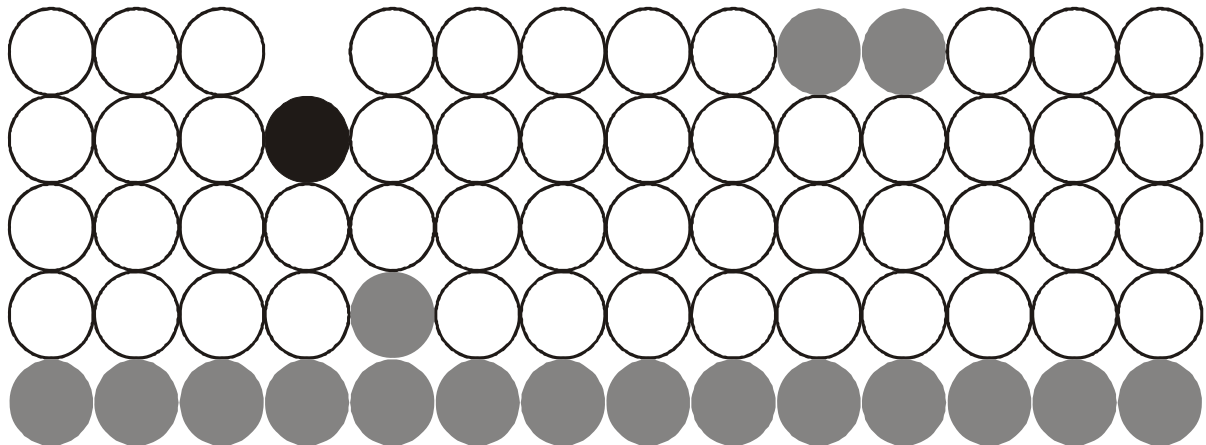


# TEXTOS DE APOIO AO PROFESSOR DE FÍSICA

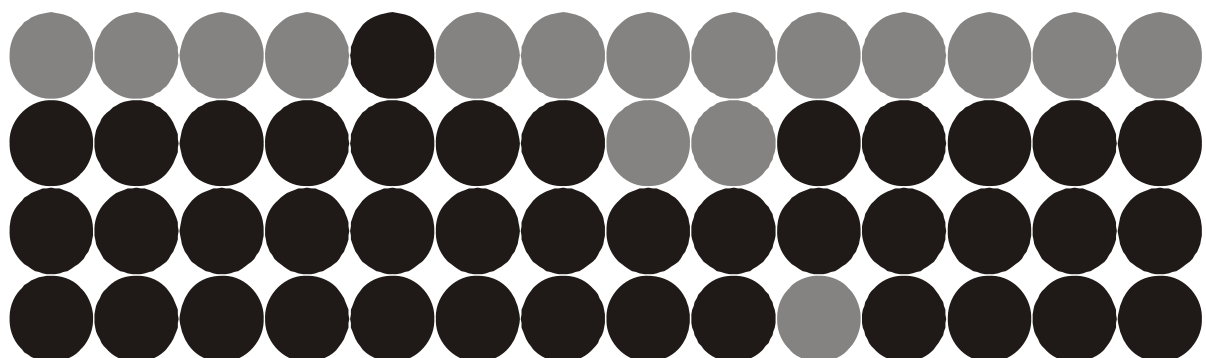
v.16 n. 5 2005

ISSN 1807-2763



Relatividade:  
a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein

Jeferson Fernando de Souza Wolff  
Paulo Machado Mors



Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

**Textos de Apoio ao Professor de Física, v. 16 n. 5, 2005**

Instituto de Física – UFRGS

Programa de Pós-graduação em Ensino de Física

Mestrado Profissional em Ensino de Física

Editores: Marco Antonio Moreira

Eliane Angela Veit

CIP-Brasil. Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
(Letícia Strehl; CRB 10/1279)

W853r Wolff, Jeferson Fernando de Souza  
Relatividade : a passagem do enfoque galileano para a visão  
de Einstein / Jeferson Fernando de Souza Wolff, Paulo Machado  
Mors. – 68 p.  
*In* Textos de apoio ao professor de física / Programa de Pós-  
Graduação em Ensino de Física; editores Marco Antonio Moreira,  
Eliane Angela Veit - Vol. 16, n. 5 (2005).

ISSN 1807-2763

1. Relatividade especial 2. Ensino médio I. Mors, Paulo  
Machado II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto  
de Física. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física  
III. Título

PACS 01.40.Ej

Impressão: Waldomiro da Silva Olivo

Intercalação: João Batista C. Da Silva

## Apresentação

Não se pode mais conceber o ensino de Física, no nível médio, sem que se aborde a Física do Século XX. Trabalha-se a chamada Física Clássica, mas seus temas não são os únicos importantes. Com a difusão da informação através de publicações de divulgação, internet, televisão, etc., cada vez mais nossos alunos trazem, para a sala de aula, o interesse pela Física dos últimos cem anos. Sem uma compreensão do que é tratado em Física Moderna, a quase totalidade do mundo à nossa volta se torna mágica, fora de nossa compreensão e controle.

A Teoria da Relatividade Especial constitui-se em uma ponte muito conveniente para se fazer a ligação entre a Física Clássica e a Física Moderna. Seu estudo propicia uma visão dos sucessos e deficiências do pensamento científico dominante no final do século 19, bem como de inconsistências que se tornaram grandes desafios na passagem para o século 20. Também, compreender melhor a natureza dessa teoria traz fundamento para a admiração que se cultiva pelo seu criador, cujo trabalho no chamado “ano miraculoso” de 1905 hoje motiva a comemoração do Ano Mundial da Física.

Apresentamos, aqui, um material que pretendemos venha facilitar o trabalho do professor, no tratamento da Relatividade. Dividido em duas partes – o texto dos alunos e um manual para o professor – este material foi desenvolvido como projeto de Mestrado em Ensino de Física na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, realizado por um dos autores (JFSW) e sob a orientação do outro (PMM).

Esperamos estar, com este trabalho, contribuindo para tornar mais fácil a introdução da Física Moderna como tema curricular no nível médio do ensino brasileiro.

Porto Alegre, novembro de 2005.

Jeferson Fernando de Souza Wolff  
jefersonwolff@terra.com.br

Paulo Machado Mors  
mors@if.ufrgs.br



## **Relatividade**

### **A passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein**



## Sumário

1.	Introdução .....	<b>9</b>
2.	Histórico .....	<b>11</b>
2.1.	A Relatividade galileana .....	11
2.1.1.	Transformações galileanas .....	14
2.2.	Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos .....	16
2.3.	O Eletromagnetismo .....	17
2.3.1.	A Eletricidade.....	17
2.3.2.	O Magnetismo .....	19
2.3.3.	Eletromagnetismo – a unificação .....	19
2.3.4.	O Eletromagnetismo e Maxwell.....	20
2.3.5.	Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica .....	21
2.4.	Einstein e a origem da Relatividade Especial .....	22
3.	Relatividade da simultaneidade.....	<b>25</b>
4.	Dilatação temporal.....	<b>27</b>
5.	Contração do espaço.....	<b>33</b>
5.1.	Contração de Lorentz - FitzGerald .....	34
6.	Adição de velocidades na Relatividade Especial .....	<b>37</b>
7.	Energia relativística .....	<b>41</b>
8.	Paradoxo dos gêmeos.....	<b>45</b>
9.	Teoria da Relatividade Geral.....	<b>47</b>
	Referências .....	<b>49</b>
	Texto do Professor.....	<b>51</b>





## 1. INTRODUÇÃO

A história do pensamento humano mostra a constante busca de teorias que possam descrever, da forma a mais coerente possível, o nosso cotidiano. Desde a Antiguidade, a humanidade busca respostas para muitas questões, até mesmo para a nossa própria existência.

Durante mais de dois séculos, as teorias desenvolvidas por Isaac Newton não foram contestadas, pois descreviam de maneira satisfatória os fenômenos da Natureza, chegando-se a ponto de, no final do século XIX, afirmar-se que não havia nada mais de novo a ser desenvolvido, “descoberto”.

Concepções simplistas apresentam estudiosos como Galileu, Newton e Einstein, como gênios que desenvolveram todas as suas teorias de forma independente. Realmente, estes cientistas elaboraram teorias que contribuíram muito para a evolução da humanidade. No entanto muitos livros, em apresentações simplificadas, deixam a idéia de que suas “descobertas” ocorreram a partir apenas de observações, ou por pura casualidade, sem nenhuma conexão com teorias já previamente existentes.

Outra idéia errada que nos é transmitida é a de que a aceitação de cada nova teoria pela comunidade científica ocorreu, em geral, sem grandes polêmicas.

Buscamos, através do presente texto, comentar a evolução das idéias científicas, enfatizando os caminhos que foram percorridos até a elaboração da Teoria da Relatividade.



## 2. HISTÓRICO

A seguir, faremos uma breve descrição dos principais fatos que levaram Albert Einstein à elaboração da Teoria da Relatividade Especial (ou Relatividade Restrita). Note que, ao descrevermos esses fatos, existe uma seqüência: a cada desenvolvimento de um novo conhecimento foi necessário que se conhecesse o que já havia sido desenvolvido até a época.

Temos que considerar que pessoas como Galileu, Newton, Maxwell e Einstein foram grandes gênios que contribuíram muito para o desenvolvimento do conhecimento humano. Porém, suas teorias não foram formuladas de forma totalmente independente. Nenhuma descoberta ocorreu de uma hora para outra. Muito pelo contrário. O conhecimento dos fenômenos da Natureza passou e ainda passa por uma constante evolução, onde em cada nova teoria que surge temos contribuições das teorias anteriores.

Isto é o que tentaremos descrever: que a gênese da Teoria da Relatividade Especial começou muito tempo antes de Albert Einstein.

### 2.1. A Relatividade galileana

O homem sempre procurou entender melhor o mundo que o cerca, a Natureza. A busca para entender o movimento dos corpos já aparece antes de Cristo. A evolução da descrição do movimento dos corpos em relação a outros, em movimentos uniformes ou acelerados, teve seu início com o filósofo grego Zenão, de Eléia (500 – 451 a.C.), estendendo-se até os trabalhos de Albert Einstein, em 1905, com a Teoria da Relatividade Especial.

Zenão considerava que se dois bastões (A e B) se deslocassem com velocidades iguais em intensidade, porém de sentidos opostos em relação a um terceiro bastão C, mantido fixo, um observador em A (ou B) mediria a velocidade do bastão em B (ou A) como duas vezes maior do que a medida por C. Zenão concluiu que este movimento era impossível, passando a chamá-lo de paradoxo dos bastões em movimento.

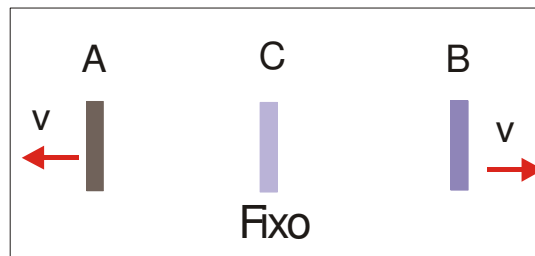


Figura 1

Um observador em A irá perceber que o bastão C se afasta com uma rapidez  $v$  e o bastão B com uma rapidez  $2v$ .

Outro filósofo a procurar descrever o movimento dos corpos foi o grego Aristóteles, nascido provavelmente em 384 a.C. Suas idéias permaneceram aceitas por mais de vinte séculos.

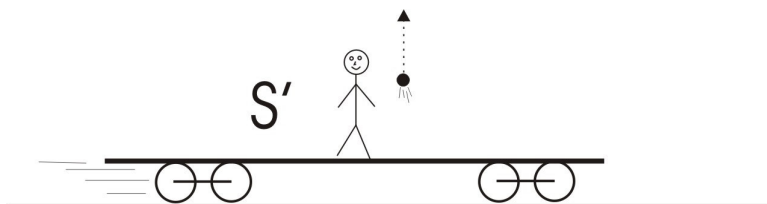
Segundo Aristóteles, a matéria era composta basicamente de quatro elementos terrestres: fogo, ar, água e terra. Estes elementos tinham posições determinadas no Universo, chamadas lugares naturais. O lugar natural do fogo era acima do lugar natural do ar que estava acima do lugar natural da água, por sua vez acima do lugar natural da terra. Deste modo, explicava por que uma pedra e a chuva caem: seus lugares naturais eram os da terra e água. Analogamente, a fumaça e o vapor sobem em busca de seus lugares naturais acima da terra. Aristóteles também elaborou várias outras teorias sobre ciências naturais, que foram aceitas até a Renascença. Dentre elas, podemos destacar o modelo geocêntrico (Terra como centro do Universo).

Somente nos séculos XVI e XVII é que o pensamento aristotélico começou a ser contestado mais veementemente, principalmente no que diz respeito à idéia do geocentrismo. A descrição dos movimentos passou a ser analisada de maneira mais matemática, e não apenas filosófica como era a descrição aristotélica.

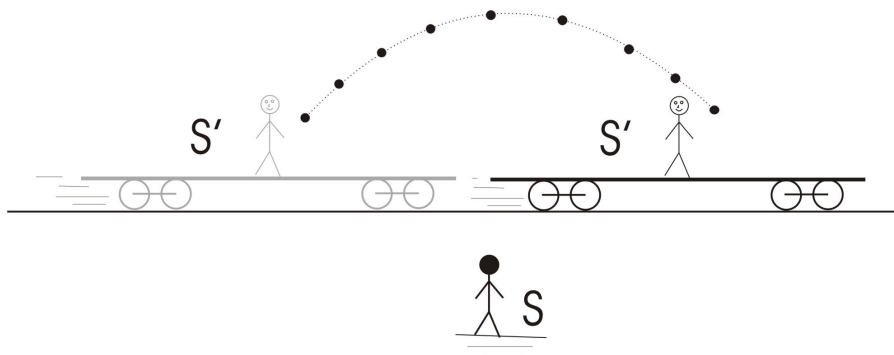
Assim, a dificuldade em entender o movimento dos corpos permaneceu até os séculos XVI e XVII com Giordano Bruno (1548 – 1600) e Galileu Galilei (1564 - 1642) que deram respostas ao paradoxo dos corpos em movimentos relativos (Zenão), utilizando relações matemáticas e não apenas respostas filosóficas como as dadas por Aristóteles.

Galileu Galilei foi o primeiro grande gênio da Ciência moderna e o primeiro homem que observou o céu com um telescópio, aderindo entusiasticamente ao sistema heliocêntrico proposto por Copérnico, o que, aliás, lhe custou muitos contratempos. Além da discussão do movimento planetário, Galileu contribuiu muito para o desenvolvimento da Mecânica, estabelecendo as leis da queda livre de um corpo e introduzindo o método experimental em Física.

Galileu utilizou o princípio da relatividade dos movimentos, ou princípio da independência dos movimentos, para demonstrar a trajetória parabólica dos projéteis. Consideremos o seguinte exemplo: um projétil lançado a partir do solo com um certo ângulo de lançamento pode ter seu movimento decomposto em dois movimentos independentes: um horizontal e outro vertical. No lançamento de um projétil verticalmente para cima, sobre uma plataforma em movimento retilíneo e uniforme, um observador que esteja sobre a plataforma em movimento verá a trajetória do projétil como retilínea de ida e volta. Quanto a um observador que esteja parado no solo, onde a plataforma está em movimento, visualizará a trajetória do projétil como parabólica. Assim, cada observador terá uma visão diferente do movimento. Com isso, Galileu conseguiu resolver o paradoxo de Zenão, mostrando que a trajetória e velocidades são dependentes do referencial de onde se observa o movimento.

**Figura 2**

Um observador que se encontra em movimento sobre uma plataforma verá uma trajetória vertical para o projétil.

**Figura 3**

Um observador que se encontra em um referencial no solo verá uma trajetória parabólica para o projétil.

Podemos citar o filósofo John Locke que escreveu há duzentos anos, em seu grande tratado “Sobre o entendimento humano”, da importância do referencial: “Se encontrarmos as pedras do xadrez na mesma posição em que as deixamos, diremos que elas não foram movidas, ou permanecem imóveis, mesmo que o tabuleiro, nesse ínterim, tenha sido transportado para outro cômodo. Da mesma forma diremos que o tabuleiro não se moveu, se ele permanece no mesmo lugar em que se encontrava na cabina, embora o navio esteja andando. E diremos também que o navio se encontra no mesmo lugar, desde que se mantenha à mesma distância da terra, embora o globo tenha dado uma volta completa. Na verdade, as pedras de xadrez, o tabuleiro e o navio, tudo isso mudou de lugar em relação a corpos situados muito mais longe”.

Então, para descrevermos o movimento dos corpos quantitativamente é necessário adotarmos um referencial, como por exemplo, as paredes da sala de aula, onde podemos considerar que existam três eixos imaginários que se cruzam ortogonalmente. Além do referencial, o observador necessita de um relógio para poder descrever quantitativamente o movimento. A Relatividade galileiana, termo utilizado por Einstein, trata da descrição de movimentos em relação a um referencial inercial, ou seja, um referencial em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme (não acelerado) em relação a outro referencial.

### 2.1.1. Transformações galileanas

Consideremos dois referenciais inerciais: um deles S, formado pelos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , em repouso em relação à Terra e outro,  $S'$ , formado pelos eixos  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ , paralelos a  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, e com velocidade  $\vec{V}$  na direção do eixo  $x$  em relação ao sistema S, conforme a figura 4.

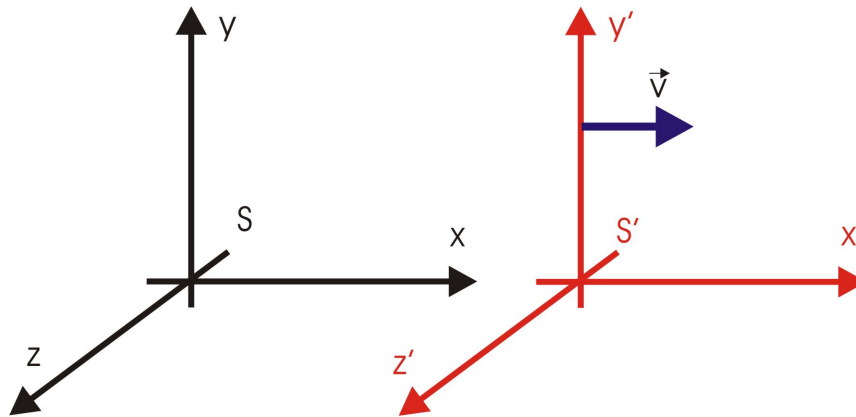


Figura 4

Consideremos que ocorra um evento em um ponto P, que pode ser identificado pelo conjunto de quatro coordenadas em cada referencial: em S ( $x$ ,  $y$ ,  $z$  e  $t$ ) e  $S'$  ( $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  e  $t'$ ), sendo que as três primeiras coordenadas de cada referencial localizam o ponto no espaço, enquanto a quarta coordenada indica o momento da ocorrência do evento. Se considerarmos que inicialmente os referenciais S e  $S'$  coincidem em  $t = t' = 0$ , temos que  $x_0 = x'_0$ ,  $y_0 = y'_0$  e  $z_0 = z'_0$ , conforme a figura 5.

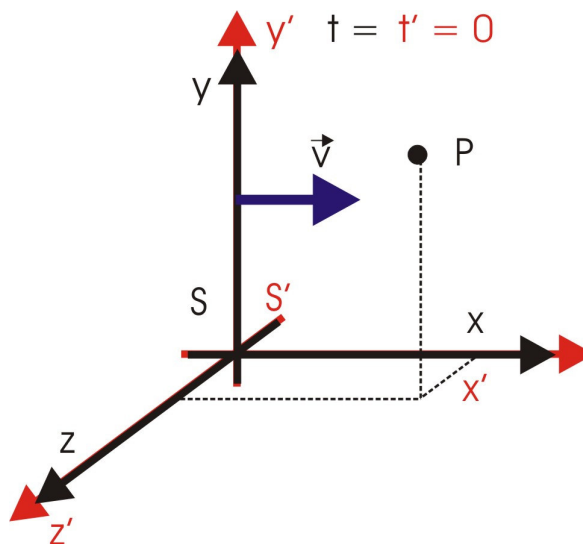


Figura 5

Agora, consideremos um instante posterior  $t = t' > 0$ . O referencial  $S'$  terá se deslocado de uma distância  $V.t$ , em relação ao referencial S, de acordo com a figura 6.

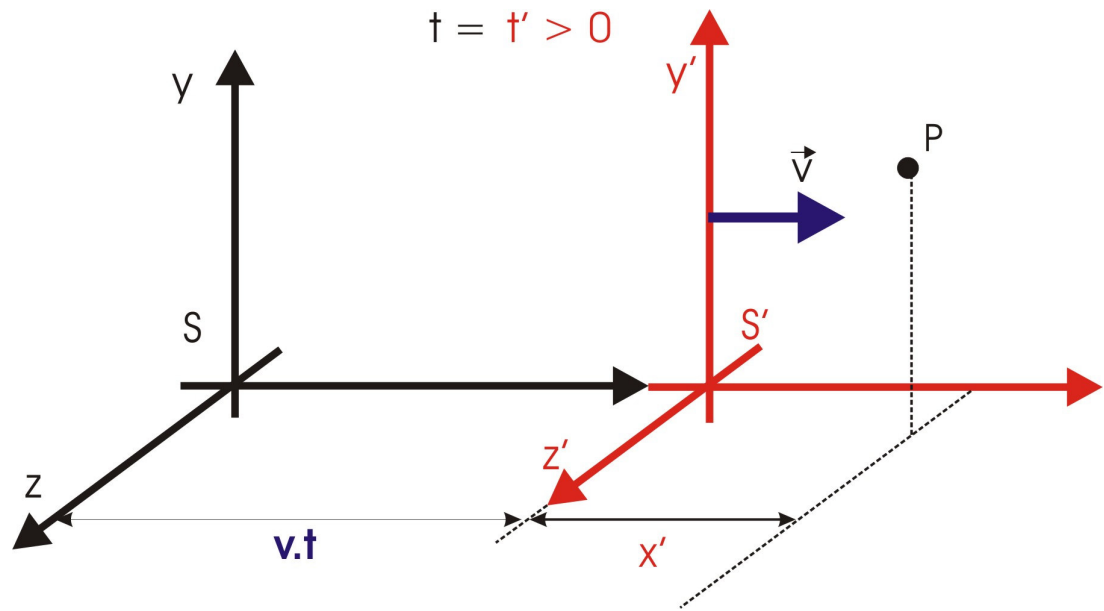


Figura 6

Então, podemos relacionar as coordenadas dos dois referenciais da seguinte forma:

$$x = x' + V \cdot t; \quad (1)$$

$$y = y'; \quad (2)$$

$$z = z'; \quad (3)$$

$$t = t'. \quad (4)$$

Note que estamos fazendo  $t = t'$  (os relógios estão sincronizados). Isto, porque para Galileu o tempo é absoluto, independente do referencial, o que chamamos de invariância do tempo. Isto está de acordo com o nosso senso comum, pois se não fosse assim, teríamos que sincronizar os nossos relógios constantemente.

Uma consequência direta da invariância do tempo, segundo as transformações galileanas, é a invariância do comprimento. Explicitando melhor, pelas transformações de Galileu concluímos que o comprimento, assim como o tempo, é absoluto, independentemente do referencial em que for medido.

Ainda com relação ao referencial, Galileu afirmou ser impossível determinar se um navio estava parado ou em movimento uniforme, realizando uma experiência mecânica em um dos seus camarotes. Com esta afirmação, podemos concluir que as leis da Mecânica são invariantes (não mudam) perante uma transformação de Galileu.

**Pense e Responda:**

- 1) Considere dois referenciais inerciais, S e S', que coincidam em  $t = 0$ , o referencial S' encontrando-se em movimento em relação a S com velocidade constante de 90 km/h, no sentido positivo do eixo x de S. Determine a posição da origem de S' em relação à origem de S após 5 minutos.
- 2) Quais as principais características da Relatividade galileana?
- 3) Qual a diferença entre um referencial inercial e um referencial não inercial?
- 4) Como você determinaria se um referencial é inercial ou não?

**2.2. Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos**

Isaac Newton nasceu na Inglaterra na noite de Natal do ano de 1642, na cidade de Lincolnshire. Newton veio ao mundo em uma época em que a Ciência, o conhecimento humano, passava por grandes modificações. O pensamento aristotélico passa a ser criticado, surgindo uma nova Ciência, com a utilização da Matemática para a descrição dos fenômenos da Natureza. Newton desenvolveu sua obra utilizando conhecimentos deixados por outros grandes pensadores como Galileu, Kepler, Descartes. O próprio Newton afirmou que “se enxergou mais longe era porque estava sobre ombros de gigantes”.

Em 1687, Newton publicou a sua maior obra, *Os Princípios Matemáticos da Filosofia Natural* (*Principia Mathematica Philosophiæ Naturalis*), contendo uma exposição da Cinemática de Galileu e do movimento dos planetas descrito por Kepler.

Podemos considerar que a essência dos *Principia* está no que hoje denominamos as três Leis de Newton: a primeira é a Lei da Inércia, segundo a qual um corpo deixado por si permanece em repouso ou em movimento retilíneo e uniforme; a segunda é a que relaciona a força resultante sobre uma partícula com sua aceleração, e é também conhecida como princípio fundamental da Dinâmica; a terceira é o conhecido princípio de ação-reação.

A primeira Lei de Newton, Lei da Inércia, é considerada por muitos autores, de uma forma equivocada, apenas como um caso especial, particular, da segunda Lei. Mas, para a formulação da primeira Lei, Newton levou mais de vinte anos, passando por um lento e gradual amadurecimento, até chegar à sua forma final. Esta lei estabelece o sistema de referência inercial. Para se medir a força e seus efeitos na mudança do movimento, necessitamos de um referencial inercial. Então, a primeira Lei é fundamental para a existência da segunda, ou seja, uma lei complementa a outra.

O que podemos concluir a respeito das Leis de Newton é que a massa e a aceleração de um corpo independem do sistema referencial inercial escolhido. Com isso, a força resultante, descrita pela segunda Lei de Newton, é independente do referencial em que for medida, nenhum sistema referencial inercial sendo preferencial a qualquer outro. Sendo assim, as Leis de Newton são iguais em qualquer sistema referencial inercial.

Partindo disso, podemos relacionar as velocidades e as acelerações de um ponto P em relação a dois referenciais inerciais, S e S', utilizando as transformações galileanas da seguinte forma:



$$v'_x = v_x - V; \quad (5)$$

$$v'_y = v_y; \quad (6)$$

$$v'_z = v_z. \quad (7)$$

$$a'_x = a_x; \quad (8)$$

$$a'_y = a_y; \quad (9)$$

$$a'_z = a_z. \quad (10)$$

Na equação (5),  $V$  expressa a intensidade da velocidade de  $S'$  em relação a  $S$ , orientada no sentido positivo do eixo  $x$  de  $S$ , como indica a figura 4.

Imaginemos um exemplo de uma pessoa  $A$  em um avião em movimento com velocidade constante, e uma outra pessoa  $B$  em uma plataforma fixa e em repouso em relação à Terra. Se ambos lançarem um objeto verticalmente para cima com velocidades iniciais iguais, irão medir a mesma altura máxima atingida pelos objetos, o mesmo tempo para atingi-la, concordando quanto à forma da trajetória descrita pelo objeto. Também concordam com a aceleração e a força resultante que será exercida sobre o objeto. Portanto, podemos concluir que os dois referenciais são equivalentes para a descrição deste movimento, ou seja, tanto a plataforma quanto o avião em velocidade constante são referenciais equivalentes, sendo impossível distinguirmos um do outro.

## 2.3. O Eletromagnetismo

A Eletricidade e o Magnetismo foram desenvolvidos de forma totalmente independente até o século XIX, quando Oersted verificou uma relação entre os efeitos elétricos e magnéticos. Assim como a Mecânica clássica, o Eletromagnetismo foi uma teoria unificadora, já que Maxwell, em 1873, unificou não apenas a Eletricidade ao Magnetismo, mas também à Óptica. Quando a Teoria Eletromagnética foi desenvolvida, existia um predomínio da Mecânica newtoniana, e acreditava-se que esta poderia descrever todos os fenômenos da Natureza.

A seguir faremos uma breve descrição dos principais fatos da evolução da Eletricidade e do Magnetismo, até a sua unificação.

### 2.3.1. A Eletricidade

O estudo da Eletricidade teve seu início com os gregos. Eles observavam que alguns elementos possuíam propriedades de atração e de repulsão, mas não diferenciavam ainda os fenômenos elétricos dos magnéticos. Somente no século XVI, através dos trabalhos do matemático italiano G. Cardano, foi que se estabeleceu claramente a diferença entre as propriedades magnéticas e elétricas.

Em 1600, William Gilbert, médico britânico, publicou o livro *De Magnete* que, além de também fazer a distinção entre os efeitos elétricos e magnéticos, diferenciou os elementos que se comportavam como o âmbar<sup>1</sup>, denominando-os de elétricos e os que não se portavam como o âmbar, os não elétricos. Também foi o precursor da idéia de campo elétrico, ao descrever como ocorria a atração ou repulsão dos corpos à distância.

Em 1667, na *Accademia Del Cimento*, pesquisadores buscaram realizar experimentos para verificar se o âmbar e outros elementos necessitavam do ar como meio para exercerem suas forças de atração. Não chegaram a fazê-lo, devido à dificuldade para se obter o vácuo. No entanto, concluíram que a atração entre os corpos eletrizados era mútua, ao contrário do que Gilbert pensava. Robert Boyle (1675) conseguiu aperfeiçoar uma bomba de vácuo e realizar uma experiência, verificando que não havia a necessidade do ar para que ocorresse a interação elétrica entre os corpos.

O primeiro gerador eletrostático foi desenvolvido por Guericke, por volta de 1663, no qual a eletrização era obtida quando a rotação de uma esfera era parada com a mão. Posteriormente, foi desenvolvido o gerador por indução, dentre os quais podemos destacar o de James Wimshurst (1882).

Os conceitos de condução e indução elétrica foram introduzidos em 1729 pelo inglês Stephen Gray que publicou, em um artigo na revista *Philosophical Transactions* da *Royal Society* (comunidade científica da qual Newton foi membro), seus resultados sobre a indução e a condução elétrica. Neste mesmo artigo, ele relata a distinção entre os materiais que hoje denominamos de condutores e isolantes.

O cientista francês Charles du Fay (Dufay), em 1734, descobriu a existência de duas espécies de eletricidade que hoje denominamos de positiva e negativa. Na época, foram denominadas de eletricidade vítrea e eletricidade resinosa. Algum tempo depois, Dufay verificou que um mesmo material poderia possuir uma ou outra eletricidade, a depender da forma como era atritado.

Com as contribuições de Dufay, começaram-se a elaborar teorias de fluidos para a eletricidade, nas quais podemos destacar a de Benjamin Franklin ao postular a existência de um fluido único que um corpo poderia ter em excesso ou em falta. Ou a idéia de Robert Symmer, em 1759, em que a matéria teria dois tipos de fluidos e que em seu estado natural (corpo neutro) possui quantidades iguais desses dois fluidos.

Em 1785, Charles Coulomb, usando uma balança de torção, enunciou a lei básica da Eletrostática, segundo a qual as forças de atração ou repulsão variam proporcionalmente ao inverso do quadrado da distância.

Os estudos relacionados aos fenômenos elétricos começaram a ter um grande avanço a partir do século XVIII, pois, além de se verificar a existência de duas cargas distintas, também começaram os estudos relacionados com as cargas em movimento, o que hoje conhecemos como corrente elétrica. Como veremos mais adiante, o desenvolvimento do conhecimento da corrente elétrica foi fundamental para a unificação da Eletricidade com o Magnetismo. A seguir, faremos uma breve descrição da evolução do conhecimento do Magnetismo.

---

<sup>1</sup> Efeito âmbar – efeito de atração ou de repulsão registrado na Antigüidade clássica, para alguns materiais.

### **2.3.2. O Magnetismo**

Assim como a Eletricidade, o Magnetismo também teve suas primeiras observações na Grécia, mas, conforme já mencionado, não se sabia quais eram as diferenças entre os efeitos elétricos e magnéticos. Contudo, foram os chineses os primeiros a fazerem uso das propriedades magnéticas que alguns materiais possuíam, utilizando a bússola. Mas, os primeiros registros da utilização da bússola no ocidente foram realizados somente em 1180, no livro do inglês Alexander Neckan.

O engenheiro militar francês Pierre de Maricourt, em seu trabalho de 1269, foi o primeiro a evidenciar uma das questões fundamentais do Magnetismo, que é a questão dos monopólos magnéticos: não temos como isolar apenas um pólo magnético (sul ou norte), como no caso da Eletricidade, em que podemos ter carga positiva ou negativa.

Como já citado, em 1600, William Gilbert, em seu livro, *De Magnete*, descreve a relação entre atração mútua entre os ímãs e o ferro. Gilbert adotava a idéia de esfera de influência para descrever a atração nas proximidades do ímã, o que hoje conhecemos como campo magnético. Também nesse trabalho, conforme já mencionado, ele descreve as diferenças entre o Magnetismo e a Eletricidade. Uma de suas maiores contribuições foi a observação de que a Terra se comporta como um grande ímã.

Após as contribuições de Gilbert, por mais de 200 anos muito pouco se avançou no estudo do Magnetismo, diferentemente dos estudos envolvidos com a Eletricidade. Os estudos sobre os efeitos do Magnetismo somente foram retomados fortemente a partir das observações de Oersted, conforme veremos a seguir.

### **2.3.3. Eletromagnetismo – a unificação**

Anteriormente aos estudos realizados por Oersted, já se dispunha de algumas evidências da existência de uma relação entre o Magnetismo e a Eletricidade. Sabia-se que as bússolas eram perturbadas durante as tempestades quando, por ação dos raios, sua polarização podia ser invertida. Com a descoberta de Franklin de que a natureza dos raios de uma tempestade é de origem elétrica, começou-se o estudo da relação entre a Eletricidade e o Magnetismo.

Em 1819, Oersted apresentou uma conferência sobre os efeitos elétricos e magnéticos a um público que já possuía conhecimento a respeito dos fenômenos. Entre as apresentações realizadas, uma é vista como um marco no surgimento do Eletromagnetismo. A experiência realizada por Oersted consistia em colocar uma bússola com seu ponteiro perpendicular a um fio por onde passava uma corrente elétrica. Com esta configuração nada poderia ser observado de anormal. Ao colocar o ponteiro paralelamente ao fio, Oersted percebeu que, com a passagem de uma corrente, o ponteiro era desviado em noventa graus. Se o sentido da corrente fosse invertido, o ponteiro girava em sentido oposto. A partir destas evidências, começou-se a busca pela relação entre os fenômenos elétricos e magnéticos. Muitos autores mencionam que esta passagem que acabamos de descrever foi descoberta por Oersted por acaso. Comentam que o cientista deixou por esquecimento uma bússola embaixo de um fio condutor e, ao passar a corrente, observou que o objeto era perturbado. Porém, não podemos considerar uma mera casualidade a sua descoberta pois, conforme relatamos, já havia indícios da existência da relação e o próprio Oersted estava envolvido com seu estudo.

Logo após a divulgação de Oersted dos resultados obtidos através de seus experimentos, várias foram as descobertas que se sucederam. Dentre elas, podemos destacar as investigações feitas pelo francês Ampère. A partir de setembro de 1820, durante os três meses que se seguiram, Ampère publicou quinze artigos referentes a fenômenos eletromagnéticos, dentre os quais podemos destacar um instrumento para medir corrente elétrica a partir dos efeitos Eletromagnéticos e outro onde dois fios paralelos percorridos por correntes de sentidos opostos se repeliam. O estudioso também percebeu que, ao passar a corrente elétrica por espiras, estas interagem como se fossem ímãs.

Os franceses Jean Biot e Félix Savart, em 30 de outubro de 1820, anunciavam os resultados das medições de forças exercidas sobre uma agulha imantada próxima a um fio condutor, percorrido por uma corrente. Esta publicação acabou por culminar no que hoje chamamos de Lei de Biot-Savart, que dá a expressão geral do campo magnético gerado ao redor de um fio condutor percorrido por uma corrente.

Em 1831, uma outra importante descoberta foi apresentada por Michael Faraday, que é a indução magnética: assim como a corrente elétrica produz campo magnético, um campo magnético variável também produz corrente elétrica em um condutor. Uma das conseqüências desta descoberta foi a possibilidade da construção de máquinas elétricas geradoras de corrente elétrica. Nos dias de hoje, a energia elétrica utilizada em nossas casas é gerada a partir deste princípio.

Para completar as descobertas básicas acerca do Eletromagnetismo, um físico russo, Heinrich F. E. Lenz mostrou que os efeitos das correntes elétricas induzidas por forças eletromagnéticas sempre se opõem a essas forças. Com outras palavras, a corrente elétrica induzida gera um campo magnético de sentido contrário à variação do que a gerou.

#### **2.3.4. O Eletromagnetismo e Maxwell**

O físico e matemático escocês James Clerk Maxwell, no ano de 1873, foi quem sintetizou as equações do Eletromagnetismo. Em seu tratado sobre Eletricidade e Magnetismo, descreveu uma formulação matemática na qual conseguiu unificar as leis de Coulomb, Oersted, Ampère, Biot e Savart, Faraday e Lenz, atualmente conhecidas como Equações de Maxwell. Campos elétricos e magnéticos satisfazem uma equação análoga às de ondas elásticas, a onda eletromagnética tendo a mesma velocidade da luz. Conclui-se, portanto, que a natureza da luz é eletromagnética.

Citando agora Maxwell, a respeito de sua descoberta:

*“A velocidade das ondulações transversais no nosso meio hipotético, calculada a partir das experiências de Eletromagnetismo efetuadas pelo Srs. Kolhraush e Weber (311.000 km/s), tem um valor tão próximo do valor da velocidade calculado a partir de experiências de Óptica realizadas pelo Sr Fizeau que é difícil de evitar a inferência de que a luz consistirá em ondulações transversais do mesmo meio que é a causa dos fenômenos elétricos e magnéticos.”*

A confirmação da hipótese de Maxwell de a luz ser de origem eletromagnética foi feita em 1887 pelo físico alemão H. Hertz. Esta confirmação se deu por meio de um circuito oscilante que produziu ondas que podiam ser refletidas, refratadas, difratadas e polarizadas da mesma forma que a luz.

Maxwell conseguiu unir três ramos do conhecimento científico da época em uma única teoria: Eletricidade, Magnetismo e Óptica. Como consequência disso, no final do século XIX, acreditava-se que pouco ou nada restava para ser adicionado ao conhecimento do Eletromagnetismo e da Mecânica newtoniana. Porém, ainda restavam alguns problemas. Dentre eles podemos destacar o fato de que se a luz é uma onda, necessita de um meio para se propagar, pois, segundo o conhecimento da época, todas as ondas (mecânicas) necessitavam de um meio para sua propagação.

**Pense e Responda:**

5) Faça um comentário sobre a seguinte afirmação:

“Todo o desenvolvimento científico sempre é feito a partir de uma observação, para somente em seguida se fazer uma descrição do fenômeno.”

6) O conhecimento do Homem sempre evolui de forma contínua, ou seja, sempre se utilizou teoria já desenvolvida para elaborar uma nova teoria. Cite exemplos que ilustrem esta afirmação.

7) Qual foi a importância das Equações de Maxwell?

8) Cite um conflito surgido com o estabelecimento da natureza ondulatória da luz.

**2.3.5. Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica**

As Equações de Maxwell descreviam uma onda eletromagnética, cuja propagação se dava no vácuo, o que causava um sério problema, pois se a luz era uma onda, isto não poderia ocorrer. O conhecimento que se tinha neste período era de ondas mecânicas como, por exemplo, ondas sonoras que necessitam de um meio para se propagar. Essa visão mecanicista dominava o pensamento científico da época. Então, imaginou-se que deveria existir um meio com algumas propriedades especiais onde as ondas eletromagnéticas se propagassem. Para este meio, chamado de éter luminífero ou simplesmente éter, era necessário postular propriedades um tanto incomuns, como densidade zero e transparência perfeita. Este meio já havia sido idealizado por René Descartes no século XVI.

Várias foram as tentativas de provar a existência do éter, que deveria permear todo o universo. Uma das tentativas mais famosas foi a realizada pelos físicos A. A. Michelson em 1881, e em 1887 por Michelson e E. W. Morley, utilizando um instrumento que denominamos de interferômetro.

Com o interferômetro seria possível determinar o movimento da Terra em relação ao éter. Mas, depois de realizadas as experiências, Michelson e Morley não conseguiram verificar a existência desse meio de propagação.

Para salvar todo o conhecimento teórico que se possuía até o momento, FitzGerald (em 1892) propôs uma hipótese que foi aceita e complementada por Lorentz. Esta hipótese consistia em

supor que os corpos são contraídos, quando se deslocam, no sentido do movimento relativo ao éter estacionário, por um fator de  $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$  ( $v$  é a velocidade do sistema, e  $c$  é a velocidade da luz).

Mas, além deste problema, existia um outro. Como já mencionado na Relatividade galileana, as leis da Física deveriam ser iguais em qualquer referencial inercial. Isto quer dizer que deveríamos observar as mesmas manifestações de um fenômeno, indiferentemente do referencial inercial em que nos encontramos.

Mas foram constatadas inconsistências com este princípio. Ao passarmos de um referencial inercial para outro, utilizando as transformações galileanas, as Equações de Maxwell forneciam resultados diferentes para um mesmo fenômeno, gerando assim um conflito. Ou as equações de Maxwell estavam erradas ou teríamos que mudar as transformações galileanas.

Frente a isto, tinha-se três alternativas:

1. A Relatividade galileana seria válida apenas para a Mecânica clássica. As leis do Eletromagnetismo exigiriam um referencial inercial preferencial chamado éter.
2. A Relatividade galileana seria válida tanto para a Mecânica clássica quanto para o Eletromagnetismo, mas as equações de Maxwell deveriam ser modificadas.
3. As equações de Maxwell e as leis da Mecânica clássica seriam válidas, mas para isto teríamos que modificar as transformações de Galileu..

As equações de Maxwell eram bastante fundamentadas para que fossem modificadas. As leis da Mecânica clássica também possuíam uma boa fundamentação teórica e experimental. Então, como alternativa, Einstein escolheu modificar as transformações de Galileu (alternativa 3).

## 2.4. Einstein e a origem da Relatividade Especial

Em 1905, Albert Einstein, físico alemão, publicou cinco grandes artigos, dentre os quais um deu origem à Teoria da Relatividade Especial, sob o título *Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento*.

A condição da validade das Equações de Maxwell em qualquer referencial inercial levava à invariância da velocidade da luz, o que contradizia a Relatividade galileana. Einstein considerou que a velocidade da luz é a mesma para qualquer referencial inercial, o que causou sérias modificações nas concepções de tempo e espaço aceitas até a época.

Einstein enunciou dois postulados:

- 1) **As leis da Física são iguais em qualquer referencial inercial, ou seja, não existe referencial inercial preferencial.**
- 2) **A luz sempre se propaga no espaço vazio com uma velocidade definida, cujo módulo é independente do estado de movimento do corpo emissor.**

O primeiro postulado está associado diretamente às leis da Mecânica, Termodinâmica, Óptica e do Eletromagnetismo, ou seja, é uma generalização do princípio da Relatividade galileana e

de Newton, que se aplicava apenas à Mecânica. Esta generalização de várias leis somente foi possível graças à modificação dos conceitos de espaço e tempo.

O segundo postulado trouxe, entre algumas conseqüências, a de que nenhuma partícula pode se deslocar com velocidade superior à da luz.

Nos próximos capítulos, iremos discutir as conseqüências a que estes dois postulados levaram, que em muito contrariam o nosso senso comum. Discutiremos os seguintes aspectos: relatividade da simultaneidade, dilatação temporal, contração do espaço, adição de velocidades na Relatividade Especial, relação massa-energia, paradoxo dos gêmeos e uma introdução à Relatividade Geral.

**Pense e Responda:**

- 9) Comente os conflitos existentes na Física no final do século XIX.
- 10) A Teoria da Relatividade Especial conseguiu unificar quais ramos da Física?
- 11) Cite os postulados de Einstein, comentando as suas conseqüências.
- 12) Determine a velocidade de uma partícula que leva dois anos mais que a luz para percorrer a distância de 7 anos-luz. Um ano-luz é a distância percorrida pela luz em um ano.





### 3. RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

Na Relatividade galileana, dois eventos são simultâneos para qualquer observador desde que, em qualquer referencial inercial, ocorra a simultaneidade. Isto porque, para a Relatividade galileana, o tempo é absoluto, independe do referencial que estivermos utilizando.

Para a Relatividade Especial de Einstein, o conceito de tempo deixou de ser absoluto e passou a ser relativo. Eventos simultâneos, em um determinado referencial inercial, não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial. Assim, a noção de simultaneidade também é relativa.

Vejam os um exemplo simples. Consideremos o trem de Einstein (experiência de pensamento) que se desloca com velocidade relativística constante  $\vec{V}$  (velocidade próxima à da luz), com um observador  $S'$  que se encontra exatamente no meio do trem, e outro observador  $S$  que se encontra no solo, e que estão se cruzando exatamente quando os raios ocorrem (ver figura 7). Consideremos que dois raios atinjam as posições frontal e traseira do trem, do ponto de vista do observador  $S$ , ao mesmo tempo. Os eventos serão simultâneos para o observador  $S$ , pois as duas frentes de onda de luz irão atingi-lo ao mesmo tempo. Já para o observador que está no referencial no interior do trem (referencial  $S'$ ) os eventos não serão simultâneos, ou seja, ele verá primeiro a frente de onda da frente, pois é neste sentido que se desloca o trem, e depois verá a frente de onda de trás. Isto está de acordo com o princípio da invariância da velocidade da luz, ou seja, para qualquer que seja o observador inercial, ambos os pulsos se movem com a mesma rapidez  $c$ . Logo,  $S'$  é levado a concluir que o raio produzido na frente do trem foi emitido primeiro do que o outro, ou seja, para este observador os raios não são simultâneos.

Mas quem está com a razão, o observador  $S$  ou o observador  $S'$ ? Ambos estão corretos; embora pareça estranho, não existe uma única resposta para esta questão. A simultaneidade é uma noção relativa e não absoluta.

Analise a figura a seguir.

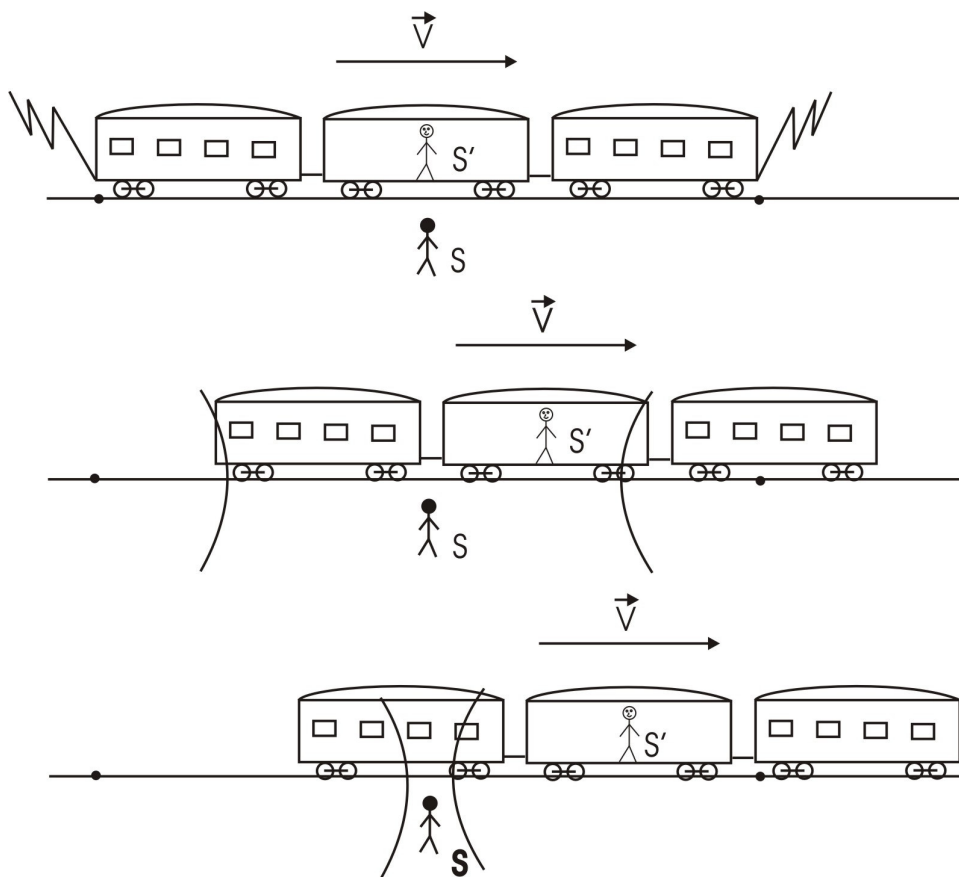


Figura 7

Se a velocidade da luz fosse infinita em qualquer referencial, os dois eventos seriam simultâneos para os dois observadores. Mas, como a rapidez da luz é igual em todas as direções em qualquer referencial inercial, os dois eventos que são simultâneos em um referencial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial.

**Pense e Responda:**

13) Nosso senso comum é de que se dois acontecimentos são simultâneos em um referencial inercial, em qualquer outro referencial inercial estes mesmos acontecimentos também serão simultâneos. Mas isto está em desacordo com a Relatividade Especial. Por que acontecimentos simultâneos em um referencial inercial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial? Isto é consequência de qual postulado?

14) Se um evento A ocorre antes de um evento B em um referencial inercial, é possível que em outro referencial inercial o evento B ocorra antes do evento A?

## 4. DILATAÇÃO TEMPORAL

Uma das conseqüências da luz se propagar em todas as direções com a mesma rapidez é que as medidas de tempo não são mais absolutas, como consideravam Galileu e Newton, ou seja, as medidas de tempo irão depender do referencial inercial em que o tempo é medido.

Consideremos a seguinte situação: um trem desloca-se com velocidade constante  $\vec{V}$ , em relação ao solo, o qual poderemos considerar como um referencial inercial que chamaremos de S. Dentro do trem, que será o nosso referencial inercial S', um sinal de luz é emitido verticalmente e refletido por um espelho que se encontra no teto. Sejam D a distância do teto até a fonte emissora de luz, e  $\Delta t'$  intervalo de tempo necessário para que a luz se desloque até o espelho e retorne, do ponto de vista de S'. Assim  $\Delta t' = 2.D/c$ . Veja a figura 8, que indica esquematicamente a experiência realizada em S'.

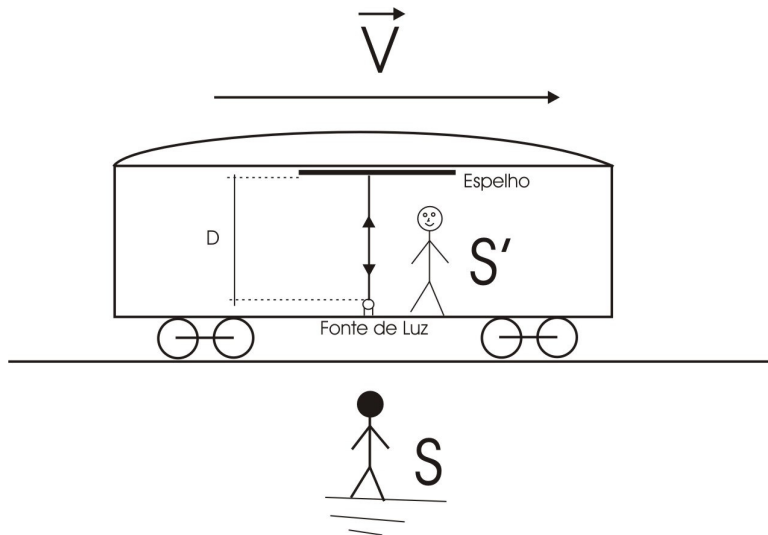


Figura 8

Agora, se considerarmos um observador que se encontra no solo, onde o trem se desloca com velocidade  $\vec{V}$  constante, ele irá medir um intervalo de tempo maior para o mesmo processo. Como a luz percorre uma distância AB com a mesma rapidez, teremos que o intervalo de tempo para a luz atingir o espelho, medido por este observador, será igual a  $AB/c$ . Logo a experiência (ida e volta do sinal de luz) terá durado o intervalo de tempo  $\Delta t = 2.AB/c$ . Como a distância AB é maior que a distância D e sendo a rapidez da luz constante, teremos como conseqüência que  $\Delta t > \Delta t'$ . Analise a figura 9.

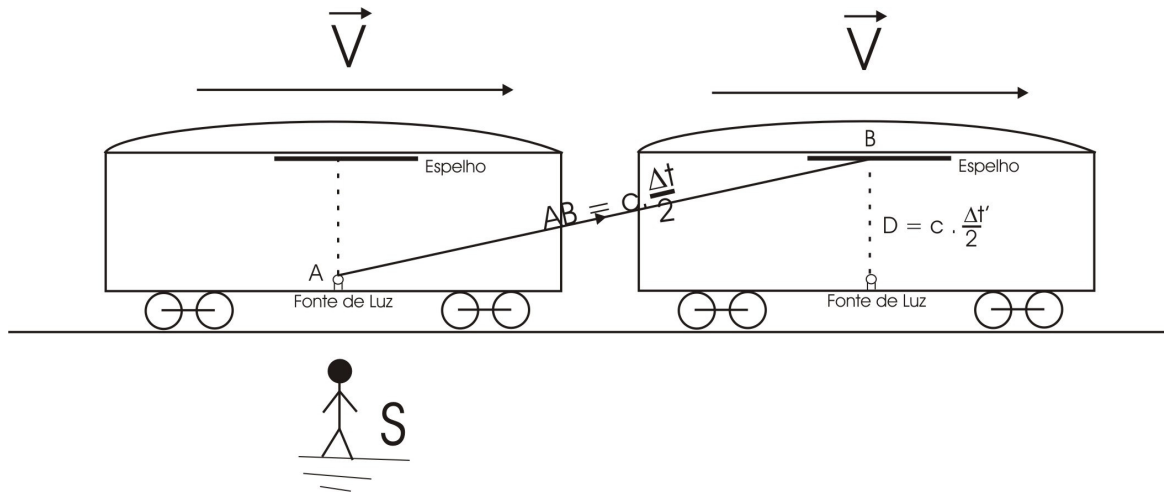


Figura 9

Enquanto o sinal de luz sobe da fonte até o espelho, o trem desloca-se, no solo, de uma distância  $d$ , que pode ser determinada por  $d = V \cdot \Delta t/2$ . Podemos determinar a relação entre  $\Delta t'$  e  $\Delta t$  pelo teorema de Pitágoras, considerando o triângulo retângulo da figura 10.

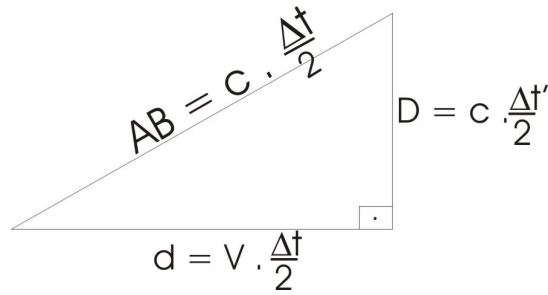


Figura 10

Temos, portanto:

$$\begin{aligned} (AB)^2 &= d^2 + D^2 \\ c^2 \cdot \Delta t^2 &= V^2 \cdot \Delta t^2 + c^2 \cdot \Delta t'^2 \\ (c^2 - V^2) \cdot \Delta t^2 &= c^2 \cdot \Delta t'^2 \end{aligned}$$

Dividindo tudo por  $c^2$ , temos:

$$\Delta t^2 \left( 1 - \frac{V^2}{c^2} \right) = \Delta t'^2$$

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \quad (11)$$

Usualmente utilizamos  $\Delta t = \gamma \cdot \Delta t'$ , onde  $\gamma$  é denominado de fator de Lorentz:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} . \quad (12)$$

Veja que só  $V < c$  permite, para  $\gamma$ , um valor real.

Como o fator  $\gamma$  é sempre maior que um, teremos, como já referido anteriormente, que  $\Delta t > \Delta t'$ . Assim, quem está fora do trem irá medir um intervalo de tempo maior do que o observador que estiver dentro do trem. Este fenômeno é conhecido como dilatação temporal.

O intervalo de tempo para quem mede no interior do trem é chamado de tempo próprio ( $\Delta t'$ ), e o intervalo de tempo para quem está no referencial fora do trem é chamado de tempo dilatado ( $\Delta t$ ).

O movimento, portanto, afeta o tempo.

O tempo próprio é o do referencial em que se está medindo a duração entre dois eventos ocorridos no mesmo local (em nosso exemplo, emissão e absorção do sinal de luz, pela fonte fixa ao trem).

Não percebemos a dilatação do tempo em nosso cotidiano porque as velocidades que atingimos são muito menores que a velocidade da luz, o fator de Lorentz sendo praticamente igual a um.

### Exemplo 1:

Consideremos que uma pessoa esteja viajando em uma nave com velocidade constante de 60% da velocidade da luz, em relação à Terra, e verifica que um determinado processo dentro da nave leva, para sua ocorrência, um intervalo de tempo de 1 minuto. Para um observador que ficou em um referencial inercial em repouso em relação à Terra, qual será o intervalo de tempo para a ocorrência do mesmo processo?

Resolução:

As informações do problema são:

$$V = 0,6.c$$

$$\Delta t' = 1 \text{ min} = 60 \text{ s (tempo próprio, medido pelo próprio viajante)}$$

$\Delta t = ?$  (Determinar o tempo medido por um observador que permaneceu em um referencial em repouso em relação à Terra.)

O fator de Lorentz vale:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6.c}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma = 1,25 .$$

Logo,

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' = 1,25 \cdot \Delta t' :$$

$$\Delta t = 75 \text{ s} .$$

O observador que ficou na Terra medirá um intervalo de tempo de 75 segundos, ou seja, o processo terá uma duração de 15 segundos a mais do que o intervalo de tempo medido pelo observador que ficou dentro da nave.

**Exemplo 2:**

O efeito do movimento sobre o tempo já foi bastante usado em filmes de ficção científica, como em *O Planeta dos Macacos*, em que a tripulação de uma nave espacial fica em missão durante três anos, medido no relógio da nave. Quando ela regressa à Terra, verifica que aqui se passaram cinquenta anos!<sup>2</sup>

Calcule, para esta situação:

- o fator de Lorentz;
- a rapidez da nave.

Resolução:

a) Neste caso, temos que o intervalo de tempo próprio ( $\Delta t'$ ) é igual a três anos, e o intervalo de tempo dilatado ( $\Delta t$ ) é igual 50 anos. Então, podemos determinar o fator de Lorentz:

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \Rightarrow \gamma = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \Rightarrow \gamma = \frac{50}{3} \Rightarrow \gamma \cong 16,7 .$$

b) Como já determinamos o valor do fator de Lorentz, utilizamos este para determinar com que rapidez a nave deve viajar para que ocorra a dilatação temporal.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow \gamma^2 = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2} \Rightarrow 1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2 = \frac{1}{\gamma^2} \Rightarrow \left(\frac{V}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = 1 - \frac{1}{16,7^2}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right)^2 = 0,9964$$

$$\left(\frac{V}{c}\right) = \sqrt{0,9964}$$

$$\left(\frac{V}{c}\right) = 0,998$$

$$V = 0,998 \cdot c .$$

A rapidez que a nave teve durante os três anos foi de 99,8% da rapidez da luz, muito acima dos valores que estamos acostumados a ver. Apesar do filme ser de ficção, a base está fisicamente correta.

<sup>2</sup> Este exemplo foi tirado de FERRARO, Nicolau Gilberto. *Física – Ciência e Tecnologia*. Volume Único; Ed. Moderna. p. 597.

**Pense e Responda:**

15) José encontra-se em um referencial inercial  $S'$  em movimento em relação a outro referencial inercial  $S$ , onde está Carlos. José realiza uma experiência, em  $S'$ , e mede sua duração  $\Delta t_{\text{José}}$  (tempo próprio). Carlos, de  $S$ , vê a experiência durar  $\Delta t_{\text{Carlos}}$  (tempo dilatado). Foi constatado que  $\Delta t_{\text{Carlos}} = 2\Delta t_{\text{José}}$ . Com este resultado é possível estimar que a rapidez relativa entre os referenciais é aproximadamente:

16) Uma espaçonave viaja com rapidez  $V = 0,80c$ . Supondo que se possa desprezar os tempos de aceleração e desaceleração da nave durante uma jornada de ida e volta que leva 12 anos, medidos por um astronauta a bordo, pode-se afirmar que um observador que permaneceu na Terra terá envelhecido, em anos:

17) Desejamos fazer uma viagem, de ida e volta, viajando em uma espaçonave com velocidade constante em linha reta, durante seis meses e, então, retornar com a mesma rapidez. Desejamos, além disso, ao retornar, encontrar a Terra como ela será 1000 anos depois, contados do início da viagem. Determine:

- a) Com que rapidez devemos viajar?
- b) Importa, ou não, que a viagem se faça em linha reta ou em círculo?





## 5. CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Uma outra consequência dos postulados da Relatividade Restrita é a relatividade do comprimento. Assim como o tempo, o comprimento terá valores diferentes para observadores que se encontram em movimento relativo um em relação ao outro. A contração do comprimento sempre ocorre na mesma direção do movimento.

Vamos considerar novamente, como exemplo, um trem que se desloca com velocidade constante em relação à plataforma da estação, e dois observadores: um no interior do trem ( $S'$ ) e outro na plataforma ( $S$ ). Suponhamos que um observador em  $S$  meça o comprimento da plataforma, encontrando o valor  $L$ . Este é o chamado comprimento próprio da plataforma, aquele que foi medido no referencial em que ela está em repouso. Este observador vê a frente do trem passar pela plataforma no intervalo de tempo  $\Delta t$ .

Note que o trem viaja na direção do comprimento medido. São medidas na direção do movimento do referencial móvel que sofrem efeitos relativísticos. O observador em  $S$  pode, então, concluir que  $L = v \cdot \Delta t$ . Para um observador em  $S'$ , a plataforma é que se move. Para ele, o comprimento medido vale  $L' = v \cdot \Delta t'$ , onde  $\Delta t'$  é o tempo próprio, a duração entre dois eventos ocorridos no mesmo local, em seu referencial: a passagem de um extremo da plataforma pela frente do trem, e a passagem do outro extremo da plataforma pela mesma frente do trem.

Então,

$$v = \frac{L}{\Delta t} \quad \text{e}$$

$$v = \frac{L'}{\Delta t'}$$

Logo,

$$\frac{L}{L'} = \frac{\Delta t}{\Delta t'} \quad (13)$$

Mas, das equações (11) e (12),

$$\Delta t = \gamma \cdot \Delta t' \quad (14)$$

As equações (13) e (14), portanto, levam a:

$$L = \gamma \cdot L',$$

ou seja,

$$L' = \frac{L}{\gamma} \quad (15)$$

Aqui, o comprimento próprio é  $L$ . Como  $\gamma > 1$ ,  $L' < L$ , ou seja, o comprimento da plataforma, conforme medido em um referencial em relação ao qual ela está em movimento, é sempre menor que seu comprimento próprio.

**Exemplo 3:**

Uma nave desloca-se com velocidade de 85% da velocidade da luz ( $0,85.c$ ), e um astronauta em seu interior mede seu comprimento e encontra um valor de 12 m. Para um observador que se encontra na Terra, qual o tamanho da nave?

Resolução:

Temos que a velocidade da Terra em relação à nave também é de  $0,85.c$ , e que o comprimento próprio é igual a 12 m. Então,

$$L' = \frac{L}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}} \Rightarrow L = L' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2} \Rightarrow L = L' \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,85.c}{c}\right)^2} \Rightarrow L = L' \cdot \sqrt{1 - (0,85)^2}$$

$$L = 0,53.L'$$

$$L = 6,32 \text{ m .}$$

Podemos observar que houve uma redução bastante significativa da medida, onde o valor medido pelo observador em repouso é quase a metade do valor medido pelo observador em movimento.

### 5.1. Contração de Lorentz - FitzGerald

Vimos que as medidas de comprimento são afetadas pelo movimento relativo dos corpos, sendo isto uma consequência do segundo postulada. Então, fica o questionamento: o que acontece com um objeto que se encontra em movimento relativo a um referencial inercial? Há uma contração no material, onde as moléculas são afetadas pelo movimento, ficando umas mais próximas das outras, ou seja, há uma alteração na estrutura do material? Ou será que é apenas a aparência visual do objeto em movimento relativo?

Antes de Albert Einstein publicar a Teoria da Relatividade Especial em 1905, os físicos George Francis FitzGerald (Irlanda, 1851 - 1901) e Hendrik Antoon Lorentz (Holanda, 1853 - 1928), propuseram a mesma relação da contração do comprimento na direção do deslocamento, porém com significado diferente. Para Lorentz e FitzGerald a contração era resultado da modificação da estrutura da matéria: o éter (meio hipotético onde a luz se propagava) afetava as forças moleculares, o que explicaria a contração do comprimento. Este argumento foi utilizado e aceito na época, pois assim explicava os resultados negativos obtidos por Michelson e Morley, na identificação do éter através do interferômetro, conforme já mencionado na seção 2.3.5.

No artigo de FitzGerald (1889), ele descreve a influência do éter na estrutura dos materiais: *“...parece ser uma suposição não improvável que as forças moleculares sejam afetadas pelo movimento [relativo ao éter] e que, em consequência, o tamanho do corpo se altere”*.

A partir da Teoria da Relatividade Especial de Einstein, a contração do comprimento passou a ter um outro significado, deixando de ser uma contração que afetaria a estrutura da matéria, e passou a ser uma contração devido à aparência visual dos objetos em movimento relativo.

Comparando a interpretação dada por FitzGerald com a de Einstein, verificamos que a primeira estava relacionada com a mudança estrutural da matéria enquanto que a segunda (Einstein)

está relacionada com o ato de medir, ou seja, não ocorre uma mudança na estrutura da matéria dos corpos, mas sim uma alteração nas medidas de comprimento, pelo fato da luz possuir a mesma rapidez em todas as direções.

**Pense e Responda:**

18) Uma barra mantém-se paralela ao eixo  $x$  de um referencial  $S$ , movendo-se ao longo deste eixo com velocidade de  $0,70.c$ . O seu comprimento de repouso é de  $2,0$  m. Qual será seu comprimento em  $S$ ?

19) Uma nave espacial, com um comprimento de repouso de  $150$  m, passa por uma estação de observação com velocidade de  $0,85.c$ . Determine:

a) Qual o comprimento da nave medido por um observador na estação?

b) Qual o intervalo de tempo registrado pelo monitor da estação entre as passagens, por um mesmo ponto, da parte da frente e da parte traseira da nave?

20) Um avião, cujo comprimento de repouso é de  $50$  m, está se movendo, em relação à Terra, com uma velocidade constante de  $630$  m/s. Em que fração do seu comprimento de repouso parecerá encurtado para um observador na Terra?



## 6. ADIÇÃO DE VELOCIDADES NA RELATIVIDADE ESPECIAL

Na Relatividade Especial, como já discutimos nas seções 4 e 5, as medidas de tempo e espaço foram modificadas totalmente, e fomos obrigados a abandonar a Relatividade galileana. Como consequência, a adição de velocidades também foi alterada, até mesmo porque nenhum corpo pode possuir velocidade maior que a da luz em relação a um referencial inercial.

Vamos recordar um pouco a soma galileana de velocidades: considere um trem que se desloca com velocidade  $\vec{V}$  constante, conforme a figura 11, e uma pessoa dentro do trem deslocando-se no mesmo sentido do trem (referencial inercial  $S'$ ). Um observador está em repouso em um referencial inercial  $S$ , preso ao solo.

O módulo da velocidade da pessoa que caminha no interior de trem, para quem está em repouso no solo, será:

$$v = V + v' , \quad (16)$$

onde

$V$  é o módulo da velocidade de  $S'$  em relação a  $S$ ;

$v'$  é o módulo da velocidade da pessoa em relação a  $S'$ , caminhando no mesmo sentido do movimento do trem;

$v$  é o módulo da velocidade da pessoa, como vista pelo observador em  $S$ .

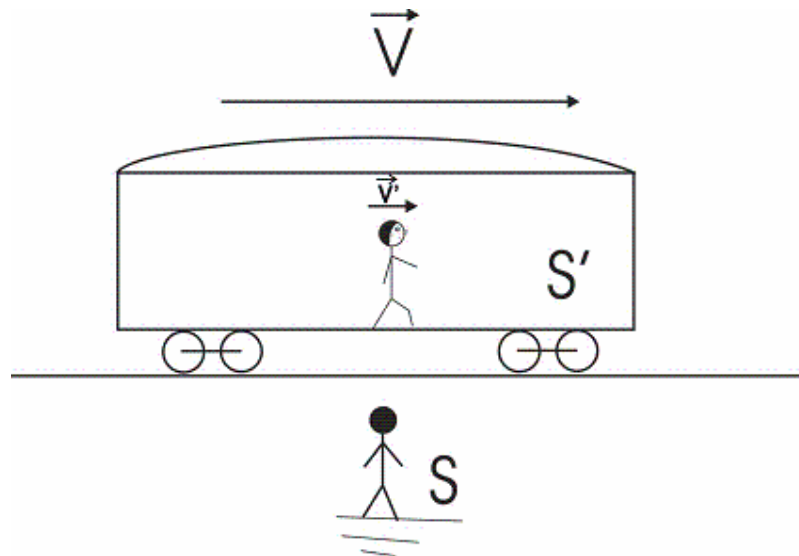


Figura 11

Em uma outra situação, onde a pessoa no interior do trem (referencial  $S'$ ) desloca-se em sentido contrário ao do trem (figura 12), teremos:

$$v = V - v' , \quad (17a)$$

onde  $v'$  refere-se ao módulo da velocidade com que a pessoa caminha em relação ao trem, para trás, e supomos  $V > v'$ . Se o trem viaja tão lentamente de tal forma que  $V < v'$ , então o observador em  $S$  verá a pessoa deslocar-se para a esquerda com uma velocidade de módulo

$$v = v' - V . \quad (17b)$$

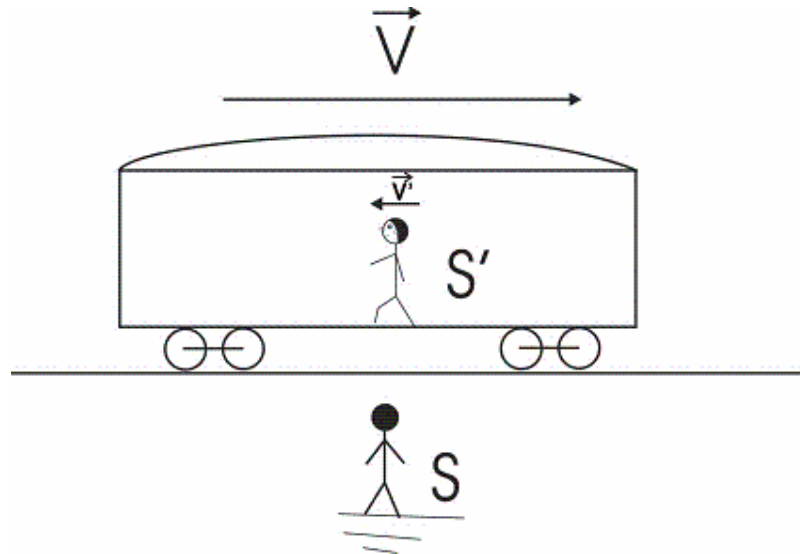


Figura 12

Para velocidades relativísticas (próximas da velocidade da luz) não podemos utilizar a adição de velocidades descrita por Galileu, pois, de acordo com o segundo postulada da Relatividade Especial, a luz desloca-se em todas as direções com a mesma rapidez  $c$ . Por exemplo, uma fonte que se desloca com rapidez  $0,8.c$  em relação ao solo emite um pulso de luz com rapidez  $c$ ; então, utilizando a equação (16) calcularemos que o pulso de luz se deslocaria com rapidez  $1,8.c$ , em relação ao solo, ou seja, com uma velocidade maior que a velocidade da luz.

Então, para velocidades relativísticas, utilizaremos uma outra relação, a qual chamaremos de adição relativística de velocidades:

$$v = \frac{V + v'}{1 + \frac{V \cdot v'}{c^2}} . \quad (18)$$

Ou, para a determinação de  $v'$ :

$$v' = \frac{V - v}{1 - \frac{V \cdot v}{c^2}} . \quad (19)$$

No exemplo citado acima, a relação (18) fornece, para  $V = 0,8.c$  e  $v' = c$ :

$$v = c ,$$

consistente com o segundo postulada.

A equação (18) estabelece a forma de combinar velocidades compatível com os postulados da Relatividade Especial.

**Exemplo 4:**

Considere duas naves, A e B, que viajam com velocidades respectivas de  $0,6.c$  e  $0,8.c$ , em relação à Terra, em sentidos opostos. Determine a velocidade relativa de uma nave em relação à outra.

Resolução:

Seja S o referencial Terra, S' o referencial preso à nave A, e considere a nave B como o objeto observado. Então, em (19),  $V = 0,6.c$  e  $v = -0,8.c$ , já que as naves viajam, em relação à Terra, em sentidos opostos.

$$v' = \frac{0,6.c + 0,8.c}{1 + \frac{0,6.c \cdot 0,8.c}{c^2}} \Rightarrow v' = \frac{1,4.c}{1,48} \Rightarrow v' = 0,95.c$$

**Pense e Responda:**

21) Uma partícula se move ao longo do eixo  $x'$  do referencial S' com a velocidade de  $0,50.c$ . O referencial S' se move em relação ao referencial S com a velocidade de  $0,60.c$ . no sentido do eixo  $x$ . Os eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , de S, possuem as mesmas orientações dos eixos  $x'$ ,  $y'$  e  $z'$ , de S', respectivamente. Qual a velocidade da partícula, conforme medida em S?

22) Duas espaçonaves movem-se em sentidos opostos com velocidades de  $0,8.c$ , relativas à Terra. Qual a velocidade de uma das naves relativamente à outra:

- a) Pela Relatividade de Galileu?
- b) Pela Relatividade de Einstein?





## 7. ENERGIA RELATIVÍSTICA

A Teoria da Relatividade Restrita modificou também as noções de energia. Com certeza você já viu em algum lugar o que poderíamos definir como a equação mais *pop* da Física:

$$E_0 = m \cdot c^2 . \quad (20)$$

Mas, qual o significado desta equação?

Einstein conseguiu demonstrar que a massa de um corpo pode ser considerada uma forma de energia, ou seja, massa pode ser convertida em energia e energia pode ser convertida em massa. Este princípio é denominado de princípio da equivalência massa-energia.

Na equação (20) temos o que chamamos de energia de repouso, ou seja, a energia que um corpo possui apenas devido à sua massa, desconsiderando outras formas de energia como a energia cinética.

Agora, quando um corpo está em movimento, além da energia de repouso, devida à sua massa, terá também energia cinética, e a energia total será a soma da energia cinética com a energia de repouso. Neste caso, temos a seguinte relação:

$$E = \gamma \cdot m \cdot c^2$$

$$E = \frac{m \cdot c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} . \quad (21)$$

A equação (21) é a equação (20) multiplicada pelo fator de Lorentz; então, para uma velocidade igual a zero, temos que a equação (21) se reduz à equação (20).

A energia cinética de um corpo para velocidades relativísticas é dada pela diferença entre a energia total (equação (21)) e a energia de repouso (equação (20)):

$$E_c = E - E_0$$

$$E_c = \gamma \cdot m \cdot c^2 - m \cdot c^2$$

$$E_c = m \cdot c^2 \cdot (\gamma - 1) . \quad (22)$$

Nas reações nucleares, por exemplo, a equação de equivalência massa-energia de Einstein é facilmente verificada, pois os núcleos e partículas subnucleares interagem, ocorrendo conversão de massa em energia, e vice-versa.

**Exemplo 5:**

Consideremos uma reação nuclear, onde a massa final após a reação seja menor em um grama do que a massa inicial. Determine a equivalência em energia para esta variação de massa.

Resolução:

Temos:

$$m = 1 \text{ g} = 10^{-3} \text{ kg};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

$$E_0 = m \cdot c^2 \Rightarrow E_0 = 10^{-3} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J} \Rightarrow E_0 = 10^{-3} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

$$E_0 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}.$$

Para termos uma idéia, com esta quantidade de energia liberada poderíamos abastecer, com energia elétrica, 100.000 residências de porte médio durante um mês (verifique isto!).

**Exemplo 6:**

Considere uma maçã de massa igual a 150 g, que seja transformada integralmente em energia utilizada para acender uma lâmpada de 100 W. Por quanto tempo permanecerá acesa esta lâmpada? (Teoricamente isto é possível, mas não há perspectiva próxima para sua realização.)

Resolução:

Inicialmente, determinaremos a energia de repouso da maçã.

Temos:

$$m = 150 \text{ g} = 1,5 \cdot 10^{-1} \text{ kg};$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}.$$

$$E_0 = m \cdot c^2 \Rightarrow E_0 = 1,5 \cdot 10^{-1} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \text{ J} \Rightarrow E_0 = 1,5 \cdot 10^{-1} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J}$$

$$E_0 = 1,35 \cdot 10^{16} \text{ J}.$$

Temos que lembrar que potência é obtida pela razão:

$$P = \frac{E_0}{\Delta t}.$$

Logo,

$$\Delta t = \frac{E_0}{P}.$$

Então:

$$\Delta t = \frac{1,35 \cdot 10^{16}}{100} \text{ s} \Rightarrow \Delta t = 1,35 \cdot 10^{14} \text{ s}.$$

$\Delta t = 1,35 \cdot 10^{14} \text{ s}$  são mais de 4 milhões de anos!

**Pense e Responda:**

23) A energia consumida por uma casa comum, por mês, é da ordem de 300 kWh (quilowatt hora). Deste modo, lembrando que  $1\text{kWh} = 3,6 \cdot 10^6$  joules, esta energia equivale, em quilogramas, a aproximadamente:

24) Qual o erro percentual que se comete quando se calcula a energia cinética por  $\frac{1}{2}m \cdot v^2$  em vez de  $(\gamma - 1) \cdot m \cdot c^2$ , para uma partícula com velocidade:

a)  $0,1 \cdot c$ ?

b)  $\frac{2}{3} \cdot c$ ?

25) Qual a velocidade de um próton que possui energia total igual a 1.800 MeV? Considere  $1\text{ eV} = 1,60 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ , e a massa do próton igual a  $1,67 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ .

26) A partir da relação da energia relativística, prove que um corpo jamais poderá chegar à velocidade da luz. Por que não é possível atingir a velocidade da luz?



## 8. PARADOXO DOS GÊMEOS

O paradoxo consiste no seguinte: dois irmãos gêmeos, José e Carlos, crescem juntos até a idade de 25 anos, quando Carlos é escolhido para realizar uma viagem a uma estrela que fica distante 15 anos-luz da Terra. Para realizar a viagem será utilizado um foguete que atinge a velocidade de 99% da velocidade da luz ( $0,99.c$ ). Para José, na Terra, o tempo de viagem de Carlos será de 30,30 anos (tempo dilatado) (verifique a validade desta afirmação). Para Carlos, que viajou, o tempo transcorrido (tempo próprio) será menor.

Pela equação (11), temos:

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}}, \text{ onde } \Delta t \text{ é o tempo dilatado e } \Delta t' \text{ é o tempo próprio.}$$

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V}{c}\right)^2}$$

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,99.c}{c}\right)^2}$$

$$\Delta t' = 0,14 \cdot \Delta t$$

$$\Delta t' = 4,24 \text{ anos .}$$

Para Carlos, que viajou, terão sido transcorridos apenas 4,24 anos, ou seja, sua idade após a viagem será de 29,24 anos, enquanto que José, que permaneceu na Terra, terá 55,30 anos, ou seja, José será mais velho que Carlos aproximadamente 26 anos.

Agora, considere uma situação contrária. Vamos colocar o nosso referencial S em Carlos, que está dentro do foguete. Desta forma, Carlos verá seu irmão José se afastando. Nesta situação consideramos o foguete em repouso, e o tempo próprio passa a ser o tempo medido por José, que está em movimento em relação a Carlos, que medirá o tempo dilatado.

Então, eis o paradoxo: dependendo do referencial que escolhermos, José ou Carlos estará mais velho ao final da viagem. Como resolver este paradoxo? É simples: José está na Terra, e podemos considerar que este é um referencial inercial. Já Carlos, que está no foguete, não pode ser considerado como um referencial inercial, pois, para atingir a velocidade de  $0,99.c$ , e para mudar o sentido do movimento, o foguete tem de ser acelerado. Não temos paradoxo, já que não estamos comparando observações a partir de dois referenciais inerciais.

O problema **não é**, pois, simétrico. Assim, quando se reencontram, José e Carlos não terão que ter a mesma idade, já que José permaneceu em um referencial inercial, enquanto Carlos sofreu acelerações.



## 9. TEORIA DA RELATIVIDADE GERAL

O estudo da Teoria da Relatividade Especial restringe-se apenas a referenciais inerciais, ou seja, referenciais não acelerados. Mas, como se comportam sistemas acelerados? Em 1907, Einstein propôs o que denominou de princípio da equivalência, o qual se tornou ponto de partida para uma nova teoria da Gravitação. Em 1916, ele publicou a Teoria da Relatividade Geral, que passou a considerar sistemas acelerados.

O princípio da equivalência consiste no seguinte: um referencial acelerado uniformemente em linha reta equivale a um campo gravitacional uniforme, ou seja, um foguete acelerado com  $a = g$  reproduz o campo gravitacional terrestre. O princípio da equivalência é fortemente confirmado pelas experiências.

Podemos concluir o seguinte: para um observador que esteja no interior de um recinto fechado, não existe nenhuma experiência física que permita distinguir se o local está sob a ação de um campo gravitacional uniforme ou se é um referencial acelerado.

Uma das consequências da Relatividade Geral é o que se denomina de curvatura da trajetória da luz, a qual foi comprovada em um eclipse total do Sol em 1919.

A Teoria da Relatividade Geral é fundamental para muitos campos de pesquisa, tanto teóricos como práticos, dentre os quais podemos destacar a Cosmologia, a Astrofísica e a procura da teoria do Campo Unificado. Muito já se descobriu, e muito ainda há para ser descoberto com os fundamentos das Teorias da Relatividade (Especial e Geral).

Como conclusão, podemos destacar que o impacto filosófico da Teoria da Relatividade sobre o nosso pensamento tem sido profundo desde sua criação até nossos dias, mudando radicalmente nossa visão de mundo e do Universo.





## REFERÊNCIAS

1. ARRUDA, S. M. Sobre as origens da relatividade especial: relação entre quanta e a relatividade especial em 1905. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 13, n. 1: p. 32-47, abr. 1996.
2. BARNETT, K. *O universo e o Dr. Einstein*. 3.ed. São Paulo: Melhoramentos. 98 p.
3. GASPAR, A. *Física*. São Paulo: Ática, 2002. v. 3: Eletromagnetismo e física moderna.
4. HELLMAN, H. *Grandes debates da ciência: dez das maiores contendas de todos os tempos*. São Paulo: UNESP, 1998. 277p.
5. LANDAU, L.; RUMER, Y. *Qué es la teoría de la relatividad*. Moscou, MIR, 1969. 63 p.
6. MARTINS, R. de A. Contribuição do conhecimento histórico ao ensino do Eletromagnetismo. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 5, p. 49-57, jun. 1988. n. especial.
7. OSTERMANN, F. ; RICCI, T. F. Relatividade restrita no ensino médio: os conceitos de massa relativística e de equivalência massa-energia em livros didáticos de Física. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*. Florianópolis, v. 21, n. 1: p. 83-102, abr. 2004.
8. 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*. Florianópolis, v. 19, n. 2: p. 176-190, ago. 2002.
9. RICCI, T. F. *Teoria da relatividade especial: física para secundaristas*. Porto Alegre, Instituto de Física –UFRGS, 2000. 36 p.
10. THUILLIER, P. *De Arquimedes a Einstein: a face oculta da investigação científica*. Rio de Janeiro: Jorge Zahar, 1994. 260 p.
11. TORRES, C. M. A. et al. *Física: ciência e tecnologia*. São Paulo: Moderna, 2001. 665 p.



## **Relatividade**

### **A passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein**

**Texto do professor**



## RELATIVIDADE

### A PASSAGEM DO ENFOQUE GALILEANO PARA A VISÃO DE EINSTEIN

#### TEXTO DE APOIO PARA APLICAÇÃO DO MATERIAL DIDÁTICO

Professor(a)!

Se você pretende contemplar o ensino da Teoria da Relatividade Especial em suas aulas de Física no ensino médio, este material poderá auxiliá-lo no desenvolvimento desse tópico. Temos aqui um material de apoio que deverá ser utilizado juntamente com o texto *Relatividade: a passagem do enfoque galileano para a visão de Einstein*, que foi elaborado para alunos de ensino médio e faz parte da Dissertação de Mestrado de Jeferson Wolff (Mestrado Profissional em Ensino de Física, UFRGS, 2005).

Mas, por que ensinarmos Teoria da Relatividade Especial a alunos do ensino médio?

A Física que comumente se ensina em nossas escolas de ensino médio é uma Física defasada em pelo menos 150 anos. Ensinamos aos nossos alunos: Mecânica, Hidrostática, Óptica, Eletricidade e Magnetismo e, quando muito, Eletromagnetismo. Quanto à Física Moderna, que foi desenvolvida no último século, na maioria das vezes sequer é comentada em sala de aula.

Porém, nossos alunos, devido à facilidade de obtenção de informação (jornais, revistas e principalmente internet), possuem muita curiosidade relacionada a assuntos de Física Moderna, como a possibilidade da viagem no tempo e o surgimento do Universo. Então, como formadores de opinião, temos a obrigação de trabalhar o ensino da Física Moderna ainda no ensino médio.

Muitos professores argumentam que não se ensina Física Moderna para o nível médio devido à falta de conhecimento matemático. Mas isto não é problema, pois depende da abordagem escolhida. Se o principal enfoque for mais conceitual, o professor se surpreenderá com a simplicidade de tais conceitos. A maior dificuldade (e também onde os alunos acabam apresentando maior interesse) é a forma inusitada de muitos conceitos, ou melhor, a mudança conceitual que deve ocorrer e que em muitas situações contraria o nosso senso comum.

Optamos por abordar o ensino da Teoria da Relatividade Especial por considerá-la um marco fundamental da Física Moderna. A abordagem dada no texto dos alunos possui como introdução a gênese da Teoria da Relatividade Especial, na qual começamos com o pensamento aristotélico, passando por grandes pensadores como Galileu, Newton e Maxwell, chegando até às conclusões de Einstein. O principal enfoque é apresentar aos alunos que a Física é uma contínua construção do pensamento humano, onde uma teoria está diretamente associada a outras teorias já existentes. Tivemos o cuidado de apresentar a história da evolução do conhecimento da Física de forma a deixar claro que cientistas como Newton e Einstein foram excepcionais, mas não descobriram suas teorias exclusivamente por genialidade.

Aconselhamos que este conteúdo seja desenvolvido com alunos da etapa final do ensino médio, pois já terão conhecimento de vários assuntos que abordaremos na gênese da Relatividade. Com isso, você terá apenas a preocupação de mostrar a parte histórica da evolução do conhecimento. Também consideramos que os alunos desta fase já estão mais maduros, com capacidade para compreender muitos dos conceitos abordados que contrariam o senso comum.

São necessárias aproximadamente vinte horas-aula para o desenvolvimento do presente material. A seguir, segue sugestão do número de aulas por tópico.

<b>Assunto</b>	<b>Número de aulas</b>
Pensamento aristotélico e Relatividade galileana	3 aulas
Isaac Newton e o movimento relativo dos corpos	1 aula
Histórico da Eletricidade e Magnetismo até a unificação	2 aulas
O problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica e a origem da Relatividade Especial	2 aulas
Relatividade da simultaneidade	1 aula
Dilatação temporal e contração do espaço	3 aulas
Adição de velocidades	1 aula
Energia relativística	2 aulas
Paradoxo dos gêmeos	1 aula
Introdução à Relatividade Geral	1 aula
Aulas para resolução de exercícios	3 aulas

## 1. TÓPICO: PENSAMENTO ARISTOTÉLICO E RELATIVIDADE GALILEANA

Este tópico é tratado nas seções *2.1 A Relatividade galileana* e *2.1.1. Transformações galileanas*. Começamos ilustrando o paradoxo de Zenão, que trata da velocidade relativa dos corpos. O paradoxo é respondido quando conseguimos verificar que a relatividade dos movimentos é questão fortemente ligada ao referencial adotado.

Achamos importante descrever o pensamento aristotélico, pois pode-se verificar que muitos alunos ainda possuem esta forma de pensar. O principal enfoque que se deve dar é que a forma como Aristóteles concebia a Natureza era puramente filosófica como, por exemplo, o fato de a matéria ser composta basicamente por quatro elementos: fogo, ar, água e terra. Estes elementos tinham posições determinadas no Universo, chamadas lugares naturais. Este pensamento permaneceu sem ser contestado mais veementemente até o século XVI.

O pensamento filosófico aristotélico começou a ser deixado de lado principalmente a partir de Galileu, quando a forma de se fazer ciência passou a ser mais matemática e com a valorização da experiência. É importante salientar neste ponto que não existe um método científico, pois muitos alunos acreditam em sua existência e que este deve ser seguido fielmente, tendo como primeiro passo a observação para somente em seguida se fazer uma lei que descreva tal observação. Para ilustrar que nem sempre primeiro se faz a observação para somente em seguida fazer uma lei que descreva tal fenômeno, cite o exemplo do Big Bang, pois existe uma teoria para o surgimento do Universo, mas nenhum dos que elaboraram tal teoria observou o Big Bang.

Outro ponto importantíssimo de ser frisado é o de se saber definir um referencial inercial, que é essencial para que se trabalhe a Relatividade de Einstein.

Quanto à Relatividade galileana (denominação dada por Einstein), os principais enfoques que devem ser trabalhados são os que se referem a tempo e espaço como absolutos, ou seja, um independe do outro, tendo como consequência a simultaneidade de eventos. Além disso, é importante trabalhar com os alunos a adição de velocidades da Relatividade galileana.

Sugerimos que, para ilustrar este tópico, sejam resolvidos os exercícios 1, 2 e 3 em aula.

### ***Respostas dos exercícios deste tópico:***

- 1) 7,5 km, em relação à origem de S.
- 2) As três principais características existentes na Relatividade galileana são de que tempo, espaço e simultaneidade de eventos são absolutos, ou seja, independem do referencial em que forem medidos.
- 3) Para que tenhamos um referencial inercial, a resultante das forças exercidas sobre este referencial deve ser nula, ou seja, o referencial não é acelerado, podendo estar em repouso ou em movimento uniforme em relação a outro referencial inercial. Já um referencial não inercial é acelerado.
- 4) Utilizaria, por exemplo, uma esfera. Colocaria em uma determinada posição e verificaria se a resultante das forças exercidas sobre a esfera é nula. Assim, seria verificado se a esfera permaneceu na mesma posição ou não. Se permaneceu, significa que temos um referencial inercial; se houve mudança na sua posição, é um referencial não inercial.

## 2. TÓPICO: ISAAC NEWTON E O MOVIMENTO RELATIVO DOS CORPOS

Este tópico inicia descrevendo um pouco a vida de Isaac Newton, um dos maiores cientistas de todos os tempos.

O principal objetivo deste tópico é ressaltar o fato de que massa e aceleração independem do referencial inercial em que estejam sendo medidos. É importante frisar que as Leis de Newton são iguais em qualquer sistema de referência inercial, o que servirá de base para a elaboração da Teoria da Relatividade Especial, sendo então importante salientar que isto vale para todas as leis físicas, não apenas as estabelecidas por Newton.

Deve-se destacar que Newton elaborou suas leis a partir do conhecimento existente na época e o próprio Newton chegou a dizer que, se enxergou mais longe, era porque estava sobre ombros de gigantes.

Finalmente, observar as transformações de velocidades de um referencial para outro, conforme apresentado na seção 2.2, principalmente as equações (5), (6) e (7).

## 3. TÓPICO: HISTÓRICO DA ELETRICIDADE E MAGNETISMO ATÉ A UNIFICAÇÃO

Para o desenvolvimento deste tópico deve-se abordar as seções 2.3. *O Eletromagnetismo*, 2.3.1. *A Eletricidade*, 2.3.2. *O Magnetismo*, 2.3.3. *O Eletromagnetismo - a unificação* e 2.3.4. *O Eletromagnetismo e Maxwell*.

Este tópico deve ser desenvolvido tendo-se, como principal objetivo, a construção e evolução do pensamento sobre estes dois ramos da ciência até a sua unificação, que trouxe consigo alguns paradoxos, entre os quais um que resultou na Teoria da Relatividade Especial.

Mas por que estudar a evolução do eletromagnetismo para a construção do conhecimento da Relatividade Especial?

Como bem sabemos, a luz é uma onda eletromagnética, mas isto somente foi concluído após a obtenção das equações de Maxwell. O segundo postulado refere-se diretamente à constância da velocidade da luz no vácuo, sendo assim uma conclusão direta das equações de Maxwell.

Tanto a parte histórica da eletricidade, quanto a do magnetismo têm seu início na Grécia, onde ainda não se conhecia bem a diferença entre os fenômenos elétricos e magnéticos. William Gilbert, em 1600, foi quem conseguiu fazer a separação entre estes dois ramos da Física, diferenciando os fenômenos elétricos dos fenômenos magnéticos.

Mas, as fortes evidências levaram Oesterd à observação de que estes dois fenômenos estão intimamente ligados. Aqui cabe ressaltar que Oesterd não descobriu por acaso a relação entre a Eletricidade e o Magnetismo, pois já conhecia indícios da relação entre estes dois fenômenos. Neste ponto é importante salientar ao aluno que esta descoberta, assim como outras, não são obras da mera casualidade, mas sim que já existia um conhecimento prévio que favoreceu a formação da nova teoria.



Com relação às equações de Maxwell, é necessário destacar que ele conseguiu unificar de forma matemática a Eletricidade e o Magnetismo com relações que já haviam sido desenvolvidas por outros cientistas. Maxwell também unificou a Eletricidade com o Magnetismo e a Óptica. É importante salientar esta questão, pois hoje estamos à procura de uma lei que consiga unificar todos os ramos da Física, algo que Maxwell conseguiu realizar, com três ramos diferentes da ciência.

Com o estabelecimento da natureza ondulatória da luz, surge um conflito para a época, pois, até então, apenas se conheciam ondas mecânicas que necessitam de um meio para se propagar. Mas as ondas eletromagnéticas, de acordo com as equações de Maxwell, não necessitavam de meio para sua propagação.

É importante reforçar que este conflito surgiu em uma época em que se achava que não havia mais nada a ser desenvolvido e que o conhecimento científico havia chegado ao fim.

Então, eis que surgiu um conflito: o de que uma onda eletromagnética não necessita de um meio para se propagar. Aqui, o professor deve enfatizar bem a origem deste conflito e a procura para salvar o conhecimento da época (a Mecânica e as equações de Maxwell, que estavam muito bem consolidados). Apesar de ser apresentado por muitos livros, não é este o conflito que dá origem à mudança conceitual que fez surgir a Teoria da Relatividade Especial.

Sugere-se que se resolva as questões 5, 6 e 7 em aula, gerando um debate junto aos alunos.

***Respostas dos exercícios deste tópico:***

**5) O desenvolvimento de uma nova teoria não obedece a nenhum método científico, ou seja, não há uma receita para se fazer ciência. Afirmar que todo o conhecimento científico sempre parte de uma observação é um grande equívoco, pois temos vários exemplos que ilustram que primeiro foi desenvolvida a teoria para somente depois se fazer a observação, isto quando é possível. Um exemplo é a Teoria do Big Bang.**

**6) Exemplo: A Teoria do Eletromagnetismo desenvolveu-se a partir dos conhecimentos já existentes da Eletricidade e do Magnetismo. Já a Teoria da Relatividade foi desenvolvida a partir das equações de Maxwell e de conflitos com a Relatividade galileana.**

**7) Maxwell conseguiu unificar com suas equações a Eletricidade, o Magnetismo e a Óptica, no Eletromagnetismo.**

**8) O conflito que surgiu com o estabelecimento da natureza ondulatória da luz era que as equações de Maxwell descreviam uma onda que podia se propagar no vácuo. Então, eis o conflito da época: como uma onda irá se propagar mesmo no vácuo, se apenas se tinha conhecimento de ondas mecânicas que necessitam de um meio material para se propagar?**

#### 4. TÓPICO: O PROBLEMA DO ELETROMAGNETISMO COM A MECÂNICA CLÁSSICA E A ORIGEM DA RELATIVIDADE ESPECIAL

Para o desenvolvimento deste tópico deve-se abordar as seções 2.3.5. *Problema do Eletromagnetismo com a Mecânica clássica* e 2.4. *Einstein e a origem da Relatividade Especial*.

Ao chegar a este tópico, é normal que o aluno comece a questionar: Mas, afinal, o que é esta tal de Teoria da Relatividade Especial? Pois até o momento já foram trabalhadas seis aulas e nada ainda foi abordado sobre a Relatividade Especial em específico.

Desse modo, este tópico torna-se essencial, pois os assuntos desenvolvidos até o momento serão fundamentais para o entendimento de onde e por que surgiu esta teoria.

O professor deve começar abordando a dificuldade em se detectar o tal do éter, o qual seria um meio hipotético onde a luz se propagaria. Comentar as tentativas de Michelson e Morley em detectar o éter através de um instrumento denominado interferômetro. Mas, pode-se observar que no texto dos alunos não nos preocupamos em descrever como era o funcionamento deste instrumento e as possíveis explicações dadas por Michelson e Morley para a não detecção do éter. Isto, porque não foi a partir dos resultados negativos destes experimentos que Einstein elaborou a sua Teoria da Relatividade.

Existia um outro paradoxo, que consistia no seguinte: as equações de Maxwell descreviam perfeitamente os fenômenos elétricos e magnéticos num determinado referencial inercial, como manifestação de um único fenômeno. Porém, quando passamos para um outro referencial inercial, utilizando as transformadas de Galileu, as equações de Maxwell forneciam resultados conflitantes. Explicações mais detalhadas deste paradoxo podem ser obtidas em RICCI, Trieste F. **Física para secundaristas: Teoria da Relatividade Especial**. Porto Alegre, Instituto de Física – UFRGS, 2000. p. 6-8.

Quando for tratada a seção 2.4., deverá ser dada uma grande ênfase aos dois postulados da Relatividade, descrevendo quais foram algumas das conseqüências que serão abordadas nos próximos capítulos como, por exemplo, que tempo e espaço deixam de ser absolutos e passam a depender do referencial em que forem medidos.

Além deste material indicamos uma pesquisa no *site* [www.if.ufrgs.br/einstein](http://www.if.ufrgs.br/einstein), do Prof. Dr. Carlos Alberto dos Santos, do Instituto de Física da UFRGS. Aí você encontrará uma biografia de Einstein, assim como uma abordagem interessante da Teoria da Relatividade Especial. Este *site* pode ser também uma ótima fonte de pesquisa para os alunos.

Ao final deste tópico sugerimos que sejam resolvidos os exercícios 9, 10 e 11, em aula.

##### **Respostas dos exercícios deste tópico:**

9) Além do conflito existente referente ao comportamento ondulatório das ondas eletromagnéticas, também surgiu um outro conflito que consistia no fato das equações de Maxwell não apresentarem o mesmo resultado para dois referenciais inerciais distintos, o que levava à conclusão de que existia um referencial inercial privilegiado: ou as equações de Maxwell deveriam ser modificadas ou a Relatividade galileana deveria ser reescrita.

10) Além dos já unificados pelo Eletromagnetismo (Eletricidade, Magnetismo e Óptica), conseguiu relacionar a Mecânica com o Eletromagnetismo.

11) As leis da Física são iguais em qualquer referencial inercial, ou seja, não existe referencial inercial preferencial; a luz sempre se propaga no espaço vazio com uma rapidez definida, que é independente do estado de movimento do corpo emissor. O primeiro postulado está associado diretamente às leis da Mecânica, Termodinâmica, Óptica e do Eletromagnetismo, ou seja, é uma generalização do princípio da Relatividade galileana e de Newton que se aplicava apenas à Mecânica. Esta generalização de várias leis somente foi possível graças à modificação dos conceitos de espaço e tempo. O segundo postulado trouxe, entre algumas consequências, a de que nenhuma partícula pode se deslocar com velocidade superior à da luz.

12) 0,7777.c

## 5. TÓPICO: RELATIVIDADE DA SIMULTANEIDADE

Este tópico deve ser abordado utilizando-se o capítulo 3. *Relatividade da simultaneidade*. Tem-se como principal objetivo que o aluno, ao final deste tópico, seja capaz de compreender que dois eventos que são simultâneos em um determinado referencial inercial não serão necessariamente simultâneos em outro referencial inercial. Como sugestão didática, reproduza a figura 7 do texto dos alunos, para ilustrar a relatividade da simultaneidade.

Aconselha-se resolver em aula os exercícios 13 e 14.

### *Respostas dos exercícios deste tópico:*

13) Devido à invariância da rapidez da luz, ou seja, a luz propaga-se em todas as direções com a mesma rapidez em qualquer referencial inercial. Se a luz tivesse velocidade infinita, aí teríamos simultaneidade de eventos em qualquer referencial inercial.

14) Sim, desde que esses eventos não ocorram no mesmo lugar do espaço. Caso dois eventos ocorram em um mesmo lugar não é possível uma inversão de sua ordem cronológica, ou seja, não é possível que o evento B ocorra antes que o evento A em qualquer outro referencial. Se os eventos não ocorrerem no mesmo local do espaço, poderemos ter uma inversão de observação desses eventos. Na Figura 13 o observador  $S_1$ , que se encontra no interior do trem que se desloca com uma velocidade  $\vec{V}_1$  para a direita, irá observar primeiro a ocorrência do evento B e, após, a do evento A. Já na Figura 14 o observador  $S_2$ , que se encontra no interior do trem que se desloca com uma velocidade  $\vec{V}_2$  para a esquerda, irá observar primeiro a ocorrência do evento A e, após, a do evento B. Assim, podemos concluir que o observador  $S_0$ , nas duas situações, vê os dois eventos simultaneamente, e os observadores  $S_1$  e  $S_2$  verão os eventos em ordem cronológica inversa. Para as duas situações, consideramos  $V_1$  e  $V_2$  iguais:  $V_1 = V_2 = V$ .

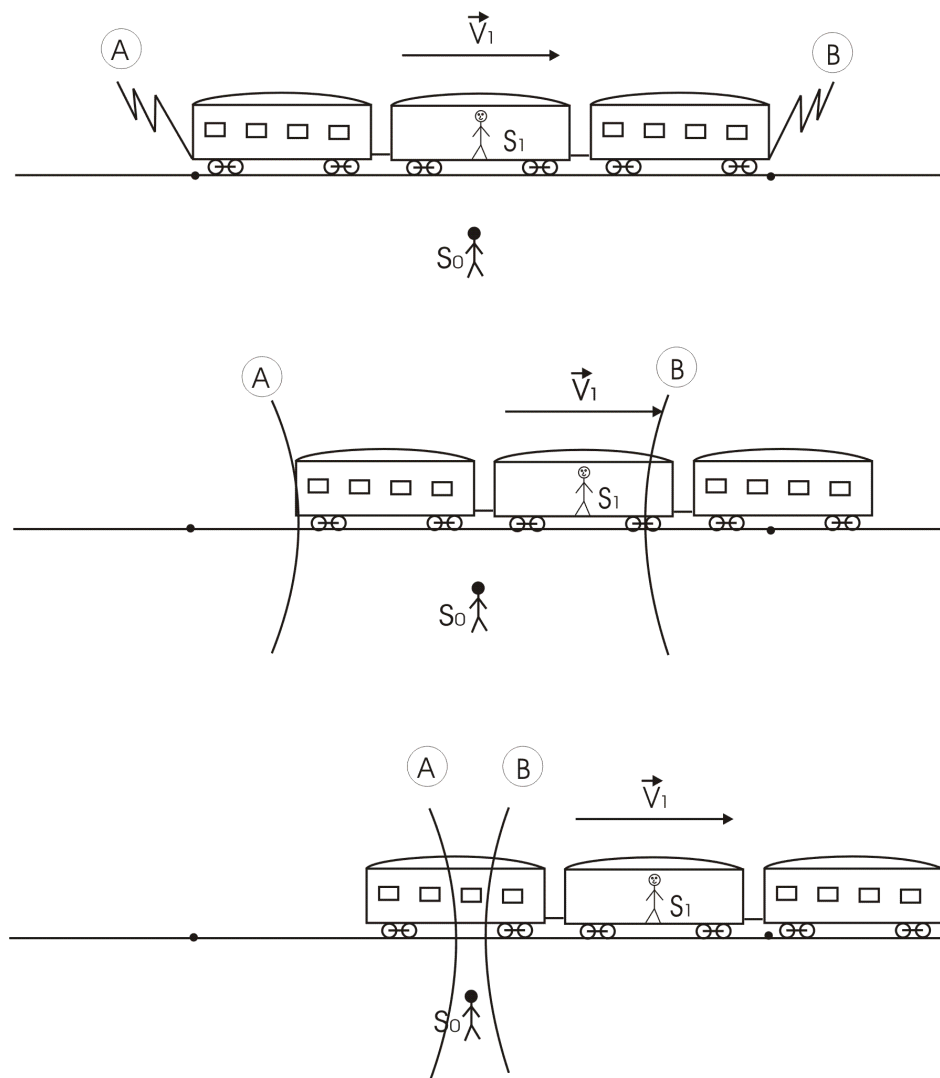


Figura 13

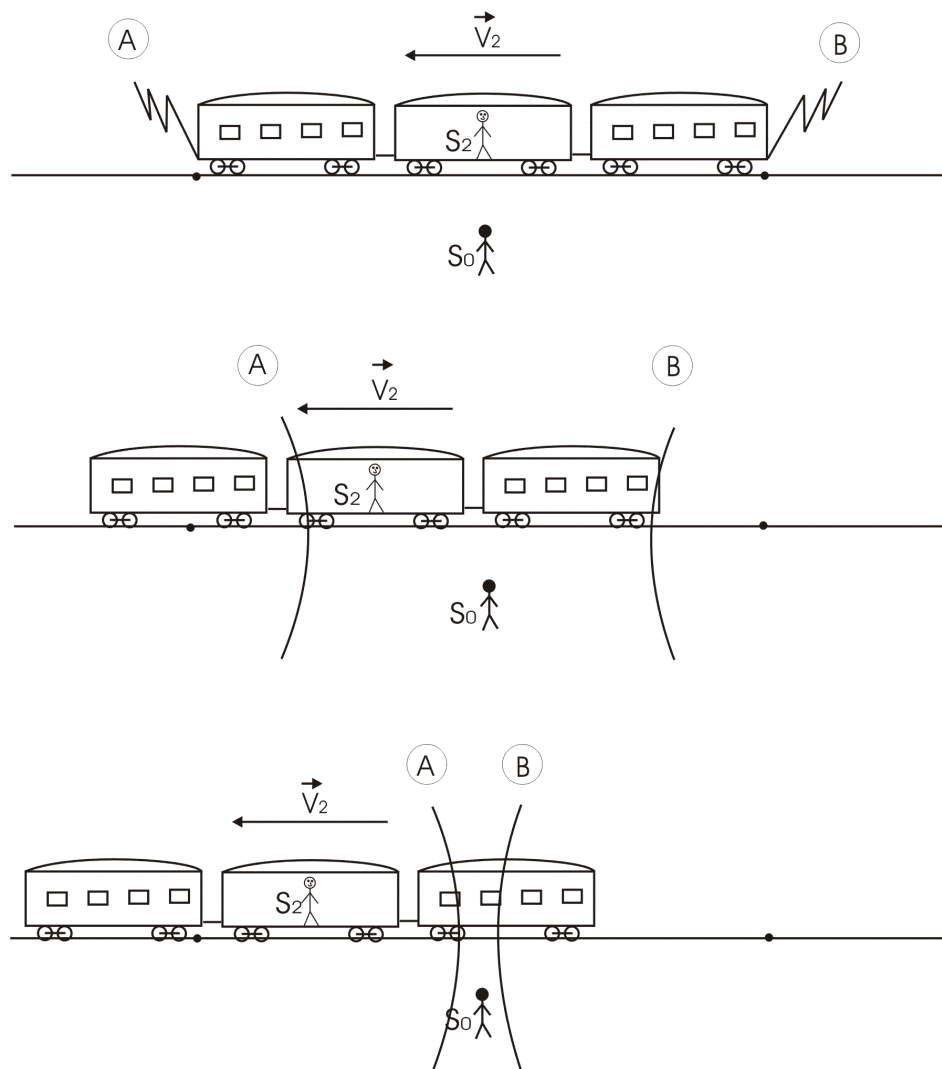


Figura 14

## 6. TÓPICO: DILATAÇÃO TEMPORAL E CONTRAÇÃO DO ESPAÇO

Este tópico deve ser abordado utilizando os capítulos 4. *Dilatação temporal* e 5. *Contração do espaço*. O principal objetivo deste tópico é que os alunos consigam compreender que tempo e espaço deixam de ser absolutos e passam a ser relativos, ou seja, dependerão do referencial em que forem medidos.

Sugerimos que se faça a dedução da equação (11), conforme está apresentada no capítulo 4. Você pode verificar que a dedução é bem simples, exigindo-se apenas o conhecimento do teorema de Pitágoras. Consideramos que é necessário realizar esta dedução com os alunos, pois fica muito mais claro o porquê da importância dos referenciais inerciais para a dilatação temporal.

Para o aluno deve ficar bem claro o conceito de tempo próprio. Refaça os exemplos 1 e 2 e recomendamos que os exercícios 15 e 17 sejam feitos em aula com os alunos.

Ao final da apresentação desta primeira parte do tópico muitos alunos começarão a questionar a validade da Relatividade Especial pois, em nosso cotidiano, não verificamos tal mudança temporal de um referencial inercial para outro. Pode-se dar uma resposta bem simples, pois para nós as velocidades são insignificantes em comparação à velocidade da luz.

Quanto à contração do comprimento, é uma consequência direta do segundo postulado. Assim como com a dilatação temporal, faça também a dedução da equação (15) com os alunos. É importante salientar que o comprimento próprio é o comprimento medido para quem está em repouso em relação ao objeto medido, e o comprimento contraído é o comprimento medido para quem está em movimento relativo.

Existem duas interpretações dadas para a contração do comprimento: a primeira, dada por Lorentz e FitzGerald, onde a contração era resultado da modificação da estrutura da matéria: o éter (meio hipotético onde a luz se propagava) afetava as forças moleculares; e a segunda, dada por Einstein, onde a contração do comprimento passou a ter um outro significado, deixando de ser uma contração que afetaria a estrutura da matéria e passou a ser uma contração devido à aparência visual dos objetos em movimento relativo. Muitos livros de ensino médio ainda dão uma abordagem onde o comprimento dos corpos é afetado pelo movimento, ou seja, que há uma diminuição do comprimento no sentido do movimento. Mas é importante deixar claro que não ocorre uma mudança na estrutura, uma diminuição do comprimento, mas sim uma contração que não passa de uma aparência visual, que irá depender do referencial em que medirmos.

É importante que se refaça o exemplo 3 e os exercícios 18 e 19 em aula, relacionados com a contração do comprimento.

Gostaríamos de ressaltar que as deduções apresentadas no texto dos alunos não foram as mesmas utilizadas por Einstein para a dilatação temporal, nem para a contração do comprimento. Utilizamos estas duas deduções por considerarmos serem mais didáticas para o entendimento de nosso aluno. Caso esteja interessado, sugerimos que observe a dedução utilizada por Einstein, que foi elaborada por Lorentz, em RESNICK, Robert. **Introdução à Relatividade Especial**; São Paulo, Polígono, 1971. Capítulo 2.2 *Dedução das equações de Transformação de Lorentz*. Páginas 60-66.

Como exemplo de aplicação da Teoria da Relatividade Especial, utilize o da detecção dos múons, partículas originadas pelos raios cósmicos que se deslocam com velocidade aproximadamente igual à da luz com um tempo de vida muito pequeno, da ordem de  $2,0 \cdot 10^{-6}$  s, o tempo próprio do múon. Sendo assim, antes que a partícula se desintegre por completo, percorrerá uma distância de aproximadamente 600 m, comprimento próprio do múon, uma distância muito menor que a altura da atmosfera terrestre. Porém, uma quantidade de múons muito maior que a esperada consegue atingir a superfície da Terra e a explicação para este paradoxo é a Relatividade Especial, pois ocorre uma dilatação temporal (tempo dilatado) para quem está na Terra, ou seja, na verdade, o múon percorre uma distância maior para que possa atingir a superfície da Terra, isto sendo uma consequência da dilatação temporal.

**Respostas dos exercícios deste tópico:**

15) 0,87.c.

16) 20 anos.

17) a) 0,999999875.c; b) Se a viagem for realizada em círculos, a espaçonave deixará de ser um referencial inercial e passará a ser um referencial não inercial, mesmo que permaneça se deslocando com rapidez constante. Então, este fenômeno não poderá ser descrito pela Relatividade Especial.

18) 1,43 m.

19) a) 78,95 m; b)  $3,1 \cdot 10^{-7}$  s.

20)  $1,05 \cdot 10^{-5}$  %.

## 7. TÓPICO: ADIÇÃO DE VELOCIDADES

Para este tópico, deve-se abordar o capítulo 6. *Adição de velocidades na Relatividade Especial* e deve-se começar lembrando a adição de velocidades de Galileu. Deve-se ainda refazer o exemplo que é apresentado neste capítulo, onde teremos um resultado para a velocidade relativa superior à velocidade da luz, o que está em desacordo com as consequências da Relatividade Especial.

Para a adição de velocidades, devemos utilizar as equações (18) e (19). Não realizamos a dedução destas equações por considerá-la um tanto complexa para alunos de ensino médio.

Neste tópico é importante salientar, para que não gere confusão junto aos alunos, que:

$V$  é o módulo da velocidade de  $S'$  em relação a  $S$ ;

$v'$  é o módulo da velocidade da pessoa em relação a  $S'$ ;

$v$  é o módulo da velocidade da pessoa, como vista pelo observador em  $S$ .

Aconselhamos que se refaça o exemplo 4 e o exercício 22 em aula.

**Respostas dos exercícios deste tópico:**

21) 0,85.c.

22) a) 1,6.c; b) 0,98.c.

## 8. TÓPICO: ENERGIA RELATIVÍSTICA

Este tópico contempla o capítulo 7 do texto dos alunos. Temos como principal objetivo que o aluno seja capaz de compreender a relação entre massa e energia apresentada pela Relatividade Especial.

Assim como no capítulo 6, onde não fizemos a dedução das equações, aqui também optamos em não realizar a dedução da equação para a energia total de um corpo. Estamos mais preocupados com a interpretação desta relação, com seu significado teórico.

É essencial destacar que a equação (21) tem o significado de que à medida que um corpo aumenta a sua velocidade, aumenta o seu conteúdo energético. A explicação para que um corpo não possa atingir velocidades superiores à da luz é que, para isto, seria necessária uma quantidade infinita de energia. Utilizando a equação (21), faça junto com os alunos um exemplo utilizando  $v = c$  e verifique que o denominador se anula. Se o denominador de uma fração tende para zero, isto implica que o resultado tende para o infinito.

Uma interpretação dada por muitos autores é a de que existe uma massa relativística. Mas o que consideramos mais coerente é identificarmos a energia de repouso (equação (20)) e verificarmos que, à medida que um corpo aumenta a sua velocidade, temos um aumento na energia cinética desse corpo e, no caso de objeto de massa não nula, sua energia tende a um valor infinito enquanto a velocidade se aproxima de  $c$ . O próprio Einstein, inicialmente, adotou a interpretação de Lorentz de massa relativística, para logo em seguida abandoná-lo como inconveniente.

Resolva em aula o exemplo 6 e os exercícios 23, 25 e 26.

### ***Respostas dos exercícios deste tópico:***

**23)  $1,2 \cdot 10^{-8}$  kg.**

**24) a) 0,8%; b) 53,7%.**

**25)  $0,85 \cdot c$**

**26) Será necessária uma quantidade infinita de energia para qualquer corpo que possua massa.**



## 9. TÓPICO: PARADOXO DOS GÊMEOS

Este tópico contempla o capítulo 8. *Paradoxo dos Gêmeos*. Optou-se por escolher o paradoxo dos gêmeos por este ser um clássico dentro da Relatividade Especial.

O paradoxo consiste no seguinte. Dois gêmeos: um fará uma viagem e o outro permanecerá em Terra. O que vai viajar, desloca-se com velocidade relativística. Quando retorna para a Terra, encontra seu irmão gêmeo mais envelhecido que ele. Muitos textos consideram que este é o paradoxo: como que seu irmão gêmeo terá envelhecido mais que ele? Mas, quanto a isto, se fizermos os cálculos conforme encontra-se no capítulo 8 do texto dos alunos, não há nenhum problema, ou seja, está de acordo com a Relatividade Especial. Claro que para nosso senso comum isto é quase um absurdo. Mas, na realidade, se escolhermos como referencial em repouso a Terra, quem estará em movimento é a nave e quem permaneceu em Terra irá envelhecer mais rapidamente. Porém, se escolhermos a nave como referencial inercial em repouso, verificaremos que, nesta situação, quem estará em movimento será o irmão que permaneceu na Terra e, agora, quem irá envelhecer mais rapidamente será quem permaneceu na nave. Então, eis o paradoxo: dependendo do referencial que escolher, um ou outro irmão irá envelhecer mais rapidamente. Quem de fato envelhece mais é o irmão que permaneceu na Terra, pois o problema não é simétrico, ou seja, a nave não pode ser considerada um referencial inercial, pois terá momentos de aceleração, para alterar a velocidade, inclusive porque, retornando à Terra não terá sempre uma trajetória retilínea.

Para este tópico, achamos importante reservar uma aula inteira, pois é importante esclarecer qual é o paradoxo e como resolvê-lo.

## 10. TÓPICO: INTRODUÇÃO À RELATIVIDADE GERAL

O último tópico está relacionado ao capítulo 9. *Teoria da Relatividade Geral*. Neste capítulo, apenas fazemos um comentário rápido sobre o que é a Teoria da Relatividade Geral, onde temos como principal objetivo o de que o aluno saiba que para referenciais não inerciais devemos utilizar os conceitos da Relatividade Geral. É importante salientar que esta teoria hoje é a base do conhecimento da cosmologia, com ampla aplicação em questões como o surgimento do Universo.

Assim como no tópico do paradoxo dos gêmeos, achamos importante deixar uma aula inteira reservada para discussões desse tópico, pois em geral os alunos apresentam grande interesse por este assunto.

## 11. TÓPICO: EXERCÍCIOS

Ao final do desenvolvimento do material com os alunos, algumas aulas devem ser direcionadas para a resolução de exercícios e discussões em geral. Também, se o professor tiver interesse em aplicar uma prova, como uma das formas de avaliação, esta poderá ser incluída nessa etapa.

## 12. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O ensino médio vem passando por algumas mudanças. Porém, estas mudanças estão sendo um tanto quanto lentas. É inaceitável que ainda não estejamos ensinando a Física do século XX. Esperamos, senhor (a) professor (a), que este material lhe seja de utilidade no desenvolvimento do ensino de uma Física mais atualizada.

Temos, como função, formar alunos que tenham condições de dar opiniões sobre os mais diversos assuntos. Citando Pietrocola<sup>3</sup>, *Hoje, ser Alfabetizado Científica e Tecnologicamente*<sup>4</sup> (ACT) é uma necessidade do cidadão moderno.

Assim, é inexplicável que não sejam mais explorados, ou mesmo introduzidos no ensino médio, conteúdos de Física Moderna. Podemos citar Terrazzan<sup>5</sup> (1992), que afirma: *A influência crescente dos conteúdos de Física Moderna e Contemporânea para o entendimento do mundo criado pelo homem atual, bem como a inserção consciente, participativa e modificadora do cidadão neste mundo, define, por si só, a necessidade de debatermos e estabelecermos as formas de abordar tais conteúdos na escola de 2º grau*<sup>6</sup>.

Cientes da preocupação dos professores em atualizarem-se e procurarem ensinar uma Física mais atual, esperamos que este material seja de valia para seu trabalho com nossos alunos do ensino médio.

---

<sup>3</sup> PIETROCOLA, Maurício. Ensino de Física – Conteúdo, Metodologia e Epistemologia numa Concepção Integradora. Ed. da UFSC, 2001. 236p.

<sup>4</sup> Pietrocola utiliza, ao invés da expressão Alfabetização Científica e Tecnológica, a expressão Alfabetização Científica e Técnica.

<sup>5</sup> TERRAZZAN, Eduardo Adolfo. A inserção da Física Moderna e Contemporânea no Ensino de Física na Escola de 2º Grau. **Caderno Catarinense de Ensino de Física**, Florianópolis v. 9, n. 3: p. 209-214, dezembro de 1992.

<sup>6</sup> O artigo referido foi publicado em 1992, quando ainda se utilizava a terminologia segundo grau, ao invés de ensino médio.

Instituto de Física – UFRGS  
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física

**Textos de Apoio ao Professor de Física**

n° 1: Um Programa de Atividades sobre Tópicos de Física para a 8ª Série do 1º Grau.  
Axt, R., Steffani, M.H. e Guimarães, V. H., 1990.

n° 2: Radioatividade  
Brückmann, M.E. e Fries, S.G., 1991.

n° 3: Mapas Conceituais no Ensino de Física  
Moreira, M.A, 1992.

n° 4: Um Laboratório de Física para Ensino Médio  
Axt, R e Brückmann, M.E., 1993.

n° 5: Física para Secundaristas – Fenômenos Mecânicos e Térmicos.  
Axt, R. e Alves, V.M., 1994.

n° 6: Física para Secundaristas – Eletromagnetismo e Óptica.  
Axt, R e Alves, V.M., 1995.

n° 7: Diagramas V no Ensino de Física.  
Moreira, M.A, 1996.

n° 8: Supercondutividade – Uma proposta de inserção no Ensino Médio.  
Ostermann, F., Ferreira, L.M. e Cavalcanti, C.H., 1997.

n° 9: Energia, entropia e irreversibilidade.  
Moreira, M.A. 1998.

n° 10: Teorias construtivistas.  
Moreira, M.A, e Ostermann, F., 1999.

n° 11: Teoria da relatividade especial.  
Ricci, T.F., 2000.

n° 12: Partículas elementares e interações fundamentais.  
Ostermann, F., 2001.

n°13: Introdução à Mecânica Quântica. Notas de curso.

Greca, I.M. e Herscovitz, V. E., 2002.

n°14: Uma introdução conceitual à Mecânica Quântica para professores do ensino médio.

Ricci, T. F. e Ostermann, F., 2003.

n°15: O quarto estado da matéria.

Ziebell, L. F. 2004.

v.16, n° 1 Atividades experimentais de Física para crianças de 7 a 10 anos de idade.

Schroeder, C., 2005.

v. 16, n° 2 O microcomputador como instrumento de medida no laboratório didático de Física.

Silva, L. F. da e Veit, E. A., 2005.

v. 16, n° 3 Epistemologias do Século XX

Massoni, N.T., 2005.

v. 16, n° 4 Atividades de Ciências para a 8ª série do Ensino Fundamental: Astronomia, luz e cores

Mees, A. A., Andrade, C. T. J. e Steffani, M. H., 2005.