



UMA DISCUSSÃO HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICA DE UMA TEORIA

Alanah Garcia da Silva
Nádia Cristina Guimarães Errobidart

Mestrado em Ensino de Ciências
Instituto de Física
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Apresentação

O produto didático apresentado é resultado da dissertação de mestrado intitulada: uma discussão histórico-epistemológica da teoria da relatividade restrita em histórias em quadrinhos. Foi elaborado com o objetivo de orientar o início da ação do professor em sala de aula para discussão do conceito histórico da teoria da relatividade restrita.

Para isso, elaboramos um produto pautado na abordagem histórica conforme as orientações da visão da natureza da ciência. Ela sugere que a abordagem do conceito histórico no processo de ensino leve em consideração os seguintes itens:

Visão epistemológica contemporânea: 1- O conhecimento científico, enquanto durável, tem um caráter não absoluto; 2 - o conhecimento científico baseia-se fortemente, mas não totalmente, na observação, nas evidências experimentais, nos argumentos racionais e no ceticismo; 3 - não existe uma maneira única de se fazer ciência, ou seja, não há um método científico universal; 4 - a ciência é uma tentativa de explicar os fenômenos naturais; 5 - leis e teorias exercem papéis diferentes na ciência, sendo que teorias não se tornam leis, mesmo quando evidências adicionais ficam disponíveis; 6 - pessoas de todas as culturas contribuem para com a construção/desenvolvimento da ciência; 7 - os novos conhecimentos devem ser comunicados de forma clara e aberta; os cientistas necessitam de registros precisos, revisão por pares e replicabilidade dos estudos realizados; 8 - as observações são carregadas de teorias; cientistas são criativos; 9 - a ciência é parte das tradições culturais e sociais; 10 - a história da ciência apresenta um caráter tanto evolutivo quanto revolucionário; 11 - a ciência e a tecnologia impactam uma à outra; 12 - ideias científicas são afetadas pelo seu meio social e histórico (MCCOMAS, ALMAZROA e CLOUGH, 1998, p.513, tradução nossa).

Após a construção do produto fizemos uso da linguagem em quadrinhos, pois consideramos que este tipo de linguagem pode contribuir para os processos de ensino e aprendizagem pelo

a) [...] fato dos estudantes quererem ler os quadrinhos; b) palavras e imagens, juntos, ensinam de forma mais eficiente; c) existe um alto nível de informação nos quadrinhos; d) as possibilidades de comunicação são enriquecidas pela familiaridade com as histórias em quadrinhos; e) os quadrinhos auxiliam no desenvolvimento do hábito da leitura, f) os quadrinhos enriquecem o vocabulário dos estudantes; g) o caráter elíptico da linguagem quadrinhística obriga o leitor a pensar e imaginar; h) os quadrinhos podem ser utilizados em qualquer nível escolar e com qualquer tema (RAMA e VERGUEIRO, 2008, p.21).

Este produto é composto por duas Histórias em quadrinhos sobre a Teoria da Relatividade Restrita. A primeira HQ é destinada aos professores com orientações para seu uso, e a segunda, aos alunos.

As Histórias em quadrinhos contêm quatro partes, narrando fatos históricos como a invenção do telescópio, em que muitos acreditam ter sido fabricado por Galileu Galilei; a sua desavença com a Igreja Católica até a sua condenação a prisão domiciliar, finalizando com as discussões a respeito do movimento relativo dos corpos celestes, com o cientista Johannes Kepler. Evidenciamos o uso de ideias de Galileu e Kepler pelo cientista Descartes. Tais ideias, foram reformuladas mais tarde por Isaac Newton, e ficaram conhecidas como as três Leis de Newton. Este, também discute com seus discípulos e a comunidade científica questões relacionadas a natureza da luz.

No quadrinhos, enunciamos o final da teoria corpuscular da luz, proposta por Newton, e a construção de uma nova teoria: a teoria ondulatória da luz. Para isso, destacamos os trabalhos de Christian Huygens, Thomas Young e August Fresnel. Além desta questão, apresentamos o problema da aberração da luz, uma vez que os cientistas não conseguiam determinar com precisão a posição das estrelas pelo fato da luz parecer vir de outra direção devido ao movimento da Terra.

Com isso, apresentamos também James Clerk Maxwell que tenta medir a velocidade da luz no éter, mas, sem sucesso, deixando com a sua principal contribuição: a junção de duas áreas da Física a eletrodinâmica e o eletromagnetismo, e a luz como uma onda eletromagnética. Também apresentamos a questão do financiamento de grandes empresários às pesquisas científicas, como o interferômetro de Michelson e Morley, finalizando com o seu resultado inesperado, explicado pela contração do espaço, proposta por Hendrik Lorentz e George FitzGerald.

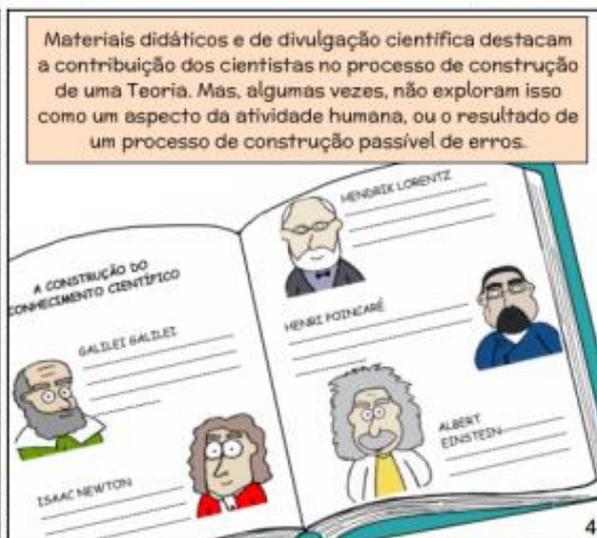
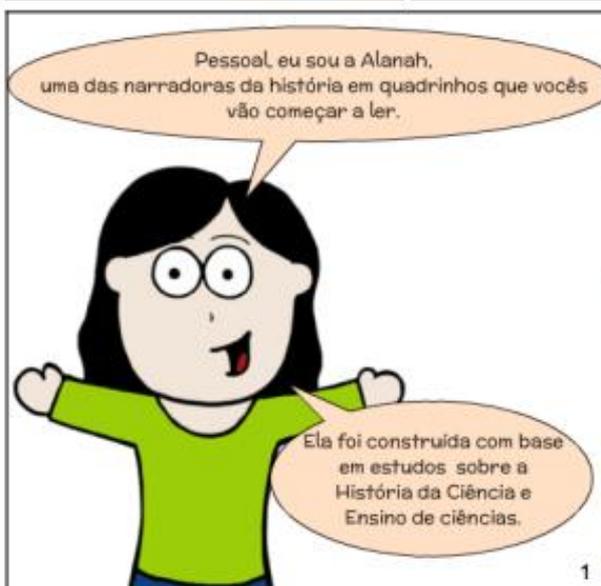
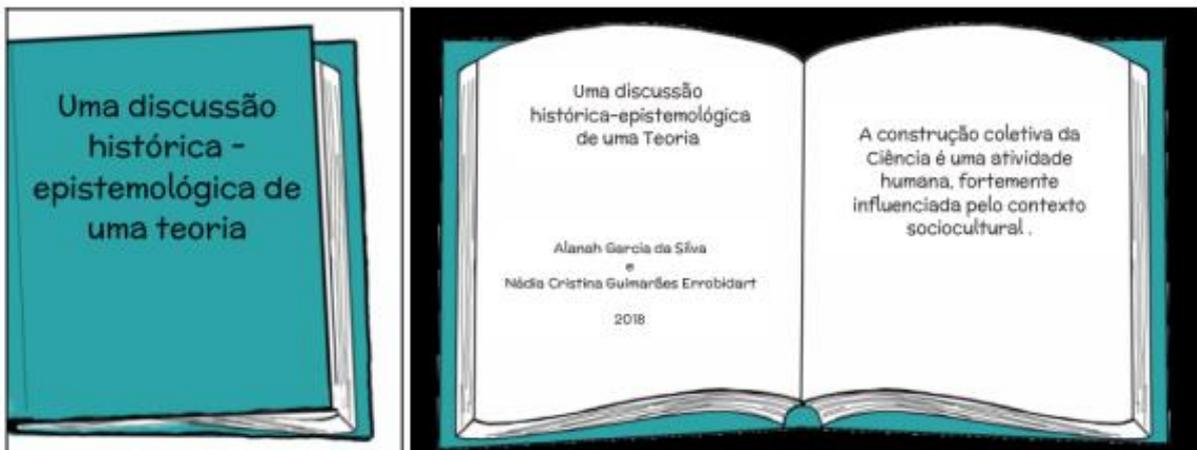
Por fim, apresentamos o princípio da Relatividade proposto por Henri Poincaré, até a formulação da Teoria da Relatividade Restrita, publicada por Albert Einstein. Também discutimos a contração do espaço-tempo e, finalizando com o paradoxo dos gêmeos.

Sumário

A HISTÓRIA DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA.....	10
O COMEÇO DE UMA HISTÓRIA: DE GALILEU A KEPLER	10
NEWTON, O EXPERIMENTO DO BALDE E A LUZ COMO PARTÍCULA	20
HUYGENS À LORENTZ: A LUZ COMO ONDA E OS INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E MORLEY	26
A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA DE POINCARÉ E EINSTEIN	32
.....	32

A HISTÓRIA DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA

O COMEÇO DE UMA HISTÓRIA: DE GALILEU A KEPLER







12

O telescópio contribuiu com o desenvolvimento da Astronomia, possibilitando uma melhor visualização de corpos celestes, visíveis e invisíveis a olho nu. Seu desenvolvimento e aperfeiçoamento foi impulsionado por contextos sociais como o militar, por exemplo, no qual o instrumento possibilitava a visualização de objetos distantes.

E, com o aperfeiçoamento do telescópio, Galileu começou a estudar as órbitas dos planetas.



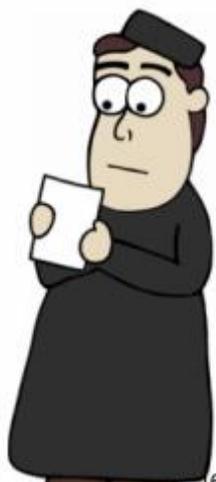
13

14



15

Galileu costumava escrever cartas aos seus amigos para, com eles, discutir observações e possíveis conclusões sobre as suas visualizações astronômicas. Esse costume era comum no período do Renascimento. Para evitar problemas com a Igreja Católica, alguns filósofos faziam uso de nomes fictícios ao assinarem suas cartas. Isso também era comum entre religiosos que contribuíam para a construção do conhecimento científico, ou, buscavam alternativas para conciliar as Sagradas Escrituras com as discussões sobre o sistema planetário, como o padre Benedetto Castelli, amigo e colaborador de Galileu.



16

Em 1613, Galileu escreve outra carta, agora para seu amigo e colaborador Padre Castelli. Nela assume publicamente seu posicionamento sobre os sistemas planetários. Entendendo o sentido de manifesto da carta, Castelli mandou fazer cópias dela e distribuiu a outros religiosos.



17

Conforme ocorria o aprimoramento da luneta, melhorando assim a visualização dos corpos celestes, o descontentamento dos membros da comunidade religiosa aumentava. A Igreja passou a monitorar as cartas escritas por Galileu aos seus amigos. Além dos relatos de Galileu sobre os satélites de Júpiter, o brilho dos corpos celestes e o movimento dos planetas, as informações apresentadas nas cartas sinalizavam sua crença no Heliocentrismo. Ao lerem o conteúdo das cartas, alguns religiosos reclamavam da exposição das Sagradas Escrituras e da pouca reverência de Galileu aos padres jesuitas, os quais se dedicavam a estudos semelhantes.

As cartas escritas por Galileu sugerem que as Escrituras Sagradas não podem ter uma interpretação literal.

Ele faz pouco caso à filosofia de Aristóteles.



18

Os jesuitas, principalmente, começaram a pressionar o Papa, simpatizante das ideias de Galileu, para que ele tomasse um posicionamento a respeito.

Galileu continua insinuando que a Terra não é o centro do universo.

Essa é a ordem natural estabelecida por Deus.

Vou conversar com ele!

Ele deve explicar-se ao Tribunal do Santo Ofício.



19

Para acalmar os integrantes da Igreja, um dos Cardeais sugeriu que Galileu deveria escrever uma solução de compromisso, na qual, tornaria público que suas conclusões sobre as observações astronômicas eram meras hipóteses.

Está ficando difícil acalmar os ânimos.

Ele precisa se retratar.



20

Galileu recusou a fazer uma solução de compromisso. Ele argumentou que, aqueles que o questionavam não tinham como base resultados astronômicos para rejeitarem suas conclusões sobre o movimento dos planetas. Isso provocou mais revolta e em 1616, ele foi convocado pelo Papa a prestar esclarecimentos.



Com isso, Galileu viajou até Roma, para conversar com as autoridades da Igreja Católica, sobre os resultados de suas observações com a luneta.



Neste encontro de 1616, Galileu foi apenas advertido verbalmente pelo Papa. Ficou proibido de defender o modelo de Copérnico, como alternativa para a cosmologia. Ele foi avisado que, se insistisse em divulgar tais ideias, seria intimado pelo Tribunal do Santo Ofício.



Desde então, seu trabalho foi acompanhado de perto por membros da Igreja. Essa vigilância perdurou por 17 anos.



Nesse período, Galileu vivenciou uma intensa competição científica com jesuítas, que se dedicavam aos estudos das ciências naturais. As divergências entre Galileu e os cientistas jesuítas estavam associadas as observações e conclusões sobre as manchas solares e a natureza dos cometas, principalmente. Os problemas de Galileu com a Igreja, que culminaram na advertência recebida em 1616 e persistiu até sua condenação em 1632, tinham como fonte as divergências com o padre Orazio Grassi, que usava o pseudônimo de Lotario Sarsi. Ele era membro da Companhia de Jesus, a qual tinha grande influência no Tribunal do Santo Ofício e, era responsável pelo movimento educacional humanista do período renascentista.



27

O Tribunal do Santo Ofício foi criado pela Igreja, muito tempo antes do Século XVI. Ele era o instrumento usado pela Igreja para combater seu enfraquecimento frente a construção do conhecimento em astronomia, matemática e filosofia natural, ou seja, da ciência moderna, que crescia com o movimento renascentista, e, com o avanço do protestantismo religioso. Alguns estudos indicam que o Papa era amigo de Galileu e esse pode ser um dos motivos do processo contra Galileu se arrastar de 1616 até 1632.



28

A ridicularização dos estudos de Grassi sobre os cometas foi considerada como uma afronta aos jesuítas teólogos, filósofos e cientistas da época. Entretanto, como o livro de Galileu recebeu a benção do Papa para ser publicado, contestá-lo publicamente seria afrontar a autoridade do Papa Urbano VIII.



Sentença?

Sim.

Retrate-se ou você será condenado!

Eu retiro o que disse.

aceito a condenação

29

Galileu se viu obrigado a abjurar de suas ideias para não ter o mesmo fim de Giordano Bruno, que foi condenado à fogueira, e então, queimado vivo pela inquisição.

Galileu viveu em prisão domiciliar, até a sua morte, em 1642.

Ele é um dos mais notáveis filósofos da ciência moderna.



30

Antes de sua condenação, Galileu Galilei realizou estudos sobre diferentes temas da filosofia natural e seus resultados inspiraram muitos outros trabalhos.

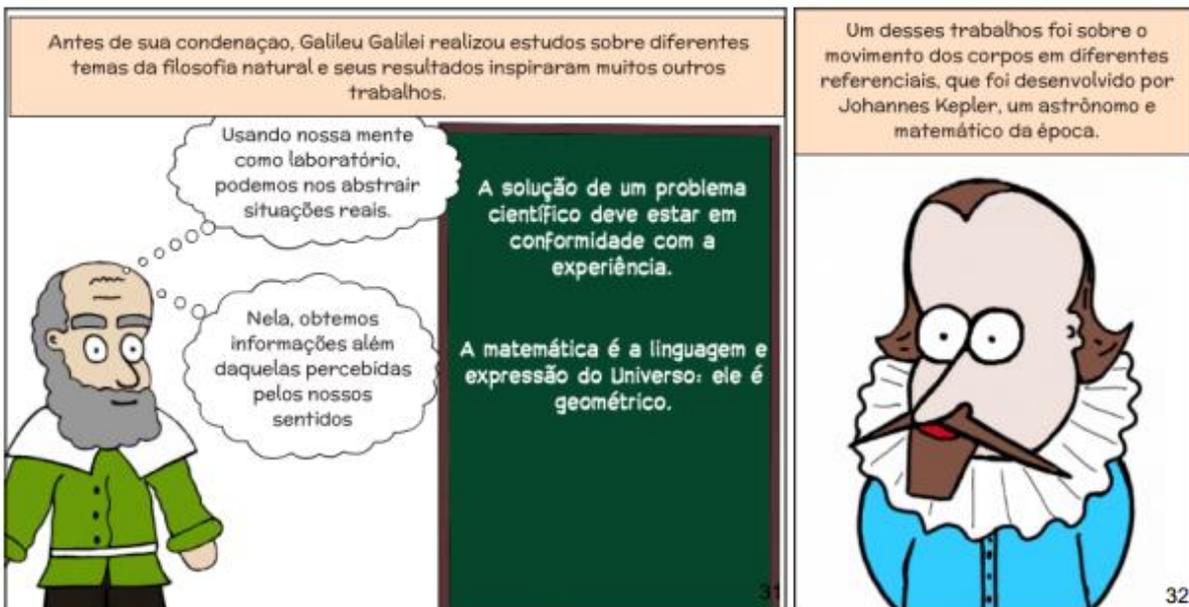
Um desses trabalhos foi sobre o movimento dos corpos em diferentes referenciais, que foi desenvolvido por Johannes Kepler, um astrônomo e matemático da época.

Usando nossa mente como laboratório, podemos nos abstrair situações reais.

Nela, obtemos informações além daquelas percebidas pelos nossos sentidos

A solução de um problema científico deve estar em conformidade com a experiência.

A matemática é a linguagem e expressão do Universo: ele é geométrico.



31

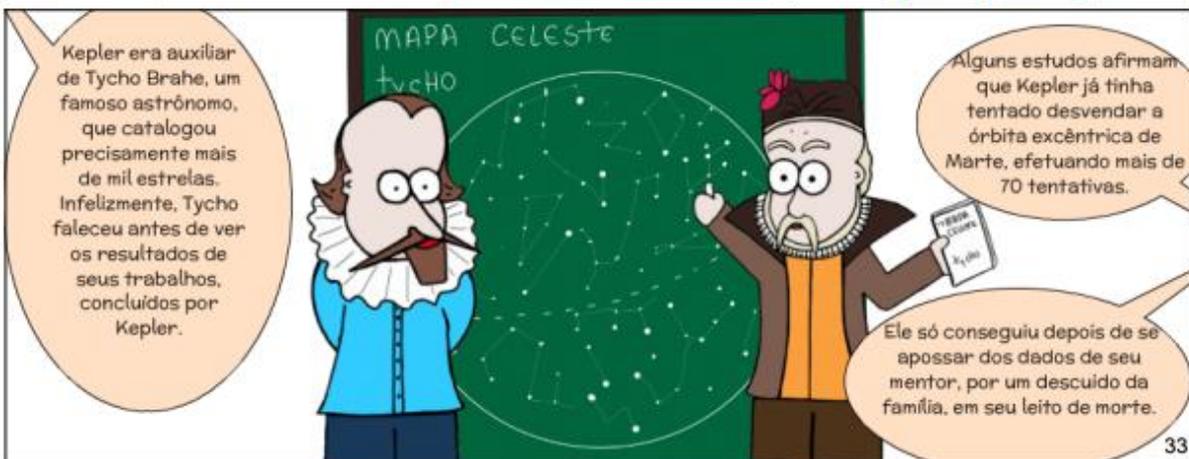
32

Kepler era auxiliar de Tycho Brahe, um famoso astrônomo, que catalogou precisamente mais de mil estrelas. Infelizmente, Tycho faleceu antes de ver os resultados de seus trabalhos, concluídos por Kepler.

MAPA CELESTE
tycho

Alguns estudos afirmam que Kepler já tinha tentado desvendar a órbita excêntrica de Marte, efetuando mais de 70 tentativas.

Ele só conseguiu depois de se apossar dos dados de seu mentor, por um descuido da família, em seu leito de morte.



33

Outra significativa contribuição Galileu está relacionada ao que denominou-se experimento imaginário.

Na carta, Galileu pediu para que Kepler imaginasse um experimento dentro de um navio.

Envie essa carta a Kepler.

Quero que ele me ajude a avaliar as consequências de um experimento utilizando a mente como laboratório.

O que acontece se jogar uma bola para cima quando um navio está parado? E quando em movimento?

Para pensar melhor a respeito dessa situação, vou pedir para a assistente fazer uma ilustração.



34

35

Na sociedade como um todo, não foi fácil a vida das mulheres sábias, principalmente a partir dos últimos anos do século XV. Como eram consideradas fracas física e moralmente, com inteligência limitada e dificuldade para raciocínio lógico, aquelas que se destacavam eram consideradas como bruxas. Apesar de não identificarmos nomes de mulheres que contribuíram para a Revolução Científica, a capacidade de trabalho delas foi amplamente empregada no século XVII. Eram desenhistas ou tradutoras de obras científicas.

Essas são minhas orientações. Faça as duas ilustrações.

Sim senhor.

36

Assim como outros cientistas que colaboraram com o processo de construção da Ciência, muitas mulheres eram consideradas como simples assistentes de cientistas como Kepler e Galileu, e foram ignoradas para a posteridade. Elas eram responsáveis pelos trabalhos que careciam de habilidades manuais como ilustrações de experimentos e instrumentos, e, também pela tradução de algumas das obras científicas, por eles utilizadas.

Acompanhe o trabalho da assistente.

Garanta que ela vai conseguir seguir minhas orientações.

Veja se ficou boa essa ilustração que ela já fez?

37

Na época, Kepler e Galileu trocaram várias cartas discutindo sobre o movimento do navio.

Se o navio se movimenta rapidamente, a bola não deveria cair no mesmo lugar da qual foi lançada, pois o navio muda de posição, por causa da sua velocidade.

Então, o observador externo iria ver o movimento da bola em forma de uma parábola.

38



Para descrever as observações desses experimentos imaginários, Galileu enunciou o que podemos considerar como os primeiros passos para a construção da Teoria da Relatividade Restrita. Ao argumentar sobre a experiência do navio, ele tentou entender os efeitos que ocorriam no navio, na bola e em um referencial externo.

Isso resume o resultado desses experimentos imaginários e meus estudos.

Princípio da relatividade:

1 - se as leis da mecânica são válidas em um dado referencial, então são também válidas em qualquer referencial que se mova com velocidade retilínea e uniforme em relação ao primeiro.

Princípio da Inércia:

2 - um corpo permanece em seu estado de repouso ou de movimento retilíneo uniforme a menos que ajam forças sobre ele, alterando assim seu estado.

44

No entanto, Galileu não acreditava que o Princípio da Inércia era válido para os corpos celestes.

Ele defendia que os movimentos circulares eram mais apropriados.

Para comprovar a sua teoria, investigava a existência de uma força externa.

45

Kepler buscou adequar seus estudos com o princípio da inércia, de Galileu. Propôs que o Sol era a fonte de todo o movimento e os planetas descreveram elipses a sua volta.

Os dados de Tycho, mostram algo inesperado.

As órbitas são elípticas!

Preciso discutir isso com Galileu. Vou escrever uma carta.

46

No entanto, Galileu relutou em concordar com a órbita elíptica.

Ele nunca respondeu a segunda carta de Kepler, que pedia que ele assumisse publicamente as suas ideias copernicanas.

47

As ideias de Galileu e Kepler influenciaram na Teoria da Gravitação Universal, pautada nas ideias de Descartes e Newton, anos mais tarde.

Uma Teoria científica não é construída nem comprovada unicamente a partir da experiência.

Mas essa é uma questão, discutida em outra parte dessa história em quadrinhos.

48

NEWTON, O EXPERIMENTO DO BALDE E A LUZ COMO PARTÍCULA

Os estudos de Galileu, Kepler e outros membros da comunidade científica influenciaram muitos outros cientistas.

Os estudos de Descartes o levaram a concluir que só existem movimentos relativos.

Todo movimento é uma mudança de posição em relação a algum objeto.

O navio só está em movimento, em relação à árvore, quando se aproxima ou se afasta dela.

1. Corpos em Repouso permanecem em repouso e corpos em movimento permanecem em movimento, a não ser que, uma força externa aja sobre.

2. O movimento inercial ocorre em linha reta.

3. Se um corpo em movimento colide com outro, o corpo de menor resistência muda de direção sem perder seu movimento.

Leis que regem os movimentos, segundo Descartes:

49

50

As questões relacionadas ao movimento da Terra, foram discutidas por diversos membros da comunidade científica. Esse debate estava alicerçado nas conclusões de Galileu, Kepler e outros cientistas.

René Descartes, por exemplo,

considerava coerente a afirmação de Kepler sobre o sistema planetário autogovernado, no qual o Sol era a fonte do movimento do Universo.

De acordo com Kepler, o Sol possuía uma força motora, parecida com a do magnetismo da Terra.

Era isso que provocava as órbitas elípticas dos planetas.

51

Tais ideias foram aceitas pela comunidade científica, até o momento em que Isaac Newton, retomou a discussão do movimento dos corpos celestes em relação a um meio material: o éter.

Senhores, vamos revisar nossos estudos sobre o problema do movimento dos corpos.

A rotação da Terra deve produzir efeitos observáveis, como um arrasto do éter.

52

53



O mesmo deveria acontecer se a Terra estivesse parada, no éter.

Não seria possível observar o éter, porque assim como a água no balde, ele estaria em repouso em relação a Terra.

Exatamente.

Terra em repouso no éter

Porém, se o balde começar a rotacionar, a água não começará a girar instantaneamente.

A água começará a girar apenas algum tempo depois...

acompanhado o movimento do balde.

Balde girando, água parada

Sim, isso mesmo.

Terra começando a se movimentar em relação ao éter

Depois de algum tempo, teríamos o balde e a água girando juntos,

e nesse momento, a superfície da água deixaria de ser plana e passaria a ser côncava.

Balde e água girando juntos

O mesmo que acontece com água o balde, aconteceria se a Terra estivesse se movimento em relação ao éter.

Terra se movendo em relação ao éter

Deveríamos observar um "vento" de éter côncavo em relação a Terra.

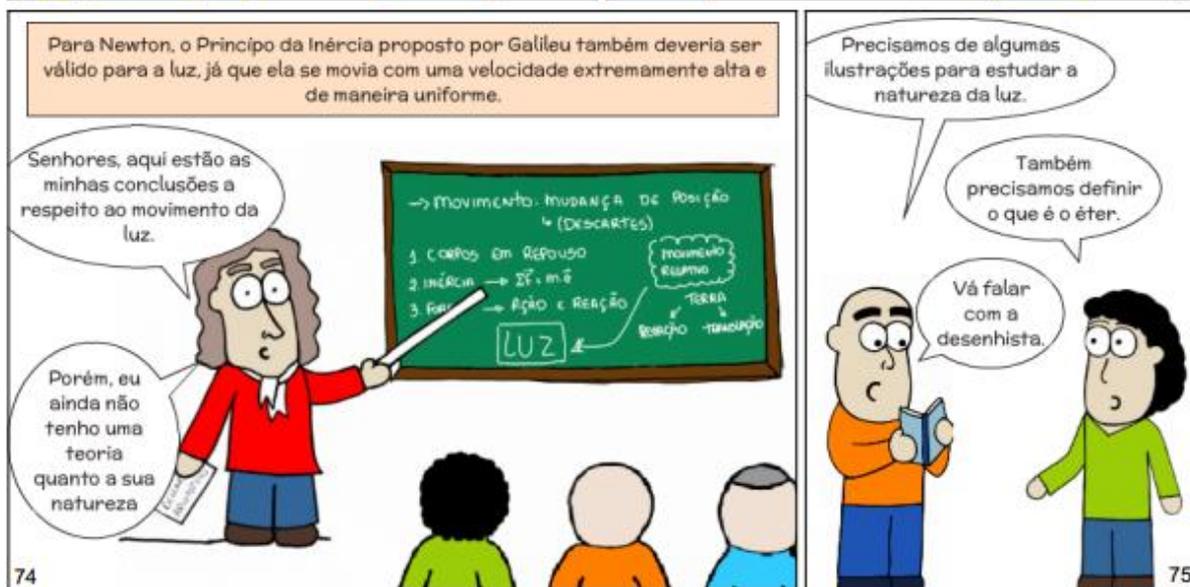
Mas, nós não observamos o vento de éter, porque o arrasto é comum ao movimento da Terra.

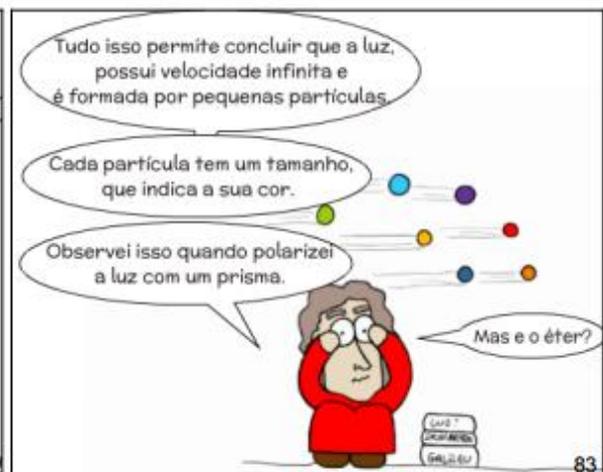
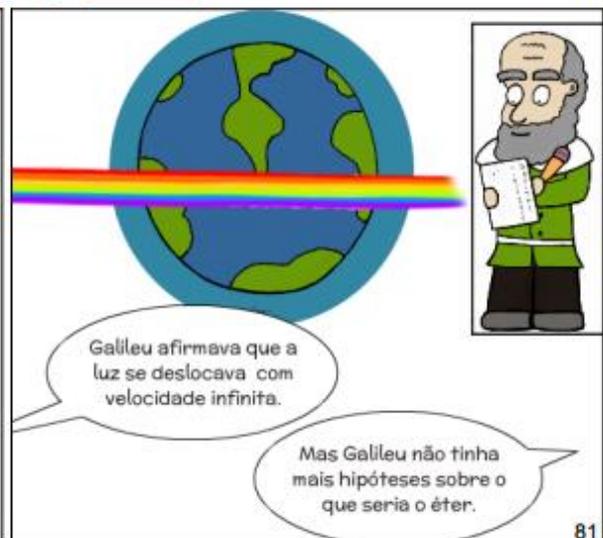
Então, não é possível detectar o éter, porque ele se move junto com a Terra.

Isso significa que, o movimento de translação é comum a todas as partes que se movem junto com a Terra.

Parece que sim!







HUYGENS À LORENTZ: A LUZ COMO ONDA E OS INTERFERÔMETRO DE MICHELSON E MORLEY

Apesar da teoria formulada por Newton, para explicar a natureza da luz, ser a mais aceita durante o Século XVII,

nem todos os cientistas da academia concordavam com ela.

Huygens era um desses.

84

Newton e Huygens tinham teorias bem diferentes em relação a natureza da luz

Discordo dessa interpretação!

Vou conversar com outros cientistas da academia sobre isso.

85

Meus caros colegas,

Considero que luz é uma perturbação que se propaga em um fluido universal, o éter. Ela é uma onda não periódica, igual ao som.

Newton não pode estar errado.

Huygens, nós não estamos tão certos a respeito disso.

86

Essa discussão sobre a natureza da luz perdurou até o início do Século XIX, com intensos debates na academia. Somente após os resultados do experimento da fenda dupla, realizado por Thomas Young, August Fresnel e colaboradores, a comunidade científica começou a aceitar a luz como uma onda.

87

Young era um médico e autodidata em várias áreas do conhecimento. Seus estudos tinham como objetivo estabelecer uma analogia entre a voz e a visão humana.

Olha Young, o feixe de luz ao passar pelo aparato de fendas duplas se divide em cores.

Essas cores se juntam novamente ao passar pelo prisma.

88

Ao comunicar os resultados nos jornais mais importantes da época, Young utilizou alguns argumentos de Newton, concordando com eles ou negando-os. A divulgação dos resultados do experimento promoveu a construção, aceitação e rejeição de conhecimentos relacionados aos fenômenos de reflexão, refração interferência e a polarização da luz.

Mesmo sendo o mais conhecido crítico da teoria ondulatória, Newton possui muitos seguidores.

fazer uso de suas hipóteses vai dar credibilidade aos meus textos.

89

Apesar da estratégia de divulgação dos resultados, o texto Young sofreu muitas críticas. Ele explicava adequadamente o fenômeno de polarização da luz, mas não dava respaldo para muitos outros fenômenos influenciados pelo movimento anual da Terra, como a paralaxe e a aberração evidenciada nas observações astronômicas.

Pois é. Já refiz as minhas contas várias vezes. Quando observo aquela estrela, no telescópio, ela está em um lugar diferente do que foi previsto.

O que será que acontece? Parece que a luz faz uma curva.

Robert Hooke, não consigo definir de forma clara a posição de algumas estrelas.

Eu também

Por mais que eu tente, sempre as observo em um lugar diferente daquele previsto teoricamente, segundo as hipóteses de Young.

90

Em 1809, utilizando um prisma, François Arago realizou um experimento, com o objetivo de verificar qual era o ângulo da luz de uma estrela em relação ao movimento da Terra. Se esse ângulo fosse fixo, colocaria um fim na aberração da luz. No entanto, a sua teoria em relação a velocidade da luz tinha alguns erros...

Conforme meus estudos, a velocidade da luz dentro do prisma é constante, e não depende do movimento da Terra. No entanto, se a Terra estiver se afastando da estrela, essa velocidade diminui, assim como, se a Terra estiver se aproximando, a velocidade aumenta.

Porém, na prática, a velocidade é sempre a mesma. Não consigo entender o porquê. Preciso pensar mais sobre isso.

92

Em 1817, Laplace, Biot, Poisson, Arago e Gay-Lussac eram os membros de uma comissão julgadora da Academia de Ciências da França, que concedeu a Fresnel um prêmio de melhor trabalho sobre o fenômeno de difração. Essa premiação era promovida por Napoleão Bonaparte. Ele considerava o desenvolvimento científico importante para garantir a formação de um grande império além dos confrontos travados por seus exércitos.

Ele trabalhou com Young. Talvez possa me explicar melhor sobre esse tal comportamento ondulatório da luz!

UHUUUU!!!

Fiz o meu experimento conforme a teoria corpuscular de Newton. Talvez Fresnel possa me explicar sobre a velocidade da luz utilizando a teoria ondulatória.

93

94

Espero que tenha ficado claro que a luz é uma onda que se propaga com velocidade constante no éter.

Para responder os questionamentos de Arago, Fresnel escreveu uma carta em forma de artigo, em 1818.

A carta divulgando a hipótese de Fresnel sobre o arrastamento do éter luminoso, impulsionou a comunidade científica a conceber a luz como uma onda. Depois de vários experimentos, evidenciaram que a teoria ondulatória apresentava alguns problemas.

Se o éter é um fluido, não deveríamos ver um arrasto, assim como vemos quando um barco está se deslocando sobre a água?

Vamos perguntar a Fresnel sobre isso. Talvez ele tenha alguma explicação.

95 96

O éter passa livremente pela Terra, com pouca ou nenhuma resistência, por isso não vemos o suposto arrasto.

Ele se comportaria como um vento ao passar por pelas árvores de um bosque.

Os argumentos de Fresnel sobre a pequena influência do movimento da Terra sobre a propagação da luz no éter fixo afetou as crenças que sustentavam a teoria corpuscular.

Isso fortaleceu estudos que promoveram a construção do conhecimento considerando a teoria ondulatória da luz.

97 98

Um momento significativo desse processo de construção do conhecimento aconteceu em 1879. Nesse ano, o físico e matemático escocês, James Clerk Maxwell, apresentou a comunidade científica, suas equações e alguns dos resultados com elas obtidos.

Cheguei a conclusão de que a luz é uma onda eletromagnética e que, tudo indica, que ela se propaga no éter com uma velocidade de 300.000 km/s.

Para comprovar a previsão teórica da velocidade da luz é preciso um meio prático de obter seu valor, a partir de um determinado referencial.

Podemos comparar a sua velocidade em relação aos eclipses dos satélites de Júpiter.

Vou pedir ajuda para quem estuda sobre isso.

99 100

Sr. Todd, acabou de chegar essa carta pra você.

Leia e me diga do que se trata.

101

Todd era um astrônomo americano, que estudava eclipses, inclusive os dos satélites de Júpiter.

O Sr. Maxwell gostaria de informações sobre suas observações relacionadas aos eclipses dos satélites de Júpiter.

Escreva-lhe informando que não tenho como ajudá-lo.

Não tenho dados suficientes,

acredito ser impossível determinar o início do eclipse com precisão, devido ao fenômeno de aberração da luz.

102

Infelizmente, Maxwell faleceu naquele mesmo ano, não conseguindo terminar os seus estudos. No ano seguinte, Todd mandou que publicasse a carta como uma homenagem ao cientista.

103

A publicação repercutiu na academia

Sr. Todd

O Sr. Albert Michelson quer falar contigo sobre a carta de Maxwell, que mandou publicar.

104

Michelson era professor de física e química na Academia Naval Americana, na qual havia sido marinheiro. Lá, estudou sobre navegação celestial e problemas relacionados com manobra dos navios.

Todd, como poderíamos determinar a velocidade da Terra no éter, utilizando a velocidade da luz como base, tal como prevista por Maxwell?

Precisaria de um aparato muito preciso.

105

Proseguiu trabalhando e estudando em reconhecidas universidades americanas, dedicando-se a estudos relacionados à natureza da luz. Como a Europa era o berço dos principais conhecimentos da física moderna, o jovem professor e pesquisador americano foi para lá.

106

A troca de conhecimentos com outros pesquisadores influenciou na construção do seu interferômetro e as limitações do contexto impactaram na precisão dos resultados obtidos para a velocidade da luz. Eles indicavam que o interferômetro tinha problemas.

Não tenho condições financeiras para aprimorar esse experimento.

Poderia recorrer ao patrocínio de empresas.

107

Nesse período o crescimento industrial na América e o mercado altamente competitivo promoveu uma aproximação entre empresas, universidades e laboratórios de pesquisas. Para aumentar a lucratividade de seus empreendimentos, essas empresas patrocinavam inventores e programas científicos, financiando o desenvolvimento de pesquisas básicas, que possibilitavam a exploração científica de fenômenos físicos, conforme seus interesses.

Eu consegui financiamento da empresa associada ao inventor que patenteou o telefone.

Alexander Graham Bell era um professor especializado em ensinar surdos e inventor não profissional. Construiu seu protótipo de telefone elétrico patenteado em 1876, pelo principal investidor da American Telephone and Telegraph (AT&T). Essa empresa monopolizou o mercado de telecomunicações, por quase três décadas, constituindo-se na fonte da fortuna de Bell.

EXPOSIÇÃO DO CENTENÁRIO DA FILADÉLFIA

408 109

O primeiro protótipo do telefone não funcionava conforme anunciado pela empresa. Como a AT&T tinha a pretensão de construir uma rede de comunicação e levar linhas telefônicas a todos os americanos, Bell selecionava projetos, relacionados com áreas de seu interesse, para a empresa financiar.

O investimento das empresas Bell em ciência básica contribuiu para a criação de importantes núcleos de pesquisa em física teórica e na formação de físicos do estado sólido muito bem qualificada. Michelson foi um dos cientistas financiados pela AT&T.

Os resultados obtidos com esse tal de interferômetro pode contribuir para aumentar o lucro da Bell com comunicação por redes de fio.

Bell Telephone Laboratories
FENÔMENOS FÍSICOS
MECÂNICOS DINÂMICOS Sr. BELL
ÓPTICOS ELÉTRICOS
ACÚSTICOS MAGNÉTICOS
EXPERIMENTOS
NOVOS CIENTISTAS

110 111

Com o financiamento, Michelson construiu o aparato.

Segundo a teoria o tempo que a luz demora para percorrer dois pontos distintos, por meio da emissão de um feixe de luz monocromático, tem que ser diferente

E deve produzir um padrão regular de arrasto.

Vamos aos resultados do experimento!

O experimento deu errado!

O padrão das franjas não mostrou qualquer arrasto da Terra no éter.

O tempo que a luz demora para percorrer os dois pontos, foi igual.

Não observamos deslocamento nas franjas.

EMPRESAS BELL

112 113

Em 1881, Michelson divulgou o resultado do experimento com o interferômetro

Não é possível determinar a velocidade da Terra em relação a luz.

Só posso concluir que a Terra não arrasta o éter durante o seu deslocamento.

Você levou em consideração o tempo de ida e volta do feixe de luz?

Não. Considerei que ele fosse nulo.

114

A repercussão dos resultados negativos do experimento levaram Michelson a não realizar uma nova tentativa até 1887.

Apresenta erros!

Não está correto!

Morley o incentivou e ajudou a construir um novo interferômetro.

Com essa placa cilíndrica, flutuando no mercúrio, não teremos mais problemas com as vibrações.

Essa foi uma ideia muito criativa.

115

Nós deixamos o feixe de luz refletindo por 4 dias, e não teve variação

Com o efeito nulo, só podemos concluir que não é possível detectar o movimento da Terra em relação ao éter.

O que aconteceu de errado?

116

Depois disso, a comunidade científica buscava explicações para o resultado negativo do experimento. Dentre os cientistas que discutiram o resultado destacamos Lorentz e FitzGerald.

FitzGerald, será que os braços do interferômetro, utilizado no procedimento de Michelson e Morley, sofreram uma contração?

Lorentz, essa hipótese pode explicar o efeito nulo no interferômetro.

117

O braço do interferômetro que se move paralelamente ao vento de éter deve ter se contraído.

Esse encurtamento ocorre sempre que o objeto se desloca em relação ao éter?

Sim, podemos provar matematicamente.

118

Com bases nessas teorias, elaboraram uma descrição matemática, que ficou conhecida como contração de Lorentz-FitzGerald.

Essa descrição explica a contração dos objetos em relação a velocidade da luz

REPOUSO: L

MOVIMENTO: $L' = L \left(\frac{1-v^2}{c^2} \right)$

L : comprimento
 v : velocidade do objeto
 c : velocidade da luz

119

A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA DE POINCARÉ E EINSTEIN



Em 1895, um matemático apresenta uma contribuição importante.

Henri Poincaré

É impossível medir o movimento absoluto da matéria em relação ao éter.

Só é possível evidenciar o movimento da matéria em relação à matéria.

Logo...

não conseguimos detectar o movimento da Terra em relação ao éter.



125

Precisamos encontrar um meio de provar a existência do éter.

Contração

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

Elaborado por
La Mecânica
de Lorentz e FitzGerald

A resposta pode ser a explicação da contração prevista por Lorentz e FitzGerald.



126

A luz é uma onda eletromagnética

Será que começo analisando o experimento realizado por Michelson e Morley?

Lorentz e FitzGerald o explicaram por meio das leis da mecânica.



127

Após muito estudo, Poincaré e seus colaboradores concluíram que era preciso uma explicação que envolvesse todas as áreas de conhecimento da Física



128

Não faz sentido.

Alguns fenômenos podem ser explicados pela mecânica, mas outros, só pelo eletromagnetismo.

Não consigo pensar uma explicação para o interferômetro que esteja de acordo com as duas áreas.



129

Mas, para conseguir unificar essas áreas, não é preciso compreender melhor o comportamento e a velocidade da luz?

Velocidade da luz

Newton	Arago	Maxwell
↓	↓	↓
INFINITA	MUDA DE ACORDO COM O MEIO	300.000 Km/s
Imprecisa		ABSOLUTA

Sim!

Ela não pode aumentar ou diminuir quando muda o meio em que se propaga.



130

Concordo com os resultados de Maxwell.

Conforme meus estudos, esse valor é absoluto!

Precisa apresentar mais detalhes dos indícios dessa relação

Velocidade da luz

300.000.000 m/s

ou

300.000 Km/s

Gravitação

Se isso estiver correto, é possível unificar a Mecânica e o Eletromagnetismo.

130

Poincaré publicou um artigo, no qual apresentou, para os demais membros da academia, a discussão de suas ideias sobre a velocidade absoluta da luz.

Absoluta!

Isso significa que tem a mesma velocidade, em qualquer referencial?

PRINCÍPIO DO MOVIMENTO RELATIVO

Sim, toda a teoria está aqui nesse artigo.

131

Poincaré continuava tentando encontrar uma maneira de medir a velocidade da luz em relação ao éter.

Até parece que o éter não existe.

Estou fazendo alguma coisa errada.

Mas, isso é impossível.

131

Mas ele não pensou em desconsiderar a existência do éter?

Não!

O éter era uma das bases do eletromagnetismo.

Poincaré

132

Até o início do século XX, a existência do éter estruturava o eletromagnetismo e a ótica, campos da física, unificados por Maxwell. Isso ajudava a explicar a causa de alguns fenômenos físicos.

A formulação matemática deve ser insuficiente.

133

Poincaré publicou em 1905 os resultados de seus estudos

É preciso levar em consideração que, todos os fenômenos devem ser idênticos, em qualquer referencial.

Tens comprovação disso?

Não!

O tempo deve ser manipulado como uma quarta dimensão, pois ele interfere nos fenômenos.

REFERENCIAL
LORENTE
CONTRAÇÃO

134

135

136

Elles ocasionaram muita discussão na academia.

NOVA TEORIA ELECTROMAGNETICA DE MAXWELL

FISICA (MILTON)

OS PRINCÍPIOS DA FISICA não resultados amplamente generalizados de várias experiências. a natureza sem a experiência não é algo nem plus!

Caríssimos, A Ciência é determinista, e, se ela admite o determinismo é porque sem ele, ela não poderia existir.

O que é o éter, como se dispõem as moléculas, será que se atraem ou se repelem?

Mas sabemos que o meio transmite, simultaneamente, as perturbações óticas e eletromagnéticas

Não o sabemos

CIENCIA E HIPÓTESE

sabemos que esta transmissão deve fazer-se de acordo com os princípios gerais da Mecânica, e isso é suficiente para estabelecer as equações do campo eletromagnético.

ÉTER

137

138

Esse foi um período de intensa controvérsia na academia.

Diferentes Instituições científicas promoviam discussões entre cientistas e filósofos, sobre o papel da teoria e das experimentações.

No contexto dessas discussões, muitos cientistas indicavam e respondiam questões da natureza, e apresentavam suas ideias sobre a função exercida pelas teorias científicas.

No mesmo ano em que Poincaré publicou seu artigo, o alemão Albert Einstein, técnico do Departamento de Patentes de Berna, Suíça, apresentava suas ideias no periódico Annalen der Physik.

1905 ... o ano milagroso

Sobre um ponto de vista heurístico concernente à geração e transformação da luz
A. EINSTEIN
18 de Março de 1905
Annalen der Physik

Sobre uma nova determinação das dimensões moleculares
A. EINSTEIN
30 de Abril de 1905
Annalen der Physik

A inércia de um corpo depende da sua energia?
A. EINSTEIN
11 de Maio de 1905
Annalen der Physik

Sobre o movimento de partículas suspensas em fluidos em repouso, como postulado pela teoria molecular do calor
A. EINSTEIN
27 de Setembro de 1905
Annalen der Physik

$E=mc^2$

Sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento
A. EINSTEIN
30 de Junho de 1905
Annalen der Physik

139



As diferenças...

Princípio da constância da velocidade da luz: a velocidade da luz não depende da velocidade da sua fonte. Ela é absoluta.

Assumindo a concepção ondulatória da luz, reescrevi, de maneira mais simples, o primeiro postulado, apresentado por Poincaré.

145

Não é possível observar o éter, pois ele é desprezível.

Isso significa que todos os referenciais inerciais são equivalentes.

Como assim?

Ou seja, não existe um referencial privilegiado.

Nós consideramos a existência do éter luminífero. Ele está presente em todos os lugares do espaço, no qual não existe qualquer tipo de matéria.

146

Você considerou o éter desprezível, com base no resultado negativo do experimento de Michelson-Morley?

Eu avalei as ideias desses cientistas.

Ele não mencionou se considerou os resultados do experimento.

mas apresenta de maneira diferente a mesma fórmula elaborada por Lorentz e FitzGerald.

147

Se ele tivesse avaliado os resultados do experimento, identificaríamos uma menção dele na introdução do artigo, no qual desprezou a existência do éter.

não acha?

Acho estranho.

O experimento de Michelson-Morley é reconhecidamente um dos mais importantes da história da Ciência.

148

O que podemos afirmar...

Raios Gama Raios X Ultra-violeta Luz Visível Infra-vermelho Micro-ondas Ondas de Rádio

MAXWELL Onda eletromagnética $c = 300000000 \text{ m/s}$

Concordo com algumas ideias de Maxwell.

149

E, apesar do nome "Teoria da Relatividade Restrita", Einstein nunca afirmou que tudo é relativo.

O espaço e o tempo são relativos!

A velocidade da luz é absoluta

150

Por isso a velocidade da luz gera uma dilatação temporal em um determinado evento.

O que é um evento?

É algo que ocorre em um determinado tempo, em um lugar do espaço.

O intervalo de tempo decorrido, entre os mesmos dois eventos, são diferentes, quando medidos por observadores distintos e que estão em movimento relativo.

Como assim?

Vou explicar melhor usando esse relógio de luz.

Imagine um tubo com um espelho de um lado e do outro uma fonte de luz. Nele, a luz emitida é refletida para sua fonte.

151

152

153

Imagine um observador em repouso, com relação ao espelho.

Quando ele medir o intervalo de tempo que a luz demora para percorrer a distância entre os dois espelhos.

Vai fazer assim, certo?

Então, ele irá dividir essa distância pela velocidade da luz, que é fixa, e encontrar o tempo que a luz demorou para realizar o percurso todo.

distância percorrida $\rightarrow d$
 $d = x \text{ ida} + x \text{ volta}$
 $\text{tempo} = \frac{d \text{ luz}}{v \text{ luz}}$
 $t_{\text{rel}} = \frac{2x}{c}$

Certo!

Observador em repouso: O_0

154

Agora imagine um observador em movimento em relação ao relógio de luz

Se o observador considerar que quem se desloca é o relógio.

Então, ele irá observar o feixe de luz se deslocando assim.

Como podemos representar, e como ele vai observar o mesmo trajeto?

distância percorrida pela luz - D
 maior que $2x$
 $\text{tempo} = \frac{D}{c}$

Observador em movimento: O_M

155

156

Os observadores registraram o evento do mesmo ponto.

Porém, um viu o evento durar um tempo maior, pois a luz percorreu uma distância maior em relação ao relógio de luz.

Isso aconteceu porque eles adotaram referenciais iguais, certo?

157

Presta atenção!!

Os referenciais eram diferentes.

A diferença, nos eventos descritos, está relacionada ao referencial a partir do qual cada um foi observado.

A dilatação temporal só pode ser percebida para velocidades próximas a da luz.

158

159

Está muito abstrato!

Vamos analisar mais alguns exemplos.

Para isso vamos usar dois eventos: algo que ocorre num ponto do espaço em determinado instante de tempo.

160

Imagine que esses irmãos vão observar dois eventos diferentes: o ligar e o desligar do motor de um avião.

161

Quando o motor é ligado, no aeroporto de Porto Alegre, temos o primeiro evento.

Um irmão observa o evento "ligar", dentro do avião e o outro amarrado na asa da aeronave.

O evento "desligar", será percebido de forma diferente pelos dois?

162

Sim

Para o irmão que viajava dentro do avião, o ligar e o desligar do motor ocorre no mesmo lugar: dentro da aeronave.

O irmão amarrado na asa, observa o ligar em Porto Alegre e o desligar, no Aeroporto de Campo Grande.

163

Outro exemplo de dilatação temporal, geralmente relatado em livros didáticos de Física, é o dos gêmeos.

164

No dia que completam 20 anos, um deles realiza uma viagem espacial.

Utilizando uma nave, com velocidade de $0,8c$ ($0,8 \times 300000 \text{ Km/s}$), vai até uma estrela que fica 20 anos luz de distância da Terra.

165

O outro, fica na Terra,

Esperando o irmão ir até a estrela e voltar.

166

Pela equação de Lorentz, o tempo de viagem, para o nave ir até a estrela e voltar, é de aproximadamente 30 anos no referencial Terra-estrela.

E para o outro irmão?

167

Para o irmão que ficou na Terra, passaram-se 50 anos.

O tempo passou de maneira diferente para os dois irmãos.

168

Ao se reencontrarem depois da viagem,

O que viajou tinha 50 anos, porque para ele, a viagem demorou 30 anos.

Depois da viagem

Antes da viagem

Mas, para o irmão que ficou na Terra a viagem demorou 50 anos.

Ele tinha completado 70 anos de idade.

169

Uoooo. 70 anos?

Mas, por que essa diferença de idade?

Lembra que, de acordo com a teoria, o espaço e o tempo são relativos?

Isso significa que ambos dependem do referencial do observador.

170

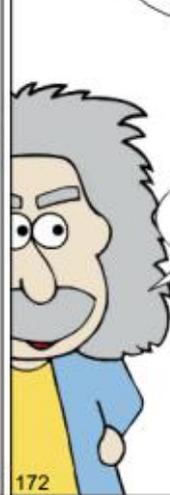
Segundo Einstein...



Não é possível afirmar com total certeza o que acontece com os irmãos.

Isso porque, a nave altera a sua velocidade, enquanto que a Terra, não.

171



O certo é que, como cada um avalia o evento, a partir do seu referencial, vão obter intervalos de tempo diferentes.

resultado da invariância da velocidade da luz no vácuo

em relação a qualquer referencial inercial

Um referencial inercial seria um objeto que se descola com velocidade constante.

Como um planeta



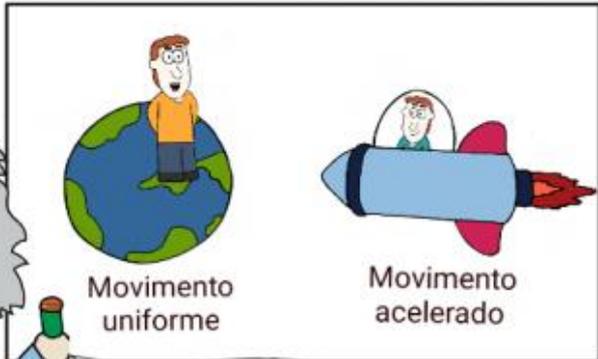
172



Exatamente. Os corpos celestes têm movimento uniforme.

Dessa forma apenas um dos irmãos está em um referencial inercial

a velocidade do movimento de translação da Terra, é constante.



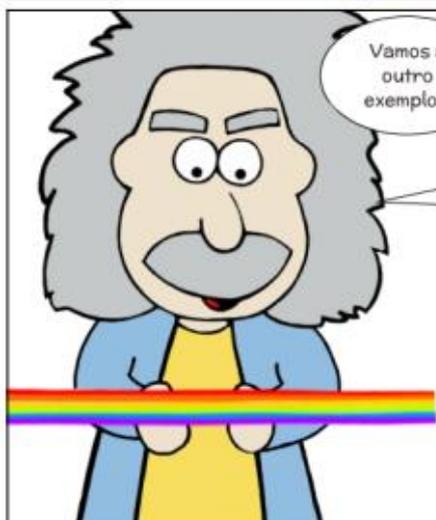
Movimento uniforme

Movimento acelerado

A nave não pode ser considerada um referencial inercial porque sua velocidade não é constante.

Entendi!

173



Vamos a outro exemplo...

O que aconteceria se eu pudesse acompanhar um feixe de luz, mantendo a mesma velocidade que a luz?

Eu não sei.

Então vamos em busca da resposta!



174

