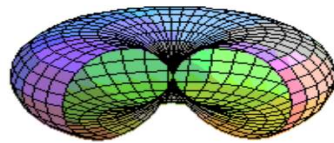
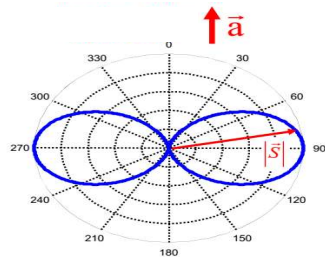
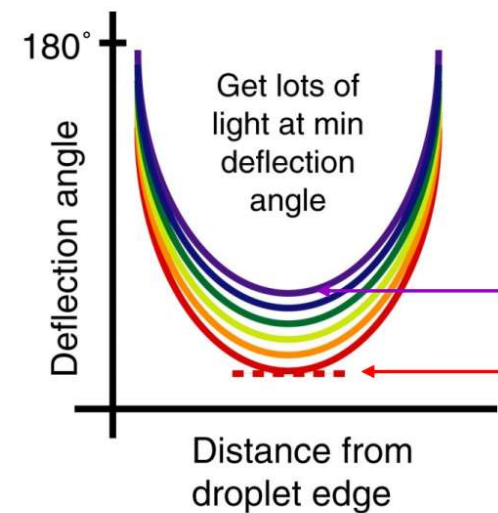


Dispersão da Luz



- Dispersão coerente e dispersão incoerente
- Radiação proveniente duma carga acelerada
expressão do Lorentz
- Dispersão Rayleigh
Porque o céu é azul
Arco-íris

Referência Hecht : 4.1-4.2



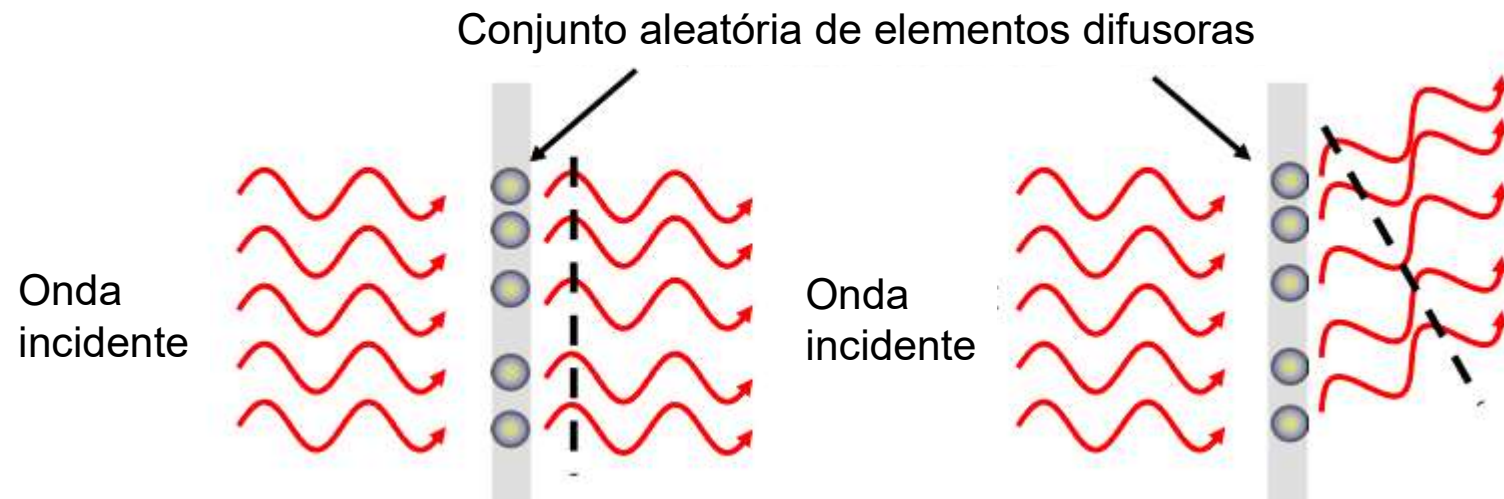
Dispersão coerente e dispersão incoerente

Dispersão **coerente**:

as ondas espalhadas têm uma relação entre as fases **não aleatória** na direção de interesse

Dispersão **incoerente**:

as ondas espalhadas têm uma relação entre as fases **aleatória** na direção de interesse



Dispersão na direção em frente é coerente

Mesmo quando a distribuição dos elementos difusoras é aleatória

Os caminhos de propagação são iguais

Dispersão fora do eixo é incoerente

quando a distribuição dos elementos difusoras é aleatória

Os caminhos de propagação são aleatórios

Dispersão coerente e dispersão incoerente

Focar nas fases das ondas dispersas $E = E_d \sum_{m=1}^N \exp(i\theta_m)$

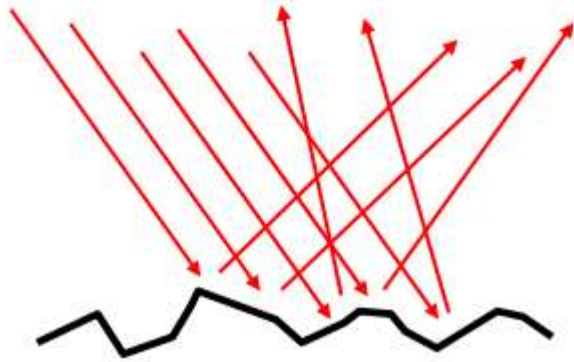
Quando a fase é incoerente

$$I = \frac{1}{2} \epsilon_o c |E|^2 \sim \left\langle \left| \sum_{j=1}^N \exp(i\theta_j) \right|^2 \right\rangle = \left\langle \sum_{j=1}^N \exp(i\theta_j) \sum_{k=1}^N \exp(-i\theta_k) \right\rangle$$
$$= \left\langle \sum_{j=1}^N \sum_{k \neq j}^N \exp(i\theta_j - \theta_k) + \sum_{j=1}^N 1 \right\rangle = N$$

Quando a fase é coerente $E = E_d e^{i\theta} \sum_{m=1}^N 1 = N E_d e^{i\theta}$ $I = \frac{1}{2} \epsilon_o c |E|^2 \sim N^2$

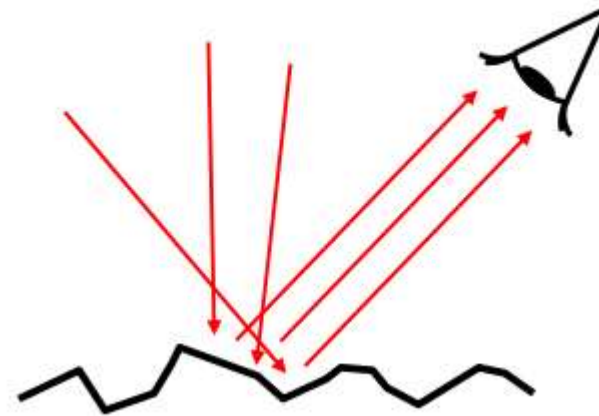
A dispersão incoerente é mais fraca (em geral N é grande) mas não nula.

Reflexões das superfícies irregulares



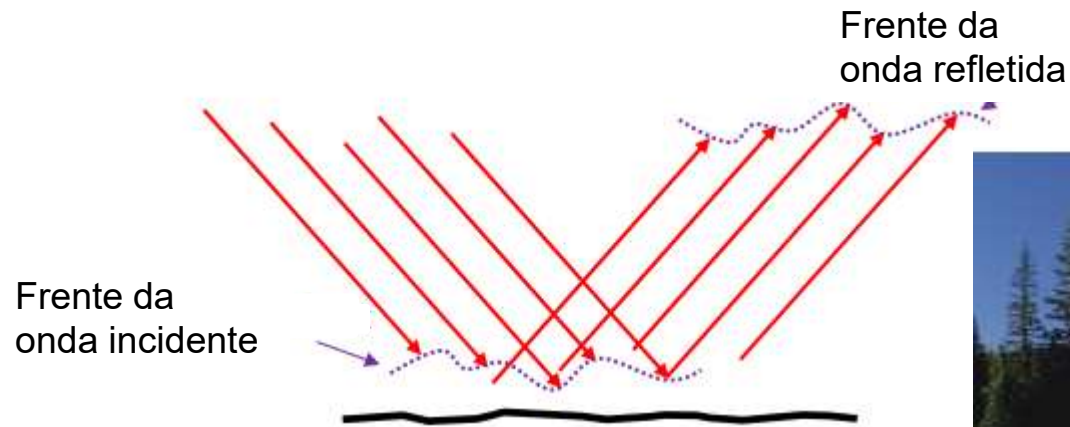
Uma superfície irregular (na escala de λ) dispersa luz em direções aleatórias com fases aleatórias

Como resultado vemos luz que veio de muitas direções diferentes. Em geral não vemos reflexões nem brilho intenso.



Quase tudo que vemos no dia a dia é luz incoerente dispersada pelos objetos irregulares.

Superfícies lisas

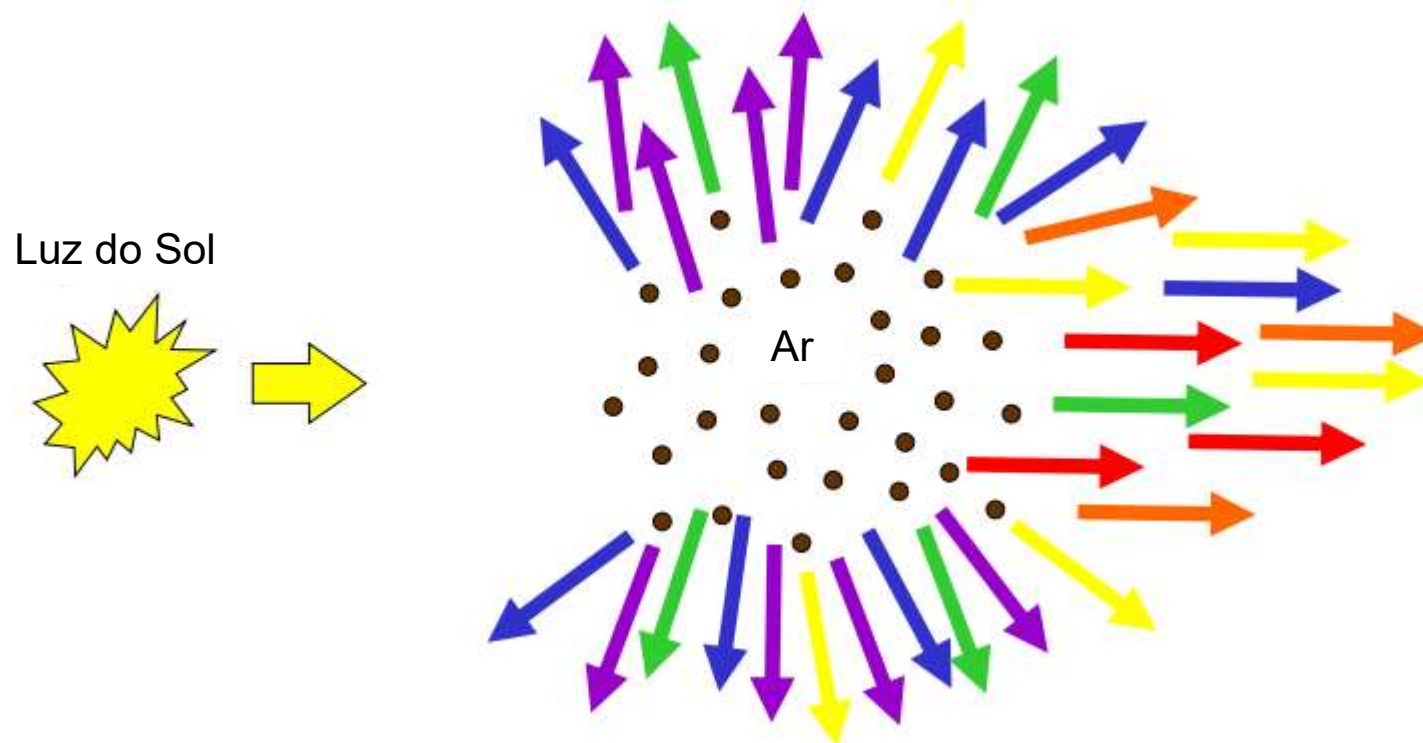


Superfícies lisas (na escala de λ)
preservam as frentes de ondas

Dispersão coerente cria imagens



Dispersão e frequência

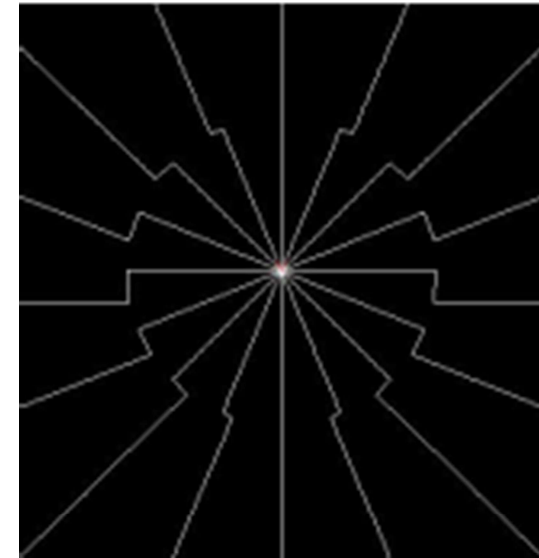
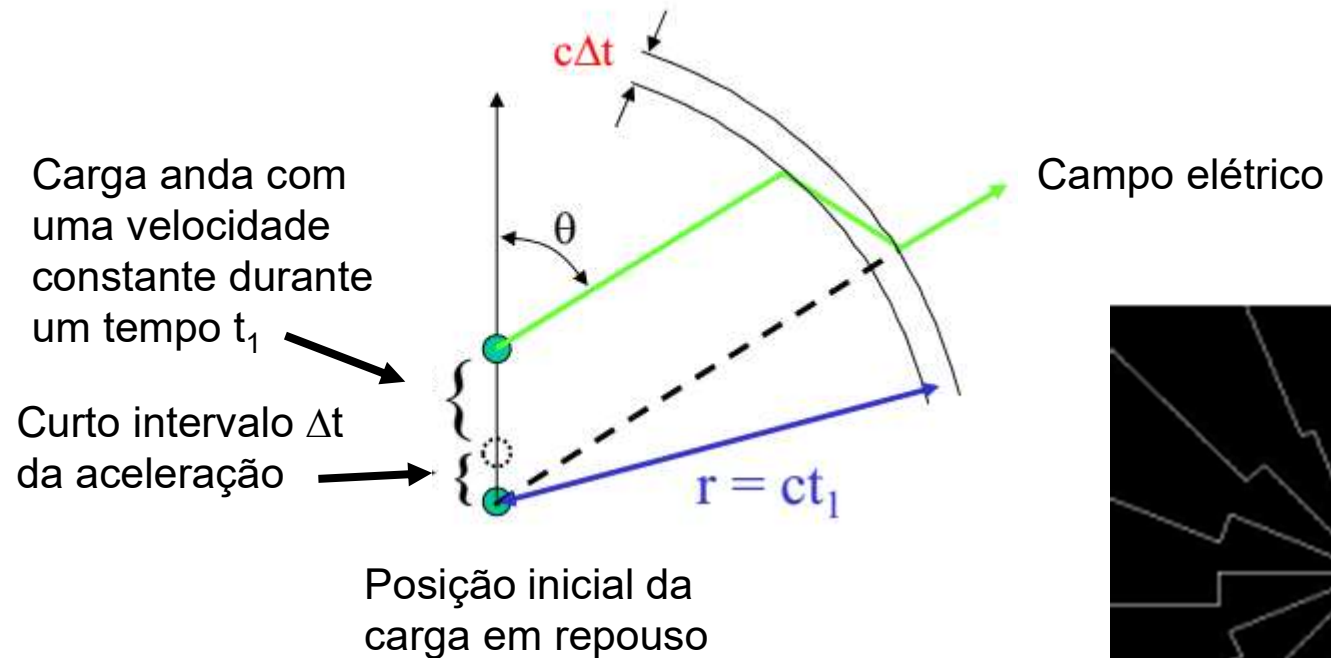


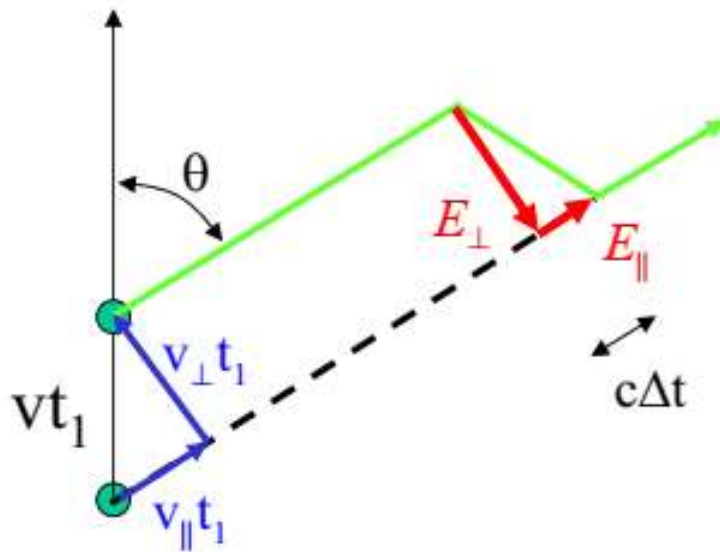
As moléculas na atmosfera dispersam a luz – a dispersão é mais forte para as frequências mais elevadas. Em consequência apenas as frequência menores se propagam para frente.

Cargas em aceleração radiam campos EM

Considere uma situação simplificada em que

- O tamanho do difusora é muito mais pequeno do que λ
- A frequência incidente é longe da ressonância mais próxima



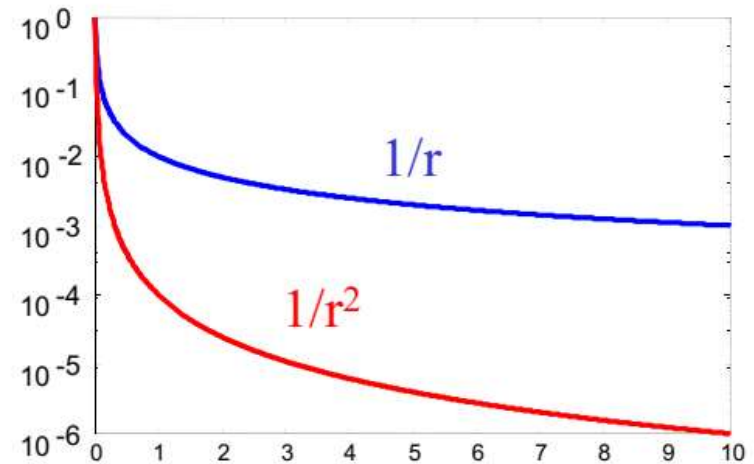


Suficientemente longe da carga o componente paralelo é desprezável

$$E_{rad}(r, t) \approx E_{\perp} = \frac{qa(t) \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 rc^2}$$

$$E_{\parallel} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$E_{\perp} = \frac{qa \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 rc^2}$$

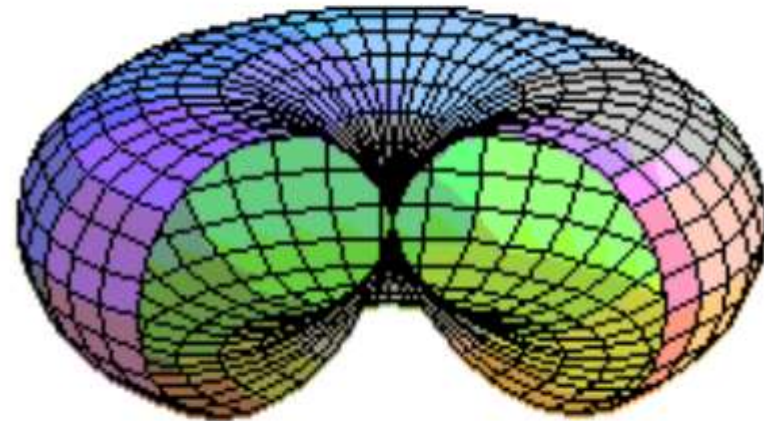
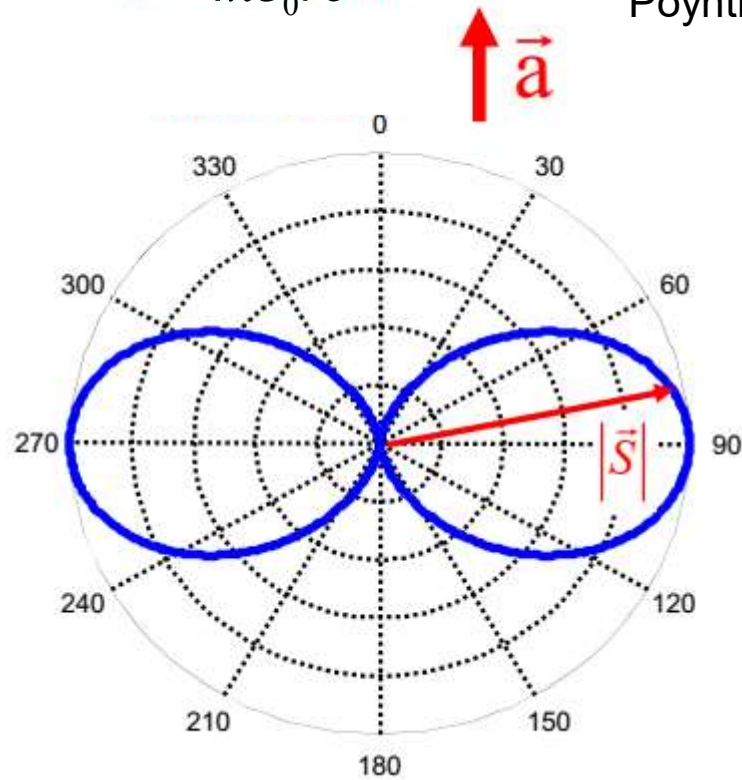


Padrão espacial da radiação

$$E_{rad}(r, t) = \frac{qa(t) \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r c^2}$$

$$S(r, t) = \epsilon_0 c |E_{rad}(r, t)|^2 = \frac{q^2 a^2 \sin^2 \theta}{16\pi^2 \epsilon_0 r^2 c^3} \sim \frac{a^2}{r^2} \sin^2 \theta$$

Poynting



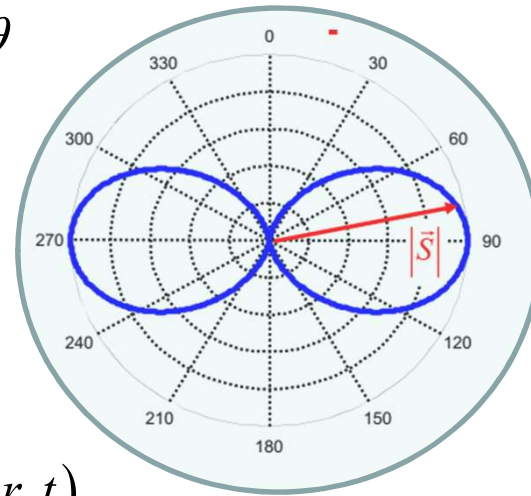
O campo elétrico radiado é nulo ao longo da direção de aceleração

Expressão de Larmor



Sir Joseph Larmor
1857-1942

$$S(r, t) = \frac{q^2 a^2 \sin^2 \theta}{16\pi^2 \epsilon_0 r^2 c^3} \sim \frac{a^2}{r^2} \sin^2 \theta$$



Potência total radiada

$$\begin{aligned} \text{Potência} &= \int_0^\pi d\theta r^2 \sin^2 \theta \int_0^{2\pi} d\phi S(r, t) \\ &= \frac{q^2 a^2}{8\pi \epsilon_0 c^3} \underbrace{\int_0^\pi d\theta \sin^3 \theta}_{4/3} \end{aligned}$$

$$P(t) = \frac{q^2 a^2}{6\pi \epsilon_0 c^3}$$

Não depende da distância (r)
É proporcional ao quadrado da aceleração

Lamor 1897

Dispersão Rayleigh

Modelo de Lorentz

$$x(t) = \frac{e}{m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\gamma\omega} E_0 e^{-i\omega t}$$

No limite em que $\omega, \gamma \ll \omega_0$

$$x(t) \approx \frac{e}{m\omega_0^2} E_0 e^{-i\omega t}$$

$$a(t) \approx -\frac{e\omega^2}{m\omega_0^2} E_0 e^{-i\omega t}$$

Larmor

$$P(t) = \frac{q^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

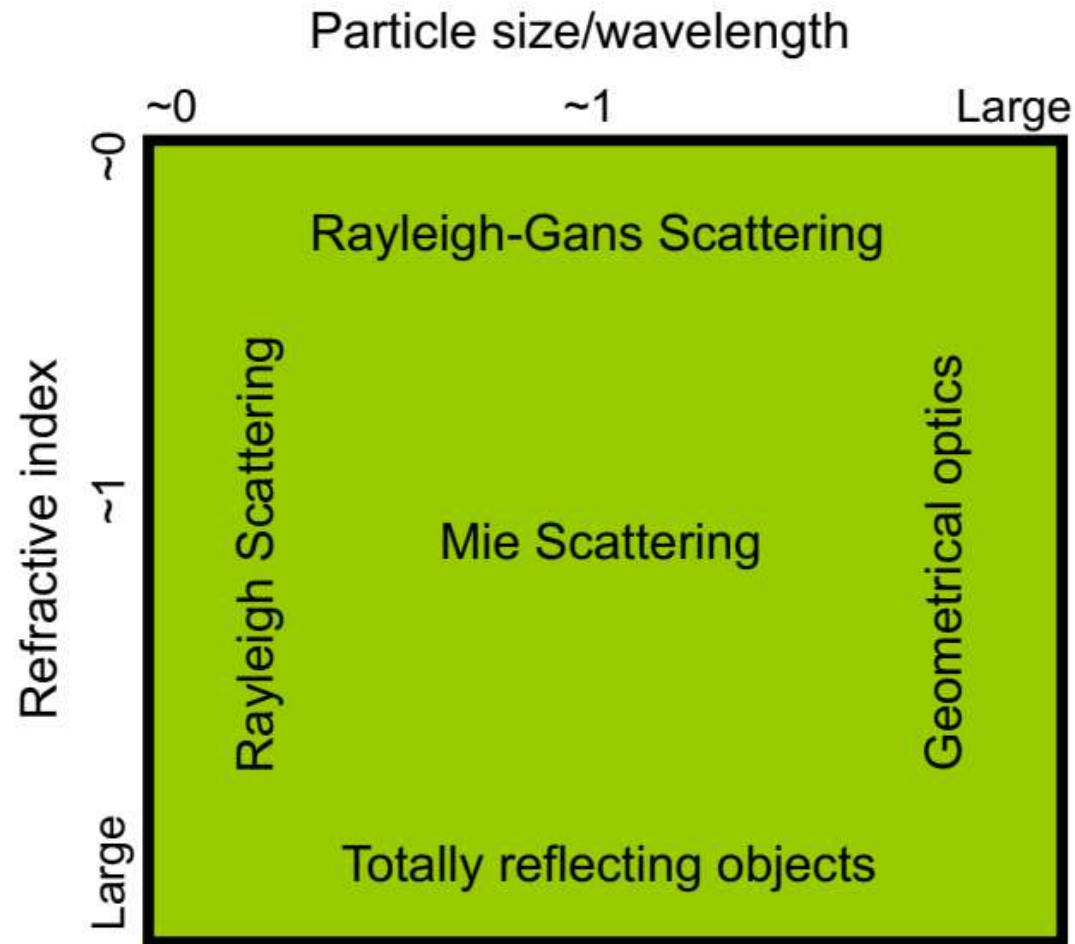
$$P_{dispersa} \sim \omega^4 P_{incident}$$

Relação deduzida pelo Lord Rayleigh em 1871

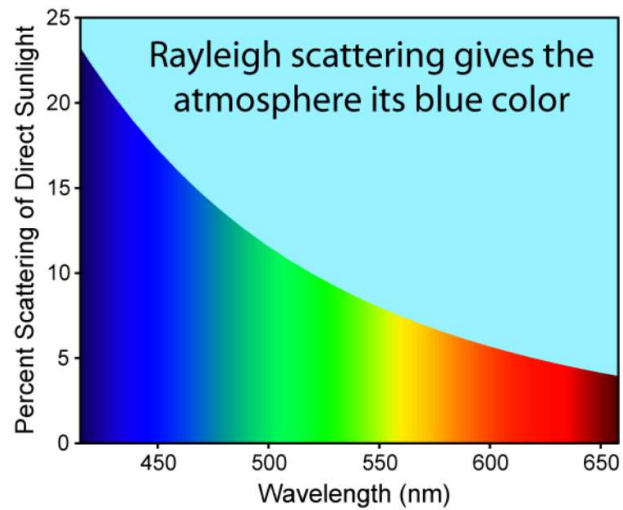


John William Strutt
(1842-1919)

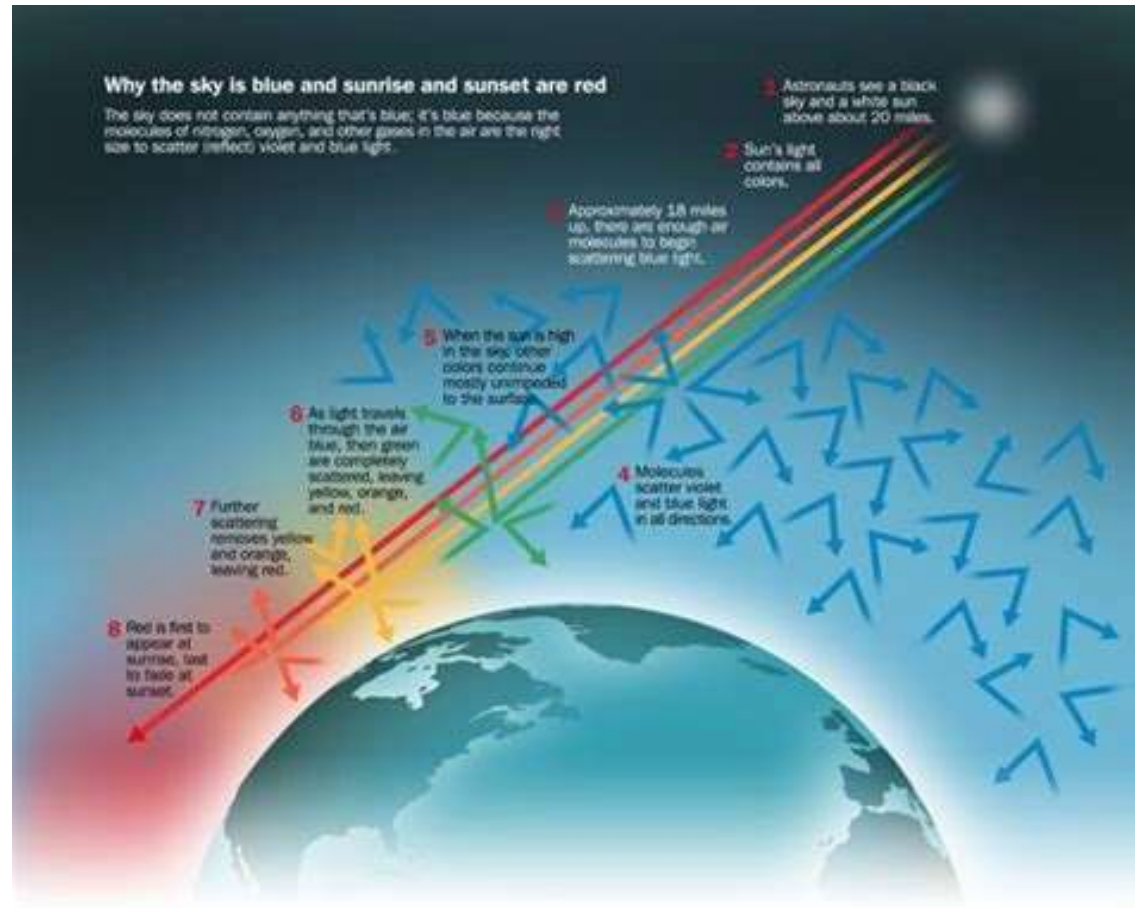
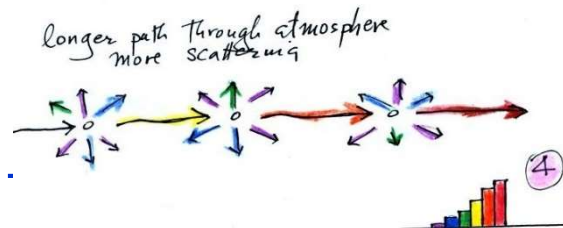
O Universo de dispersão é grande

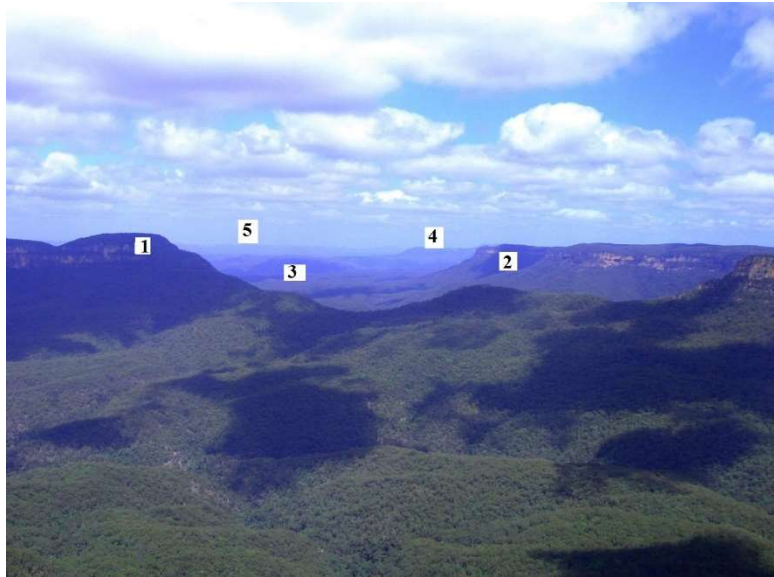


Dispersão Rayleigh

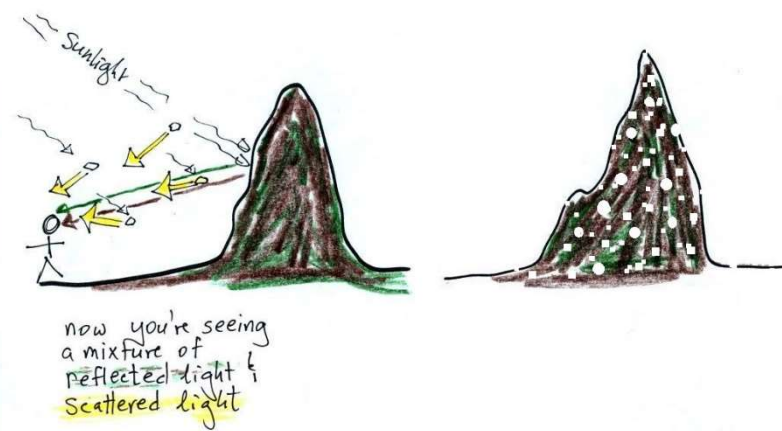


$$P_{disp} \sim \omega^4 P_{inc}$$





O mais distante o objeto seja
parece menos nítido e mais azulada

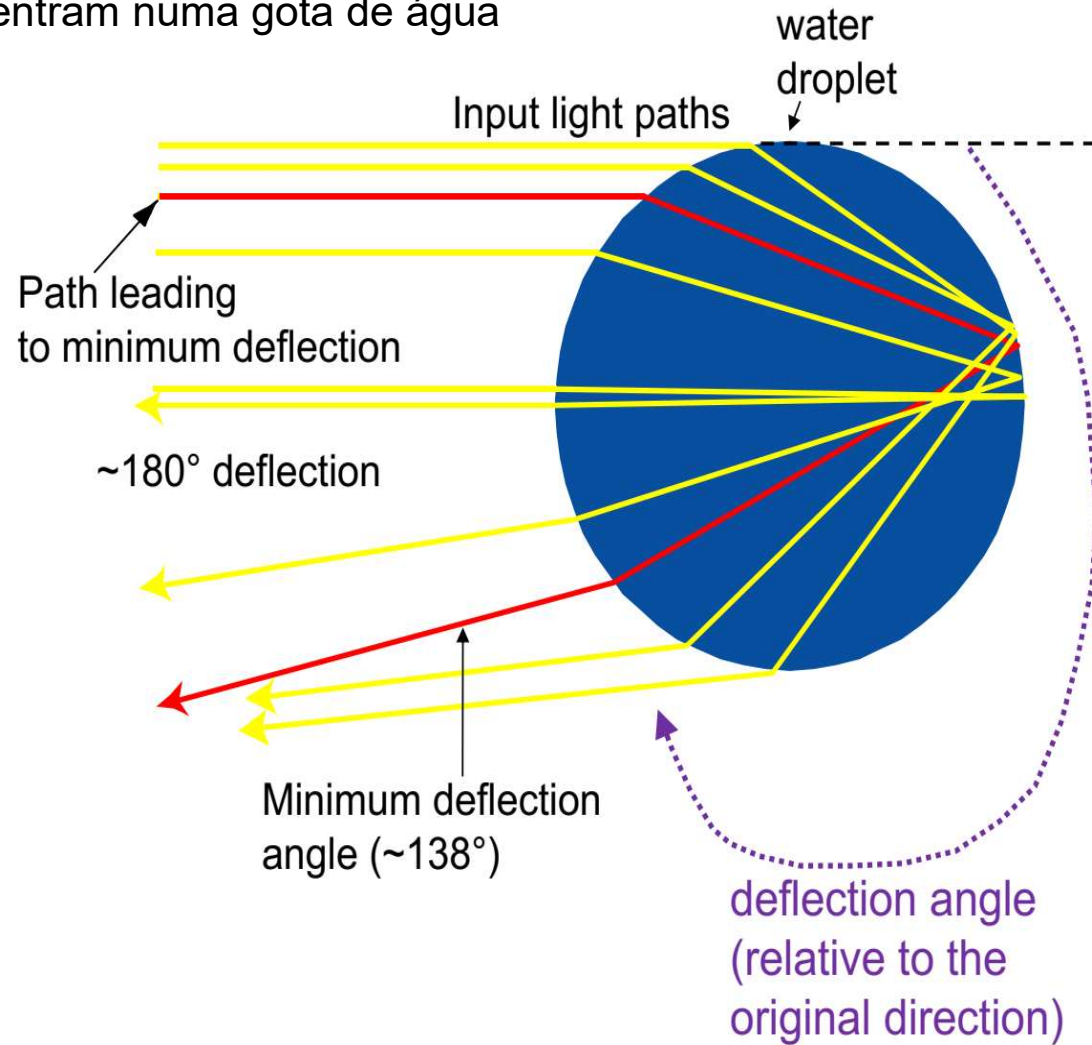


A lua não tem uma atmosfera



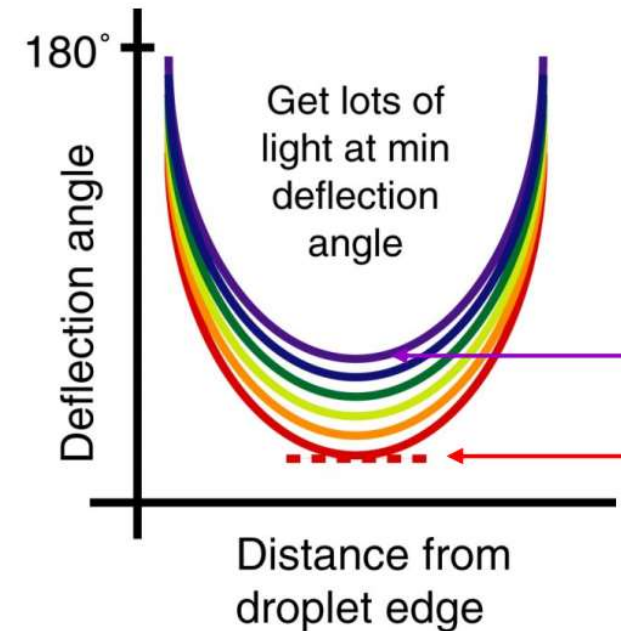
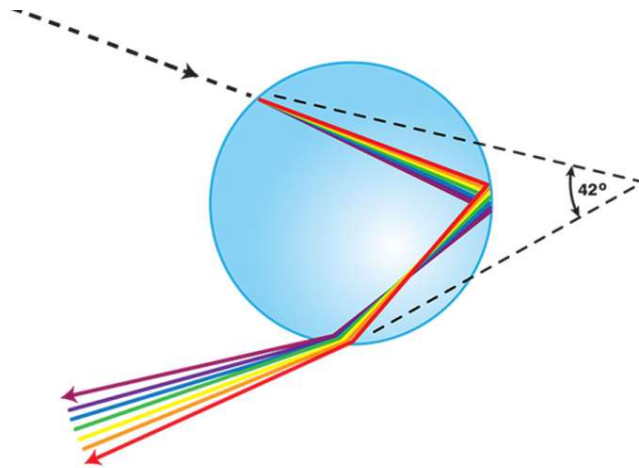
Arco-Íris (outro exemplo de dispersão incoerente)

Traçado dos raios que entram numa gota de água



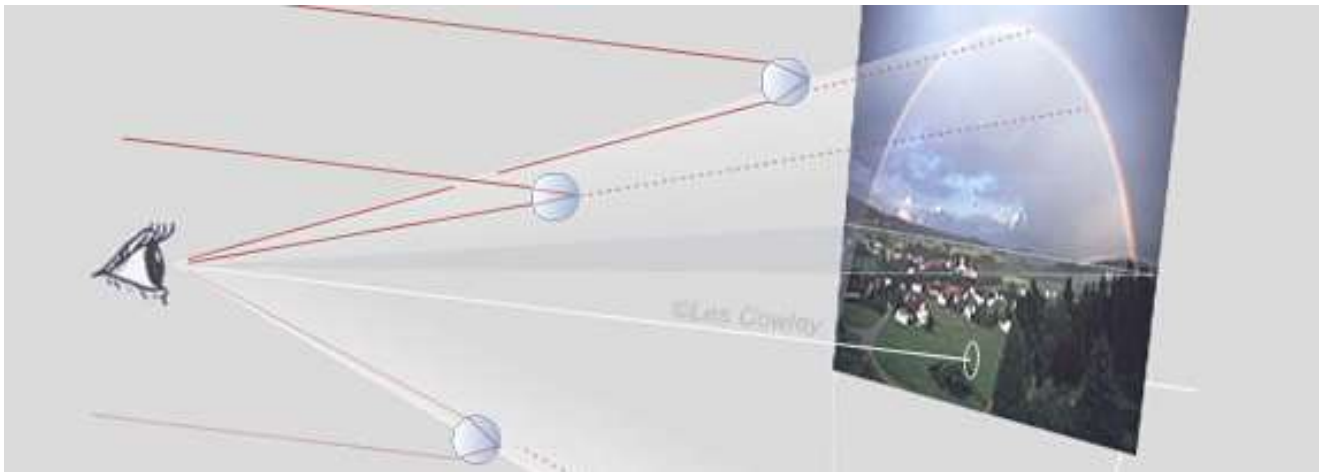
Arcos de Íris (outro exemplo de dispersão incoerente)

$n(\lambda)$ – os desvios mínimos das várias cores são diferentes



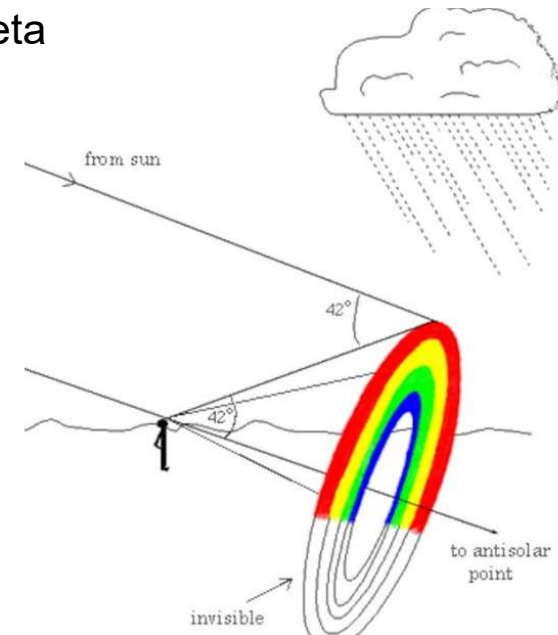
Variação do angulo de deflexão em função da distância do canto cima.

- Existe muita luz desviada perto do ângulo mínimo de desvio
- Variação de índice de refração separa as cores
- Muita luz (de todas as cores) é desviada para ângulos maiores – o céu a baixa do arco de íris é mais brilhante



Em princípio o arco de íris pode ser uma circunferência completa com um ângulo de abertura igual $180^\circ - 138^\circ = 42^\circ$

ângulo de desvio mínima



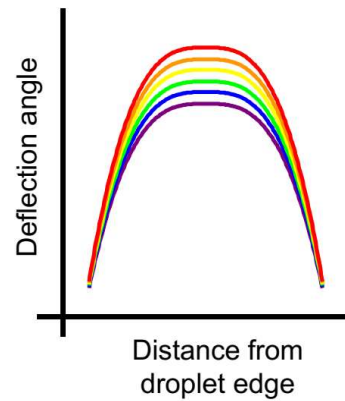
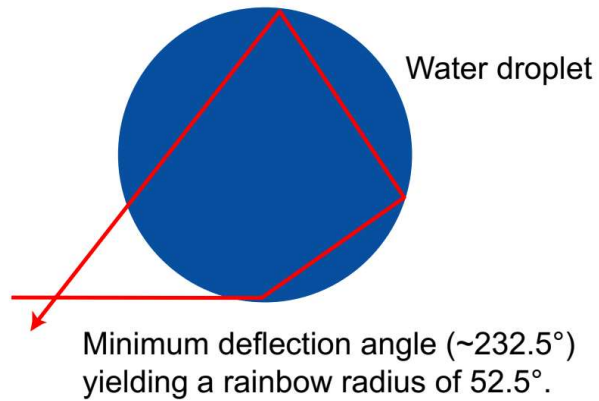
Duplo arco de Íris



Luz que entre na metade inferior da gota pode ser refletida 2 vezes.

O segundo arco íris é menos intenso e tem as cores invertidas.

Entre os 2 arcos existe uma banda escura.





Efeitos atmosféricos

