções de ciência e o pensamento científico, uma busca de um olhar crítico o qual o aluno possa ser envolvido com as aulas, que saiba lidar com suas eventuais concepções espontâneas, que identifique as transformações do pensamento científico percebendo que as teorias científicas não são definitivas.

MATERIAL PARA AUXÍLIO AO PROFESSOR

Mecânica Relativística

Certos experimentos, tais como os conduzidos por Fizeau e Michelson-Morley, juntamente com a consideração da hipótese de Fresnel e a persistência na aceitação do éter, além de outras características científicas da época, são abordados para fornecer orientações ao contexto no qual a teoria da relatividade será desenvolvida.

Os trabalhos de eminentes cientistas, como Poincaré e Lorentz, são analisados com o objetivo de desmistificar a noção errônea sobre os grandes gênios, que retrata Einstein como um ser “todo-poderoso” que singularmente descobriu a teoria da relatividade. Embora o trabalho de Einstein seja, sem dúvida, meritório, sua conquista não apenas resulta de sua notável habilidade e dedicação como físico teórico, mas também é influenciada pelo trabalho de outros cientistas anteriores e contemporâneos a ele, assim como pelas questões conflitantes que permeavam a comunidade científica da época.

CAPÍTULO 1

Hipótese de Fresnel

No século XIX, a organização da óptica ondulatória fundamentava-se na presença de um éter luminoso. Diversas experiências foram conduzidas, e diante da tentativa de interpretá-las, emergiram diversas hipóteses acerca do éter. Cada teoria apresentava uma proposta distinta sobre o comportamento desse fluido em relação aos corpos materiais, sendo as teorias mais influentes as desenvolvidas por George Gabriel Stokes, Thomas Young e Augustin Jean Fresnel.

No período de 1725 a 1726, Bradley, com o objetivo de mensurar o fenômeno da paralaxe astronômica das estrelas fixas, registra uma alteração na posição de uma estrela. A paralaxe é um fenômeno resultante do movimento anual da Terra.

Observando a figura (2.1), uma estrela¹ E é observada sob um ângulo Z_1 , enquanto a Terra está na posição P_1 de sua órbita. Então, seis meses depois, a mesma estrela é observada sob um ângulo Z_2 e a Terra está na posição P_2 . A diferença na medida desses ângulos, ou seja, na medida da posição da estrela em função da posição da terra, é chamada de paralaxe. Porém a variação encontrada na observação feita por Bradley era num plano perpendicular ao plano que a teoria previa para paralaxe. Este fenômeno ficou conhecido como Aberração das estrelas fixas, e estava relacionado com o movimento de translação da Terra. No caso da aberração, como apresentado na figura (2.2), o ângulo de aberração é o formado entre EP_1 e E_1P_1 .¹

¹ Estrela gama da constelação de Dragão

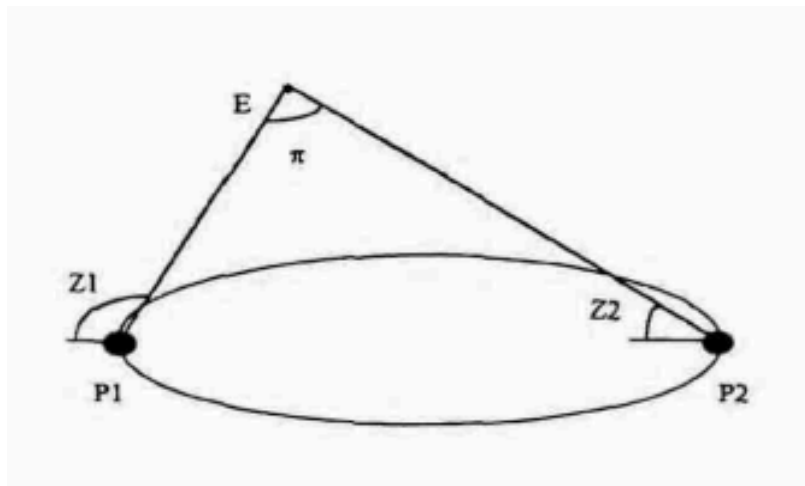


Figura 1.0 — Estrela E observada da Terra sob dois ângulos diferentes (Z_1 e Z_2), enquanto a Terra se encontra, respectivamente, nas posições P_1 e P_2 defasada em seis meses. (PIETROCOLA, Mauricio. Ago/1993. p.159)

Fonte: Monografia apresentada no Curso de Especialização em Ensino de Física da UFSC, Cavalcanti, Welchy Leite

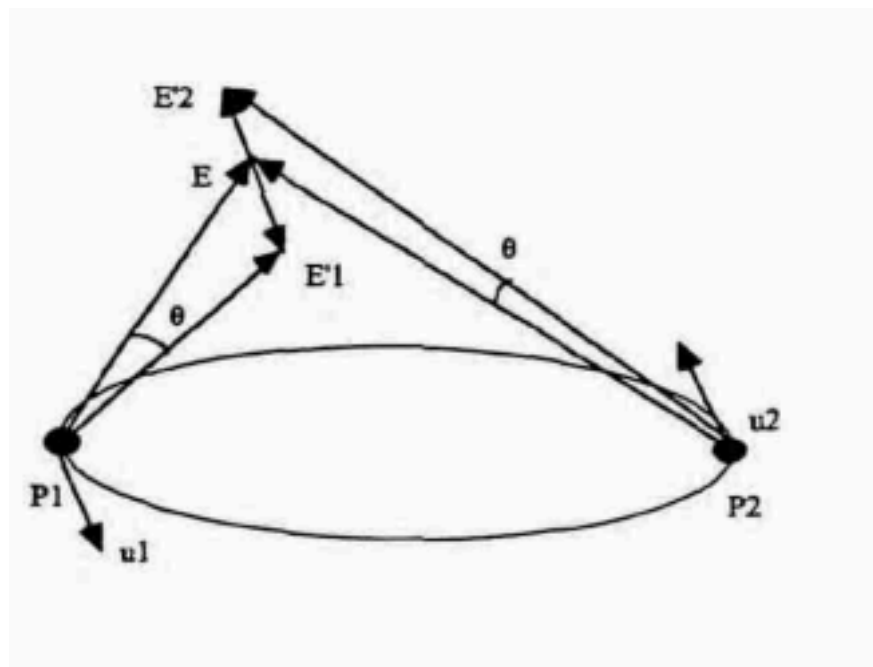


Figura 1.1 — A estrela E é observada a partir da Terra. Nas posições P_1 e P_2 , μ_1 e μ_2 representam, respectivamente, as direções do deslocamento terrestre. A posição E_1 é obtida a

partir da composição da direção de propagação da luz emitida pela estrela na direção EP, e a velocidade u de translação da Terra. (PIETROCOLA, Mauricio. Ago/1993, p.160)

Fonte: Monografia apresentada no Curso de Especialização em Ensino de Física da UFSC, Cavalcanti, Welchy Leite

Naquela época, a teoria newtoniana da luz prevalecia no cenário científico. Portanto, ao abordar a aberração, Bradley, ao considerar que a luz era composta por diminutos corpúsculos de matéria, aplicou as leis da mecânica de corpos rígidos. A explicação para a aberração baseou-se na variação da trajetória de um corpo em relação ao movimento relativo ao observador, ao realizar uma composição de movimento entre a direção de propagação da luz emitida pela estrela e a velocidade de translação da Terra. Dessa maneira, o fenômeno da aberração indicou que a propagação luminosa poderia ser influenciada pelo movimento dos corpos materiais, variando de observador para observador, conforme seu movimento relativo. Dentro da perspectiva corpuscular da luz, a aberração não seria um fenômeno incomum, pois representaria uma possível consequência dentro da mecânica newtoniana.

No início do século XIX, com o "renascimento" da óptica ondulatória, surgiram explicações para a aberração sob a perspectiva ondulatória. Em 1804, Young apresentou uma explicação para a aberração, baseando-se na teoria da luz conforme a concepção de Huygens. Ele considerou o éter como um meio que preenchia o espaço, sendo um fluido material infinito, homogêneo e isotrópico que permeava todos os corpos. No entanto, Young teve que incluir a proposição de que o éter era totalmente imóvel no espaço e não influenciado devido ao movimento da Terra, Young acreditava que o éter penetrava um corpo material com praticamente nenhuma resistência, tão livremente quanto o vento passando através das árvores. Com essa premissa, torna-se viável considerar que o éter não é perturbado pelo movimento da Terra, o que descarta a possibilidade de uma composição entre a velocidade de translação da Terra em sua órbita e a velocidade de propagação da luz.

A observação sistemática do fenômeno da aberração revelou um ângulo de aberração idêntico para diferentes estrelas, sugerindo, assim, a constância da velocidade da luz. Isso representava uma incompatibilidade com a teoria corpuscular, uma vez que, nesse cenário, a velocidade de propagação dos corpúsculos de luz no espaço dependeria das dimensões dos corpos emissores. Biot e Arago conduziram experimentos, verificando a constância do ângulo de aberração para diversas estrelas. Em 1810, Arago realizou uma nova série de experimentos, explorando a possibilidade de combinar o movimento da Terra com a

propagação da luz, na esperança de observar desigualdades nas medidas dos desvios da luz. Mais uma vez, os resultados obtidos foram em vão, reforçando a sugestão de que a velocidade da luz era constante.

A teoria de Young, proposta em 1804, que considerava o éter como totalmente transparente e imóvel, não oferecia uma explicação adequada para os resultados dos experimentos realizados por Arago em 1810. Por outro lado, a hipótese de um éter completamente arrastado pelo movimento terrestre poderia explicar satisfatoriamente esse resultado, mas, ao mesmo tempo, não conseguia dar conta da explicação para a aberração.

Arago escreve a Fresnel em busca de uma possível reconciliação entre os resultados da aberração e seus experimentos de 1810 com a concepção ondulatória da luz. Em 1818, surge uma proposta para solucionar tal questão. Mesmo sem ter conhecimento da hipótese de Young, Fresnel propõe um éter imóvel no espaço, contudo, com uma pequena parte dele sendo arrastada pelos corpos transparentes em movimento junto com a Terra. Apesar da semelhança com a proposta de Young, o fato de o éter sofrer essa pequena influência do movimento terrestre explica tanto a refração (resultados do experimento de Arago em 1810) quanto a aberração. Essa hipótese ficou conhecida como o arrastamento parcial do éter luminoso. A expressão encontrada por Fresnel para a propagação de uma onda luminosa no interior do éter foi:

$$v_p = c \pm \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v \quad (1.0)$$

Sendo n o índice de refração do corpo que se move com velocidade v em relação ao éter. E o termo:

$$v_f = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)v \quad (1.1)$$

Designa a variação da velocidade de propagação das ondas luminosas dentro de um meio transparente em movimento, e é conhecido como o coeficiente de Fresnel.

A teoria de Fresnel enfrentou várias críticas, inclusive por parte do próprio Fresnel, que em diversos momentos reconheceu que o arrastamento parcial do éter não podia ser completamente integrado às bases mecânicas da concepção ondulatória da luz. Uma das falhas identificadas era a dependência da quantidade de éter arrastado pelo comprimento da luz incidente, evidenciando uma lacuna na fundamentação mecânica que sustentava a teoria.

Apesar dessas limitações, ao longo do século, diversas experiências validaram a fórmula de Fresnel como uma ferramenta matemática para interpretar fenômenos ópticos, embora sem necessariamente considerar seu significado físico. No final do século XIX, a hipótese de Fresnel foi incorporada pela teoria eletromagnética, tornando-se uma fórmula capaz de explicar resultados experimentais na primeira ordem de aproximação de v/c .

Uma outra hipótese emerge em 1848 quando Stokes conjecturou que o éter estava, de certa forma, "colado" à matéria, compartilhando seu movimento. Ele propôs que o éter próximo à superfície terrestre seria totalmente arrastado, enquanto o éter mais distante permaneceria imóvel, criando assim uma região de transição entre o éter em movimento e o estacionário. O éter seria considerado rígido em relação à luz, mas não ofereceria resistência aos planetas em seus movimentos. Com essa hipótese², tornava-se possível explicar a experiência de 1810, e, sob determinadas condições de contorno para a mencionada região de transição, também seria capaz de explicar a aberração das estrelas fixas.

Diante de diversas conjecturas, em 1851, Fizeau conduz um experimento na busca por uma hipótese "correta". Ele mensura o coeficiente de arrastamento do éter pela matéria ao investigar a influência do movimento de uma corrente de água na propagação da luz. Essa corrente interfere e gera padrões de difração distintos conforme a direção do fluxo de água. Os resultados obtidos corroboram a confirmação da fórmula teórica de Fresnel, fortalecendo a validação da existência de um éter parcialmente arrastado.

CAPÍTULO 2

Experimento de Michelson-Morley

Em 1881, Albert A. Michelson embarca na tentativa de calcular a velocidade (v) com que a Terra se desloca através do éter, empregando um dispositivo conhecido como interferômetro (ver Figura 1.0). Em 1887, em colaboração com Edward W. Morley, eles realizam novas tentativas, utilizando o mesmo dispositivo, mas com algumas modificações que o tornam ainda mais sensível.

² A hipótese de Stokes implica em algumas condições dinâmicas entre o arrastamento de éter, e mais tarde (1887) Lorentz demonstra a incompatibilidade dessas condições.

O princípio subjacente ao funcionamento do dispositivo é o seguinte: a partir de um ponto de uma fonte extensa S , a luz incide sobre um espelho semi prateado M , cujo revestimento de prata tem espessura suficiente para transmitir metade da luz incidente e refletir a outra metade. Dessa forma, a luz incidente em M divide-se em duas ondas - uma transmitida ao espelho M_1 e a outra parte refletida alcança o espelho M_2 . Cada um desses espelhos, M_1 e M_2 , reflete a luz incidente ao longo de suas direções, chegando ao olho do observador (luneta na Figura 1.0). O objetivo era medir o tempo de chegada dos feixes ao observador (luneta). A suposição era que, acreditando na existência de um éter, haveria o movimento da Terra em relação a ele, gerando um "vento de éter"; como resultado, o tempo de chegada dos feixes seria diferente. Use o QR code ou o link³ para visualizar uma simulação do interferômetro

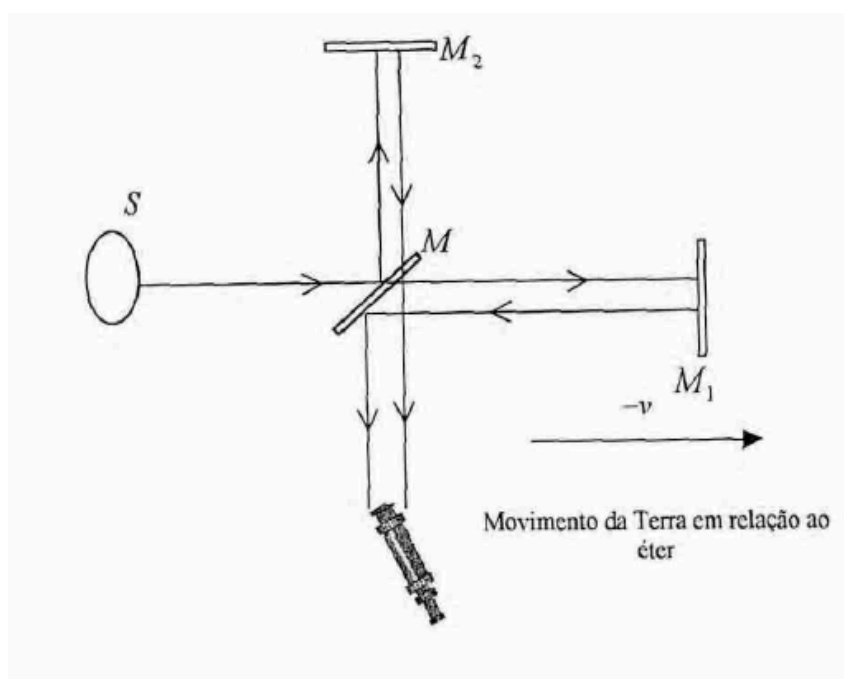


Figura 2.0 - Diagrama simplificado do funcionamento do interferômetro de Michelson.

Fonte: <https://repositorio.ucb.br/>

³ link para simulação do interferômetro: <https://www.youtube.com/watch?v=6aHF0etDT18>

Considerando a ausência de arrastamento no movimento do éter em relação à Terra, conforme preconizado por Fresnel, o interferômetro foi exposto a esse "vento de éter". Ao alinhar a direção de incidência ao espelho M_1 com a direção da velocidade da Terra, Michelson, em 1881, não detectou nenhuma diferença nos tempos de chegada dos feixes.

Em 1887, durante a experiência realizada com Morley, Michelson alcançou o mesmo resultado obtido em 1881: nenhum "vento de éter" foi detectado. Esse novo resultado experimental reforça significativamente a constância da velocidade da luz.

2.1 - Poincaré, Lorentz e os conflitos na Física

No ano de 1902, em seu livro "A Ciência e a Hipótese", Poincaré explora a tendência da ciência em direção à unidade e simplicidade. Ele destaca que descobertas, mesmo que inicialmente estranhas entre si, têm a propensão de se organizar numa síntese. Novos fenômenos, revelados pela observação direta, muitas vezes aguardam para encontrar seu lugar nessa síntese, podendo exigir, por vezes, a reestruturação de parte do "edifício" formado pelos fatos e conceitos já consolidados. Contrariamente, observa-se indícios de mudanças e complexidades nos conceitos e teorias anteriormente solidificados, especialmente em relação ao espaço, tempo e éter, sugerindo que a ciência estava se encaminhando para uma direção marcada pela variedade e complexidade.

Poincaré era um cientista de caráter convencionalista, percebe-se isto quando ele cita:

"Pouco nos importa que o éter exista realmente: é um problema para os metafísicos. O importante para nós é que tudo se passa como se ele existisse, e essa é uma hipótese cômoda para a explicação dos fenômenos. Afinal, temos outras razões para crer na existência dos objetos materiais? Essa também é uma hipótese cômoda e que nunca deixará de o ser, ao passo que um dia virá certamente em que o éter será rejeitado, por inútil." (Poincaré, Henri.1988, p.157).

Poincaré dedicou sua atenção às questões relacionadas à teoria do elétron e às hipóteses de contração do espaço propostas por Lorentz, considerando também as observações já realizadas para baixas velocidades, as quais indicavam a constância da massa.

"O atributo essencial da matéria é sua massa, sua inércia. A massa é o que, sempre e por toda parte, permanece constante, o que subsiste quando uma

transformação química alterou todas as qualidades sensíveis da matéria e parece ter produzido um outro corpo. Portanto, se chegasse a demonstrar que a massa e a inércia da matéria não lhe pertencem, na realidade, que é um luxo de empréstimo com que ela se engalana, que essa massa, a constante por excelência, é, ela própria, suscetível de alteração, poderíamos dizer que a matéria não existe. Ora, é precisamente isso que se anuncia. "(Poincaré, Henri. 1988, p.177).

O instinto dos físicos na época ainda os levava a acreditar na possibilidade de determinar o movimento absoluto da Terra. No entanto, diante dos insucessos nesse sentido, Lorentz reconhece a impossibilidade desse movimento absoluto e o adota como postulado, explicando conseqüentemente:

" ... todo átomo material seria formado por elétrons positivos, pequenos e pesados, e por elétrons negativos, grandes e leves, e, se a matéria sensível não nos parece eletrizada, é porque os dois tipos de elétrons são aproximadamente em número igual. Nesse sistema, não existe verdadeira matéria, somente buracos no éter".(Lorentz apud Poincaré, Henri. 1988, p.180).

Na afirmação de Lorentz encontra-se a necessidade, que não foi somente dele, mas da comunidade científica da época de conservar a teoria, em manter a "existência" do éter.

Lorentz fez uma significativa contribuição à física ao interpretar as equações de Maxwell em termos de cargas e correntes transportadas por partículas fundamentais. Ele denominou essas partículas como "partículas carregadas" em 1892, "íons" em 1895 e, finalmente, atribuiu o nome crucial à teoria, chamando-as de "elétrons". Em 1892, Lorentz publicou seu primeiro artigo sobre a teoria eletromagnética atomística. Nessa época, a experiência de Michelson-Morley já havia sido realizada, e Lorentz demonstrava preocupação em relação a isso.

"Esta experiência me intriga há muito tempo; por fim, só consegui pensar numa maneira de reconciliá-la com a teoria de Fresnel, que consiste na suposição de que a linha que une dois pontos de um corpo sólido, se inicialmente é paralela à direção do movimento da terra, não conserva o mesmo comprimento quando é subseqüentemente rodada de 90°" (Lorentz apud Pais, Abraham. 1995, p.140).

De acordo com as hipóteses de Lorentz, se o comprimento nesta última posição for l , então a manutenção da hipótese de Fresnel ocorre se o comprimento na posição inicial for expresso por:

$$l' = l \left(1 - \frac{v^2}{2c^2} \right) \quad (2.0)$$

A equação é reconhecida como a contração de Lorentz-FitzGerald na segunda ordem de aproximação em v/c . Conforme essa hipótese de contração, a ausência de movimento nas franjas na experiência de Michelson-Morley seria resultado de uma compensação entre o efeito da velocidade da Terra e a variação do comprimento do braço do interferômetro na mesma direção. Essa explicação demanda a existência do éter, uma vez que Lorentz havia pressuposto que as forças eletromagnéticas e as forças moleculares atuam por meio de uma intervenção do éter.

A citação de Lorentz sobre a conciliação entre a experiência e a teoria de Fresnel demonstra uma preocupação em conciliar a experiência, os resultados com os modelos já consolidados.

Quem na verdade primeiro propõe a hipótese da contração foi FitzGerald em 1889⁴:

"Li com muito interesse a experiência maravilhosamente delicada dos srs. Michelson e Morley para tentar decidir a importante questão de como o éter é arrastado pela Terra. O resultado parece ser oposto ao de outras experiências, mostrando que o éter só pode ser arrastado no ar numa extensão desprezível. Eu sugeriria que o comprimento dos corpos materiais se modifica (na direção de seu movimento no éter) de uma quantidade que depende do quadrado da razão entre as suas velocidades e a da luz. Sabemos que as forças elétricas são afetadas pelo movimento dos corpos eletrificados em relação ao éter, e parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere. Seria muito importante que algumas experiências seculares sobre atrações elétricas entre corpos permanentemente eletrificados, como num eletrômetro de quadrante muito delicado, pudessem

⁴ Em seu artigo, publicado pela revista americana Science, com título "O éter e a atmosfera terrestre". (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995,p.139)

ser realizadas em zonas equatoriais, para se observar se existe alguma variação diária ou anual da atração - diária, por causa do fato de a rotação da Terra ser adicionada ou subtraída et respectiva velocidade orbital, e anual, de forma similar, para a sua velocidade orbital e o movimento do sistema solar." (FitzGerald apud Pais, Abraham. 1995. p.139).

Observa-se que FitzGerald já havia desenvolvido a hipótese da contração e tinha fé na existência do éter. Os resultados subsequentemente alcançados por Lorentz corroboram essa ideia, e tanto Lorentz quanto FitzGerald endossam a intervenção dinâmica do éter. No entanto, em 1892, quando Lorentz formulou suas ideias, ele não tinha conhecimento do artigo de FitzGerald. Foi somente em 1894 que Lorentz tomou ciência da hipótese de contração de FitzGerald por meio de um artigo de Lodge datado de 1893. Lorentz, ao entrar em contato com FitzGerald, comunicou ter chegado independentemente ao mesmo resultado e indagou onde FitzGerald havia publicado suas ideias para citá-las. FitzGerald respondeu a Lorentz alguns dias depois, mencionando que havia enviado seu artigo à revista Science, mas não sabia se havia sido publicado. Ele também afirmou estar certo de que a publicação do artigo de Lorentz precedia qualquer publicação impressa sua. FitzGerald expressou grande satisfação com os resultados de Lorentz e por saber que este concordava com seus resultados.

Em um ensaio datado de 1895, inicia-se a trajetória de Lorentz em direção às suas transformações, sua outra grande contribuição que estabelece uma relação entre um conjunto de sistemas de coordenadas de espaço-tempo (O) e outro (x, y, z, t), que se move em relação ao primeiro com velocidade constante v. Nesse artigo de 1895, Lorentz apresenta o teorema dos estados correspondentes. Nele, um sistema em repouso em relação ao éter em um sistema de coordenadas (x, y, z, t) tem seus campos elétrico e magnético, bem como o deslocamento elétrico (E, H, D), expressos como funções de (x, y, z, t). Considerando outro sistema em movimento em relação ao primeiro com velocidade v, Lorentz demonstra a existência de um estado correspondente no segundo sistema, na primeira ordem em v/c, onde seus campos elétrico, magnético e deslocamento elétrico (E', H', D') são as mesmas funções de (x', y', z', t'). Para isso, ele propôs transformações, onde:

$$\vec{r} = \vec{r}' - vt \quad (2.1)$$

$$t' = t - v \frac{\vec{r}}{c^2} \quad (2.2)$$

$$\vec{E} = \vec{E} + \vec{v} \times \frac{\vec{H}}{c} \quad (2.3)$$

$$\vec{H} = \vec{H} - \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c} \quad (2.4)$$

Lorentz designou t como tempo geral e t' como tempo local. Em sua concepção, existia um único tempo verdadeiro, representado por t . Interpretar de forma realista o tempo t' para Lorentz é desafiador, pois, para ele, esse tempo desempenha apenas uma função auxiliar no sistema de referência em movimento, sendo uma variável "fictícia".

Em seu artigo de 1895, introduz um postulado da força que uma partícula com carga e e velocidade v está submetida, $F = e\left(\vec{E} + \vec{V} \times \frac{\vec{H}}{c}\right)$ que é conhecida como força de Lorentz.

Em 1904, Lorentz elabora suas transformações definitivas [*Em 1899 Lorentz escreve as equações de transformação na forma: $x' = \epsilon\gamma(x - vt)$, $y' = \epsilon\gamma$, $Z' = \epsilon\gamma$, e $t' = \epsilon\gamma(t - vx/c^2)$, onde ϵ é um fator de escala que ele afirmara ter que ser bem definido, que só seria determinado "por um conhecimento mais profundo dos fenômenos". (Lorentz apud Pais, Abraham. 1993, p.143).*], estabelecendo o valor de ϵ como um. Além disso, apresenta uma proposta sobre a forma e a estrutura do elétron, fundamentada na ideia central de contração das distâncias e dilatação do tempo.

A teoria de Lorentz reflete um período de crise com esforços para manter um paradigma baseado no mecanicismo, enquanto um novo paradigma emerge. Esse período levou a física a abandonar uma visão em que os constituintes eram massas inerciais, discretas ou contínuas, movendo-se de acordo com as leis da mecânica, influenciados por forças de contato ou à distância. Em contrapartida, a teoria de Lorentz apresenta uma perspectiva eletromagnética na qual as realidades físicas são o éter eletromagnético e as cargas elétricas. Nessa visão, as leis da natureza são reduzidas às leis do campo eletromagnético, a partir das quais se busca estabelecer as propriedades do éter e sua interação com as cargas.

Em 1900 Poincaré tem nos seus trabalhos muitas questões sobre o éter; no discurso inaugural do Congresso de Paris de 1900 ele já perguntara: "Existe realmente o éter ?" (Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.145).

Mas percebe-se bem a necessidade que tinha, então, o éter de ser um suporte material:

"Sabemos bem de onde nos vem a crença no éter. Se a luz leva vários anos para chegar de uma estrela distante até nós, durante esse período de tempo ela não mais estará na estrela e não estará, ainda, na Terra. Mas terá que estar em algum lugar e sustentada, por assim dizer, por algum suporte material. "(Poincaré, Henri. 1988, p.132).

A necessidade do éter como um meio de suporte é igualmente uma característica de Lorentz. Para ele, o éter representa um substrato essencial para a propagação do campo, servindo como suporte para o deslocamento das ondas eletromagnéticas.

No contexto do movimento absoluto, Poincaré postula o "princípio da relatividade" como uma lei geral da natureza. Ele considera a impossibilidade experimental de detectar o movimento absoluto da Terra como uma lei universal da natureza e a aceita sem restrições. Nesse sentido, a hipótese de contração de Lorentz-FitzGerald, utilizada para explicar essa impossibilidade experimental, perde seu significado, uma vez que Poincaré postula o "princípio da relatividade". Quanto às transformações, Poincaré as deduz a partir do Princípio da Mínima Ação, refletindo uma abordagem mecanicista. Com Poincaré, o tempo local é tratado como um conceito físico.

"Considere dois observadores em movimento relativo uniforme que desejam acertar seus relógios por meio de sinais luminosos. Relógios acertados deste modo não apresentarão o tempo verdadeiro, mas, em vez disso, mostrarão aquilo que podemos chamar tempo local. Todos os fenômenos vistos por um observador estão atrasados em relação ao outro, porém atrasados de igual modo, e, como exigido pelo princípio da relatividade, o observador não pode saber se está em repouso ou em movimento absoluto. "(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

Na citação, Poincaré parecia estar alinhado com a teoria da relatividade, exceto por sua observação de que o raciocínio mencionado não era suficiente, sendo necessárias hipóteses adicionais. Outra perspectiva significativa de Poincaré relaciona-se com a constância da velocidade da luz. Em 1904, ele declara: "Os experimentos parecem teimar em sugerir a impossibilidade de detectar o movimento absoluto"(Poincaré, Henri apud Villani, A., mai/1981, p.35).

Em seguida, propõe a elaboração de uma nova mecânica, onde a velocidade da luz é estabelecida como um limite intransponível. No entanto, não ocorre uma ruptura imediata com o mecanicismo. Percebem-se características de um Poincaré que resistia à modificação do paradigma, embora estivesse preocupado com as perturbações, os "atentados" ao paradigma existente. Mais uma vez, ele demonstra sua inquietação com a instabilidade das teorias ao acrescentar:

“apresso-me a dizer que ainda não chegamos lá, e que nada ainda prova que os velhos princípios não vão emergir vitoriosos e intactos dessa batalha.”
(Poincaré, Henri apud Pais, Abraham. 1995, p.146).

CAPÍTULO 3

Relatividade Restrita - Os Postulados da Teoria da Relatividade Restrita

Com base na percepção de que a Física não estava em condições de proporcionar um modelo suficientemente abrangente para explicar resultados importantes, Einstein formula os postulados da relatividade restrita. Isso resulta na rejeição do conceito de movimento absoluto e na obsolescência do éter, que deixa de ser um referencial absoluto para o eletromagnetismo e não desempenha mais o papel de suporte para a radiação. O modelo anterior, que preferia um sistema de coordenadas em repouso absoluto na mecânica newtoniana, é abandonado em favor de um conjunto infinito de referenciais inerciais. O novo modelo é completamente fundamentado nos dois postulados⁵ (Einstein, A. apud Bassalo, J.M.F., 1987):

1ª) Princípio da Relatividade : *“As leis pelas quais os sistemas físicos experimentam mudanças não são afetadas, se essas mudanças de estado são referidas a um ou outro de dois sistemas de coordenadas em movimento de translação uniforme”.*

2ª) Constância da velocidade da luz : *“Qualquer raio de luz move-se em um sistema 'estacionário' de coordenadas com a velocidade determinada c , quer seja o raio emitido por um corpo estacionário ou em movimento”.*

⁵ Einstein em seu artigo de junho/1905. Einstein apud Bassalo, 1987.

A impossibilidade de detectar o movimento absoluto é fundamentada no princípio da relatividade, que declara que esse movimento carece de significado físico. Uma consequência necessária desse princípio é o abandono do éter, uma vez que as ondas eletromagnéticas não dependem dele como suporte para sua propagação. Se o éter fosse essencial, ele se tornaria um referencial privilegiado. Outro aspecto crucial reside no valor constante da velocidade da luz, independentemente do estado de movimento da fonte emissora.

Através desses postulados, Einstein determina as transformações lineares, que são essencialmente as transformações de Lorentz. Em seguida, ele investiga os efeitos dessas transformações, identificando tanto a contração de Lorentz-FitzGerald quanto a dilatação do tempo. No entanto, não se pode afirmar, como esperaria Popper, que a teoria da relatividade einsteiniana seja meramente uma continuação de teorias anteriores propostas por Lorentz, FitzGerald ou Poincaré. Para Lorentz e FitzGerald, a contração seria um efeito real e dinâmico, relacionado às forças moleculares que variariam para um corpo em movimento uniforme em comparação ao mesmo corpo em repouso. Em contraste, na teoria da relatividade restrita, a contração é uma consequência direta dos dois postulados.

Assim como Poincaré, que não aceita a identidade física entre os dois sistemas de referência nas transformações de Lorentz, mantendo a existência de um sistema em repouso, a teoria da relatividade restrita apresenta descontinuidades em relação a Poincaré. Além disso, Poincaré não questiona o éter nem o tempo absoluto da mecânica newtoniana, os quais perdem significado na mecânica relativística. Esses fatores, juntamente com as divergências nas interpretações de Einstein e Lorentz sobre a natureza do tempo nas transformações de Lorentz, destacam a singularidade da teoria de Einstein e os conceitos distintos derivados da teoria da relatividade.

O término do éter e a invariabilidade da velocidade da luz são resultados decorrentes dos postulados, representando uma ruptura significativa com os conceitos previamente propostos por Lorentz, Poincaré e outros que buscaram teorias e modelos para harmonizar as teorias existentes com os resultados experimentais.

3.1 - A experiência de Michelson-Morley e o pensamento de Einstein

Um aspecto amplamente debatido na teoria de Einstein é se ele estava ou não ciente do experimento de Michelson-Morley antes de publicar seu artigo de 1905 sobre a relatividade, no qual Einstein não fez nenhuma referência ao referido experimento.

Em uma correspondência enviada a um historiador um ano antes de seu falecimento, Einstein abordou pela última vez o tema relacionado à influência que recebeu da experiência de Michelson-Morley:

"O resultado de Michelson-Morley não teve influência considerável no meu desenvolvimento. Não me lembro nem mesmo se tinha conhecimento dele quando escrevi o primeiro artigo sobre o tema (1905). A explicação deve-se a que, por razões gerais, eu estava firmemente convencido da não existência do movimento absoluto; meu problema residia em como conciliar isso com nosso conhecimento da eletrodinâmica. Talvez assim seja possível entender por que razão, na minha luta pessoal, não desempenhou qualquer papel decisivo, a experiência de Michelson."(Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.200).

Grandes cientistas, como Millikan, apontaram para uma ligação direta entre o princípio da relatividade e o experimento de Michelson-Morley:

"A Teoria da Relatividade Especial pode ser considerada... essencialmente uma generalização a partir do experimento de Michelson... Descartando todas as concepções a priori sobre a natureza da realidade... Einstein tomou como ponto de partida fatos experimentais cuidadosamente testados, independentemente deles parecerem razoáveis ou não... Mas este experimento(M-M), depois de ter sido realizado com extraordinária habilidade e refinamento pelos seus autores, deu a resposta definitiva, que não existe nenhuma velocidade observável da terra em relação ao éter. Este incrível e aparentemente inexplicável fato experimental perturbou violentamente a Física do séc. XIX e por quase vinte anos os físicos se esforçaram para torná-lo razoável. Mas Einstein nos chamou atenção: vamos aceitá-lo como um fato experimental estabelecido e tirar as suas inevitáveis consequências... Assim nasceu a teoria da Relatividade Especial" (Millikan, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

Outra opinião afim é refletida a partir do seguinte comentário de M. Von Laue:

"O resultado negativo do experimento de M. M, forçou a teoria de Lorentz do éter estacionário a fazer uma nova hipótese, que conduziu à teoria da Relatividade. Dessa forma o experimento se tornou, por assim dizer, o experimento fundamental da T.R., porque é partindo dele que se atinge quase imediatamente a derivação das transformações de Lorentz, que contém o princípio da relatividade" (M. Von Laue, R. A. apud Villani, A., mai/1981, p.36).

De acordo com Einstein, os resultados experimentais que mais influenciaram seu pensamento foram as observações da aberração estelar e as medidas de Fizeau sobre a velocidade da luz na água em movimento. Quanto ao experimento de Michelson-Morley, ele afirmou que só chamou sua atenção após 1905.

Sommerfeld alegou, em um livro publicado em 1923⁶, que Einstein, em 1905, não estava familiarizado com o trabalho de Lorentz de 1904 sobre suas transformações. No entanto, durante sua visita ao Brasil em 1925, Einstein afirmou ao professor Azevedo Amaral, docente de Cálculo e Geometria Analítica na Escola Nacional de Engenharia, que...

"O princípio da Relatividade restrita não foi lido nas equações de Lorentz, como afirmara Bergson; mas como resultado de longas meditações sobre a experiência de Michelson"(Einstein, A apud Bassalo, J M F, 1987).

Quando questionado por Azevedo Amaral sobre o que o levou à teoria da relatividade, Einstein explicou que havia realizado duas meditações fundamentais. A primeira ocorreu aos 17 anos, ponderando sobre a possibilidade de viajar com uma velocidade idêntica à da luz. A segunda meditação envolveu a consideração da experiência de Michelson.

No que diz respeito ao experimento de Michelson-Morley, é bastante provável que, mesmo que Einstein o conhecesse, não o tenha mencionado porque o experimento não teria exercido qualquer influência em seu pensamento, em sua trajetória em direção à teoria da

⁶ Livro editado pela Methuen and Company, Ltd. em 1923 e republicado em 1952 pela editora Dover, no qual foram reunidos alguns trabalhos de Einstein, Lorentz e Minkowski, com notas de Arnold Sommerfeld.

relatividade. No entanto, o conhecimento desse experimento poderia ser considerado um ponto a favor da sobrevivência e validade da teoria, de acordo com Einstein⁷.

"Nunca é fácil falar do modo como cheguei à teoria da relatividade, pois várias complexidades ocultas motivam o pensamento humano, e elas agiram com pesos diferentes." (Einstein, A apud Pais, A., 1995, p.152).

A reação da comunidade científica ao princípio da relatividade e a maneira como foi divulgada, tanto em artigos científicos quanto em livros didáticos, reafirma a visão kuhniana de como a ciência está sujeita não apenas a argumentos lógico-matemáticos e racionais, mas também a subjetividades e, ainda mais, à persuasão. A relação entre a influência do experimento Michelson-Morley e o princípio da relatividade introduz no ensino da ciência uma série de "achismos" e opiniões que contradizem os próprios relatos de Einstein sobre a influência recebida desse experimento. O que é finalmente descrito nos livros didáticos é uma interpretação simplificada dos comentários e análises de grandes cientistas, geralmente privilegiando uma abordagem empirista da ciência, colocando o experimento de Michelson-Morley na gênese da teoria da relatividade, e esta como um arcabouço teórico que sistematizou as concepções de Poincaré, Lorentz e FitzGerald, fornecendo finalmente a resposta correta ao experimento.

Enquanto poderíamos empregar a teoria da relatividade para orientar discussões sobre a evolução do conhecimento científico, é crucial compreender o contexto real no qual a teoria da relatividade estava sendo desenvolvida e o significado do experimento Michelson-Morley para essa teoria.

3.2 - As transformações de Lorentz

Considera-se dois sistemas de coordenadas Σ e Σ' . (figura 3.1), que se movem um em relação ao outro, na direção x , com velocidade \vec{v}_x . Por simplicidade, considera-se apenas eventos localizados sobre o eixo x , sendo que no tempo $t = t' = 0$ as origens e eixos dos sistemas são coincidentes. Um determinado evento ocorre e em relação ao sistema Σ é determinado pelas coordenadas x e t ; este mesmo evento é registrado pelo sistema Σ' é dado pela abscissa x' e pelo tempo t' .

⁷ Conferência de Kyoto 1922; Einstein, A. apud Pais, A., 1995, p.152.

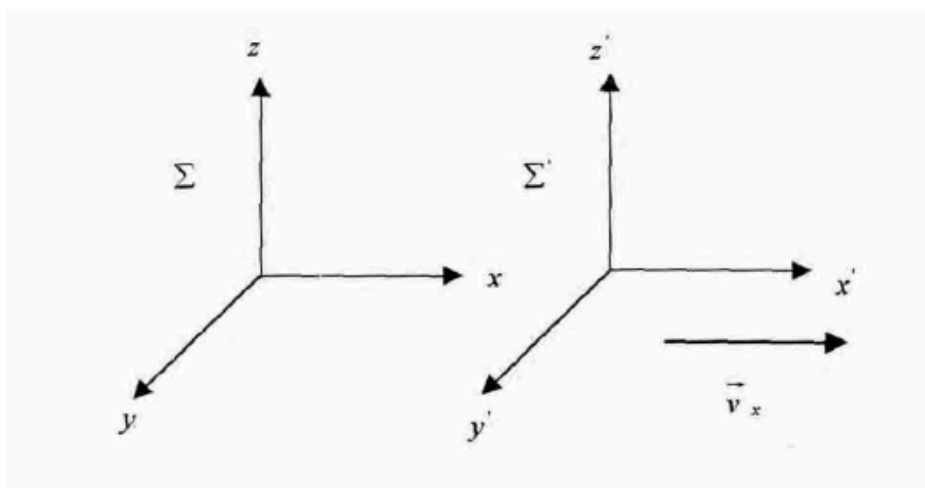


Figura 3.1 - Dois sistemas de coordenadas que se movem um em relação ao outro , na direção x com velocidade uniforme \vec{v}_x

Fonte:Fonte: <https://repositorio.ucb.br/>

Busca-se derivar as equações de transformação que conectam as coordenadas espaço-tempo de um evento observado por um observador em Σ com as coordenadas desse mesmo evento para um observador em Σ' . Para isso, serão levados em conta os postulados da relatividade e a hipótese da homogeneidade, a qual estabelece que todos os pontos no espaço e no tempo são equivalentes. Assim, os resultados de medidas de comprimento ou intervalos de tempo não devem depender do local ou do momento em que as medições são realizadas.

Considera-se um sinal luminoso avançando ao longo de x positivo se propagando segundo a equação:

$$x = ct \quad (3.1)$$

Considerando os postulados da relatividade, o mesmo sinal luminoso deve também propagar-se em relação a Σ' com a velocidade c , e a propagação em Σ' é descrita por:

$$x' = ct' \quad (3.2)$$

As equações podem ser escritas como:

$$x - ct = 0 \quad (3.3)$$

$$x' - ct' = 0 \quad (3.4)$$

As coordenadas do espaço-tempo que satisfazem a equação (3.3) também devem satisfazer a equação (3.4). Dessa forma pode-se escrever:

$$(x' - ct') = \zeta (x - ct) \quad (3.5)$$

sendo ζ uma constante.

Considerando o mesmo sinal luminoso se propagando ao longo de x negativo, obtém-se de forma análoga:

$$(x' + ct') = \eta (x - ct) \quad (3.6)$$

Onde η é uma constante.

Somando as equações (3.5) e (3.6) obtém-se:

$$x' = \frac{x(\zeta+\eta) - ct(\zeta-\eta)}{2} \quad (3.7)$$

E subtraindo essas mesmas equações (3.5) e (3.6) tem-se

$$ct' = \frac{-x(\zeta-\eta) + ct(\zeta+\eta)}{2} \quad (3.8)$$

No intuito de simplificar os cálculos introduz-se as seguintes constantes:

$$a = \frac{(\zeta+\eta)}{2}$$

(3.9)

$$b = \frac{(\zeta-\eta)}{2} \quad (3.10)$$

Pode-se então substituir as equações (3.9) e (3.10) nas equações (3.7) e (3.8) eliminando as constantes ζ e η , encontra-se:

$$x' = ax - bct \quad (3.11)$$

$$ct' = act - bx \quad (3.12)$$

Sendo conhecidas as constantes a e b pode-se obter as coordenadas espaço-tempo do sistema de referência Σ a partir das coordenadas do sistema Σ' , e vice-versa.

Considerando a origem do sistema Σ' em $x' = 0$, das equações (3.11) e (3.12) é possível escrever:

$$\frac{x}{t} = v_x = \frac{bc}{a} \quad (3.13)$$

Sendo v_x a velocidade relativa dos dois sistemas.

Considerando um observador no referencial Σ observando o sistema Σ' , num determinado instante $t = 0$. Assim da equação (3.11) tem-se:

$$x' = ax \quad (3.14)$$

Nesse determinado instante $t = 0$, um observador em Σ' mede a distância entre dois pontos no seu referencial e encontra $x = 1$, assim a partir da equação (3.14) pode-se escrever:

$$\Delta x = \frac{1}{a} \quad (3.15)$$

Fazendo o mesmo processo para um instante $t' = 0$, ou seja para um observador em Σ' , obtém-se a partir da equação (3.12):

$$t = \frac{bx}{ac} \quad (3.16)$$

Substituindo a equação (3.16) na equação (3.11), tem-se:

$$x' = ax - \frac{bcx}{ac} \quad (3.17)$$

Considerando a equação (3.13) e multiplicando o segundo termo da parte direita da equação acima por $\frac{ac}{ac}$, encontra-se:

$$x' = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x \quad (3.18)$$

De acordo com a hipótese da homogeneidade para $t' = 0$ tem-se $\Delta x' = \frac{1}{a}$ assim a equação torna-se:

$$x' = \frac{1}{a} = a \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x \quad (3.19)$$

que pode ser escrita como:

$$a^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (3.20)$$

A equação acima juntamente com a equação (3.13) permite a determinação das constantes a e b .

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.21)$$

$$b = \frac{\frac{v}{c}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.22)$$

Introduzindo as equações acima em (3.10) e (3.12), tem-se:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.23a)$$

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (3.24)$$

Que são as transformações de Lorentz, podendo ser estendidas a eventos fora do eixo x acrescentando:

$$y' = y \quad (3.23b)$$

$$z' = z \quad (3.23c)$$

Para velocidades muito pequenas comparadas à velocidade da luz, ou seja, para $v/c \ll 1$, as equações (3.23) e (3.24) de transformação de Lorentz c podem ser escritas, aproximadamente, como:

$$x' = x - vt \quad (3.25a)$$

$$y' = y \quad (3.25b)$$

$$z' = z \quad (3.25c)$$

$$t' = t \quad (3.25d)$$

Estas expressões matemáticas, designadas por (3.25), representam de maneira formal as equações de transformação propostas por Galileu. Quando analisadas de forma isolada, podem sugerir uma evidência de continuidade entre a mecânica newtoniana e a relativista. Contudo, uma interpretação mais atenta revela que a discrepância entre essas teorias reside no processo de formulação dessas equações e nos conceitos envolvidos, não apenas no resultado final. Os princípios a partir dos quais essas equações foram derivadas são distintos. Ao contrário das premissas da mecânica newtoniana, o tempo não é considerado uma magnitude universal e absoluta neste contexto, sendo que as equações surgem como consequência dos postulados adotados.

3.2.1 - Conseqüências das transformações de Lorentz

Uma das implicações fundamentais das transformações de Lorentz está associada às dimensões de um objeto quando este está em movimento em relação a observadores situados em sistemas de referência distintos. Imaginemos uma haste delgada com coordenadas fixas em um sistema de referência Σ , a qual se desloca com uma velocidade v_x em relação a um sistema de coordenadas Σ' , conforme ilustrado na figura 3.2.

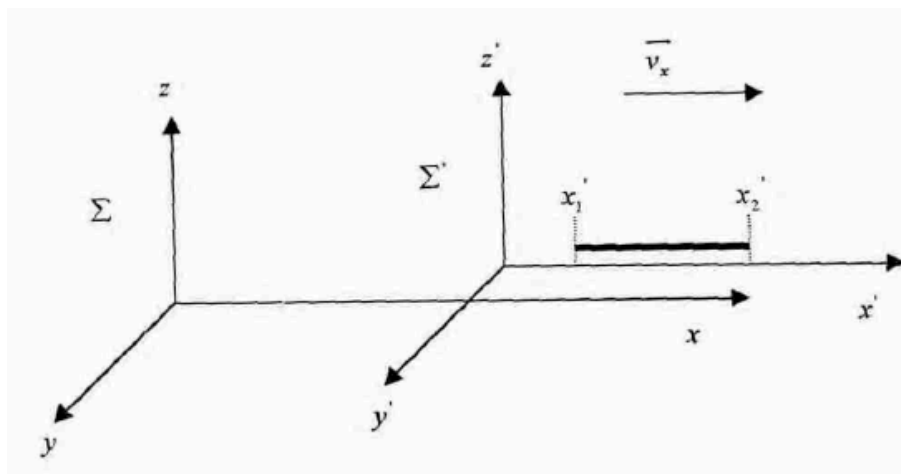


Figura 3.2 — Um haste em repouso sobre um sistema de referências Σ' que se movimenta com velocidade v_x em relação a outro sistema de referências Σ .

Fonte: <https://repositorio.ucb.br/>

Utilizando as transformações de Lorentz, a relação encontrada entre a medida $(x_2 - x_1)$ do comprimento da haste para o observador em Σ' e a medida $(x_2 - x_1)$ obtida pelo observador no sistema Σ é a seguinte:

$$(x_2 - x_1) = (x_2 - x_1) \sqrt{1 - v^2/c^2} \quad (3.26)$$

O comprimento de um corpo medido em repouso em relação ao observador é máximo, e de acordo com um referencial em movimento esse corpo tem a medida de seu comprimento diminuída na direção do movimento por um fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$. As medidas da haste ao longo dos eixos perpendiculares y e z não variam.

Conforme abordado na seção inicial deste capítulo, esse resultado foi previamente identificado por Lorentz e FitzGerald. Entretanto, suas explicações foram diferentes, evidenciando a disparidade nos significados dos conceitos que surgem a partir dos postulados da teoria da relatividade.

Outra consequência que aparece é a dilatação temporal. Supõe-se que inicialmente os dois sistemas Σ e Σ' tenham seus eixos e origens coincidentes nos instantes $t = t' = 0$, em seguida o sistema de referências Σ' é colocado em movimento relativo ao sistema Σ com velocidade relativa v_x como apresentado nas figuras anteriores. Considera-se também, que cada observador localizado nos diferentes sistemas Σ e Σ' tenha um relógio. Em seguida a um determinado evento os dois observadores registram o intervalo de tempo deste acontecimento.

Sendo dt o intervalo de tempo registrado pelo relógio em repouso em relação ao sistema Σ , e dt' o intervalo de tempo medido através do relógio em repouso em relação ao sistema Σ' , utilizando as transformações de Lorentz a relação entre as medidas para os intervalos de tempo no diferentes referenciais Σ e Σ' é dada por:

$$dt = \frac{dt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (3.27)$$

Ou seja, a medida do intervalo de tempo registrada pelo observador em Σ é maior do que a atribuída pelo observador no referencial Σ' .

3.3 - Paradoxo dos Gêmeos

Uma das peculiaridades antecipadas pela teoria da relatividade geral é o paradoxo dos gêmeos. Este fenômeno singular na teoria da relatividade destaca a presença de uma descontinuidade entre as abordagens newtoniana e relativista, uma vez que tal paradoxo não emerge a partir das considerações baseadas nos conceitos newtonianos.

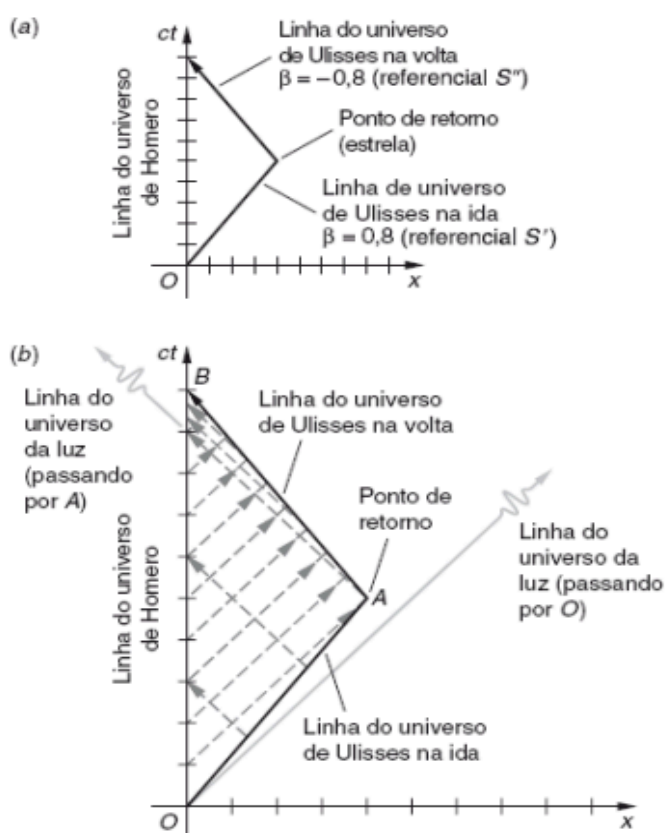


Figura 3.7 - (a) Diagrama espaço-tempo da viagem de Ulisses a uma estrela distante no referencial inercial em que Homero e a estrela estão em repouso. (b) As divisões do eixo ct correspondem a anos no relógio de Homero. As retas tracejadas mostram as linhas do universo de sinais luminosos transmitidos pelos gêmeos com uma frequência de um sinal por ano, de acordo com seus relógios. Observe que as frequências dos sinais recebidos pelos dois gêmeos são muito diferentes.

Na teoria da relatividade restrita, o tempo se dilata para um observador em movimento em relação a um observador em repouso. A equação da dilatação temporal é,

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Vamos supor que Ulisses viaja para uma estrela distante a uma distância D da Terra com velocidade u , para e retorna com a mesma velocidade u . O tempo total de viagem, segundo Homero, é a soma do tempo de ida e volta,

$$\Delta t_{total} = \Delta t_{ida} + \Delta t_{volta} = \frac{D}{u} + \frac{D}{u} = \frac{2D}{u},$$

para Ulisses, o tempo de viagem será dilatado. O intervalo de tempo próprio para cada trecho (ida ou volta) é $\Delta t_0 = \Delta t'_{ida} + \Delta t'_{volta}$. Cada intervalo de tempo medido por Ulisses é dilatado pelo fator de Lorentz,

$$\Delta t'_{ida} = \Delta t'_{volta} = \frac{\Delta t_{ida}}{\gamma} = \frac{D/u}{\gamma} = \frac{D}{u\gamma}$$

dessa forma, o tempo total de viagem medido por Ulisses é

$$\Delta t_0 = 2 \cdot \frac{D}{u\gamma} = \frac{2D}{u\gamma},$$

substituindo γ

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{u} \sqrt{1 - (u/c)^2}$$

fazendo a comparação dos tempos, temos que para Homero (na Terra)

$$\Delta t_{total} = \frac{2D}{u}$$

já para Ulisses (na nave)

$$\Delta t_0 = \frac{2D}{u} \sqrt{1 - (u/c)^2}$$

Podemos concluir que quando Ulisses retorna à Terra, ele terá experimentado menos tempo do que Homero devido à dilatação do tempo. Especificamente, o tempo que ele experimentou é menor pelo fator de Lorentz γ . Portanto, Ulisses será mais jovem que Homero quando eles se reencontrarem.

4 - Considerações Finais

Numerosas são as disparidades entre as teorias de Poincaré, Lorentz e Einstein, destacando-se como mais uma evidência de um ambiente propício para revoluções científicas e rupturas epistemológicas. A divergência na concepção do éter e sua eventual eliminação

pela teoria de Einstein é um desses pontos críticos que marcaram a transição entre essas teorias.

A inclinação para manter uma continuidade, as múltiplas reformulações na hipótese do éter e a firmeza nos conceitos de espaço e tempo absolutos explicam por que as teorias de Einstein enfrentaram uma aceitação demorada. Isso se deve às numerosas tentativas de preservar a estrutura estabelecida pelos conceitos e teorias consolidados.

Ao longo da história, a ciência tem buscado leis invariáveis e verdades absolutas. Os períodos de crise, especialmente as revoluções científicas, desempenham um papel crucial para evitar que essas verdades se transformem em mitos, mantendo-as como construções humanas suscetíveis a desafios e contestações. Ao contrário da perspectiva de Popper, nos anos que antecederam a teoria da relatividade de Einstein e mesmo depois, não houve uma busca incessante pela refutação. Em vez disso, observou-se uma persistência em manter o paradigma do espaço e tempo absolutos, bem como o conceito de éter, mesmo quando esses fundamentos estavam desgastados pelos resultados experimentais encontrados.

Um aspecto que inicialmente sugere a presença de continuidade é a convergência das transformações de Lorentz para velocidades significativamente inferiores à velocidade da luz, resultando nas transformações de Galileu. No entanto, apesar da coincidência nas equações, os conceitos subjacentes são distintos, representando uma modificação no paradigma. Isso implica em uma alteração nos conceitos fundamentais utilizados como referência pela comunidade científica.

5 - Sequência Didática

5.1 - Aula 01 - Tempo de 48 minutos

Objetivos

Apresentar o conceito de Relatividade Restrita com um contexto histórico, passando pelo experimento de Michelson e Morley e fazendo algumas demonstrações de transformações clássicas de velocidade.

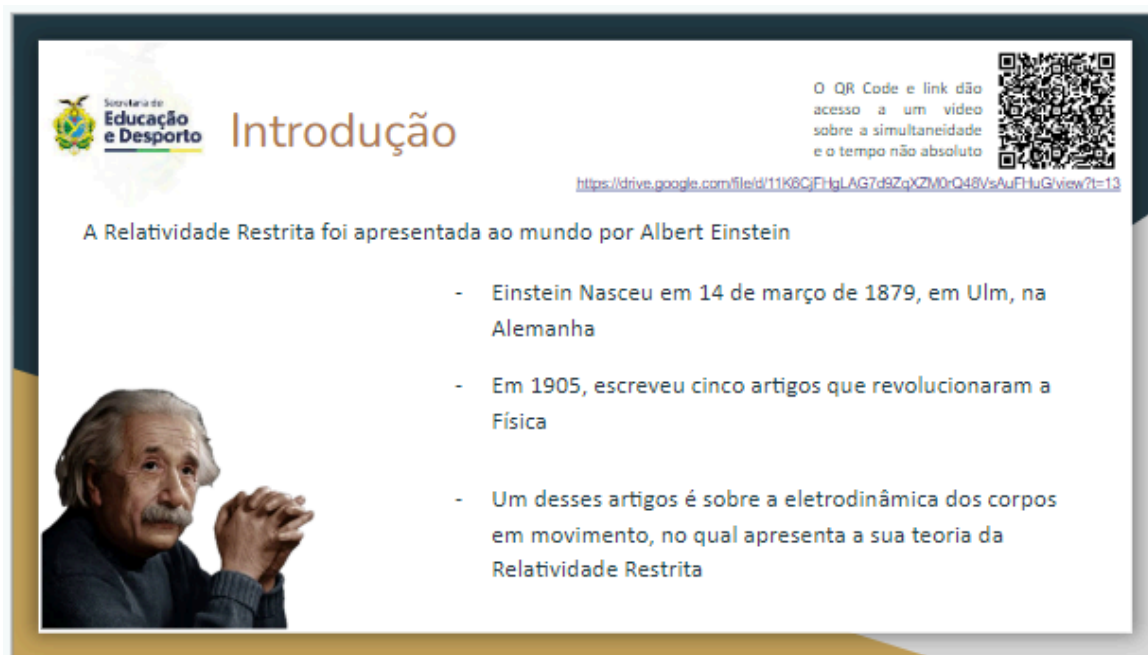
Materiais/Equipamentos:

- Data show
- Pincel e apagador
- Computador
- Caixa de som
- Quadro branco
- Papel e caneta

Procedimento didático

Inicia-se a aula com a apresentação do tema. É interessante mostrar e comentar sobre tecnologias e curiosidades que envolvem a Relatividade Restrita, até mesmo sobre a Relatividade Geral, pois pode instigar a curiosidade dos alunos e abre espaço para perguntas. Durante todo o processo ocorrerá a avaliação formativa, assim, ela será utilizada como intermediadora para discussão do tema com a turma. Seguindo em frente, pergunta-se à turma sobre a importância e importância do tema, a fim de começar um curto debate o qual tem como finalidade explorar os conhecimentos pré-existentes (subsúncos) acerca do assunto. Em seguida, é apresentado um contexto histórico que mostra a “evolução” da teoria no meio científico. Durante todas as explicações, o contexto histórico deve ser evidenciado. Sendo assim, um exposto sobre Einstein será apresentado, continuando e falando um pouco sobre as ideias de Newton sobre o mesmo tema, as transformações de Galileu, a importância de Maxwell e suas equações do eletromagnetismo, Por fim, a primeira aula é finalizada abordando o experimento de Michelson e Morley e a não detecção do vento do éter.

Introdução e conceito



Secretaria de Educação e Desporto

Introdução

O QR Code e link dão acesso a um vídeo sobre a simultaneidade e o tempo não absoluto

<https://drive.google.com/file/d/11K8CjFhLgLAG7d9ZqXZM0rQ48VsAuFHuG/view?t=13>

A Relatividade Restrita foi apresentada ao mundo por Albert Einstein

- Einstein Nasceu em 14 de março de 1879, em Ulm, na Alemanha
- Em 1905, escreveu cinco artigos que revolucionaram a Física
- Um desses artigos é sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, no qual apresenta a sua teoria da Relatividade Restrita

Figura 5.1 - Slide da aula 1 do produto educacional

Fonte: próprio autor

O primeiro slide é apenas para comentar um pouco sobre Einstein e o artigo que revelou ao mundo, o qual deixou a Relatividade Restrita “famosa”. Como estamos dando ênfase à história, é necessário comentar que o caráter relativístico da física não começou com Einstein. Mas quem o percebeu primeiro foi Nicolau Copérnico, o mesmo percebeu e mostrou que o movimento dos planetas sendo em torno do Sol, os cálculos destes mesmos movimentos se tornam simples, ou seja, as mesmas equações, independentemente da origem de coordenadas, seriam obtidas.

O Princípio da Relatividade é justamente essa invariância das equações que expressam as leis da física.

Relatividade Clássica

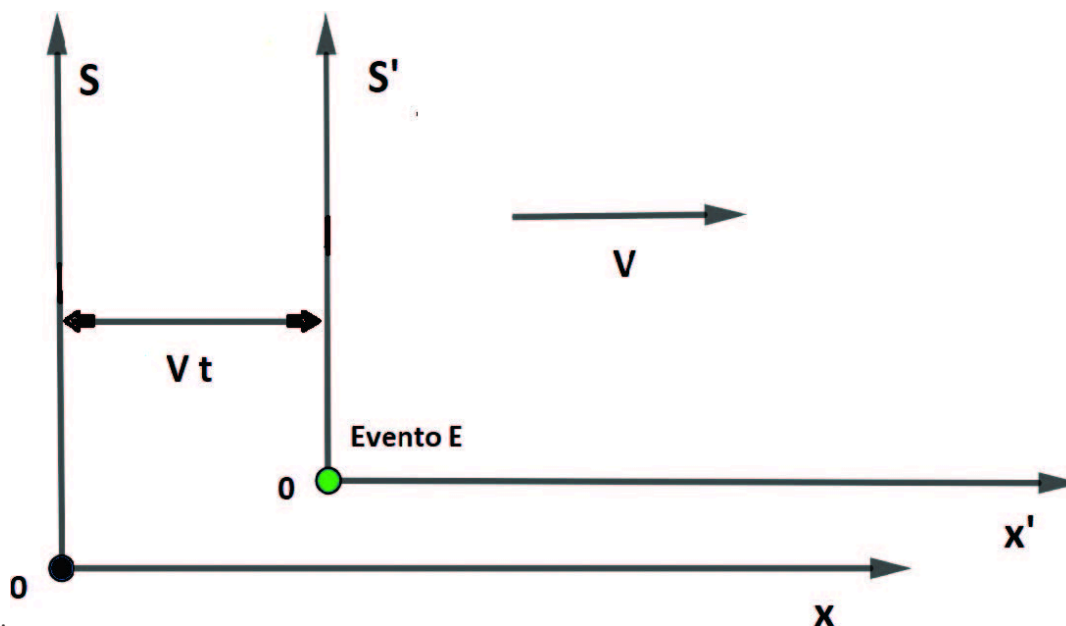


Figura 5.2 - Ilustração dos referenciais inerciais envolvidos na transformação de Galileu com um evento E ocorrendo na origem do referencial S' , que se move com velocidade v constante em relação a S .

Fonte: Revista Brasileira de Ensino de Física

Considere dois referenciais da figura (5;2), o referencial S está em repouso, enquanto o referencial S' tem velocidade v constante em relação a S .

Consideramos S e S' *referenciais inerciais*. Dizemos que um referencial é inercial quando ele estiver em repouso ou em movimento de trajetória retilínea com velocidade constante em relação a outro referencial inercial.

As leis de Newton são válidas apenas em referenciais inerciais e, também são invariantes em tais referenciais.

As transformações de Galileu

As transformações de Galileu descrevem coordenadas de posição e velocidade de um objeto em dois referenciais inerciais que se movem um em relação ao outro com uma velocidade constante. Essas transformações são válidas para sistemas que se movem a velocidades muito inferiores à velocidade da luz e são uma aproximação útil em muitos contextos da física clássica.

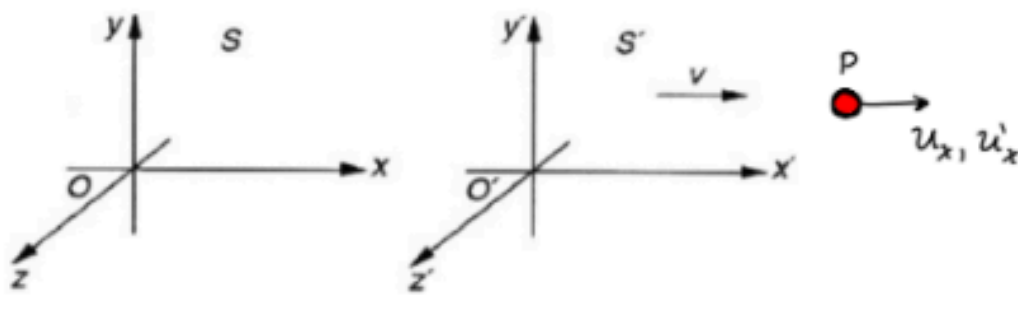


Figura 5.3 - Ilustração dos referenciais inerciais envolvidos na transformação de Galileu com um evento E ocorrendo na origem do referencial S' , que se move com velocidade v constante em relação a S com uma partícula inclusa.

Fonte: Vídeo Aula do professor Cícero

Observando o sistema de referenciais da figura 03, observa-se uma partícula P , se movendo com velocidade v_x em relação a S , e v'_x em relação a S' . Além disso, as coordenadas da partícula em relação a S são (x, y, z) , e em relação a S' são (x', y', z') .

Pela transformação de galileu, temos:

$$x' = x - vt$$

$$u'_x = u_x - v$$

$$y' = y$$

$$u'_y = u_y$$

$$z' = z$$

$$u'_z = u_z$$

$$t' = t$$

O experimento de Michelson-Morley

Antes de entender o experimento de Michelson-Morley, precisamos entender as motivações científicas e históricas para a criação de tal experimento.

James Clerk Maxwell foi um físico escocês do século XIX, nascido em 1831 e falecido em 1879. Ele é conhecido principalmente por suas contribuições fundamentais para a teoria eletromagnética. Suas equações, conhecidas como Equações de Maxwell, descrevem as interações fundamentais entre campos elétricos e magnéticos, formando a base teórica para o entendimento da eletricidade, do magnetismo e da propagação da luz.

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \hat{j}$$

Com essas equações, Maxwell, mostrou que a eletricidade e o magnetismo são fenômenos que estão interligados, dando surgimento então ao eletromagnetismo. Ele ainda descobriu que a partir dessas quatro equações, foi possível obter um resultado ondulatório, ou seja, ao resolver essas equações, o resultado é uma equação de onda, ou duas, uma mostrando a variação do campo magnético e a outra o campo elétrico.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

Partindo das equações de onda, foi possível também chegar a um valor de velocidade das mesmas, o valor obtido foi $c = 1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0} \simeq 3 \times 10^8 \text{ m/s}$. Essa velocidade, “nada” mais é do que a velocidade da luz. O que aconteceu, foi que os físicos da época, indagaram sobre que referencial é essa velocidade. Existe algum sistema de referência que está em repouso absoluto, será que o próprio espaço não seria esse referencial absoluto?

Décadas antes de Einstein revelar a Relatividade para o mundo, acreditava-se que o espaço era preenchido por uma substância invisível a qual recebeu o nome de *Éter Luminífero*. Os físicos acreditavam que o éter estaria em repouso absoluto, podendo assim servir como um referencial absoluto.

Em 1887, dois físicos norte-americanos A. A Michelson e E. W Morley tentaram provar a existência do éter realizando um experimento projetado para medir o movimento da Terra em relação ao mesmo. A ideia era detectar uma diferença na velocidade da luz quando ela se propagava a favor ou contra o movimento da Terra através desse éter. Para realizar isso,

Michelson e Morley projetaram um interferômetro, um instrumento óptico que divide um feixe de luz em dois caminhos perpendiculares, fazendo com que eles percorram caminhos diferentes e, em seguida, os recombinam. A interferência entre os dois feixes de luz poderia revelar quaisquer diferenças na velocidade da luz ao longo desses caminhos.

Surpreendentemente, o experimento não detectou nenhuma variação significativa na velocidade da luz, independentemente da direção em que o interferômetro estava orientado ou da posição da Terra em sua órbita. Este resultado foi paradoxal, pois contradizia as expectativas da teoria do éter. A figura a seguir, representa o esquema do interferômetro de Michelson-Morley. O QR code dá acesso a um vídeo de demonstração do interferômetro

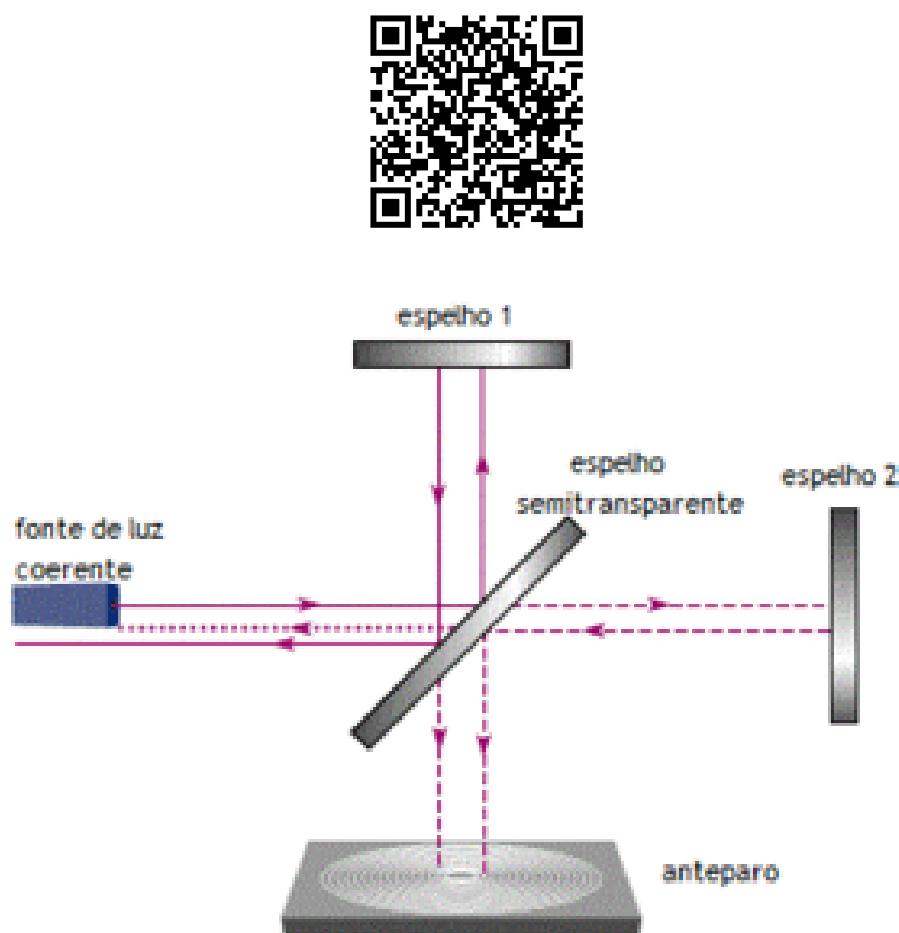


Figura 5.4 - Esquema de funcionamento do Interferômetro de Michelson-Morley

Fonte: wikipedia.org

Aqui está uma descrição básica de como o interferômetro funciona:

Divisão do feixe de luz: O interferômetro começa com uma fonte de luz, geralmente um laser, que emite um feixe de luz coerente. Esse feixe de luz é então dividido em dois por um divisor de feixe, geralmente um espelho semitransparente, conhecido como divisor de feixe.

Caminhos perpendiculares: Os dois feixes resultantes viajam ao longo de caminhos ópticos perpendiculares entre si. Um espelho reflete um dos feixes, enquanto o outro segue um caminho direto.

Reflexão e recombinação: Cada feixe atinge um espelho no final de seu caminho e é refletido de volta para o divisor de feixe. O divisor de feixe então recombina os dois feixes refletidos.

Interferência: Quando os dois feixes se encontram novamente, eles interferem uns com os outros. Dependendo das diferenças nas distâncias percorridas pelos dois feixes, ocorrerá interferência construtiva ou destrutiva.

Detecção: O padrão de interferência resultante é detectado por um observador. Se os dois feixes percorrerem distâncias iguais, ocorrerá interferência construtiva; se as distâncias forem diferentes, ocorrerá interferência destrutiva.

O resultado experimental foi totalmente diferente do que se esperava, Sendo assim, Michelson chegou a conclusão de que *não há deslocamento das franjas de interferência, demonstrando assim que a hipótese de um éter estaria incorreta*, logo, não existia um referencial privilegiado e absoluto para o qual a velocidade da luz fosse $c = 3 \times 10^8$ m/s. Então para qual referencial a luz deveria ter velocidade c ?

Essa resposta foi dada por Einstein e abalou os alicerces da Física: Para todos os referencias a velocidade da luz sempre era c .

O QR code a seguir dá acesso a uma apresentação em slide pelo software power point sobre a aula 01⁸.



⁸ link da aula 01:

https://docs.google.com/presentation/d/11Z9-QFa920rp8ADv3Z5CeeSfqHp87L3Dk9I8TPx4fwE/edit#slide=id.g26636540741_0_10

5.2 - Aula 02 - Tempo de 48 minutos

Objetivos

Apresentar os postulados de Einstein para a Relatividade Restrita e a dilatação do tempo, finalizando com um exemplo. Durante a apresentação, simulações serão mostradas para exemplificar melhor os conceitos.

Nota: Todas as equações serão deduzidas, sendo que o professor deve previamente preparar os alunos para compreendê-las. Ou seja, os alunos devem ver conceitos como velocidade média, aceleração, repouso, movimento e referenciais. Tais conceitos são obrigatórios na grade comum curricular do Novo ensino Médio para a disciplina Física. As deduções não apresentam cálculos diferenciais, apenas matemática básica, logo, é de grande importância que as deduções sejam feitas no quadro e não mostradas em qualquer software de apresentação.

Materiais/Equipamentos:

- Data show
- Pincel e apagador
- Computador
- Papel e caneta

Procedimento didático

Inicia-se a aula mostrando um trecho da série Gênios do canal National Geographic o qual trata a simultaneidade e o não absolutismo do tempo pensado por Einstein, logo depois mostrar em mídia duas situações feitas no simulador simulab (simulação de dilatação do tempo). Após mostrar, duas perguntas são feitas, porém as respostas devem ficar para o final da aula. Segue-se então para os postulados de Einstein, deixando evidente sempre o conceito histórico envolvido (afinal, Einstein não nasceu com o conhecimento da relatividade, ele adquiriu através de estudos e pesquisas). As consequências devidos aos postulados são mostradas e inicia-se a demonstração de como ocorre a dilatação do tempo.

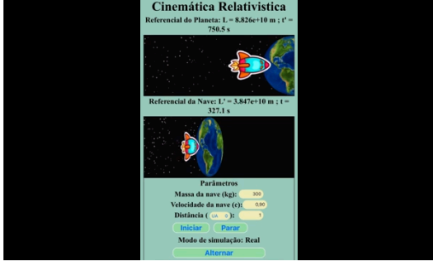


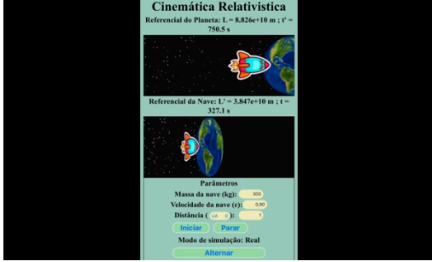
O QR Code e o link⁹ no rodapé dão acesso a um vídeo sobre simultaneidade e o não absolutismo do tempo. O trecho foi retirado da série Gênios do canal National Geographic

⁹ <https://drive.google.com/file/d/11K6CjFHgLAG7d9ZqXZM0rQ48VsAuFHuG/view?t=13>

Os postulados de Einstein

Observemos as duas situações a seguir






O que há de diferente entre as naves espaciais?

O que há de diferente entre os vídeos?

O QR code e o link abaixo levam à simulação dos vídeos acima



Ativar o Windows Defender
Acesse Configurações para ativar o Windows Defender

<https://www.scisimulab.com.br/simuls/relatividade/index.html>

Figura 5.5 - Slide 2 da segunda aula de cinemática relativística

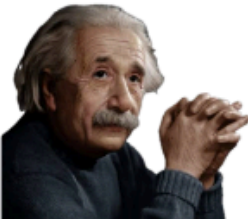
Fonte: próprio autor

Os Postulados de Einstein

Em 1905 foi proposto um princípio da relatividade por Albert Einstein, como já dito anteriormente, a relatividade não é uma teoria exclusiva de Einstein da Física moderna. Mas há uma diferença entre os princípios anteriores e o proposto em 1905, o de Einstein é mais abrangente, se aplica tanto às leis da mecânica quanto às leis da eletrodinâmica. Ficou sendo o primeiro postulado.

Os postulados de Einstein

I - Princípio da Relatividade: As leis da física são as mesmas em todos os referenciais inerciais. Isso significa que não há um "referencial absoluto" e que as observações e medições feitas em diferentes sistemas de referência em movimento uniforme devem levar às mesmas leis físicas. Essencialmente, não há como determinar se você está em repouso absoluto ou se movendo com velocidade constante; as leis da física serão as mesmas em ambos os casos.



II - Velocidade da Luz Constante: A velocidade da luz no vácuo é constante e independente da velocidade da fonte de luz ou do observador. Isso significa que a velocidade da luz é um valor universal invariável que vale c . Independentemente da velocidade do observador em relação à fonte de luz, a velocidade da luz permanece a mesma para todos os observadores.

Figura 5.6 - Slide 03 da segunda aula de cinemática Relativística

Fonte: próprio autor

Interpretando o primeiro postulado, as leis da Física são as mesmas em um referencial inercial em repouso ou em um referencial inercial com velocidade constante, em um experimento por exemplo, os resultados devem ser exatamente iguais em ambos referenciais. Sendo assim, um observador não seria capaz de demonstrar se seu referencial inercial está em repouso ou em movimento.

Esse postulado deixa muito claro o resultado nulo obtido no experimento de Michelson-Morley, é justamente a prova de que não é possível detectar o movimento absoluto.

Einstein chegou em outra importante conclusão por conta das propriedades incomuns das ondas eletromagnéticas no espaço “livre”. Essa conclusão é o segundo postulado.

No pensamento clássico, se estivéssemos viajando em uma nave espacial com velocidade bem próxima à da luz, os raios da luz vindo do fundo da espaçonave demorariam muito tempo para chegar até nós.



Figura 5.7 - Pensamento clássico sobre a velocidade da luz

Disponível em: Canal professor Cícero

Porém, pelo segundo postulado, um raio de luz ou a luz continuará medindo a mesma velocidade c independente da velocidade da fonte.

Uma outra consequência, ainda por conta do segundo postulado, é sobre o conceito de simultaneidade.

Simultaneidade

A priori, simultaneidade parece ser um conceito extremamente simples, afinal, dizemos que dois eventos são simultâneos quando ocorrem ao mesmo tempo, porém, apenas do ponto de vista da física clássica. Quando o conceito passa para a relatividade restrita, a coisa muda um pouco. Se valendo de uma demonstração simples, é possível mostrar que a definição da física clássica não é válida.

Exemplo: Considere um observador em uma plataforma de trem. Em um determinado instante, um trem que está passando tem seu centro alinhado com o observador de modo que tanto sua extremidade direita quanto a esquerda se encontram à mesma distância do observador da plataforma.

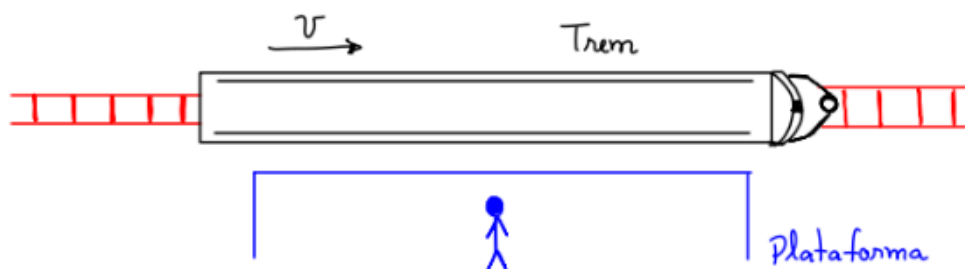


Figura 5.8 - Observador na plataforma de trem

Disponível em: Canal professor Cícero

Digamos que neste mesmo instante, dois raios caíram sobre o trem, um em cada extremidade. Para o observador na plataforma os raios atingem o trem simultaneamente, mas e para o observador do trem? Os eventos (quedas dos raios) são simultâneos?

Na figura a seguir, o ponto C representa o observador da plataforma, enquanto o ponto C' representa o observador no trem

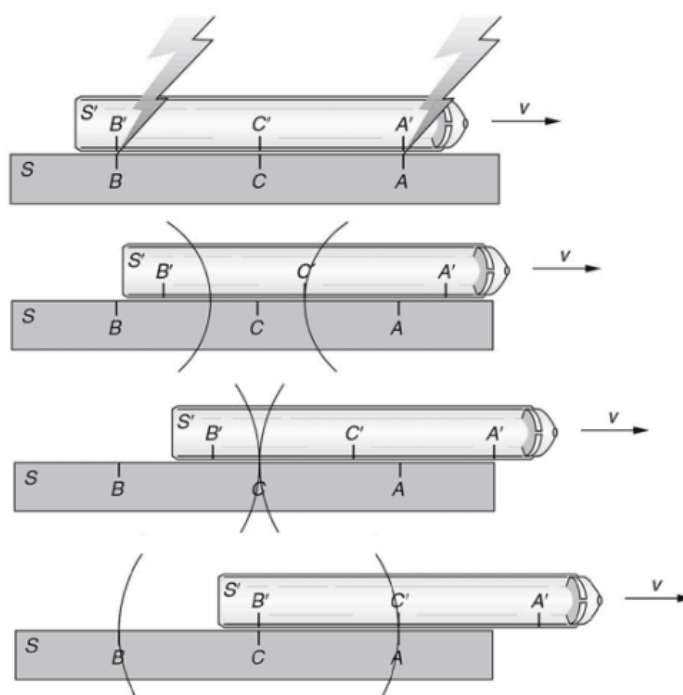


Figura 5.9 - Momento que os raios caem

Disponível em: Canal professor Cícero

Note que quando C recebe as informações de queda dos dois raios ao mesmo tempo, C' recebe primeiro a informação do raio que caiu na frente e só depois a informação do raio que caiu atrás. Isso acontece porque C' está se movendo em direção ao feixe de luz da frente e contrária ao feixe de luz de trás.

Sendo assim, o conceito de simultaneidade precisa ser modificado: *Dois eventos são simultâneos em referencial inercial não necessariamente devem ser simultâneos em outro referencial inercial que se move em relação ao primeiro.*

O Espaço-Tempo

Dois observadores lado a lado, em repouso um em relação ao outro, compartilham um mesmo sistema de referência. Ambos concordariam em suas medições de espaço e dos intervalos de tempo entre eventos dados, portanto, dizemos que eles compartilham a mesma região do espaço-tempo

No entanto, pelos postulados da relatividade, como consequência, se existir movimento relativo entre eles, os observadores não irão concordar em suas medições do espaço e do tempo.

Não é por acaso que as medidas se diferenciam, mas de maneira tal que cada observador sempre medirá a mesma razão entre o espaço e o tempo para a luz, quando maior for a distância espacial medida, maior será o intervalo de tempo medido:

$$\frac{ESPAÇO}{TEMPO} = \frac{ESPAÇO}{TEMPO} = C$$

Dilatação Temporal

Para começarmos a entender a dilatação temporal, imaginemos o seguinte experimento: Uma espaçonave move-se com velocidade constante e de intensidade v , em relação a um observador em repouso localizado na superfície do planeta Terra. Chamaremos para simplificar os referenciais da Terra de S e o do astronauta de S' .

Em seu interior um astronauta dispõe uma fonte de Luz presa ao solo da espaçonave, capaz de emitir pulsos luminosos de pequena duração. Esses pulsos luminosos viajam em linha reta e vertical atingindo um espelho fixado imediatamente acima da fonte luminosa, no teto da espaçonave, de modo que o pulso pode ser refletido de volta para sua fonte onde também existe um detector.

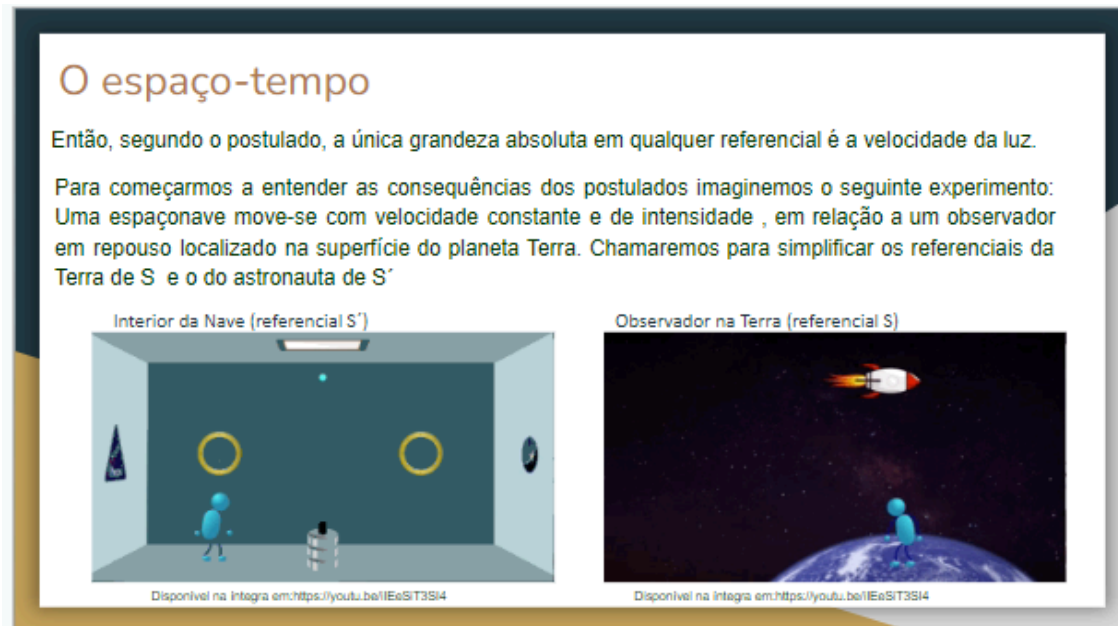


Figura 5.10 - Slide 06 da segunda aula

Fonte: próprio autor

Como já foi dito, para o observador localizado na Terra, a espaçonave tem o movimento que pode ser visualizado abaixo Contudo, o que nos interessa saber é qual o

caminho observado para o pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Seguramente não deve ser o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador na Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.

O espaço-tempo

Bom, mas o que nos interessa é saber qual a trajetória do pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Pelo princípio da relatividade, não é o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador em Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.



the observer on earth sees a **diagonal path**

Disponível na íntegra em <https://youtu.be/IEeSIT3SI4>

Os dois observadores irão concordar quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulada da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Figura 5.11 - slide 07 da segunda aula, observador vendo o foguete no início da trajetória

Fonte: próprio autor

O espaço-tempo

Bom, mas o que nos interessa é saber qual a trajetória do pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Pelo princípio da relatividade, não é o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador em Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.



the observer on earth sees a **diagonal path**

Disponível na íntegra em <https://youtu.be/IEeSIT3SI4>

Os dois observadores irão concordar quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulada da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Figura 5.12 - slide 07 da segunda aula, observador vendo o foguete no meio da trajetória

Fonte: próprio autor

O espaço-tempo

Bom, mas o que nos interessa é saber qual a trajetória do pulso de luz quando visto a partir do referencial em Terra. Pelo princípio da relatividade, não é o mesmo observado pelo astronauta, já que para o observador em Terra, existe o movimento da espaçonave e que deve ser levado em consideração.



the observer on earth sees a **diagonal path**

Os dois observadores irão concordar quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulada da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Disponível na Intagra em <https://youtu.be/IEeSIT3SI4>

Figura 5.13 - slide 07 da segunda aula, observador vendo o foguete no meio da trajetória

Fonte: próprio autor

Enquanto o astronauta assiste o pulso caminhar em trajetória retilínea, o observador em Terra enxerga uma trajetória diagonal.

Acontece que enquanto a espaçonave passa pela Terra, o astronauta aciona seu aparato que emite um pulso de luz, e ambos veem o pulso luminoso, sua reflexão na superfície do espelho e o retorno do raio de Luz.

Os dois observadores concordarão quanto ao fenômeno ocorrido, a isso chamaremos de evento. É importante o fato de que os dois observadores enxergarão o mesmo fenômeno, lembre-se de que o 1º postulada da relatividade restrita estabelece que não existem referenciais privilegiados.

Onde estaria então a diferença na observação do fenômeno?

Para entendermos melhor o que está acontecendo, iremos começar a calculando o tempo devido ao movimento vertical do pulso de luz visto pelo astronauta, baseando-se na altura da espaçonave e na velocidade do feixe de Luz, que chamaremos de c .

Chamando a altura da espaçonave de D , temos

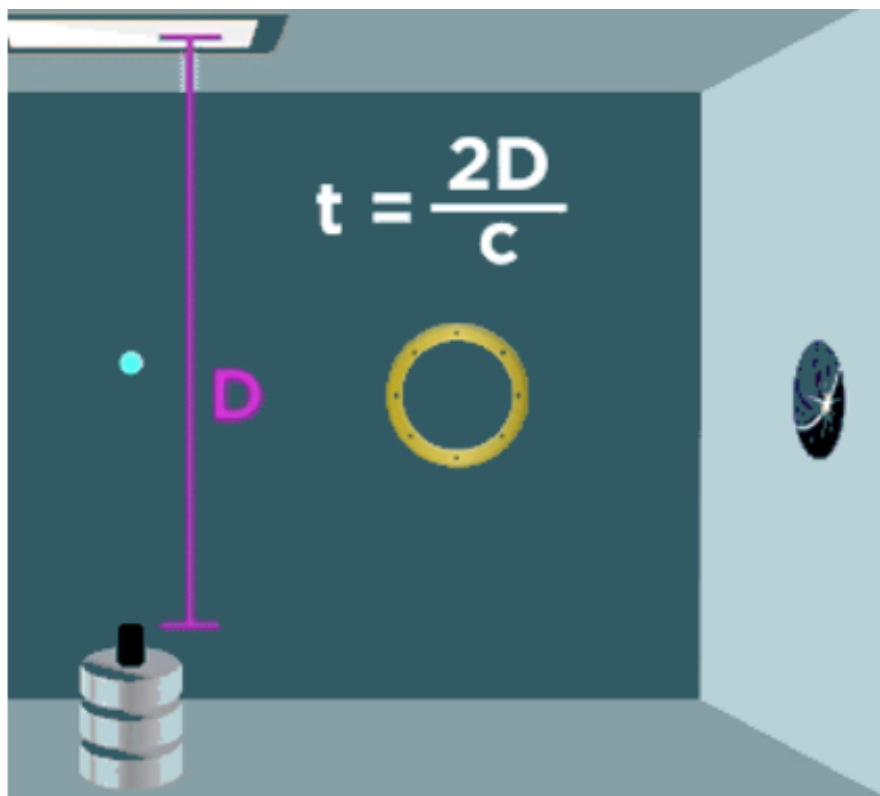


Figura 5.14 - tempo de percurso de ida e volta do “raio” de luz

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/iIEeSiT3SI4>

Aqui introduzimos a notação Δt_p ao invés de simplesmente t , correspondente ao que chamamos de tempo próprio do observador. É o intervalo de tempo medido por quem encontra-se no referencial da espaçonave.

$$\Delta t_p = \frac{2D}{c} = \frac{\text{comprimento percorrido pelo raio de luz}}{\text{velocidade da luz}}$$

Seguindo o mesmo raciocínio, podemos calcular o intervalo de tempo necessário para que a Luz percorra a trajetória como vista pelo observador na Terra.

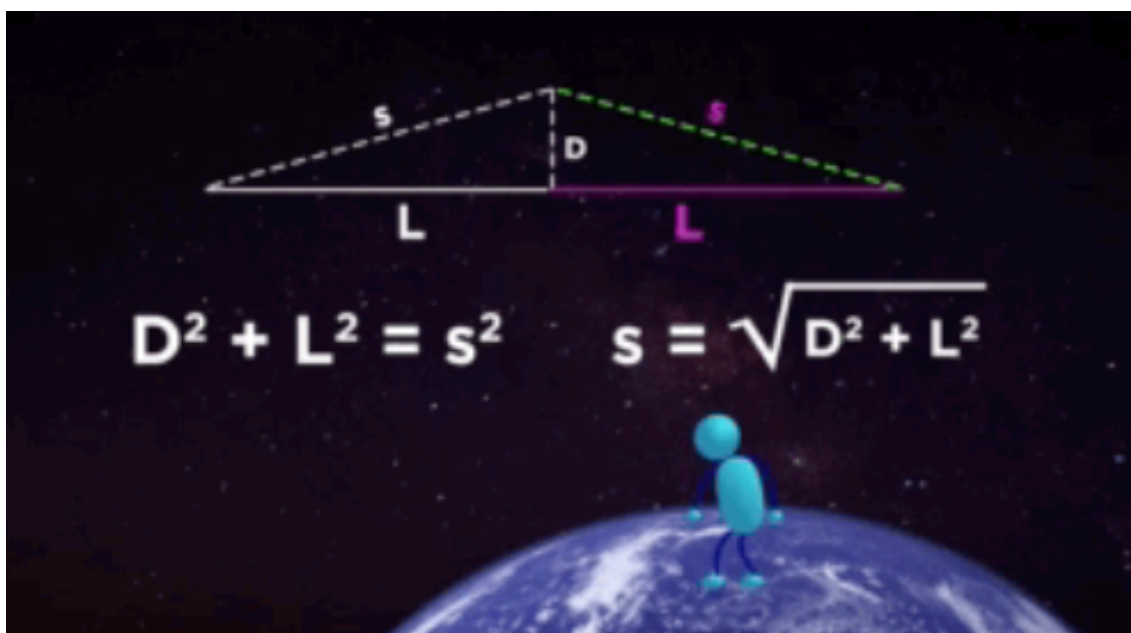


Figura 5.15 - trajeto do raio de luz visto pelo observador na Terra

Disponível na íntegra em: <https://youtu.be/iIEeSiT3SI4>

Utilizando a nomenclatura da animação, temos

$$D = \textit{dist\~{a}ncia vertical}$$

$$L = \textit{dist\~{a}ncia horizontal percorrida pela espa\~{c}onave}$$

$$S = \textit{caminho do pulso de luz observado da Terra}$$

Agora vamos explicitar essas medidas em função de outras grandezas, como a velocidade da espaçonave v e a velocidade da Luz c .

$$L = \frac{v\Delta t}{2}$$

$$S = \frac{c\Delta t}{2}$$

Com essas duas substituições podemos calcular o tempo medido pelo observador homem em repouso na Terra, no referencial que chamamos de S . Usando o teorema de Pitágoras, tem-se

$$D^2 + L^2 = S^2$$

$$D^2 + \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2$$

Em seguida, isolamos o termo dependente do tempo

$$\Delta t = \frac{2D}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Com mais um pouco de álgebra

$$\Delta t = \frac{2D}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Como

$$\Delta t_P = \frac{2D}{c}$$

Obtemos a relação entre os dois intervalos de tempo

$$\Delta t = \frac{\Delta t_P}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_P$$

Nosso último resultado relaciona intervalos de tempo diferentes. O intervalo de tempo medido no referencial S' , é diferente do intervalo de tempo medido no referencial S . O astronauta e o observador na Terra não concordam quanto ao valor desses intervalos. A diferença é dada por um fator que relaciona os dois intervalos de tempo.

Denotaremos por γ , que também é chamado de fator de Lorentz. Ele mostra que o tempo medido por um observador dito em repouso em relação a outro que se move, é multiplicado por um número maior do que 1 toda vez que um observador se movimenta em relação a outro.

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

Isso acaba gerando uma consequência direta acerca das percepções de cada observador. Embora ambos possam reconhecer o mesmo fenômeno, que é a emissão do pulso luminoso, ambos discordam sobre quando tal evento ocorreu.

Em nosso cotidiano não percebemos esses efeitos em nossas experiências porque as velocidades com as quais nos movimentamos em relação a referenciais que estejam em repouso, digamos objetos parados em relação à superfície da Terra, são muito baixas. Observe que o fator de Lorentz relaciona a velocidade de movimento dos corpos com a velocidade de propagação da luz, que possui um valor gigantesco se comparado às nossas experiências diárias.

Efeitos relativísticos perceptíveis ocorrem quando as velocidades dos corpos são de aproximadamente 10%, ou quando tem-se movimentos que ocorrem por longos períodos de tempo provocando efeitos cumulativos.

5.3 - Aula 03 - Tempo de 48 minutos

Objetivos

Levar os alunos para o laboratório de informática, apresentar os softwares de simulações nos sites e deixar que eles façam as simulações, na busca de compreender os fundamentos físicos agora por simulações. Nesta aula também, o professor irá resolver exercícios relacionados às simulações.

Materiais/Equipamentos:

- Laboratório de informática
- Data show

Procedimento didático

No projeto, o professor mostra como as simulações funcionam. A partir daí os alunos podem fazer as simulações sozinhos no computador, o professor deve ficar apenas auxiliando caso necessário.

As primeiras simulações estão no site da **Universidade Federal de Santa Catarina**. Fazem parte de UMA PROPOSTA PARA O ENSINO DA RELATIVIDADE

RESTRITA ATRAVÉS DE SIMULAÇÕES DESENVOLVIDAS A PARTIR DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL EASY JAVA SIMULATIONS.

A primeira simulação (**simulação 1**) mostra os efeitos da dilatação do tempo e da contração do espaço, através de uma nave espacial em uma viagem interestelar. As outras duas mostram o conceito de simultaneidade em duas situações distintas (**simulação 2** e **simulação 3**). Em uma delas através da emissão de dois fótons (dois eventos) e outra através de dois raios elétricos (dois eventos) gerados por duas nuvens.

Simulação 01 - Contração relativística: Nesta simulação, é possível apenas alterar a velocidade da nave, porcentagem em relação a velocidade da luz. De acordo com a velocidade escolhida, os dados como *comprimento da nave em repouso*, *comprimento da nave em movimento*, *tempo no interior da nave* e *tempo para um observador externo*, serão mostrados se irão ser alterados e o valor da alteração.

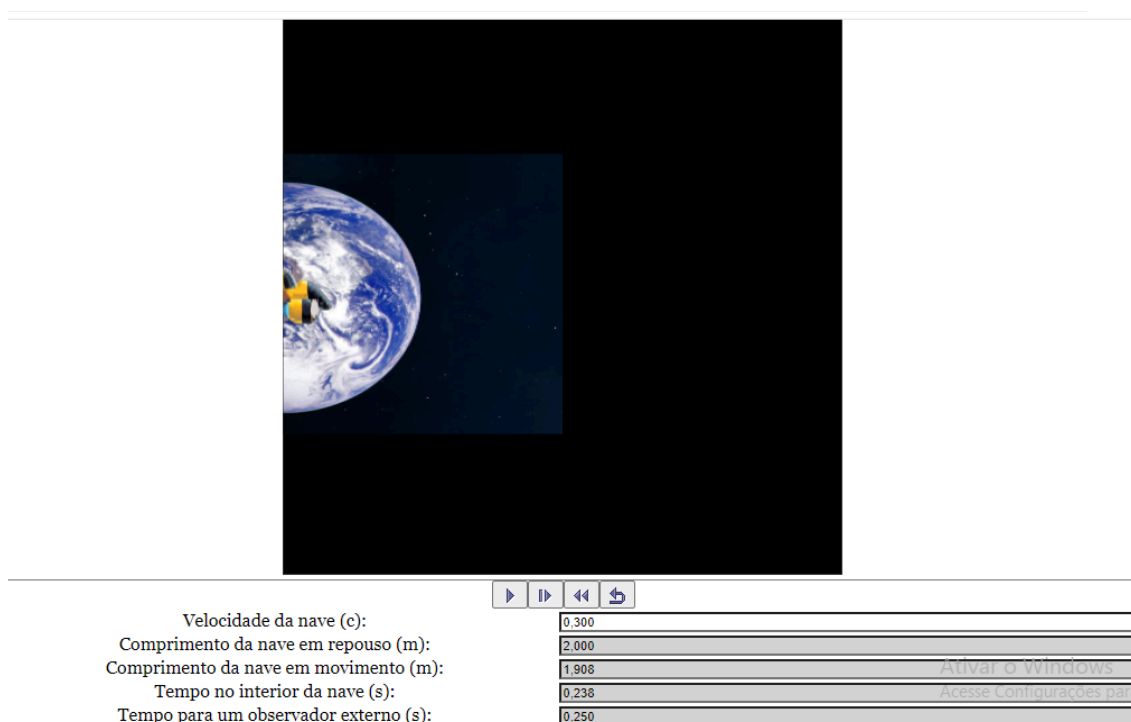


Figura 5.16 - Simulador contração relativística

Fonte: site da Universidade Federal de Santa Catarina

A seguir a um QR Code e um link que levam à **simulação 01**



https://alloy.sites.ufsc.br/ejss_model_sim1/sim1_Simulation.xhtml

Simulação 02 - Simultaneidade: Nesta simulação é apresentado dois eventos, assim como no primeiro, é possível apenas alterar a velocidade do objeto que se move. É possível fazer análises de baixas e altíssimas velocidades e perceber que para baixas velocidades, o pensamento clássico é válido, porém para altíssimas velocidades o conceito de simultaneidade deve ser repensado.

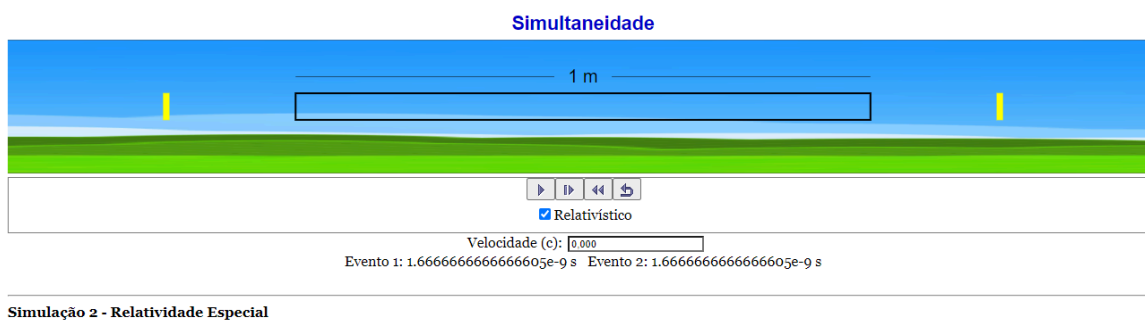


Figura 5.17 - simulador 2 simultaneamente

Fonte: site da Universidade Federal de Santa Catarina

O QR Code e um link que levam à **simulação 02**



https://alloy.sites.ufsc.br/ejss_model_sim3/sim3_Simulation.xhtml

Simulação 03 - Simultaneidade: Esta simulação tem os mesmos fundamentos da simulação 02, porém com um cenário diferente e que deixa um pouco mais simples a visualização da simultaneidade

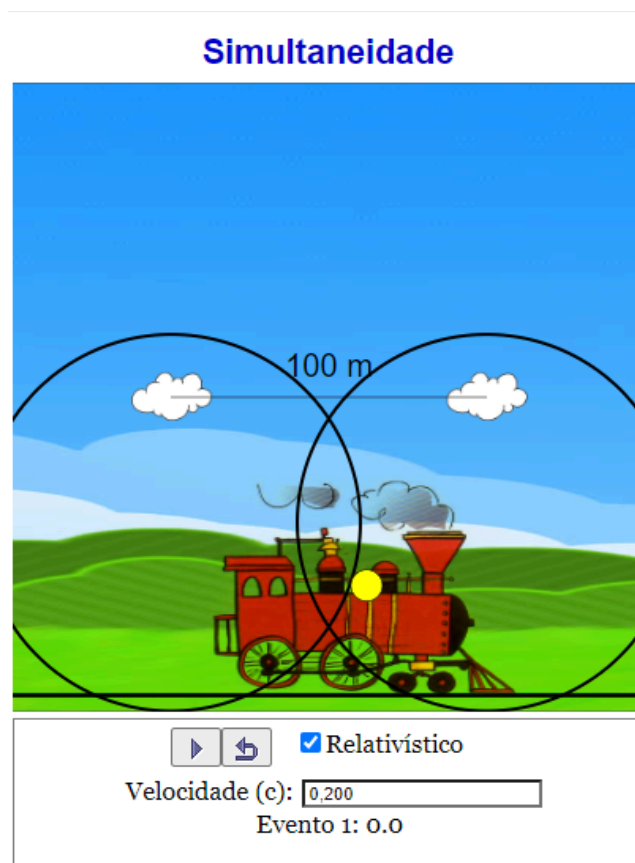


Figura 5.18 - simulador 3 simultaneamente

Fonte: site da Universidade Federal de Santa Catarina

O QR Code e um link que levam à **simulação 03**



https://alloy.sites.ufsc.br/ejss_model_train/train_Simulation.xhtml

Questão:

Física - Young and Freedman - Vol 4-Ed 12ª - Capítulo 37 Exercícios - Ex. 11

Por que somos bombardeados por múons?

Múons são partículas subatômicas instáveis que sofrem decaimento e se transformam em elétrons com vida média de $2,2 \mu\text{s}$. Eles são gerados quando raios cósmicos bombardeiam as camadas superiores da atmosfera a cerca de 10 km acima da superfície da Terra e, descolam-se com uma velocidade muito próxima à da luz. O problema que gostaríamos de discutir, é por que vemos múons na superfície da Terra.

a) Qual é a maior distância que um múon poderia percorrer durante sua vida média de $2,2 \mu\text{s}$?

b) De acordo com a sua resposta à parte (a), seria de imaginar que os múons nunca chegariam à superfície. Mas a vida média de $2,2 \mu\text{s}$ é medida no sistema do múon e, múons se movem muito rápido. A uma velocidade de $0,999c$, qual é a vida média de um múon em referência a um observador em repouso na Terra? Qual distância o múon nesse tempo? Esse resultado explica porque encontramos múons em raios cósmicos?

c) Do ponto de vista do múon, ele continua vivendo durante $2,2 \mu\text{s}$, então como ele alcança o solo? Qual a densidade dos 10 km de atmosfera que o múon precisa atravessar?

Passo 1

letra a)

A maior distância que um múon pode poder percorrer é se ele tiver velocidade igual a da luz, logo:

$$\begin{aligned}d &= vt = ct \\d &= (3 \times 10^8)(2,2 \times 10^{-6}) \\d &= 660 \text{ m}\end{aligned}$$

Passo 2

letra b

Para um observador em repouso na Terra, a vida média do múon irá sofrer uma dilatação temporal, ou seja:

$$\begin{aligned}\Delta t &= \gamma \Delta t' \\ \Delta t &= \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \Delta t'\end{aligned}$$

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}}} (2,2 \times 10^{-6})$$

$$\Delta t = 4,9 \times 10^{-5} s$$

Passo 3

A distância que ele percorreria seria:

$$d = vt$$

$$d = (0,999)(3 \times 10^8)(4,9 \times 10^{-5})$$

$$d = 15000 m$$

No referencial da Terra, o múon pode percorrer 15 km na atmosfera, por isso o encontramos em raios cósmicos.

Passo 4

letra c)

Queremos saber agora quanto vale a distância de 10 km para o múon. Para o múon, a distância irá contrair, assim:

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

$$l = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} l_0$$

$$l = \sqrt{1 - \frac{(0,999c)^2}{c^2}} (1000)$$

$$l = 450 m$$

No referencial do múon, a altura da atmosfera é menor do que a distância que ele se move durante a sua vida útil.

5.4 - Aula 04 - Tempo de 48 minutos

Objetivos

Esta aula será dedicada para que os alunos façam um teste para diagnosticar os conhecimentos adquiridos.

Materiais/Equipamentos:

- Canetas/ lápis
- Teste impressos

Teste

1) Sabemos que Albert Einstein publicou trabalhos muito importantes sobre a Teoria da Relatividade Restrita. Se por um acaso, Einstein não tivesse publicado tais trabalhos naquele momento, tal teoria teria chances iguais ou próximas de ser desenvolvida? Explique sua resposta.

2) **Marque a alternativa que completa o texto:** No século XIX, os cientistas acreditavam que a luz precisava de um meio para se propagar, então para desempenhar esse papel pensaram em uma hipótese.

- a) O éter luminífero era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- b) Uma substância gasosa misteriosa existente era a hipótese que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- c) O Plasma Universal era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.
- d) A Matéria Escura era uma hipotética substância que se acreditava preencher o espaço vazio e servir como meio de propagação para a luz.

3) Marque os nomes de cientistas com contribuições na Física você que já ouviu falar

- Henri **Poincaré** Galileu Galilei Albert A. **Michelson** Hendrik **Lorentz**
 Fitzgerald Edward Williams **Morley**
 Albert **Einstein** James C. **Maxwell**
 Isaac **Newton** Hippolyte Fizeau

Em poucas palavras, descreva as vantagens (se houveram) em estudar a história antes de estudar um novo assunto sobre Física?

4) Qual é a importância da história da relatividade restrita no desenvolvimento da física e na nossa compreensão do universo?

5) Sabendo que a Terra gira no sentido Leste, imagine que uma aeronave está em um ponto do planeta na linha do equador e precisa chegar no ponto oposto ainda na linha do equador. Qual seria o trajeto com tempo mais curto, ir pelo sentido leste (mesmo sentido da Terra) ou no sentido oeste (sentido contrário ao da rotação terrestre) ?



6) Não querendo buscar uma definição precisa sobre o conceito de tempo, e apesar de utilizarmos a palavra tempo em nosso dia-a-dia, leia atentamente as frases que seguem e marque com um X a(s) que mais se aproxima(m) da idéia de tempo que você tem.

- a) () O tempo não passa na aula do professor Chatonildo!
- b) () O atleta completou a prova em um tempo de 1 hora 45 minutos e 37 segundos.
- c) () O tempo passa, não temos como impedir.
- d) () O tempo dirá e não há o que você possa fazer para mudar.
- e) () Se eu for duas vezes mais rápido, levarei a metade do tempo para chegar em casa.
- f) () Todas as luzes da praça acenderam ao mesmo tempo.
- g) () Não temos todo o tempo do mundo, o amanhã pode nem chegar!
- h) () O tempo passa mais devagar nos relógios em movimento.
- i) () O tempo se revela como um filme, quadro a quadro.

7) Explique, para cada uma das frases que assinalou, qual é o significado da palavra tempo que você tem em mente.

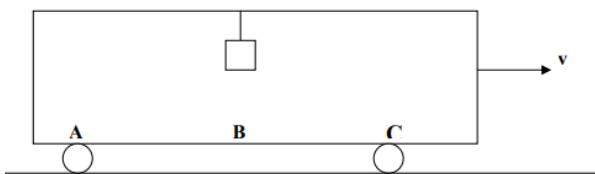
8) Escreva com suas próprias palavras: o que é tempo para você?

9) Quando olhamos para o céu, durante uma noite estrelada, estamos observando o:

() Passado () Presente () Futuro

10) Por quê?

11) O ônibus se movimenta por uma estrada retilínea como mostra a figura.

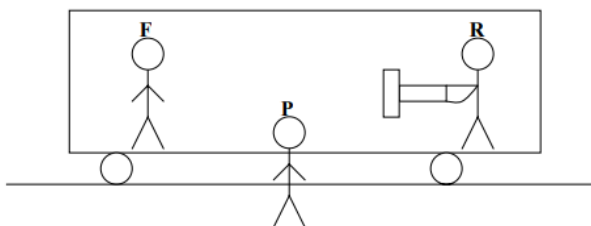


Num dado instante, um pacote se desprende do topo do ônibus e cai no chão. Em que ponto o pacote deverá cair quando o ônibus:

- estiver em repouso em relação ao solo;
- estiver se deslocando com velocidade constante de 100 km/h;
- esteja se deslocando com velocidade constante de 10000 km/h.

Justifique suas respostas.

12) Imagine a seguinte situação: dois amigos, Fábio e Rafael, estão dentro de um vagão. Rafael, à direita, segura uma lanterna e quando a acende, raios de luz partem da lanterna na direção de Fábio. Considere a velocidade da luz igual a $3 \cdot 10^8$ m/s. Justificando cada item, responda às questões abaixo.



Para Fábio, qual será a velocidade da luz quando: a) ele está em repouso em relação à Rafael; b) ele se move para a direita com velocidade de 5 m/s; c) ele se move para a esquerda com velocidade de 3 m/s. Considere que o vagão esteja em repouso em relação ao solo.

13) (UFRJ, Física 4, P2 - 2011.2, Questão ME06) Um observador na Terra vê uma espaçonave passar com velocidade $0,5c$. Na ponta da espaçonave, uma partícula é lançada para trás com velocidade $0,4c$ em relação à espaçonave. Qual a velocidade da partícula para o observador na Terra?

Considerações finais

Em consonância com o novo currículo do ensino médio e as orientações estabelecidas pela BNCC, espero que este produto educacional possa servir como suporte para o ensino da cinemática relativística, bem como para a teoria que a explica, a Relatividade Restrita. Estamos cientes das dificuldades inerentes à transposição didática desses conteúdos, especialmente no que tange à base algébrica e às questões epistemológicas, visto que o domínio desses fenômenos vai além da observação e percepção da realidade cotidiana. Por esse motivo, apresentamos um conjunto de estratégias para abordá-los com excelência, visando a aprendizagem significativa.

As estratégias e recursos empregados nesta UEPS objetivam a participação ativa dos alunos, pois esse comportamento é benéfico para a construção da aprendizagem com significados. Dentre as estratégias, a Cosmologia mostrou-se um cenário propício para enriquecer as discussões da temática trabalhada, uma vez que a cinemática relativística possui sua parcela de contribuição nos desdobramentos do pensamento cosmológico moderno. No entanto, é necessário esclarecer as interpretações controversas entre os tipos de redshift resultantes da compreensão frágil dos conceitos.

Portanto, espero que este produto possa auxiliar os professores em suas práticas, no sentido de promover a aprendizagem significativa acerca do conteúdo de cinemática relativística.

Referências Bibliográficas

1. ALONSO, Marcelo. Física: um curso universitário, v. 2 Campos e ondas / Marcelo Alonso, Edward J. Finn; Giorgio Moscati (coord.); tradução Ivan C. Nascimento, Curt E. Hennies. 2. ed. brasileira, São Paulo: Blucher, 2015.
2. AMAZONAS. Referencial Curricular Amazonense, 2019. Disponível em: <https://www.sabermais.am.gov.br/pagina/jornada-pedagogica-2020-referencial-curricular>. Acessado em 09 de março de 2022.
3. AMAZONAS. Secretaria de Estado de Educação. Proposta Curricular e Pedagógica Ensino Médio (PCP-EM). 2021. Disponível em: <https://www.sabermais.am.gov.br/pagina/novo-ensino-medio-amazonas>. Acessado em 09 de março de 2022.
4. ANDERSON, L. W.; KRATHWOHL, K. R. A. Taxonomy for learning, teaching and assessing: a revision of Blooms taxonomy of educational objectives. New York: Longman, 2001.
5. BAGDONAS, Alexandre. Controvérsias envolvendo a natureza da Ciência em sequências didáticas sobre a cosmologia. Tese (Doutorado em Ensino de Física) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2015. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/81/81131/tde-14092015-112555/publico/Alexandre_Henrique_Bagdonas.pdf. Acessado em 21 de julho de 2022.
6. BELHOT, R. V.; FERRAZ, A. P. C. M. Taxonomia de Bloom: revisão teórica e apresentação das adequações do instrumento para definição de objetivos instrucionais. Gestão e Produção. São Paulo, v. 17, n 2, p. 421-431, 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/gp/a/bRkFgcJqbGCDp3HjQqFdqBm/?format=pdf&lang=pt>. Acessado em 16 de março de 2022.
7. BLOOM, B.S.; MADDAUS, G. F.; HASTINGS, J. T. Manual de Avaliação Formativa e Somativa da Aprendizagem do Aluno. Nova York: McGraw-Hill, 1971.
8. BRASIL. Ministério da Educação. Bases Legais - Parâmetros Curriculares Nacionais Ensino Médio. Brasília, 2000. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/blegais.pdf>. Acessado em 05 de fevereiro de 2022.
9. BRASIL. Ministério da Educação. Base Nacional Comum Curricular. Brasília, 2018. Disponível em:

- http://basenacionalcomum.mec.gov.br/images/BNCC_EI_EF_110518_versaofinal_site.pdf. Acesso em: 05 fevereiro 2022.
10. CARUSO, Francisco. Física moderna: origens clássicas e fundamentos quânticos / Francisco Caruso; Vitor Oguri. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
 11. DE ALCANTARA, Marlon Cesar; LEAL, Karel Pontes. Edwin Hubble & the Puzzle of Astronomical Red Shifts. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de São Paulo, 2015. Disponível em:
https://scholar.google.com.br/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=dwin+Hubble+%5C%26+the+Puzzle+of+Astronomical+Red+Shifts&btnG=. Acessado em 21 de julho de 2022.
 12. EINSTEIN, Albert. Sobre o princípio da relatividade e suas implicações. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, p. 37-61, 2005.
 13. FILHO, G. E.; SAUER, L. Z.; ALMEIDA, N. N.; VILLAS-BOAS, V. Uma nova sala de aula é possível: aprendizagem ativa na educação em engenharias / Gabriel Elmôr Filho ... [et al.] 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.
 14. MAZUR, Eric. Peer instruction: a revolução da aprendizagem ativa / Eric Mazur; tradução: Anatólio Laschuk. Porto Alegre: Penso, 2015.
 15. MACIEL, Rafael Ramos. A Astronomia nas aulas de Física: uma proposta de utilização de Unidades de Ensino Potencialmente Significativa (UEPS). Dissertação (Mestrado Profissional em Ensino de Física) - Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá, SC, 2016, 94p. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/178264>. Acessado em 10 de abril de 2022.
 16. MOREIRA, M.A. Unidades de Ensino Potencialmente Significativas - UEPS. Aprendizagem Significativa em Revista / Meaningful Learning Review, Vol. 1, n. 2, pp. 43-63, 2011. Disponível na página pessoal do Prof. Marco Antônio Moreira:
<https://www.if.ufrgs.br/~moreira/UEPSport.pdf>. Acessado em: 19 de março de 2022.
 17. MULLER, Alexei Machado. Fundamentos de Astronomia e Astrofísica para o ensino superior na modalidade a distância [recurso eletrônico] / Alexei Machado Muller, Dra. Maria de Fátima Oliveira Saraiva e Dr. Kepler de Souza Oliveira Filho. Porto Alegre: UFRGS, Instituto de Física, 2013. Disponível em:
http://lief.if.ufrgs.br/pub/cref/n30_Muller. Acessado em 7 de junho de 2022.
 18. NUSSENZVEIG, Herch Moysés. Curso de Física Básica - vol. 4 / H. Moysés Nussenzveig. 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 1998.

19. OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. *Astronomia e Astrofísica*, 2. ed. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2004.
20. PELLEGRINO, O; CRUZ, A. *Controlo Metrológico dos cinemómetros*. Laboratório Central de Metrologia Instituto Português da Qualidade. Disponível em: http://www.spmet.pt/Eventos/Encontro1/Olivier_Pellegrino.pdf. Acessado em 02 de agosto de 2023.
21. SATO, Eduardo A. *Atividade Experimental: Expansão sem centro*. Torta de Maçã Primordial, Campinas, 13 de junho de 2019. Disponível em: <https://www.blogs.unicamp.br/tortaprimordial/expansao-sem-centro/>. Acessado em 18 de setembro de 2023.
22. SIQUEIRA, Gustavo Almeida. *Conceitos Físicos em Métodos de Detecção de Exoplanetas: Método Doppler* / Gustavo Almeida Siqueira. Barra do Garças - MT, 2020. 60p.: il. (algumas color.); 30 cm.
23. STUDART, Nelson. Einstein: uma breve cronologia. *Revista Física na Escola*, v. 6, n. 1, 2005. Disponível em: <http://www1.fisica.org.br/fne/phocadownload/Vol06-Num1/cronologia1.pdf>. Acessado em 03 de abril de 2022.
24. TIPLER, Paul A., 1933. *Física Moderna* / Paul A. Tipler e Ralph A. Llewellyn; tradução e revisão técnica Ronaldo Sérgio de Biasi. 6. ed. [Reimpr.] Rio de Janeiro: LTC, 2017. il.; 28 cm.
25. TREVISAN, A. L.; AMARAL, R. G. A Taxonomia revisada de Bloom aplicada à avaliação: um estudo de provas escritas de Matemática. *Ciência e Educação*, Bauru, v. 22, p. 451-464, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ciedu/a/PGX4mJD5LKdqbpPpTZgYTN/?format=pdf&lang=pt>. Acessado em 16 de março de 2022.

ANEXOS

Anexo A

Lista de Links e QRcode

Capítulo 3: Experimentos Históricos

QR Code para Experimento de Michelson-Morley

Link: [Simulação do interferômetro de Michelson](#)

Descrição: Este QR code leva a uma simulação que explica o funcionamento do interferômetro de Michelson-Morley, um experimento crucial que tentou detectar o "vento de éter" e fornecer provas da teoria da relatividade restrita ao demonstrar a constância da velocidade da luz em diferentes referenciais.



Capítulo 5: Produto Educacional e Aplicações Práticas

QR Code para Aula 01

Link: [Apresentação da Aula 01](#)

Descrição: Acesso a uma apresentação em slides da Aula 01, que introduz a cinemática relativística. A aula foi planejada para dar uma visão inicial sobre os conceitos fundamentais e estabelecer uma base para discussões posteriores sobre o tempo e o espaço relativos.



QR Code para Simulação de Dilatação do Tempo - Série Gênios

Link: [Vídeo sobre simultaneidade e o não absolutismo do tempo](#)

Descrição: Este QR code direciona a um vídeo retirado da série "Gênios", do canal National Geographic, que explora a simultaneidade e o conceito de que o tempo não é absoluto. Ideal para complementar a explicação sobre a relatividade do tempo e como ela foi pensada por Einstein.



QR Code para Simulação 01 - Contração Relativística

Link: [Simulação de Contração Relativística](#)

Descrição: Nesta simulação, os estudantes podem experimentar com a velocidade da nave em relação à velocidade da luz para observar a contração do comprimento da nave e a dilatação do tempo, conceitos centrais da teoria da relatividade restrita.



QR Code para Simulação 02 - Simultaneidade

Link: [Simulação de Simultaneidade](#)

Descrição: Apresenta o conceito de simultaneidade para diferentes velocidades, comparando situações em que a simultaneidade é válida em baixas velocidades, mas precisa ser repensada em velocidades muito altas, conforme descrito na relatividade.



QR Code para Simulação 03 - Simultaneidade Alternativa

Link: [Simulação Alternativa de Simultaneidade](#)

Descrição: Variante da Simulação 02, esta simulação apresenta uma visão simplificada para facilitar a compreensão da simultaneidade em um contexto alternativo, ajustando a visualização do fenômeno para diferentes cenários.

Esses QR codes oferecem acesso a materiais didáticos visuais e interativos que facilitam a compreensão dos conceitos complexos da cinemática relativística, conectando teoria e prática através de simulações e vídeos educacionais.