

Teoria da Relatividade Especial

De acordo com as leis clássicas da física, formuladas por Isaac Newton no seu livro *Principia* em 1687, o movimento de uma partícula tinha que ser descrito em relação a um sistema de referência inercial. Nele a partícula não estava sujeita a forças externas e, portanto, se moveria com uma velocidade constante e em uma linha reta. Segundo Newton dois referenciais inerciais podiam ser relacionados desde que eles estivessem se movendo, um em relação ao outro, em uma direção fixa e com velocidade constante. O tempo nesses referenciais inerciais iria diferir por uma constante e todos os tempos poderiam ser descritos em relação a um tempo absoluto.

Essa teoria, criada no século XVII, não foi alterada até o século XIX quando os fenômenos elétricos e magnéticos passaram a ser estudados teoricamente.

Um éter que evaporou

Os físicos já sabiam há muito tempo que o som se propagava através de um meio material. Isso naturalmente levou-os a postular, no final do século XIX, que também deveria existir um meio material no qual a luz se propagava. Tal meio foi chamado de éter luminífero ou, simplesmente, éter.

Vários grandes cientistas dessa época, tais como Cauchy, Stokes, Thomson e Planck, aceitaram a hipótese da existência do éter e postularam suas várias propriedades. No final do século XIX a luz, o calor, a eletricidade e o magnetismo todos tinham seus respectivos éteres.

No entanto, à medida que os pesquisadores tentavam explicar o éter e estabelecer suas propriedades o que se viu foi o surgimento de uma substância quase mágica. Segundo as teorias correntes, o éter tinha que ser um fluido pois ele precisava preencher o espaço. No entanto, ele também precisava ser milhões de vezes mais rígido do que o aço pois precisava aguentar as altas frequências das ondas luminosas. Ao mesmo tempo o éter não podia ter massa, deveria ser completamente transparente, não dispersivo, incompressível, contínuo e não ter viscosidade!

Ao verificar que o campo eletromagnético se propagava com uma velocidade essencialmente igual à velocidade da luz, Maxwell postulou que a própria luz era um fenômeno eletromagnético. Ele escreveu um artigo sobre o éter para a edição de 1878 da *Encyclopaedia Britannica* e propôs a existência de um único éter. Seu artigo narra sua própria tentativa, sem sucesso, em medir o efeito do arrasto do éter provocado pelo movimento da Terra no espaço. Maxwell também propôs uma maneira astronômica pela qual poderíamos verificar o arrasto do éter feito pelo nosso planeta. Para isso deveríamos medir a velocidade da luz usando os diferentes satélites de Júpiter quando eles estivessem em posições diferentes em relação à Terra.

Impelido pelas idéias de Maxwell, o físico Albert Abraham Michelson (nascido na Prússia e naturalizado norte-americano) iniciou uma série de experiências sobre o éter. Em 1881, ele registrou:



Albert A. Michelson (1852 - 1931)

"O resultado da hipótese de um éter estacionário é mostrada ser incorreta, e segue a conclusão necessária de que a hipótese está errada."

Em 1886 o físico holandês Hendrik Lorentz escreveu um artigo onde criticava a experiência feita por Michelson. Ele declarou que, realmente, não estava preocupado com o resultado experimental obtido por Michelson, que ele desprezava considerando-o ter sido resultado de experiências realizadas sem a precisão necessária.

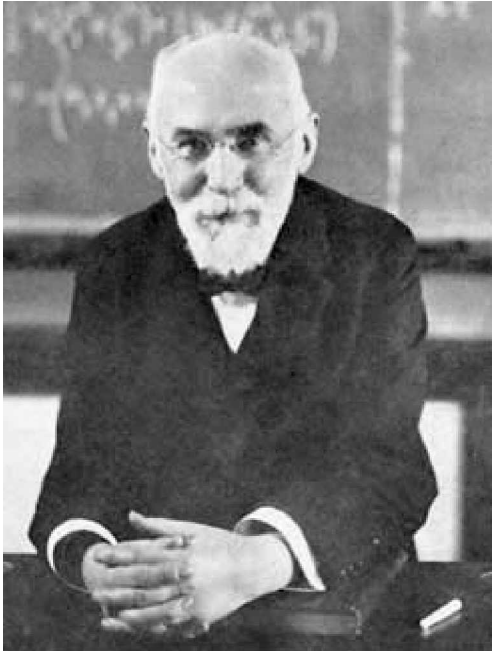
Michelson foi persuadido por Thomson e outros a repetir sua experiência. Ele assim o fez em 1887, dessa vez associando-se ao físico norte-americano Edward Williams Morley. Os dois cientistas registraram, mais uma vez, que nenhum efeito de arrasto havia sido encontrado. Parecia que a velocidade da luz era independente da velocidade do observador. Michelson e Morley refinaram a experiência e a repetiram várias vezes até 1929.



Edward Williams Morley (1838 - 1923)

A idéia da existência de um meio material chamado éter só foi abandonada quando as transformações Galileanas e a dinâmica Newtoniana foram modificadas pelas transformações de Lorentz-FitzGerald e pela Teoria da Relatividade Restrita de Albert Einstein.

As transformações de FitzGerald-Lorentz



Hendrik Antoon Lorentz (1853 - 1928)

Sabemos hoje que as equações que descrevem um dado fenômeno físico, definidas em um determinado referencial, precisam permanecer inalteradas se as observamos em um outro referencial que se desloca com velocidade constante em relação ao primeiro. O conjunto de equações que associa esses dois referenciais são conhecidas como transformações de Lorentz em homenagem ao físico holandês Hendrik Antoon Lorentz que as apresentou mais claramente ao mundo científico. Na verdade, as transformações de Lorentz possuem diversos descobridores.

O primeiro cientista a obter as importantes relações que hoje conhecemos como transformações de FitzGerald-Lorentz foi o físico alemão Woldemar Voigt (1850 - 1919), em 1887. Foi ele quem, pela primeira vez, as escreveu por extenso e mostrou que certas equações eram invariantes sob essas transformações.

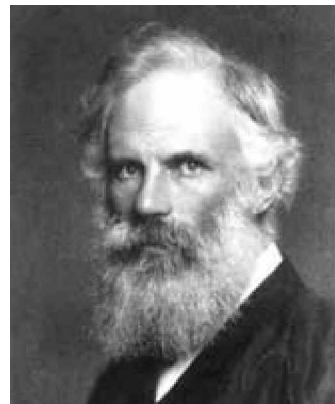
Hoje, com um fator de escala diferente, essas transformações são conhecidas simplesmente como equações de Lorentz ou transformações de Lorentz. O grupo das transformações de Lorentz nos dá a geometria da relatividade especial. Curiosamente, a importância dessas transformações para o desenvolvimento dos conceitos de espaço-tempo era totalmente desconhecida por Voigt, que estava pesquisando o deslocamento Doppler quando as obteve.

Embora Voigt tenha se correspondido com Lorentz sobre a experiência de Michelson-Morley em 1887 e 1888 não parece que esse último tenha tomado conhecimento dessas transformações. Lorentz, nessa época, estava muito preocupado com a nova experiência de Michelson-Morley feita em 1887.

Em 1889 um pequeno artigo foi publicado pelo físico irlandês George FitzGerald na revista Science. O artigo, *The ether and the earth's atmosphere*, tinha menos de meia página e não é técnico. Nele FitzGerald mostrava que os resultados da experiência de Michelson-Morley somente poderiam ser explicados se:

"...o comprimento dos corpos materiais muda, dependendo se eles estão se movendo ao longo do éter ou através dele, por uma quantidade que depende do quadrado da razão entre suas velocidades e aquela da luz."

Lorentz não conhecia o artigo de FitzGerald e em 1892 propôs a existência de uma "contração" quase idêntica em um artigo que agora considerava muito seriamente a experiência de Michelson-Morley. Quando Lorentz ficou sabendo, em 1894, que FitzGerald já havia publicado uma teoria similar à dele, prontamente escreveu ao físico irlandês. FitzGerald replicou que realmente havia enviado um artigo para a Science mas "eu não sei se eles em algum momento o publicaram". Ele ficou feliz em saber que Lorentz concordava com ele "pois eu tenho sido um tanto ridicularizado por aqui devido à minha visão". Depois disso Lorentz usou cada oportunidade que surgia para agradecer a FitzGerald, que havia sido o primeiro a propôr a idéia de contração dos corpos materiais. Somente FitzGerald, que não sabia se seu artigo havia sido publicado, acreditava que Lorentz tinha publicado primeiro.



George Francis Fitzgerald (1851-1901)



Joseph Larmor (1857 - 1942)

Em 1897, o físico norte-irlandês Joseph Larmor publicou as transformações de Lorentz na conceituada revista científica inglesa *Philosophical Transactions of the Royal Society* in 1897. Note que isso ocorreu dois anos antes de Hendrik Lorentz e oito anos antes de Albert Einstein. Larmor também foi capaz de prever o fenômeno da dilatação do tempo e também a contração do espaço.

Larmor escreveu um livro chamado "Aether and matter" (1900) no qual escreve por extenso as transformações de Lorentz, o que ainda não havia sido feito por Lorentz, assim como a contração do espaço e a dilatação do tempo. Ele mostrou que a contração de Fitzgerald-Lorentz era uma consequência dessas transformações.

Finalmente Lorentz escreveu por extenso as transformações que agora têm o seu nome, sendo portanto a terceira pessoa a fazê-lo. Ele então, assim como Larmor já havia feito, mostrou que a contração de FitzGerald-Lorentz era uma consequência dessas transformações.



Jules Henri Poincaré (1854-1912)

A relatividade engatinha

O mais importante artigo relacionado com a relatividade especial publicado antes de 1900 foi de autoria do físico francês Jules Henri Poincaré, "La mesure du temps", que apareceu em 1898. Nesse artigo Poincaré diz:

"...não temos intuição direta sobre a igualdade de dois intervalos de tempo. A simultaneidade de dois eventos ou a ordem de sua sucessão, assim como a igualdade de dois intervalos de tempo, deve ser definida de tal modo que as afirmações das leis naturais sejam tão simples quanto possível."

Por volta de 1900 o conceito de éter como uma substância material estava sendo questionado. Paul Drude escreveu:

"O conceito de um éter absolutamente em repouso é o mais simples e o mais natural - pelo menos se o éter é concebido como sendo não uma substância mas meramente espaço dotado de certas propriedades físicas."

físicas."

Poincaré, em sua palestra de abertura no Congresso de Paris em 1900, perguntou "O éter realmente existe?". Em 1904 esse grande cientista se aproximou bastante de uma teoria da relatividade especial em uma palestra no International Congress of Arts and Science, em Saint Louis. Ele mostrou que observadores em diferentes sistemas de referência terão relógios que:

"... marcarão o que podemos chamar de tempo local...como exigido pelo princípio da relatividade o observador não pode saber se ele está em repouso ou em movimento absoluto."

O ano em que a relatividade especial finalmente passou a existir foi 1905. O mês de junho desse ano foi muito importante para essa nova teoria. Em 5 de junho Poincaré apresentou um importante trabalho, "Sur la dynamique de l'électron", enquanto o primeiro artigo de Einstein sobre a relatividade foi recebido em 30 de junho. Poincaré estabeleceu que "parece que esta impossibilidade de demonstrar movimento absoluto é uma lei geral da natureza." Depois de criar o nome de transformações de Lorentz em homenagem a esse físico, Poincaré mostrou que essas transformações, junto com as rotações, formam um grupo, uma estrutura algébrica muito importante.

O artigo de Einstein possui uma abordagem completamente diferente. Ele não tem como objetivo explicar resultados experimentais, mas sim mostrar a beleza e simplicidade da teoria. Na introdução Einstein diz:

"...a introdução de um éter-luz provará ser supérflua uma vez que, de acordo com a visão a ser desenvolvida aqui, nem um espaço em repouso absoluto dotado de propriedades especiais será introduzido nem um vetor velocidade será associado com um ponto do espaço vazio no qual processos eletromagnéticos ocorrem."

Referenciais inerciais são introduzidos os quais, por definição, estão em movimento uniforme um em relação ao outro. A teoria inteira é baseada em dois postulados:

1. as leis da física tomam a mesma forma em todos os sistemas de referência inerciais.
2. em qualquer sistema de referência inercial a velocidade da luz c é a mesma independentemente da luz ser emitida por um corpo em repouso ou por um corpo em movimento uniforme.

Einstein deduziu as transformações de Lorentz a partir de seus dois postulados e, como Poincaré, provou a propriedade de grupo dessas transformações. Ele também deduz a contração de FitzGerald-Lorentz e menciona o paradoxo do relógio. Einstein o chamou de teorema e afirma que se dois relógios síncronos C_1 e C_2 são sincronizados em um ponto A e C_2 deixa A movendo-se ao longo de uma curva fechada até retornar a A então C_2 marcará o tempo mais lentamente comparado com C_1 . Einstein afirma que isso não significa a existência de qualquer paradoxo uma vez que C_2 experimenta aceleração enquanto C_1 não o faz.

Em setembro de 1905 Einstein publicou um pequeno mas importante artigo no qual ele provou a famosa equação

$$E = mc^2$$

O primeiro artigo sobre a relatividade especial não escrito por Einstein apareceu em 1908 e seu autor foi o físico alemão Max Planck. O fato da teoria da relatividade ter sido aceita por alguém tão importante quanto Planck fez com que ela fosse rapidamente aceita pelos físicos da época. Quando Einstein escreveu seu artigo de 1905 ele ainda era um especialista técnico de terceira classe no escritório de patentes de Berna. Também em 1908 Minkowski publicou um importante artigo sobre relatividade, apresentando pela primeira vez as equações de Maxwell-Lorentz na forma tensorial. Ele também mostrou que a teoria Newtoniana da gravitação não era consistente com a relatividade.

As principais contribuições para a relatividade especial foram feitas, sem dúvida, por Lorentz, Poincaré e, certamente, pelo fundador da teoria, Einstein. É interessante ver suas respectivas reações em relação à formulação final da teoria.

Embora Einstein tenha gasto vários anos pensando sobre como formular essa teoria, uma vez tendo encontrado os dois postulados, eles passaram imediatamente a ser naturais para ele. Einstein sempre foi relutante em aceitar que os resultados da experiência de Michelson-Morley tiveram qualquer influência na sua maneira de pensar.

A reação de Poincaré ao artigo de Einstein de 1905 foi tão estranha quanto a se Einstein em relação aos trabalhos do físico francês. Quando Poincaré deu uma palestra em Göttingen em 1909 sobre relatividade ele não mencionou Einstein de modo algum. Ele apresentou a relatividade com três postulados, o terceiro sendo a contração de FitzGerald-Lorentz. Na verdade Poincaré nunca escreveu um artigo sobre relatividade no qual mencionasse Einstein. O próprio Einstein comportou-se de maneira similar e Poincaré é mencionado apenas uma vez nos artigos de Einstein. Lorentz, entretanto, foi elogiado tanto por Einstein como por Poincaré e frequentemente foi citado nos trabalhos desses dois grandes físicos.

O próprio Lorentz nem sempre parecia aceitar as conclusões de Einstein. Em 1913 ele fez uma palestra advertindo que a teoria da relatividade havia sido aceita muito rapidamente e que não estava tão seguro sobre a sua validade. Lorentz disse:

"Até onde essa palestra diz respeito ele encontra uma certa satisfação na interpretação mais antiga de acordo com a qual o éter possui pelo menos substancialidade, espaço e tempo podem ser rigorosamente separados, e a simultaneidade sem especificação suplementar pode ser falada. Finalmente deve ser notado que a temerária afirmação que nunca podemos observar velocidades maiores do que a velocidade da luz contém uma restrição hipotética do que é acessível a nós, uma restrição que não pode ser aceita sem algumas reservas."

A despeito da cautela de Lorentz a teoria da relatividade especial foi rapidamente aceita. Em 1912 Lorentz e Einstein foram propostos conjuntamente para o Prêmio Nobel pelo seu trabalho na teoria da relatividade especial. A recomendação foi feita por Wien, o ganhador do Prêmio Nobel de 1911, que disse:

"...Embora Lorentz deva ser considerado como o primeiro a ter encontrado o conteúdo matemático do princípio da relatividade, Einstein foi bem sucedido em reduzi-lo a um princípio simples. Devemos por conseguinte avaliar os méritos de ambos pesquisadores como sendo comparáveis."

Einstein nunca recebeu Prêmio Nobel pela relatividade. O comitê Nobel estava, a princípio, cauteloso e esperou por confirmações experimentais. Na época em que tal confirmação estava disponível Einstein tinha se movido para trabalhos mais monumentais.

O que é a Teoria da Relatividade Especial?

Os postulados sobre os quais se apoia a teoria da Relatividade Especial

A teoria da Relatividade Especial proposta por Einstein em 1905 baseia-se em dois postulados básicos:

- a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, não importa quais sejam suas *velocidades relativas*.
- as leis da física são as mesmas em qualquer *sistema de referência inercial*.

Para entendermos melhor o que eles significam precisamos definir alguns de seus termos.

O que é um postulado?

O dicionário Aurélio define "postulado" como sendo uma "proposição não evidente nem demonstrável, que se admite como princípio de um sistema dedutível, de uma operação lógica ou de um sistema de normas práticas". Postulado é um fato ou preceito reconhecido sem prévia demonstração. Isso nos diz que as duas afirmações feitas acima não são demonstráveis. Elas foram estabelecidas por Einstein e colocadas sobre sua teoria sem terem sido deduzidas, calculadas ou inferidas a partir de experiências.

O que é preciso para definir repouso e movimento?

Na nossa vida diária comumente nos referimos a um determinado corpo dizendo se ele está em repouso ou em movimento. Para nós essas palavras bastam pois são bastante óbvias. No entanto, isso não é visto de modo tão simples pelos físicos. Quando um físico se refere a "repouso" ou "movimento" ele precisa definir em relação a que sistema de referência isso está relacionado. Duas pessoas paradas em um ponto de ônibus estão em repouso uma em relação à outra se considerarmos que o nosso sistema de referência é o ponto de ônibus. Os ônibus que passam (em alta velocidade e sem parar como sempre!) estão em movimento para essas duas pessoas. No entanto, se você está dentro de um ônibus e considera que o sistema de referência é o ônibus, você está parado e as duas pessoas que estão no ponto de ônibus estão em movimento.

Isso nos mostra que "repouso" e "movimento" não são conceitos absolutos mas sim relativos que precisam da definição de um sistema de referência para que possam ser perfeitamente entendidos pelos físicos.

E o que é movimento?

Definimos velocidade como sendo a variação da posição de um corpo ao longo de um determinado intervalo de tempo. Por isso sempre estamos comentando que um carro nos ultrapassou a mais de 100 quilômetros por hora. No entanto, para os físicos a definição de movimento não é tão simples. Ao dizermos que um determinado corpo está em movimento é preciso que fique claro que tipo de movimento ele tem. O corpo mantém uma direção de movimento retilínea ou sua trajetória é curva? Sua velocidade é constante ou varia em intervalos de tempo? Quando falamos de velocidade não basta citar um número. Para o físico a velocidade é definida por um valor numérico e por uma direção. Quando uma grandeza física, tal como a velocidade, precisa de um número e uma direção para ser definida, dizemos que ela é uma grandeza vetorial. Assim, a velocidade é uma grandeza vetorial e nos referimos a ela como o "vetor velocidade".

Agora podemos definir "velocidade relativa". Esse termo nos informa a diferença de velocidade existente entre dois corpos. Se um corpo está em repouso em relação a um referencial sua velocidade é zero. Ao compararmos isso com um outro corpo que se desloca a uma velocidade de 10 quilômetros por hora nesse mesmo referencial dizemos que a velocidade relativa entre esses dois corpos é de 10 quilômetros por hora. Por outro lado, se um corpo se desloca a 30 quilômetros por hora e um segundo corpo se desloca a 50 quilômetros por hora, ambas medidas em relação ao mesmo sistema de referência, precisamos conhecer a direção do movimento de cada um deles para podermos determinar sua velocidade relativa. Se eles se

afastam ao longo de uma mesma reta ou seja, se eles estão se deslocando em sentidos opostos, sua velocidade relativa é a soma de suas velocidades particulares resultando, nesse caso, em 80 quilômetros por hora. Se eles estão se aproximando ao longo da mesma direção ou seja, se eles estão se deslocando no mesmo sentido, sua velocidade relativa é a diferença entre suas velocidades particulares ou seja, nesse exemplo, 20 quilômetros por hora.

E o que é aceleração?

Quando você vê a Luana Piovani na televisão seu coração bate acelerado. Para nós isso é aceleração. Mas não é bem assim para a física. Embora os físicos também fiquem "acelerados" ao ver a atriz nossa definição é um pouco mais elaborada. A aceleração também é uma grandeza vetorial. Ela também precisa de mais que um número para ser descrita. Ela precisa de um número e de uma direção. Por isso nos referimos sempre ao "vetor aceleração". Para a física, a aceleração é definida como a variação do vetor velocidade. É claro que você notou que eu não disse que a aceleração é a variação da velocidade mas sim do "vetor velocidade". Como um "vetor" é descrito por um número e uma direção, basta que um desses fatores varie para que eu tenha uma variação do próprio vetor. Isso quer dizer que a aceleração pode ser provocada tanto pela variação do valor numérico da velocidade como também pela variação de sua direção. Assim você pode ter aceleração pelo simples fato de mudar a direção do seu movimento.

Vemos então que um corpo que se desloca em linha reta será acelerado se ele variar o valor numérico da sua velocidade mas mantiver a mesma trajetória. No entanto, se o corpo começa a descrever uma curva ele estará acelerado uma vez que, mesmo mantendo o valor numérico de sua velocidade, ele estará variando a direção da velocidade!

Analisando os postulados da relatividade especial

primeiro postulado:

"a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores, não importa qual seja a sua velocidade relativa."

Este postulado nos diz que independente da velocidade que o observador possua em relação a um feixe de luz a velocidade deste feixe será sempre observada ter o mesmo valor. Vimos anteriormente que a velocidade relativa entre dois corpos que se deslocam ao longo de uma mesma direção podia ser dada pela soma ou subtração de suas velocidades particulares, dependendo de se eles estão se deslocando no mesmo sentido ou não. No caso do feixe luminoso isso não ocorre. Se você estiver se aproximando de um feixe luminoso irá verificar que ele possui uma velocidade c . Se você estiver se afastando do feixe medirá a mesma velocidade c . Seja qual for a sua velocidade e seja qual for a direção em que você se deslocar sempre irá medir a mesma velocidade c para o feixe luminoso.

segundo postulado:

"As leis da física são as mesmas em qualquer sistema de referência inercial."

Vamos supor que um pesquisador observa uma partícula em um determinado referencial inercial ou seja, um sistema de referência não acelerado que neste caso consideramos estar se movendo com uma determinada velocidade constante v . Esse postulado de Einstein nos diz que as leis da física observadas por esse pesquisador serão exatamente as mesmas que aquelas observadas por um outro pesquisador que esteja em repouso ou seja, parado, em relação a esse sistema de referência.

Objetos relativísticos e não relativísticos

Para os físicos é mais comum usar o termo "partículas" do que "objetos" e é isso que faremos a partir desse momento.

Afinal, o que diferencia um corpo relativístico de um não relativístico? Para os cientistas todas as partículas (ou objetos) cujas velocidades sejam comparáveis à velocidade da luz são consideradas "relativísticas". Isso quer dizer que ao dividirmos a velocidade v do corpo pela velocidade c da luz o resultado deve ser bem próximo a 1. Dizemos então que um objeto é relativístico se $(v/c) \sim 1$.

No entanto, as partículas cujas velocidades são muito menores do que a velocidade da luz são consideradas

"não-relativísticas". Nesse caso a razão entre essas duas velocidades é $\ll 1$ ou seja $(v/c) \ll 1$.

O fator "gama"

Em quase todas as relações matemáticas obtidas por Einstein na sua teoria da relatividade restrita surge um termo bastante característico. Ele é:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \geq 1$$

onde c é a velocidade da luz e v é a velocidade de um objeto.

Quando a velocidade de um objeto é muito menor do que a velocidade da luz o termo GAMA é aproximadamente igual a 1. Isso nos diz que estamos em uma situação não relativística ou seja, Newtoniana.

O conceito de energia relativística

Einstein mostrou que a expressão relativística correta para a energia de uma partícula de massa de repouso m_0 e momentum p é:

$$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

Essa é uma das mais importantes e interessantes equações da física relativística. Vamos ver isso com detalhes.

- suponha que estamos estudando uma partícula que se desloca com velocidade v diferente de zero. Nesse caso, a equação acima se aplica sem qualquer problema pois o momentum p é dado pelo produto da massa do corpo pela sua velocidade ou seja, $p = mv$.
- e se a partícula estiver em repouso ou seja, tiver velocidade nula? Nesse caso $v = 0$ e conseqüentemente $p = mv = 0$. Nesse caso o primeiro termo da equação é nulo e ela se reduz à famosa relação

$$E = m_0 c^2$$

- e se a partícula não tiver massa? No caso em que $m = 0$ a equação acima também se aplica. Só que agora o segundo termo da equação, $m_0^2 c^4$, fica igual a zero. Temos então, como expressão final, que

$$E = pc$$

O leitor atento imediatamente pode reclamar: mas $p = mv$ e se $m = 0$ então o primeiro termo da equação também é nulo! Não é bem assim. No caso de partículas de massa zero o momento p não é

mais dado pela expressão mv mas sim por $h\nu$ onde h é a constante de Boltzmann e ν é a frequência de propagação da partícula sob a forma de onda.

Podemos então resumir as possíveis expressões de energia da seguinte maneira:

massa	velocidade	equação de energia
$m > 0$	$v > 0$	$E^2 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$
	$v = 0$	$E = m_0 c^2$
$m = 0$	$v > 0$	$E = pc$

Os efeitos peculiares das velocidades relativísticas

a contração do espaço

Considere dois observadores cada um deles em um laboratório de uma espaçonave distinta. Nesses laboratórios eles possuem barras de medição. Cada uma das espaçonaves está se movendo em relação à outra a uma velocidade bem próxima à velocidade da luz. A teoria da relatividade especial nos diz que:

cada observador verá a barra de medição do outro observador mais curta do que a sua por um fator γ . A isso se dá o nome de "contração do espaço".

a dilatação do tempo

Considere dois observadores cada um deles em um laboratório de uma espaçonave distinta. Em cada laboratório existe relógios para a medição de tempo. Cada uma das espaçonaves está se movendo em relação à outra a uma velocidade bem próxima à velocidade da luz. A teoria da relatividade especial nos diz que:

cada observador verá o relógio situado no laboratório da outra espaçonave contando o tempo de modo mais lento do que o seu próprio relógio por um fator γ . A isso se dá o nome de "dilatação do tempo".