



www.estudar.com.vc

Resumo e Lista de Exercícios

Física IV

Fuja do Nabo P1 2018.2





1. Introdução

O curso de Física IV visa introduzir aos alunos os conceitos de física moderna através de uma visão conceitual dos fenômenos e uma abordagem simplificada das demonstrações.

2. Interferência

O fenômeno da Interferência caracteriza-se pela superposição de duas ou mais ondas em um mesmo ponto do espaço. Quando esse fenômeno ocorre, a onda resultante será dada pelo princípio da **superposição**, que basicamente nos diz que a onda resultante será a soma das ondas iniciais.

a. Fontes Coerentes

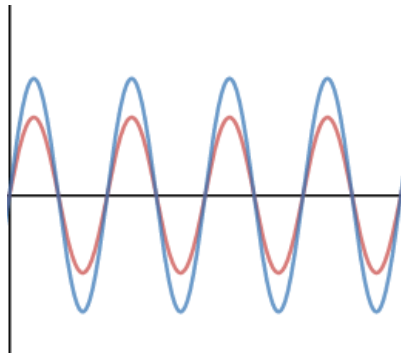
Duas fontes são ditas coerentes quando apresentam a mesma frequência, mesma direção de propagação e sua diferença de fase permanece constante com o tempo. Não necessariamente indica que as fontes estão em fase. Tudo que iremos analisar sobre interferência supõe que as fontes são coerentes.

b. Fontes (Ondas) em Fase

Duas fontes estarão em fase quando estão sincronizadas entre si, ou seja, a diferença de fase inicial entre elas é 0° .



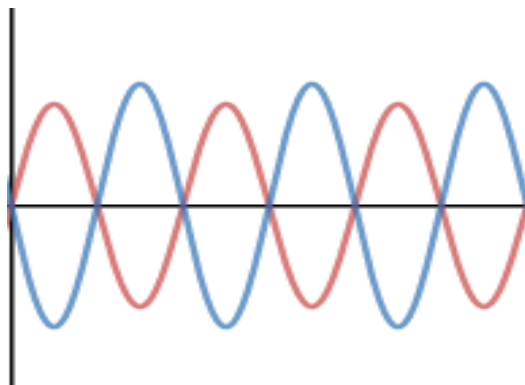
Exemplo:



c. Fontes em Oposição de Fase

Duas fontes estão em oposição de fase se a diferença de fase inicial entre elas é $\pi \text{ rad}$.

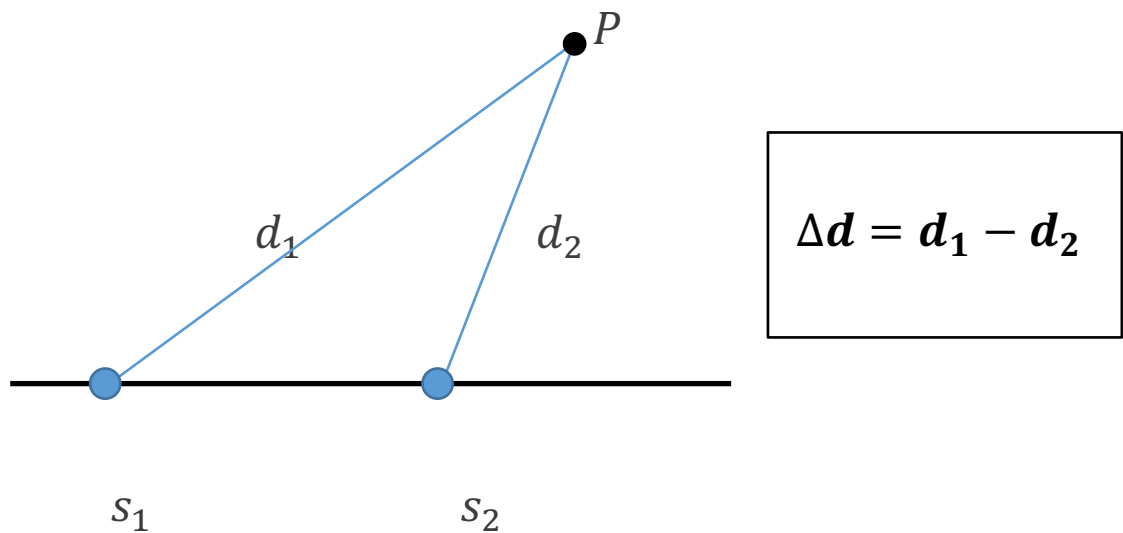
Exemplo:



d. Diferença de Caminho (Δd)

A diferença de caminho representa a diferença de percurso entre duas fontes até encontrar o ponto do espaço em que será analisada a interferência.

Exemplo: Supondo a existência de duas fontes s_1 e s_2 , iremos analisar a interferência no ponto P.



e. Interferência Construtiva

A interferência entre duas ondas é dita **construtiva** quando a amplitude da onda resultante é **maior** que a amplitude das ondas iniciais.

I. Interferência Construtiva para Fontes em Fase

Supondo duas fontes inicialmente **em fase** que emitem ondas com comprimento de onda λ , a condição de interferência construtiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = m \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

II. Interferência Construtiva para Fontes em Oposição de Fase

Supondo duas fontes em **oposição de fase** que emitem ondas com comprimento λ , a condição para interferência construtiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$



f. Interferência Destrutiva

A interferência entre duas ondas é dita **destrutiva** quando a amplitude da onda resultante é **menor** que a amplitude das ondas iniciais.

I. Interferência Destrutiva para Fontes em Fase

supondo duas fontes inicialmente **em fase** que emitem ondas com comprimento de onda λ , a condição de interferência destrutiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

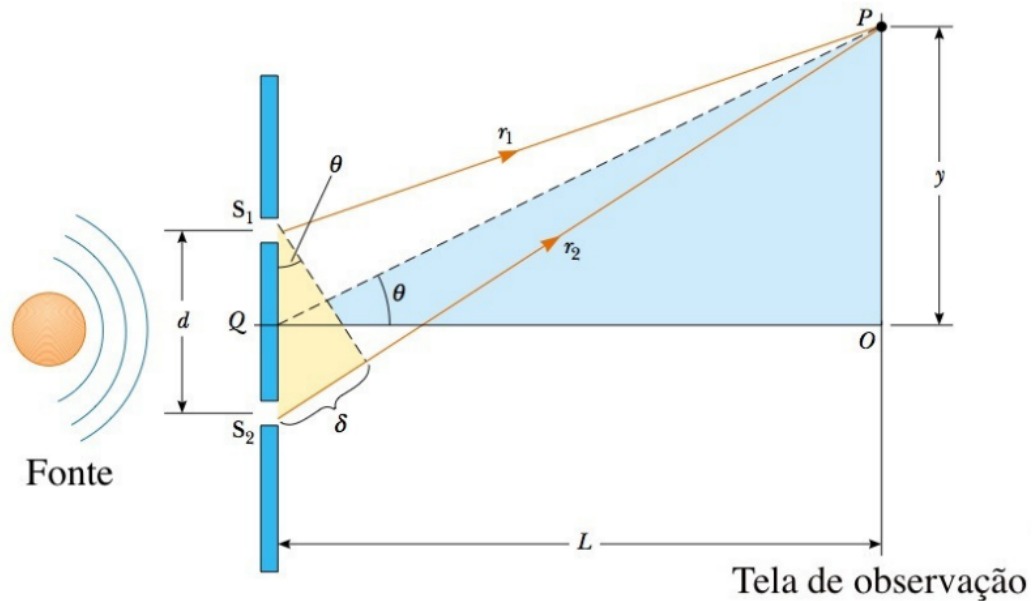
II. Interferência Destrutiva para Fontes em Oposição de Fase

Supondo duas fontes em **oposição de fase** que emitem ondas com comprimento λ , a condição para interferência destrutiva será dada por:

$$\Delta d = d_1 - d_2 = m \lambda, \text{ com } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

3. Interferência em Fendas Duplas

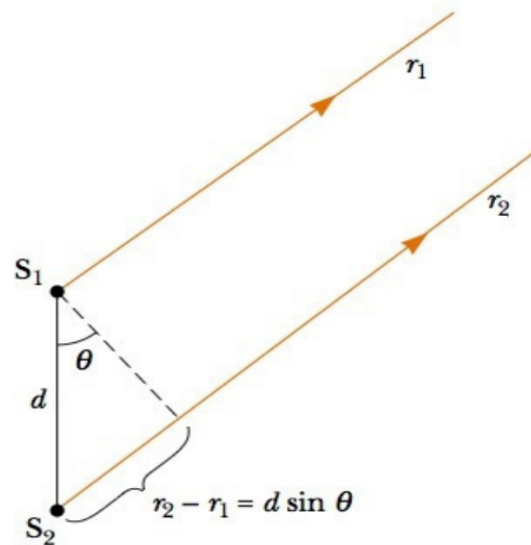
O experimento de Interferência em fendas duplas foi estudado de forma mais precisa através do experimento de Thomas Young.



Interferência em Fendas Duplas (Serway)

No experimento de Young vamos analisar a interferência no Ponto P gerada pelas Fontes S_1 e S_2 , que estão **em fase** devido à existência de uma fonte S_0 posicionada antes da tela com a fenda dupla.

Na experiência $L \gg d$, então, a diferença de caminho se resume a δ , uma vez que os raios r_1 e r_2 podem ser tomados como paralelos (figura abaixo).



Raios paralelos (Serway)

A diferença de caminho será $d \sin \theta$, logo a condição para **interferência construtiva** será dada por:

$$d \sin \theta = m\lambda, \text{ com } m \in \mathbb{Z}$$

As **interferências destrutivas** serão dadas por:

$$d \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda, \text{ com } m \in \mathbb{Z}$$

Utilizando a aproximação válida para pequenos ângulos, $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$, pode-se determinar as **posições dos máximos** (y_m), que correspondem às interferências construtivas:

$$\tan \theta_m = \frac{y_m}{D}$$

$$\tan \theta_m \approx \sin \theta_m$$



$$\sin \theta_m = \frac{m\lambda}{d}$$

$$y_m = \frac{m\lambda D}{d}$$

4. Intensidade das Figuras de Interferência

A intensidade das figuras de Interferência estará relacionada a intensidade do campo elétrico resultante da superposição de dois campos elétricos em um mesmo ponto do espaço.

Genericamente, dado um campo elétrico $E(t) = E_p \cos(\omega t + \phi)$, a intensidade da onda será dada por:

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_0 c E_p^2$$

Onde:

ϵ_0 = permissividade elétrica do vácuo;

c = velocidade da luz no vácuo.

Supondo dois campos elétricos: $E_1(t) = E \cos(\omega t + \phi)$ e $E_2(t) = E \cos(\omega t)$, a amplitude resultante (E_p) da superposição desses campos será:

$$E_p = 2E \left| \cos \frac{\phi}{2} \right|$$



Usando essa expressão pode-se calcular a expressão da intensidade resultante e analisar onde seus valores serão **máximos** e **mínimos**.

$$I = 2\varepsilon_0 c E^2 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

$$I_0 = 2\varepsilon_0 c E^2$$

$$I = I_0 \cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right)$$

Analisando a expressão da intensidade tem-se que seu valor máximo será para $\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) = 1$ e seu valor mínimo para $\cos^2\left(\frac{\phi}{2}\right) = 0$. Assim, pode-se escrever que:

$$\phi = 2m\pi, \text{ com } m \in Z$$

máximos de Intensidade

$$\phi = (2m + 1)\pi, \text{ com } m \in Z$$

mínimos de Intensidade

a. Relação entre Diferença de Fase e Diferença de Caminho

Dada uma diferença de fase ϕ , ela se relacionará com uma diferença de caminho Δd seguindo a seguinte proporção:

$$\frac{\phi}{2\pi} = \frac{\Delta d}{\lambda}$$



$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta d$$

b. Relação entre Comprimento de Onda em um Meio

Supondo que o comprimento de onda em um meio com índice de refração n seja λ , sua relação com o comprimento de onda λ_0 no vácuo será dado por:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

5. Interferência em Películas Finas

Uma película fina é uma pequena camada de um material, imersa em um meio com índice de refração diferente do seu. A condição de película fina deve ser atendida para que se possa tomar os raios refletidos e refratados em sua superfície como coerentes.

a. Mudança de Fase na Reflexão

Suponha que uma onda eletromagnética viaje no meio 1 (índice de refração n_1) e seja refletida na interface de separação com um meio 2 (índice de refração n_2). Tem-se as seguintes situações:

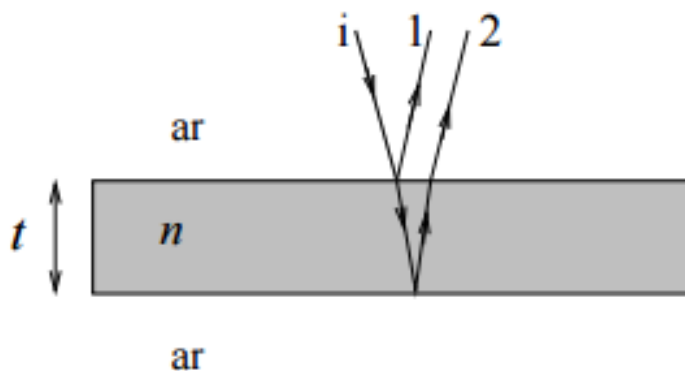
I. Se $n_1 < n_2$, haverá uma **mudança de fase de π** no campo elétrico refletido, ou seja, se tomarmos a onda incidente e refletidas elas estarão em **oposição de fase**.

II. Se $n_1 > n_2$, **não haverá uma mudança de fase** no campo elétrico refletido, ou seja, se tomarmos a onda incidente e refletida elas estarão **em fase**.



Observação: não há mudança de fase na refração.

Exemplo: Analisar as condições de interferência construtiva e destrutiva entre os raios 1 e 2 na película fina abaixo, com $n > n_{ar}$.



O raio 1 é originado na reflexão na primeira interface de separação entre a película e o ar. Como ele vem do ar e vai para a película e temos $n_{ar} < n$, essa reflexão ocorre com mudança de fase de $\pi \text{ rad}$.

O raio 2 é originado da reflexão na segunda interface de separação. Como ele vai do meio com índice de refração n para a película, não há mudança de fase na reflexão, logo pode-se concluir que **os raios 1 e 2 são emitidos inicialmente em oposição de fase.**

Supondo que a incidência seja normal, podemos supor que a diferença de caminho entre os raios 1 e 2 (Δd) será igual a $2t$. Assim, as condições de **interferência construtiva** serão:

$$2t = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_n \text{ com } m = 0,1,2, \dots$$



$$\text{como } \lambda_n = \frac{\lambda_0(\text{v\u00e1cuo})}{n}$$

$$2tn = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda_0$$

A condi\u00e7\u00e3o para **interfer\u00eancias destrutiva** ser\u00e1:

$$2tn = m\lambda_0$$

6. Difra\u00e7\u00e3o

a. Princ\u00edpio de Huygens

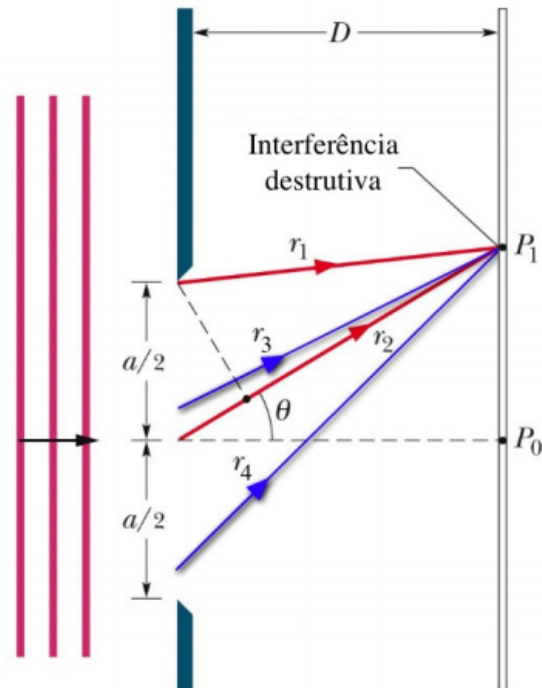
Cada ponto da frente de onda pode ser tomado como um conjunto de fontes circulares secund\u00e1rias, de tal forma que \u00e9 poss\u00edvel determinar a posi\u00e7\u00e3o da onda no instante $t + \Delta t$ a partir do instante t apenas tra\u00e7ando a envolt\u00f3ria das frentes de onda circulares.

7. Difra\u00e7\u00e3o em Fendas Simples

Dada uma fenda simples de tamanho n\u00e3o desprez\u00edvel a , as condi\u00e7\u00f5es para os **m\u00ednimos de difra\u00e7\u00e3o** podem ser estimadas com o aux\u00edlio do princ\u00edpio de Huygens e utilizando difra\u00e7\u00e3o de Fraunhofer que sup\u00f5e que os raios saindo da fenda podem ser supostos paralelos. Tais m\u00ednimos ser\u00e3o dados pela seguinte express\u00e3o:

$$a \sin \theta = m \lambda, \text{ com } m = 1, 2, 3, \dots$$

Note que agora $m = 0$ nos d\u00e1 um m\u00e1ximo e n\u00e3o um m\u00ednimo.



Difração em fendas simples (Halliday)

a. Posição dos Máximos

A posição dos máximos será estimada como no ponto médio entre dois mínimos, ou seja, se θ_1 é a posição do primeiro mínimo e θ_2 é a posição do segundo, a posição do primeiro máximo, além do máximo central, será dada por:

$$\theta_{1max} = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2}$$

b. Intensidade na Difração de Fendas Simples

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right)^2$$



$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

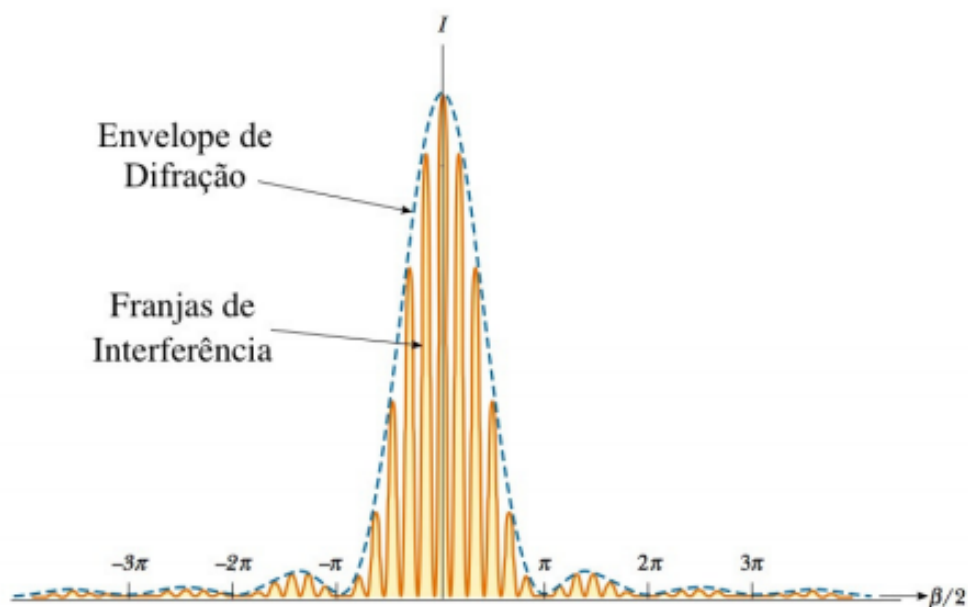
8. Intensidade na Difração em Fendas Duplas

Quando se realiza a experiência das fendas duplas com fendas de tamanhos a , não desprezíveis, e separadas por uma distância d , a figura de interferência e difração terá a seguinte característica:

$$I = I_0 \left(\frac{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}{\frac{\beta}{2}} \right)^2 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin \theta$$

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \sin \theta$$



Interferência e Difração (Serway).



Na figura de interferência e difração, o “envelope” da curva corresponde ao fenômeno da difração enquanto as franjas internas ao “envelope” estão relacionadas ao fenômeno da interferência.

9. Difração em Orifícios Circulares

Dado um orifício circular de diâmetro D , a posição angular do primeiro mínimo de difração será dada por:

$$\sin \theta_1 = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

10. Critério de Rayleigh

Dois objetos estão começando a ser distinguíveis quando o centro da figura de difração de um deles coincide com o mínimo de difração do outro.

A separação mínima angular entre eles será chamada de **limite de resolução**. No caso de lentes circulares como telescópios, tem-se:

$$\theta_{min} = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

Para fontes puntiformes, a separação angular mínima será dada por:

$$\theta_{min} = \frac{\lambda}{d}$$

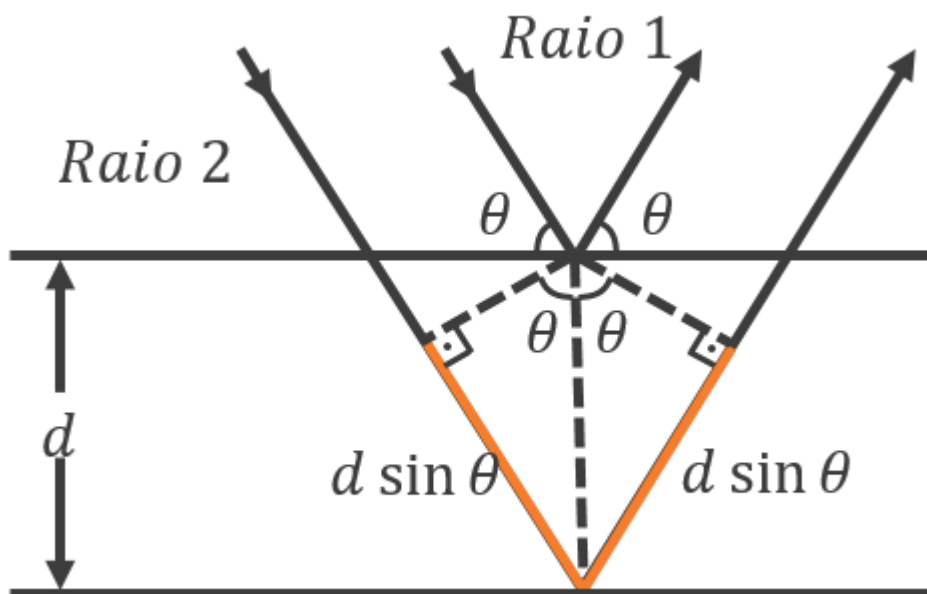


11. Difração de Raios X (Lei de Bragg)

A condição para interferência construtiva em difrações de raios X, segundo a lei de Bragg é dada por:

$$2 \cdot d \cdot \sin \theta = m \lambda, m = 1, 2, 3, \dots$$

A figura a seguir representa a diferença de caminho entre os raios 1 e 2. É importante notar que os raios são supostos em fase.



12. Relatividade

a. Evento

Um evento é uma ocorrência caracterizada por valores definidos para a posição (coordenadas x , y e z) e para o tempo (t).



b. Tempo Próprio

O intervalo de tempo entre dois eventos que ocorrem num **mesmo ponto do espaço** é chamado tempo próprio e designado por Δt_0 .

Em um dado sistema que se move com velocidade \vec{u} , existe uma infinidade de outros sistemas que se movem com velocidade relativa em relação a esse primeiro sistema, porém há um único sistema em que a velocidade relativa é nula.

Assim, o tempo natural é mais fundamental que os outros intervalos de tempo medidos em outros referenciais e esse referencial será tomado como sistema de referência.

c. Dilatação do Tempo

Dado que o intervalo de tempo próprio entre dois eventos é Δt_0 (medido no sistema de referência), então para um observador que se move com velocidade \vec{u} em relação a esse sistema de referência, o intervalo de tempo medido será:

$$\Delta t = \Delta t_0 * \gamma$$

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



d. Comprimento Próprio

É o comprimento de um corpo medido em um sistema onde o mesmo **encontra-se em repouso**. O comprimento próprio de um corpo é denotado por l_0 .

e. Contração do Comprimento

Supondo conhecido o comprimento próprio l_0 de um corpo e que exista um referencial que se move com velocidade \vec{u} em relação ao sistema de referência, o comprimento medido nesse novo sistema será dado por:

$$l = \frac{l_0}{\gamma}$$

No caso da variação do comprimento, é importante lembrar que ela ocorre apenas na direção paralela à velocidade \vec{u} .

13. Transformações de Lorentz

As transformações de Lorentz nos ajudam a responder a seguinte questão:

Dado que temos as coordenadas (x, y, z, t) de um evento em um referencial S , quais são as coordenadas (x', y', z', t') desse mesmo evento em um referencial S' que se move em relação a S com velocidade $\vec{u} = u_x \vec{i}$ e coincide com S em $t = t' = 0$.

Para a posição de uma partícula, as transformações de Lorentz podem ser expressas por:



$$\begin{cases} x' = \gamma(x - ut) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{ux}{c^2}\right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} x = \gamma(x' + ut') \\ y = y' \\ z = z' \\ t = \gamma\left(t' + \frac{ux'}{c^2}\right) \end{cases}$$

No referencial S' , as componentes da velocidade de um corpo, que possui, em S , $\vec{v} = v_x\vec{i} + v_y\vec{j} + v_z\vec{k}$, são dadas por:

$$\begin{cases} v'_x = \frac{v_x - u}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \\ v'_y = \frac{\left(v_y \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}\right)}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \\ v'_z = \frac{\left(v_z \sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}\right)}{1 - \frac{uv_x}{c^2}} \end{cases}$$

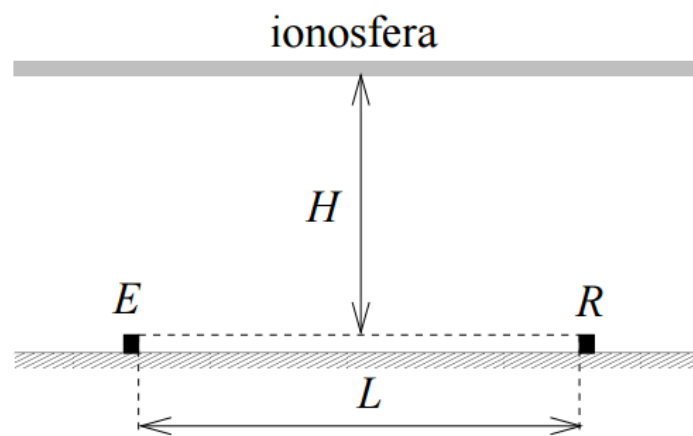


Lista de Exercícios

1. Interferência

P2 2012 Física IV Poli USP, Exercício 1a

Ondas longas de rádio, com comprimento de onda λ , de uma estação radiotransmissora E podem chegar a um receptor R por dois caminhos diferentes. Um deles é a trajetória retilínea do emissor até o receptor, a uma distância L . O segundo envolve uma reflexão na ionosfera (camada de moléculas ionizadas, quase no topo da atmosfera) que está a uma altura H da superfície da Terra. Admita que a reflexão ocorra num ponto a meio caminho entre o emissor e o receptor e que a onda sofra uma mudança de fase π radianos ao ser refletida na ionosfera.



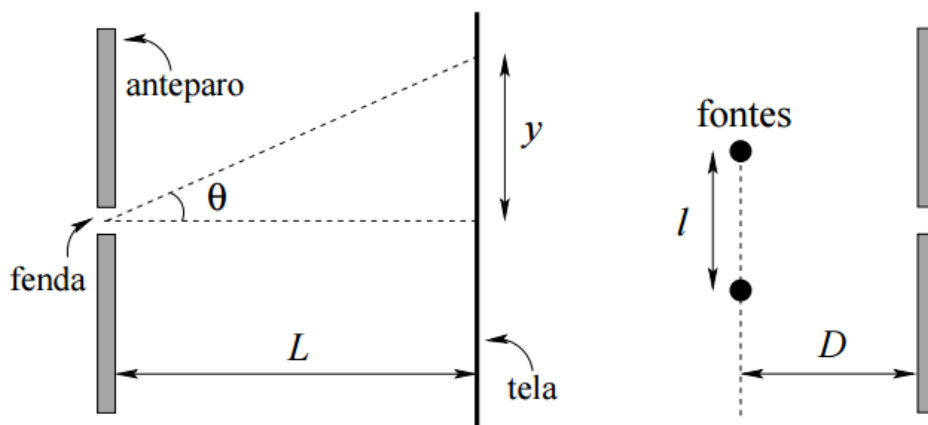
Quais as condições que devem ser obedecidas por H , L e λ para que haja interferência destrutiva entre o feixe direto e o feixe refletido?



2. Difração e Critério de Rayleigh

P1 2015 Física IV Poli USP, Exercício 1

Luz de comprimento de onda de 500 nm de uma fonte pontual distante incide normalmente sobre um anteparo com uma fenda de largura $a = 5000 \text{ nm}$. O padrão de difração é observado numa tela a uma distância $L = 3 \text{ m}$ do anteparo.



- Calcule a posição angular do primeiro e do segundo mínimos de difração com $\theta > 0$ (use a aproximação $\sin \theta \approx \tan \theta \approx \theta$).
- Calcule a distância $y > 0$ do primeiro máximo lateral de difração em relação ao centro da figura de difração. Use a aproximação de que um máximo lateral está situado à meia distância dos mínimos adjacentes.
- Considere agora duas fontes pontuais idênticas, não coerentes, emitindo luz desse mesmo comprimento de onda (500 nm), situadas à mesma distância D da fenda e separadas por $l = 2 \text{ m}$, conforme a figura acima. Determine a distância máxima D para que essas duas fontes estejam minimamente resolvidas na tela.



3. Difração em Fendas Duplas

P1 2016 Física IV Poli USP, Exercício 2a

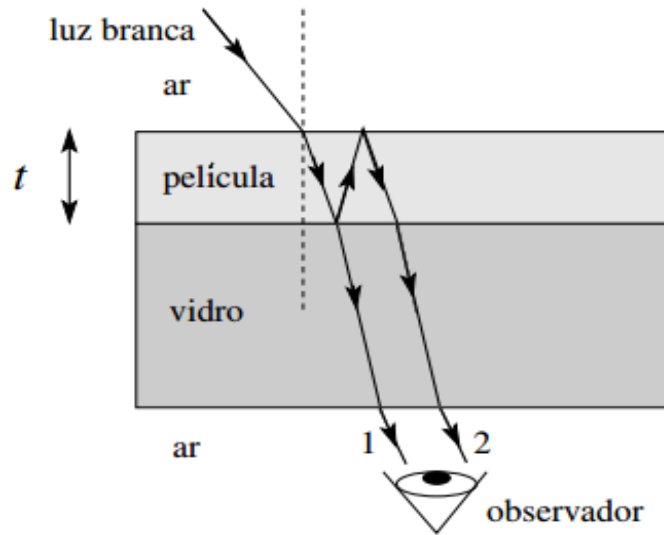
Luz monocromática incide sobre um anteparo com duas fendas de largura a separadas por uma distância d . Sobre uma tela situada a uma distância muito maior que d observam-se franjas de interferência e de difração, conforme a figura. Com base nesta figura, estime a relação $\frac{a}{d}$. Justifique.



4. Difração em Fendas Duplas

P1 2016 Física IV Poli USP, Exercício 2b

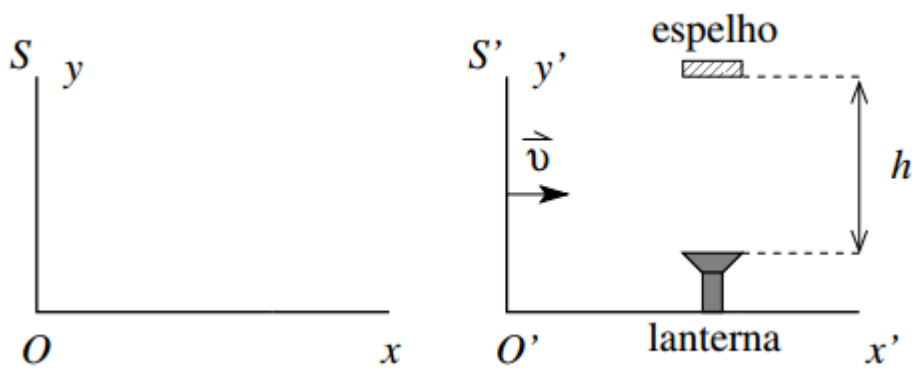
Uma película transparente de espessura $t = 200 \text{ nm}$ e com índice de refração $n_p = 1,2$ está colocada entre dois meios dielétricos: ar (índice de refração $n_{ar} = 1$) e vidro (índice de refração do vidro $n_v = 1,5$). Luz branca incide quase normalmente sobre esta película e um observador vê a luz transmitida, conforme a figura. A luz branca tem comprimento de onda entre 400 nm e 700 nm . Para quais comprimentos de onda nesse intervalo haverá interferência construtiva entre os raios 1 e 2 da figura?



5. Relatividade do Tempo e do Espaço

P1 2016 Física IV Poli USP, Exercício 3

Uma lanterna está em repouso no sistema inercial S' que se move com velocidade $\vec{v} = \frac{4c}{5} \hat{i}$ em relação a um outro sistema inercial S . Em um determinado instante, um pulso de luz é emitido pela lanterna e propaga-se paralelamente ao eixo $O'y'$ até ser refletido por um espelho paralelo ao eixo $x'z'$, retornando à lanterna. A distância entre a lanterna e o espelho é $h = 9m$, conforme a figura.



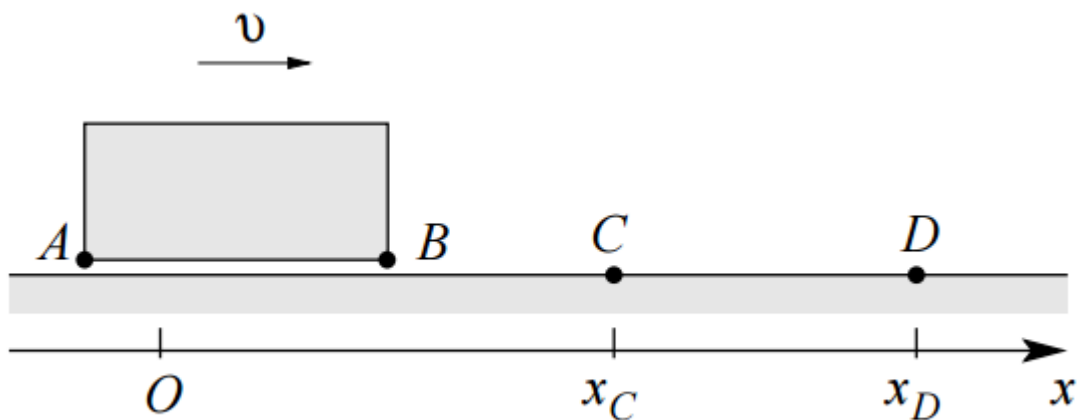


- a. Qual é o intervalo de tempo medido em S' entre a emissão e o retorno do pulso luminoso?
- b. Qual é a distância percorrida pela lanterna durante estes dois eventos (emissão e retorno do pulso), medida no referencial S ?

6. Transformações de Lorentz

P1 2015 Física IV Poli USP, Exercício 4

Um veículo se move com velocidade uniforme v em relação ao solo. Sejam A e B as extremidades do veículo e C e D marcações no solo, como na figura. Definamos o evento $B \equiv C$ como a passagem de B por C e os eventos $B \equiv D$, $A \equiv C$ e $A \equiv D$ de forma análoga.



- a. Se o intervalo de tempo entre os eventos $B \equiv C$ e $A \equiv C$ (tempo gasto pelo veículo para passar pelo ponto C) no referencial do veículo é $\Delta t'$, qual é o intervalo de tempo entre esses eventos no referencial do solo?
- b. Se os eventos $B \equiv D$ e $A \equiv C$ são simultâneos no referencial veículo, qual o intervalo de tempo entre esses eventos no referencial solo?