Chapter 2

A Teoria da Relatividade

“Não sei o que você quer dizer”, ponderou Alice. “Claro que não sabe”, redarguiu o Chapeleiro, balançando desdenhosamente a cabeça. “Ouso afirmar que você jamais falou com o Tempo!”

“Talvez não”, replicou Alice cautelosamente, “mas sei que tenho que vencer o tempo, quando aprendo música”. “Ah! aí está”, disse o Chapeleiro. “Ele não gosta de ser vencido. Se você se mantivesse em bons termos com o Tempo, ele obrigaria o relógio a fazer quase tudo que você desejasse. Suponha, por exemplo, que fossem nove horas da manhã, hora de começar a estudar; bastaria que você sussurrasse uma insinuação ao Tempo e o relógio avançaria num piscar de olhos. Treze e trinta: hora da refeição”. (**Alice no País das Maravilhas**, Lewis Caroll, 1896. Compilado de **As Idéias de Einstein**, J. Berstein, Ed. USP 1975)

2.1 Einstein: um Gênio Desempregado

Albert Einstein é o único físico do século XX cujo gênio científico é comparável ao de Isaac Newton. Viveu em uma época dramática e fascinante da História. Uma época de guerras, perseguições e revoluções políticas e científicas. Além das duas teorias da relatividade (a especial e a geral), deu outras contribuições fundamentais para a física, como a explicação para o efeito fotoelétrico (trabalho pelo qual ganhou o Prêmio Nobel de Física de 1921), o movimento browniano e o calor específico dos sólidos. A enigmática imagem do velho descabelado mostrando a língua para os fotógrafos transformou-se numa espécie de ícone do "cientista louco" bonachão. Judeu e pacifista fervoroso, escreveu sobre o exército:

> *A pior das instituições gregárias se intitula exército. Eu o odeio. Se um homem puder sentir qualquer prazer em desfilar aos sons de música, eu desprezo esse homem...Não merece um cérebro humano, já que a medula espinhal o satisfaz. Deveríamos fazer desaparecer o mais depressa possível este câncer da civilização. Detesto com todas as forças o heroísmo obrigatório, a violência gratuita e o nacionalismo débil. A guerra é a coisa mais desprezível que existe. Preferia deixar-me assassinar a participar dessa ignonímia.* (**Albert Einstein. Como Vejo o Mundo**, Ed. Nova Fronteira, 1981)

Albert Einstein nasceu no dia 14 de março de 1879, na cidade de Ulm, na Alemanha. Seus pais se chamavam Hermann e Pauline Einstein, e seus avós Abraham e Hindel Einstein. Einstein destaca duas experiências que teve durante a infância e que aparentemente foram determinantes na escolha da sua carreira. A primeira teria acontecido aos 4 ou 5 anos de idade, quando estava doente, e seu pai lhe deu de presente uma bússola. O fato da agulha da bússola, isolada e protegida dentro do vidro, obedecer a uma força externa, invisível, que a fazia sempre apontar para o Norte deixou-lhe a impressão de que deveria haver "algo escondido nas profundezas das coisas". Aos 12 anos veio a segunda experiência, segundo ele, de natureza inteiramente diferente. Ganhou de presente um livrinho de geometria plana. Após conseguir, com muito esforço, demonstrar o teorema de Pitágoras, experimentou, segundo ele, um tipo de certeza que não conhecia: a certeza matemática.

Primeira fotografia conhecida de Einstein, por volta dos 5 anos de idade.

Quando Einstein tinha 7 anos de idade, sua mãe escreveu em carta para a avó materna: “Ontem Albert trouxe seu boletim escolar. Novamente ele está no topo da turma, com notas brilhantes”. Um ano depois o avô materno escreveu: “Albert voltou às aulas há uma semana. Eu adoro aquele menino, porque você não pode imaginar como ele se tornou inteligente.”

Aos 16 anos Einstein prestou exames para admissão na Escola de Engenharia do famoso Instituto Tecnológico de Zurique, na Suíça. Embora tenha se saído brilhantemente em matemática e física, fracassou nas outras matérias e foi reprovado. Ironicamente, foi nesta mesma época que começou a ter os primeiros “insights” que o levariam à teoria da relatividade.

Em 1896, aos 18 anos de idade, foi finalmente admitido na Politécnica de Zurique. Havia desistido de se tornar engenheiro e decidido ganhar a vida ensinando física e matemática. Contudo, as aulas em Zurique não o entusiasmavam muito. Preferia estudar por conta própria as coisas que lhe interessavam. Foi durante essa época que tomou contato com a eletrodinâmica de Maxwell, tendo se tornardo uma autoridade no assunto. Graduou-se em 1900.

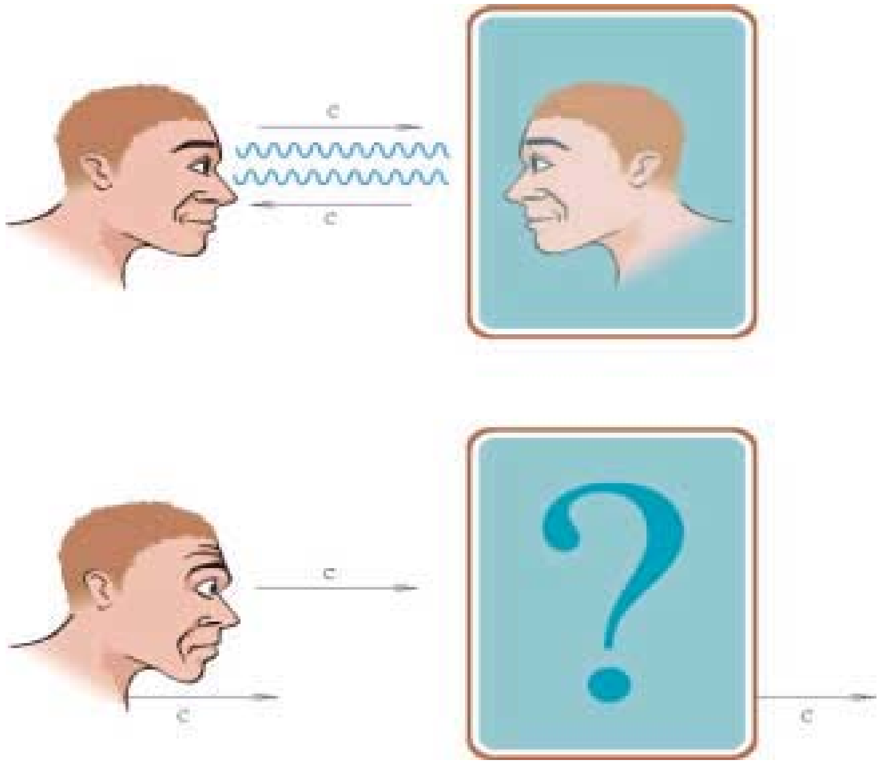
Com o fim do curso vieram os problemas. Embora seu talento tivesse sido reconhecido em Zurique, aparentemente não manteve as melhores relações com seus ex-professores, entre eles um influente homem chamado Heinrich Weber, que certa vez lhe teria dito: “Você é inteligente! Mas você tem um problema. Você não aceita nada que lhe digam. Não aceita nada”. Para ganhar a vida Einstein dava aulas particulares. Foi Marcel Grossmann, um matemático e ex-companheiro da Politécnica quem, através do pai, lhe arranjou um emprego em um escritório de patentes em Berna. Ali naquele lugar, durante as horas vagas, Einstein produziria o trabalho que iria detonar 300 anos de física!

Em suas **Notas Autobiográficas** (Ed. Nova Fronteira, 1982) Einstein, aos 67 anos de idade, escreveu:

> *Perdoe-me Newton; você descobriu talvez o único caminho possível em sua época para um homem possuidor do mais alto raciocínio e poder criativo. Os conceitos que criou ainda hoje orientam o nosso pensamento na física, embora saibamos que deverão ser substituídos por outros, muito afastados da esfera da experiência imediata, para possibilitar a compreensão mais profunda dos relacionamentos.*

2.2 Maxwell não Concorda com Newton

Segundo o próprio Einstein, aos 16 anos de idade despertou para um problema que o deixou intrigado. Suponha que você esteja se olhando em um espelho. Você vê a sua imagem porque a luz que chega ao espelho é refletida sobre seus olhos. O que aconteceria com a sua imagem se você e o espelho estivessem viajando à velocidade da luz no vácuo, ou seja, a 300 000 km/s? Se pensarmos de acordo com a mecânica clássica, nesta situação a luz não alcançaria o espelho e, consequentemente, a imagem desapareceria. Lembremos aqui que, como vimos, todos os referenciais que se movem com velocidade constante são equivalentes perante a segunda lei de Newton. Por outro lado, sabemos que a luz é um fenômeno ondulatório e, em tal experiência pensada, estaríamos viajando com a onda que, aos nossos olhos perderia este caráter de luz! No entanto, de acordo com a eletrodinâmica de Maxwell isso não é possível; uma onda eletromagnética é *sempre* uma onda eletromagnética, em qualquer referencial inercial e viaja sempre com a mesma velocidade de 300 000 km/s. Einstein então se deu conta do paradoxo: ou a mecânica de Newton, ou a eletrodinâmica de Maxwell está errada! O que fazer?



Que imagem apareceria em um espelho que, com o seu observador, se deslocasse à velocidade da luz?

Recordemos o que foi dito na secção 1.1.6 sobre movimento relativo. As transformações de Galileu para posição e velocidade de um objeto, medidas de dois referenciais que se movem relativamente um ao outro com velocidade **V**, são dadas por:

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \mathbf{R}$$

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}' + \mathbf{V}$$

No experimento do espelho imaginado por Einstein, **V** seria igual à velocidade da luz.

Para explicar a propagação da luz e de ondas eletromagnéticas em geral, os físicos do século XIX imaginaram que o espaço era preenchido por um meio que eles denominaram de "éter". Nesta época não se concebia a idéia de que uma onda poderia se propagar na ausência de um meio material que a sustentasse. O éter seria uma substância que permearia todo o espaço, e serviria de sustentáculo para a propagação da luz. A existência dessa substância misteriosa nunca foi detectada, mas imaginava-se que o valor $c = 300\ 000$ km/s, da velocidade da luz, era aquele medido de um sistema de coordenadas que estivesse em repouso em relação ao éter. Tal sistema ficou conhecido como o *sistema do éter*. Na medida em que a Terra também deveria se mover em relação ao éter, era natural imaginar que haveria uma diferença entre as velocidades da luz medidas no referencial do éter (c) e no referencial da Terra (que chamaremos c'). De acordo com as transformações de Galileu, se Terra e luz se deslocassem na mesma direção e sentido, e a velocidade da Terra em relação ao éter fosse V, a velocidade da luz medida no referencial da Terra deveria ser:

$$c' = c - V$$

E se o movimento fosse em sentido contrário, ou seja, luz para um lado e Terra para o outro, teríamos, de acordo com as transformações de Galileu:

$$c' = c + V$$

Se esse troço tá dando um nó na sua cabeça, não se desespere. Pense como se a Terra fosse um carro na Rio-São Paulo, e o éter fosse um outro carro, na mesma pista. Os dois motoristas querem medir a velocidade de um terceiro carro: o "carro-luz", e comparar os valores.

Suponha que você está no "carro-Terra". Você sabe de antemão que a velocidade do "carro-luz" em relação ao "carro-éter" é constante e igual a c. Que velocidade você mede? Se a velocidade relativa dos dois primeiros carros é V, e se eles estiverem viajando na mesma direção, a velocidade do "carro-luz" que você mede será $c - V$, e se estiver em sentido contrário será $c + V$. Em física é assim: às vezes a Terra vira carro, às vezes ela é um ponto geométrico, e às vezes tem massa desprezível. Vale tudo pra entender o problema! A propósito, você já ouviu falar em cavalos esfericamente simétricos?

O problema "quente" no final do século XIX era portanto medir esta suposta diferença entre as velocidades da luz no éter e na Terra. Se você fosse um físico da época e quisesse embolsar o Prêmio Nobel, como é que você faria isso? Arrumaria dois carros, uma lanterna, e iria pra Rio-São Paulo? Certamente que não! Você construiria um *interferômetro*! Interferoquê?!

Um interferômetro é uma idéia luminosa. É um aparelho destinado a medir a velocidade da luz utilizando o fato de que ondas eletromagnéticas apresentam o fenômeno de interferência (seção 1.2.4). Vimos que a intensidade da onda é proporcional ao quadrado do campo elétrico, e que para dois campos que se superpõem encontramos a seguinte expressão para o campo total em um ponto do espaço:

$$E^2 = 2E_0^2(1 + cos\theta)$$

onde θ é o ângulo entre os vetores de campo elétrico das ondas individuais. Usando a relação trigonométrica

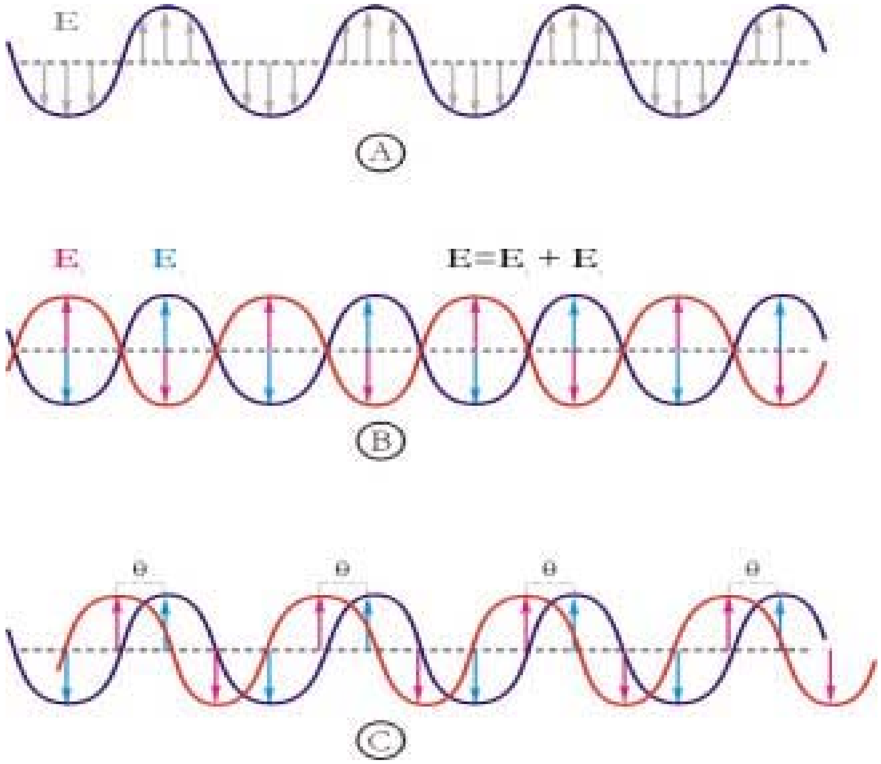
$$1 + cos\theta = 2cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

e chamando de $\mathcal{I}$ a intensidade da onda total, proporcional a E^2, podemos escrever:

$$\mathcal{I} = 4\mathcal{I}_{max}cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

onde $\mathcal{I}_{max}$ é a intensidade máxima da onda.

O ângulo θ é chamado de *ângulo de fase* entre as ondas, ou *diferença de fase*. A fórmula acima mostra um resultado muito interessante: ela nos diz que a intensidade da onda total depende somente da diferença de fase entre as ondas individuais. Por exemplo, se a diferença de fase for igual a π a intensidade será zero, mas se θ for igual a 0, a intensidade será máxima. Em um interferômetro podemos medir a velocidade da luz controlando a diferença de fase entre ondas luminosas que percorrem caminhos diferentes e se superpõem. As ondas são observadas em um anteparo, e sua superposição resulta em um padrão que consiste em regiões de máximos e mínimos de intensidade luminosa, chamadas de *franjas de interferência*.



Ondas eletromagnéticas podem interferir construtiva ou destrutivamente, dependendo do ângulo de fase entre elas.

O americano Albert Abraham Michelson realizou em 1881, pela primeira vez, tal experimento e com ele faturou o Nobel de 1907[1] No experimento, um raio luminoso incide sobre um espelho semi-transparente posicionado a exatos 45^o com a direção de incidência do feixe. O fato do espelho ser "semi-transparente" significa que metade da intensidade luminosa será refletida, e metade o atravessará. O fato de estar a 45^o com a direção de incidência, significa que a parte refletida fará um ângulo de 90^o com a direção original. As partes refletida e transmitida são novamente refletidas por outros espelhos e se juntam novamente em um

[1] Michelson foi o primeiro americano a receber o Prêmio. Em 1887, 6 anos após seu experimento original, ele obteve, trabalhando com E.W. Morley, resultados mais precisos. Foi este segundo experimento que entrou para a História da Física como o *experimento de Michelson-Morley*.

anteparo onde o padrão de interferência pode ser analisado. A interferência ocorrerá porque os raios luminosos que se juntam no anteparo percorrerão caminhos diferentes em tempos diferentes, e consequentemente terão fases diferentes. Por exemplo, considere aquela parte do feixe que se desloca paralelamente ao deslocamento da Terra. Se c é a velocidade do raio luminoso em relação ao éter, e v é a velocidade da Terra (e portanto dos espelhos) também em relação ao éter, quando o espelho se desloca no mesmo sentido do raio luminoso, o tempo para percorrer a distância l entre os espelhos será igual a $l/(c-v)$. Mas quando o raio volta refletido e consequentemente se desloca em sentido contrário ao deslocamento da Terra, encontra o espelho indo em sua direção com uma velocidade igual a $c+v$. Portanto o tempo de volta será $l/(c+v)$, e o tempo total de ida e volta será então:

$$t = \frac{l}{c-v} + \frac{l}{c+v} = \frac{2cl}{c^2-v^2} = \frac{2l/c}{1-v^2/c^2}$$

Agora, devido ao fato de que a velocidade da luz é muito maior do que a do espelho, ou seja $c \gg v$, podemos usar a relação aproximada:

$$(1-x)^n \approx 1 - nx$$

válida para $x \ll 1$, e aplicar ao denominador da fração acima, sendo $x = v^2/c^2$, e $n = -1$, para obtermos o resultado:

$$t \approx \frac{2l}{c}\left(1 + \frac{v^2}{c^2}\right)$$

para o tempo de ida e volta do raio luminoso que se desloca paralelamente ao movimento da Terra. A dedução para o tempo de ida e volta do raio luminoso que se desloca perpendicularmente ao movimento do espelho, é ligeiramente mais complicada, mas não chega a ser difícil (veja Painel VI).

PAINEL VI
A EXPERIÊNCIA DE MICHELSON

Um esquema do interferômetro de Michelson é mostrado na figura. Uma fonte luminosa F emite um feixe de luz que incide sobre um espelho semi-transparente E, posicionado a 45^o em relação ao raio incidente. Metade da intensidade é refletida sobre o espelho E_2, e metade atravessa E e incide sobre outro espelho E_1. O feixe refletido em E_2 retorna sobre E que novamente deixa passar somente metade da intensidade (a outra metade é refletida de volta para a fonte). Do mesmo modo, a porção refletida em E_1 incide de volta em E que refletirá metade da intensidade do raio que retorna. A parte que incidiu sobre E_1 percorre uma distância total l_1 correspondente ao trajeto $E \rightarrow E_1 \rightarrow E$, e a parte que incide sobre E_2 percorre l_2 no trajeto $E \rightarrow E_2 \rightarrow E$. A interferência entre os raios é observada sobre estas duas porções no anteparo. Suponha que a velocidade dos espelhos em relação ao éter seja v, paralela à direção do raio que incide sobre E_1. O tempo de percurso $E \rightarrow E_1 \rightarrow E$ é fácilmente obtido:

$$t_1 = \frac{l_1}{c-v} + \frac{l_1}{c+v} = \frac{2l_1}{c}\left(\frac{1}{1-v^2/c^2}\right)$$

Para calcularmos o tempo de percurso $E \rightarrow E_2 \rightarrow E$ temos que levar em conta que E e E_2 se deslocam perpendicularmente à direção de movimento dos espelhos. Se t_2 é o tempo total deste percurso, em $t_2/2$ o espelho E_2 terá se deslocado de uma distância $vt_2/2$. A distância percorrida pela luz nesse caso será de $ct_2/2$, sendo que esta percorrerá a mesma distância até alcançar E_2 novamente. Aplicando o teorema de Pitágoras a este trajeto do raio, obtemos:

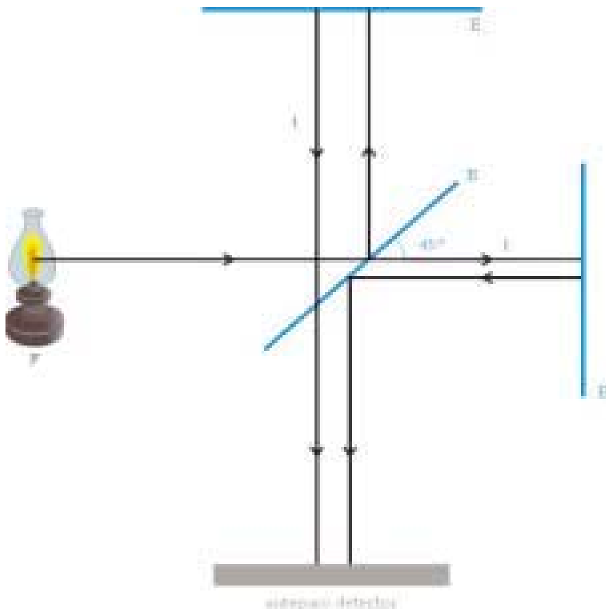
$$\frac{ct_2}{2} = \left[l_2^2 + \left(\frac{vt_2}{2}\right)^2\right]^{1/2}$$

Conseqüentemente,

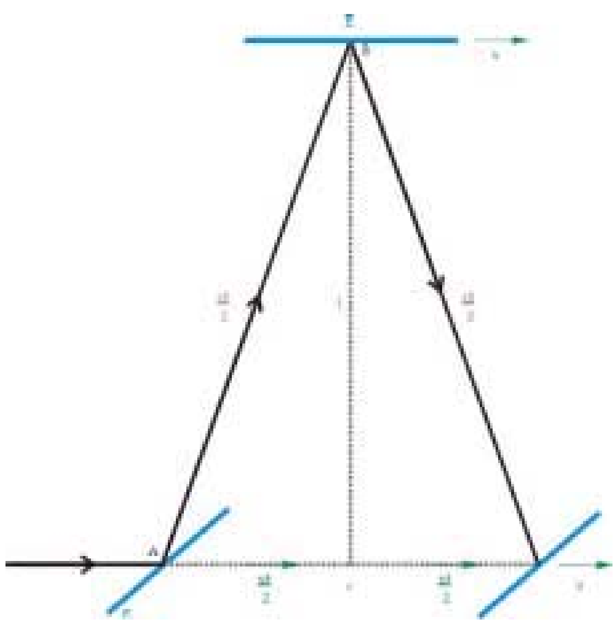
$$t_2 = \frac{2l_2}{c}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

A diferença entre os tempos de trânsito nos dois percursos será:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c}\left[\frac{l_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{l_1}{1 - v^2/c^2}\right]$$



Esquema do inteferômetro de Michelson.



Trajetória do raio luminoso com o movimento do interferômetro.

Suponha agora que todo o aparelho seja girado de 90^o. Fazendo isso, é simples ver que l_2 troca de lugar com l_1, e conseqüentemente a "nova" diferença nos tempos será:

$$\Delta t' = \frac{2}{c}\left[\frac{l_2}{1 - v^2/c^2} - \frac{l_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right]$$

Portanto, a rotação muda as diferenças entre os intervalos de tempo por:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2}{c}\left[\frac{l_1 + l_2}{1 - v^2/c^2} - \frac{l_1 + l_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}\right]$$

Usando o desenvolvimento binomial $(1 + x)^n \approx 1 + nx$, válido para x pequeno, obtemos para os denominadores dos termos entre colchetes:

$$\frac{1}{1 - v^2/c^2} \approx 1 + \frac{v^2}{c^2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

com isso:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{v^2}{c^2}\left(\frac{l_1 + l_2}{c}\right)$$

Esta diferença entre os intervalos de tempo de percurso causa uma mudança na diferença de fase entre as ondas que, por sua vez, acarreta em um deslocamento nas franjas de interferência sobre o anteparo. Ou seja, onde estava claro fica mais escuro. Esse deslocamento ΔN será dado pela razão entre a diferença nos tempos $\Delta t' - \Delta t$, e o período das ondas (como os raios partem da mesma fonte o período (e a freqüência) será o mesmo para ambos):

$$\frac{\Delta t' - \Delta t}{\tau} = \Delta N = \frac{v^2}{c^2}\left(\frac{l_1 + l_2}{c\tau}\right)$$

Mas, $c\tau = \lambda$, o comprimento de onda da radiação. Na experiência de Michelson, $l_1 = l_2 = 11$ m, $\lambda = 5,5 \times 10^{-7}$ m, e $v/c = 10^{-4}$. Com isso obtém-se $\Delta N = 0,4$ franjas. Este é o deslocamento das franjas que deveria ser observado se houvesse alguma diferença na velocidade da luz medida nos dois referenciais, o da Terra e o do Éter. Como nenhuma mudança foi observada, a conclusão inevitável foi de que a velocidade da luz é a mesma nos dois referenciais.

Na experiência de Michelson os raios paralelo e perpendicular são superpostos de modo a interferirem. O que se mede em um interferômetro deste tipo são as posições das franjas de interferência. Essas posições dependem dos caminhos percorridos pelos dois raios luminosos. Michelson mediu as posições das franjas e depois rotacionou de 90^o todo o aparelho, de modo a trocar as direções de propagação entre os raios paralelo e perpendicular. Ele calculou que se houvesse uma diferença entre as velocidades da luz no sistema do éter e na Terra, essa rotação deslocaria as franjas de interferência de quatro décimos. Espertinho, não? Porque você acha que ele embolsou o Estocolmo[2]?

Resultado do experimento: deslocamento das franjas igual a zero! Isto é, não houve mudança nenhuma no padrão de interferência quando foi feita a rotação. Polvorosa total! O Titanic começou a afundar! Este resultado foi tão impactante, que até 1930 (50 anos depois do experimento de Michelson, e 25 anos depois da Relatividade) tinha "mané" repetindo o experimento. Todos eles confirmaram: não existe a diferença entre as velocidades da luz em relação ao sistema do éter e da Terra, previsto pela mecânica clássica. Ou seja, não existe o tal sistema do éter. Então, para que o éter?!

[2]Estocolmo, capital da Suécia, terra natal de Alfred Nobel, um milionário químico e industrial que instituiu o famoso *Prêmio Nobel* para obras científicas, literárias e filantrópicas.

2.3 Os Postulados da Relatividade: a Implosão do Velho Templo

"Zur Elektrodynamik Bewegter Körper", ou " Sobre a Eletrodinâmica dos Corpos em Movimento". Este é o título de um dos artigos publicados em 1905 no *Annalen der Physik*, uma influente revista científica alemã da época. O autor do artigo: um desconhecido jovem de 26 anos de idade, funcionário de um escritório de patentes, chamado Albert Einstein. Era o início do fim para a física clássica[3].

Nesse artigo Einstein postula dois *princípios*:

> **Princípio da Relatividade**: *As leis da Física são as mesmas em todos os sistemas inerciais. Não existe nenhum sistema inercial preferencial.*
>
> **Princípio da Constância da Velocidade da Luz**: *A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor em todos os sistemas inerciais.*

Com o primeiro princípio Einstein detona a idéia do tal sistema do éter e, de forma geral, de sistemas de referência absolutos. Ele afirma que não é possível encontrarmos através de qualquer experimento (mecânicos, óticos, eletromagnéticos, etc.) um sistema de referência que esteja absolutamente parado, ou absolutamente em movimento. Tal sistema não existe. Tudo o que existe é o movimento

[3]Na verdade, cronologicamente falando, o "fim" da Física Clássica já havia começado em 1900 com o trabalho de Max Planck (capítulo três). Contudo, a importância deste trabalho só foi reconhecida pela primeira vez pelo próprio Einstein, que é, na opinião do autor, a figura central da Física no século XX.

relativo. O segundo princípio é um postulado consistente com os resultados experimentais de Michelson. Einstein mais tarde viria a dizer que por ocasião de seu artigo desconhecia os resultados de Michelson[4]. Vamos estudar agora as conseqüências lógicas dessas duas sentenças.

A velocidade da luz é a mais alta velocidade que pode ser atingida na Natureza. É o topo. O segundo princípio afirma que esta velocidade é a mesma em todos os sistemas inerciais. Aqui a nossa intuição começa a ir para o brejo! Só para "sentir o drama", considere novamente o experimento da imagem no espelho, que Einstein imaginara dez anos antes do seu artigo. De acordo com o segundo princípio, se fosse possível para o observador se mover com o espelho à velocidade da luz, ele continuaria a ver a sua imagem como se estivesse parado! É como se você quisesse medir a velocidade de um carro na estrada tentando "emparelhar" com ele, mas por mais que você acelerasse a velocidade dele continuasse sempre a mesma em relação a você. Imagine uma coisa dessas: você vai com seu carro pela a estrada a 80 km/h, e vê outro carro a sua frente a 50 km/h, em relação a você. Então você acelera e aumenta a sua velocidade para 120 km/h, mas continua vendo o carro da frente se afastar com os mesmos 50 km/h! É ou não é esquisito?

Obviamente uma coisa dessas não é imediatamente aceita pelos físicos só porque um tal de Einstein falou. Desde seu nascimento, a relatividade já foi testada milhares de vezes em diferentes laboratórios por todo o mundo, e sobreviveu a todos os testes. Um dos testes mais espetaculares da constância da velocidade da luz foi realizado no la-

[4]Há aqui alguma controvérsia. Alguns autores afirmam que Einstein conhecia os resultados de Michelson, mas fazia de conta que não, o que sugere uma certa "malandragem" sua.

boratório CERN, localizado na Europa, em 1964 (9 anos após a morte de Einstein; 35 anos após a publicação do artigo!). Para isso os físicos usaram o decaimento de uma partícula chamada *píon*, representada por π^0 (o sobrescrito "0" quer dizer que a partícula é neutra, ou seja *sem carga elétrica*). No capítulo nove falaremos com mais detalhes sobre partículas elementares e decaimentos. Por agora é suficiente saber que o π^0 se desintegra, ou decai, em duas partículas gama, que nada mais são do que ondas eletromagnéticas. Representamos o processo de decaimento de maneira semelhante àquela usada pelos químicos para representar reações químicas:

$$\pi^0 \longrightarrow \gamma + \gamma$$

Estes símbolos significam que o píon "some" para dar lugar a ondas eletromagnéticas (também chamadas de partículas gama, ou fótons, como veremos no próximo capítulo), representadas pela letra grega gama (γ).

Píons podem ser fabricados em laboratórios. No experimento de 64 no CERN, píons foram produzidos com uma velocidade muito próxima à velocidade da luz: $v = 0,99975c$ (ou seja, 99,975% da velocidade da luz). O objetivo do experimento era medir a velocidade dos gamas emitidos no decaimento no referencial do píon. Ou seja, realizar na prática a experiência do espelho de Einstein! O resultado da medida foi:

$$c = 2,9977 \times 10^8 \ \text{m/s}$$

ou seja, idêntico à velocidade da luz medida no laboratório (obviamente em repouso em relação ao píon). A conclusão deste experimento foi a de que o píon se movendo com uma velocidade muito próxima à da luz, "vê" a onda eletromagnética se propagar com uma velocidade que seria a mesma que ele "veria" se estivesse parado.

Obviamente os princípios postulados por Einstein invalidam as transformações de Galileu. Mas, se aquelas transformações estão erradas, quais são as certas? Antes de responder vamos considerar uma situação simples onde dois referenciais A e B se deslocam relativamente um ao outro ao longo do eixo x com uma velocidade v. De acordo com as transformações de Galileu, as relações entre as coordenadas medidas nos dois sistemas será:

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

Ou seja, somente a coordenada x sofrerá neste caso alteração quando passarmos de um sistema para outro. A última equação, $t' = t$ é uma mera afirmação de que o tempo é absoluto, um postulado da mecânica newtoniana. A relatividade afirma que essas transformações não são corretas, ou pelo menos não são gerais (por exemplo, elas estão em conflito com o resultado do experimento de Michelson). As transformações encontradas por Einstein, e que devem ser usadas são chamadas *transformações de Lorentz*, dadas por[5]:

[5]Essas expressões não foram deduzidas por Einstein, mas pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz, que, no entanto, as utilizou em um contexto físico diferente.

$$
\begin{aligned}
x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\
y' &= y \\
z' &= z \\
t' &= \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}
\end{aligned}
\tag{2.1}
$$

Note que a última equação afirma que intervalos de tempo medidos pelo observador em movimento dependem da velocidade relativa entre os sistemas de coordenadas. Ou seja, cai por terra o absolutismo do tempo newtoniano, implícito nas transformações de Galileu! Se a velocidade v for muito pequena, ou seja, $v \ll c$, os termos v^2/c^2 e v/c^2, podem ser desprezados e o que obtemos são precisamente as transformações de Galileu. Portanto, a relatividade estabelece um *limite de validade* para as transformações de Galileu (e de certa forma para a nossa percepção do mundo!). Quando v for muito grande, comparável à velocidade da luz, a física "muda", e temos que usar as transformações de Lorentz. Quanto mais próximo v for de c, mais a razão v^2/c^2 tenderá para o valor 1, e conseqüentemente a expressão $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ tenderá para zero, fazendo as frações em 2.1 "explodirem" para infinito. É nesse limite que coisas estranhas acontecem com o tamanho dos objetos e os ponteiros dos relógios!

2.4 O Tempo pode ser Esticado!

Simultaneidade: "Qualidade do que é simultâneo; existência ao mesmo tempo de duas ou mais ações, fatos ou coisas." (Koogan/Houaiss, **Enciclopédia e Dicionário Ilustrado**, Ed. Delta 1998).

Um dos conceitos chaves em relatividade é o de simultaneidade. O dicionário define a palavra sem dizer contudo como julgar se dois eventos são simultâneos ou não. Nas palavras de Einstein: *Quando digo, por exemplo, 'o trem chega às 7', significa que a passagem do ponteiro do relógio sobre o lugar marcado 7 e a chegada do trem são eventos simultâneos.* Esta afirmação trivial para o senso comum, não é tão trivial assim em relatividade.

Suponha que um observador meça dois eventos, que vamos chamar de evento 1 e evento 2 (como por exemplo a passagem de um avião e o espirro de uma pessoa). O nosso senso comum nos diz que se os eventos ocorrem ao mesmo tempo para um observador sentado no banco de um jardim, ou seja, se eles são simultâneos, também o serão para alguém, por exemplo, passando em um ônibus. Acontece que simultaneidade também é um conceito relativo. Ou seja, se o observador sentado no banco observa o evento 1 e o evento 2 ocorrerem ao mesmo tempo, o observador em movimento pode chegar à conclusão, por exemplo, de que a pessoa espirrou antes de o avião passar!

A relatividade da simultaneidade está associada à relatividade do tempo. Consideremos um outro "experimento-cabeça". Material necessário: 2 observadores, 1 trem, 1 espelho, uma lanterna, 2 relógios, e 1 maquinista (para guiar o trem!). Ainda bem que o experimento é só de cabeça! Para dar um toque mais humano vamos chamar um dos observadores de *Eduardo* e o outro de *Mônica*. Eduardo está em pé na plataforma, e Mônica viaja em uma cabine do trem, que se move com velocidade

v constante (portanto ambos os referenciais são inerciais). O espelho se encontra em frente à plataforma, a uma distância d, do outro lado dos trilhos. O trem se aproxima da estação e, no momento em que a cabine de Mônica passa por Eduardo, a lanterna é acesa. O objetivo do experimento é medir o tempo que a luz leva para ir até o espelho, refletir, e voltar até a cabine onde está Mônica. Como Mônica está parada em relação ao trem, ela simplesmente vê a luz ir e voltar perpendicularmente à sua cabine, e portanto gastar um tempo Δt_M igual a:

$$\Delta t_M = \frac{2d}{c}$$

Por outro lado, para Eduardo o trem terá se deslocado uma distância igual a $v\Delta t_E$, durante o tempo Δt_E de ida e volta do raio luminoso medido por ele. O caminho percorrido pela luz será para Eduardo igual a $2l$ (veja figura), e portanto:

$$\Delta t_E = \frac{2l}{c}$$

Aplicando o teorema de Pitágoras ao triângulo retângulo formado por l, d e $(1/2)v\Delta t_E$ obtemos:

$$l = \sqrt{(\frac{v}{2}\Delta t_E)^2 + d^2}$$

Mas, da expressão do tempo medido por Mônica obtemos:

$$d = \frac{c}{2}\Delta t_M$$

conseqüentemente

$$l = \sqrt{(\frac{v}{2}\Delta t_E)^2 + (\frac{c}{2}\Delta t_M)^2}$$

Por outro lado, da expressão do tempo medido por Eduardo temos:

$$l = \frac{c}{2}\Delta t_E$$

Substituindo na expressão anterior, e elevando ambos os lados ao quadrado, obtemos:

$$(\frac{c}{2}\Delta t_E)^2 = (\frac{1}{2}v\Delta t_E)^2 + (\frac{c}{2}\Delta t_M)^2$$

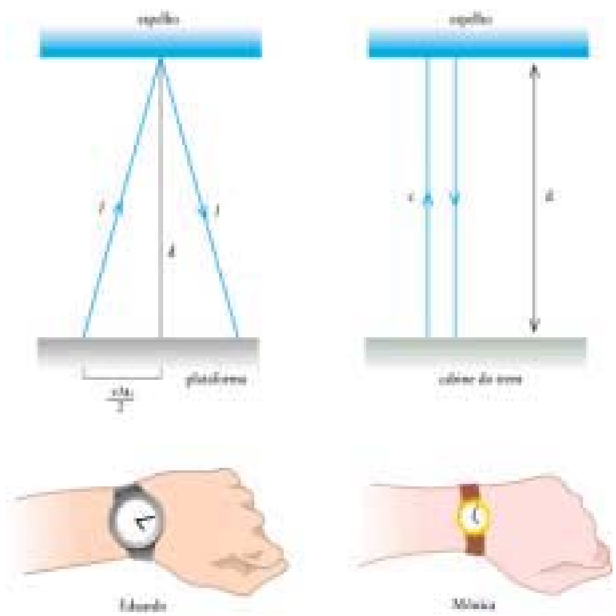
ou

$$(c^2 - v^2)\Delta t_E^2 = c^2\Delta t_M^2$$

donde obtemos a seguinte relação para os intervalos de tempo Δt_M e Δt_E:

$$\Delta t_E = \frac{\Delta t_M}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Ou seja, os intervalos de tempo medidos por Eduardo e Mônica são diferentes! Eles somente serão iguais se a velocidade do trem for muito menor do que a da luz (o que obviamente é sempre verdade, pelo menos para os trens fabricados aqui na Terra!), ou seja $v \ll c$. O leitor deve parar para refletir sobre esse resultado espetacular da relatividade. A fórmula acima vale para qualquer velocidade v. Para um valor qualquer de v, o intervalo de tempo medido por Eduardo será maior do que aquele medido por Mônica. Ou seja, o relógio de Mônica se atrasa em relação ao de Eduardo. Eduardo envelhece mais rápido do que Mônica! Note que isso é uma consequência direta da constância da velocidade da luz: como o percurso do raio visto por Eduardo é maior, a única maneira de manter c constante é alongar o tempo na mesma proporção! Este fenômeno é chamado de *dilatação temporal*. Embora não o façamos aqui, a dilatação temporal pode também ser deduzida facilmente das transformações de Lorentz.



A Relatividade prevê que observadores que se movem relativamente um ao outro envelhecem de maneira distinta.

Para dar um exemplo numérico utilizando valores acessíveis no nosso dia-a-dia, vamos supor que Mônica se encontre em um desses super-trens japoneses que viajam a 500 km/h (aproximadamente 139 m/s). A esta velocidade, o fator no denominador da expressão acima seria de:

$$\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-(139/3\times 10^8)^2}} \approx 1 + 10^{-13}$$

Ou seja, para essa velocidade, cada segundo que se passar para Mônica, 1,0000000000001 segundos (um segundo e um décimo de um trilhonésimo) se passarão para Eduardo! Este exemplo mostra porque no nosso dia-a-dia de velocidades mundanas, não percebemos tais fenômenos.

Mas, o que é impossível para humanos, pode ser corriqueiro para partículas. Lembra do experimento de 64 realizado no CERN para verificar a constância da velocidade da luz? Pois é, em 68 eles fizeram um para verificar a dilatação temporal! Desta vez eles usaram não o π^0, mas o *múon*, uma partícula que quando em repouso dura apenas cerca de 2,2 microssegundos (1 microssegundo = 1 μs = 10^{-6} s). Múons foram produzidos a uma velocidade de 0,9966c (ou seja, 99,66% da velocidade da luz), e seu tempo de decaimento observado. Resultado: quando se move com essa velocidade o múon leva cerca de 26,2 microssegundos para decair. Comparando com a previsão da teoria da relatividade:

$$\Delta t = \frac{2,2}{\sqrt{1-0,9966^2}} = 26,7 \ \ \mu\text{s}$$

em boa concordância com o experimento. Então, do ponto de vista do observador em repouso, o múon vive mais tempo quando em movimento!

Aqui vale uma pausa para um comentário não-tendencioso de um físico experimental. Cá pra nós, esses experimentos são de arrepiar! Não fosse possível verificar experimentalmente esses resultados estapafúrdios da relatividade, a teoria jamais teria sido aceita! A física é uma ciência experimental. Experimentar é preciso!

O leitor deve estar se perguntando ainda sobre o problema do espelho. A constância da velocidade da luz em todos os referenciais inerciais foi postulada por Einstein, o que leva às transformações de Lorentz. Obviamente se essas transformações estão corretas, elas devem "embutir" o resultado do experimento do espelho (ou do múon). Ou seja, temos as transformações para as posições; precisamos agora das transformações para as velocidades. Vamos considerar o problema unidimensional ao longo do x. Se v for a velocidade de um objeto medida de um sistema fixo em relação ao solo, e v' o medido de um sistema que se desloca com velocidade V em relação ao primeiro, sabemos que classicamente:

$$v = v' + V$$

A transformação correta para velocidade, obtida das transformações de Lorentz é:

$$v = \frac{v' + V}{1 + v'V/c^2}$$

Note que esta se reduz à expressão anterior no caso em que $v \ll c$.

Para verificarmos o experimento do espelho simplesmente substituímos $v' = c$ para a velocidade do espelho e do observador, e vemos o que resulta para v, a velocidade da luz medida por ele:

$$v = \frac{c + V}{1 + cV/c^2} = \frac{c + V}{1 + V/c} = \frac{c + V}{(c + V)/c} = c$$

ou seja, a velocidade da luz permanece a mesma.

Passemos agora aos tamanhos das coisas.

2.5 O Espaço pode ser Encolhido!

Como se mede o comprimento de alguma coisa? O leitor a essa altura deve estar pensando: "pronto, agora ele enlouqueceu de vez!" Mas lembremos que foi exatamente fazendo perguntas "triviais" que Einstein chegou à relatividade. Vamos então de novo: como se mede o comprimento de alguma coisa? Pegamos uma régua e comparamos o tamanho do objeto com o número daqueles tracinhos desenhados na régua. Neste processo trivial, o que estamos fazendo na realidade é subtrair os números correspondentes aos tracinhos que coincidem com as extremidades do objeto a ser medido. Por exemplo, se uma das extremidades coincide com o tracinho que marca '15 cm' e a outra está sobre o tracinho '5 cm', o comprimento do objeto será obviamente de 10 cm. E se o objeto estiver se movendo em relação a você? Suponha que você queira medir o comprimento de um cabo de vassoura que está se movendo, por exemplo, arrastado por uma bicicleta. Neste caso fica difícil usar uma régua. Poderíamos, por exemplo, usar um daqueles dispositivos óticos que existem em portas de elevadores para abrí-las quando a luz é interrompida. Então, durante a passagem do cabo de vassoura a luz estaria interrompida. Mediríamos desse modo o tempo gasto durante a passagem do cabo, e multiplicaríamos esse tempo pela velocidade do cabo. Este seria o comprimento do cabo, certo? Mas, que intervalo de tempo você usaria, cara-pálida, se acabamos de ver que intervalos de tempo dependem do observador?

Retornemos aos nossos observadores Eduardo e Mônica. Desta vez o objetivo é medir o comprimento da plataforma da estação. Eduardo, que está parado em relação à plataforma, pega uma régua e mede um comprimento igual a L_0. Além disso, ele mede o intervalo de tempo que o trem leva para atravessar a plataforma. Chamando esse intervalo de Δt_E, e sabendo que a velocidade do trem é constante e igual a v, obviamente Eduardo chega à conclusão de que:

$$L_0 = v\Delta t_E$$

Para Mônica, por outro lado, o trem está parado, e é a plataforma que se move com velocidade v (em módulo). De dentro do trem Mônica mede um intervalo de tempo Δt_M para o trem atravessar a plataforma, e chega a conclusão de que o comprimento da plataforma é igual a:

$$L = v\Delta t_M$$

Dividindo uma expressão pela outra obtemos a seguinte relação entre os comprimentos medidos por Eduardo e Mônica:

$$L = L_0 \frac{\Delta t_M}{\Delta t_E} = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Portanto, Mônica vê a plataforma com um comprimento menor do que o que é visto por Eduardo! Para ela o espaço encolheu! Este fenômeno é chamado de *contração do comprimento*, e é obviamente uma conseqüência direta da dilatação do tempo. Podemos novamente utilizar o exemplo do trem japonês viajando a 500 km/h para avaliar de quanto a plataforma encolhe para Mônica. Neste caso, obtemos:

$$L \approx (1 - 10^{-13})L_0$$

ou seja, se o comprimento da plataforma para Eduardo for de 50 metros, para Mônica ele será de 49,9999999999999 metros!

Poderíamos agora perguntar, por exemplo, a que velocidade o trem deveria viajar a fim de que a plataforma aparecesse para Mônica com a metade do comprimento visto por Eduardo. Basta substituir $L = L_0/2$ na expressão acima:

$$\frac{1}{2} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Rightarrow \frac{1}{4} = 1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2$$

ou

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - 0,25} = 0,866$$

ou seja, cerca de 86,6 % da velocidade da luz, ou 259 800 km/s!

Uma curiosidade: note como o valor da velocidade da luz é importante para a nossa percepção do mundo. Se ao invés de 300 000 km/s, a luz viajasse a 100 km/h, o valor calculado acima corresponderia a apenas 87 km/h, o que de fato é a ordem de magnitude para velocidades de trens e carros. Em tal situação veríamos carros, trens, ônibus, etc., mudarem de tamanho quando postos em movimento!

2.6 $E = mc^2$: Energia que dá Gosto!

Não só a imagem de Einstein mostrando a língua para os fotógrafos se tornou um símbolo, mas também a sua famosa expressão $E = mc^2$. Expressões simples como essa possuem um poder cativante sobre a mente estética dos físicos. Fórmulas complicadas são coisas horrorosas, em geral aproximadas, sem beleza e sem generalidade. Como dizia Vinicius de Moraes, “beleza é fundamental”. Concordamos que $E = mc^2$ é mais famosa do que $F = ma$. Que diretor de cinema usaria $F = ma$, ou $p = mv$, ao invés de $E = mc^2$ em uma daquelas histórias manjadas do menino-gênio? Mas o que significa essa expressão, e quais são suas conseqüências? É o que veremos nesta seção.

Recordemos primeiramente a definição de momento ou quantidade de movimento em mecânica clássica:

$$p = mv$$

Vimos que esta quantidade está associada à energia cinética T através de:

$$T = \frac{p^2}{2m}$$

Lembremos ainda a importante propriedade de conservação destas quantidades em sistemas mecânicos isolados.

Em relatividade o momento, como definido acima, não se conserva para todos os sistemas inerciais. A fim de preservar a lei de conservação do momento, sua expressão deve então ser redefinida. A nova expressão envolve o mesmo fator $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ que aparece nas expressões da dilatação temporal e contração do comprimento:

$$p = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} v$$

Podemos re-escrever essa expressão com o mesmo aspecto que a clássica definindo uma quantidade chamada *massa relativística* m':

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

de modo que

$$p = m'v$$

Vemos então que a massa relativística depende da velocidade do objeto. Quando $v = 0$, teremos $m' = m$. A massa m é aquela medida por um observador em repouso em relação ao objeto, e por essa razão é chamada de *massa de repouso*. Por outro lado, a massa m' é aquela medida por um observador que vê o objeto se mover. Então, em relatividade existem duas massas: a de repouso e a relativística. Obviamente para $v \neq 0$, m e m' serão diferentes. É preciso ter cuidado nesse ponto: o fenômeno de aumento da massa relativística é um efeito dinâmico, e não significa que a *quantidade de matéria* do objeto esteja aumentando. Trata-se de um aumento da *inércia* do objeto. Ou seja, quanto mais próxima da velocidade da luz for a velocidade de um objeto, mais difícil se torna aumentá-la. Estritamente falando, somente objetos com massas de repouso iguais a zero podem viajar à velocidade da luz (como, por exemplo, os fótons - capítulo três). Um elétron, por exemplo, possui massa de repouso $m = 9,11 \times 10^{-31}$ kg. Se um elétron for acelerado até que sua velocidade atinja o valor $0,95c$ (95% a velocidade da luz), para um observador em repouso em relação a ele, sua massa passa a ser aproximadamente de $3,2m$. É desnecessário dizer que no nosso dia-a-dia não percebemos tal aumento. Usando novamente o exemplo do trem a 500 km/h, se Mônica mede 60 kg para sua própria massa, Eduardo medirá 60,00000000000001 kg, o que não significa que Mônica aparecerá aos seus olhos mais gordinha!

A energia cinética relativística não terá mais uma relação tão simples com o momento do objeto, quanto na mecânica clássica. Ela é dada por :

$$T = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right)$$

ou

$$T = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2 = m'c^2 - mc^2$$

Note que quando $v = 0$, teremos $T = 0$, como ocorre na mecânica clássica. Além disso, na maioria das situações do nosso dia-a-dia, a velocidade v do objeto que se move será muito menor do que a velocidade da luz c, ou seja, $v \ll c$. Neste limite, podemos usar uma aproximação para a raiz quadrada no denominador da expressão acima. De um modo geral, em uma expressão do tipo:

$$(1 + x)^n$$

se x for muito menor do que 1, podemos escrever:

$$(1 + x)^n \approx 1 + nx$$

No caso que estamos tratando, identificamos x como $-v^2/c^2$, e $n = -1/2$:

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

Consequentemente, para $v \ll c$ teremos:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx 1 + \frac{v^2}{2c^2}$$

e nossa expressão para a energia cinética então se torna:

$$T = mc^2 \left(1 + \frac{v^2}{2c^2}\right) - mc^2 = \frac{mv^2}{2}$$

que é o resultado clássico. Logo, a energia cinética relativística se reduz à clássica no limite de baixas velocidades, como aliás já era de se esperar!

Definimos a quantidade $m'c^2$ como a *energia total* do objeto, que será então igual à soma da energia cinética mais o produto mc^2:

$$m'c^2 = T + mc^2$$

Note que no último termo, a quantidade m é a *massa de repouso.* Esta é a famosa expressão da *energia de repouso*, E:

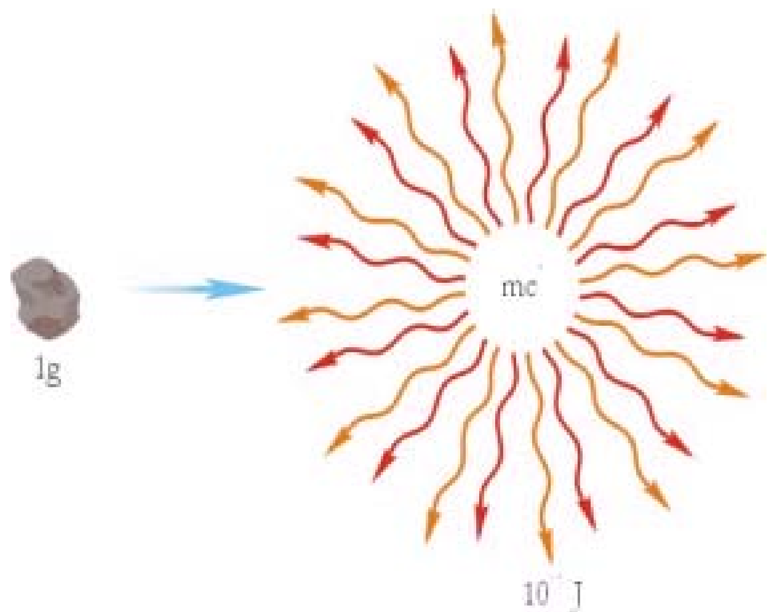
$$E = mc^2$$

Esta expressão estabelece uma *equivalência entre massa e energia*, e é talvez o resultado mais revolucionário da teoria da relatividade. Ela simplesmente nos diz que massa pode ser convertida em energia e vice-versa. Como veremos com mais detalhes no capítulo sete, esta equivalência é verificada em processos de desintegração nuclear. Somente a título de exemplo vamos estimar aqui a energia contida em uma massa igual a 1 grama:

$$E = 10^{-3} \text{ kg} \times (3 \times 10^8)^2 \text{ m/s} = 9 \times 10^{13} \approx 10^{14} \text{ J}$$

Só para dar uma idéia da quantidade de energia acima, recordemos que a energia necessária para elevar 1 litro de água de zero até 100 graus

Celsius é da ordem de 10^5 J. Portanto, com a energia de 10^{14} J contida em uma massa de apenas 1 g, poderíamos ferver cerca de 1 bilhão de litros de água! Pense nisso: se na sua casa a caixa dágua é de 2000 litros, 1 bilhão de litros corresponde a 500 000 caixas dágua!



O resultado mais revolucionário da Relatividade: massa e energia são grandezas físicas equivalentes!

PAINEL VII

CASAMENTO CONTURBADO

Einstein casou-se pela primeira vez em 1903, sob veemente oposição dos seus pais, com a serbia Mileva Maric, uma ex-companheira da Politécnica que ele conheceu aos 17 anos de idade. O casamento gerou dois filhos, e revelou uma face pouco divulgada e embaraçosa de um candidato a mito. Várias cartas foram escritas por ele durante esta época. Elas revelam a decadência do relacionamento do casal até a sua separação. Inicialmente Einstein se refere a Mileva como "uma criatura igual a ele; forte e independente", ou como em outra carta, onde ele se refere à Mileva como "gatinha", e declara: "sem a sua lembrança, eu não conseguiria viver no meio desse miserável bando de humanos".

À medida em que o relacionamento foi se deteriorando, o teor das cartas foi mudando. Em uma delas Einstein escreve para sua prima Elsa, com quem se casaria mais tarde: "Trato Mileva como uma empregada que não posso demitir. Tenho meu próprio quarto, e evito ficar sozinho com ela. Somente desta forma consigo suportar nosso convívio."

Einstein chegou ao extremo de impor regras escritas à Mileva:

"A) você se encarregará de: (1) que minhas roupas sejam mantidas em ordem; (2) me servir três refeições ao dia no meu quarto; (3) que meu quarto e minhas coisas sejam mantidas em ordem sobre a minha mesa, e que não sejam tocadas por ninguém além de mim."

"B) Você renunciará a qualquer relacionamento pessoal comigo, exceto quando necessário, de modo que as aparências sociais sejam mantidas. Em particular, você não: (1) sentará ao meu lado em casa; (2) sairá ou viajará comigo."

"C) Você terá que prometer as seguintes coisas: (1) não esperar afeição de minha parte, e não se aproximar de mim; (2) responder imediatamente quando eu falar com você; (3) sair do meu quarto imediatamente, sem protestar, quando eu pedir."

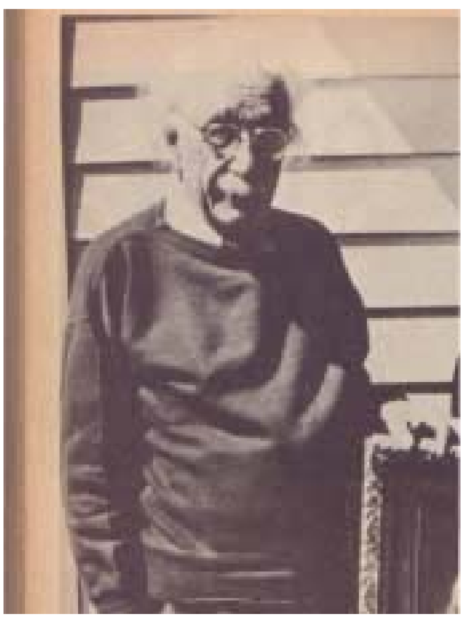
"D) Você prometerá não denegrir a minha imagem aos olhos das crianças."

2.7 Viagens no Tempo

A teoria da relatividade revelou o comportamento não intuitivo de relógios e réguas a altas velocidades. Mas, o que é um relógio senão algo que marca o número de vezes que determinado fenômeno se repete? Um relógio de pulso marca o número de voltas dadas pelos ponteiros durante uma revolução completa da Terra em torno de si mesma. A rigor, qualquer fenômeno periódico serve como relógio. E se aplicarmos a dilatação temporal a seres humanos? As batidas de nosso coração, por exemplo, podem servir como relógio. Em 1911, 6 anos após a publicação de seu artigo revolucionário, Einstein fez o seguinte comentário:

> *Se tivéssemos um organismo vivo numa caixa, poderíamos proceder de maneira que o organismo, depois de um vôo longo arbitrário retornasse ao ponto inicial, numa condição muito pouco alterada, enquanto que os organismos correspondentes, que permaneceram em suas posições iniciais, haviam há muito cedido lugar a novas gerações. Para o organismo em movimento, o longo tempo de jornada foi um mero instante, desde que o movimento tenha sido realizado com uma velocidade próxima à da luz.* (Compilado de **Introdução à Relatividade Especial**, Robert Resnik, Ed. USP 1971).

Considere por exemplo uma outra experiência pensada. Material necessário: 2 pessoas gêmeas, 2 relógios e um foguete capaz de viajar com velocidade próxima a da luz. Um dos gêmeos embarca no foguete e faz uma viagem até uma galáxia distante, enquanto o outro permanece na Terra. Cada um dos gêmeos vê o seu próprio relógio marcar as horas normalmente, mas para o que permanece na Terra, o relógio do outro se atrasa, como resultado da dilatação temporal. Em outras palavras, para ele, seu irmão envelhece mais lentamente. Quando a nave retornar à Terra, o que viajou estará mais novo do que o que ficou na Terra! Podemos pensar como se o do foguete tivesse feito uma viagem para o futuro!



Última fotografia de Eistein, aos 79 anos de idade.

Obviamente tal experiência não é, por enquanto, possível de ser realizada. Do material necessário, só dispomos dos gêmeos e dos relógios, mas não da nave com as características desejadas. No entanto, existem homens dispostos a tudo. Vimos anteriormente que a dilatação do tempo foi verificada em laboratórios utilizando partículas subatômicas. Se criarmos, por exemplo, dois múons e acelerarmos um deles a uma velocidade de 0,9966c, permanecendo o outro em repouso, notaremos que o primeiro existirá por cerca de 26 μs, enquanto que o segundo terá desaparecido após 2,2 μs. O experimento acima, no entanto, diz respeito não a partículas, mas a pessoas. Em outubro de 1977, Joseph Hafele e Richard Keating resolveram testar a dilatação temporal em relógios macroscópicos, utilizando vôos comerciais em torno do globo. Neste nível de velocidades a dilatação temporal é imperceptível para o senso comum, e só pôde ser medida devido a existência de relógios atômicos de altíssima precisão. Com isso Hafele e Keating verificaram a dilatação temporal prevista pela teoria da relatividade com um erro menor do que 10%!

É este o estado das coisas. Somos seres não relativísticos e nossas percepções são mais próximas à mecânica clássica. No entanto, a Natureza é muito mais do que as nossas percepções, como ficou evidente neste capítulo. Os tremendos "insights" de Einstein o colocaram acima das próprias percepções, e no topo do mundo, entre os homens mais brilhantes que já existiram. A relatividade "bagunçou" o palco fundamental da mecânica clássica, revelando propriedades dinâmicas até então insuspeitas do espaço e do tempo. Mas Einstein não parou por aí, e nem os desenvolvimentos da física no início do século XX. Se o leitor acha que este capítulo já esgotou a quota de coisas estranhas que podem ser toleradas, sugiro que ele feche o livro e não ouse ler o próximo capítulo, sob pena de que, caso insista em ir adiante, vir a duvidar da sua própria existência!

Onde saber mais: deu na Ciência Hoje.

1. *O Anel Impossível de Einstein*, Reuven Opher, vol. 8, no. 47, p 12.

2. *Segredos do Jovem Einstein*, Thomas F. Glick, vol. 11, no. 66, p. 60.

3. *A Nova Estrela Binária e a Relatividade*, João Steiner, vol. 4, no. 20, p. 6.

4. *Luz Lenta*, H. Moysés Nussenzveig, vol. 25, no. 149, p. 19.

5. *Um Manuscrito de Einstein no Brasil*, Alfredo Tiomno Tolmasquim e Ildeu de Castro Moreira, vol. 21, no. 124, p. 22.

Resumo - Capítulo Dois

A Teoria da Relatividade foi publicada por Albert Einstein em 1905. A teoria é baseada sobre dois postulados fundamentais: 1) todos os sistemas inerciais são equivalentes, e 2) a velocidade da luz é a mesma em qualquer sistema inercial. Como consequência desses postulados, as noções de espaço e tempo absolutos introduzidas na mecânica clássica tiveram que ser abandonadas. Na relatividade, intervalos de tempo e distâncias dependem do estado de movimento do observador. Quando um observador se encontra em movimento, o tempo para ele é dilatado em relação a um observador parado, e o espaço é encolhido. O conceito de energia ganha um novo significado na relatividade. A famosa fórmula

$$E = mc^2$$

expressa a equivalência entre massa e energia. c **é a velocidade da luz no vácuo. A relatividade representa uma generalização da mecânica newtoniana, e a velocidades muito menores do que a velocidade da luz, as duas teorias se tornam equivalentes.**