

MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE

Centro de Ciências Biológicas e da Natureza

**UMA CONSTRUÇÃO DIDÁTICA DO
CONCEITO DE ESPAÇO-TEMPO DA
TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA:
UMA REVOLUÇÃO HISTÓRICA DA FÍSICA**

Diego Rodrigues de Souza
Marcelo Castanheira da Silva

Rio Branco, Acre
Dezembro de 2019.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.”

Isaac Newton.

Conteúdo

APRESENTAÇÃO	4
1. OS RAIOS CÓSMICOS E A VIDA MÉDIA DO MÚON	6
1.1 OS RAIOS CÓSMICOS E O CHUVEIRO AÉREO EXTENSO.....	6
1.2 O PROBLEMA DA VIDA MÉDIA DO MÚON.....	9
2. A UNIFICAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO E DA ÓTICA POR MAXWELL.....	11
2.1 A INVENÇÃO DA PILHA ELÉTRICA E A FUNDAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO POR OESTERD E AMPÈRE	11
2.2 A NOÇÃO DE CAMPO, LINHAS DE CAMPO E A GERAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS DESCOBERTA POR FARADAY	14
2.2.1 A GERAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS DESCOBERTA POR FARADAY	15
2.2.2. A NOÇÃO DE CAMPO E LINHAS DE CAMPO	16
2.3 A LUZ: ENTRE A TEORIA CORPUSCULAR E A TEORIA ONDULATÓRIA.....	17
2.4 A SÍNTESE MAXWELLIANA: A UNIFICAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO E DA ÓTICA	19
3. A VELOCIDADE CONSTANTE DA LUZ E A NÃO-INVARIÂNCIA DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL NAS TRANSFORMAÇÕES DE GALILEU	28
4. AS TENTATIVAS DE DETECÇÃO DA VELOCIDADE DA TERRA EM RELAÇÃO AO ÉTER, A CONTRAÇÃO DE LORENTZ-FITZGERALD PARA O ESPAÇO E AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ	33
4.1. O ÉTER E AS TENTATIVAS DE SUA DETECÇÃO	33
4.2. A CONTRAÇÃO DO ESPAÇO DE LORENTZ-FITZGERALD E AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ	35
4.2.1. O PROBLEMA DA VELOCIDADE DA LUZ E A CONTRAÇÃO DO ESPAÇO IDEALIZADA POR LORENTZ E FITZGERALD	35
4.2.2. AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ	36
5. O PROBLEMA DA ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO E A MUDANÇA DE CONCEPÇÃO ACERCA DE ESPAÇO E TEMPO	40
5.1 EINSTEIN E O PROBLEMA DA ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO.....	40
5.2. A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA	41
5.2.1. OS POSTULADOS.....	41
5.2.2. A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE	42
5.2.3. A RELATIVIDADE DOS INTERVALOS DE TEMPO	44
5.2.4 A RELATIVIDADE DOS COMPRIMENTOS.....	47
5.2.5. A MUDANÇA DE CONCEPÇÃO ACERCA DE ESPAÇO E DE TEMPO A PARTIR DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA (TRR)	49
6. O PROBLEMA DO TEMPO DE VIDA MÉDIA DO MÚON	52
7. A INCOMPATIBILIDADE DOS CONCEITOS DE ESPAÇO E DE TEMPO NAS TEORIAS NEWTONIANA E EINSTEINIANA SEGUNDO THOMAS S. KUHN	58
ANEXO – GABARITOS.....	65

APRESENTAÇÃO

A ascensão da teoria da relatividade restrita de Albert Einstein no início do século XX foi uma das grandes revoluções da física nos últimos 150 anos. A teoria em si foi fruto de uma construção que ressignificou a visão do mundo em que vivemos. Para se ter ideia, foi necessário o abandono de conceitos físicos básicos e estabelecidos há séculos como o espaço e o tempo absolutos, a ideia de simultaneidade de eventos para dois observadores e até mesmo de leis como o princípio da dinâmica de Newton, a conservação da quantidade de movimento e a conservação da energia mecânica.

Neste material de estudo, que pode ou não ser associado a uma tarefa de consulta orientada¹ na *internet*, exploramos especialmente a mudança nas concepções de espaço e tempo. Para tanto, usamos um caminho que perpassa por física, história e filosofia da ciência com a intenção de tratarmos conteúdos científicos fundamentais que auxiliem no novo entendimento da união de espaço e tempo sem, contudo, deixar à margem uma abordagem de natureza da ciência ao considerar a criação da teoria como uma atividade histórica, social, não rígida, problemática e fruto de um processo de ruptura.

Dentre os assuntos abordados aqui, estão: os raios cósmicos e vida média do múon; a unificação do eletromagnetismo e da ótica por Maxwell; a velocidade constante da luz e a não-invariância das equações de Maxwell nas transformações de Galileu; as tentativas de detecção da velocidade da Terra em relação ao éter, a contração de Lorentz-FitzGerald para o espaço e as transformações de Lorentz; o problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento e a mudança de concepção acerca de espaço e tempo; o problema do tempo de vida média dos múon; a incompatibilidade dos conceitos de espaço e de tempo nas teorias newtoniana e einsteiniana segundo Thomas S. Kuhn.

Já na tarefa de consulta orientada na *internet*, desenvolvida de maneira gratuita a partir das ferramentas disponíveis no Google Sites², lançamos luz sobre as relações entre o conteúdo examinado de relatividade restrita contido neste material de estudo e um produto tecnológico resultante da mesma, o Sistema de Posicionamento Global (GPS³), ainda que seu funcionamento também precise de correções de relatividade geral. Acerca deste aparato, colocamos em pauta dados de sua criação, o seu princípio

¹ A tarefa de consulta orientada na *internet* pode ser acessada no *site* “WebQuest: GPS e relatividade”, desenvolvido pelos autores deste texto cujo endereço é <<https://sites.google.com/ifac.edu.br/webquestgpsrelatividade>>. Acesso em 25 de setembro de 2019.

² Endereço: <<https://sites.google.com>>. Acesso em 25 de setembro de 2019.

³ A sigla é proveniente do inglês: *Global Positioning System*.

de funcionamento, a necessária correção espaço-temporal para sua tamanha precisão, algumas aplicações gerais e uma discussão relativa ao direito de privacidade de todo cidadão que usa tal tecnologia, já que grandes corporações mundiais detêm informações confidenciais acerca da posição real de indivíduos em todo o tempo.

Assim sendo, diante da falta ou da insuficiência de materiais que auxiliem no estudo de tópicos de física moderna e contemporânea no ensino médio, que é o caso da noção de espaço-tempo da teoria da relatividade restrita, espera-se que tanto alunos quanto professores apreciem este material de estudo e a tarefa de consulta orientada criada para uso na *internet*. Tais ações são uma tentativa de melhorar a educação básica brasileira.

1. OS RAIOS CÓSMICOS E A VIDA MÉDIA DO MÚON

1.1 OS RAIOS CÓSMICOS E O CHUVEIRO AÉREO EXTENSO

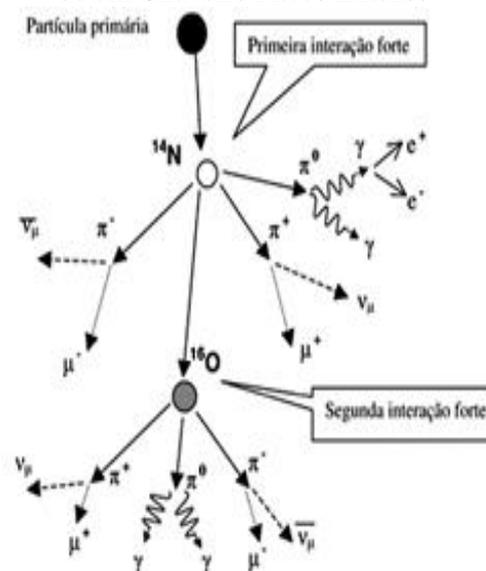
Os raios cósmicos foram descobertos no início do século XX por Victor Franz Hess (1883 – 1964) e Werner Kolhörster (1887 – 1946) ao investigarem o fenômeno de ionização do ar e a consequente perda de carga elétrica de objetos carregados e isolados (SOUZA et al., 2017, p. 4; FAUTH, 2007). Embora pareça tão distante de nossa realidade pelo nome que recebem, os raios cósmicos são partículas tais como elétrons, prótons e núcleos pesados provavelmente oriundos de nebulosas e extinção de estrelas. Têm como características serem muito penetrantes na matéria, chegam a Terra com velocidades próximas à velocidade da luz no vácuo, $c \cong 3.10^8 \text{ m/s}$, possuem altas energias e formam partículas secundárias a partir de sua interação com a atmosfera terrestre (SOUZA et al., 2017, p. 5).

Sobre esta última característica, Pierre Auger (1889 – 1993) descobriu que o produto dessas interações é o fenômeno denominado Chuveiro Aéreo Extenso, que é responsável pela criação de diversas partículas como píons ($\pi^0, \pi^+ e \pi^-$), káons ($K^0, K^+ e K^-$) (FAUTH, 2010), elétrons (e^-), pósitrons (e^+), múons (μ^-), antimúons (μ^+), neutrinos do múon (ν_μ), antineutrinos do múon ($\bar{\nu}_\mu$), fótons (γ) e hádrons (FAUTH, 2007).

É possível entender este fenômeno usando o diagrama observado ao lado, na figura 1.

Analisando a figura 1, de cima para baixo, constatamos que uma partícula primária, isto quer dizer, de alta energia cuja origem é desconhecida, colide com um átomo de Nitrogênio. Esses choques originam uma grande quantidade de interações eletromagnéticas e nucleares, resultando na criação de uma cascata de partículas como píons ($\pi^0, \pi^+ e \pi^-$) que, em sequência, decaem em elétrons (e^-), pósitrons (e^+), múons

Figura 1: esquema do desenvolvimento de um Chuveiro Aéreo Extenso.



Fonte: FAUTH et al. (2007).

e antimúons (μ^- e μ^+), neutrinos e antineutrinos do múon (ν_μ e $\bar{\nu}_\mu$) e fótons (γ). Além disso, há outra interação no esquema, dessa vez com um átomo de Oxigênio, originando mais partículas. Nesse processo, que é esquemático daquilo que acontece na atmosfera terrestre, algumas partículas conseguem chegar à superfície de nosso planeta.

Curiosidade sobre o assunto!

NASA detecta raios cósmicos vindos do maior sistema estelar do céu

Colisão de ventos estelares de Eta Carinae provocaram a emissão de raios gama e raios-X que podem chegar até a Terra.

Novos dados do telescópio NuSTAR, da NASA, sugerem que o maior e mais luminoso sistema de estrelas em um raio de 10 mil anos-luz, Eta Carinae, está passando por uma rápida aceleração de suas partículas, transformadas em energia que pode chegar até a Terra em forma de raios cósmicos.

O sistema Eta Carinae ficou famoso no século 19, quando, em uma explosão episódica e ainda pouco compreendida, se tornou a segunda estrela mais brilhante no céu. Na mesma ocasião, o sistema expeliu uma nebulosa famosa por seu formato de ampulheta.

Eta Carinae também contém um par de estrelas massivas, com massas de 30 a 90 vezes maior do que a do nosso Sol, cuja órbita excêntrica⁴ as aproxima a cada cinco anos e meio, deixando-as a uma distância equivalente a do Sol até Marte.

“Ambas estrelas de Eta Carinae expõem poderosos fluxos, chamados de ventos estelares”, explica Michael Corcoran, membro do Centro de Voo Espacial Goddard da agência espacial norte-americana e coautor do estudo publicado na *Nature Astronomy*. “O local onde estes ventos se chocam muda durante o ciclo orbital, que produz um sinal periódico em raios-X de baixa energia que nós temos rastreado por mais de duas décadas.”

Os astrônomos já sabem que esses raios cósmicos com energia maior do que um bilhão de elétrons-volt⁵ só podem vir de fontes de fora do nosso sistema solar. Mas,

⁴ Trata-se de uma órbita elíptica.

⁵ Trata-se de uma unidade de medida de energia definida como o trabalho realizado ao se mover um elétron através de uma diferença de potencial de 1 volt no vácuo, equivalendo a, aproximadamente,

como essas partículas (elétrons, prótons e núcleos atômicos) carregam uma carga elétrica, os raios podem desviar do curso sempre quando encontram um campo magnético. Isso não só causa distúrbios em sua trajetória como também pode mascarar qual é a sua fonte de origem.

De acordo com as observações feitas pelo telescópio NuSTAR entre março de 2014 e junho de 2016, foram detectados raios-X de baixa energia provenientes de um gás produzido pela colisão dos ventos estelares de Eta Carinae, processo onde as temperaturas ultrapassam os 40 milhões de graus Celsius.

Além da identificação de raios-X, o satélite Telescópio Espacial de Raio Gama Fermi também detectou mudanças em raios gama vindos de uma fonte que está na direção do Eta Carinae. A nitidez do telescópio Fermi, no entanto, não é tão apurada quanto a de telescópios de raios-X, por isso os astrofísicos ainda não conseguiram confirmar a conexão entre os dois eventos.

Ainda assim, para os pesquisadores, a melhor hipótese que pode explicar tanto a detecção dos raios-X, quanto à dos raios gama, é a de que ondas de elétrons tenham sido aceleradas durante um violento choque na fronteira da colisão dos ventos estelares.

“Nós sabemos há algum tempo que a região ao redor da Eta Carinae é uma fonte de emissões energéticas em raios-X e raios-gama em alta energia”, afirma Fiona Harrison, professora de astronomia no Instituto de Tecnologia da Califórnia e principal pesquisadora da missão NuSTAR. “Mas até que o NuSTAR fosse capaz de identificar a radiação, mostrar que ela vem do sistema binário e estudar suas propriedades detalhadamente, a origem era um mistério.”

Os cientistas preveem também que algumas partículas aceleradas do evento, como os elétrons, podem escapar do sistema estelar e vir em direção a Terra em forma de raios cósmicos.

Fonte: NASA detecta raios cósmicos vindos do maior sistema estelar do céu. **Revista Galileu**, Brasil, 06 de maio de 2018. Disponível em <https://revistagalileu.globo.com/Ciencia/noticia/2018/07/nasa-detecta-raios-cosmicos-vindos-do-maior-sistema-estelar-do-ceu.html>. Acesso em 19 de maio de 2019.

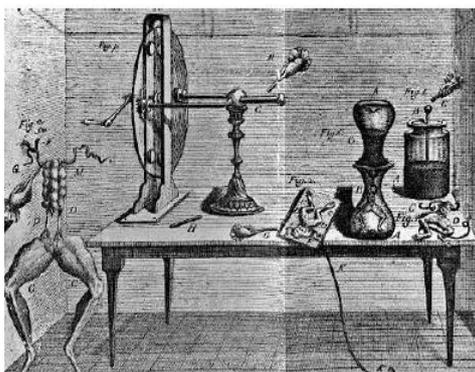
$1,6 \cdot 10^{-19} J$. O eV é uma unidade de medida muito usada, já que o Joule – Unidade de medida padrão do Sistema Internacional de Unidades – é muito grande.

2. A UNIFICAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO E DA ÓTICA POR MAXWELL

2.1 A INVENÇÃO DA PILHA ELÉTRICA E A FUNDAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO POR OESTERD E AMPÈRE

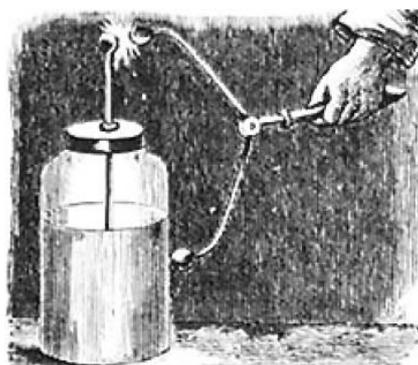
O experimento das contrações nas pernas de uma rã, figura 2, realizado por Luigi Galvani (1737 – 1798) em 1791, certamente despertou a curiosidade de Alessandro Volta (1745 – 1827), que sugeriu uma explicação para o fenômeno observado e construiu a primeira fonte de corrente elétrica contínua (GERMANO et al., 2012; MARTINS, 1999). Antes disso, existiam fontes de corrente elétrica, mas não duradouras. É o caso da garrafa de Leyden, figura 3, uma espécie primitiva de capacitor elétrico construído por Pieter van Musschenbroek (1692 – 1761) na cidade holandesa de Leyden.

Figura 2: ilustração do experimento de Galvani.



Fonte: Beléndez (2008).

Figura 3: ilustração de uma garrafa de Leyden.

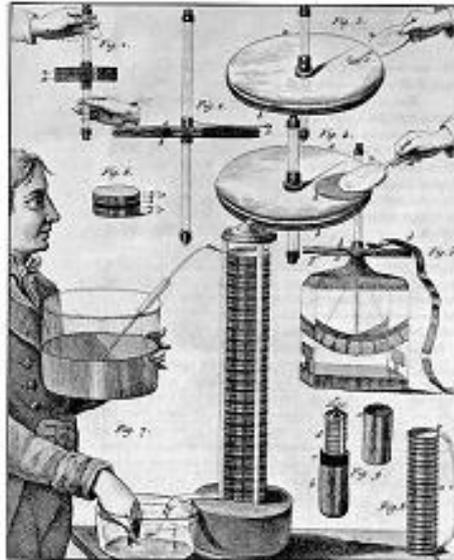


Fonte: Beléndez (2008).

O dispositivo montado por Volta, que mais tarde passou a ser chamado de pilha elétrica, era formado por discos alternados de metais como prata e zinco ou prata e chumbo ou prata e estanho ou, ainda, cobre e estanho, de tal forma que esses pares eram separados por um material poroso embebido em uma solução de sal. Das placas, saíam fios metálicos para conduzir a eletricidade (GERMANO et al., 2012).

Um desenho de como era a pilha voltaica pode ser verificado na figura 4, retirada de Beléndez (2008).

Figura 4: ilustração da pilha elétrica de Volta.



Fonte: Beléndez (2008).

A despeito da pequena diferença de potencial que produzia, a invenção de Volta possibilitou uma grande quantidade de experimentos e, principalmente, de novas descobertas em eletricidade. Por exemplo, foi usando uma pilha voltaica que aconteceu uma das mais importantes descobertas científicas do século XIX: a unificação dos fenômenos elétricos e magnéticos que desde a antiguidade eram compreendidos como distintos. O responsável pelo achado foi Hans Christian Oesterd (figura 5).

Figura 5: Hans Christian Oesterd. (1777 – 1851).

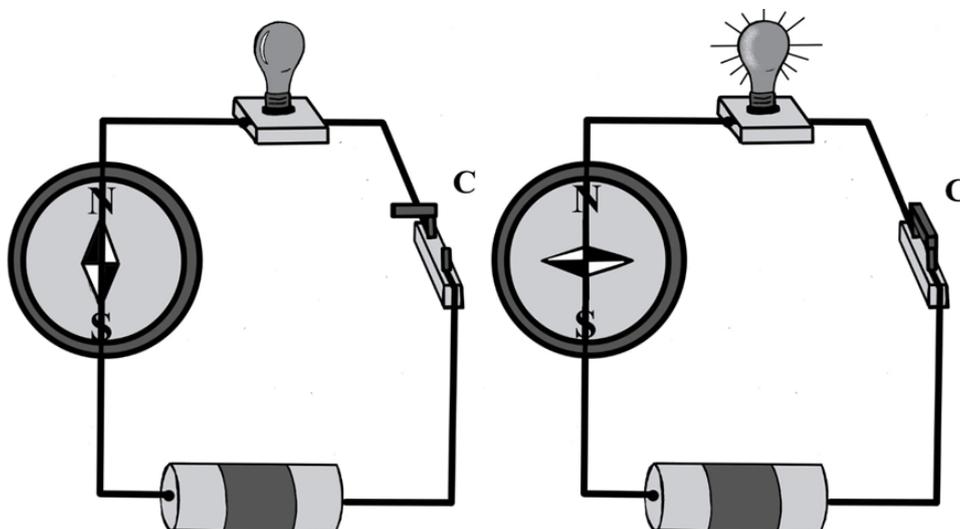


Fonte: Beléndez (2008).

Para o feito, Oesterd construiu um aparato com uma agulha imantada livre para girar e a colocou em certa direção. Depois disso, colocou um fio elétrico na mesma direção sobre ela e o conectou a uma pilha fornecedora de corrente elétrica contínua, como mostra a figura 6. Foi assim que percebeu a agulha girando para uma direção perpendicular ao cabo. Embasado nisso, concluiu que fenômenos elétricos, devido à

pilha, e magnéticos, devido à bússola, tinham uma mesma raiz e fundou o eletromagnetismo.

Figura 6: esquema do experimento de Oesterd.



Fonte: os autores.

Apesar do mito de que essa descoberta tenha sido por acaso, Oesterd tinha inspiração metafísica na unidade das forças da natureza e, dessa forma, ele acreditava em um vínculo entre a eletricidade e o magnetismo (POLITO, 2016, p. 96; BELÉNDEZ, 2008). Ademais, a verdade é que uma descoberta acidental não reduziria em nada o mérito de Oesterd, pois apenas a sorte não favoreceria quem podia compreender o fenômeno.

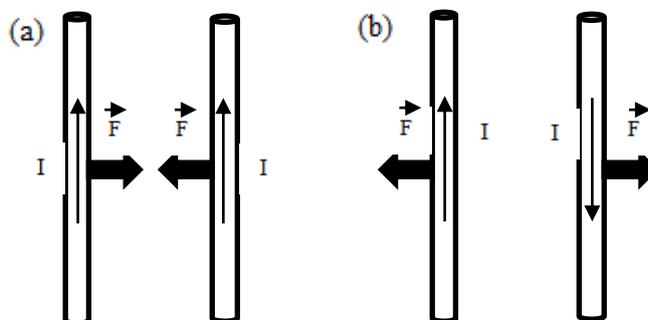
Após a inauguração do eletromagnetismo, coube a André Marie Ampère, figura 7, o desenvolvimento de uma teoria matemática para explicar a interação da eletricidade e do magnetismo a partir do movimento de cargas elétricas (BELÉNDEZ, 2008). Baseado em seus experimentos, ele também percebeu a inexistência de cargas magnéticas isoladas na natureza, uma das leis do eletromagnetismo clássico, e que uma corrente elétrica podia produzir efeitos magnéticos sobre outra corrente elétrica, pois se atraíam quando tinham mesmo sentido e se repeliam quando tinham sentidos opostos (POLITO, 2016, p. 97; BELÉNDEZ, 2008), como mostra a figura 8.

Figura 7: André Marie Ampère (1775 – 1836)



Fonte: Beléndez (2008).

Figura 8: ilustração da atração (a) e da repulsão (b) magnéticas devido a correntes elétricas em condutores paralelos.



Fonte: os autores.

Ainda em tempo, a construção do eletromagnetismo também se deve a muitos outros cientistas. Alguns deles, além dos já citados, são Jean-Baptiste Biot (1774-1862), Felix Savart (1791-1841) e Michael Faraday (1791-1867).

2.2 A NOÇÃO DE CAMPO, LINHAS DE CAMPO E A GERAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS DESCOBERTA POR FARADAY

Michael Faraday (figura 9) foi um físico experimental inglês bastante respeitado ainda em sua época. Seus grandes feitos foram à explicação da eletrólise em termos da força elétrica, a descoberta do fenômeno da indução eletromagnética e a inserção de conceitos como campo e linhas de campo no eletromagnetismo (BELLÉNDEZ, 2008).

Figura 9: Michael Faraday (1791-1867).



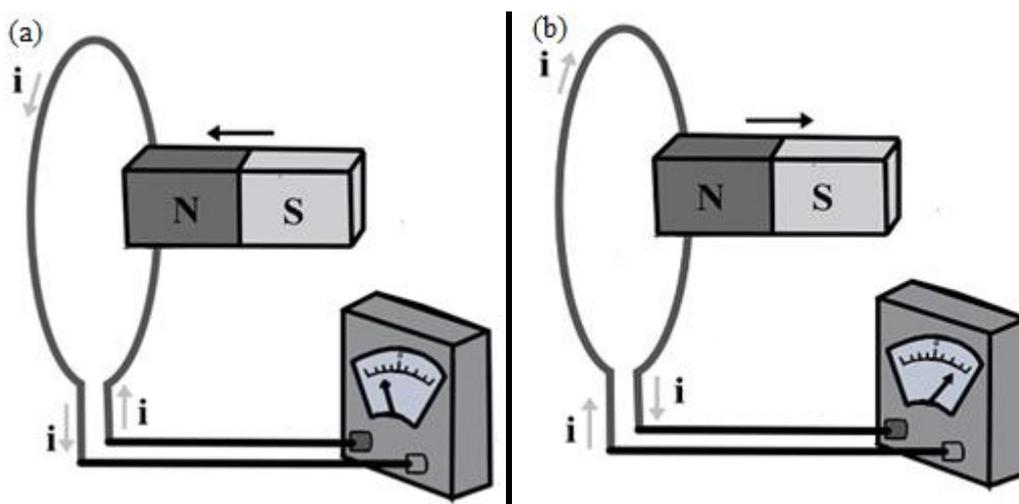
Fonte: Beléndez (2008).

A seguir, detalharemos um pouco mais sobre a indução eletromagnética e os conceitos de campo e linhas de campo, duas de suas ideias mais geniais (POLITO, 2016, p. 99).

2.2.1 A GERAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA A PARTIR DE CAMPOS MAGNÉTICOS VARIÁVEIS DESCOBERTA POR FARADAY

Para chegar à indução eletromagnética, Faraday realizou uma série de experimentos utilizando o movimento relativo de espiras e fontes de campo magnético e/ou variação do campo magnético. Alguns desses experimentos são ilustrados na figura 10, que demonstra a) uma espira e um ímã colocado em movimento para a esquerda e b) uma espira e um ímã colocado em movimento para a direita⁷. O resultado encontrado por Faraday nestas situações foi à criação de correntes elétricas, que chamamos de correntes elétricas induzidas. É verdade que isso surpreendeu, pois o fenômeno pressupunha força elétrica sobre as cargas elétricas em repouso na espira (GRIFFITHS, 2011, p. 208).

Figura 10: ilustração de alguns experimentos feitos por Faraday.



Fonte: os autores.

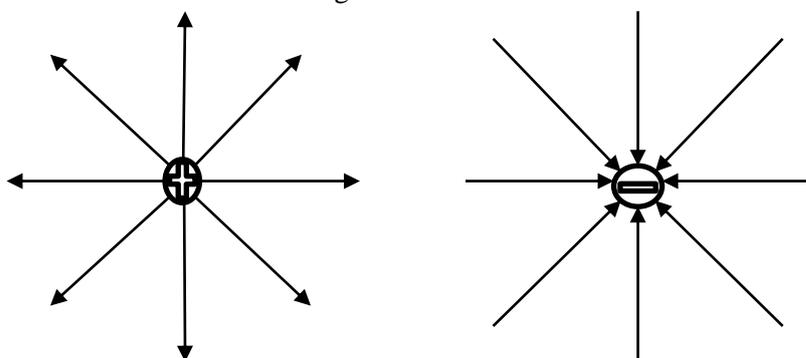
A explicação dada para o que se observou foi inovadora. Para Faraday, a força elétrica experimentada nas cargas elétricas da espira era motivada por um campo elétrico induzido resultante da variação do campo magnético. Assim, campos magnéticos variáveis no tempo passaram a ser compreendidos como fontes de campos elétricos.

⁷ Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/faraday>, há um simulador denominado “laboratório de eletromagnetismo de Faraday”. Com ele, de forma mais interativa, é possível realizar virtualmente estes experimentos citados no texto.

2.2.2. A NOÇÃO DE CAMPO E LINHAS DE CAMPO

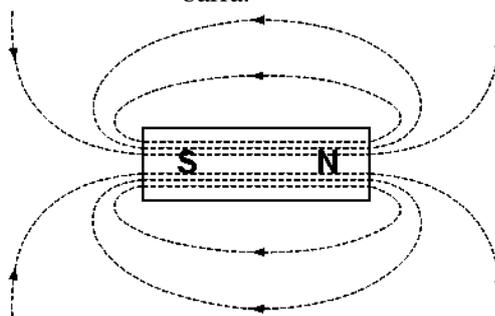
Outra contribuição de Faraday foi a introdução do conceito de campo e linhas de campo⁸, haja vista o oferecimento de suporte teórico para o abandono da teoria dos fluidos elétricos e magnéticos e da teoria newtoniana de ação à distância (BELÉNDEZ, 2008). Para Faraday, um dos maiores físicos experimentais de todos os tempos, um campo preencheria o espaço em torno de cargas elétricas (Figura 11), ímãs⁹ (Figura 12) e correntes elétricas (Figura 13) e explicaria suas interações com linhas imaginárias que ajudariam a determinar a direção e a intensidade dos campos de força¹⁰.

Figura 11: ilustração das linhas de campo em cargas elétricas positivas e em cargas elétricas negativas.



Fonte: os autores.

Figura 12: ilustração das linhas de campo magnético fechadas em um ímã em forma de barra.



Fonte: Museu das Comunicações¹¹.

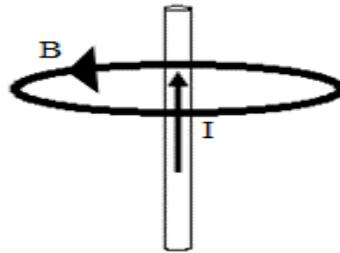
⁸ É comum encontrar o termo “linhas de força” como sinônimo de linhas de campo em alguns livros didáticos.

⁹ Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/magnet-and-compass>, há um simulador denominado “ímã e bússola”. Usando este objeto de aprendizagem, é possível entender o campo magnético terrestre e sua interação com bússolas.

¹⁰ Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/charges-and-fields>, há um simulador denominado “cargas e campos”. Com ele, de forma mais interativa, é possível entender melhor o conceito de campo discutido aqui, principalmente o elétrico.

¹¹ Disponível em: <http://macao.communications.museum/por/exhibition/secondfloor/MoreInfo/-2_2_1_MagneticFields.html>. Acesso em 28 de maio de 2019.

Figura 13: ilustração das linhas de campo magnético fechadas em um fio com corrente elétrica.



Fonte: os autores.

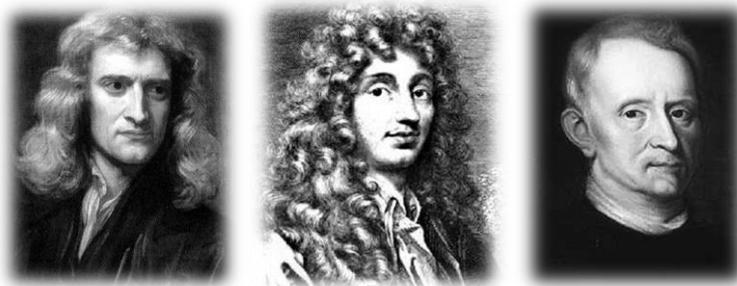
Sobre as figuras 11, 12 e 13, é interessante frisar que elas são meras descrições de campos elétricos e magnéticos de situações idealizadas, que são os casos de cargas elétricas, de um ímã em forma de barra e de uma corrente elétrica em um fio retilíneo, respectivamente, todos isolados no espaço. Situações mais complexas, de corpos com formatos quaisquer eletrizados ou magnetizados, por exemplo, requerem mais perícia para serem caracterizadas com linhas de campo.

2.3 A LUZ: ENTRE A TEORIA CORPUSCULAR E A TEORIA ONDULATÓRIA

A maioria dos filósofos gregos concebia a luz como emissões de corpos luminosos que partiam dos olhos ou do corpo iluminado. Isso se manteve durante a idade média enquanto filósofos e autores árabes contribuíram para o estabelecimento de leis básicas da ótica geométrica. Um pouco mais tarde, Isaac Newton (1643-1727) foi um dos principais partidários de uma vertente desta teoria (POLITO, 2016, p. 79; BELÉNDEZ, 2008).

Em contraposição, na idade moderna, principalmente Christian Huygens (1629-1695) e Robert Hooke (1635-1703) inauguraram a teoria ondulatória da luz. Essa teoria também conseguia explicar fenômenos luminosos estabelecendo leis físicas e necessitava, bem como a teoria corpuscular, de um meio de propagação sutil e fluido chamado de éter luminífero (BELÉNDEZ, 2008). A figura 14 mostra as imagens de Newton, Huygens e Hooke.

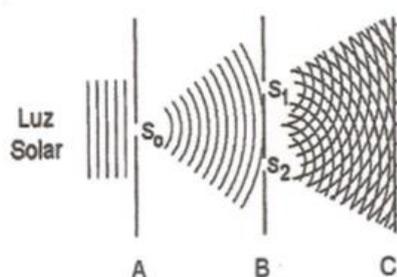
Figura 14: Isaac Newton (1643-1727), Christian Huygens (1629-1695) e Robert Hooke (1635-1703).



Fonte: Beléndez (2008).

Portanto, no século XVIII, a comunidade científica estava dividida quanto à natureza da luz. De um lado, Huygens, Hooke e seus seguidores eram a favor da teoria ondulatória da luz. Do outro, Descartes, Newton e seus seguidores eram a favor da teoria corpuscular. Desse confronto, a teoria ondulatória saiu vencedora mediante uma demonstração de interferência da luz proposta (figura 15) e realizada por Thomas Young¹² (1773-1829), figura 16, (POLITO, 2016, p. 93).

Figura 15: esquema da experiência de Young.



Fonte: Silva (2009).

Figura 16: Thomas Young (1773-1829).



Fonte: Beléndez (2008).

No experimento de interferência da luz ou de dupla fenda, como também é conhecido, diz-se que Young utilizou três anteparos: A, B e C, como mostra a figura 15. A luz solar passava pelo anteparo A, por meio de um orifício S₀, e seguia até o anteparo B. Este, por sua vez, tinham dois orifícios, S₁ e S₂, que também davam passagem à luz solar. O resultado do experimento, que provoca fascínio nos cientistas ainda hoje, é que

¹² Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/wave-interference>, há um simulador denominado “interferência de onda”. Ele é uma alternativa para entender melhor o fenômeno de interferência, mas para o caso de ondas mecânicas.

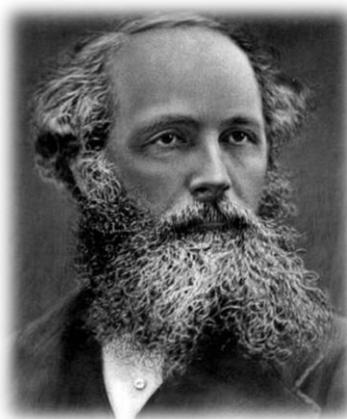
ao invés de se obter duas fontes de luz intensas e bem localizadas no anteparo C, se obtém um padrão de interferência, fenômeno característico das ondas.

Depois da comprovação da natureza ondulatória da luz, aconteceram diversos avanços na ótica. Por exemplo, a descoberta da polarização da luz por Etienne L. Malus (1775-1812), a sintetização dos conceitos da teoria ondulatória de Huygens e dos princípios de interferência e difração por Augustin J. Fresnel (1778 – 1827) e a melhoria nas medidas de velocidade da luz realizadas por Armand Fizeau (1819 – 1896) e Jean B. Foucault (1819-1868) (BELÉNDEZ, 2008).

2.4 A SÍNTESE MAXWELLIANA: A UNIFICAÇÃO DO ELETROMAGNETISMO E DA ÓTICA

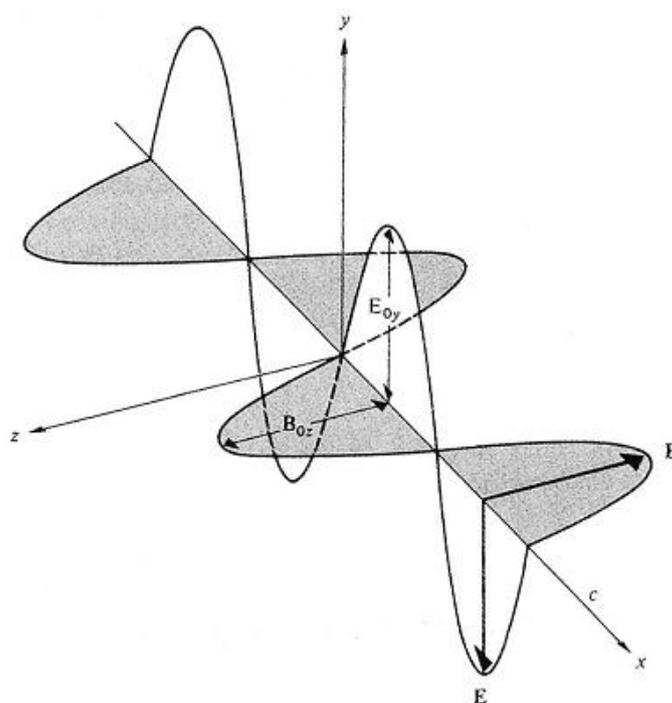
Em meio ao grande progresso científico observado no século XIX, James Clerck Maxwell (1831-1879), figura 17, publicou a obra “Tratado de Eletricidade e Magnetismo” no ano de 1873. Nela, discutiu fenômenos, generalizou equações e demonstrou teoricamente que campos elétrico e magnético propagavam-se conjuntamente de maneira perpendicular tal como uma onda de velocidade próxima àquela prevista para a luz e, por fim, conjecturou a luz como uma onda eletromagnética (POLITO, 2016, p. 107), exemplificado na figura 18.

Figura 17: James Clerck Maxwell (1831-1879).



Fonte: Beléndez (2008).

Figura 18: esquema de uma onda eletromagnética plana.



Fonte: Beléndez (2008).

É significativo dizer que Maxwell realizou tais feitos embasado nas ideias de Faraday sobre campos elétricos e magnéticos e linhas de campo. Ao todo, propôs 20 equações que deveriam governar o eletromagnetismo (BELÉNDEZ, 2008). Posteriormente, em 1884, Oliver Heaviside (1850-1925) e Williard Gibbs (1839-1903) as sintetizaram em apenas quatro, que são mostradas a seguir (GRIFFITHS, 2011):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (1)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (4)$$

Embora o cálculo envolvido nas equações não seja adequado à compreensão de estudantes do ensino médio, já que é difícil o bastante até para estudantes do ensino superior, é possível dizer que cada uma delas tem uma implicação no eletromagnetismo. Por exemplo, a equação 1 corresponde à lei de Gauss da eletricidade e descreve a relação entre um campo elétrico e as cargas elétricas que o produzem. Tem equivalência à lei de Coulomb em situações estáticas. A equação 2 é chamada de lei de Gauss do

magnetismo e afirma a inexistência de cargas ou monopolos magnéticos. A equação 3 é a lei de Faraday e descreve como um campo magnético variável no tempo induz um campo elétrico. A equação 4 expressa a lei de Ampère-Maxwell e afirma que campos magnéticos podem ser gerados tanto por correntes elétricas quanto por campos elétricos que variam no tempo.

Maxwell acreditava na existência de um éter. Esse era um meio que conseguia transportar as ondas eletromagnéticas¹³, figura 18, previstas por suas equações. Aliás, após cálculos, ele percebeu que essas ondas deviam ter velocidades próximas às medidas de velocidade da luz. Por isso, concluiu imediatamente que a luz podia ser descrita como uma onda eletromagnética: “Difícilmente podemos evitar que a luz não é outra coisa que ondas transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos” (BELÉNDEZ, 2008).

Poucos anos mais tarde, a previsão matemática de Maxwell apresentou-se verdadeira em experimentos realizados por Heinrich R. Hertz (1857 – 1894), figura 19. Isso marcou o início da transmissão de informações sem a necessidade de cabos e serviu de base para que Guglielmo Marconi (1874 – 1937), figura 20, criasse o primeiro sistema prático de telegrafia sem fios.

¹³ Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/radio-waves>, há um simulador denominado “ondas de rádio e campos eletromagnéticos”. Com ele, de forma mais interativa, é possível melhorar a compreensão de como as ondas de rádio são produzidas por uma antena, transmitidas no ar e recebidas em um aparelho de som.

Figura 19: Heinrich R. Hertz (1857 – 1894).



Fonte: Beléndez (2008).



Fonte: Jacot e Collier (1940).

Figura 20: Guglielmo Marconi (1874 – 1937) e seu sistema de telegrafia sem fios.

Após a morte de Maxwell, a teoria eletromagnética foi amplamente aceita e refinada. Um dos principais nomes desse empreendimento foi Hendrik A. Lorentz (1853-1928) (POLITO, 2016, p. 114; BELÉNDEZ, 2008) que, entre outros feitos, conseguiu explicar a reflexão e a refração da luz a partir do eletromagnetismo. Além disso, previu a necessidade de uma força para cargas elétricas que se movimentavam em campos magnéticos e os efeitos de polarização de ondas eletromagnéticas.

Embora o sucesso da teoria eletromagnética fosse indiscutível, existiam alguns conflitos com a mecânica clássica. Isso, sem dúvidas, incomodava profundamente alguns físicos do final do século XIX. Outros acreditavam que as leis físicas estavam bem compreendidas, algo que se mostrou totalmente errado com o passar do tempo.

A partir daqui, você saberia responder?

Para resolver os exercícios abaixo, os alunos deverão ter conhecimento de: 1 – condução de corrente elétrica em condutores e em soluções, 3 e 4 – uso da regra da mão direita, 5 – linhas de campo elétrico, 6 – campo magnético de ímãs, 7 e 8 – lei de Lenz, 9 – experimento de Young e 10 – noção do que seja difração e polarização. A leitura do conteúdo do produto não garantirá que consiga resolver as questões, logo é fundamental que tenham estudado esses assuntos e seria bom que fizesse uma revisão rápida antes da aplicação.

1. (FUVEST-SP) Na década de 1780, o médico italiano Luigi Galvani realizou algumas observações, utilizando rãs recentemente dissecadas. Em um dos experimentos, Galvani tocou dois pontos da musculatura de uma rã com dois arcos de metais diferentes, que estavam em contato entre si, observando uma contração dos músculos, conforme mostra a figura:



Interpretando essa observação com os conhecimentos atuais, pode-se dizer que as pernas da rã continham soluções diluídas de sais. Pode-se, também, fazer uma analogia entre o fenômeno observado e o funcionamento de uma pilha.

Considerando essas informações, foram feitas as seguintes afirmações:

I. Devido à diferença de potencial entre os dois metais, que estão em contato entre si e em contato com a solução salina da perna da rã, surge uma corrente elétrica.

II. Nos metais, a corrente elétrica consiste em um fluxo de elétrons.

III. Nos músculos da rã, há um fluxo de íons associado ao movimento de contração.

a) I, apenas.

b) III, apenas.

c) I e II, apenas.

d) II e III, apenas.

e) I, II e III.

2. (UERJ-RJ) Em fins do século XVI, foi feita uma das primeiras aplicações práticas de uma pilha: a decomposição da água em oxigênio e hidrogênio, processo denominado eletrólise. Já naquela época, com base nesse experimento, sugeriu-se que as forças responsáveis pelas ligações químicas apresentam a seguinte natureza:

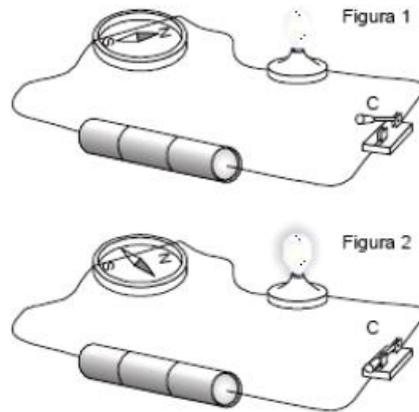
a) nuclear.

b) elétrica.

c) magnética.

d) gravitacional.

3. (PUC-SP) Na experiência de Oersted, o fio de um circuito passa sobre a agulha de uma bússola. Com a chave C aberta, a agulha alinha-se, como mostra a figura 1. Fechando-se a chave C, a agulha da bússola assume nova posição (figura 2).



A partir desse experimento, Oersted concluiu que a corrente elétrica estabelecida no circuito

- a) gerou um campo elétrico numa direção perpendicular à da corrente.
- b) gerou um campo magnético numa direção perpendicular à da corrente.
- c) gerou um campo elétrico numa direção paralela à da corrente.
- d) gerou um campo magnético numa direção paralela à da corrente.
- e) não interfere na nova posição assumida pela agulha da bússola que foi causada pela energia térmica produzida pela lâmpada.

4. (UEL-PR) "Trem magnético japonês bate seu próprio recorde de velocidade (da Agência Lusa) - Um trem japonês que levita magneticamente, conhecido por "Maglev", bateu hoje o seu próprio recorde de velocidade ao atingir 560 km/h durante um teste de via. O comboio de cinco vagões MLX01, cujo recorde anterior de 552 km/h fora alcançado em abril de 1999 com 13 pessoas a bordo, alcançou sua nova marca sem levar passageiros. O trem japonês fica ligeiramente suspenso da via pela ação de magnetos, o que elimina a redução da velocidade causada pelo atrito com os trilhos".

Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/folha/ciencia/ult306u10675.shtml>>.

Acesso em 18 de maio de 2019).

É possível deixar suspenso um corpo condutor criando uma força magnética contrária à força gravitacional que atua sobre ele. Para isso, o corpo deve estar imerso em um campo magnético e por ele deve passar uma corrente elétrica. Considerando um

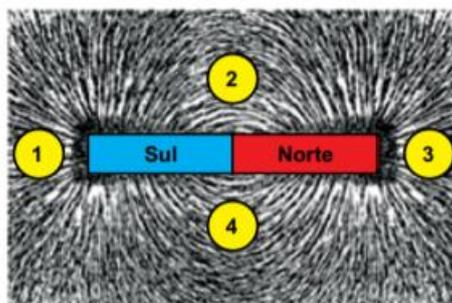
fio condutor retilíneo como uma linha horizontal nesta folha de papel que você lê, que deve ser considerada como estando posicionada com seu plano paralelo à superfície terrestre e à frente do leitor. Quais devem ser as orientações do campo magnético e da corrente elétrica, de modo que a força magnética resultante esteja na mesma direção e no sentido contrário à força gravitacional que atua sobre o fio? Ignore as ligações do fio com a fonte de corrente elétrica.

- a) A corrente deve apontar para esquerda ao longo do fio, e o campo magnético deve estar perpendicular ao fio, apontando para o leitor
- b) A corrente deve apontar para a esquerda ao longo do fio, e o campo magnético deve estar paralelo ao fio, apontando para a direita.
- c) A corrente deve apontar para a direita ao longo do fio, e o campo magnético deve estar perpendicular ao fio, apontando para fora do plano da folha.
- d) A corrente deve apontar para a direita ao longo do fio, e o campo magnético deve estar paralelo ao fio, apontando para a direita.
- e) A corrente deve apontar para a esquerda ao longo do fio, e o campo magnético deve estar perpendicular ao fio, apontando para dentro do plano da folha.

5. (PUC-MG) As linhas de força de um campo elétrico são um modo conveniente de visualizar o campo elétrico e indicam a direção do campo em qualquer ponto. Leia as opções abaixo e assinale a afirmativa incorreta.

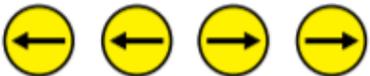
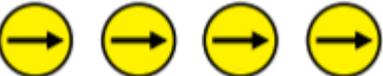
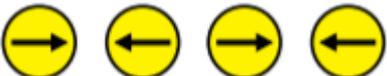
- a) As linhas de força saem da carga negativa e entram na carga positiva.
- b) O número de linhas que saem ou que entram em uma carga puntiforme é proporcional ao valor da carga elétrica.
- c) As linhas de força saem da carga positiva e entram na carga negativa.
- d) O número de linhas por unidade de área perpendicular às linhas é proporcional à intensidade do campo.

6. (UNESP-SP) Um ímã em forma de barra, com seus polos Norte e Sul, é colocado sob uma superfície coberta com partículas de limalha de ferro, fazendo com que elas se alinhem segundo seu campo magnético. Se quatro pequenas bússolas, 1, 2, 3 e 4, forem colocadas em repouso nas posições indicadas na figura, no mesmo plano que contém a limalha, suas agulhas magnéticas orientam-se segundo as linhas do campo magnético criado pelo ímã.



(www.grupoescolar.com. Adaptado.)

Desconsiderando o campo magnético terrestre e considerando que a agulha magnética de cada bússola seja representada por uma seta que se orienta na mesma direção e no mesmo sentido do vetor campo magnético associado ao ponto em que ela foi colocada, assinale a alternativa que indica, correta e respectivamente, as configurações das agulhas das bússolas 1, 2, 3 e 4 na situação descrita.

- a) 
- b) 
- c) 
- d) 
- e) 

7. (UFMG-MG) A corrente elétrica induzida em uma espira circular será:

- a) nula, quando o fluxo magnético que atravessa a espira for constante.
 b) inversamente proporcional à variação do fluxo magnético com o tempo.
 c) no mesmo sentido da variação do fluxo magnético.
 d) tanto maior quanto maior for a resistência da espira.
 e) sempre a mesma, qualquer que seja a resistência da espira.

8. (FAAP-SP) Num condutor fechado, colocado num campo magnético, a superfície determinada pelo condutor é atravessada por um fluxo magnético. Se por um motivo qualquer o fluxo variar, ocorrerá:

- a) curto circuito.
- b) interrupção da corrente.
- c) o surgimento de corrente elétrica no condutor.
- d) a magnetização permanente do condutor.
- e) extinção do campo magnético.

9. (UFLA-MG) A experiência de Young, relativa aos fenômenos de interferência luminosa, veio mostrar que:

- a) A interferência pode ser explicada independentemente da estrutura íntima da luz.
- b) A interferência só pode ser explicada com base na teoria corpuscular da luz.
- c) A interferência só é explicada satisfatoriamente através da teoria ondulatória da luz.
- d) Tanto a teoria corpuscular quanto a ondulatória explicam satisfatoriamente esse fenômeno.
- e) Nem a teoria corpuscular nem a ondulatória conseguem explicar esse fenômeno.

10. (UFRGS-RS) Considere as seguintes afirmações sobre os fenômenos ondulatórios e suas características:

- I. A difração ocorre apenas com ondas sonoras.
- II. A interferência ocorre apenas com ondas eletromagnéticas.
- III. A polarização ocorre apenas com ondas transversais.

Quais estão corretas?

- a) Apenas I.
- b) Apenas II.
- c) Apenas III.
- d) Apenas I e II.
- e) I, II e III.

11. (UFMG-MG) As ondas eletromagnéticas, ao contrário das ondas mecânicas, não precisam de um meio material para se propagar. Considere as seguintes ondas: som, ultrassom, ondas de rádio, micro-ondas e luz. Sobre essas ondas é correto afirmar que

- a) luz e micro-ondas são ondas eletromagnéticas e as outras são ondas mecânicas.
- b) luz é onda eletromagnética e as outras são ondas mecânicas.
- c) som é onda mecânica e as outras são ondas eletromagnéticas.
- d) som e ultrassom são ondas mecânicas e as outras são ondas eletromagnéticas.

3. A VELOCIDADE CONSTANTE DA LUZ E A NÃO-INVARIÂNCIA DAS EQUAÇÕES DE MAXWELL NAS TRANSFORMAÇÕES DE GALILEU

A eletrodinâmica de Maxwell elevou a física a um novo e mais alto patamar. Para se ter ideia, o progresso científico alcançado com a unificação do eletromagnetismo e da ótica tem estatura comparável à síntese newtoniana que, a grosso modo, unificou as leis do movimento da terra e do céu.

No entanto, já no fim do século XIX, essa teoria tinha algumas limitações. A primeira seria o fato de que a velocidade da luz sempre se mantinha constante como foi demonstrado em vários experimentos como os realizados por Michelson e Morley¹⁴, por exemplo. A segunda era o conflito das equações de Maxwell com a mecânica clássica no chamado problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento (BELÉNDEZ, 2008).

Esta última se traduzia numa incoerência dos resultados dos fenômenos eletromagnéticos previstos a partir das equações de Maxwell com as leis de Newton para o movimento. Isso, se considerarmos o princípio da relatividade descoberto por Galileu Galilei (1564 – 1642), que diz: as leis da mecânica são válidas em referências desde que um tenha velocidade constante e trajetória retilínea em relação ao outro.

Figura 21: Galileu Galilei (1564 – 1642).



Fonte: Galilei (2003).

Esse princípio também é conhecido como invariância de Galileu e “traduz a vontade de encontrar uma imagem do mundo que seja independente da situação dos diversos observadores” (SEIXAS, 2006). A partir dele e com ajuda da figura 22, se um

¹⁴ O experimento de Michelson e Morley será detalhado a seguir.

referencial S' se movimentar apenas na horizontal com velocidade u constante em relação a um referencial S , então sua posição x' em relação ao referencial S é tal que

$$x' = x - ut \quad (5)$$

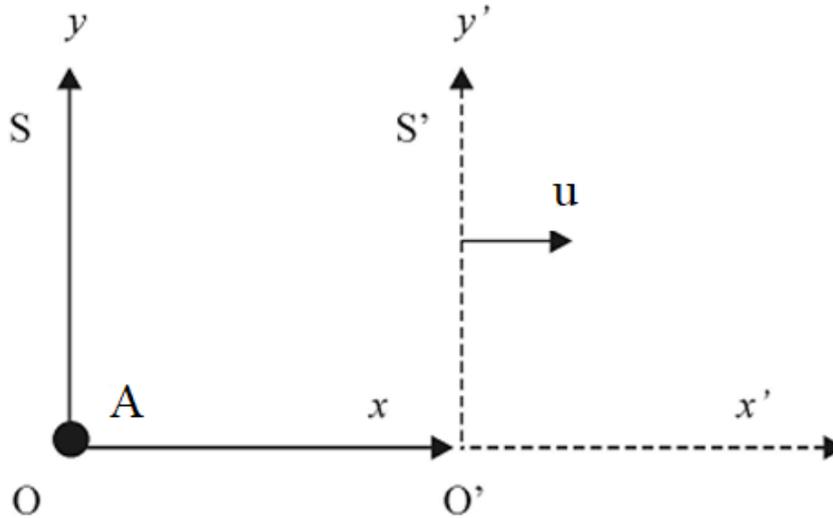
$$y' = y \quad (6)$$

Além do mais, pelo fato de que o espaço e o tempo são ditos absolutos na mecânica clássica, temos que

$$t' = t \quad (7)$$

em que t e t' são os tempos medidos nos referenciais S e S' .

Figura 22: Sistemas de referenciais S e S' em movimento retilíneo uniforme entre si.



Fonte: os autores.

Embora já referido, a invariância de Galileu se encaixava bem às leis da mecânica, mas as equações de Maxwell pareciam ser não-invariantes para referenciais inerciais. Isto é, caso se mudasse os referenciais com velocidade constante, as equações de Maxwell passavam a prever resultados distorcidos um do outro. Então, algumas indagações que se punham na virada do século XIX eram: “Como resolver a incompatibilidade entre eletromagnetismo e mecânica clássica devido a não-invariância das equações de Maxwell?” e “Existe algum referencial privilegiado para as ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente, para a luz?”

A derradeira questão tinha resposta afirmativa para a maioria dos físicos que acreditavam no éter luminífero. Conseqüentemente, era necessário provar a existência desse meio que seria referencial absoluto para a luz (SEIXAS, 2006).

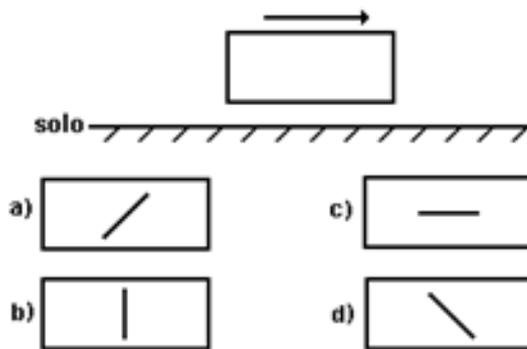
A partir daqui, você saberia responder?

-
1. Analise as sentenças a seguir e some os valores que correspondem às corretas.
01. A grande contribuição de Galileu Galilei (1564-1642) para a ciência foi a de estabelecer a Física como uma ciência baseada na experimentação.
02. Certamente todos nós já experimentamos os efeitos da inércia, descritos nos estudos de Física, como, por exemplo, quando dentro de um ônibus nos sentirmos projetados para frente quando o mesmo é freado bruscamente.
04. Os trabalhos de Newton, como sua obra “Princípios Matemáticos da Filosofia Natural”, foram determinantes nos estudos da chamada Física Clássica.
08. Uma das principais diferenças entre as ideias aristotélicas e galilaicas, no que se refere aos movimentos dos corpos, é que o primeiro era partidário do movimento absoluto e, o segundo, do movimento relativo.
16. Segundo o pensamento aristotélico, vigente até os dias atuais, se um corpo está em movimento, ou seja, possui velocidade, então, necessariamente, uma força atua sobre o mesmo.
32. Segundo o pensamento newtoniano, vigente até os dias atuais, todo corpo permanece em repouso ou em movimento uniforme até que uma força atue sobre ele e modifique tal estado.
2. (FUVEST-SP) Num vagão ferroviário, que se move com velocidade $v_0 = 3 \text{ m/s}$ em relação aos trilhos, estão dois meninos, A e B, que correm um em direção ao outro, cada um com velocidade $v = 3 \text{ m/s}$ em relação ao vagão, considerando que o menino B esteja se deslocando no mesmo sentido do vagão. As velocidades dos meninos A e B em relação aos trilhos são respectivamente:
- a) 6 m/s e 0 m/s
 - b) 3 m/s e 3 m/s
 - c) 0 m/s e 9 m/s
 - d) 9 m/s e 0 m/s
 - e) 0 m/s e 6 m/s
3. (FEI-SP) Sabe-se que a distância entre as margens paralelas de um rio é de 100 m e que a velocidade da correnteza, de 6 m/s, é constante, com direção paralela às margens. Um barco parte de um ponto x da margem A com velocidade constante de 8 m/s, com

direção perpendicular às margens do rio. A que distância do ponto x o barco atinge a margem B?

- a) 100 m
- b) 125 m
- c) 600 m
- d) 750 m
- e) 800 m

4. (UERJ-RJ) Na figura a seguir, o retângulo representa a janela de um trem que se move com velocidade constante e não nula, enquanto a seta indica o sentido de movimento do trem em relação ao solo. Dentro do trem, um passageiro sentado nota que começa a chover. Vistas por um observador em repouso em relação ao solo terrestre, as gotas da chuva caem verticalmente. Na visão do passageiro que está no trem, a alternativa que melhor descreve a trajetória das gotas através da janela é:



5. A velocidade da luz de uma fonte que se aproxima de um observador com velocidade $\vec{v} \neq 0$ deve ser maior, menor ou igual à velocidade da luz de uma fonte que está em repouso em relação ao mesmo observador? Comente como você chegou à sua conclusão.

6. Em sua opinião e/ou conhecimentos, existe algum meio material ou não que sustente a emissão da luz do Sol a Terra?

7. Em sua opinião e/ou conhecimentos, seria possível detectar o éter luminífero, pensado por Maxwell e outros como suporte para a propagação de ondas eletromagnéticas, se estivéssemos dentro dele? Comente como você chegou a essa conclusão.

4. AS TENTATIVAS DE DETECÇÃO DA VELOCIDADE DA TERRA EM RELAÇÃO AO ÉTER, A CONTRAÇÃO DE LORENTZ-FITZGERALD PARA O ESPAÇO E AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

4.1. O ÉTER E AS TENTATIVAS DE SUA DETECÇÃO

A ideia de éter existia desde Aristóteles (Século IV a. C.) e era utilizada por ele para se garantir a inexistência do vazio no cosmos. Especulado de outras formas, a crença nessa “substância” persistiu até o início do século XX para explicar, por exemplo, a propagação da luz no espaço por nomes como René Descartes (1596 – 1650), Huygens, Leonhard Euler (1707 – 1783), Young e Fresnel (PIETROCOLA, 2002).

Principalmente para os adeptos da teoria ondulatória da luz, a existência do éter parecia real e inevitável, pois uma onda só poderia ser transmitida em um meio material. Do sucesso das explicações de Fresnel na ótica até fenômenos como o calor, a eletricidade e o magnetismo passaram a ser interpretados como manifestações do éter. Sua importância para os físicos foi tão grande que J. J. Thomson (1856 – 1949) chegou a dizer: “O éter não é uma criação fantástica de uma filosofia especulativa; ele é essencial para nós, como o ar que respiramos” (PIETROCOLA, 2002).

Mas alguns obstáculos se colocaram à frente do éter luminífero. Dois deles eram:

- a regularidade dos movimentos dos astros não poderia existir em um meio fluido tal como era concebido o éter;
- as ondas transversais, como as eletromagnéticas, só poderiam ser transmitidas em meios rígidos.

Uma solução para o problema do movimento dos corpos celestes foi admitir extrema fluidez ao éter. Tal concordância ocasionava características bizarras a ele, pois nenhuma substância conhecida podia ser muito fluida e rígida ao mesmo tempo (PIETROCOLA, 1993).

Somado a isso, experimentos que procuravam observar a ação do movimento terrestre no éter luminífero utilizando a velocidade da luz falharam¹⁵. É o caso, por exemplo, das experiências de interferência da luz empreendidas por Albert Abraham Michelson (1852 – 1931) e Edward Morley (1838-1923) (POLITO, 2016, p. 114).

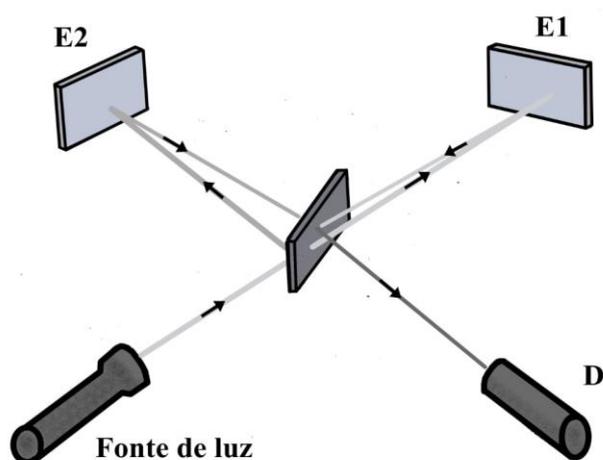
¹⁵ Lembre-se que provar a existência do éter era demonstrar um referencial absoluto.

O famoso experimento de Michelson e Morley consistia na tentativa de detectar o éter usando a velocidade da luz e o movimento de translação da Terra. A ideia se baseava na crença de que esse meio de propagação era como o previsto por Fresnel, isto é, pouco interagente com a matéria e estacionário (MARTINS, 2012).

Dessa forma, entre 1881 e 1887, Michelson e Morley utilizaram um interferômetro¹⁶ visando encontrar padrões de interferência devido às diferenças nos tempos dos raios de luz colocados em direções perpendiculares entre si e simultaneamente a favor ou contra o movimento da Terra em torno do Sol. Se a hipótese do éter estivesse correta, o feixe de luz que apontasse na direção de movimento da Terra seria mais rápido ou mais devagar que o feixe perpendicular e isso poderia ser detectado.

Por meio do esquema ilustrado na figura 23, é possível compreender melhor o experimento de Michelson e Morley. No aparato, temos uma fonte que emite luz para uma placa semiespelhada no centro, que reflete e refrata feixes, e dois espelhos E1 e E2. Como a diferença de caminho óptico da luz medida a favor e contra o sentido de movimento de translação da Terra é diferente por uma composição de movimentos, seria de se esperar que o anteparo para a observação do fenômeno de interferência (D) perceberia diferença de velocidades dos feixes de luz, o que causaria um padrão de interferências. A figura 24 mostra o dispositivo experimental similar ao empregado na época por Michelson e Morley.

Figura 23: esquema experimental de um espectrômetro de Michelson.



Fonte: os autores.

¹⁶ Instrumento que produz franjas de interferência sendo bastante utilizado na física e na astronomia.

Figura 24: foto de um aparato experimental semelhante ao usado por Michelson e Morley entre os anos 1881 e 1887.



Fonte: Schiller (2019).

Contudo, para a decepção da comunidade científica da época, os resultados foram negativos, quer dizer, as velocidades dos dois feixes de luz eram iguais (NUSSENZVEIG, 1998). A conclusão retirada dos experimentos de Michelson e Morley causou mal-estar, pois o fato dos feixes de luz terem velocidades iguais parecia apontar para a inexistência do éter. Nesse contexto, outro problema do século XIX ainda em aberto era a não-invariância das equações de Maxwell pelas transformações de Galileu, um produto da divergência entre o eletromagnetismo e a mecânica clássica.

4.2. A CONTRAÇÃO DO ESPAÇO DE LORENTZ-FITZGERALD E AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

4.2.1. O PROBLEMA DA VELOCIDADE DA LUZ E A CONTRAÇÃO DO ESPAÇO IDEALIZADA POR LORENTZ E FITZGERALD

Em uma tentativa de salvar o éter luminífero, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) e George Francis FitzGerald (1851-1901), separadamente, supuseram que corpos que se deslocavam no meio etéreo deveriam sofrer uma contração na medida de seu comprimento (BARROS et al., 2005; OSTERMANN e RICCI, 2002), já que era de conhecimento na época que se uma esfera carregada se movesse com certa velocidade, seu campo elétrico deveria apresentar uma compressão (POLITO, 2016, p. 114). Portanto, Lorentz e FitzGerald estenderam isto para toda a matéria.

Confiando nessa hipótese, calcularam que essa contração seria dada por

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (8)$$

em que L_0 é o comprimento próprio do objeto na direção de seu movimento em um referencial inercial próprio S' , u é a velocidade escalar do objeto em relação a um outro referencial inercial S , c é a velocidade de propagação da luz no vácuo e L é o comprimento do objeto medido com relação ao referencial S ¹⁷ (OSTERMANN e RICCI, 2002).

Dessa forma, finalmente havia uma explicação para os experimentos de Michelson e Morley. Sem renegar o éter, Lorentz e FitzGerald afirmaram que o braço do interferômetro paralelo ao movimento da Terra deveria sofrer uma contração. Apesar de estranha, essa justificativa foi encarada como sendo objetivamente real (OSTERMANN e RICCI, 2002).

4.2.2. AS TRANSFORMAÇÕES DE LORENTZ

No contexto do desenvolvimento das explicações a respeito dos experimentos de Michelson e Morley e da tentativa de estender a explicação dos fenômenos eletromagnéticos para a escala microscópica (POLITO, 2016, p. 115), Lorentz obteve as transformações de coordenadas que deixavam a velocidade da luz invariante para dois observadores em movimento relativo uniforme (BARROS et al., 2005). Embora inicialmente tida como uma solução matemática, as transformações de Lorentz resolveram as incongruências observadas nas medidas de velocidade da luz detectadas nos experimentos de Michelson e Morley.

Nessas transformações, se um referencial S' se movimenta com velocidade u na direção horizontal em relação ao referencial S , como observamos na figura 22, então a mudança de coordenadas do sistema S para o sistema S' se daria pelas equações

$$x' = \gamma(x - ut) \quad (9)$$

$$y' = y \quad (10)$$

$$t' = \gamma\left(t - \frac{u}{c^2}x\right) \quad (11)$$

em que $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$ é o chamado fator de Lorentz.

¹⁷ Para auxílio, veja a figura 22.

Observe que essas transformações são distintas das de Galileu. Há uma dependência do chamado fator de Lorentz na direção do movimento e o tempo depende da posição e da velocidade do móvel, algo que Lorentz chamou de “tempo local” (STACHEL, 2004). Era preciso abandonar o tempo absoluto para aceitar as transformações de Lorentz. Assim, começava a ruir o pensamento newtoniano de que tempo e espaço eram isolados entre si e absolutos.

Coube a Henri Poincaré (1854 – 1912) uma interpretação das transformações de Lorentz e do tempo local (POLITO, 2016, p. 116), que pode ser entendida assim: “É o tempo que relógios em repouso em um referencial que se move através do éter marcariam, se fossem sincronizados usando sinais de luz, mas sem levar em consideração o movimento do referencial” (STACHEL, 2004). Por essa explicação, que é muito elaborada, era possível perceber que o conceito de tempo ainda precisava ser melhor compreendido.

Portanto, todos os fenômenos eletromagnéticos estavam explicados ainda que isso implicasse na continuidade da crença no éter e violasse o princípio da relatividade de Galileu.

Curiosidade sobre o assunto!

A MEDIDA DO TEMPO

O nosso padrão de medida do tempo, que desde a antiguidade tinha como referência o movimento de rotação da Terra (1 segundo = 1/86.400 de um dia), passou, com o advento dos relógios atômicos em meados do século passado, a ser referenciado no mundo submicroscópico regido pelas leis quânticas. Em 1967 o segundo foi redefinido como sendo igual a 9.192.631.770 períodos da radiação emitida ou absorvida na transição entre dois níveis hiperfinos do átomo de Césio-133.

Num relógio atômico típico, utiliza-se um campo magnético apropriado para selecionar, de um feixe de vapor de Césio, aqueles átomos capazes de absorver micro-ondas de uma dada frequência fundamental ν_0 . Após atravessar o campo de micro-ondas, os átomos que sofreram a transição desejada são desviados por outro campo magnético em direção a um detector. Um circuito de retroalimentação é usado para maximizar o número de átomos que chegam ao detector, regulando a frequência de micro-ondas cada vez que esse número diminui. Dessa forma, essa frequência é mantida ajustada, dentro da maior precisão possível, àquela frequência ν_0 . Acopla-se a esse

5. O PROBLEMA DA ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO E A MUDANÇA DE CONCEPÇÃO ACERCA DE ESPAÇO E TEMPO

5.1 EINSTEIN E O PROBLEMA DA ELETRODINÂMICA DOS CORPOS EM MOVIMENTO

Um dos assuntos preferidos de Albert Einstein (1879 – 1955), um desconhecido funcionário do departamento de patentes da Suíça antes da fama alcançada mundialmente, era a eletrodinâmica dos corpos em movimento. Embora Lorentz, Poincaré e outros tenham obtido sucesso na conciliação entre o eletromagnetismo e a mecânica clássica, Einstein desconfiava da teoria pela quantidade de hipótese inseridas e conceitos não experimentais invocados. Por exemplo, ele tinha certo desconforto com relação à sustentação dos fenômenos eletromagnéticos pelo éter e lhe intrigava as noções de tempo local e encurtamento no comprimento de corpos na direção de seu movimento em relação ao éter.

Figura 25: Albert Einstein (1879 – 1955).



Fonte: Renn (2004).

Lançando mão de uma nova interpretação para o problema das cargas elétricas em movimento e da interação entre campos elétrico e magnético, em 1905, Einstein publicou um artigo intitulado “Acerca da eletrodinâmica dos corpos em movimento”. Nele, introduziu a Teoria da Relatividade Restrita (TRR) que, ao explicar fenômenos eletromagnéticos a partir de ‘uma troca de referenciais inerciais, deu origem a uma nova compreensão para os conceitos de espaço e de tempo (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 141). Nesse mesmo ano, Einstein ainda publicou outros dois artigos sobre o efeito fotoelétrico e o movimento Browniano, ambos também de grande impacto para a ciência.

5.2. A TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA¹⁸

5.2.1. OS POSTULADOS¹⁹

A TRR de Einstein se embasou em apenas dois postulados simples, não intuitivos e com fortes implicações em todas as áreas de estudo da física. Eles podem ser enunciados da seguinte maneira:

1º Postulado: as leis da física são as mesmas em qualquer sistema de referência inercial²⁰.

2º Postulado: a velocidade da luz no vácuo é sempre a mesma em qualquer sistema de referência inercial e não depende da velocidade da fonte.

A partir deles, a TRR conseguia solucionar o problema da eletrodinâmica dos corpos em movimento sem recorrer ao éter. Além disso, previa que um evento que ocorresse simultaneamente a outro em relação a um observador A poderia não ocorrer simultaneamente para outro observador B, que o movimento relativo entre dois observadores influenciava nas medidas de intervalo de tempo e de comprimento para cada um deles e que as leis de conservação da física exigiam uma reformulação na segunda lei de Newton e nas equações de energia cinética e quantidade de movimento da mecânica clássica (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 141).

O primeiro postulado de Einstein é chamado de princípio da relatividade. Sua consequência é que se as leis da física dependessem dos referenciais inerciais, então elas deveriam ser uma maneira para distingui-los, algo que não ocorre. Dessarte, por esse postulado, as leis da física devem ser as mesmas para dois observadores que mantêm movimento uniforme e retilíneo um em relação ao outro.

Um exemplo que mostra a validade disso é o fato do movimento de um ímã em relação a uma bobina parada produzir o mesmo efeito da bobina em movimento em relação ao ímã ‘parado, pois a indução eletromagnética depende apenas da variação do fluxo do campo magnético não distinguindo referenciais inerciais²¹.

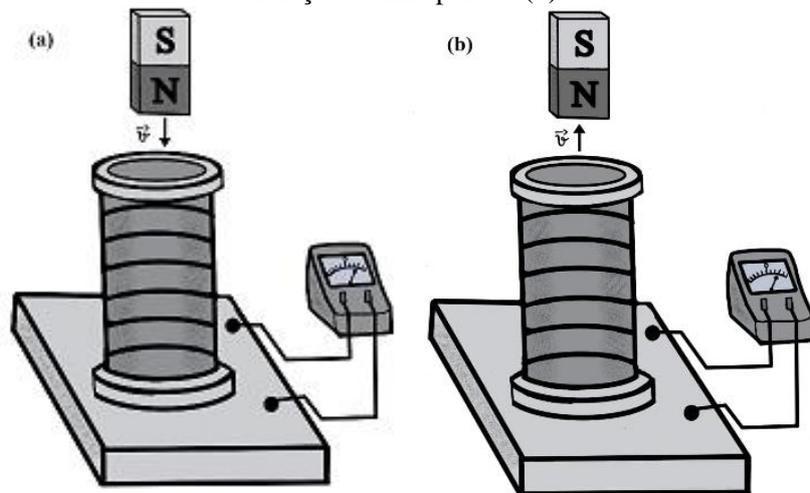
¹⁸ Em larga medida, o conteúdo explorado nessa seção se baseia em Young e Freedman (2009).

¹⁹ Postulado é um ponto de partida para a solução de um problema.

²⁰ Referencial inercial é um sistema de referência em que corpos livres da ação de forças não têm o seu estado de movimento alterado.

²¹ Faça você mesmo! No endereço <https://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/legacy/faraday>, há um simulador denominado “Laboratório de eletromagnetismo de Faraday”. Com ele, de forma mais interativa, é possível entender melhor as situações tratadas no texto.

Figura 26: ímã em movimento em relação à bobina parada (a) e bobina em movimento em relação ao ímã parado (b).



Fonte: adaptado de Young e Freedman (2009, p. 142).

Isso acontece também para as outras leis de Maxwell e elas são ditas relativísticas. Inclusive, há uma simetria entre os fenômenos eletromagnéticos, já que, a depender de uma mudança de referenciais inerciais, é possível que se perceba os fenômenos sob a ótica da eletricidade ou do magnetismo.

O segundo postulado da TRR, que não é intuitivo, surgiu de um grande salto conceitual de Einstein: perceber que para as equações de Maxwell serem válidas em qualquer referencial inercial seria necessário que a velocidade da luz no vácuo fosse a mesma em qualquer situação (YOUNG e FREEDMAN, 2009, p. 142), circunstância que é prevista pelas transformações de Lorentz.

Uma consequência deste postulado é que um referencial inercial jamais pode se deslocar com a velocidade da luz no vácuo, pois isso conduziria a uma falácia. Imagine você... Se uma fonte de luz e seu feixe de luz tivessem uma mesma velocidade, ao mesmo tempo o feixe deveria ficar em um mesmo ponto do espaço em relação à sua fonte e viajar com a velocidade da luz no vácuo em relação à fonte! Isso é um absurdo e não pode acontecer, de acordo com a TRR. Deixando de lado a ironia da situação, um carro não poderia ter a velocidade da luz e, ao mesmo tempo, se distanciar de um feixe de *laser* emitido por si mesmo também com a própria velocidade da luz. É inconsistente!

5.2.2. A RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

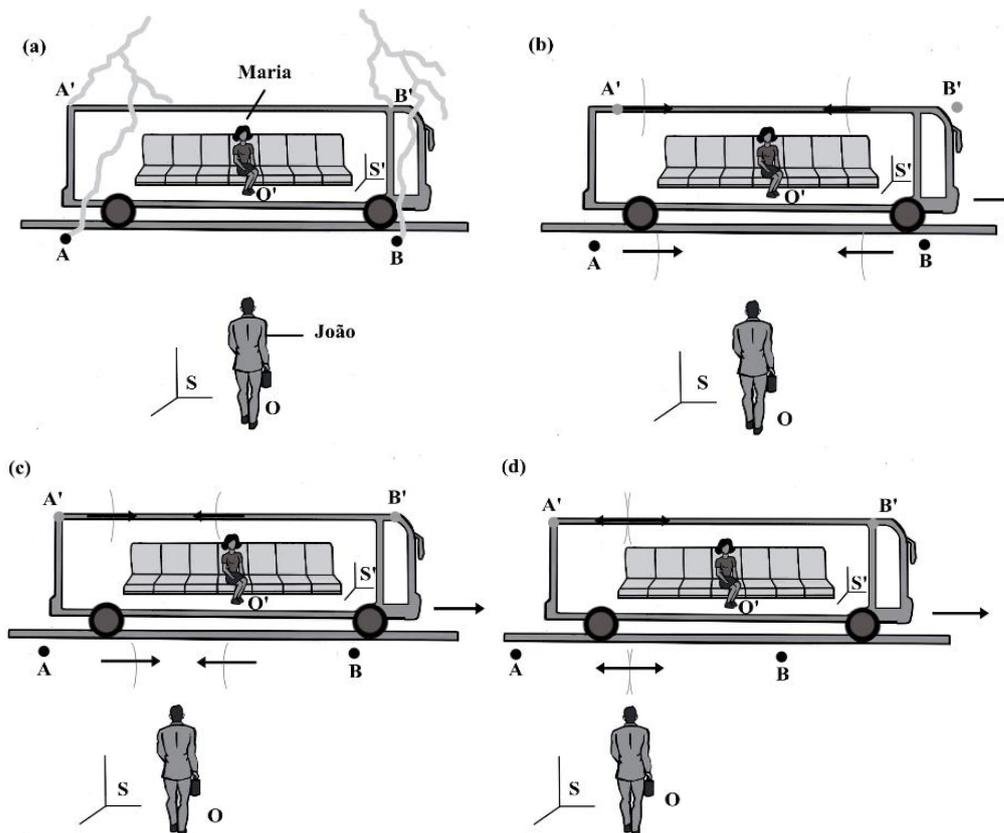
Na mecânica de Newton, o espaço e o tempo eram tidos como absolutos. Desse modo, um evento que ocorresse simultaneamente a outro em relação a um observador A

era simultâneo para outro observador B existindo ou não um movimento uniforme e retilíneo entre eles. Por exemplo, com o perdão da fantasia, na mecânica newtoniana, um mosquito em uma fruta que cai de uma árvore mediria o mesmo intervalo de tempo que uma pessoa que espera a fruta cair não importando a velocidade de queda.

Com a TRR de Einstein, a ideia de simultaneidade de eventos para dois observadores mudou. Não necessariamente eventos simultâneos para um observador inercial A deviam ser simultâneos para outro observador inercial B. A consequência disso é que medições de intervalos de tempo e distância para dois observadores poderiam não serem iguais a depender da velocidade relativa deles. Isso quer dizer que o tempo e o espaço já não eram mais absolutos.

Einstein chegou a essa conclusão após realizar um de seus famosos *Gedankenexperiment*, ou seja, experimentos mentais. Pensando na relatividade de simultaneidade, um deles é descrito a seguir com o auxílio da figura 27:

Figura 27: uma experiência mental sobre simultaneidade.



Fonte: os autores.

Imagine que um ônibus (Referencial inercial S') que se desloca para a direita com velocidade u próxima à da luz (Figura 27-a) tenha as suas extremidades atingidas por raios. Cada raio deixa uma marca no ônibus (A' e B') e no chão (A e B) no

momento em que atingem esses pontos. No instante do evento, João (Referencial inercial S) está em repouso no ponto O , exatamente no ponto médio entre A e B , e Maria se movimenta junto com o ônibus no ponto O' . Então, é possível perceber que Maria se aproxima da luz que vem da frente do ônibus e se afasta da luz que vem de sua traseira (Figura 27-b). Assim, como ela vê primeiro a luz da frente, conclui que o raio da frente foi o primeiro a cair (Figura 27-c). Diferente de Maria, João vê os dois raios atingindo o solo ao mesmo tempo e para ele os raios atingiram o ônibus simultaneamente (Figura 27-d).

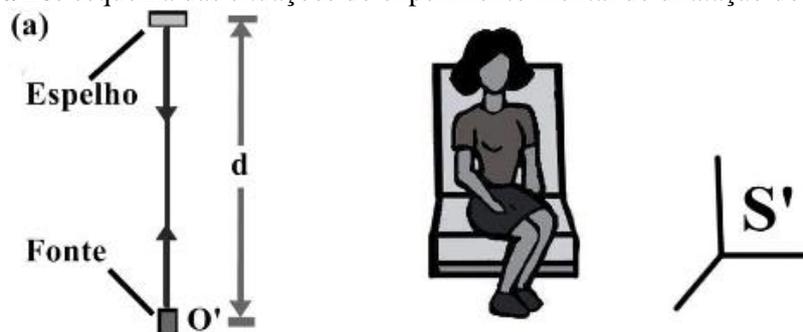
Portanto, pelo experimento mental, fica claro que os eventos (queda dos raios) aconteceram simultaneamente para João e não aconteceram simultaneamente para Maria, embora ambos fossem observadores inerciais, ou seja, observadores livres da ação de forças e, por conseguinte, com velocidade constante um em relação ao outro. Essa diferença de percepção para João e Maria sugere que as medidas de intervalo de tempo e de distância para dois observadores que têm movimento relativo com velocidades próximas a c podem não ser iguais, como veremos nas próximas seções.

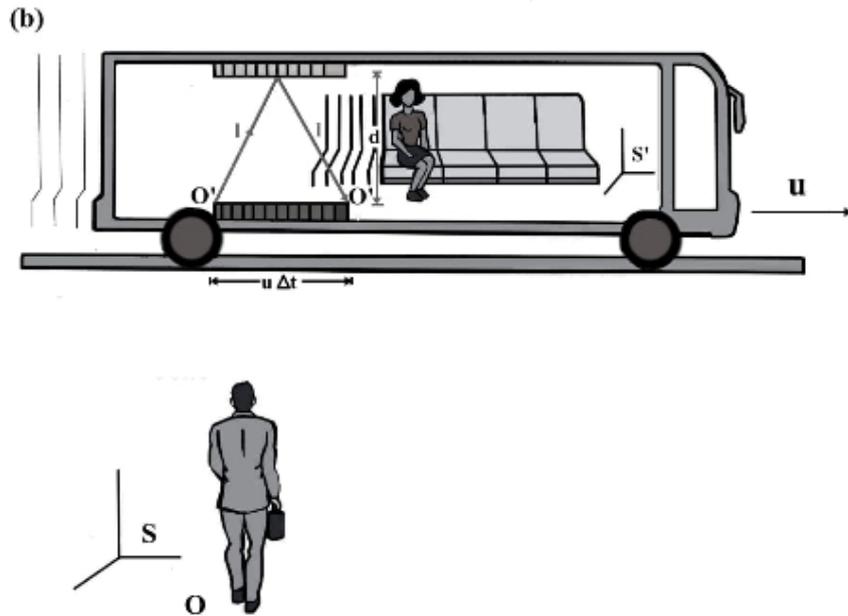
5.2.3. A RELATIVIDADE DOS INTERVALOS DE TEMPO

Usaremos outra experiência mental para demonstrar quantitativamente que medidas de intervalos de tempo podem ser diferentes para observadores com movimento relativo com velocidade próxima à velocidade da luz no vácuo c .

Imagine que Maria se locomova dentro do ônibus, no referencial inercial S' , para a direita com velocidade u em relação a João, no referencial inercial S , e que ela consiga enxergar a emissão de um pulso de luz no ponto O' , sua reflexão depois de percorrer uma distância d e seu retorno ao mesmo ponto O' , como mostra a figura 28-a:

Figura 28: esquema das situações do experimento mental de dilatação do tempo.





Fonte: os autores.

O intervalo de tempo medido por Maria para que a luz emitida em O' volte a esse mesmo ponto é Δt_0 , chamado de tempo próprio, tal que

$$\Delta t_0 = \frac{2d}{c} \quad (12)$$

Já João, situado em O , percebe outro intervalo de tempo Δt para a ida e a volta do pulso de luz em O' já que a luz viaja por uma distância $2l$, em que l^{22} é

$$l = \sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2} \quad (13)$$

calculado pela figura 28-b.

Dessa forma, para João, o intervalo de tempo Δt para que os eventos aconteçam é dado por

$$\Delta t = \frac{2l}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{d^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2} \quad (14)$$

Se isolarmos d na equação 12 e o inserirmos na equação 14, teremos como resultado

$$\Delta t = \frac{2}{c} \sqrt{\left(\frac{c\Delta t_0}{2}\right)^2 + \left(\frac{u\Delta t}{2}\right)^2} \quad (15)$$

²² Nesta passagem, usamos o teorema de Pitágoras para o triângulo retângulo que tem hipotenusa l e catetos d e $\frac{u\Delta t}{2}$, que pode ser imaginado a partir da figura 28-b.

e, por fim, se elevarmos ao quadrado e isolarmos Δt , chegaremos ao resultado

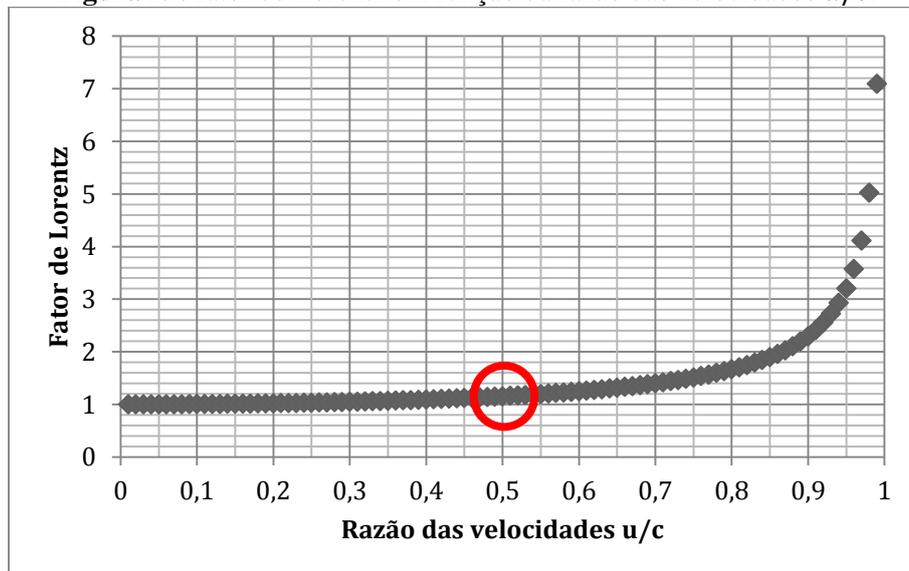
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t_0 \quad (16)$$

demonstrando uma maior medida de intervalo de tempo por João em relação a Maria.

Como adiantado na seção 4.2.2, a constante γ é chamada de fator de Lorentz. Seu aparecimento na TRR manifesta a imposição de que as transformações de Lorentz são consistentes com o princípio da relatividade para velocidades grandes em relação a c em detrimento das transformações de Galileu, que só geram resultados compatíveis com a realidade em situações que envolvem baixas velocidades em relação a c .

O gráfico na figura 29 demonstra o comportamento de γ em função da velocidade relativa u entre dois referenciais inerciais. Quando u é muito pequena e $\gamma \approx 1$, então os intervalos de tempo medidos para dois eventos consecutivos pelos observadores inerciais, um em repouso (Δt_0) e outro em movimento (Δt) em relação ao primeiro, com velocidade u , são aproximadamente iguais, ou seja, $\Delta t \cong \Delta t_0$. Quando u é grande e passa de $0,5 c$ (veja o círculo que destaca esse local no gráfico da figura 29), então $\gamma > 1$ e os intervalos de tempo medidos para dois eventos consecutivos pelos observadores inerciais são diferentes, tal que $\Delta t > \Delta t_0$.

Figura 29: fator de Lorentz em função da razão das velocidades u/c .



Fonte: Os autores.

É possível generalizar o resultado visto na equação 16. Podemos dizer que a medida de intervalo de tempo entre dois eventos em um referencial inercial em repouso

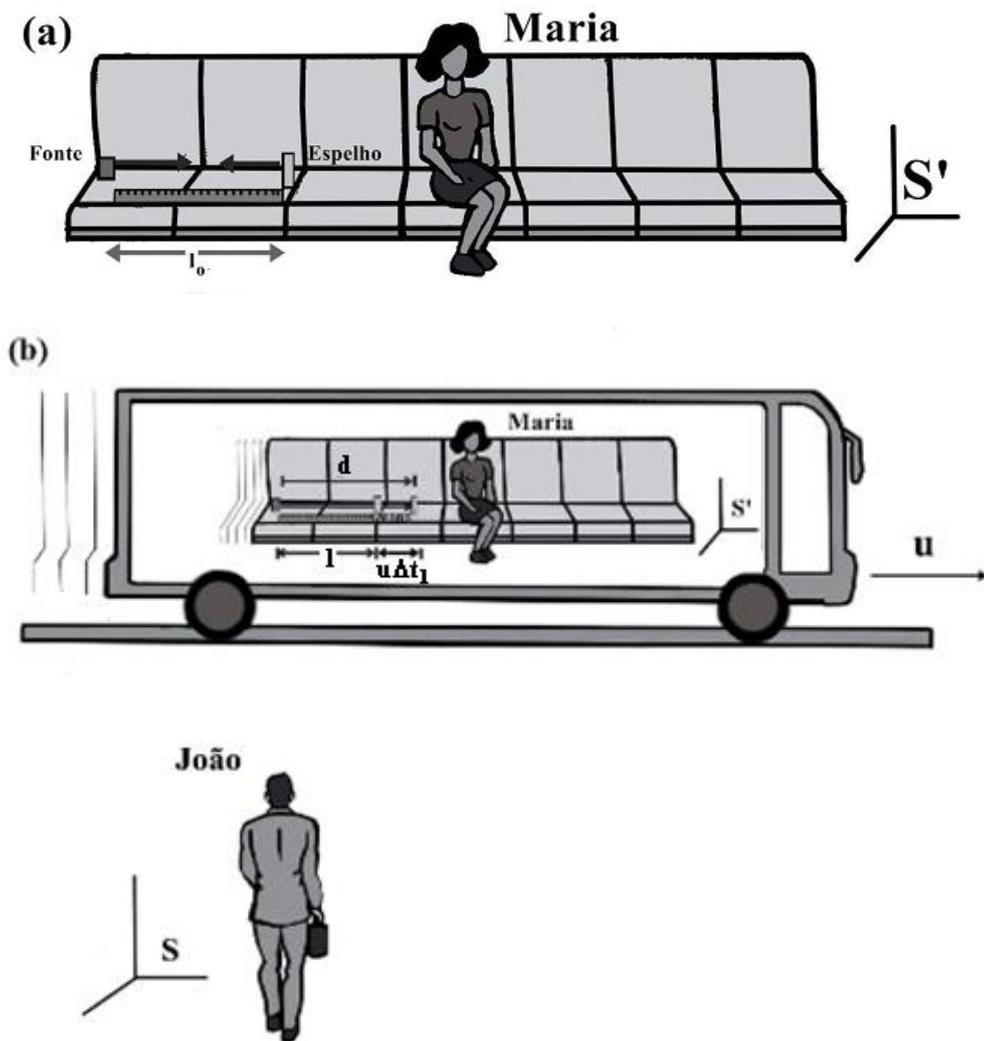
é sempre menor do que a medida de intervalo de tempo para os mesmos eventos em um referencial que se desloca com velocidade constante u em relação ao primeiro referencial. Esse é um dos resultados não intuitivos da TRR e expressa a chamada dilatação do tempo.

5.2.4 A RELATIVIDADE DOS COMPRIMENTOS

Não são apenas os intervalos de tempo entre dois eventos que podem ser diferentes para distintos sistemas de referência inerciais, ou seja, que exibem velocidades constantes entre si. As medidas de comprimentos, quer dizer, de distâncias entre dois pontos também podem ser diferentes, mas somente na direção do movimento.

Para comprovar isso, utiliza-se a experiência imaginária esboçada a seguir:

Figura 30: esquema das situações do experimento mental de contração do comprimento.



Fonte: os autores.

Desta vez, consideramos uma régua de comprimento l_0 com um espelho em uma de suas extremidades e uma fonte de luz na outra, em repouso em relação a um sistema de referência S' , de Maria, da figura 30-a. Dessa maneira, o intervalo de tempo próprio Δt_0 que um pulso de luz leva para ir da fonte até o espelho e voltar é

$$\Delta t_0 = \frac{2l_0}{c} \quad (17)$$

No sistema de referência S , de João, a mesma régua se movimenta junto com o ônibus com uma velocidade u durante a propagação do pulso de luz, como mostra a figura 30-b. O comprimento da régua para este referencial é l e o intervalo de tempo que a luz leva para ir da fonte até o espelho é Δt_1 . Neste intervalo de tempo, devido ao movimento do ônibus, a luz anda $u\Delta t_1$. Assim, a distância d entre a fonte e o espelho é diferente de l , de jeito que

$$d = l + u\Delta t_1 \quad (18)$$

Mas lembre-se que a luz também se desloca com velocidade c . Sendo assim,

$$d = c\Delta t_1 \quad (19)$$

Igualando as equações 18 e 19 e isolando Δt_1 , temos que

$$\Delta t_1 = \frac{l}{c-u} \quad (20)$$

Agora, para a situação em que o trem que leva Maria muda de sentido, temos que

$$d = l - u\Delta t_2 \quad (21)$$

Mas a luz também se desloca com velocidade c e será verdade que

$$d = c\Delta t_2 \quad (22)$$

Igualando as equações 21 e 22, temos que

$$\Delta t_2 = \frac{l}{c+u} \quad (23)$$

Consequentemente, o intervalo de tempo entre o envio do pulso ao espelho e sua volta deve ser $\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2$, que dá

$$\Delta t = \frac{2l}{c(1-\frac{u^2}{c^2})} \quad (24)$$

Combinando as equações 16, 17 e 24 e isolando l , chegamos à conclusão de que

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} = \frac{l_0}{\gamma} \quad (25)$$

Com base na equação 25, é possível afirmar que o comprimento medido em um sistema de referência no qual o corpo está em repouso, chamado comprimento próprio l_0 , é sempre maior que o comprimento medido em um sistema de referência, simbolizado por l , que se desloca com velocidade constante u em relação ao primeiro. Mais uma vez, a constante γ é o fator de Lorentz. Quando u é muito pequena e $\gamma \cong 1$, então os comprimentos medidos por observadores inerciais em repouso (l_0) e em movimento com velocidade u (l) são aproximadamente iguais, tal que $l \cong l_0$. Agora, quando u é grande e passa de $0,5 c$ (figura 29), então $\gamma > 1$ e os comprimentos medidos pelos observadores inerciais são diferentes, de modo que $l < l_0$.

5.2.5. A MUDANÇA DE CONCEPÇÃO ACERCA DE ESPAÇO E DE TEMPO A PARTIR DA TEORIA DA RELATIVIDADE RESTRITA (TRR)

Einstein foi ousado ao exigir que as descrições dos fenômenos eletrodinâmicos fossem levadas às últimas consequências (POLITO, 2016, p. 117). Como resultado disso, houve a necessidade de reinterpretar as noções de espaço e tempo. Essa tarefa ficou a cargo de Hermann Minkowski (1864 – 1909). Ele observou que espaço e tempo podiam ser interpretados como coordenadas em um espaço pseudoeuclidiano de quatro dimensões (POLITO, 2016, p. 117), ou seja, espaço (três dimensões) e tempo foram enxergados como grandezas interdependentes, como retratam comicamente as figuras 31 e 32:

Figura 31: espaço e tempo antes de Einstein e espaço-tempo depois de Einstein.



Fonte: Caruso e Freitas (2009).

Figura 32: espaço e tempo antes e espaço-tempo depois de Einstein.



Fonte: Caruso e Freitas (2009).

Em relação aos feitos de Lorentz, Poincaré e de diversos outros cientistas, Einstein se destacou pela coragem de fundar uma nova física que ao mesmo tempo dava solução aos problemas enfrentados no início do século XX e destituía o éter como estrutura da matéria ou da radiação eletromagnética. Portanto, a TRR de Einstein foi à forma mais simples, elegante e definitiva de superar a visão mecanicista de mundo (POLITO, 2016, p. 118).

Curiosidade sobre o assunto!

O éter ou o nada

Ainda se estuda a existência de uma entidade invisível que preenche todo o espaço.

A teoria cosmológica mais aceita, atualmente, é uma versão modificada da teoria do *big bang*, proposta em meados do século XX. No entanto, já se sabe a algum tempo que esse modelo, mesmo com os vários aperfeiçoamentos que lhe foram adicionados, tem um defeito grave: falta matéria no universo, de acordo com os cálculos. Para sermos mais exatos, a massa da matéria que conhecemos e que preenche o espaço cósmico, constitui as galáxias e todas as estrelas, é dez vezes menor do que a teoria exige. Ou o sistema cosmológico atualmente aceito precisa ser substituído por outro, ou é necessário encontrar essa matéria que está faltando. Nos últimos anos houve várias propostas a respeito dessa “matéria escura” desconhecida. Uma das mais recentes afirma que dois

terços da massa do universo é constituída pela quintessência. Essa não é uma palavra nova. Foi usada por muitos séculos pelos seguidores de Aristóteles para designar uma substância invisível, que preencheria todo o espaço celeste, e que era também denominada de éter.

Não se trata de uma coincidência: a escolha do nome é proposital. Essa e outras propostas recentes da física estão reabilitando a ideia de um éter – uma ideia que parecia ter sido rejeitada definitivamente, no início do século XX. Esse é um tema que toca os fundamentos da física e que suscita a pergunta: Quem está errado? Os físicos atuais, ou os que tinham abandonado o éter? Um dos dois grupos cometeu um enorme erro. Qual deles?

Fragmento de texto retirado do artigo “O éter ou nada: ainda se estuda a existência de uma entidade invisível que preencha todo o espaço” de Roberto de Andrade Martins disponível em: <<http://www.ghc.usp.br/server/pdf/Sci-Am-eter-2.PDF>>. Acesso em 19 de maio de 2019.

3. Calcule a dilatação temporal na vida média do múon com os dados do problema contidos no segundo parágrafo dessa seção. Sua resposta condiz com a existência dos múons próximos à superfície terrestre?

A figura 33 explica bem o que acontece aos múons na rápida viagem que fazem desde seu “nascimento” até o seu decaimento em um elétron (ou pósitron), um neutrino e um antineutrino.

Figura 33: o problema do múon na superfície terrestre.



Fonte: Caruso e Freitas (2009).

A partir daqui, você saberia responder?

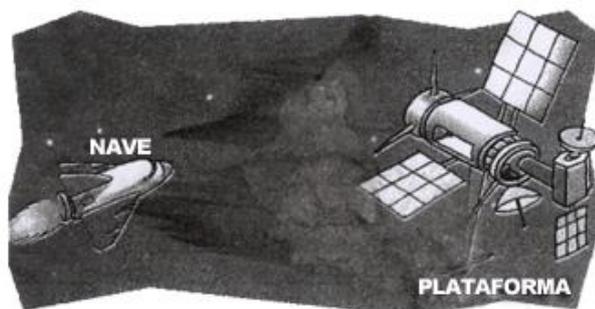
1. (BRASIL ESCOLA) Sobre os postulados da relatividade, marque o que for falso:

- a) As leis da Física são as mesmas em todos os referenciais que mantêm velocidade constante ou que estão parados.
- b) A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor para qualquer referencial inercial e vale 3×10^8 m/s.
- c) A velocidade da luz tem seu valor máximo no vácuo e tem o mesmo valor para qualquer referencial inercial, que é 300.000 m/s.
- d) Os postulados da teoria da relatividade fundamentam a teoria da relatividade de Einstein.

2. (BRASIL ESCOLA) A teoria da relatividade restrita prevê que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, independentemente do estado de movimento relativo entre eles. Com base nessa afirmação, imagine duas naves que viajam no espaço com velocidades altíssimas em uma mesma direção, mas com sentidos opostos. Se cada nave possui velocidade V e a velocidade da luz no vácuo é c , a luz percebida pelo piloto teria velocidade:

- a) $V + c$
- b) $c - V$
- c) $V - c$
- d) c
- e) $2c$

3. (UFMG) Observe a figura:



Paulo Sérgio, viajando em sua nave, aproxima-se de uma plataforma espacial, com velocidade de $0,7c$, em que c é a velocidade da luz. Para se comunicar com Paulo Sérgio, Priscila, que está na plataforma, envia um pulso luminoso em direção à nave. Com base nessas informações, é correto afirmar que a velocidade do pulso medida por Paulo Sérgio é de:

- a) $0,7c$.
- b) $1,0c$.
- c) $0,3c$.
- d) $1,7c$.

4. (UFRN-RN) A teoria da Relatividade Especial prediz que existem situações nas quais dois eventos que acontecem em instantes diferentes, para um observador em um dado referencial inercial, podem acontecer no mesmo instante, para outro observador que está em outro referencial inercial. Ou seja, a noção de simultaneidade é relativa e não absoluta.

A relatividade da simultaneidade é consequência do fato de que:

- a) a teoria da Relatividade Especial só é válida para velocidades pequenas em comparação com a velocidade da luz.
- b) a velocidade de propagação da luz no vácuo depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.
- c) a teoria da Relatividade Especial não é válida para sistemas de referência inerciais.
- d) a velocidade de propagação da luz no vácuo não depende do sistema de referência inercial em relação ao qual ela é medida.

5. (UFRN-RN) Nos dias atuais, há um sistema de navegação de alta precisão que depende de satélites artificiais em órbita em torno da Terra. Para que não haja erros significativos nas posições fornecidas por esses satélites, é necessário corrigir relativisticamente o intervalo de tempo medido pelo relógio a bordo de cada um desses satélites. A Teoria da Relatividade Especial prevê que, se não for feito esse tipo de correção, um relógio a bordo não marcará o mesmo intervalo de tempo que outro relógio em *repouso* na superfície da Terra, mesmo sabendo-se que ambos os relógios estão sempre em perfeitas condições de funcionamento e foram sincronizados antes do satélite se lançado.

Se não for feita a correção relativística para o tempo medido pelo relógio de bordo:

- a) ele se adiantará em relação ao relógio em Terra enquanto ele for acelerado em relação à Terra.
- b) ele ficará cada vez mais adiantado em relação ao relógio em Terra.
- c) ele atrasará em relação ao relógio em Terra durante metade de sua órbita e se adiantará durante a metade da outra órbita.
- d) ele ficará cada vez mais atrasado em relação ao relógio em Terra.

6. (UEL-PR) A teoria da Relatividade Restrita, proposta por Albert Einstein (1879 – 1955) em 1905, é revolucionária porque mudou as ideias sobre o espaço e o tempo, mas em perfeito acordo com os resultados experimentais. Ela é aplicada, entretanto, somente a referenciais inerciais. Em 1915, Einstein propôs a Teoria Geral da Relatividade, válida não só para referenciais inerciais, mas também para referenciais não-inerciais.

Sobre os referenciais inerciais, considere as seguintes afirmativas:

- I. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade constante.
- II. São referenciais que se movem, uns em relação aos outros, com velocidade variável.
- III. Observadores em referenciais inerciais diferentes medem a mesma aceleração para o movimento de uma partícula.

Assinale a alternativa correta:

- a) Apenas a afirmativa I é verdadeira.
- b) Apenas a afirmativas II é verdadeira.
- c) As afirmativas I e II são verdadeiras.
- d) As afirmativas II e III são verdadeiras.
- e) As afirmativas I e III são verdadeiras.

7. (UNIMAT-MT) Com o advento da Teoria da Relatividade de Einstein, alguns conceitos básicos da física newtoniana, entre eles, o espaço e o tempo, tiveram de ser revistos. Qual a diferença substancial desses conceitos para as duas teorias?

Alternativas	Física newtoniana		Teoria da relatividade	
	Espaço	Tempo	Espaço	Tempo
a)	Absoluto	Absoluto	Dilata	Contraí
b)	Dilata	Absoluto	Contraí	Dilata
c)	Absoluto	Contraí	Dilata	Absoluto

d)	Absoluto	Absoluto	Contraí	Dilata
e)	Contraí	Dilata	Absoluto	Absoluto

8. ²³ O tempo médio de vida de múons estacionários é $2,2\mu s$. O tempo médio de vida dos múons de alta velocidade produzidos pelos raios cósmicos é $16\mu s$ no referencial da Terra. Determine a velocidade em relação à Terra dos múons produzidos pelos raios cósmicos.

9. Uma espaçonave cujo comprimento de repouso é 130 m passa por uma base espacial a uma velocidade de $0,74c$. a) Qual é o comprimento da nave no referencial da base? b) Qual é o intervalo de tempo registrado pelos tripulantes da base entre a passagem da proa e a passagem da popa da espaçonave?

10. (UFG-GO) Segundo a Teoria da Relatividade Restrita de Albert Einstein, o tempo transcorre de maneira diferente para observadores com velocidades diferentes. Isso significa que, para um observador em um referencial fixo, transcorre um intervalo de tempo entre dois eventos, enquanto para um observador em um referencial que viaja com uma velocidade constante v , em relação ao referencial anterior, o intervalo de tempo entre os mesmos eventos será

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Os dois intervalos de tempo estão relacionados porque representa uma dilatação temporal. Nesta expressão, c é a velocidade da luz no vácuo. Com esta teoria, surge o paradoxo dos gêmeos: para o piloto de uma espaçonave que realizou uma viagem espacial, com uma velocidade constante de $0,8c$, transcorreram 18 anos até o seu retorno à Terra. Para o gêmeo que ficou na Terra, calcule quanto tempo durou a viagem do seu irmão, o piloto.

²³Retirado das notas de aula de Jason Alfredo Carlson Gallas. Disponível em <<https://inaesp.org/ENSINO/Cap42.pdf>>. Acesso em 21 de maio de 2019.

7. A INCOMPATIBILIDADE DOS CONCEITOS DE ESPAÇO E DE TEMPO NAS TEORIAS NEWTONIANA E EINSTEINIANA SEGUNDO THOMAS S. KUHN

Diante da revolução causada pela criação da relatividade restrita, uma questão se coloca e suscita acalorados debates. Um deles, de natureza filosófica é: a noção de espaço e tempo newtonianos seria um caso particular das noções introduzidas com a TRR?

Como é possível ver nas deduções abaixo

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad \Delta t \cong \Delta t_0 \quad (24)$$

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}} \quad \rightarrow \quad \rightarrow \quad l \cong l_0 \quad (25)$$

os resultados da dilatação do tempo, visto na equação 16, e da contração do comprimento, visto na equação 25, da mecânica relativística são quase inexistentes para quando a velocidade relativa u entre os referenciais S e S' é baixa, isto significa, que os intervalos de tempo Δt e Δt_0 e os comprimentos l e l_0 são aproximadamente iguais, algo que é visto em nosso cotidiano.

Apesar de sermos induzidos a acreditar que a mecânica newtoniana seja um caso especial da relatividade restrita, conforme Thomas S. Kuhn (1922 – 1996), figura 34, a resposta ao questionamento colocado no início desta seção é negativa, pois os padrões e definições científicos são sempre diferentes para cada teoria (BASTOS FILHO, 2000).

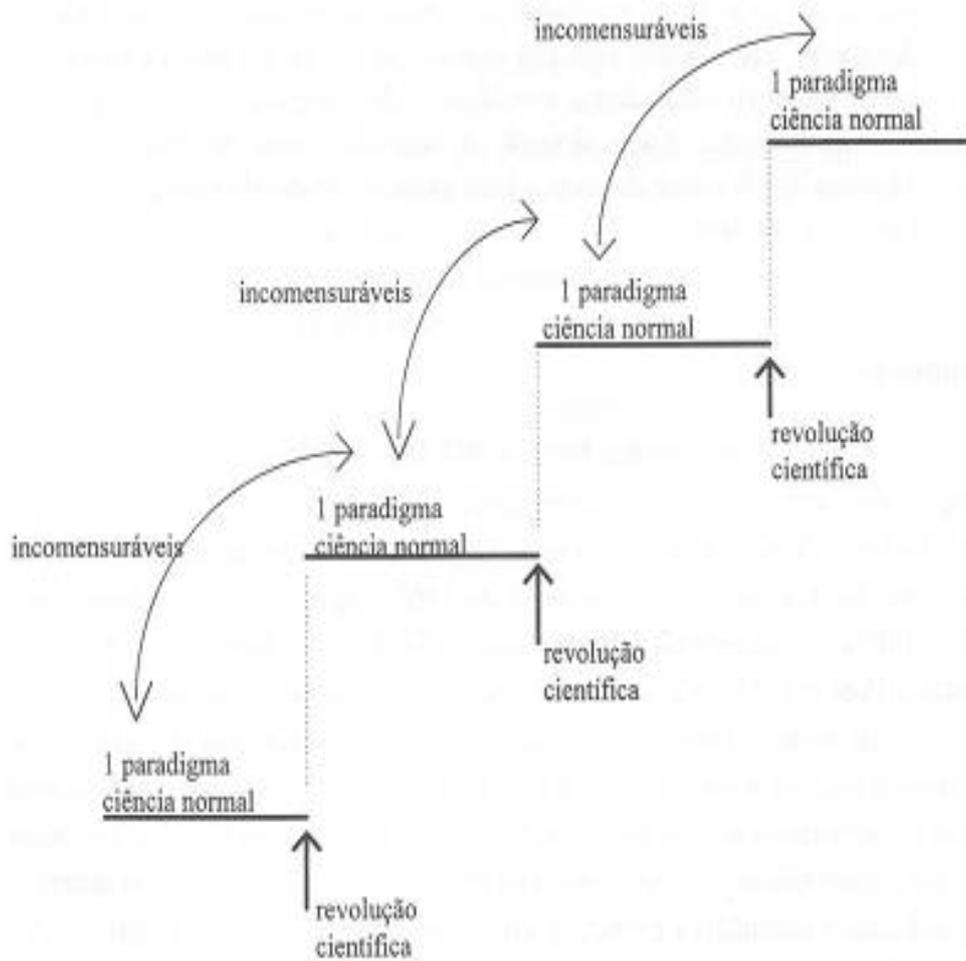
Figura 34: Thomas S. Kuhn (1922 – 1996).



Fonte: Oliveira (2011, p. 35).

Para afirmar isso, Kuhn faz uso de sua compreensão de progresso científico, que é composto por um ciclo com período de ciência normal com apego a um paradigma, período de ciência extraordinária, com crise nesse paradigma, e revolução científica que gera ciência normal com um novo paradigma incompatível com o anterior, conforme mostra o esquema da figura 35.

Figura 35: esquema do modelo de progresso científico de Kuhn.



Fonte: Ostermann (1996).

Para Kuhn, o termo **paradigma** traduz um conjunto de compromissos como crenças, valores, técnicas partilhadas etc. que dão suporte à **ciência normal**. Esta, por sua vez, compreende a pesquisa baseada em realizações científicas reconhecidas como proporcionadoras de fundamentos para sua prática posterior (KUHN, 2011, p. 29) e tem como objetivo articular fenômenos e teorias já fornecidos pelo paradigma (OSTERMANN, 1996) por meio da resolução de problemas denominados **quebra-cabeças**.

Contudo, o aparecimento de **anomalias e crises no paradigma** durante a resolução de quebra-cabeças, ou seja, o advento de desorientações entre paradigma e ciência normal, abre brecha para uma crise na área de pesquisa dando origem à chamada **ciência extraordinária**. Nessa situação, há a possibilidade de uma **revolução científica** com o aparecimento de **um novo paradigma** que, aliás, é incompatível ou **incomensurável** com o anterior.

Analisando a passagem da mecânica newtoniana para a mecânica relativística com base nas ideias de Kuhn, percebemos padrões e definições científicos diferentes entre as duas teorias que nos revelam certa incompatibilidade entre seus conceitos. Por exemplo, para Newton, o espaço e o tempo absolutos, distinguíveis dos relativos, são pontos centrais de sua visão de mundo:

O espaço absoluto, por sua própria natureza, sem relação com algo exterior, é sempre semelhante e imóvel. O espaço relativo é a dimensão móvel ou a medida do espaço absoluto [...] (NEWTON, 1978, p. 40 *apud* FERREIRA et al. 2009).

O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si mesmo e por sua própria natureza, flui uniformemente sem relação com nada externo, e também é chamado duração. O tempo relativo, aparente e comum, é uma medida sensível e externa da duração por meio do movimento (NEWTON, 1978, p. 40 *apud* FERREIRA et al. 2009).

Embora essa interpretação tenha permanecido durante os séculos XVIII e XIX, desde as contribuições de Einstein no século XX, o espaço e o tempo são interdependentes e formam entre si um espaço pseudoeuclidiano de quatro dimensões

(POLITO, 2016, p. 117). Por causa disso, tanto o espaço como o tempo se alteram ao passar de um sistema de referência inercial para outro sendo a transformação de Lorentz a responsável por tais mudanças (FERREIRA et al., 2009).

Portanto, devemos superar a concepção de que a dinâmica newtoniana pode ser derivada da dinâmica relativista, pois os conceitos físicos dos conceitos einsteinianos não são de modo algum idênticos àqueles conceitos newtonianos que levam o mesmo nome.

Outra visão sobre o assunto!

A Filosofia da Ciência em Thomas Kuhn

Thomas Kuhn foi um daqueles pesquisadores da Filosofia da Ciência que defenderam o contexto de descoberta, o qual privilegia os aspectos psicológicos, sociológicos e históricos como relevantes para a fundamentação e a evolução da ciência.

Para Kuhn, a ciência é um tipo de atividade altamente determinada que consiste em resolver problemas (como um quebra-cabeça) dentro de uma unidade metodológica chamada paradigma. Este, apesar de sua suficiente abertura, delimita os problemas a serem resolvidos em determinado campo científico. É ele que estabelece o padrão de racionalidade aceito em uma comunidade científica sendo, portanto, o princípio fundante de uma ciência para a qual são treinados os cientistas.

O paradigma caracteriza a Ciência Normal. Esta se estabelece após um tipo de atividade desorganizada que tenta fundamentar ou explicar os fenômenos ainda em um estágio que Kuhn chama de mítico ou irracional: é a pré-ciência. A Ciência Normal também ocorre quando da ruptura e substituição de paradigmas (o que não significa voltar ao estágio da pré-ciência). É que dentro de um modelo ocorrem anomalias ou contraexemplos que podem colocar em dúvida a validade de tal paradigma. Se este realmente se torna insuficiente para submeter às anomalias à teoria – já que vista de outro ângulo elas podem se tornar um problema – ocorre o que Kuhn denomina de Ciência Extraordinária ou Revolucionária, que nada mais é do que a adoção de outro paradigma, isto é, de visão de mundo.

Isto ocorre porque dentro de um paradigma há expectativas prévias que os cientistas devem corroborar. Por isso, os cientistas não buscam descobrir (como entendiam os pensadores do contexto de justificação) nada, mas simplesmente adequar

teorias a fatos. Quando ocorre algo diferente deste processo, isso se deve a fatores subjetivos, como a incapacidade técnica do profissional, ou à inviabilidade técnica dos instrumentos, ou ainda à necessidade de real substituição do paradigma vigente. Para isso, os cientistas usam hipóteses ad hoc²⁴ para tentar manter o paradigma (contrário ao que pensava Popper). Aqui, Kuhn evidencia o caráter de descontinuidade do conhecimento científico que progride, então, por rupturas e não pelo acúmulo do saber, como pensava a ciência tradicional.

CABRAL, João Francisco Pereira. "A Filosofia da Ciência em Thomas Kuhn"; **Brasil Escola**. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/filosofia/a-filosofia-ciencia-thomas-kuhn.htm>>. Acesso em 23 de maio de 2019.

REFERÊNCIAS

BARROS, A.; MONTE, E. M.; ARAÚJO, I. G.; OLIVEIRA, J. C. T.; VIEIRA, S. Sobre a contração de Lorentz. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 27, n. 4, p. 621 - 623, 2005.

BASTOS FILHO, J. B. Sobre os paradigmas de Kuhn, o problema da incomensurabilidade e o confronto com Popper. *Acta Scientiarum*, 22 (5):1297-1309, 2000.

BELÉNDEZ, A. La unificación de luz, electricidad y magnetismo: la “síntesis electromagnética” de Maxwell. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 30, n. 2, 2601, 2008.

CARUSO, F.; FREITAS, N. Física moderna no ensino médio: o espaço-tempo de Einstein em tirinhas. *Cad. Bras. Ens. Fís.*, v. 26, n.2, p. 355 - 366, ago. 2009.

FAUTH, A. C.; PENNEREIRO, J. C.; KEMP, E.; GRIZOLLI, W. C.; CONSALTER, D. M.; GONZALEZ, L. F. G. Demonstração experimental da dilatação do tempo e da

²⁴ Neste caso, ad hoc significa hipótese(s) estranha(s) a uma teoria para salvá-la de ser falseada.

contração do espaço dos múons da radiação cósmica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 585-591, 2007.

FAUTH, A. C.; GROVER, A. C.; CONSALTER, D. M. Medida da vida média do múon. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 32, n. 4, 4502, 2010.

FERREIRA, R. A.; HELAYEL-NETO, J. A.; SIQUEIRA-BATISTA, R.; JESUS, V. L. B.; SIQUEIRA-BATISTA, R. O espaço e o tempo, entre a ciência e a filosofia: notas para o ensino de física. In: VII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências, Florianópolis, 11, 2009. ISSN 21766940.

GALILEI, G. Carta de Galileu Galilei a Fortunio Liceti em Pádua. Tradução de Pablo Rubén Mariconda. **Scientiae studia**, v. 1, n. 1, p. 75-80, 2003.

GRIFFITHS, D. J. **Eletrodinâmica**. 3ª ed. São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

GERMANO, M. G.; LIMA, I. P. C.; SILVA, A. P. B. Pilha voltaica: entre rãs, acasos e necessidades. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n. 1, 2012.

JACOT, B. L.; COLLIER, D.M.B. **Marconi, senhor do espaço**. Rio de Janeiro: Vecchi, 1940.

KUHN, T. S. **A estrutura das revoluções científicas**. 11ª edição. São Paulo: Perspectiva, 2011.

MARTINS, R. A. Alessandro Volta e a invenção da pilha: dificuldades no estabelecimento da identidade entre o galvanismo e a eletricidade. **Acta Scientiarum**, 21(4): 823 – 35, 1999.

MARTINS, R. A. O éter e a óptica dos corpos em movimento: a teoria de Fresnel e as tentativas de detecção do movimento da Terra (1818-1880). **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 29, n.1: p. 52-80, abril. 2012.

MARTINS, A. F. P.; ZANETIC, J. Tempo: esse velho estranho conhecido. **Revista Ciência e cultura**, v. 54, n. 2. São Paulo, out/nov/dez 2002.

NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica** – volume 4. 1ª edição. São Paulo: Blucher, 1998.

OLIVEIRA, S. G. **Kuhn, Feyerabend e a revolução copernicana: irracionalidades” na atividade científica?** 127 f. Dissertação. (Mestrado em Educação em Ciências e Matemática). Universidade Federal de Goiás, setembro de 2011.

OSTERMANN, F. A epistemologia de Kuhn. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.13, n3: p.184-196, dez.1996

OSTERMANN, F.; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: contração de Lorentz-Fitzgerald e aparência visual de objetos relativísticos em livros didáticos de física. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, v. 19, n.2: p. 176-190, ago. 2002

PIETROCOLA, M. Fresnel e o arrastamento parcial do éter: a influência do movimento da terra sobre a propagação da luz. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, v.10, n.2: p.157-172, 1993.

PIETROCOLA, M. O espaço plena e a concepção do éter. **Física na Escola**, v. 3, n. 2, 2002.

POLITO, A. M. M. **A construção da estrutura conceitual da física clássica**. São Paulo: Livraria da Física, 2016.

RENN, J. A física clássica de cabeça pra baixo: como Einstein descobriu a teoria da relatividade especial. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 27 - 36, 2004.

SEIXAS, W. O princípio da relatividade – De Galileu a Einstein. **Revista Brasileira de História da Matemática**, v. 5, n. 10, 2006.

SILVA, B. V. C., Young fez, realmente, o experimento da fenda dupla?, **Latin-American Journal of Physics Education**, v3, n. 2, p. 280-28, 2009.

SOUZA, M. S.; OLIVEIRA, M. R. S.; LOURENÇO, A. B. **Raios cósmicos invadindo o ensino médio**. In: **Abordando os raios cósmicos no ensino médio**: uma proposta de sequência de ensino. 2017. 92 p. In: Dissertação (Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física) – Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, Dourados, 2017.

STACHEL, J. 1905 e tudo o mais. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 27, n. 1, p. 5 - 9, 2004.

VIEIRA, S.; BARROS, A.; ARAÚJO, I.; OLIVEIRA, J. C. Uma comparação entre deduções da equação $E=mc^2$. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 26, n. 2, p. 93 - 98, 2004.

YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Física IV: ótica e física moderna**. Tradução de Cláudia Martins. Revisão técnica de Adir Moysés Luiz. 12ª edição. São Paulo: Adisson Wesley, 2009.

ANEXO – GABARITOS

A seguir, são indicados os gabaritos das questões utilizadas no decorrer do material didático. Algumas foram criadas pelos autores e outras foram aproveitadas de processos seletivos de universidades e/ou da disponibilização em *sites* de auxílio a estudos dos referidos conteúdos que aqui exploramos:

Capítulo 1

1. $\Delta S \cong 659,0 m$
2. $h \cong 14\ 341 m$
3. Subjetiva.

Capítulo 2

1. E
2. B
3. B
4. A
5. A
6. C

7. A
8. C
9. C
10. C
11. D

Capítulo 3

1. 47
2. A
3. B
4. A
5. De acordo com a mecânica newtoniana, a velocidade da luz observada pelo observador deveria ser maior que c . No entanto, isto é um erro, conforme percebemos por um dos postulados da relatividade restrita.
6. Subjetiva.
7. Subjetiva.

Capítulo 4

1. Subjetiva.
2. Subjetiva.
3. Conforme a relatividade restrita, é impossível que um móvel tenha exatamente a velocidade da luz. Portanto, a questão em si é um absurdo.

Capítulo 6

Primeira seção:

1. Não. Retomar cálculos das questões 1 e 2 do capítulo 1.
2. É possível usar argumentos relacionados à dilatação do tempo ou de contração do comprimento, assim como os demonstrados na figura 31.
3. A dilatação do tempo para o múon em relação a um observador na terra será $\Delta t = 109,9 \cdot 10^{-3} s$. Sim, isso condiz com múons próximos à superfície terrestre.

Segunda seção:

1. C
2. D
3. B
4. D
5. D
6. A
7. D
8. 0,98 c
9. Gabarito: a) 87,4 m; b) $3,94 \cdot 10^{-7} s$
10. 30 anos