

## CAPÍTULO I

### "A RELATIVIDADE QUE ESTAMOS ACOSTUMADOS"

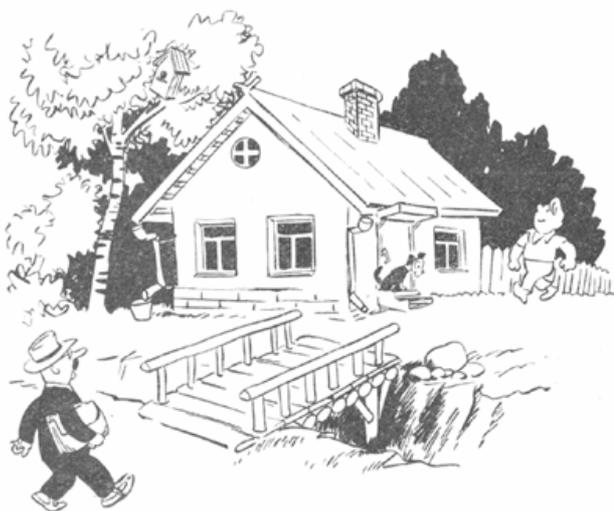
#### 1.1- TODA AFIRMAÇÃO FAZ SENTIDO?

Obviamente que não. Mesmo se tomarmos algumas palavras e as juntarmos em estrito acordo com as regras da gramática, o resultado pode ficar completamente sem sentido, Não existe sentido algum, por exemplo, na afirmação: "a água é triangular".

Entretanto, nem tudo que não tem sentido é assim tão óbvio. Muito freqüentemente, uma afirmação que parece muito razoável à primeira vista torna-se absolutamente sem sentido numa investigação mais profunda.

#### 1.2 - DIREITO OU ESQUERDO?

De que lado da rua - direito ou esquerdo - está a casa? Você não pode possivelmente responder a esta questão de imediato.



Se você vai pela ponte até o bosque, ela estará no seu lado esquerdo, e se você vai à direção oposta, ela estará no seu lado direito. Falando-se dos lados direito ou esquerdo de uma rua, você deve mencionar a direção relativa.

É totalmente certo falar da margem direita de um rio, porque sua correnteza determina a direção. Podemos, analogamente, dizer que um veículo automotor viaja ao longo da faixa da direita de uma rodovia, porque o fluxo do tráfego indica a direção relativa.

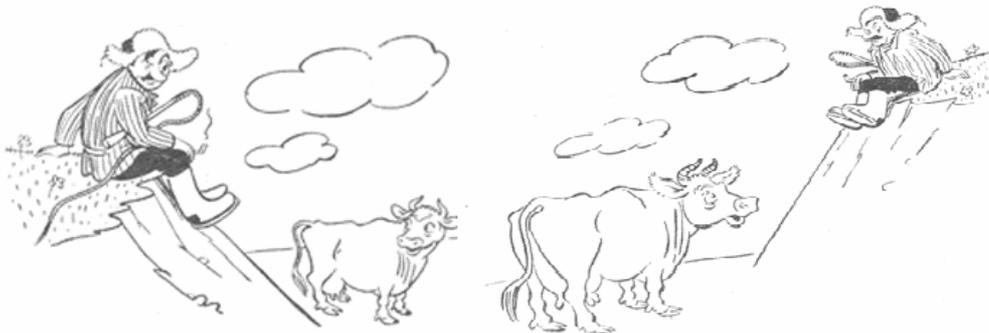
As noções "direito" e "esquerdo" são, portanto relativas, e faz sentido somente quando uma direção é dada para nos orientar.

### 1.3 É DIA OU NOITE AGORA?

A resposta depende da localização. Quando é dia em Moscou, é noite em Vladivostok. Não existe um paradoxo aqui. Simplesmente, "dia" e "noite" são noções relativas e você não pode responder a questão sem se referir ao local.

### 1.4 QUEM É MAIOR?

Na figura abaixo, o "boiadeiro" é obviamente maior do que o boi. Na outra figura o boi é maior que o boiadeiro. Isto não é uma incongruência. As duas figuras foram desenhadas de dois ângulos diferentes - um mais perto do boi, e o outro mais perto do boiadeiro. Não são as dimensões verdadeiras de um objeto que são essenciais para um desenhista, mas o ângulo sob o qual ele está vendo. E estas dimensões angulares dos objetos são obviamente muito relativas.



Não tem sentido falar sobre dimensões angulares dos objetos a menos que estes sejam definidos no espaço. Por exemplo, não existe sentido em dizer que uma torre é vista de um ângulo de 45°. Mas se você disser que uma torre afastada 15 metros de você é vista sob um ângulo de 45°, é bastante razoável. Ainda mais, conclui-se que a torre tem 15 metros de altura.

### 1.5 - O RELATIVO PARECE ABSOLUTO.

Se mudarmos nosso ponto de observação ligeiramente, as dimensões angulares também mudarão ligeiramente. Por isso é que as medidas angulares são freqüentemente usadas na astronomia. Mapas estelares são supridos com distâncias angulares entre estrelas, i.é, os ângulos em que a distância entre as estrelas é vista da Terra.

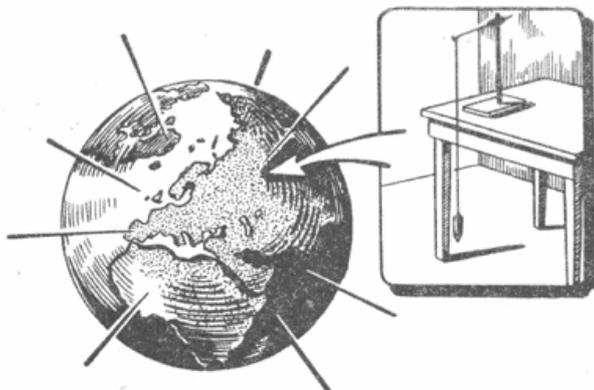
Independentemente de nosso movimento na Terra, e independentemente do nosso ponto de observação, nós sempre vemos as estrelas numa e na mesma distância uma da outra. Isto é devido a tremenda, inconcebivelmente grande, distância que separa-nos das estrelas. Comparando a elas nosso movimento na Terra de um lugar para o outro, é tão insignificante que podemos simplesmente desprezá-los. Ainda mais, neste caso, as distâncias angulares podem ser assumidas como distâncias absolutas.

Se tomarmos a translação da Terra ao redor do Sol em consideração, a variação das medidas angulares tornam-se notáveis, embora ligeiramente significativas. A situação mudaria radicalmente, se transferíssemos nosso ponto de observação para alguma estrela - Sírius, por exemplo. Todas as medidas angulares seriam diferentes, e encontraríamos as estrelas que estão afastadas no nosso céu: muito juntas umas das outras, e vice-versa.

#### 1.6- O ABSOLUTO TORNA-SE RELATIVO.

Freqüentemente dizemos "para cima" e "para baixo". Estas noções são absolutas ou relativas?

Em tempos diferentes as pessoas deram diferentes respostas a esta questão. Quando as pessoas não sabiam que nossa Terra era redonda e a imaginavam ser tão plana quanto uma pizza, a direção vertical foi considerada como um conceito absoluto. Foi assumido que a direção vertical era -uma única, em todos os pontos da superfície terrestre e que era muito natural falar do "para cima" absoluto" e do "para baixo" absoluto.



Quando foi descoberto que a Terra era redonda, a noção de "vertical" desabou.

Realmente, a Terra é redonda, a direção de uma linha vertical depende essencialmente da posição do ponto na superfície terrestre através do qual aquela linha passa.

Em diferentes pontos do globo a direção vertical será diferente. Desde que as noções "para cima" e "para baixo" dessa forma perdem o sentido, a menos que o ponto exato da superfície da Terra seja especificado, o absoluto torna-se relativo. Não existe uma direção vertical -no Universo. Ainda mais, para qualquer direção no espaço podemos especificar um ponto na superfície terrestre no qual esta direção será vertical.

### 1.7- PROTESTO AO "SENSO COMUM".

Tudo isso parece óbvio para nós hoje e não temos a mínima dúvida. Contudo, sabemos da História que não tem sido fácil para os seres humanos perceberem a relatividade de "para cima" e "para baixo". As pessoas estão inclinadas a atribuírem um sentido absoluto aos conceitos se a sua relatividade não for evidente na experiência diária (como no caso do "direito" e "esquerdo").

Vamos recordar a absurda objeção ao fato que a Terra era redonda que veio até nós lá da idade média: como, diziam, podem as pessoas andarem de ponta cabeça?!

Este argumento está errado porque não considera a relatividade da direção vertical que provém do fato da Terra ser redonda.

Se nós não reconhecermos a relatividade da direção vertical e a tomarmos como absoluta em Moscou, p.ex. , então, naturalmente, as pessoas em Nova Zelândia estarão andando de pernas para cima. Mas, lembre-se que para os Novo-Zelandeses nós Moscovitas, igualmente, estamos andando de ponta-cabeça. Não existe nisto contradição de modo algum, desde que a direção vertical não é realmente um conceito absoluto, mas relativo.

Começamos sentir o verdadeiro significado da relatividade da direção vertical somente quando consideramos dois pontos suficientemente afastados na superfície Terrestre - Moscou e Nova Zelândia, p. ex.. Se, -por um lado, tomarmos dois pontos que estão próximos um do outro, duas casas em Moscou, por exemplo, é justificável a consideração de que -todas as verticais neles serem praticamente paralelas, i.é, absolutas.

Somente quando tratamos com áreas comparáveis em tamanho com a da superfície terrestre que a tentativa de aplicarmos uma vertical absoluta conduz a absurdos e contradições.

Os exemplos que foram discutidos acima mostram que muitos dos -conceitos que usamos na nossa vida diária são relativos, que eles fazem sentido somente quando especificamos as condições de observação.

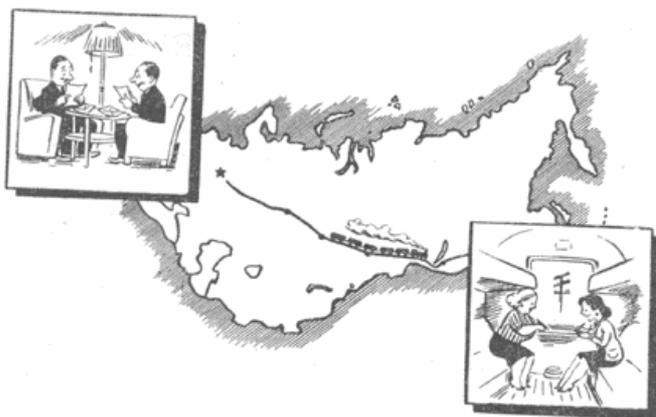
## CAPÍTULO II

### O ESPAÇO É RELATIVO

#### 2.1- NUM MESMO LUGAR OU NÃO?

Freqüentemente dizemos que dois eventos ocorreram num mesmo lugar e tendemos atribuir significado absoluto à nossa afirmação. Mas, na realidade não significa nada. É o mesmo que dizer, "são 5 horas agora" , sem especificar onde - em Moscou ou Chicago.

Para entender isto apropriadamente, vamos imaginar que duas viajantes combinaram se encontrarem todos os dias num mesmo compartimento a bordo do expresso Moscou-Vladivostok e escreverem cartas a seus maridos. Seus maridos dificilmente concordariam se dissermos a eles que suas esposas encontraram-se sempre num mesmo ponto do espaço. Eles diriam que estes pontos estavam centenas de quilômetros afastados, e estariam totalmente certos. Eles não receberam as cartas de diferentes cidades - Yaroslavl, Perm , Sverdlovsk, Tumen, Omsk, e Khabarovsk sucessivamente?



Estes dois eventos - escrever cartas no primeiro e no segundo dia da viagem - ocorreram num mesmo lugar do ponto de vista das esposas e em lugares afastados centenas de quilômetros do ponto de vista de seus maridos.

Quem estava certo - os maridos ou as esposas? Não temos fundamentos para tomarmos o partido de um ou de outro. É muito evidente para nós que o conceito "num mesmo lugar no espaço" é relativo.

Similarmente, a afirmação que duas estrelas no céu coincidem -faz sentido somente se especificarmos que elas têm sido observadas da Terra. Dois eventos podem ser ditos coincidentes no espaço somente se mencionarmos os corpos em relação aos quais os eventos são localizados.

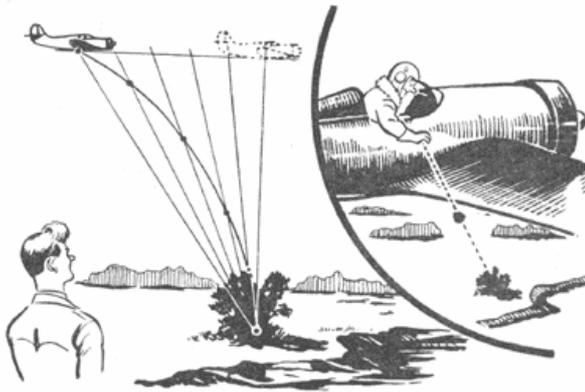
Assim, o conceito de posição no espaço é também relativo. Quando falamos de posição de um corpo no espaço nós sempre implicamos sua posição relativa a outros corpos. Se não mencionarmos outros corpos na nossa resposta à questão concernente a posição de um dado corpo, a questão perderá o sentido.

## 2.2 - COMO UM CORPO REALMENTE SE MOVE.

Segue que o conceito de "transferência de um corpo no espaço" é também relativo. Se dissermos que o corpo foi deslocado no espaço, queremos dizer que ele meramente mudou sua posição relativa a outros corpos.

Se observarmos o movimento de um corpo de vários pontos que alteram suas posições relativas, notaremos que seu movimento varia.

Uma pedra atirada de uma aeronave cai em linha reta relativa ao avião, mas descreve uma curva, conhecida como uma parábola, relativa à Terra.



Como a pedra viaja na realidade?

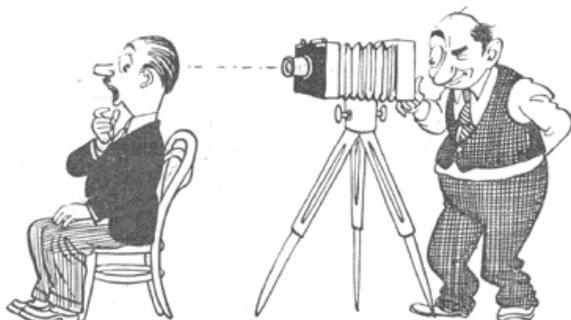
Existe tão pouco sentido nesta questão quanto naquela uma sobre o ângulo em que a Lua é vista na realidade. Se observada do Sol, ou da Terra?

A forma geométrica da curva ao longo da qual um corpo se movimenta é exatamente tão relativa quanto a fotografia de um edifício. Exatamente como obtemos fotografias diferentes quando fotografamos um edifício de frente e de trás, do mesmo modo, também obtemos diferentes curvas quando seguimos o voo de uma pedra de diferentes pontos.

### 2.3 - TODOS OS PONTOS DE VISTA SÃO EQUIVALENTES?

Se limitarmos nosso interesse quando observamos o movimento de um corpo no espaço a um estudo da trajetória (a curva ao longo da qual o corpo se move), seríamos guiados na nossa seleção de um lugar de observação por considerações de conveniências e simplicidade.

Um bom fotógrafo, quando seleciona um ponto para a sua câmara, está concentrado, entre outras coisas, com o lado estético desta figura, com sua composição.



Mas estudando o movimento de corpos no espaço nosso interesse é mais extenso. Não queremos somente conhecer a trajetória, mas também prever a trajetória de um corpo em determinadas condições. Em outras palavras, queremos saber as leis que governam o movimento - as leis que induzem os corpos se moverem de um modo ou de outro.

Quando examinamos a relatividade do movimento deste ponto de vista, encontramos que nem todas as posições no espaço são equivalentes.

Se nós pedirmos ao fotógrafo para tirar uma fotografia de nós, para a carteira de identidade, é a nossa cara que queremos ver fotografada, e não o lado de trás da

nossa cabeça, que determinará a posição no espaço de onde ele nos fotografará. Nenhuma outra posição satisfaria nossa exigência.

## 2.4 - O ESTADO DE REPOUSO É ENCONTRADO!

O movimento dos corpos é influenciado pelas forças externas. Um exame detalhado desta influência nos colocará diante de uma aproximação inteiramente nova ao problema do movimento.

Vamos assumir que temos um corpo à nossa disposição que não é influenciado por qualquer força externa. Este corpo se moverá de um jeito mais ou menos bizarro, dependendo do ponto de nossa observação. Mas é óbvio que a posição mais natural para observá-lo será aquela em que o corpo está simplesmente em repouso.

Podemos, além disso, dar agora uma definição completamente nova do estado de repouso, a despeito do movimento do corpo dado relativo aos outros corpos. Assim, um corpo livre da influência de qualquer força externa está num estado de repouso.

## 2.5 - SISTEMA INERCIAL.

Como podemos dar origem a um estado de repouso? Quando podemos estar certos de que um corpo não é influenciado por qualquer força estranha?

Para este propósito, devemos considerar aquele corpo tão bem afastado quanto podemos de todos os outros corpos que poderiam afetá-lo.

Poderíamos, na nossa imaginação, construir um laboratório - um sistema de referência - de tais corpos inerciais, e discutir as propriedades de movimento observando-as deste laboratório, o qual considerariamos estar no estado de repouso.

Se as propriedades do movimento observadas de algum outro laboratório diferir das propriedades do movimento observadas no nosso laboratório, teríamos garantia de dizer que o primeiro laboratório estava se movendo.

## 2.6 - O TREM SE MOVIMENTA?

Após estabelecermos que o movimento dentro de um laboratório se movendo é governado por leis diferentes daquelas que prevalecem num laboratório inercial, o conceito de movimento parecerá ter perdido seu caráter relativo. Teríamos, então somente que insinuar o movimento de inércia relativa e referir a ele como absoluto.

Mas as leis que prevalecem num laboratório inercial mudariam em todos os casos quando o laboratório está se movendo?

Vamos embarcar num trem movendo-se em linha reta com velocidade uniforme e observar o comportamento dos corpos dentro do vagão, comparando-o com aqueles de um trem parado.

Nossa experiência diária revela-nos que num trem viajando retilineamente com velocidade constante o movimento dos corpos é o mesmo daquele num trem estacionário. Uma bola lançada para cima no ar num trem em movimento invariavelmente ficará para trás da nossa mão, e não descreverá uma curva como mostrado na fig. debaixo na próxima página.

Se descontarmos o impulso que é inevitável por razões técnicas, todas as coisas que acontecem num trem em movimento também acontecerão num trem estacionário

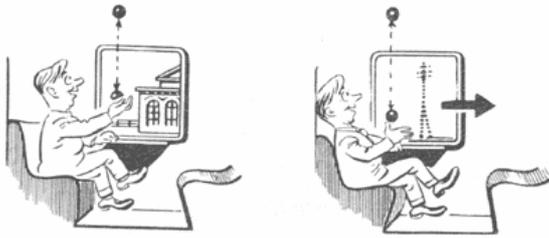
É uma situação diferente de quando o trem reduz ou aumenta sua velocidade. No primeiro caso experimentamos um impulso para frente e no segundo caso um impulso para trás, bastante distinto de um estado de repouso.

Se um trem movendo-se com velocidade constante varia sua direção também sentiremos isso outra vez. Numa volta brusca para a direita seremos atirados contra o lado esquerdo do vagão, e vice-versa, numa curva à esquerda.

Recapitulando, chegamos a conclusão que enquanto um certo laboratório move-se uniformemente e retilineamente relativo a um outro laboratório que está num estado de repouso, é impossível observar diferenças no comportamento dos corpos no segundo laboratório. Entretanto, tão logo o movimento do laboratório movendo-se varia (aceleração, desaceleração, mudança de direção) o efeito é instantaneamente sentido no comportamento dos corpos nele.

## 2.7 ESTADO DE REPOUSO É PERDIDO PARA SEMPRE.

O incrível fato que um laboratório em movimento retilíneo e uniforme não tem efeito sobre o comportamento dos corpos nele, compele-nos a revisar nosso conceito de estado de repouso. Ele revela que o estado de repouso e o estado de movimento retilíneo uniforme não diferem. Um laboratório que se move uniformemente e retilineamente relativo a um que está num estado de repouso pode ser por ele mesmo considerado em um estado de repouso. Isto significa que não existe um estado de repouso absoluto, mas um incontável número de vários "estados de repouso". Daí existe um número incontável de laboratórios, "num estado de repouso", todos eles movendo-se UNIFORMEMENTE E RETILINEAMENTE em relação ao outro com várias velocidades.



Desde que o estado de repouso é relativo e não absoluto, temos que mencionar todo instante em relação a qual dos incontáveis laboratórios movendo-se uniformemente e retilineamente com relação aos outros, nós observamos um dado movimento.

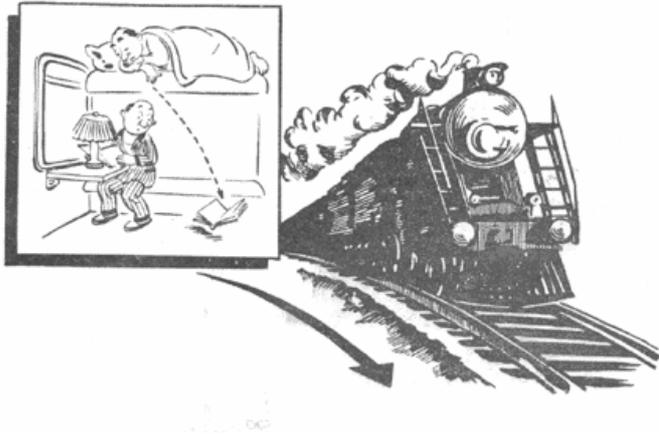
Assim., nós fracassamos quando fazemos do movimento um conceito absoluto.

Em relação a que estado de repouso" observamos o movimento é uma questão que está aberta para sempre.



Chegamos assim a mais importante lei da natureza, usualmente chamada de o Princípio da Relatividade do Movimento.

Diz-se que o movimento dos corpos dentro de sistemas de referências que movem-se uniformemente e retilineamente uns com os outros é governado pelas mesmas leis.



## 2. A LEI DA INÉRCIA.

O princípio da relatividade do movimento indica que um corpo quando não é influenciado por uma força externa pode estar num estado de repouso ou num estado de movimento retilíneo uniforme - uma condição que os físicos chamam de lei da inércia.

Entretanto, na nossa vida diária a operação desta lei é velada (disfarçada) e não se manifesta diretamente. Pela lei da Inércia um corpo num estado de movimento retilíneo uniforme permaneceria em seu movimento para todo o sempre se nenhuma força externa atuar sobre ele. Entretanto, nossas observações mostram que se nós não aplicarmos força a um corpo ele é compelido a vir a ficar em repouso.

A chave do mistério está no fato que todos os corpos que vemos experimenta o efeito de certas forças externas - as forças de atrito. A condição que precisamos afim de observar a lei da inércia - ausência de forças externas atuando sobre o corpo - não é avaliável. Mas impondo as condições do experimento, i.é, reduzindo as forças de atrito, podemos aproximar à condição ideal exigida para observar a lei da inércia, impondo que esta lei é também válida para movimentos observados na nossa vida diária.

A descoberta do princípio da relatividade do movimento é uma das grandes descobertas do homem. A Física nunca teria sido capaz de se desenvolver sem ele. Devemos esta descoberta ao gênio Galileu, quem arrojadamente se opôs aos

ensinamentos de Aristóteles, dominante naquele tempo e energicamente defendido pela Igreja Católica. De acordo com Aristóteles o movimento era possível somente se forças fossem aplicadas e inevitavelmente cessaria sem elas. Galileu estabeleceu o muito pelo contrário num número de experiências brilhantes . Ele mostrou que era o atrito que levavam os corpos em movimento a pararem, e que um corpo uma vez posto em movimento permaneceria em movimento para sempre se não existisse o atrito.

## 2.9 A VELOCIDADE TAMBÉM É RELATIVA !

Segue do princípio da relatividade do movimento que o movimento retilíneo e uniforme de um corpo movendo-se com certa velocidade é um conceito sem significado, a menos se dissermos em relação a qual referencial inercial que certa velocidade é medida.

Assim achamos que velocidade é também um conceito relativo. Se determinarmos a velocidade de um mesmo corpo relativa a diferentes referenciais inerciais obteremos diferentes resultados.

Contudo, cada variação de velocidade, aceleração, desaceleração ou mudança de direção, é absoluta em significado e não depende da posição do referencial do qual a observarmos.

## CAPÍTULO III

### A TRAGÉDIA DA LUZ

#### 3.1 - A LUZ NÃO SE PROPAGA INSTANTANEAMENTE

Temos nos convencidos do princípio da relatividade do movimento e da existência de um incontável número de referenciais "inerciais". No último as leis que governam o movimento dos corpos são semelhantes. Entretanto, existe uma espécie de movimento que, à primeira vista, contradiz o princípio que estabelecemos acima. É a propagação da luz.

A luz não se propaga instantaneamente, embora, na verdade, sua velocidade é tremenda - 300 000 Km/s!

Esta colossal velocidade é difícil de ser concebida, posto que usualmente lidamos com velocidades bem inferiores. A velocidade do último foguete espacial Soviético, p. ex., é de meramente 12 Km/s. De todos os corpos com os quais lidamos, a Terra é a que tem a maior velocidade na -sua órbita ao redor do Sol. Mas, mesmo assim, a velocidade da translação da Terra é somente 30 km/s .

#### 3.2 - PODE A VELOCIDADE DA LUZ SER VARIADA ?

A colossal velocidade de propagação da luz não é, por si só, alguma coisa muito extraordinária.

Você pode sempre acelerar ou desacelerar artificialmente o movimento de um corpo. Mesmo de uma bala de revólver. Tudo que você precisa é colocar uma caixa de areia na sua trajetória. Perfurando a caixa a bala perderá sua velocidade.

É diferente com a luz. A velocidade de uma bala depende largamente do projeto do rifle do qual ela é atirada e das propriedades da pólvora, enquanto a velocidade da luz é sempre a mesma não importa qual é da sua fonte.

Vamos colocar uma placa de vidro na trajetória de um feixe de luz. Desde que a velocidade da luz no vidro é inferior daquela do vácuo, o feixe viajará mais devagar. Entretanto, tendo passado através do vidro, a luz reassume a velocidade de 300 000 km/s.

A propagação da luz no vácuo, tão distinta de todas as outras espécies de movimento, tem esta importante propriedade - você não pode acelerá-la ou desacelerá-la. Não importa que variações o feixe de luz sofre na matéria, ele se propaga com a mesma velocidade tão logo emerge para o vácuo novamente .

### 3.3 LUZ E SOM.

Desta forma a propagação da luz lembra-nos mais a propagação do som do que o movimento dos corpos. Som é uma vibração do meio em que ele se propaga. Além disso, a velocidade do som depende das propriedades do meio e não das propriedades da fonte sonora: a velocidade do som não pode -ser aumentada ou diminuída mais que a velocidade da luz mesmo passando a som através de outros corpos.

Se colocarmos uma barreira de metal na sua trajetória, o som variará sua velocidade dentro da barreira, mas tão logo ele emerge para o seu meio inicial ele retorna a sua velocidade inicial.

Coloquemos uma lâmpada elétrica e um sino debaixo de uma campânula de vidro e retiremos todo o ar de dentro da campânula. O som do sino ficará cada vez mais fraco, até tornar-se totalmente inaudível. A lâmpada, ao contrário, irradiará luz como usualmente.

Este experimento prova que o som propaga-se num meio material enquanto a luz propaga-se até no vácuo.

Ai está sua diferença essencial.

### 3.4 O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE DO MOVIMENTO PARECE ESTAR ABALADO.

A colossal, mas não infinita, velocidade da luz no vácuo leva-nos a um conflito com o princípio da relatividade do movimento.

Imagine um trem viajando com a tremenda velocidade de 240 000 Km/s. Estamos indo na frente do vagão, e uma lâmpada elétrica é ligada no fundo do vagão. Veremos que resultado obteríamos se medíssemos o tempo necessário

para a luz viajar de um extremo a outro do trem.



Veríamos que este tempo diferiria daquele que obteríamos se o trem estivesse parado. Realmente, em relação a um trem movendo-se com velocidade de 240 000 km/s a luz viajaria com velocidade de somente  $300\,000 - 240\,000 = 60\,000$  km/s. É como se a luz tivesse que alcançar a frente do vagão. Se nós colocarmos a lâmpada na frente do trem e medirmos o tempo necessário para a luz atingir o fundo do vagão, veríamos que sua velocidade, na direção oposta ao movimento do trem seria  $240\,000 + 300\,000 = 540\,000$  km/s. A luz e o fundo do vagão movem-se um ao encontro do outro.

Assim, parece que num trem em movimento a luz se propagaria com diferentes velocidades em direções diferentes, enquanto num trem que está parado a velocidade da luz é a mesma em ambas as direções .

É muito diferente com uma bala de revólver. Se atirada na direção do movimento do trem ou contra ela, a velocidade da bala relativa às paredes de um vagão será a mesma - igual à velocidade da bala em um trem parado .

O fato é que a velocidade de uma 'bala depende da velocidade do rifle, enquanto a velocidade da luz, como já dissemos, não muda com a variação na velocidade em que a lâmpada está viajando.

Nosso argumento parece demonstrar que a propagação da luz contrasta fortemente com o princípio da relatividade do movimento. Uma bala lança-se sobre uma mesma velocidade em relação às paredes de um trem em movimento ou parado, enquanto em um trem viajando a 240 000 km/s a luz aparentemente propaga-se 5 ( cinco ) vezes mais lenta numa direção e 1, 8 vezes mais rápida na direção oposta que num trem parado.

Parece que um estudo da propagação da luz permite-nos estabelecer a velocidade absoluta de um movimento do trem,

Existe a esperança que poderíamos estabelecer o conceito de estado absoluto de repouso por meio do fenômeno da propagação da luz.

O referencial no qual a luz se propaga em todas as direções com a mesma velocidade constante de 300 000 km/s pode ser dito estar num estado de repouso absoluto. Em qualquer outro referencial que se move uniformemente e retilineamente a nós, a velocidade da luz seria diferente em diferentes direções. Neste caso a relatividade, do movimento, relatividade da velocidade, e relatividade do estado de repouso, que estabelecemos acima, não existem.

### 3.5 - O MUNDO DO ÉTER.

Como isto é concebido? Numa, determinada época os físicos aplicaram a analogia entre o fenômeno da propagação do som e da luz para introduzir um meio especial, que eles chamaram de éter, no qual a luz se propagava do mesmo modo que o som se propaga no ar. Assumiram que todos os corpos movendo-se no éter não propeliam este último do mesmo modo que uma gaiola feita de tiras finas de madeira flutuando na água não impulsiona a água.

Se nosso trem está parado em relação ao éter, então a luz propagará em todas as direções com a mesma velocidade . O movimento do trem relativo ao éter manifestar-se-ia imediatamente do fato que a velocidade da luz seria diferente para diferentes direções.

Entretanto, esta introdução ao éter, um meio cuja vibração observamos na forma de luz, dá origem a um número de questões picantes. Para começar, a hipótese por si só é obviamente artificial. Realmente, podemos estudar as propriedades do ar não somente observando a propagação do som nele, mas também por vários métodos físicos e químicos de pesquisa. Entretanto, devido a alguma razão

misteriosa, o éter não toma parte na maioria dos fenômenos. A densidade e pressão do ar são facilmente medidas pelos mais grosseiros métodos. Ainda, todas as tentativas para apreender alguma coisa da densidade e pressão do éter levaram a nada.

A posição é bastante ridícula.

Todos os fenômenos da natureza podem, é claro, serem "explicados" introduzindo algum líquido especial possuindo as propriedades desejadas. Mas, a diferença entre a teoria genuína de um fenômeno e uma simples paráfrase de fatos bem conhecidos com termos científicos, está contido precisamente no fato que muito mais coisas resultam da teoria do que obtemos dos fatos aos quais ela está baseada. Tomamos, por exemplo, a concepção do átomo. Foi na química que ele foi introduzido na ciência, mas nossa noção sobre átomos permite-nos explicar e prever um grande número de fenômenos que não tem relação à química.

O conceito do éter pode ser legitimamente comparado à explicação que um selvagem teria dado a um gramofone, o seu efeito era por causa de um especial "espírito gramofônico" que foi aprisionado na caixa misteriosa.

Tais "explicações" não explicam nada.

Os Físicos tiveram uma infeliz experiência com isso antes do éter. Houve um tempo que eles "explicaram" o fenômeno da combustão por meio de propriedades de um líquido que chamaram fustigante, e o fenômeno do calor por meio das propriedades de um outro líquido - calórico. Estes líquidos, a propósito, não eram menos imprecisos que o éter.

### 3.6 SITUAÇÃO DIFÍCIL

Mas a dificuldade principal está contida no fato que a violação do princípio da relatividade do movimento pela propagação da luz teria fatalmente levado à violação do mesmo princípio por todos os outros corpos.

Após tudo isso, qualquer meio oferece resistência ao movimento dos corpos. Ainda mais, o deslocamento dos corpos no éter também envolveria atrito. O movimento de um corpo diminuiria a velocidade, e finalmente atingiria o repouso. Entretanto, a Terra está girando ao redor do Sol por muitos milhares de milhões de anos (de acordo com dados geológicos - e não mostra traços de redução de velocidade devido ao atrito,

Assim, tentando explicar o estranho comportamento da luz num trem móvel pela presença do éter temos tropeçado num beco sem saída. A noção sobre o éter não elimina a contradição entre a violação do princípio da relatividade pela luz e o uso dele para todos outros movimentos.

### 3.7 - A EXPERIÊNCIA DECIDIRÁ.

O que fazemos com esta contradição? Antes de expressarmos nossas considerações a este respeito vamos voltar a seguinte circunstância.

A contradição entre a propagação da luz e a relatividade do movimento tem sido apresentada a nós exclusivamente através de uma construção mental.

É verdade, repetimos, que esta construção foi muito convincente. Mas se confinarmos a raciocínios solitários seremos comparados a um velho filósofo que tentou produzir as leis da Natureza pelo que ser passava na sua cabeça[1]. O perigo inevitável provém de que o mundo assim construído pode um dia se desenvolver de maneira a ser muito diferente daquele real.

A experiência é o árbitro supremo de tudo e de todas as teorias físicas. Ainda mais não confinaremos a argumentos de como se propaga a luz num trem em movimento, e voltaremos a experimentos que mostrarão como ela se propaga na realidade nestas condições.

Nosso experimento é facilitado pelo fato que nós moramos num corpo em movimento. Girando ao redor do Sol, a Terra não se move retilineamente e não pode além disso estar num permanente estado de repouso em relação a qualquer outro referencial.

Mesmo se tomarmos um referencial relativo ao qual a Terra está parada em Janeiro, é certo estar em movimento em Julho, desde que a direção da rotação da Terra ao redor do Sol varia. Além disso, estudando a propagação da luz na Terra nós, de fato, estudamo-la dentro de um referencial que se move com velocidade de 30 km/s, alguma coisa muito considerável nas nossas condições. (A rotação da Terra ao redor do seu eixo que é aproximadamente da ordem de meio quilômetro por segundo pode ser desprezada).

Estamos satisfeitos, entretanto, ao comparar nosso globo ao trem em movimento que discutimos acima e que levou-nos a um beco sem saída? O trem estava movendo-se uniformemente e retilineamente, enquanto a Terra órbita. Sim, estamos satisfeitos ao fazer isso. A Terra pode ser satisfatoriamente considerada estar movendo-se uniformemente e retilineamente dentro daquela fração infinitesimal de um segundo a qual ela ligeiramente leva para passar através dos pontos de observação. A margem de erro é assim tão insignificante que não pode ser detectada.

Mas desde que temos comparado trem e Terra, seria natural esperar que a luz na Terra comportar-se-ia tão estranhamente como fez no nosso trem, i.é., que ela propagar-se-ia em diferentes direções com diferentes velocidades.

### 3.8 - O PRINCÍPIO DA RELATIVIDADE TRIUNFA

Um experimento desta espécie foi feito em 1881 por Albert Michelson, um dos maiores físicos experimentais do século 19, que mediu a velocidade da luz propagando-se em diferentes direções com um alto grau de precisão. Para detectar ligeiras diferenças previstas na velocidade Michelson usou um equipamento experimental engenhoso e muito preciso. A precisão deste experimento foi tão alta que ele teria sido capaz de detectar diferenças tão pequenas na velocidade quanto o previsto.

O experimento de Michelson foi mais tarde repetido sob várias condições e levaram a muitos resultados inesperados. Num referencial movendo-se a luz propagou muito diferentemente daquele que temos deduzido. Michelson descobriu que na Terra girando, a luz propagou em todas as direções com a mesma velocidade constante. Neste respeito, a propagação da luz lembra-nos a bala. É independente do movimento do referencial e sua velocidade relativa às paredes do referencial é a mesma em todas as direções.

O experimento de Michelson assim estabeleceu o CONTRÁRIO À NOSSA INFERÊNCIA do fenômeno da propagação da luz, e longe de contradizer, totalmente concorda com o princípio da relatividade do movimento. Em outras palavras todo nosso raciocínio na seção 3.4 estava errado.

### 3.9 - FORA DA FRIGIDEIRA E DENTRO DO FOGO.

Temos rejeitado a apreensiva contradição entre as leis de propagação da luz e o princípio da relatividade do movimento. A contradição foi somente uma aparência devido ao nosso erro de raciocínio. Por que fizemos nosso erro ?

Por aproximadamente um quarto de século, de 1881 até 1905, os físicos torturaram seus cérebros com este problema. Ainda, todas suas explicações inevitavelmente levaram a novas contradições entre a teoria e a prática. \_

Se a fonte sonora e o observador viajavam numa gaiola feita de finas hastes, o observador sentiria um forte vento. Se medirmos a velocidade do som relativa à gaiola ela será menor na direção em que a gaiola se move do que na direção oposta. Entretanto, suponhamos colocar a fonte sonora num vagão em que todas as janelas e portas estão bem fechadas e medimos sua velocidade, descobrimos que desde que o ar dentro do vagão não afetado pelo movimento do vagão, a velocidade do som nele será a mesma em todas as direções.

Se tomarmos a luz em vez do som poderíamos fazer a seguinte afirmação para explicar o experimento de Michelson. A Terra não deixa o éter intacto, como a gaiola de finas tiras, quando vista através do espaço. Do contrário, vamos assumir que ela leva o éter junto com ela, que no movimento ela inclua um só todo com ela. Dessa forma o resultado do experimento de Michelson é absolutamente compreensível.

Mas esta afirmação conflita com um grande número de outros experimentos, tal, por exemplo, como a propagação da luz na água fluindo através de um tubo. Se nossa afirmação sobre o éter de que está sendo arrastado pela Terra fosse correta, então medindo a velocidade da luz na direção do fluxo obteríamos uma velocidade igual à velocidade da luz na água parada mais a velocidade do fluxo. Mas como um resultado de nossas medidas obtemos uma velocidade muito menor que obteríamos se nossa afirmação fosse correta.

Já temos mencionado o fenômeno extremamente estranho dos corpos não experimentarem qualquer atrito ao falar de quando passa através do éter. Mas se eles não somente passam através do éter mas o carregam consigo, o atrito seria maior.

Assim, todas as tentativas para contornar a contradição que surgiu após a inesperado resultado do experimento de Michelson, fracassaram.

Resumindo.

O experimento de Michelson reafirma o princípio da relatividade do movimento não somente para corpos ordinários, mas também, para a propagação da luz e, daí, para todos os fenômenos naturais.

Como já temos visto, a relatividade da velocidade aparece diretamente do princípio da relatividade do movimento. Diferentes referenciais movendo-se uns em relação aos outros teriam velocidades diferentes. Mas, por outro lado, a velocidade da luz de 300 000 km/s é a mesma para todos os referenciais. Além disso, é absoluta e não relativa!

## CAPÍTULO IV

### O TEMPO É RELATIVO

#### 4.1 - EXISTE NA VERDADE UMA CONTRADIÇÃO?

A primeira vista pode parecer que estamos tratando com uma contradição puramente lógica. A constância da velocidade da luz ao se propagar em todas as direções é uma prova ampla do princípio da relatividade. Ao mesmo tempo, a velocidade em si é absoluta.

Vamos recordar, entretanto, como o homem medieval tratou o fato de que a Terra era redonda. Para eles a redondeza da Terra conflitava com a força da gravidade, posto que ele aprendeu que todos os objetos tinham que cair para a superfície terrestre. Ainda assim sabemos perfeitamente bem que não existe conflito lógico

no todo. Simplesmente, os conceitos de "para cima" e "para baixo" são relativos, e não absolutos.

O mesmo assegura verdadeiro para a propagação da luz.

Teria sido fútil olhar para uma contradição lógica entre o princípio da relatividade do movimento e o sentido absoluto da velocidade da luz. A contradição aparece quando introduzimos outras suposições, muitas da maneira que as pessoas na Idade Média fizeram quando elas rejeitaram.

Que a Terra fosse redonda tratando o conceito de "para cima" e "para baixo" como um conceito absoluto. Sua crença absurda veio de experiências insuficientes: as pessoas viajavam muito pouco naquele tempo e conheciam somente pequenas áreas da superfície terrestre. Evidentemente, alguma coisa semelhante aconteceu a nós: nossa insuficiência de experimentos fez--nos acreditar que algo relativo fosse absoluto.

O quê ?

Para ver nosso erro nós de pronto não aceitaremos nada, somente hipóteses estabelecidas pela experiência.

#### 4.2 - A BORDO DE UM TREM

Pinte um trem de 5.400.000 Km de comprimento viajando retilineamente e uniformemente a velocidade de 240 000 Km/s.

Suponha que uma lâmpada seja ligada em algum dado instante nalguma parte no meio do trem. E suponhamos que portas automáticas na frente e no fundo abram no momento que a luz da lâmpada as atinjam. O quê as pessoas à bordo do trem veriam, e o quê as pessoas paradas na plataforma veriam.

Respondendo esta questão nós, como estabelecemos antes, seremos fiéis a resultados experimentais apenas.

Pessoas no centro do trem veriam o seguinte: Já que, de acordo com o experimento de Michelson, a luz viaja relativo ao trem com uma mesma velocidade em todas as direções - 300 000 km/s, ela atingirá o fundo e a frente do trem simultaneamente 9 segundos mais tarde ( $2\ 700\ 000:300\ 000$ ) e ambas portas abrirão ao mesmo tempo.

Com relação à plataforma da estação a luz também viaja com uma velocidade de 300 000 km/s, mas o fundo do trem se move ao encontro do feixe de luz. Ainda mais, o feixe de luz atingirá o fundo do trem após

$$\frac{2\,700\,000}{300\,000 + 240\,000} = 5 \text{ segundos}$$

O feixe deve alcançar a frente do trem, e, assim, atingirá 45 segundos após

$$\frac{2\,700\,000}{300\,000 + 240\,000} = 5 \text{ segundos}$$

Pareceria para as pessoas na plataforma que as portas se abrem em instantes diferentes - a porta do fundo primeiro e a porta da frente 45 - 5 = 40 segundos depois.

Assim dois eventos absolutamente idênticos - abertura das portas da frente e do fundo de um trem - acontecerão ao mesmo tempo para pessoas a bordo do trem e com um intervalo de tempo de 40 segundos para pessoas na plataforma.



#### 4.3 - O "SENSO COMUM" É DESACREDITADO.

Existe qualquer contradição nisto? Talvez, o fato que temos descoberto é tão absurdo quanto dizer que um jacaré mede dois metros da cabeça ao rabo e um metro do rabo à cabeça.

Vamos pôr à prova e ver por que o resultado que obtivemos parece absurdo a despeito dos conformes do experimento.

Difícilmente, conforme podemos pensar, nunca encontraremos qualquer contradição lógica no fato que dois fenômenos que aconteceram simultaneamente

para pessoas no trem fossem separados por 40 segundos para pessoas na plataforma.

Nossas conclusões estão numa contradição gritante ao "senso comum", isto é a única coisa que podemos dizer para nos consolar.

Mas, recorde como o "senso comum" do homem medieval insurgiu-se contra o fato que a Terra girava ao redor do Sol? Realmente, as experiências do homem medieval revelaram a eles que indiscutivelmente a Terra estava parada e que o Sol girava ao redor dela. E não foi ao "senso comum" que tivemos de agradecer pela prova ridícula que a Terra não poderia ser redonda? O conflito do "senso comum" com um fato real foi ridicularizado numa bem conhecida piada sobre um "cowboy" que exclamou, "Não pode ser!" ao ver uma girafa no zoológico.

O assim chamado "senso comum" não é mais que uma recapitulação dos conceitos e hábitos formados na nossa vida diária.

Ele representa um certo nível de percepção refletindo a extensão de nossa experiência.

A dificuldade de perceber e entender que dois eventos ocorrendo simultaneamente no trem estão 40 segundos defasados quando vistos da plataforma é muito parecida com a dificuldade que o "cowboy" teve quando viu a girafa. Como o "cowboy" nunca vira antes o animal, assim também nós nunca viajamos com velocidades, de algum modo, perto da fantástica velocidade de 240 000 km/s. Não é surpreendente que quando os físicos encontram tais fantásticas velocidades eles observam fatos que consideravelmente diferem das coisas que estamos acostumados na nossa vida diária.



O resultado inesperado do experimento de Michelson forneceu aos físicos novos fatos e os forçaram a reexaminar - desafiando o senso comum - o que, parecia conceitos óbvios e comuns como a simultaneidade de dois eventos.

Tem sido mais simples, é claro, negar o novo fenômeno com bases no "senso comum", mas se o fizemos, pareceríamos ao "cowboy" que não acreditava nos seus alhos quando viu uma girafa.

#### 4.4 - O TEMPO PARTICIPA DA SORTE DO ESPAÇO.

A ciência não hesita em entrar em conflito com o assim chamado "senso comum". O que ela receia acima de tudo é a inconsistência entre os conceitos existentes e os novos dados experimentais, e sempre que ocorre ela esmaga as concepções existentes e eleva nosso conhecimento a um nível mais alto.

Consideremos que dois eventos simultâneos são simultâneos dentro de qualquer referencial. Nossa experiência estabeleceu, entretanto, que estávamos errados. Aplicado sozinho no caso quando os referenciais estavam num estado de repouso relativo uns com os outros. Se, por outro lado, dois referenciais estivessem em movimento um em relação ao outro, as ocorrências simultâneas em um deles seriam tomadas como ocorrendo num intervalo de tempo no outro. O conceito de simultaneidade torna-se relativo; ele tem sentido somente se especificarmos o movimento do referencial em que os eventos são observados.

Recordemos o exemplo da relatividade de valores angulares da seção 1.5. Seja zero a distância angular entre duas estrelas observadas da Terra, devido ao fato das duas estrelas estarem alinhadas. Na nossa vida diária nunca entraremos em

conflito com a suposição que isto é uma verdade absoluta. É diferente se formos do lado de fora do sistema solar e observarmos as mesmas duas estrelas de algum outro ponto no espaço. Encontraremos a distância angular bem diferente de zero.

O fato que duas estrelas que estão alinhadas quando observadas da Terra pode não estar alinhadas quando observadas de outros pontos no espaço, bastante óbvio para nossos contemporâneos, teria parecido um absurdo ao homem medieval que concebeu o céu como uma cúpula borrifada com estrelas.

Vamos assumir que fossemos perguntados se, à parte dos referenciais de todas as espécies, os dois eventos realmente ocorreram simultaneamente. Infelizmente esta questão não tem mais sentido que se, à parte de todos os pontos dos quais nós conduzimos nossas observações, as duas estrelas estão realmente alinhadas. O fato é que simultaneidade depende não somente dos dois eventos mas também do referencial dos quais observamos esses eventos, justamente como o alinhamento das duas estrelas depende não necessariamente de suas posições, mas também do ponto do qual elas são observadas.

Enquanto tratamos com velocidades que foram insignificantes comparadas com a velocidade da luz, a relatividade do conceito de simultaneidade foi desconhecida para nós. Foi somente quando examinamos movimentos com velocidades comparáveis àquelas da luz que fomos compelidos a reexaminar nosso conceito de simultaneidade.

Do mesmo modo, as pessoas tiveram de revisar sua concepção de "para cima" e "para baixo" quando começaram a viajar através de distâncias comparáveis com as dimensões da Terra. Antes, a concepção que a Terra era plana não conflitava, e claro, com a experiência.

Verdade, não somos capazes de viajar com velocidades assim próximas à da luz e observar todos os fatos que nós já discutimos, os quais são paradoxais do ponto de vista de nossos velhos conceitos. Mas, graças às modernas técnicas experimentais somos capazes de manifestar estes fatos conclusivamente num número de fenômenos físicos.

O tempo assim participa da sorte do espaço! As palavras "ao mesmo tempo" são tão sem significado como as palavras "num mesmo lugar".

O intervalo entre dois eventos, como a distância entre eles no espaço, tem de ser suplementada pela referência ao referencial em relação ao qual ele é definido.

#### 4.5 - O TRIUNFO DA CIÊNCIA.

A descoberta que o tempo é relativo mudou radicalmente as idéias do homem sobre a Natureza. Ela representa uma das maiores vitórias das razões humanas sobre as concepções retrógradas, antigas e centenárias. É comparável somente

com a revolucionária mudança ocasionada nas noções humanas pela descoberta que a Terra é redonda.

A descoberta da relatividade do tempo feita em 1905 pelo maior físico do século XX, ALBERT EINSTEIN (1880-1955), colocou-o, então um jovem de 25 anos, entre os gigantes da humanidade, entre - COPÉRNICO , NEWTON, e outros - os brilhantes da Ciência.

Lênin chamou Albert Einstein de um dos "maiores transformadores das ciências naturais".

A teoria da relatividade do tempo e seus corolários são usualmente conhecidas como a Teoria Especial da Relatividade. Não é para ser confundida com o princípio da relatividade do movimento.

#### 4.6 - VELOCIDADE TEM SEU LIMITE.

Antes da segunda Guerra Mundial a velocidade dos aviões eram abaixo da velocidade do som. Hoje temos aviões supersônicos. Ondas de rádio se propagam à velocidade da luz. Poderíamos talvez criar o telégrafo "superluz" para emitir sinais a velocidades maiores que a velocidade da luz? Não, isto é uma coisa impossível de se fazer.

Realmente, se pudermos transmitir sinais com velocidades infinitas poderíamos ser capazes de estabelecer a simultaneidade de quaisquer dois eventos . Diríamos que estes dois eventos aconteceram simultaneamente se o sinal infinitamente veloz do primeiro evento chegou no mesmo instante que o sinal do segundo evento. Assim, simultaneidade de dois eventos teriam adquirido caráter absoluto, independente do movimento do laboratório à qual esta afirmação se aplica.

Mas, já que a experiência refuta a natureza absoluta do tempo concluímos que o sinal de transmissão não pode ser instantâneo. A velocidade de transmissão de um ponto no espaço a outro não pode ser infinita, em outras palavras, não pode ser maior que algum valor final chamado limite de velocidade.

Este limite de velocidade concorre com a velocidade da luz.

Realmente, de acordo com o princípio da relatividade do movimento as leis da Natureza serão as mesmas para todos os laboratórios movendo-se relativamente a um com outro (retilineamente e com a mesma velocidade uniforme). A afirmação que nenhuma velocidade pode ser maior que o limite dado é também uma lei da Natureza e, além disso, o valor da velocidade limite seria exatamente similar em diferentes laboratórios. A velocidade da luz, como sabemos, possui as mesmas qualidades. Assim, a velocidade da luz não é meramente a velocidade de propagação de um fenômeno natural. Ela faz o importante papel de ser a velocidade limite.

A descoberta da existência no Universo da velocidade limite é um dos maiores triunfos do gênio humano e da capacidade experimental do gênero humano.

Os físicos do século 19 foram incapazes de perceberem que uma velocidade limite existia, e que sua existência poderia ser provada. Além disso, se eles tivessem topado com ela, por sorte, em seus experimentos, eles não teriam tido certeza que ela era uma lei da Natureza, senão meramente o efeito de sua limitada capacidade experimental.

O princípio da relatividade revela que a existência de uma velocidade limite está contido na própria natureza das coisas. Assumir que o desenvolvimento tecnológico capacitar-nos-á a chegar a velocidades maiores que a velocidade da luz é apenas tão ridículo quanto sugerir que a ausência de pontos na superfície Terrestre com mais que 20 mil quilômetros afastados não é uma lei geográfica, mas o resultado de nosso limitado conhecimento, e esperar que algum dia, quando a geografia fizer mais avanços, seremos capazes de encontrar pontos na Terra que estão ainda mais afastados.

A velocidade da luz faz o papel de tal excepcionalidade na Natureza, exatamente porque é a velocidade limite para a propagação de qualquer coisa. A luz ultrapassa todos os outros fenômenos, ou, quando muito, chega simultaneamente com eles.

Se o Sol rachar em dois e formar duas estrelas, o movimento da Terra sofreria, naturalmente, uma variação também.

Os físicos do século 19, que não sabiam que uma velocidade limite existia na Natureza, certamente assumiriam que a Terra mudou seu movimento instantaneamente após o Sol rachar em dois. Ainda que a luz teria levado oito minutos no total para cobrir a distância do Sol rachado até a Terra.

A variação no movimento de rotação da Terra começaria oito minutos após o Sol rachar. Até aquele momento, a Terra continuaria a se mover como se o Sol não tivesse rachado. Qualquer coisa que ocorra no Sol, ou com ele, não afetaria a Terra ou seu movimento antes dos oito minutos após.

A velocidade limite de propagação de sinais naturalmente não priva-nos da possibilidade de estabelecer simultaneidade de 2 eventos. Tudo que temos a fazer é notar o atraso de tempo do sinal. Isto é a prática usual.

Este método de estabelecer simultaneidade de ações é bem compatível com a relatividade deste conceito. Realmente, para subtrair a diferença no tempo devemos dividir a distância entre os dois pontos onde os eventos ocorreram pela velocidade do sinal luminoso. Por outro lado quando discutimos, anteriormente, as cartas enviadas do expresso Moscou --Vladivostok dissemos que a localização de um evento no espaço é também bastante relativo.

#### 4.7 - ANTERIOR E POSTERIOR.

Vamos assumir o nosso trem com a lâmpada, que chamaremos de Trem de Einstein, que o dispositivo automático falhou e as pessoas no trem notaram que a porta da frente abriu 15 segundos antes da do fundo. Na plataforma, reversamente, as pessoas notaram que a porta do fundo abriu  $40-15 = 25$  segundos antes. Um evento que ocorreu antes num referencial ocorreu mais tarde no caso de outro.

Pode ocorrer para nós que esta relatividade dos conceitos de "anterior" e "posterior" teria, quando tudo é dito e feito, seu limite. Não é provável, após tudo (do ponto de vista de qualquer referencial), que um bebê nascesse antes que sua mãe.

Suponhamos um evento que é formado no Sol. Oito minutos mais tarde é, captado por um astrônomo observando o Sol com o telescópio. Qualquer coisa que o astrônomo faça após aquilo, será absolutamente posterior ao aparecimento do evento - "mais tarde" do ponto de vista de qualquer referencial

do qual o Sol e o astrônomo são observados. Pelo contrário, qualquer coisa que aconteça ao astrônomo antes daqueles oito minutos anteriores ao aparecimento do evento (o sinal de luz desta ocorrência alcançando o Sol antes do aparecimento do evento), acontece absolutamente antes.

Se, por exemplo, o astrônomo coloca os seus óculos em algum instante entre estes dois limites, a relação de tempo entre o aparecimento do evento e a colocação dos óculos, não será absolutamente anterior.

Podemos movimentar relativamente ao astrônomo e o evento no Sol de modo a observar o astrônomo colocando seus óculos antes, mais tarde ou ao mesmo tempo que o aparecimento do evento, dependendo da velocidade e direção do nosso movimento.

O princípio da relatividade assim demonstra que três tipos de relações existem entre os eventos - absolutamente antes, absolutamente após e nem antes e nem depois, ou, para ser mais preciso as relações anterior e posterior, dependem do referencial do qual os eventos são observados.

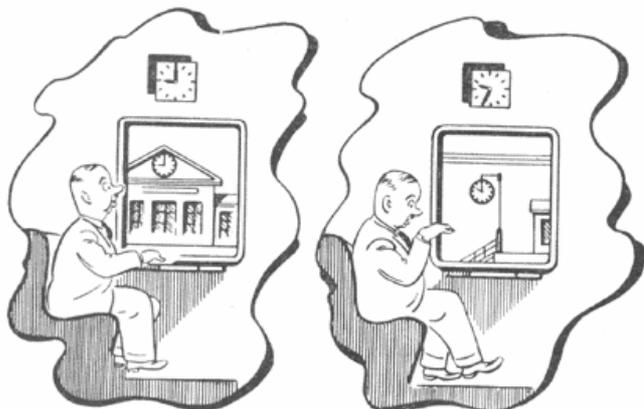
## CAPÍTULO IV

### RELÓGIOS E RÉGUAS EXTRAVAGANTES

#### 5 . I - EMBARQUEMOS NO TREM NOVAMENTE.

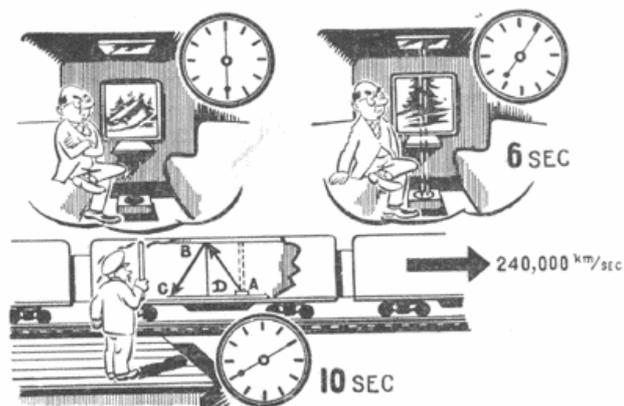
Estamos passeando no trem de Einstein ao longo de uma estrada sem fim. A distância entre duas estações é 864 000 000 Km. O trem viajando a 240 000 Km/s levará uma hora para cobrir esta distância.

Existem relógios em ambas as estações. Um viajante a bordo do trem acerta na primeira estação seu relógio com o da estação. Chegando na segunda estação ele é surpreendido ao encontrar que seu relógio está atrasado.



Na relojoaria ele foi informado que seu relógio estava em ordem.

O quê aconteceu?



Para compreender isso, vamos assumir que o viajante envia ao teto do trem um feixe de luz de uma tocha colocada no piso do vagão. Um espelho no teto reflete o feixe de volta à tocha de luz. O caminho do feixe quando visto pelo viajante está mostrado na seção superior da figura abaixo.

Parece bem diferente ao observador na plataforma. Durante o tempo que leva o feixe para viajar da tocha ao espelho, e este mesmo deslocará devido ao movimento do trem. Durante o tempo que o feixe leva para voltar à tocha, esta deslocará a mesma distância.

Notaremos que para observadores na plataforma o feixe claramente viajou uma distância maior que aquela vista pelo passageiro viajante. Por outro lado, sabemos que a velocidade da luz é uma velocidade absoluta e que é a mesma para aqueles viajantes do trem e aqueles que a observam da plataforma. Concluimos, além disso, que um intervalo maior transcorreu na estação, entre a partida e a chegada de um feixe, do que no trem !

É fácil de se calcular a relação. Suponhamos que o observador na plataforma estabeleça que 10 segundos transcorreram entre a saída e a chegada do feixe de luz. Durante estes 10 segundos o feixe viajou

$300\,000 \times 10 = 3\,000\,000$  km. Segue que os lados AB e BC do triângulo isósceles ABC são de  $1\,500\,000$  km cada. AC é evidentemente igual à distância que o trem viajou nos 10 segundos, i.é,  $240\,000 \times 10 = 2\,400\,000$  km.

Agora é fácil achar a altura do vagão, a qual é igual a BD, a altura do triângulo ABC.

Recordemos que num triângulo retângulo o quadrado da hipotenusa (AB) é igual a soma dos quadrados dos catetos (AD e BD) . A equação

$AB^2 = AD^2 + BD^2$  ajuda-nos a encontrar que a altura do vagão é

Enorme essa altura, embora não seja tão surpreendente, considerando as dimensões astronômicas do trem de Einstein.

Do ponto de vista do passageiro, a trajetória viajada pelo feixe de luz do chão até o teto, e voltando novamente ao chão é obviamente o dobro da altura, i.é,  $2 \times 900\,000$  mm =  $1\,800\,000$  km. Ele levará  $1\,800\,000 / 300\,000 = 6$  segundos para o feixe viajar esta distância.

## 5.2 - PARADOXO DO RELÓGIO.

Enquanto 10 segundos transcorreram na estação, somente 6 segundos se passaram no trem. Isto significa que se o trem chegou uma hora após sua partida de acordo com o relógio da estação, ele viajou somente no relógio do passageiro. Em outras palavras, a cada hora seu relógio estará 24 minutos atrasado em relação ao relógio da estação.

É fácil de ver que quanto maior a velocidade do trem maior a diferença de tempo que transcorreu.

Realmente, quanto mais a velocidade do trem se aproxima daquela da luz, mais o cateto AD que indica a trajetória do trem se aproxima da hipotenusa AB que indica a trajetória percorrida no mesmo tempo pelo feixe de luz. A relação do cateto BD pela hipotenusa decresce na mesma proporção. Ainda, é esta relação que representa a relação do tempo no trem pela da plataforma. Aumentando a velocidade do trem até atingir aquela da luz podemos reduzir o tempo no trem a um número infinitesimal por hora do tempo na estação. Numa velocidade igual a 0,9999 daquela da luz, p . ex., somente um minuto transcorreria no trem em uma hora do tempo na estação.

Conseqüentemente todos relógios viajantes atrasam-se intervalos de tempo em relação àqueles num estado de repouso. Isto contradiz o princípio da relatividade que seguimos no nosso argumento?

Significaria que o relógio que está mais rápido que todos os outros está num estado de repouso absoluto?

Não, este não é o caso porque a comparação entre o relógio no trem e na plataforma foram feitos sob condições absolutamente iguais. Realmente existiram três relógios e não dois. O viajante "checou" seu tempo com dois diferentes relógios em duas estações diferentes. E, inversamente, se existissem relógios na frente e no fundo do vagão do trem, o observador comparando o relógio da estação com aqueles no trem como num relâmpago ( ao mesmo tempo ), descobriria que o relógio da estação estava sempre atrasado.

Dado que o trem viaja uniformemente e retilineamente em relação à estação, estamos justificados a considerá-lo estar estacionário e a estação estar, movendo-se. As leis da Natureza operando neles seriam as mesmas.

Cada e todo observador que está sem movimento em relação a seu relógio notará que ele está diferente dos relógios movendo-se relativamente a ele e que os relógios estão todos mais adiantados à medida que a razão do seus movimentos cresce.

Isto pode ser comparado a dois observadores estando ao pé de diferentes antenas de telégrafos, cada um exigindo que a antena - para qual ele está olhando é vista de um ângulo maior que os outros.

### 5.3 - MÁQUINA DO TEMPO

Agora vamos assumir que o trem de Einstein viaja ao longo de uma estrada circular e não numa linha real de estrada de ferro. Ele retornará após um certo tempo ao seu ponto de partida. Como já estabelecemos, o passageiro descobrirá que seu relógio está atrasado, e quanto mais rápido o trem vai, mais atrasado seu relógio fica. Aumentando a velocidade do trem podemos atingir um ponto onde somente um dia passa para o passageiro enquanto um número de anos transcorre para a estação.

Assim muitos anos podem transcorrer, como de fato acontece, que no retorno à estação de partida após uma jornada de um dia (no seu próprio relógio), nosso passageiro verá que todos seus pertences e amigos estão há tempo mortos.

Durante esta jornada pela estrada circular o tempo de somente dois relógios é comparado - no trem e na estação de partida.

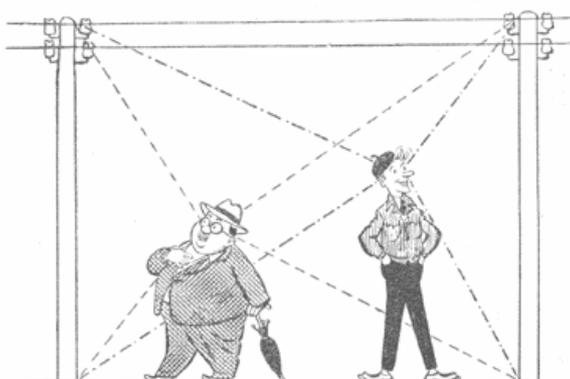
Existe qualquer coisa nisto que contradiz o princípio da relatividade? Podemos considerar que o passageiro está num estado de repouso e que a estação de partida está se movendo ao redor de um círculo com a velocidade do trem de Einstein? Chegaríamos então à conclusão que somente um dia passou para a pessoa na estação, enquanto muitos anos transcorreram para o passageiro no trem. Isto seria uma inferência incorreta. Aqui está o por quê.

Estabelecemos acima que um corpo pode ser considerado estacionário somente se ele não experimentar o efeito de uma força externa. Existe é verdade, mais que apenas um estado de repouso. Existe um incontável número deles, e dois corpos estacionários podem, como sabemos, moverem-se retilineamente e uniformemente, um em relação ao outro. Mas o relógio no trem de Einstein rodando na estrada circular experimenta o efeito de uma força centrípeta, e não podemos, além disso, considerá-lo num estado de repouso. A diferença entre as leituras dos relógios da estação e o do trem é absoluta.

Se duas pessoas cujos relógios mostram o mesmo tempo partem e se encontram novamente, o relógio daquele que estava num estado de repouso ou movimento retilíneo uniforme, estará adiantado, pois não teria experimentado os efeitos de qualquer força.

Uma viagem numa estrada circular a uma velocidade perto daquela da luz permite-nos imaginar a máquina do tempo de Wells, se para uma extensão

ão de partida, sairíamos do vagão em ao futuro, mas não podemos diferença entre o trem de Einstein e



Não vale a pena esperar que seremos sempre capazes de viajar para o passado não importa até onde a ciência progrida. Se, ao contrário, fosse verdade, seríamos compelidos a admitir que situações verdadeiramente absurdas são possíveis em princípio. Apenas imagine pondo-se a caminho do passado e desembarcando na difícil e completamente absurda situação de uma pessoa cujos pais não tinham ainda nascidos.

Viagens ao futuro envolvem não mais que contradições aparentes.

#### 5.4 - VIAJANDO A UMA ESTRELA.

Existem estrelas no céu que estão tão longe de nós que um raio de luz leva 40 anos para nos atingir. Como já sabemos que é impossível viajar mais rápido que a velocidade da luz, podemos bem desenhar a conclusão que a estrela não pode ser atingida em menos de 40 anos. Entretanto, esta inferência é errônea, por que não consideramos a contração no tempo envolvida no movimento.

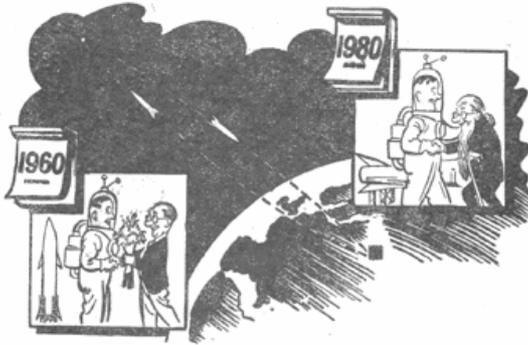
Suponha que viajemos a uma estrela em um foguete de Einstein à velocidade de 240 000 km/s. Para pessoas na Terra atingiremos a estrela em  $(300\ 000 \times 40) / 240000 = 50$  anos.

Mas para nós a bordo do foguete voando, o tempo, com a mencionada velocidade, encolherá numa razão de 10 para 6. Daí, não atingiremos a estrela em 50.

Podemos reduzir este tempo de vôo indefinidamente aumentando a velocidade do nosso satélite Einsteniano até aproximar bem da velocidade da luz. Teoricamente, viajando numa velocidade suficientemente alta podemos atingir a estrela e retornar à Terra dentro de um minuto! Mas, 80 anos terrestres passariam.

A julgar pelas aparências, possuímos assim um jeito de prolongarmos a vida humana, atrapalhada somente pelo ponto de vista das outras pessoas, desde que o homem envelhece de acordo com "seu" próprio tempo. Para nosso pesar, entretanto, esta perspectiva é ilusória se dermos conta e uma olhada bem de perto para ela.

Para começar o corpo humano não está adaptado a um estado de aceleração prolongada excedendo a força da gravidade da Terra a qualquer extensão visível. Requer-se um tempo considerável para se acelerar a velocidades próximas da luz. Cálculos mostram que em seis meses de viagem com uma aceleração igual aquela da Terra nosso ganho equivale a meramente seis semanas. Se prolongarmos nossa excursão o ganho no tempo aumentará ligeiramente. Doze meses num foguete conduziria-nos a um ganho de 18 meses, dois anos de viagem daria-nos um ganho de 28 anos, e se passarmos três anos numa viagem interplanetária ganharíamos mais que 360 anos. !



Imaginação muito confortante, você não acha ?

A matéria é menos animada quando vamos às despesas de energia. Um foguete pesando apenas uma tonelada e voando com uma velocidade de 260 000 km/s ( velocidade requerida para "dobrar" o tempo, i.é, para que um ano no foguete seja igual a dois na Terra) consumiria 250 000 000 000 000 (250 trilhões) de quilowatts-hora - uma quantidade de energia que o mundo todo levaria meses para produzir.

Entretanto isto é somente o que o foguete consome no vôo. Teríamos ainda que imaginar quanta potência é exigida para acelerar nosso veículo à velocidade de 260 000 km/s. E, ainda mais potência seria necessária no fim do vôo para desacelerar a nave espacial até um desembarque seguro. Quanta potência requereríamos?

Seria ainda 200 vezes maior que a quantidade que citamos acima, mesmo se tivéssemos combustível suficiente para produzir um jato escapando da máquina na maior velocidade possível - a velocidade da luz. Em outras palavras, teríamos de consumir uma quantidade de potência que o mundo produz em várias dúzias de anos. Realmente, a velocidade de escape do jato resulta em milhares de vezes menor que a da velocidade da luz, fazendo a potência expelida requerida para nosso vôo imaginário fabulosamente grande.

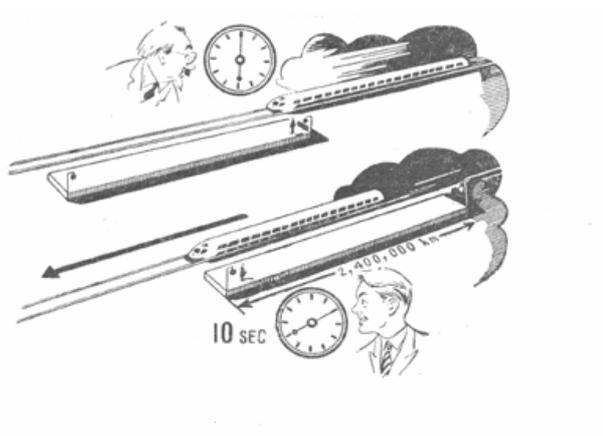
### 5.5 - CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO

O tempo, como já vimos, não é realmente um conceito absoluto. É relativo e requer indicação precisa do referencial do qual a observação é conduzida.

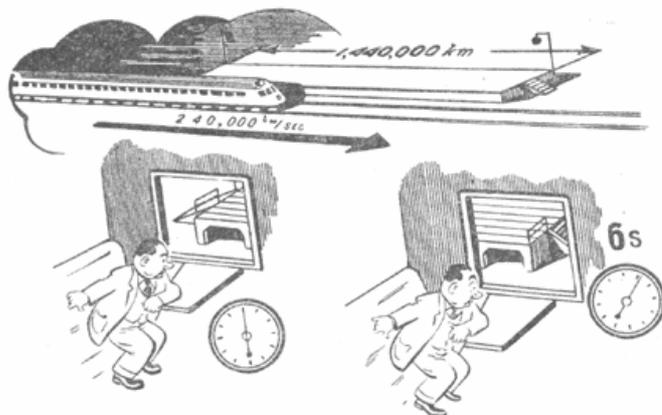
Agora vamos voltar ao espaço. Encontramos mesmo antes de ter discutido o experimento de Michelson que o espaço é relativo. Ainda que, não obstante, a relatividade do espaço atribua um caráter absoluto às dimensões dos corpos. Em outras palavras, consideramo-las serem propriedades do corpo e que não

dependiam do referencial do qual conduzimos nossas observações. Entretanto, a teoria da relatividade faz-nos abandonar esta convicção também. À semelhança de nossa noção sobre o tempo ter sido absoluta, ela (a convicção) é um preconceito que desenvolvemos por que sempre tratamos com velocidades infinitamente menores que a velocidade da luz

Imaginemos que o trem de Einstein passa apressado em frente a uma plataforma de estação com 2 400 000 km de comprimento. O trem viaja de um extremo ao outro da plataforma em  $2\,400\,000 / 240\,000 = 10$  segundos pelo relógio da estação. Mas, para o relógio do passageiro o trem terá gasto somente 6 segundos. Os passageiros estarão completamente satisfeitos ao concluírem que a plataforma não tem 2 400 000 km, mas  $240\,000 \times 6 = 1\,440\,000$  km de comprimento.



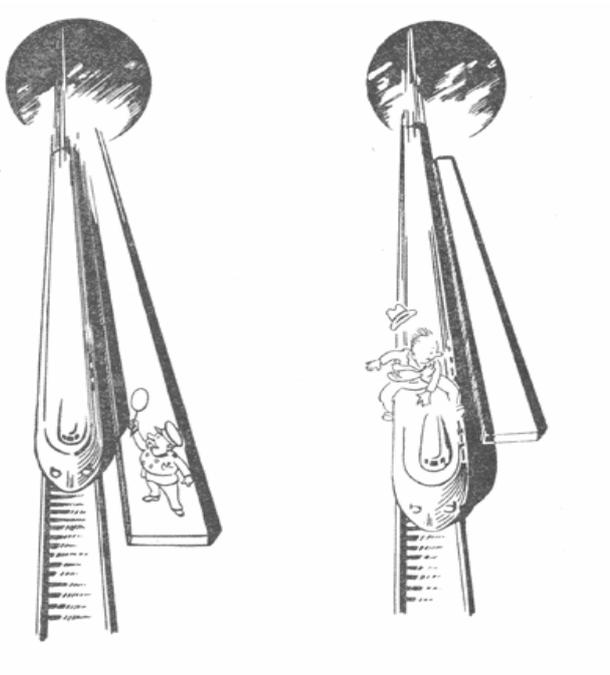
O comprimento da plataforma, como vimos é maior do ponto de vista do referencial que está estacionário com relação a ela, que do ponto de vista do referencial relativo ao qual a plataforma está se movimentando. Todos os corpos em movimento contraem-se na direção do seu movimento.



Entretanto, esta contração não prova ao todo que o movimento é absoluto: o corpo adquire suas dimensões verdadeiras tão logo o vimos de um referencial que está estacionário relativo ao corpo. Igualmente, os passageiros encontrarão que a plataforma contraiu, enquanto as pessoas na plataforma pensarão que é o trem de Einstein que tornou-se mais curto (na razão de 6 para 10).

Não seria uma ilusão de óptica. Todos os instrumentos usados na medição dos comprimentos de um corpo mostrarão isto também.

Em conexão com esta descoberta devemos agora corrigir as inferências feitas na seção 3.9 sobre o tempo gasto para as portas se abrirem no trem de Einstein. Quando estávamos calculando o tempo para que as portas abrissem do ponto de vista de um observador na plataforma, assumimos que o comprimento de um trem em movimento era o mesmo que de um estacionário. Ainda que o trem fosse menor para a pessoa na plataforma. Conseqüentemente, o intervalo entre o tempo para portas abrirem do ponto de vista do relógio da estação aumentará realmente de somente  $(6/10) \times 40 = 24$  segundos.



Naturalmente, esta correção não é essencial para as conclusões que fizemos anteriormente.

As figuras anteriores mostram o trem de Einstein e a plataforma da estação como vistos pelos observadores na estação e no trem.

Vemos na figura da esquerda que a plataforma é maior que o trem e naquela da direita o trem é maior que a plataforma.

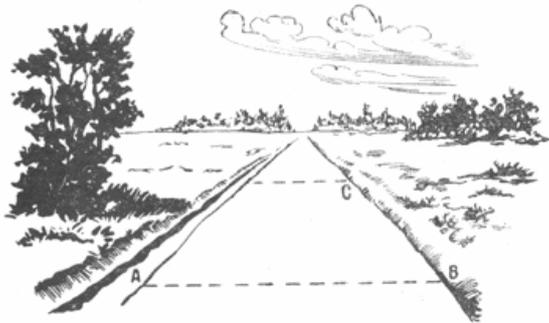
Qual dessas figuras corresponde à realidade?

A questão está sem sentido, como a questão sobre o boi e o boiadeiro da sec I.4.

Estes dois fenômenos são "instantâneos" de uma mesma realidade tomada de pontos de vista diferentes.

## 5 . 6 - VELOCIDADES CAPRICHOSAS.

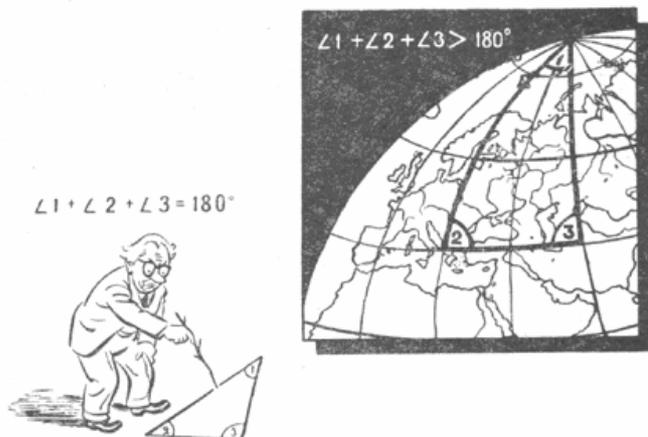
Qual é a velocidade do passageiro relativa ao leito da estrada se ele anda com 5 km/h em direção à frente de um trem que está viajando a 50 km/h ? Evidentemente será  $50 + 5 = 55$  km/h. Nossa resposta está baseada na fórmula de adição de velocidades e não temos dúvida alguma que ela está correta. Realmente, o trem viajou 50 km e o homem no trem um adicional de 5 km em uma hora. Daí, o total de 55 km.



É óbvio que a existência de uma velocidade limite faz a lei da adição de velocidades inaplicável universalmente a pequenas e grandes velocidades. Se o passageiro estivesse viajando no trem de Einstein a velocidade de, digamos, 100 000 km/s sua velocidade relativa ao leito da ferrovia teria sido  $240\,000 + 100\,000 = 340\,000$  km/s . Mas não existe tal velocidade por que ela excede a velocidade da luz.

Conseqüentemente, a lei da adição de velocidades que usamos to-dos os dias, não é inteiramente precisa. Ela se aplica somente para velocidades bem inferiores daquela da luz.

O leitor que está acostumado a toda sorte de paradoxos em conexão com a teoria relativística facilmente entenderá porque o argumento aparentemente óbvio, por meio do qual deduzimos a lei da adição de velocidades, é inadequado. Adicionamos a distância viajada pelo trem em uma hora com aquela do passageiro no trem. Entretanto, a teoria da relatividade mostrou-nos que estas distâncias não podem ser adicionadas. Isto seria apenas tão absurdo que multiplicar AB por BC para achar a área da seção de uma estrada na figura anterior, esquecendo-se que o lado está distorcido na figura devido à perspectiva. Além disso, para obter a velocidade do passageiro relativa a estação, devemos achar a distância viajada por ele em uma hora pelo relógio da estação, e para obter sua velocidade no trem devemos usar o relógio do trem, o qual, como já sabemos, não é o mesmo em muito.



Isto leva-nos à conclusão que velocidades das quais no mínimo uma é comparável com a da luz, são adicionadas de uma maneira bem diferente daquela que estamos acostumados. Podemos observar esta paradoxal adição de velocidades experimentalmente quando, por exemplo, vendo a propagação da luz num fluxo de água (discutimos isto anteriormente). O fato que a velocidade de propagação da luz no fluxo d'água não é igual à soma da velocidade da luz na água parada e a velocidade do fluxo d' água, mas menor que sua soma, é diretamente atribuída à teoria da relatividade.

Velocidades são adicionadas numa maneira muito peculiar se uma delas é exatamente 300 000 km/s. Esta velocidade, como sabemos, possui a propriedade de permanecer inalterada, a despeito do movimento do referencial do qual a observamos. Em outras palavras, se adicionarmos qualquer velocidade a 300 000 km/s novamente obteremos os mesmos 300 000 km/s.

Um simples paralelo pode ser apresentado com referência a inaplicabilidade da usual regra de adição de velocidades.

Como você sabe num triângulo plano (ver à esquerda da figura anterior), a soma dos ângulos A,B e C é igual a dois ângulos retos. Agora imaginemos um triângulo desenhado na superfície Terrestre (veja à direita da figura anterior). A soma dos ângulos deste triângulo será maior que dois ângulos retos devido a esfericidade da Terra. Esta diferença torna-se visível somente quando o comprimento do triângulo é comparável daquele da Terra.

Podemos usar a regra ordinária da adição de velocidades quando tratamos com velocidades insignificantes, apenas como é possível aplicar as regras da geometria plana para se medir pequenas áreas na superfície da Terrestre.

-

## CAPÍTULO VI

### MASSA

#### 6.1 - MASSA

Suponhamos que queremos fazer algum corpo inercial mover-se com uma velocidade definida. Teremos que aplicar uma certa força nele. O corpo entrará em movimento e pode ser acelerado no tempo para qualquer velocidade desejada se não existir forças externas impedindo-o, tal como o atrito. Encontraremos que diferentes intervalos de tempo são requeridos para acelerar corpos diferentes à velocidades desejadas com auxílio de uma dada força.

Para escaparmos das forças de atrito, imaginemos no espaço duas esferas de tamanhos idênticos, uma feita de chumbo e a outra de madeira. Apliquemos a mesma força a cada uma delas até elas se acelerarem à velocidade de, digamos, 10 km/h.

Evidentemente, teremos que aplicar esta força à esfera de chumbo por um intervalo de tempo maior que a esfera de madeira. Sob a ação de uma força constante, a velocidade cresce proporcionalmente ao tempo. Por isso, a massa é a relação do tempo requerido para acelerar um corpo inercial até aquela velocidade. A massa é proporcional a esta relação, o coeficiente sendo dependente da força aceleradora.

#### 6.2 - CRESCIMENTO DA MASSA

A massa é a mais importante propriedade de qualquer corpo. Usamos a massa dos corpos como sendo sempre constante. Ela não depende da velocidade. Isto segue de nossa opinião que sob a aplicação continuada de uma força constante a velocidade cresce na proporção direta do tempo de sua aplicação.

Esta opinião está baseada na simples regra de adição de velocidades. Entretanto, temos já provado que esta regra não pode ser aplicada em todos os casos.

O que fazemos para obter a velocidade após uma força ter sido aplicada por, digamos, dois segundos? Conformamo-nos à regra ordinária da adição e adicionamos a velocidade do corpo no fim do primeiro segundo à velocidade adquirida durante o próximo segundo.

Podemos fazer assim até que as velocidades se aproximem da velocidade da luz. Neste caso a velha regra torna-se inadequada. Adicionando velocidades com a devida consideração da teoria da relatividade obteremos resultados um tanto menores que obteríamos se fossemos usar a velha regra da adição, sem utilidade alguma neste caso. Isto significa que uma alta velocidade não crescerá tão

proporcionalmente ao tempo quando uma força é aplicada mas alguma coisa menor. Isto é natural somente por que existe uma velocidade limite.

Dada uma força constante, a velocidade de um corpo cresce menos e menos à medida que ela se aproxima daquela da luz, de modo que a velocidade limite nunca é excedida.

A massa poderia ser considerada independente da velocidade de um corpo enquanto dizemos que a velocidade do corpo aumenta proporcionalmente ao tempo quando uma força é aplicada a ele. Mas logo que a velocidade aproxima daquela da luz, a proporção entre o tempo e a velocidade desaparece e a massa torna-se dependente da velocidade. Desde que o tempo de aceleração cresce infinitamente e a velocidade não pode ser maior que a limite, observamos que a massa cresce com a velocidade, que torna-se infinita quando a velocidade do corpo atinge aquela da luz.

Cálculos mostram que a massa de um corpo movendo-se cresce tanto como o seu comprimento diminui. Assim, a massa do trem de Einstein movendo-se a 240 000 km/s é (10/6) vezes maior que a massa do mesmo trem em repouso.

É bem natural que em se tratando de velocidades convencionais, insignificantes comparadas com a velocidade da luz, podemos desprezar a variação na massa como já desprezamos a conexão entre as dimensões e velocidades de um corpo, ou a conexão entre a intervalo de tempo entre dois eventos e as velocidades com as quais os observadores desses eventos viajam.

Podemos checar a relação entre a massa e velocidade que provém da teoria da relatividade pelo experimento de observar o movimento de elétrons acelerados.

Nos modernos dispositivos experimentais um elétron em movimento a uma velocidade próxima daquela da luz é bem comum. Elétrons são acelerados em instalações especiais chamadas aceleradores até velocidades de somente 30 km/s menos que a velocidade da luz.

A física moderna é bem capaz de comparar a massa do elétron movendo-se a grandes velocidades com a massa de elétrons estacionários. Experimentos têm confirmado completamente que a massa está relacionada a velocidade, um corolário da princípio da relatividade.

### 6.3 - QUAL É O PREÇO DE UM GRAMA DE LUZ?

O incremento de massa de um corpo está estreitamente ligado ao trabalho aplicado a ele; é proporcional à força requerida para colocar o corpo em movimento. Não existe necessidade de depender trabalho somente para colocar o corpo em movimento. Todas forças aplicadas ao corpo, qualquer aumento da energia do corpo, aumenta sua massa. Isto é exatamente por que um corpo tem mais massa quando aquecido, por que uma mola tem mais massa quando é

comprimida. Realmente, o coeficiente de proporcionalidade entre a variação da massa e a variação da energia é insignificante: Para adicionar um grama de massa a um corpo teríamos de aplicar 25 000 000 kwh de energia.

Isto é o por que a variação no peso de um corpo nas condições ordinárias é muito insignificante e escapa da maioria das medidas precisas. Assim, se aquecermos uma tonelada de água de 0°C até o ponto de ebulição, sua massa crescerá aproximadamente por cinco milionésimos de uma grama.

Se queimarmos uma tonelada de carvão numa fornalha fechada, o produto da combustão terá uma massa de  $(1/3000)$  de um grama menos que o carvão original e oxigênio, Esta perda de massa é arrebatada pelo calor gerado no processo de queima.

Entretanto, na física moderna também observamos fenômenos onde a variação da massa faz um papel bem proeminente.

Tome o fenômeno que ocorre quando o núcleo atômico colide e um novo núcleo aparece como resultado. Quando, por exemplo, um átomo de lítio colide com um átomo de hidrogênio, produzindo dois átomos de hélio, a massa varia de  $(1/400)$  do seu valor original.

Já dissemos que para aumentar a massa de um corpo de um grama devemos aplicar algo em torno de 25 000 000 kwh de potência. Daí, para convertermos um grama de lítio e hidrogênio em hélio é requerido 400 vezes menos energia.

Agora vamos julgar e responder a seguinte questão: Qual das substâncias existentes na Natureza é mais cara (se nos guiarmos pelo peso)?

O rádio é considerado como sendo o elemento mais caro. Até recentemente, um grama dele foi dito ser da ordem de um quarto de milhões de rubros.

Mas vejamos o custo da luz.

Numa lâmpada elétrica temos um retorno de apenas  $(1/20)$  de gasto de energia na forma de luz. Além disso, um grama de luz é equivalente a 20 vezes mais trabalho que 25 000 000 kwh, i . é, 500 000 000 kwh. O que somaria a 5 000 000 rubros se assumirmos que um quilowatt hora custa somente 1 kopek. Segue que um grama de luz custa 20 vezes mais que um grama de rádio.

## CAPÍTULO VII

### PARA RECAPITULAR

Experimentos precisos e bastante convincentes fazem-nos admitir que a teoria da relatividade, que revela a característica mais extraordinária do mundo que nos rodeia, está correta. Estas características escapam-nos à primeira vista superficial.

Vimos a profunda e radical modificação introduzida pela teoria da relatividade aos conceitos básicos que o homem manipulou através de seculares experiências diárias.

Significa que a física desenvolvida muito antes do aparecimento da teoria da relatividade é arremessada ao mar como um velho e inútil sapato?

Se isto fosse assim, não haveria motivo para empregar-nos na pesquisa científica. Algumas novas teorias certamente apareceriam e esmagariam as antigas.

Imagine um passageiro viajando em um expresso ordinário ajuste seu relógio por que, de acordo com a teoria da relatividade, estaria atrasado com relação ao relógio da estação. Qualquer um faria uma gozação com ele. O efeito de, digamos, uma sacudidela num relógio altamente preciso é bem maior, sem mencionar o fato que a diferença na questão aumenta de uma fração microscópica de um segundo.

O engenheiro químico que duvidar se a água conserva sua massa quando é aquecida está claramente fora de seu normal. E, inversamente, o físico tratando de colisões de núcleos atômicos sem considerar a variação de seu peso atômico estaria convidado a deixar o laboratório por ser ignorante.

Projetistas desenvolveram - e continuam a desenvolver - seus projetos de acordo com as velhas leis da física, por que se eles forem introduzir as correções baseadas na teoria da relatividade, estas correções teriam menos efeitos nas suas máquinas que um micróbio se fixando no volante. Físicos experimentando elétrons rápidos devem lembrar-se da variação nas suas massas com relação às velocidades.

A teoria da relatividade, longe de refutar conceitos e noções prévias, estende-as e define os limites com os quais estes velhos conceitos podem ser aplicados sem incorrer no perigo de erro. As leis da Natureza descobertas pelos físicos anteriores ao nascimento da teoria da relatividade não são revogadas no todo, somente o seu uso é que é agora mais claramente definido.

A correlação entre a física baseada na teoria da relatividade, conhecida como relativística, e a física da escola antiga conhecida como clássica, é aproximadamente a mesma que a geografia ulterior, que leva em consideração a esfericidade da Terra, e a geografia básica, que a ignora. A geografia ulterior deriva-se da relatividade da vertical, e a física relativística vem da relatividade das dimensões dos corpos e do intervalo de tempo entre dois eventos quaisquer, enquanto a física clássica não sabe nada dos conceitos de relatividade.

Como a geografia ulterior desenvolveu-se da geografia básica, assim a física relativística desenvolveu e estendeu a física clássica.

Podemos mudar as fórmulas da geometria esférica, a geometria da esfera, às fórmulas da geometria plana se assumirmos o raio da Terra sendo infinitamente longo. A Terra então não será mais uma esfera e sim um plano infinito, a vertical será absoluta, e a soma dos ângulos num triângulo será exatamente igual a dois ângulos retos.

Uma mudança semelhante pode ser feita na física relativística se assumirmos que a velocidade da luz é infinitamente grande, i . é, a propagação da luz é instantânea.

Realmente, se a luz se propaga instantaneamente, o conceito de simultaneidade, como vimos, torna-se absoluto.

O intervalo de tempo entre eventos e dimensões dos corpos tornam-se absolutos, também independentemente do referencial, ou laboratório do qual eles são observados.

Conseqüentemente, podemos conservar todos os conceitos clássicos se considerarmos a velocidade da luz ser infinita.

Entretanto, a tentativa de combinar o limite da velocidade da luz com os conceitos antigos de espaço e tempo coloca nos na absurda posição de uma pessoa que sabe que a Terra é redonda, mas insiste que a vertical de sua cidade natal é uma vertical absoluta, e não sai dos limites da cidade de medo de desmoronar-se no espaço.