

Olympic Birds

Física



Princípios da Óptica Geométrica



Olympic Birds
Princípios da Óptica Geométrica
Física

Sumário

1	Introdução	2
2	Luz: Onda ou Partícula ?	2
3	Princípio de Fermat	4
4	Reflexão e Refração	6
5	Caminho Óptico	7
6	Reversibilidade da Luz	8
	Apêndice A: Encontrando as Leis da Óptica	9
7	Problemas	12
7.1	Problema 1 - Obtendo foco de lente (adaptado de Gupta)**	12
7.2	Problema 2 - Um sistema óptico diferenciado (adaptado de Gupta)*** .	12
7.3	Problema 3 - Fibras óticas (OBF 2015)*	13
7.4	Problema 4 - Desvio de prisma (adaptado de Gupta)*	13
7.5	Problema 5 - Óptica do Arco-íris (adaptado da Seletiva de Física 2025)****	14
7.6	Problema 6 - Raios incidentes e inclinados ***	15
7.7	Problema 7 - Fibra óptica (SOIF 2023)***	15
7.8	Problema 8 - Reflexões em lentes (adaptado de Gupta)****	16
7.9	Problema 9 - Caminho óptico equivalente e definição de função de lente ***	17
7.10	Problema 10 - espelhos em lentes (adaptado de Gupta)**	17
8	Gabaritos	18

1 Introdução

Após o lançamento da nossa primeira coletânea sobre *Princípios da Ótica Geométrica*, a equipe de Física do Olympic Birds apresenta este material teórico completo sobre o mesmo tema. Com ele, você terá acesso aos conceitos fundamentais necessários para compreender e resolver os desafios propostos na coletânea inicial.

Iniciamos este material com uma discussão essencial que permeou toda a história dos estudos de óptica, abordando os principais conceitos e fenômenos relacionados à óptica geométrica. Começaremos pelo Princípio de Fermat e pelo conceito de caminho óptico, estabelecendo as bases para o entendimento do comportamento da luz.

Em seguida, exploraremos os fenômenos de reflexão e refração, integrando uma análise das características eletromagnéticas da luz. Avançando um pouco mais, aprofundaremos a discussão sobre caminho óptico, abordando especificamente o fenômeno da interferência. Por fim, discutiremos o Princípio da Reversibilidade da Luz, um conceito central na óptica geométrica.

Além disso, incluímos uma seção de problemas cuidadosamente organizados por níveis de dificuldade, classificados de * a ****, sendo * o mais fácil e **** o mais difícil.

Ao final deste material, você encontrará os gabaritos das questões, permitindo avaliar sua compreensão e reforçar os conceitos estudados.

2 Luz: Onda ou Partícula ?

O questionamento do que seria a luz sempre foi presente na história da humanidade. Entre as hipóteses possíveis consideradas para descrever o que seria a luz fisicamente, duas sempre se destacaram no cenário científico: partícula ou onda. A discussão sobre o assunto já foi muito assanhada, levando até mesmo a conflitos e tensão entre cientistas, como entre Newton (defensor da luz como partícula) e Huygens (defensor da luz como onda).

Os primeiros experimentos pareciam indicar um comportamento predominantemente ondulatório da luz. Dentre esses experimentos, destaca-se o da interferência, realizado por Thomas Young. Esse experimento, em princípio, parecia provar definitivamente que a luz não poderia ser descrita como partícula, dado que partículas não podem ser representadas como funções de onda que se anulam em certos pontos. No experimento, a luz é direcionada para passar por uma fenda dupla, e, segundo o princípio de Huygens, cada ponto da fenda atua como uma fonte independente de ondas.

O padrão de interferência observado é resultado da soma das funções de onda provenientes de cada fenda, as quais apresentam diferenças de fase que variam conforme o ponto no plano atingido pela luz. Em algumas regiões, a diferença de fase é nula, resultando em máximos de intensidade luminosa; em outras, a diferença é de meio período, originando mínimos. Contudo, para os propósitos do presente estudo, esses detalhes são secundários. O que se conclui é que, nesse experimento, a luz apresentou um

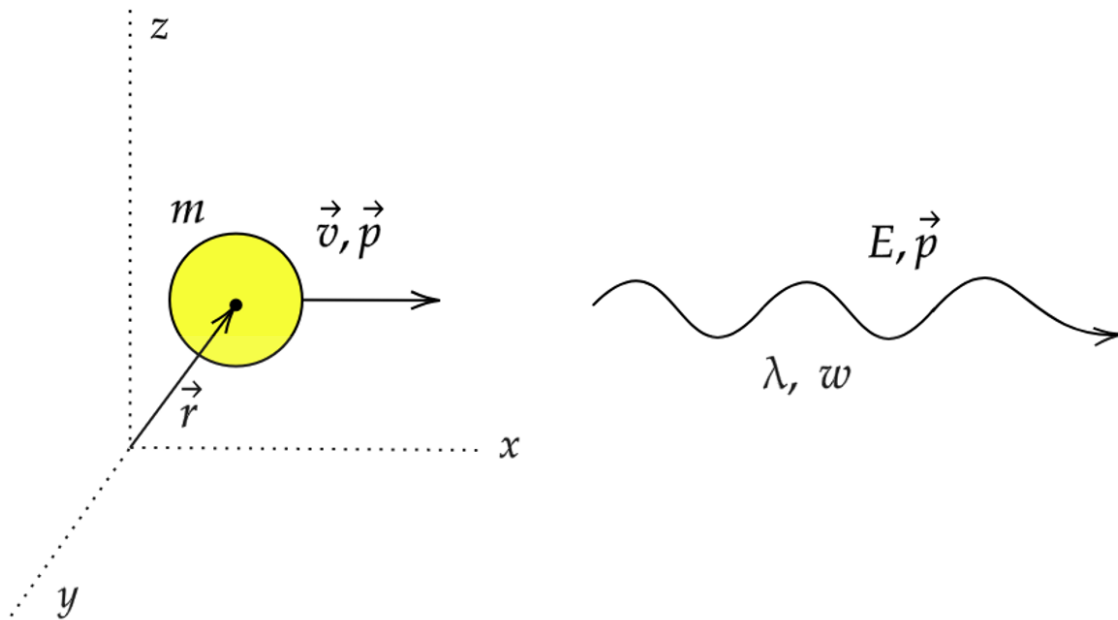


Figura 1: Seria a luz uma partícula com posição e velocidade bem definidas, ou uma onda com comprimento de onda e frequência bem definidas?

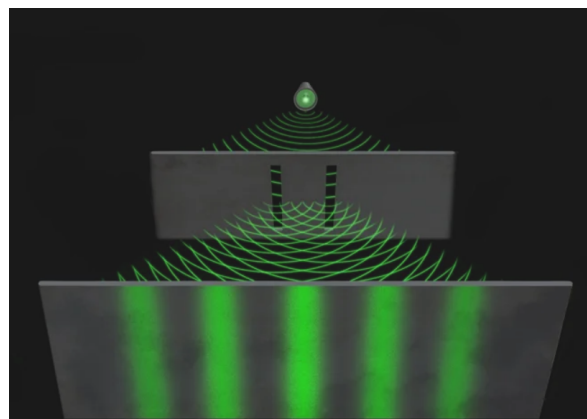


Figura 2: Experimento da Fenda Dupla. (Fonte: imagem retirada da internet, autoria desconhecida.)

comportamento categoricamente ondulatório.

Apesar disso, outros fenômenos físicos, como a reflexão e a refração, continuavam sendo bem descritos ao assumir a luz como partícula. Assim, mesmo com a predominância da ideia de que a luz era uma onda, algumas hipóteses sobre sua natureza corpuscular ainda persistiam.

A reviravolta na compreensão da natureza da luz ocorreu quando Albert Einstein descreveu, de forma magistral, o efeito fotoelétrico. Todavia, havia um ponto essencial em sua teoria: a hipótese de que a luz possui energia quantizada, o que implicava que ela deveria ser descrita como partícula, já que partículas possuem posição, velocidade e

energia bem definidas. Nascia, assim, o conceito de fóton.

Einstein também mostrou como verificar experimentalmente sua teoria, e experimentos subsequentes, como o Efeito Compton, confirmaram sua validade. Contudo, isso gerou uma aparente contradição: como reconciliar o fato de a luz se comportar como partícula com a evidência anterior de que ela era uma onda?

Atualmente, essa questão é resolvida pelo conceito de dualidade onda-partícula, elegantemente representado pela hipótese de De Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{p},$$

onde λ é o comprimento de onda, h é a constante de Planck e p é o momento linear.

De acordo com essa hipótese, a luz pode apresentar comportamento ondulatório ou corpuscular, dependendo das condições do experimento. Além disso, como não há privilégios físicos exclusivos para a luz, todas as entidades físicas podem exibir esse comportamento dual. Entretanto, devido à pequena magnitude da constante de Planck ($h \approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), o comprimento de onda associado a objetos macroscópicos, que possuem grandes momentos, é praticamente indetectável.

Nos estudos de óptica geométrica, adotaremos a descrição da luz como uma onda, salvo em casos específicos, como na análise de fenômenos relacionados à reflexão, onde a natureza corpuscular pode ser útil. De modo geral, porém, a óptica geométrica considera a luz exclusivamente como uma onda, pois os cenários relativísticos e quânticos não são abordados nesse contexto.

3 Princípio de Fermat

O Princípio de Fermat é bastante simples e pode ser descrito pelo seguinte enunciado:

“A luz sempre percorre o caminho mais curto possível, ou, equivalentemente, o menor caminho óptico possível. Assim, se entre os pontos A e B a luz percorre dois caminhos, ambos necessariamente possuem o mesmo caminho óptico, que será o menor possível.”

Em outras palavras, a luz sempre busca o caminho mais rápido, mas não necessariamente o de menor comprimento. Isso ocorre porque o índice de refração de um meio afeta a velocidade da luz, tornando o trajeto mais demorado dependendo do meio. Para ilustrar, observe a imagem abaixo:

Embora os caminhos AB e CD tenham o mesmo comprimento Δx , seus caminhos ópticos são diferentes, sendo definidos por:

$$\begin{aligned} \text{CO}_{AB} &= \Delta x n_1 \\ \text{CO}_{CD} &= \Delta x n_2 \end{aligned} \tag{3.1}$$

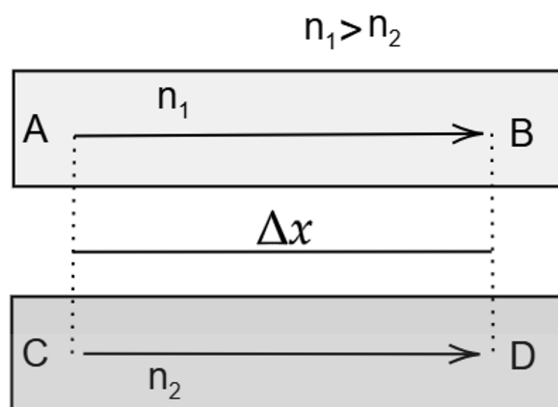


Figura 3: Ilustração de diferentes caminhos ópticos.

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos respectivos meios. Como o menor caminho óptico corresponde ao menor tempo, o caminho CD é percorrido em um intervalo de tempo menor.

Outra forma de analisar essa diferença é observar a velocidade da luz em cada meio, que diminui devido ao índice de refração, conforme o fator:

$$v = \frac{c}{n} \quad (3.2)$$

em que v é a velocidade da luz no meio, c é a velocidade da luz no vácuo e n é o índice de refração. Dessa forma, os tempos necessários para cada trajeto são dados por:

$$T_{AB} = \frac{\Delta x}{v_1} = \frac{\Delta x n_1}{c},$$

$$T_{CD} = \frac{\Delta x}{v_2} = \frac{\Delta x n_2}{c}.$$

Portanto, o tempo necessário para a luz percorrer o caminho AB é maior que o tempo necessário para percorrer o caminho CD , mesmo que ambos tenham o mesmo comprimento, corroborando os cálculos baseados no conceito de caminho óptico.

O Princípio de Fermat é extremamente útil, pois permite analisar sistemas ópticos em que a luz percorre mais de um trajeto. Nessas situações, todos os caminhos percorridos apresentam o mesmo caminho óptico, correspondente ao menor valor possível. Esse princípio também fundamenta diversos outros conceitos da óptica geométrica.

Por exemplo, observe a imagem abaixo:

Uma aplicação simples do Princípio de Fermat nos permite concluir que, independentemente de quão tortuosos sejam os trajetos 1 e 2 que a luz toma para ir de A a B , ambos terão o mesmo caminho óptico mais curto e levarão o mesmo tempo para serem percorridos.

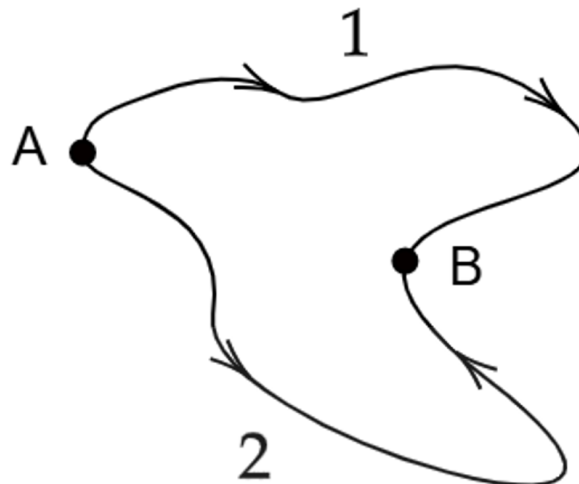


Figura 4: Exemplo de trajetos com o mesmo caminho óptico.

Assim, ao resolver problemas de óptica geométrica, é fundamental considerar como eles se relacionam com o Princípio de Fermat e verificar se a solução obtida está em conformidade com ele.

4 Reflexão e Refração

Nesta seção, apresentaremos as principais leis da óptica geométrica, que descrevem os fenômenos de reflexão e refração da luz. As demonstrações dessas leis, baseadas em conceitos de ondas eletromagnéticas e nas condições de contorno do eletromagnetismo, serão discutidas no apêndice. As leis são:

Primeira Lei: Todos os raios, sejam eles incidentes, refletidos ou transmitidos, estão restritos ao mesmo plano definido pelo raio incidente, formando o chamado **plano de incidência**.

Segunda Lei: O ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão:

$$\boxed{\theta_i = \theta_r} \quad (4.1)$$

Essa é a **lei da reflexão**.

Terceira Lei:

$$\boxed{n_2 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i} \quad (4.2)$$

Conhecida como a **lei de Snell**, essa relação descreve a refração da luz ao atravessar meios com diferentes índices de refração.

Além dessas leis, é importante diferenciar entre dois tipos de reflexão que podem ocorrer dependendo da natureza da superfície:

- **Reflexão Especular:** Quando a superfície de separação entre os meios é perfeitamente lisa, os raios de luz refletem de maneira ordenada, formando imagens nítidas.
- **Reflexão Difusa:** Quando a superfície é rugosa, os raios refletem em direções desordenadas, resultando em um espalhamento aleatório e uma imagem borrada.

A partir da relação $v = \lambda f$, pode-se deduzir que, ao atravessar meios com diferentes índices de refração, o comprimento de onda da luz é modificado conforme:

$$\lambda_m = \frac{\lambda}{n}, \quad (4.3)$$

onde λ_m é o comprimento de onda no meio de índice n , e λ é o comprimento de onda no vácuo.

Um fenômeno interessante ocorre quando o ângulo de incidência ultrapassa um limite crítico, resultando em **reflexão total**, sem transmissão para o segundo meio. Esse ângulo limite pode ser calculado pela equação:

$$n_2 \sin(90^\circ) = n_1 \sin \theta_i \quad \Rightarrow \quad \theta_i = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \quad (4.4)$$

Esse efeito só ocorre quando $n_2 < n_1$, ou seja, quando a luz passa de um meio mais refringente (n_1) para um menos refringente (n_2). Para $n_1 < n_2$, não existe ângulo limite, e a luz sempre sofre refração.

5 Caminho Óptico

A luz, como onda, possui uma fase que é gerada pela posição espacial da luz juntamente com o tempo. Quando duas ondas de fases opostas se encontram, ocorre uma interação destrutiva, onde a intensidade emitida pelo raio resultante é zero, ou seja, as ondas se anulam. Agora, se as fases forem semelhantes, as intensidades se somam. Logo, para determinar esse fenômeno, é preciso saber como determinar a fase, e para isso é necessário conhecer o caminho óptico, que, de forma simplificada, é o caminho percorrido pela luz.

A diferença de fase δ em radianos é dada por:

$$\delta = \frac{\Delta r}{\lambda} 2\pi,$$

onde Δr é a diferença de caminho óptico dividida por n (ou a diferença de caminho). Já que o caminho óptico, em si, é dado por nx , onde x é o espaço percorrido, ou seja,

se dois raios se divergem a partir de um ponto e percorrem caminhos de comprimentos diferentes até se convergirem novamente, a diferença dessas distâncias será a diferença de caminho.

Podemos notar que a mudança no meio também afeta o caminho óptico, e portanto, a fase. Com uma prova simples, podemos encontrar a diferença de caminho:

Se pegarmos dois trechos de comprimento L , um com índice n_1 e o outro com índice n_2 , veremos que $L = M\lambda_2 = N\lambda_1$, onde M e N são números quaisquer. Temos que $\lambda_2 n_2 = \lambda_1 n_1$. Ademais, a diferença de caminho pode ser dada por $\Delta r = (M - N)\lambda_1$. Se todo o sistema for analisado no índice n_1 , temos que a diferença de caminho é:

$$\Delta r = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) L,$$

ou, se pegarmos o caminho óptico e dividirmos por n_1 , teremos:

$$\Delta r = \frac{n_2 L - n_1 L}{n_1},$$

e chegaremos ao mesmo resultado.

Em suma, a equação de onda é dada por:

$$\vec{A}(r, t) = A_{0,r} e^{i(k_r \cdot r + \omega t + \phi)}.$$

Se tivermos duas ondas A_1 e A_2 com fases ϕ_1 e ϕ_2 , a diferença de fases será $\delta = \phi_2 - \phi_1$. Logo, percebe-se que, se a diferença de caminho for igual a $(m + \frac{1}{2})\lambda$, a interferência será destrutiva, e se for $m\lambda$, será construtiva, onde m é um número inteiro qualquer.

No geral, isso é mais utilizado na óptica física, mas na óptica geométrica, ele pode ser usado da seguinte forma: se temos dois raios de luz em fase que se divergem, o caminho óptico até eles se convergirem deve ser igual para formar uma imagem no ponto de convergência, ou, no máximo, distando por $m\lambda$.

6 Reversibilidade da Luz

A reversibilidade da luz é um princípio utilizado para facilitar a resolução de questões. Usando como justificativa o princípio de Fermat, podemos afirmar que, se o raio de luz segue um caminho do ponto A e chega no ponto B , um raio de luz saindo de B chegaria em A , basicamente utilizando o caminho reverso. Isso é válido se analisarmos as leis da óptica, que não se referem ao sentido da luz, mas sim ao fato de que um raio de luz só pode exercer uma configuração de movimento conforme as peculiaridades do sistema em que está inserido.

Este conceito é útil na resolução de problemas, porém vale destacar que em alguns casos ele não pode ser aplicado, mais precisamente em casos limites. Por exemplo, se dispararmos um raio de luz no ângulo limite em relação à normal da interseção dos

meios, o raio sairá paralelo e perpendicular à normal. No entanto, se dispararmos um raio paralelo à interseção, ele não se desviará para o meio com maior índice de refração de acordo com o mesmo ângulo limite. Ele seguirá seu caminho paralelo à interseção, sem desvio.

Apêndice A: Encontrando as Leis da Óptica

Os raios de luz são ondas eletromagnéticas, ou seja, são formados pela interação de campos elétricos e magnéticos, cujas equações de onda podem ser definidas de forma complexa:

Ondas elétricas:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} + \omega t)}$$

Ondas magnéticas:

$$\vec{B} = \frac{1}{v}(\vec{k} \times \vec{E})$$

onde v é a velocidade da onda eletromagnética, neste caso, a luz, no meio.

A interação de ondas com relação à alteração de meios é bastante conhecida. Com isso em mente, para entender todo o espectro de reflexão e refração da luz, devemos analisar o seguinte fenômeno: um raio de luz incidente, ao atravessar a interface entre dois meios (do meio 1 para o meio 2), se dividirá em raio refletido e transmitido, com os respectivos ângulos θ_i , θ_r , θ_t em relação ao plano de incidência. Sabe-se que o raio incidente pertence inteiramente e somente ao plano xz .

Todas as ondas terão a mesma frequência ω , que é determinada pelo raio incidente. Logo, todas as ondas se relacionam por $\omega = k_i v_1 = k_r v_1 = k_t v_2$. Com isso, $k_i = k_r = \frac{v_2}{v_1} k_t = \frac{n_1}{n_2} k_t$.

Possuímos as equações referentes às condições de contorno dos campos eletromagnéticos:

$$\epsilon_1 E_1^\perp = \epsilon_2 E_2^\perp, \quad E_1^\parallel = E_2^\parallel$$

$$B_1^\perp = B_2^\perp, \quad \frac{1}{\mu_1} B_1^\parallel = \frac{1}{\mu_2} B_2^\parallel$$

Ou seja, se analisarmos as condições de contorno, teremos a seguinte estrutura genérica:

$$()e^{i(k_i \cdot r + \omega t)} + ()e^{i(k_r \cdot r + \omega t)} = ()e^{i(k_t \cdot r + \omega t)}$$

quando $z = 0$.

Deixando de lado os termos dentro dos parênteses por um momento, o fator importante a se notar é que as dependências de x , y e t estão confinadas aos fatores exponenciais, e

essas dependências devem ser iguais quando $z = 0$. Uma mudança sutil em um desses termos destruiria a igualdade da equação, logo concluímos que:

$$k_r \cdot r = k_i \cdot r = k_t \cdot r$$

quando $z = 0$.

Outra forma de escrever essa equação mais precisamente seria:

$$x(k_i)_x + y(k_i)_y = x(k_r)_x + y(k_r)_y = x(k_t)_x + y(k_t)_y$$

Quando $x = 0$:

$$(k_i)_y = (k_r)_y = (k_t)_y$$

Quando $y = 0$:

$$(k_i)_x = (k_r)_x = (k_t)_x$$

Logo, como havíamos determinado que k_i pertence ao plano xz , então $(k_i)_y = 0$.

Com isso, obtemos a primeira lei da óptica:

Primeira Lei: Todos os raios, a partir do incidente, sendo eles refletidos ou transmitidos, estão restritos ao mesmo plano do incidente, determinando assim o **plano de incidência**.

Ao mesmo tempo, $(k_i)_x = (k_r)_x = (k_t)_x$ implica que:

$$k_i \sin \theta_i = k_r \sin \theta_r = k_t \sin \theta_t$$

E como já sabemos, $k_i = k_r$, logo, como θ_i e θ_r estão restritos ao intervalo de $(0, \frac{\pi}{2})$, temos que $\theta_i = \theta_t$. Com isso, obtemos a segunda lei:

Segunda Lei: O ângulo de incidência é igual ao de reflexão:

$$\boxed{\theta_i = \theta_t} \quad (.1)$$

Esta é a **lei da reflexão**.

Por fim, por meio das equações $k_i \sin \theta_i = k_t \sin \theta_t$ e $\frac{n_1}{n_2} k_t = k_i$, temos a terceira lei:

Terceira Lei:

$$\boxed{n_2 \sin \theta_t = n_1 \sin \theta_i} \quad (.2)$$

A famosa **lei de Snell**.

A seguir, temos uma figura retratando o fenômeno e as respectivas equações de onda para melhor discernimento:

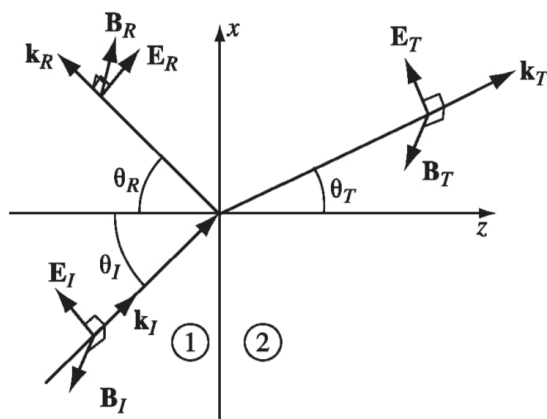


Figura 5: Esquema dos raios

Incidente:

$$\vec{E}_i(r, t) = \vec{E}_{0_i} e^{i(k_i \cdot r + \omega t)}$$

$$\vec{B}_i(r, t) = \frac{1}{v_1} (\vec{k}_i \times \vec{E}_i)$$

Refletida:

$$\vec{E}_r(r, t) = \vec{E}_{0_r} e^{i(k_r \cdot r + \omega t)}$$

$$\vec{B}_r(r, t) = \frac{1}{v_1} (\vec{k}_r \times \vec{E}_r)$$

Transmitida:

$$\vec{E}_t(r, t) = \vec{E}_{0_t} e^{i(k_t \cdot r + \omega t)}$$

$$\vec{B}_t(r, t) = \frac{1}{v_2} (\vec{k}_t \times \vec{E}_t)$$

7 Problemas

7.1 Problema 1 - Obtendo foco de lente (adaptado de Gupta)**

Na figura, o raio incide numa fina lente como mostrado na figura. Ambas as superfícies têm raio de curvatura igual a R . Determine a distância focal (o foco) total do sistema óptico; em outras palavras, supondo um raios vindos de um objeto muito distante, encontro onde eles irão se convergir após passarem por essa lente.

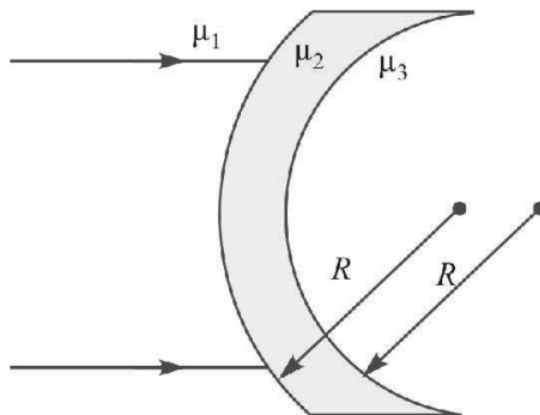


Figura 6: Imagem original de Gupta

7.2 Problema 2 - Um sistema óptico diferenciado (adaptado de Gupta)***

Uma fina lente biconvexa de índice de refração igual a 1.5 é posta em cima de um espelho plano horizontal conforme mostrado na imagem abaixo. O espaço entre as lentes e o espelho é então preenchido com água com índice de refração de 1.33. É descoberto que quando o ponto objeto é posto 15cm acima da lente (em seu eixo principal), o objeto coincide com sua imagem. Repetindo isso com outro líquido, o objeto e a imagem novamente coincidem, só que agora a uma distância 25cm acima da lente. Calcule o índice de refração desse líquido.

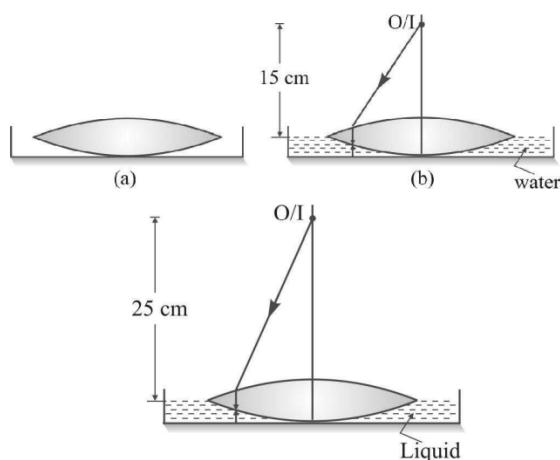


Figura 7: Imagem original de Gupta

7.3 Problema 3 - Fibras óticas (OBF 2015)*

A capacidade de transmissão de sinais por fibras óticas só é possível se o feixe luminoso não escapar para o meio exterior. Suponha uma fibra ótica de diâmetro d feita de um material de índice de refração n e cercada pelo vácuo. Baseando-se na figura abaixo, qual é o menor raio de curvatura que se pode dobrar essa fibra sem que a luz escape para o meio exterior?

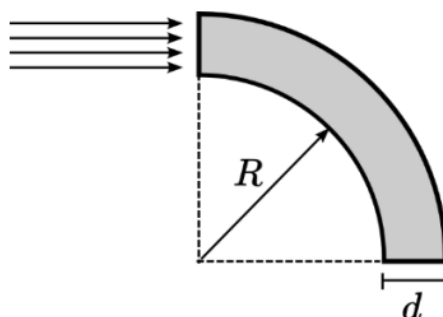


Figura 8: Imagem original da OBF

7.4 Problema 4 - Desvio de prisma (adaptado de Gupta)*

Um raio de luz sofre um desvio de 30° quando incide num prisma equilátero cujo índice de refração é $\sqrt{2}$. Qual é o ângulo subtendido pelo raio dentro do prisma em relação à base do prisma?

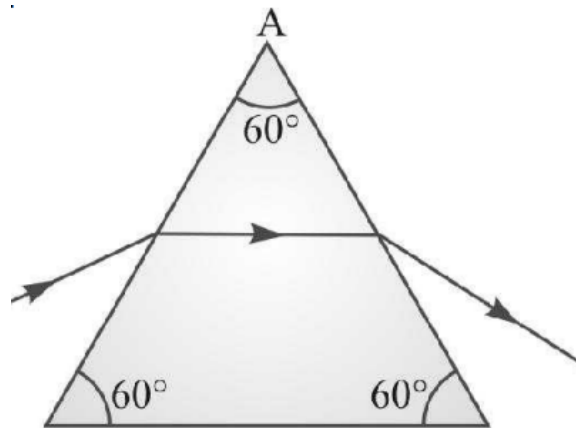
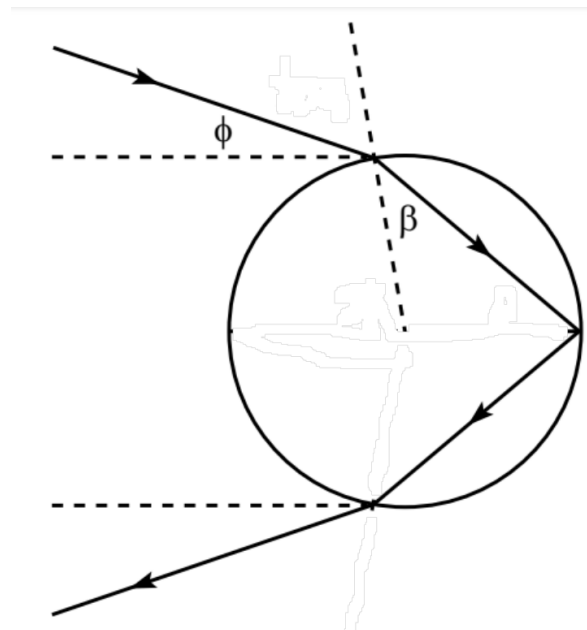


Figura 9: Imagem original de Gupta

7.5 Problema 5 - Óptica do Arco-íris (adaptado da Seletiva de Física 2025)****

Considere um raio de luz incidindo na superfície de uma gota de chuva, formando um ângulo genérico ϕ com a horizontal. Suponha que o índice de refração da água seja igual a $\frac{4}{3}$ e que as gotas de chuva sejam perfeitamente esféricas. O raio de luz é refratado, formando um ângulo β com a direção radial da gota, conforme mostrado na figura a seguir.



O ângulo de refração, β , dependerá do índice de refração específico de cada cor. Na figura acima se mostra o caso em que o raio refratado, após sofrer uma reflexão total interna na superfície posterior da gota, acaba sofrendo uma segunda refração e emerge da gota para o ar novamente.

- a) Mostre que a equação que relaciona os ângulos ϕ e β é

$$\phi = 2\beta - \arcsin\left(\frac{4}{3} \sin \beta\right)$$

Note que β não pode ser maior do que $\arcsin \frac{3}{4}$, já que levaria a um valor de seno superior a 1. Este valor de β resulta no ângulo crítico para a interface ar/água.

- b) Nesta equação podemos perceber que o ângulo ϕ tem um máximo para certo valor de $\beta = \beta_{\phi_{\max}}$. Encontre esse ângulo e o valor de ϕ_{\max} correspondente.

7.6 Problema 6 - Raios incidentes e inclinados ***

Um feixe de luz incide inclinado por um ângulo θ em relação à horizontal num espelho convexo, conforme visto na imagem abaixo. Determine qual será o ponto focal destes raios, tomando a perpendicular ao eixo óptico como coordenada y, e o próprio eixo óptico como o eixo x, com origem no foco.

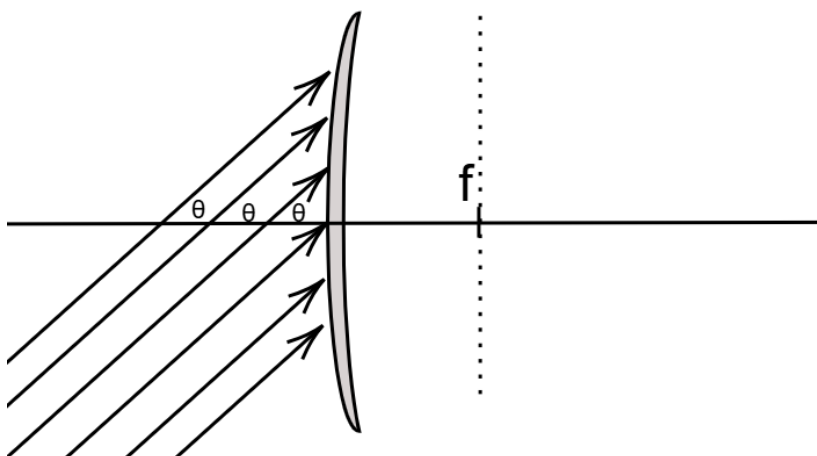


Figura 10: Esquema da questão

7.7 Problema 7 - Fibra óptica (SOIF 2023)***

As fibras ópticas têm revolucionado o mundo das telecomunicações nas últimas décadas. Seu funcionamento está baseado nas leis da reflexão e da refração, em particular, no fenômeno da reflexão total interna. Na figura abaixo mostramos o esquema de uma fibra óptica, a qual é um fino fio de material transparente, chamado núcleo, através do qual se propaga luz que sofre diversas reflexões totais, já que o material que “envolve” a fibra, chamado revestimento, possui um menor índice de refração.

Dados:

- $n_{\text{ar}} = 1,000$
- $n_{\text{núcleo}} = 1,4665$

- $n_{\text{revestimento}} = 1,460$

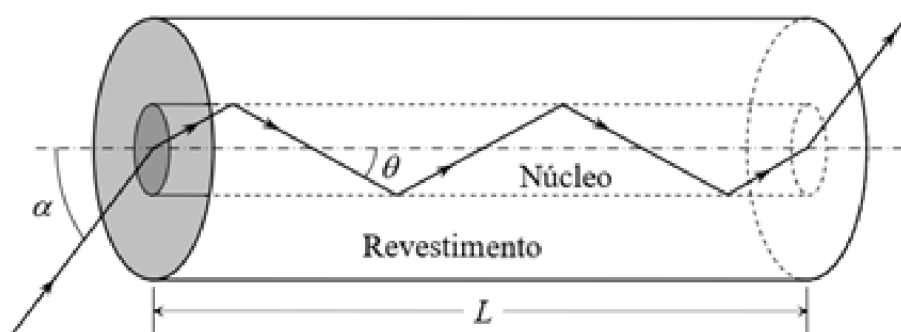


Figura 11: Imagem original da SOIF

Questões:

- a) Determine o máximo ângulo com respeito ao eixo, θ_{max} , com que pode viajar a luz dentro do núcleo para que se produzam reflexões totais ao atingir o revestimento. Para que ângulo máximo externo de iluminação α_{max} esta situação acontece?

Todos os raios que incidem sobre a entrada do núcleo com $0 \leq \alpha \leq \alpha_{\text{max}}$ propagar-se-ão ao longo da fibra, confinados no núcleo. Os raios seguem caminhos diferentes e, portanto, tardam tempos diferentes até alcançar o extremo de saída.

- b) Sabendo que a velocidade da luz no vácuo é $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$, calcule os comprimentos L_0 e L_{max} percorridos pela luz nos casos extremos ($\alpha = 0$, $\alpha = \alpha_{\text{max}}$), assim como os tempos de trânsito correspondentes, t_0 , t_{max} , para uma fibra de comprimento $L = 1000 \text{ m}$.

7.8 Problema 8 - Reflexões em lentes (adaptado de Gupta)****

Quando uma forte fonte de luz é utilizada com uma lente convexa, produz-se um número de imagens diferentes devido às reflexões internas e refrações como mostrado na figura abaixo. Essas imagens extras são definidas pelos focos na figura. Defina uma fórmula geral para a posição da n -ésima imagem, isto é, a posição de f_n , usando apenas f , n e μ .

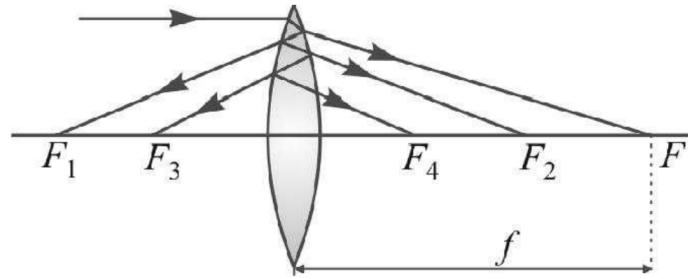
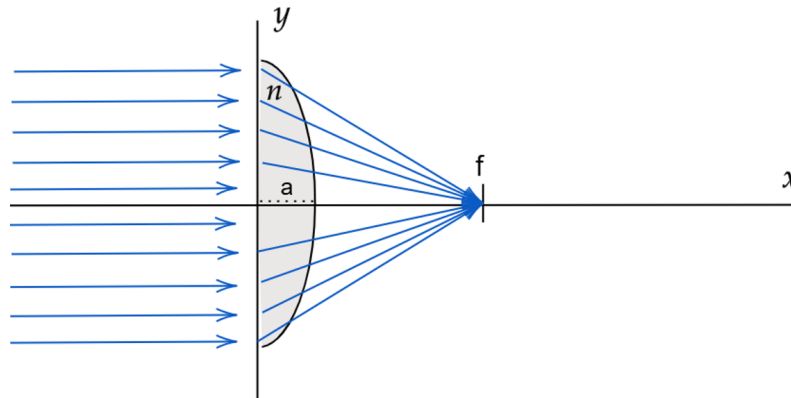


Figura 12: Imagem original de Gupta

7.9 Problema 9 - Caminho óptico equivalente e definição de função de lente ***

Uma fonte emite raios paralelos que incidem num sistema óptico, de forma que todos os raios convergem num ponto a uma distância f do sistema. Sabendo que o ponto máximo do sistema mede "a", obtenha a função da curvatura dele. Observação: f é a distância do ponto máximo do sistema até onde a imagem se forma. Desta forma, a distância da imagem ao centro do sistema de coordenadas é $(f + a)$. Dica: utilize a noção de caminho óptico equivalente.



7.10 Problema 10 - espelhos em lentes (adaptado de Gupta)**

Uma porção hemisférica da superfície de uma esfera sólida de vidro ($\mu = 1,5$) com raio r é espelhada para tornar o lado interno refletor.

Um objeto é colocado no eixo da hemisfera a uma distância $3r$ do centro da esfera. A luz do objeto é refratada na parte não espelhada, refletida pela parte espelhada e, novamente, refratada na parte não espelhada. Determine a posição final da imagem formada.

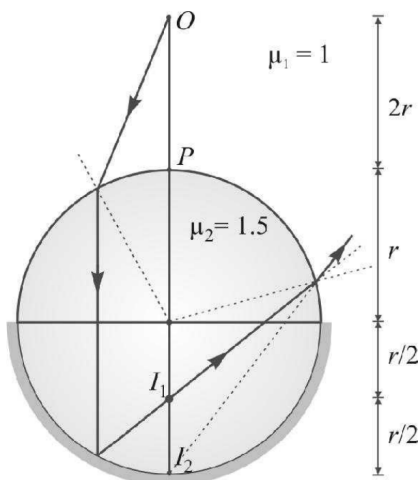


Figura 13: Imagem original de Gupta

8 Gabaritos

1. $f = \frac{\mu_3 R}{\mu_3 - \mu_1}$

2. $\mu = 1,6$

3. $\frac{d}{\mu - 1} = R$

4. O ângulo é nulo.

5. A fórmula para φ_{\max} é dada por: $\varphi_{\max} = 2 \arcsin \left(\sqrt{\frac{5}{12}} \right) - \arcsin \left(\sqrt{\frac{20}{27}} \right)$. O valor numérico de φ_{\max} é aproximadamente 21.01°

6. $x = 0$ e $y = f \cdot \tan(\theta)$

7. Item(a):

$$\alpha_{\max} = \arcsin (1,465 \cdot \cos 4,7^\circ) \approx 6,9^\circ.$$

Item(b):

$$T_{\max} \approx 4,903 \mu s$$

8.

$$\frac{1}{F_n} = \frac{(n+1)\mu_i - 1}{(\mu_i - 1)f}$$

9.

$$y(x) = n^2 x^2 - 2nx(a + f) + na(2f + na)$$

10. Seja p a posição da imagem, $p = + 2r$

Referências

- [1] GRIFFITHS, David J. *Introduction to Electrodynamics*. 4. ed. Boston: Pearson, 2013.
- [2] MOYSES NUSSENSVEIG, H. *Curso de Física Básica: Volume 4*. 5. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2003.
- [3] EINSBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nuclei, and Particles*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1974.
- [4] GUPTA, D. C. *Optics for JEE Main & Advanced (Study Package for Physics)*. New Delhi: Disha Publications, 2021.
- [5] TIPLER, Paul A. *Física para Cientistas e Engenheiros: Volume 2 - Mecânica, Ondas e Termodinâmica*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.