

VELOCIDADE DA LUZ

Introdução

Ao incidir sobre um determinado meio, a luz tende a se propagar. No entanto, no caso dos metais, por exemplo, a luz propaga muito pouco ao atingir tais materiais. Num bom número de meios, especialmente líquidos e gases, ela consegue viajar através dele. A velocidade com que a luz se propaga depende do meio material. Assim é que na água a luz se propaga a uma velocidade menor do que no ar.

A velocidade máxima de propagação da luz ocorre num meio do qual extraímos toda a matéria. Tal meio é o que denominamos de vácuo. Por exemplo, podemos considerar o meio entre a Terra e o Sol, ou entre a Terra e as estrelas como sendo o vácuo.

A relação entre a velocidade da luz num determinado meio e a velocidade da luz no vácuo é dada por:

$$V = \frac{c}{n}$$

Onde c é a velocidade da luz no vácuo e n é o índice de refração do meio. O índice de refração no vácuo é igual a 1. O valor da velocidade da luz no vácuo é:

$$c = 299.792.458 \frac{m}{s}$$

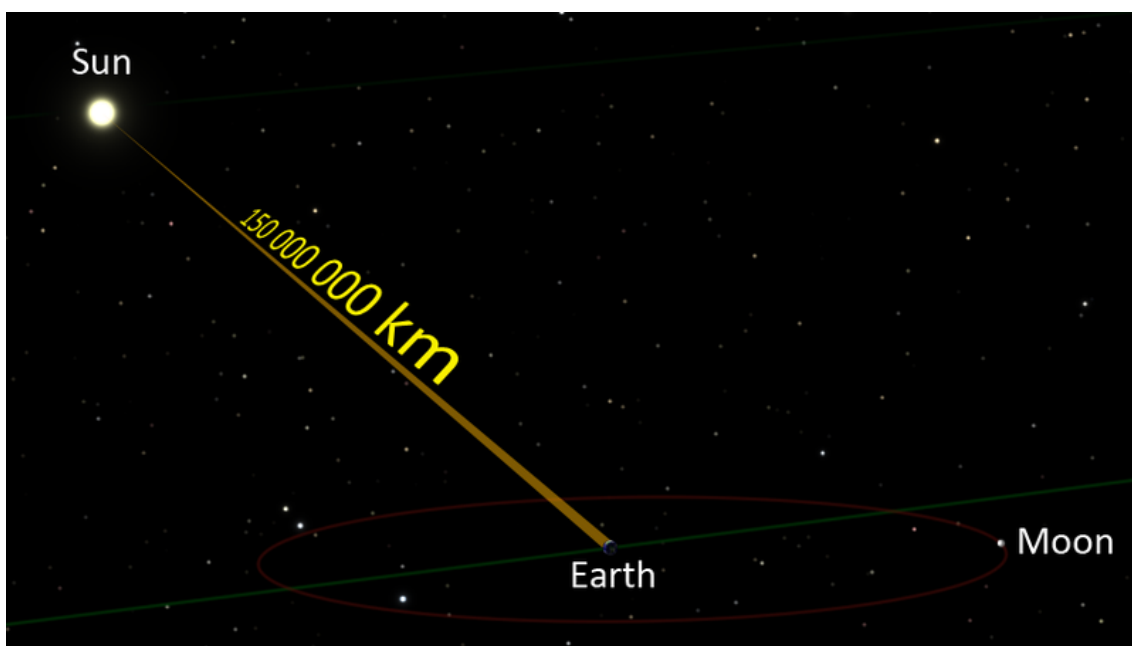


Fig. A luz demora cerca de oito segundos para viajar do Sol até a Terra

São muitas as questões envolvendo a velocidade da luz. As mais simples são aquelas envolvendo sua determinação. Nesse contexto, surgem apenas duas questões: A determinação experimental da velocidade da luz e a determinação teórica da mesma.

No entanto, a questão da velocidade da luz suscita questões fundamentais para a Física, bem como para toda a ciência. Conquanto não pareça à primeira vista, o fato é que a velocidade da luz desempenha uma papel central na teoria da relatividade. Duas questões fundamentais emergem dessa teoria:

1-A velocidade da luz no vácuo, é a velocidade limite

2- A velocidade da luz tem um caráter absoluto.

Finalmente, é bom apontar para o fato de a velocidade da luz é uma constante tida como fundamental da física. Assim como, por exemplo, a constante de Planck (h), a carga elétrica do elétron e a constante da gravitação universal de Newton.

Esses quatro aspectos serão analisados a seguir.

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DA VELOCIDADE DA LUZ

Qual é o valor da velocidade da luz? Muitos, como Descartes e Kepler acreditavam que a velocidade da luz seria infinita. A suspeita de que a luz teria uma velocidade finita começou com Galileu. Em 1638 Galileu propôs uma experiência para tirar essa dúvida. Bastaria dois observadores portando duas lanternas cobertas e localizados a uma distância conhecida. Sugeriu que se poderia medir a velocidade da luz da seguinte forma: o primeiro observador descobria sua lanterna. A luz se propagaria até o segundo observador. Nesse instante ele descobria sua lanterna. Observando-se o intervalo de tempo decorrido desde quando a luz partiu da primeira lanterna até o instante em que a luz da segunda lanterna atingisse o primeiro observador, teríamos como medir a velocidade da luz. É um método baseado no tempo de voo. Basicamente, nesse método substituímos o segundo observador com sua lanterna, por um espelho que faz a luz retornar. Para lanternas distantes de 2 quilômetros não foi possível decidir sobre a velocidade da luz através de experiências levadas a cabo em 1667.

Ole Römer (1644-1710) foi o primeiro a verificar que a velocidade da luz é finita e sugeriu uma forma de determinar a velocidade da luz através da medida do intervalo entre eclipses da "lua" Io de Júpiter. Io, se move praticamente no mesmo plano que o planeta Júpiter se move em torno do Sol. Assim o interesse de Romer era determinar o intervalo de tempo entre a entrada de Io na região de sombra de Júpiter e a o instante em que ele saia dessa região de sombra.

Romer observou, usando um telescópio, que quando a terra está mais próxima de Júpiter, o intervalo de tempo, necessário para a lua de Júpiter passar por trás do mesmo é, nessas circunstâncias de 42,5 horas. Observou no entanto que esse intervalo de tempo aumentava á medida que a terra se afastava de Júpiter. Isso foi corretamente interpretado por ele como sendo devido ao tempo extra necessário para a luz cobrir uma distancia extra, distancia essa associada ao afastamento dos planetas. Pode ocorrer, igualmente a

aproximação. Assim, se o eclipse durar um intervalo T_0 , depois de Júpiter se afastar uma distância d o novo intervalo será dado por uma das seguintes possibilidades:

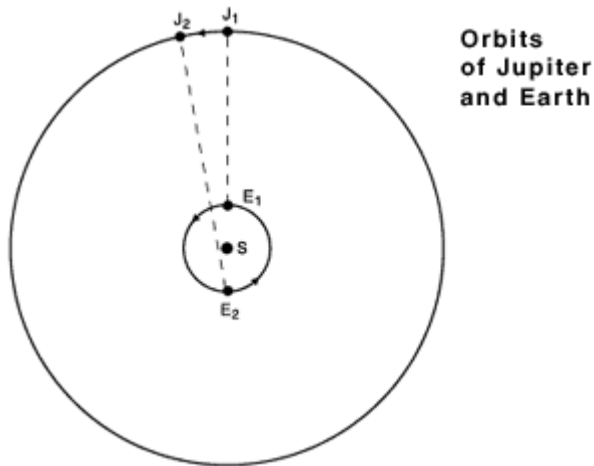
$$T - T_0 = \frac{d}{c}$$

Nesse caso os planetas estão se afastando. A determinação de d e dos tempos permitem determinar c .

No caso em que eles se aproximam, temos:

$$T_0 - T = \frac{d}{c}$$

A medida pode ficar mais acurada quando tomarmos medidas nos instantes quando a distância for máxima. Idealmente 6 meses depois da primeira, quando a distância é a maior possível.



Com base nessas observações Romer conclui que a velocidade da luz seria de $2,310^8 \text{ m/s}$.

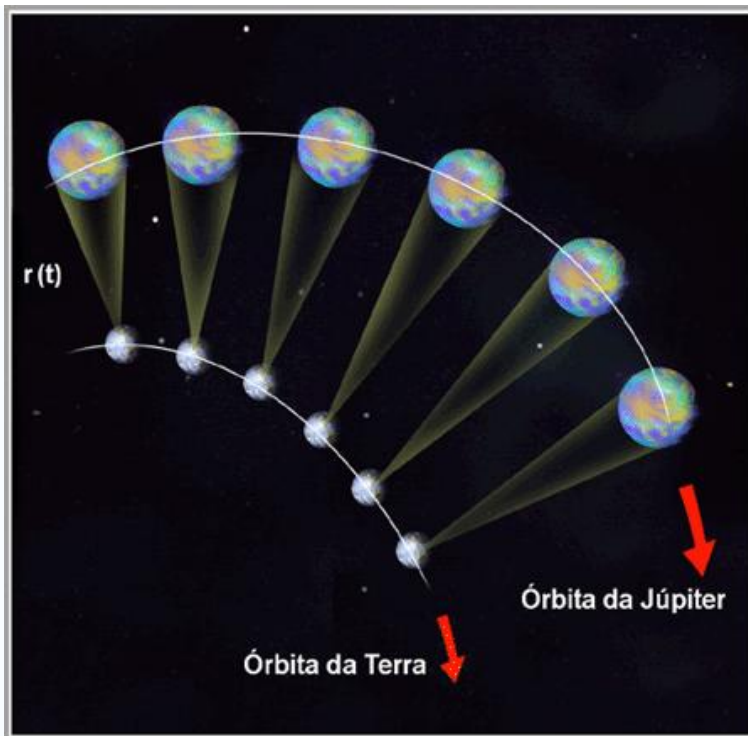


Fig 16 O método experimental utilizado por Romer.

Existem dois métodos astronômicos para a determinação da velocidade de luz. O primeiro é aquele utilizado por Romer. O outro método é fazer uso da “aberração estelar”.

Aberração Estelar

O fenômeno da aberração foi descoberto por Bradley no início do século 18. A partir de 1.725 James Bradley passou a efetuar observações relativamente precisas da variação (nesse caso aparente) da posição das estrelas do longo das estações do ano. Notou que as estrelas em geral, tinham posições percorrendo uma órbita elíptica. Dá-se a esse fenômeno o nome de “aberração” da luz estelar.

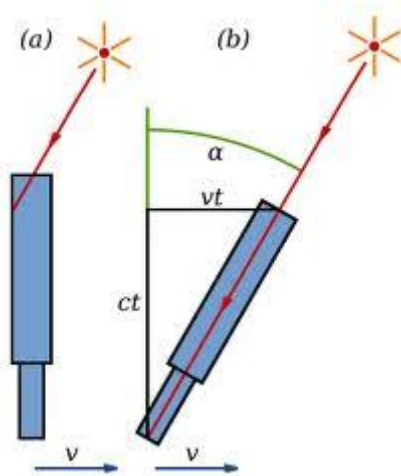
O máximo de aberração ocorre para estrelas localizadas no Zênite, é dado por

$$\tan \alpha = \frac{v_T}{c}$$

onde v_T é a velocidade de translação da terra em torno de sol ($3 \cdot 10^4$ m/s).

O ângulo da aberração α , no caso das estrelas localizadas numa direção perpendicular ao movimento da Terra é de aproximadamente 10^{-4} rad, Este é o ângulo que devemos inclinar o tubo do telescópio de forma a observar a estrela. Isso porque num certo intervalo de tempo dt a luz percorre uma distância cdt enquanto o telescópio se desloca de uma distância $v_T dt$.

É como querer captar um perigo de chuva num carro em movimento.



A partir da determinação do ângulo da aberração estelar, e da velocidade de deslocamento, podemos determinar a velocidade da luz.

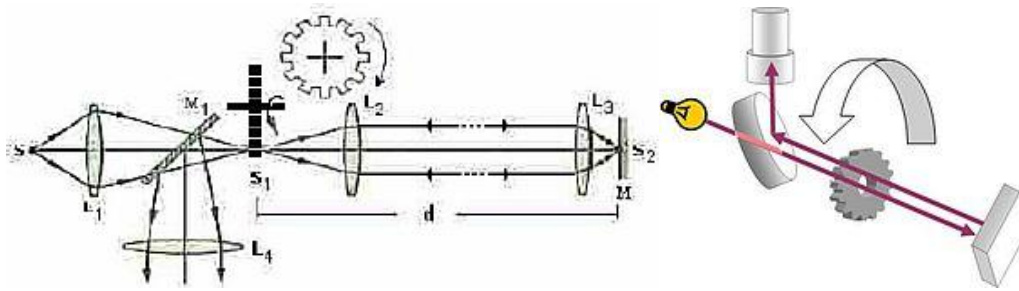
Outros Métodos Empregados Na Determinação de c

Em 1849 H. Fizeau efetuou a primeira medida da velocidade da luz utilizando métodos terrestres, Com isso foi precursor de um método que classificamos hoje como método do tempo de voo.

O método do tempo de voo é baseado em determinar o tempo necessário para a luz viajar até um espelho localizado a uma grande distancia (8 quilômetros ou mesmo 30 quilômetros) e depois efetuar o percurso de volta. A seguir apresentamos duas versões desse método.

A primeira versão é aquela utilizada por Fizeau. Ela pode ser entendida a partir do esquema apresentado na fig. (). Nela utilizamos um feixe de luz que se propaga até certo ponto no qual se encontra um espelho que reflete a luz de forma a voltar por um percurso idêntico ao da ida.

Tanto no percurso de ida quanto de volta, existe uma roda dentada que é colocada a girar a uma frequência F (número de voltas por segundo). O feixe passa por uma das aberturas entre os dentes. No entanto, só conseguirá passar de volta pela abertura dos próximos dentes para valores específicos da frequência (f) (o número de voltas por segundo), do número de dentes (N), da distancia até o espelho (L) e da velocidade da luz.



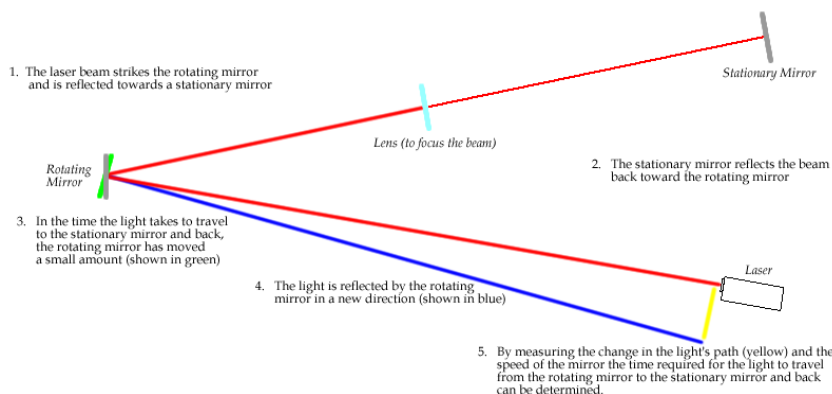
Em função dos dados acima, a velocidade da luz é dada pela expressão:

$$c = 4LfN$$

Na sua experiência pioneira, Fizeau utilizou uma roda dentada com 720 dentes, que girava a 12,5 voltas por segundo e o espelho se localizava a uma distância $L = 8.633$. Dai concluindo que velocidade da luz seria de 315.000 Km/s.

Uma segunda versão do método de tempo de voo é aquele que substitui a roda dentada por um espelho girante (vide fig. XX).

Nesse método, sugerido por Arago, e utilizado por Fizeau e Foucault em 1850, determina-se a velocidade da luz em função do deslocamento da imagem resultando da rotação do espelho girante.

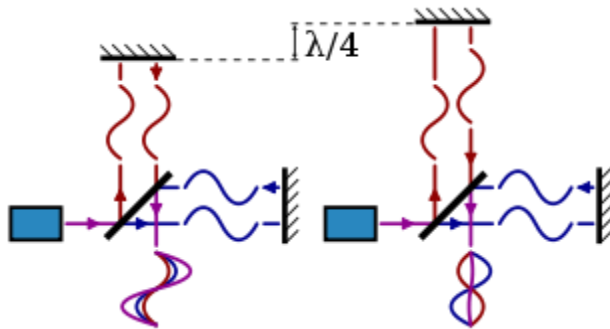


A determinação da frequência e do comprimento de onda da radiação eletromagnética nos ressonadores de cavidade leva à determinação bastante precisa da velocidade da luz.

Outro método utilizado na determinação da velocidade da luz é baseado na interferometria. Nesse método empregamos um feixe de luz em uma frequência bem determinada (ν). Em seguida o feixe é dividido em dois, perseguindo trajetórias distintas. Em seguida eles são recombinados. As diferenças de caminho óptico dos dois feixes levarão a um determinado padrão de interferência. Por meio desse padrão de interferência podemos inferir o comprimento de ondas. Para tal devemos determinar o comprimento de cada um dos dois caminhos.

Observe-se que uma diferença do comprimento de um quarto do comprimento de onda leva de um padrão de interferência construtiva a um padrão de interferência destrutiva (vide figura).

Interferometry



An interferometric determination of length. Left: [constructive interference](#); Right: [destructive interference](#).

Determinação Teórica da Velocidade da Luz

Levando-se em conta a existência da corrente de deslocamento, pode-se mostrar, utilizando-se de manipulações não muito complexas, que as equações de Maxwell no espaço podem ser escritas sob a forma:

$$\frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial z^2} = \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{H}(x, y, z, t)}{\partial t^2}$$

e, portanto, os campos elétrico e magnético podem se propagar como ondas no espaço. Os campos são os componentes da onda. A razão para a sua propagação mesmo no vácuo tem a haver com o fenômeno da indução no eletromagnetismo. Um campo elétrico variando com o tempo induz um campo magnético variando com o tempo e esse último ao variar induz um campo elétrico variando com o tempo e assim sucessivamente,

Tais ondas recebem o nome de ondas eletromagnéticas. Sua velocidade de propagação é dada por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Onde μ e ϵ estão associadas a propriedades magnéticas (μ) e elétricas (ϵ) do meio. São as constantes denominadas de permeabilidade magnética e permitividade elétrica do meio. As ondas eletromagnéticas têm, portanto, uma velocidade de propagação que depende das propriedades eletromagnéticas do meio. Para um meio no qual a magnetização é nula, obtemos:

$$v = \frac{1}{\sqrt{k}\sqrt{\epsilon_0\mu_0}} = \frac{c}{n}$$

Onde k é a constante dielétrica do meio. Donde inferimos que

$$k = n^2;$$

e que:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

Ou seja, a teoria de Maxwell explica teoricamente o valor da velocidade da luz para qualquer meio material, inclusive o vácuo.

O CARÁTER ABSOLUTO DA VELOCIDADE DA LUZ

A velocidade da luz tem um papel central no desenvolvimento da teoria da relatividade de Einstein. Seu comportamento é assaz surpreendente. Tem a mesma velocidade independentemente do estado de movimento do observador. Ao que se saiba esse é um caso único. E isso se torna verdade se, de fato, o fóton for a única partícula acessível (do ponto de vista experimental) dotada de massa zero.

Para entendermos seu papel na formulação da teoria da relatividade especial, imaginemos dois sistemas de referência (podemos imaginar dois sistemas de referencia como sendo duas naves espaciais). Consideremos agora esses referenciais (as duas naves espaciais) em movimento relativo. Um determinado fenômeno pode ser investigado através de medidas realizadas pelos observadores localizados em cada um dos referenciais.

O resultado das medidas levadas a efeito em referenciais diferentes (em cada uma das naves) permite-nos classificar as grandezas físicas em duas grandes categorias. As grandezas absolutas são aquelas para as quais as medidas levam sempre ao mesmo resultado (ao mesmo valor), independentemente dos referenciais. As grandezas relativas são aquelas, como o nome indica, que dependem do sistema de referencia. O tempo, por exemplo, é absoluto? Isto é, intervalos de tempo dependem do referencial escolhido? Astronautas em naves

diferentes registram intervalos de tempo iguais para um mesmo evento? Até o trabalho de Einstein o tempo era tido como absoluto, conforme propusera Newton.

A questão central da teoria da relatividade pode ser concentrada em três indagações: Que grandezas físicas têm um caráter absoluto? Como se relacionam as diversas grandezas físicas relativas (as coordenadas e o tempo de ocorrência de um evento, por exemplo) medidas em cada um dos sistemas de referências? Como se escrevem as equações nos diversos referenciais? Einstein procurou dar respostas a estas questões a partir do que teria, na sua concepção, um caráter absoluto. Sugeriu que a velocidade da luz e a forma das equações teriam um caráter absoluto. Sua teoria tem como base para sua formulação esses dois pressupostos (ou postulados).

Primeiro Postulado

A velocidade da luz no vácuo é independente do sistema de referência inercial e, conseqüentemente, assume o mesmo valor (c) para qualquer observador.

Na teoria da relatividade restrita, o objetivo de Einstein era o de descrever os fenômenos analisados a partir de sistemas de referência, que se movem com velocidade constante e em linha reta, um em relação ao outro. O fato de a velocidade destes ser constante, e o movimento retilíneo, fazia com que a sua teoria da relatividade fosse mais restrita (donde o nome). Dez anos depois Einstein elaborou uma teoria mais geral (sua Teoria Geral da Relatividade).

No primeiro postulado, sobre a constância da velocidade da luz, Einstein revela sua genialidade. Pois se tratava de algo completamente inusitado e pouco intuitivo. Como se sabe hoje, em matéria de velocidade, isto se aplica apenas à velocidade da luz. Conferiu à velocidade da luz, e não ao tempo, um caráter absoluto.

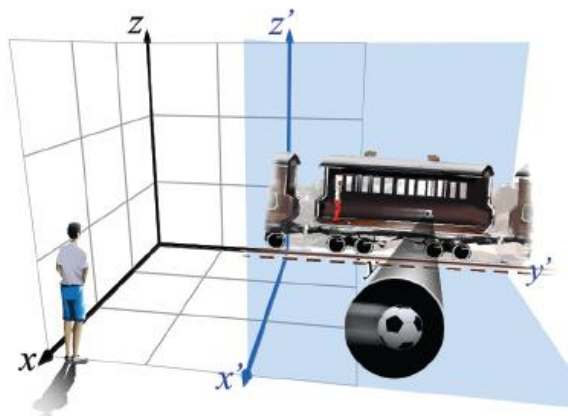


Fig. 11.3. A velocidade de um objeto é a mesma nos dois sistemas?

O fato é que a teoria da relatividade de Einstein leva à ideia de que a velocidade da luz é a velocidade máxima de um objeto. Fato esse que ainda não foi desmentido pelas muitas experiências.

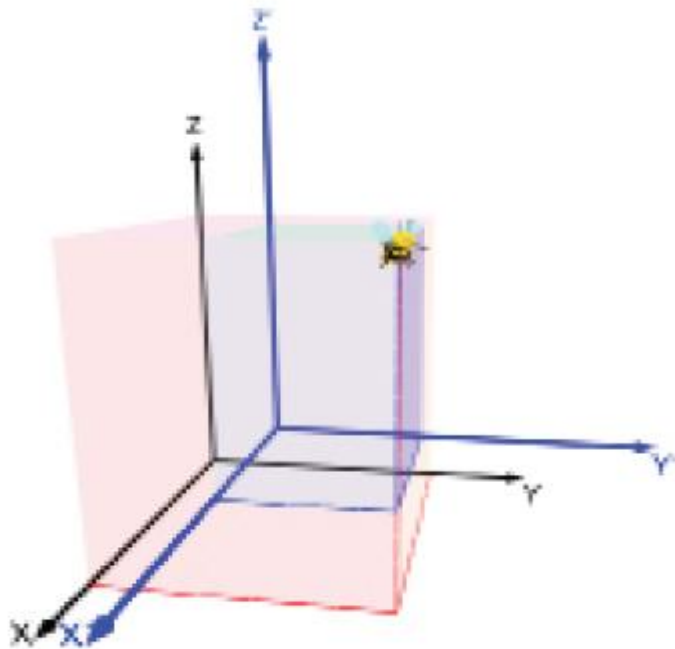
De acordo com a teoria da relatividade restrita se dois referenciais se deslocam um em relação ao outro com velocidade v , ao longo do eixo x , as coordenadas do espaço e o tempo medido em cada referencial obedecem às seguintes relações, ou transformações:

$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} (x - vt)$$

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left(t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$



Observando o fator

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

Notamos que no limite ultra-relativístico ele tende a infinito:

$$\lim_{v \rightarrow c} \gamma \rightarrow \infty$$

além disso, as transformações de Lorentz não fazem sentido para

$$v > c$$

Dessa forma, entende-se que a teoria da relatividade implica num limite para a velocidade que os objetos podem atingir. Esse limite é a velocidade da luz.

Partículas destituídas de massa (isso é, tem massa nula) se propagam, sempre, com a velocidade da luz. O Fóton é uma das nove partículas elementares que têm essa característica. Mas é a única que pode ser encontrada livre.

Efeito Cerenkov.

Uma partícula pode, no entanto, ter uma velocidade num determinado meio superior à velocidade da luz naquele meio.

Quando isso acontece a partícula emite uma radiação eletromagnética característica. Suas características foram elucidadas por Cerenkov o qual foi agraciado, pela descoberta, com o prêmio Nobel de física em 1958. É um efeito análogo à onda de choque quando um avião ultrapassa a barreira do som. É um onda de choque fotonica. A envoltória (plana) da frente de onda forma um ângulo θ o qual pode ser determinado da seguinte forma que:

Num determinado intervalo de tempo δt a radiação emitida percorrerá uma distância dada pela velocidade da luz no meio (água, por exemplo) vezes o intervalo de tempo. Isto é:

$$d = v\delta t = \frac{c}{n} \delta t$$

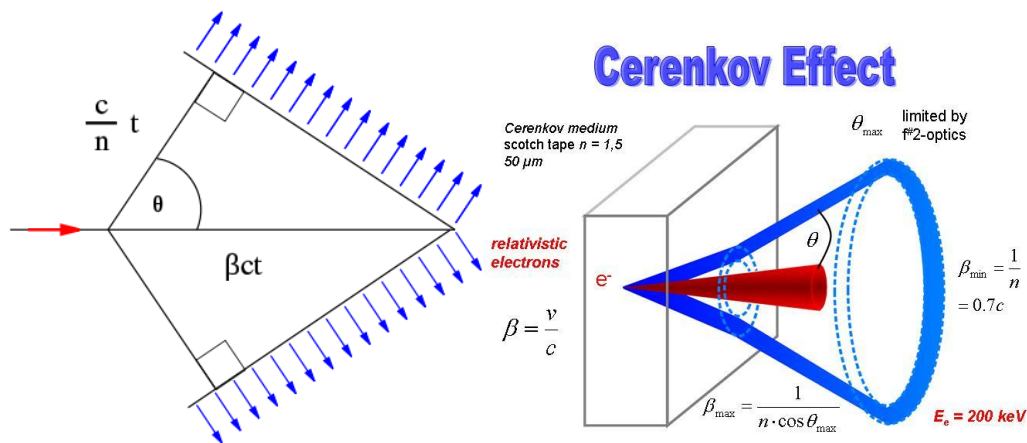
Onde n é o índice de refração do meio.

Tendo em vista que durante o intervalo de tempo δt a partícula percorreu uma distância dada por:

$$d' = v\delta t = \beta ct$$

O ângulo formado pela direção da propagação das ondas e da partícula em movimento é tal que:

$$\cos \theta = \frac{d}{d'} = \frac{1}{n\beta}$$



A velocidade da luz como constante fundamental

Na física, a velocidade da luz é uma constante fundamental. Isso acarreta duas consequências. A primeira é que o metro hoje é definido a partir dela:

"O metro é o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de 1/299.792.458 de segundo".

A segunda é que várias grandezas físicas dependem dessa constante. A seguir consideraremos o caso da energia de partículas..

Demonstra-se, com base na teoria da relatividade, que a energia de uma partícula é dada por:

$$\frac{E}{c} \equiv \sqrt{p^2 + (mc)^2}$$

Ou ainda:

$$E = \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m^2 c^4}$$

No caso de partículas de massa zero obtém-se:

$$E = pc$$

Tendo em vista a equivalência descoberta por Einstein, entre massa e energia, os constituintes dotados de massa representam uma forma de energia: a Energia associada à massa. Assim, se um objeto tem massa m , a ele está associado uma quantidade equivalente de energia dada por,

$$E = mc^2$$

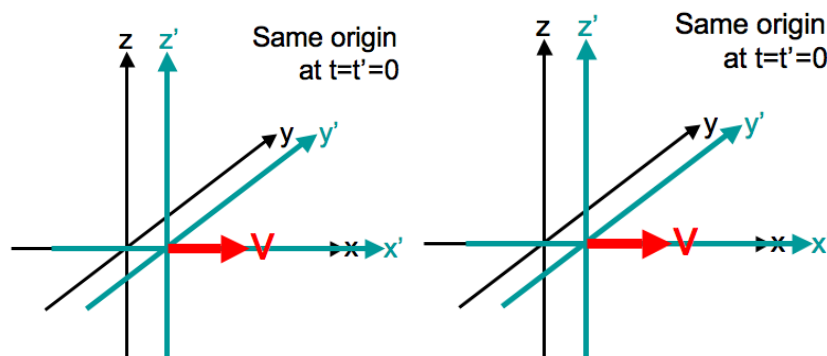
Onde c é a velocidade da luz no vácuo.

A luz muda de cor: O efeito Dopler

De acordo com a teoria da relatividade, se luz é emitida com frequência ν_{emi} num referencial que desloca com velocidade V , formando um ângulo θ com a direção da mesma, a frequência da luz observada ν_{obs} , aquela determinada no referencial que observa a fonte em movimento, é dada por:

$$\nu_{obs} = \gamma \nu_{emi} \left(1 + \frac{V}{c} \cos \theta \right) = \gamma \nu_{emi} (1 + \beta \cos \theta)$$

Esse efeito, recebe o nome de efeito Dopler relativístico.



Arte:

colocar a luz formando um ângulo terá.

Para $\theta = 0$ a frequência é dada por.

$$\nu_{obs} = \gamma \nu_{emi} \left(1 + \frac{V}{c} \right) = \nu_{emi} \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

Este efeito recebe o nome de redshift

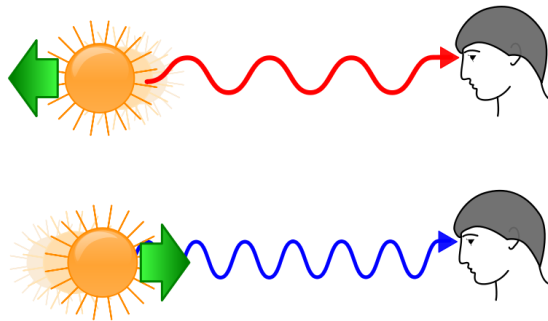
Enquanto que para $\theta = \pi$,

$$\nu_{obs} = \gamma \nu_{emi} \left(1 - \frac{v}{c} \right) = \nu_{emi} \sqrt{\frac{1 - \beta}{1 + \beta}}$$

Nesse caso a frequência diminui quando a fonte se afasta. Esse efeito recebe o nome de blueshift.

O efeito Doppler transversal é aquele definido para o valor de $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$v_{obs} = \gamma v_{obs} = \frac{v_{obs}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$



Redshift

Na astronomia e na cosmologia estamos interessados em determinar a velocidade de objetos que se aproximam ou que se afastam de nós. O último caso é aquele de maior interesse.

Definimos o parâmetro redshift, representado pela letra z , como

$$z = \frac{v_{emi} - v_{obs}}{v_{obs}} \quad z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{emi}}{\lambda_{emi}}$$

Ou, analogamente:

$$z + 1 = \frac{v_{emi}}{v_{obs}} \quad z + 1 = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{emi}}$$

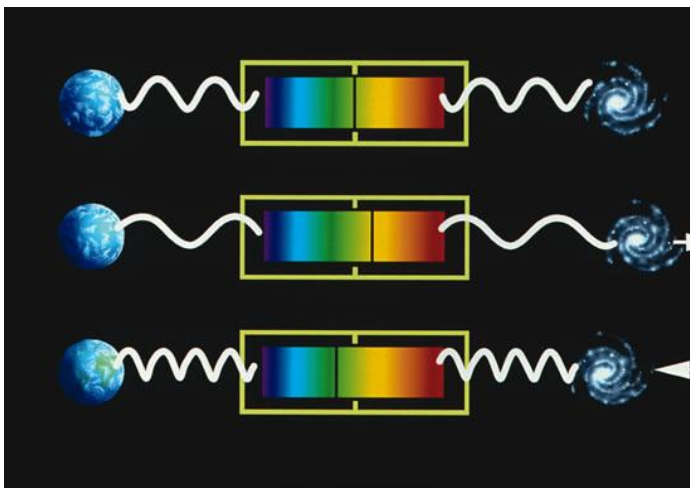
De acordo com o efeito Doppler, um objeto distante se afastando de nós (luz vindo em nossa direção) o redshift é dado por

$$z+1 = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

No Limite não relativístico, temos

$$z+1 \cong 1+\beta$$

Ocorre assim o redshift (para galáxias ou estrelas) que se afastam de nós ($v > v_0$). Ocorre o Blue Shift para objetos que se aproximam de nós $v < v_0$.



Cada cor se propaga numa velocidade diferente.

Um fenômeno interessante associado à velocidade da luz é a sua dispersão. Ela resulta do fato de que a rigor, cada cor se propaga com velocidade diferente. A frequência de cada cor é constante. Isto é, é a mesma frequência que a luz de uma dada cor tem no vácuo. Muda, portanto o seu comprimento de onda.

O índice de refração de um determinado meio depende da frequência da onda monocromática. A essa dependência do índice de refração damos o nome de dispersão. De uma maneira geral escrevemos:

$$n = n(\omega)$$

Como resultado, o índice de refração acaba sendo diferente para cada componente da luz. Por exemplo, a luz violeta é aquela para a qual, num meio como o vidro, tem o maior índice de refração de todo o espectro luminoso. No outro extremo do espectro, a luz vermelha é aquela que tem o menor índice de refração. Como consequência disso a luz solar ao incidir sobre um dioptra plano sofrerá uma dispersão da luz. Isso porque, ao incidir na superfície de separação de dois meios, cada luz monocromática (violeta, anil, azul, verde, amarela, alaranjada e vermelha), que compõe a luz solar, tomará direções diferentes dentro do vidro (ou de outro meio do qual o prisma é composto). Assim, o desvio depende do comprimento de onda. Como resultado, temos uma decomposição da luz em diversas componentes monocromáticas que a constitui. Esse é o fenômeno e a explicação para o fenômeno da dispersão da luz.

*A luz solar (luz branca) é composta por ondas harmônicas dos mais variados comprimentos de onda. A luz composta por ondas harmônicas de apenas um comprimento de onda, damos o nome de **luz monocromática**. Uma luz branca, composta por ondas harmônicas de vários comprimentos de onda é uma **luz policromática**. Esse é o caso da luz solar.*