A satellite image of Earth showing the continent of South America and the surrounding Atlantic Ocean. The image is taken from a high angle, showing the curvature of the planet. The text is overlaid on the top right portion of the image.

Radiação eletromagnética na Atmosfera

Henrique M. J. Barbosa
Instituto de Física – USP
hbarbosa@if.usp.br

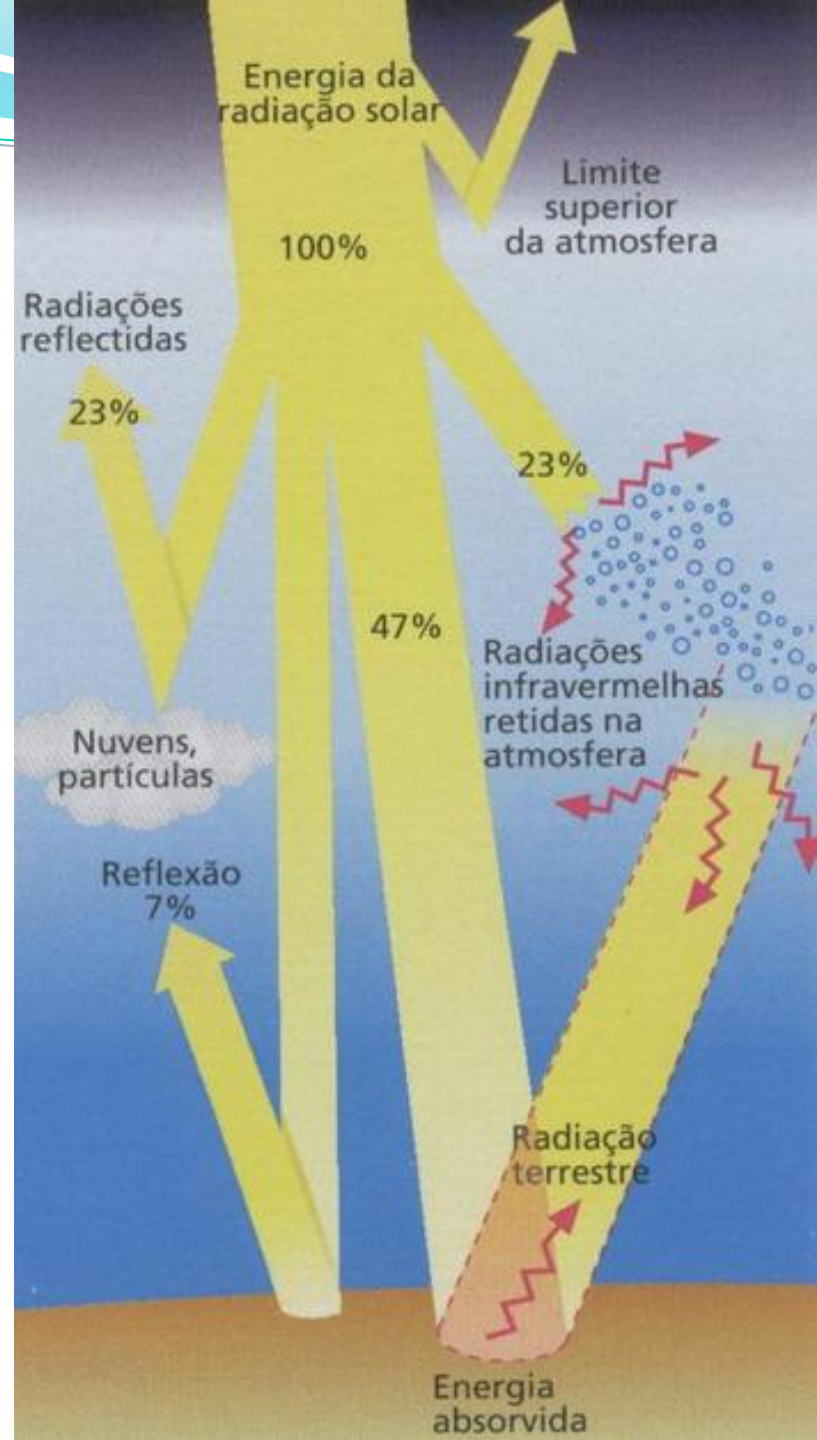
<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>



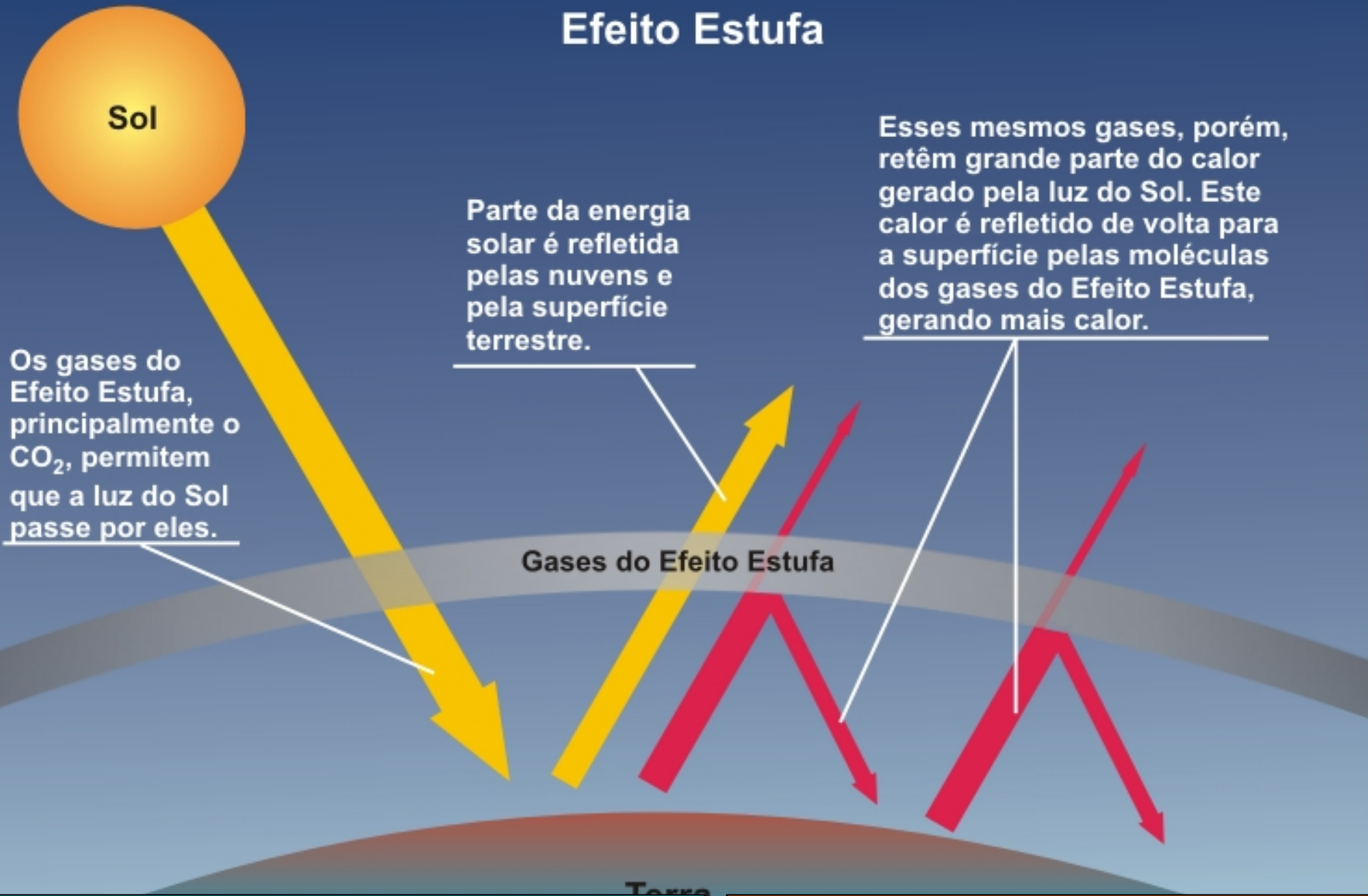
Sun-Earth Day 2008: Space Weather Around the World
sunearthday.nasa.gov

Energia do sol

- A energia é repartida:
 - 30% é refletida
 - 50% é abs na superfície
 - 20% é abs na atmosfera



Efeito Estufa

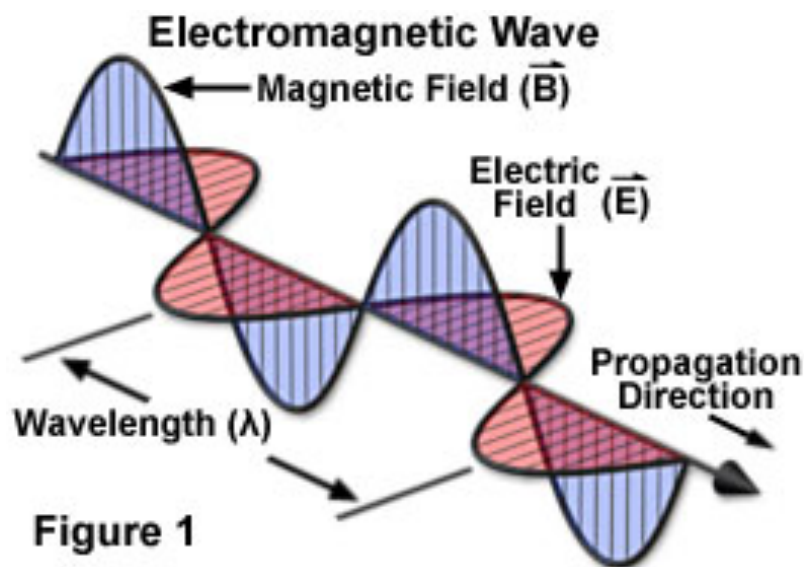


Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de apenas -18°C

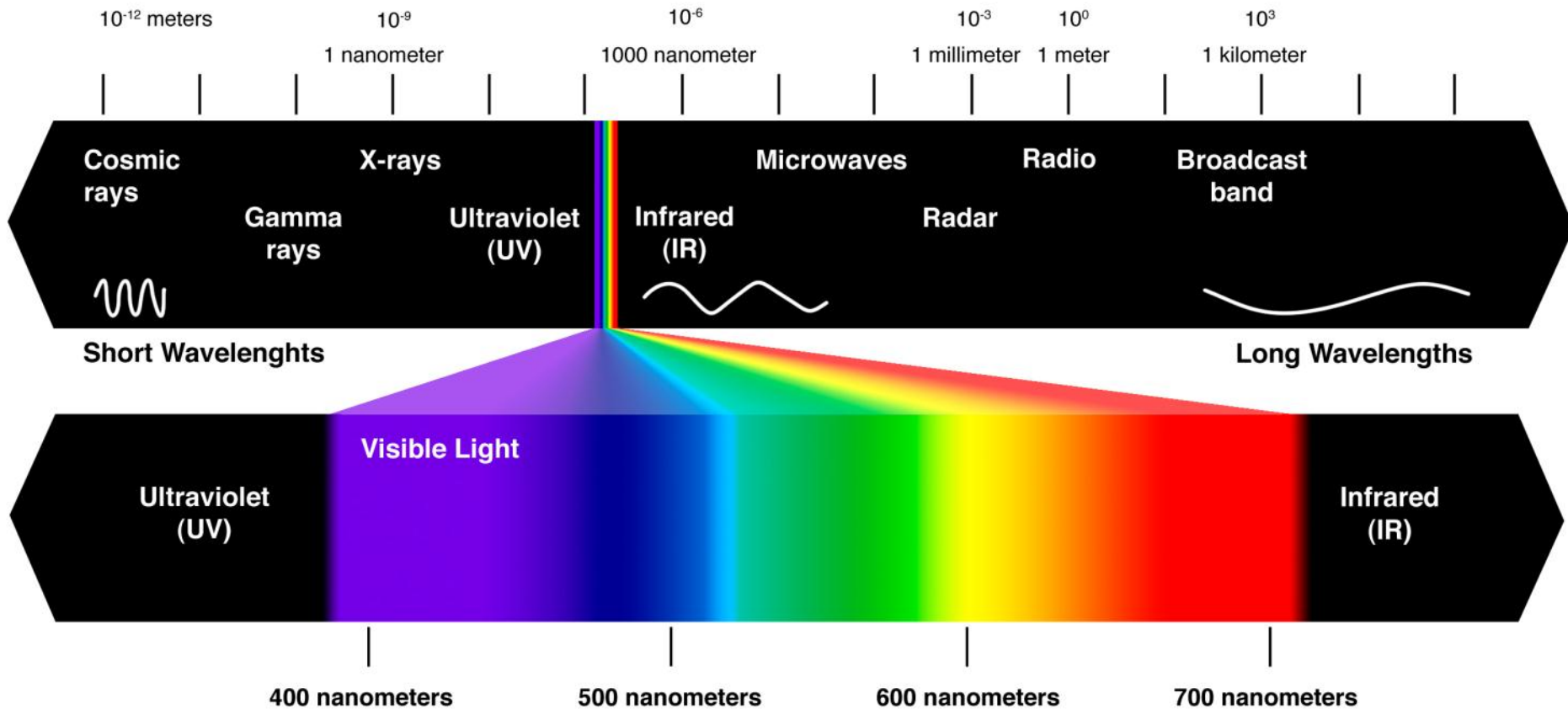
Com o efeito estufa, fica em torno de $+15^{\circ}\text{C}$

Radiação eletromagnética

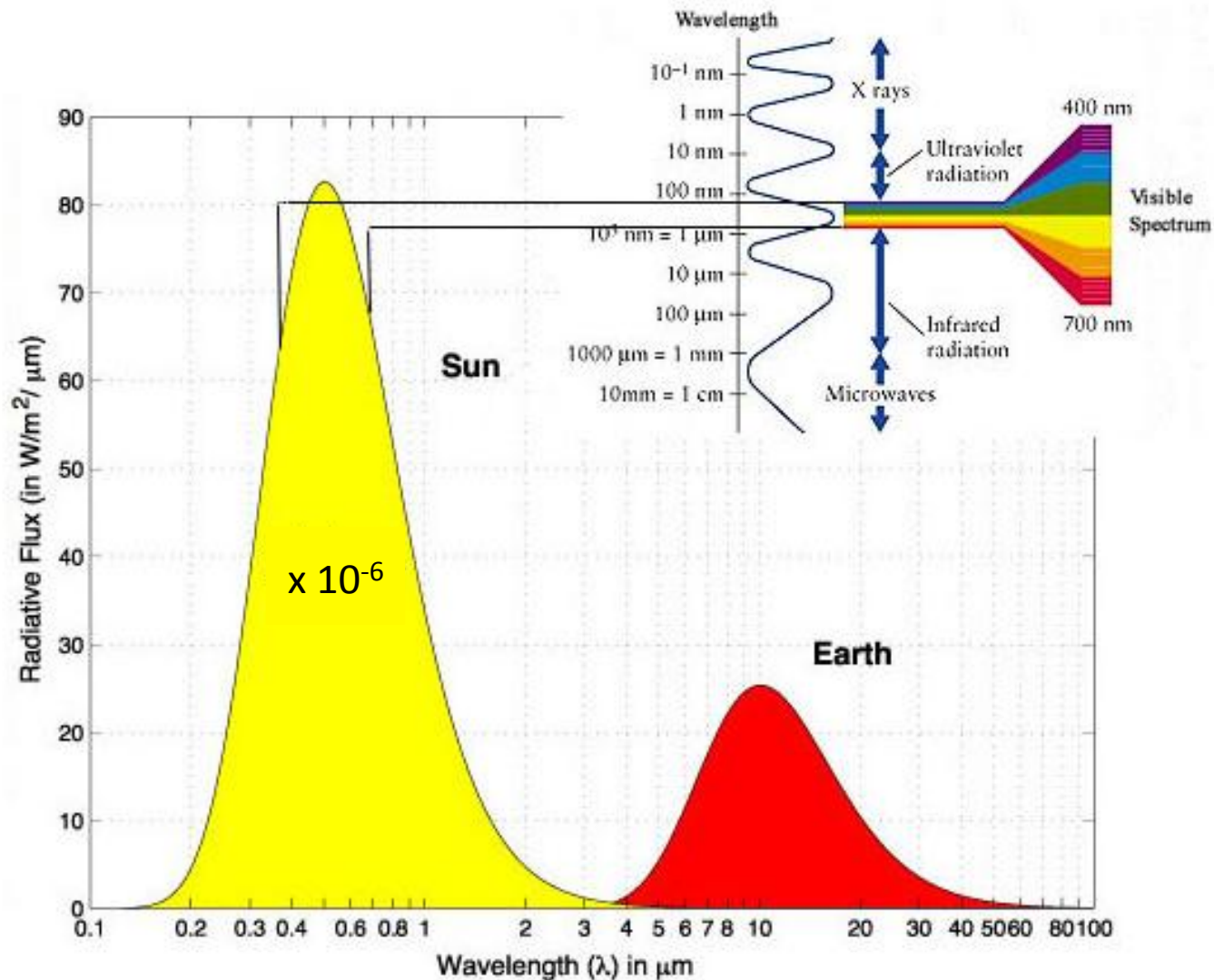
- É uma forma de energia emitida e absorvida por partículas carregadas e que se propaga no espaço como uma onda e como partícula ao mesmo tempo;
- É formada por um campo magnético e um campo elétrico que vibram em fase, perpendiculares entre si e a direção de propagação;
- A velocidade de propagação no vácuo é a constante e dada pela razão $E/B = c$



Espectro eletromagnético

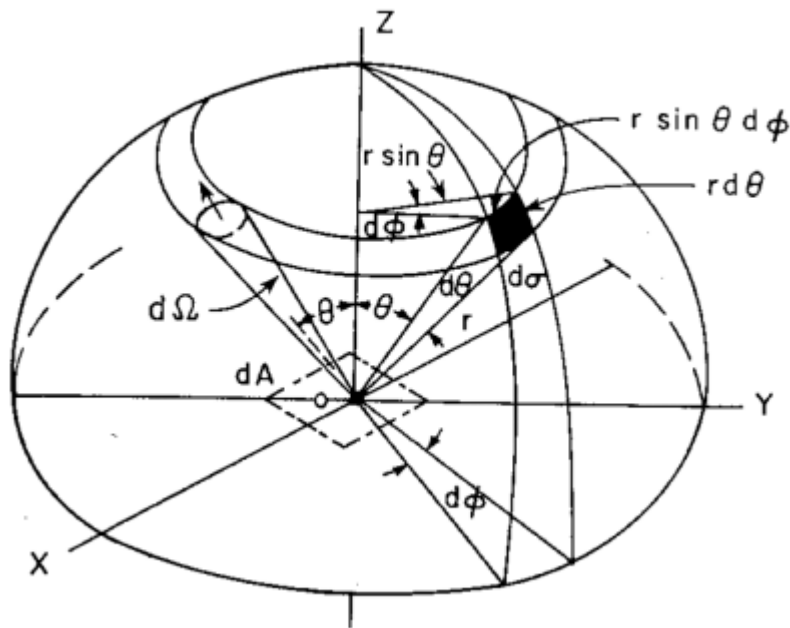


Espectro Solar e Terrestre



Intensidade ou radiância

- Energia radiante por tempo, por comprimento de onda, por ângulo sólido e por área perpendicular
 - Função da posição, direção, frequência e tempo



$$dI_{\lambda}(\vec{r}, \hat{n}, t) = \frac{dE_{\lambda}}{\cos \theta \cdot d\lambda \cdot da \cdot d\Omega \cdot dt}$$

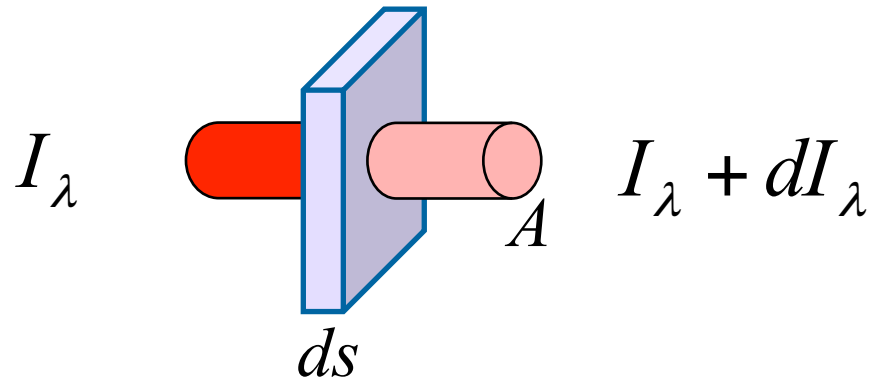
Unidades: $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$

Radiação na Atmosfera

- A extinção e a emissão são as principais interações da radiação com a atmosfera
- Extinção:
 - É um processo que diminui a quantidade de radiação. Pode ser devido a **absorção** ou **espalhamento**
 - **Absorção:** transforma energia E.M. em outra forma
 - **Espalhamento:** muda a direção de propagação
- Emissão:
 - É um processo que aumenta a quantidade de radiação.
 - Todo corpo com $T > 0K$ emite radiação
 - Pode haver radiação espalhada na direção do feixe

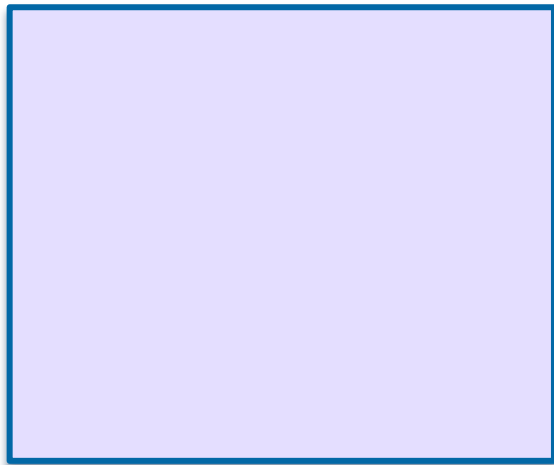
Extinção

- O processo de extinção é proporcional a intensidade da radiação e a quantidade de matéria

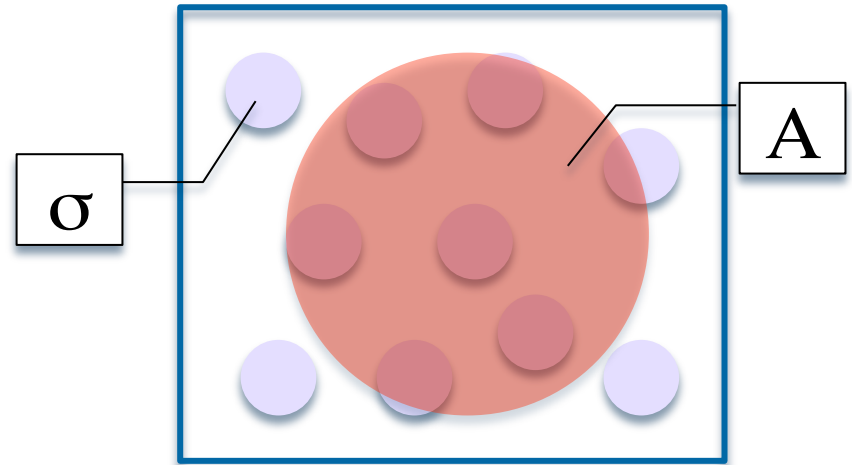


- Se ds é pequeno o suficiente, não há sobreposição entre os núcleos espalhadores (1 camada)

Light extinction



$ds \rightarrow \infty$



$ds \rightarrow 0$

- Portanto, a fração de fótons que sofre extinção é:

$$\frac{dI_{\lambda}}{I_{\lambda}} = - \frac{\sigma \cdot N A ds}{A}$$

$\left\{ \begin{array}{l} \sigma = \text{seção de choque} \\ N = \# / \text{volume} \\ N A ds = \# \end{array} \right.$

Extinção

- Portanto, em termos da seção de choque [m²], σ :

$$dI_{\lambda} = -\sigma N I_{\lambda} ds$$

- Ou do coeficiente de extinção volumétrico [1/m], α :

$$dI_{\lambda} = -\alpha I_{\lambda} ds$$

- Ou do coeficiente de extinção molar [m²/mol], ϵ :

$$dI_{\lambda} = -\epsilon c I_{\lambda} ds \quad c = \text{Concentração Molar}$$

Extinção ao longo da trajetória

- Resolvendo a equação diferencial, encontramos:

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(s_0) \exp \left[- \underbrace{\int_{s_0}^s \alpha(\lambda, s') ds'} \right]$$

- E se há vários tipos de partículas diferentes:

$$I_{\lambda}(s) = I_{\lambda}(s_0) \exp \left[- \underbrace{\sum_i \int_{s_0}^s \alpha_i(\lambda, s') ds'}_{\tau(s_0, s)} \right]$$

Lei de Beer-Bouguer-Lambert

$$I = I_0 e^{-\tau}$$

- **Wikipedia** - *This law was discovered by Pierre Bouguer before 1729 and it is often (mis)attributed to Johann Heinrich Lambert, who cited Bouguer's “Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumiere” (Claude Jombert, Paris, 1729), and even quoted from it, in his “Photometria” in 1760. Much later, August Beer extended the exponential absorption law in 1852 to include the concentration of solutions in the absorption coefficient.*

$$dI_\lambda / I_\lambda \propto ds$$

Bouguer

$$dI_\lambda / I_\lambda \propto \text{Concentração molar}$$

Beer

Emissão de radiação

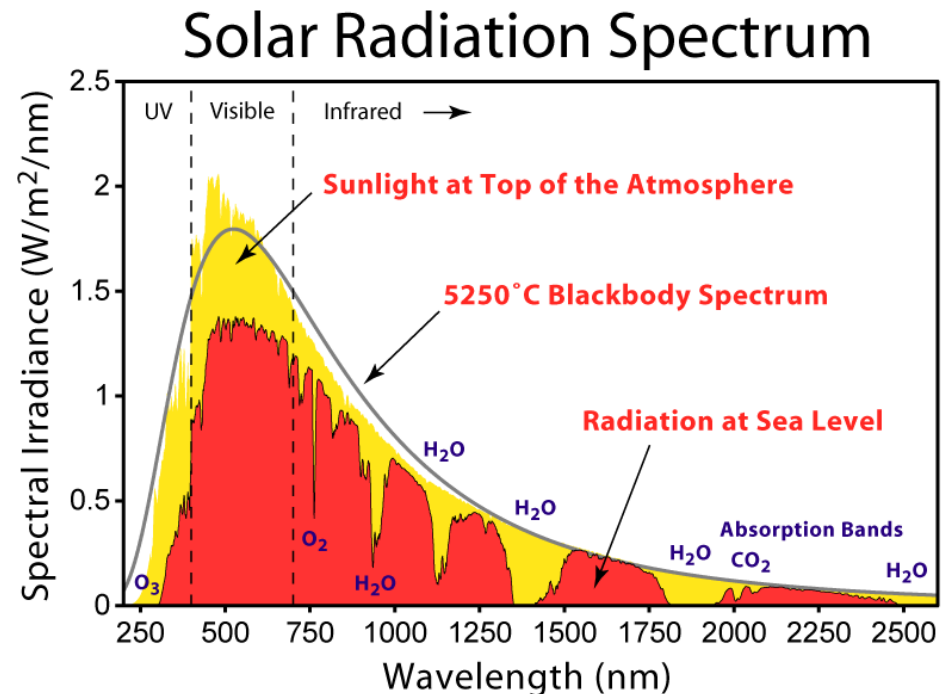
- A função de Planck explica a intensidade (**radiância**) emitida por um corpo negro (**ideal**):

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left(e^{hc/kT\lambda} - 1 \right)}$$

Unidades: $W\ m^{-2}\ sr^{-1}\ m^{-1}$

No caso não ideal, há a emissividade:

$$B_{\lambda}^{\text{cinza}} = B_{\lambda}^{\text{negro}} \cdot \epsilon$$



Stefan-Boltzmann law

- Integrando sobre todos os comprimentos de onda, encontramos a potência total emitida pelo corpo negro, que é a lei de radiação de Stefan-Boltzmann :

$$P_{emitida} = \int_0^{\infty} B_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

- Onde $\sigma = 5.671 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann

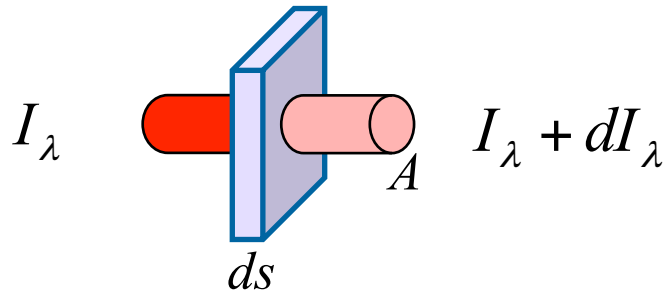
Lei de Kirchoff

- A lei de Kirchoff diz que, se um corpo está em equilíbrio em equilíbrio termodinâmico, então:

Emissividade = Absortividade

- Portanto a **radiância** devido ao processo de emissão térmica tem a mesma constante α :

$$dI_{\lambda} = +\alpha B_{\lambda} ds$$



Equação de Schwarzschild

- A equação de transferência radiativa é simplesmente a lei de beer-lambert, considerando a emissão:

$$dI_\lambda = -\alpha I_\lambda ds + \alpha B_\lambda ds \quad \rightarrow \quad \frac{dI_\lambda}{\alpha ds} = -I_\lambda + B_\lambda$$

- E a nossa solução original... **fica mais complicada:**

$$I_\lambda(s) = I_\lambda(s_0)e^{-\tau(s_0,s)} + \int_0^{\tau(s_0,s)} B_\lambda e^{-\tau'} d\tau'$$

- A equação de Schwarzschild descreve a transferência de radiação em um meio não espalhador (e.g. Sensoriamento remoto no IR termal).

Espalhamento x Absorção

- Devemos lembrar que a luz pode ser extinta por dois processos:

$$\alpha_{total} = \alpha_{abs} + \alpha_{esp}$$

- ... E que a lei de Kirchoff's diz que $\alpha_{abs} = \alpha_{emis}$, portanto a equação de transferência radiativa completa será:

$$dI_{\lambda} = -\alpha_{esp} I_{\lambda} ds - \alpha_{abs} I_{\lambda} ds + \alpha_{abs} B_{\lambda} ds$$

Observação 1

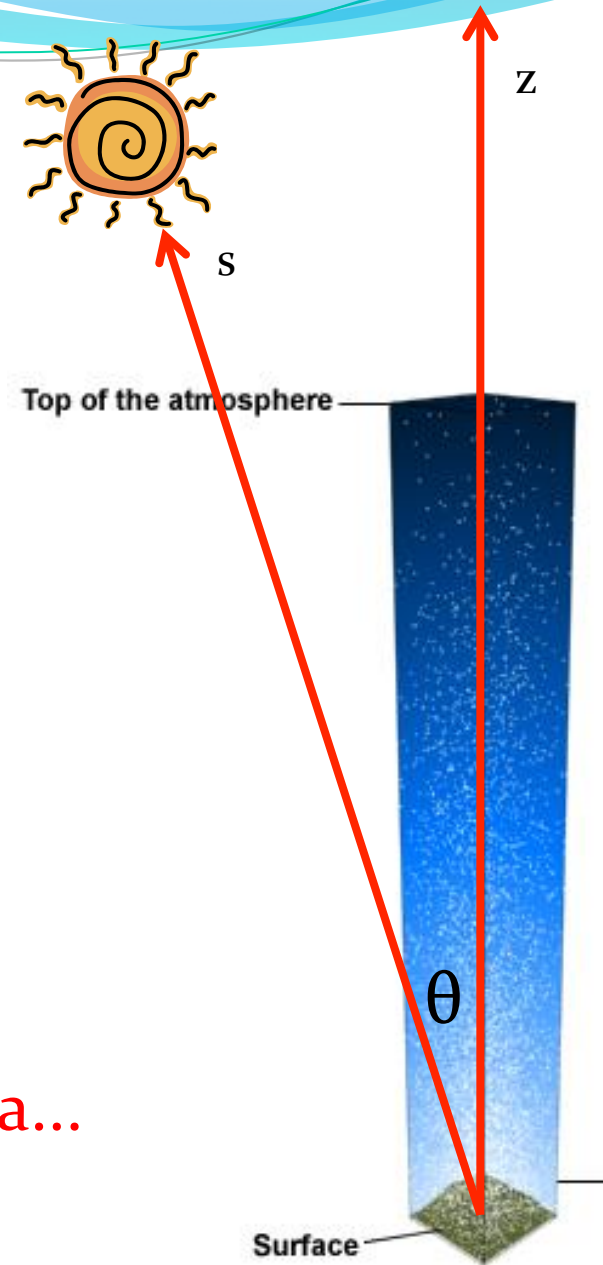
- Se a direção de propagação (s) não for a vertical (z), aproximamos:

$$\frac{dI_\lambda}{\alpha ds} = -I_\lambda + B_\lambda$$



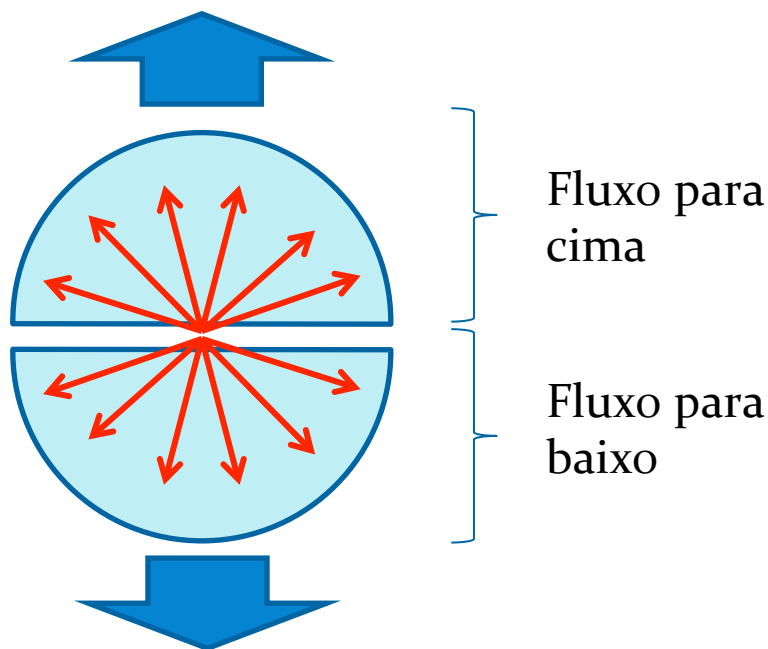
$$\cos(\theta) \frac{dI_\lambda}{\alpha dz} = -I_\lambda + B_\lambda$$

E a solução fica ainda mais complicada...

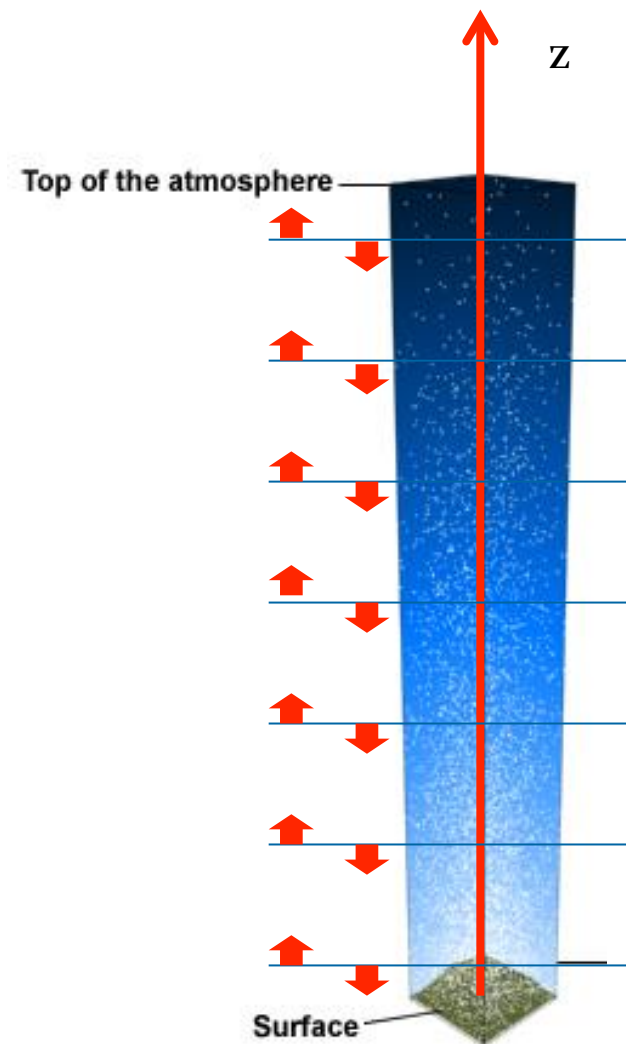


Observação 2

- Na aproximação de atmosfera plano paralela, temos que considerar toda a radiância em uma direção:

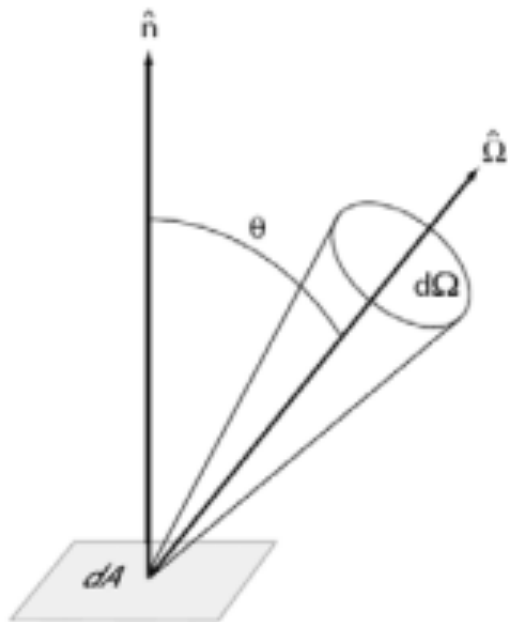


$$\cos(\theta) \times \text{Sun}$$



Fluxo ou irradiância

- Energia radiante por tempo, por comprimento de onda, por área perpendicular
 - Integral da radiância em um certo ângulo sólido



$$F_{\lambda} = \int_{\Omega} I_{\lambda} \cos(\theta) d\Omega$$

$$F_{\lambda} = \frac{dE_{\lambda}}{d\lambda \cdot da \cdot dt}$$

Unidades: $\text{W m}^{-2} \text{m}^{-1}$

Fluxo hemisférico

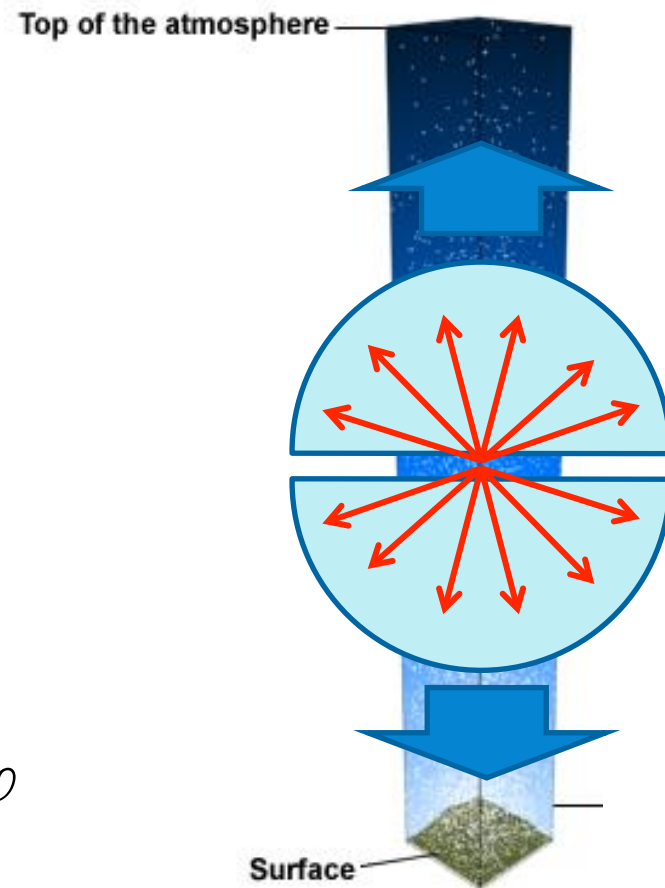
- Integrando o hemisfério superior (fluxo para cima) ou inferior (fluxo para baixo):

- Para cima:

$$F_{\lambda}^{\uparrow} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda}(\theta, \varphi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi$$

- Para baixo:

$$F_{\lambda}^{\downarrow} = - \int_0^{2\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} I_{\lambda}(\theta, \varphi) \cos(\theta) \sin(\theta) d\theta d\varphi$$



Fluxos Não-monocromáticos

- Radiação de onda curta incidente na superfície:

$$SW_{sfc}^{\downarrow} = \int_{100\text{ nm}}^{4\text{ }\mu\text{m}} F_{\lambda}^{\downarrow}(sfc) d\lambda$$

- Radiação de onda longa emergente:

$$LW_{top}^{\uparrow} = \int_{4\text{ }\mu\text{m}}^{100\text{ }\mu\text{m}} F_{\lambda}^{\uparrow}(top) d\lambda$$

- Radiação PAR:

$$PAR = \int_{400\text{ nm}}^{700\text{ nm}} F_{\lambda}^{\downarrow}(sfc) d\lambda$$

Pontos para lembrar #1

- Já temos a equação de transferência radiativa...
- Já sabemos resolvê-la (ou quase)...

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)e^{-\tau_{total}}$$

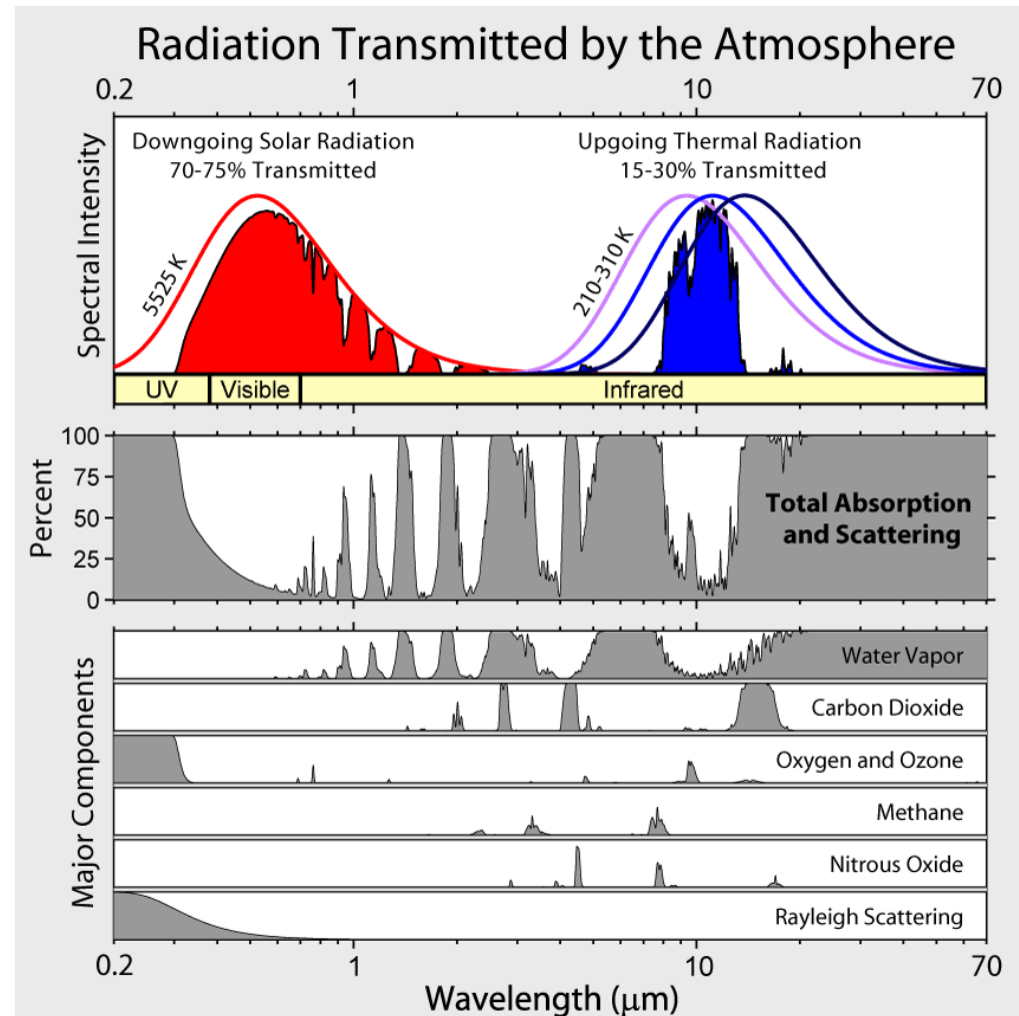
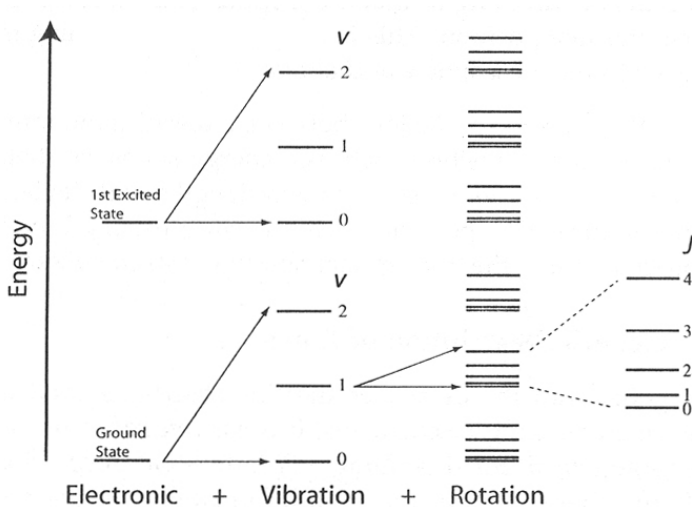
Mas de onde tiramos os coeficientes de absorção e espalhamento?

$$\tau_{total}(\lambda) = \sum_{k=species} \int_{s_0}^s \alpha_{total}^k(\lambda, s') ds'$$

$$\alpha = N\sigma \Rightarrow \sigma_{total} = \sigma_{abs} + \sigma_{scat}$$

Absorção gasosa

- Teoria e medidas em laboratório para determinar a absorção de cada constituinte



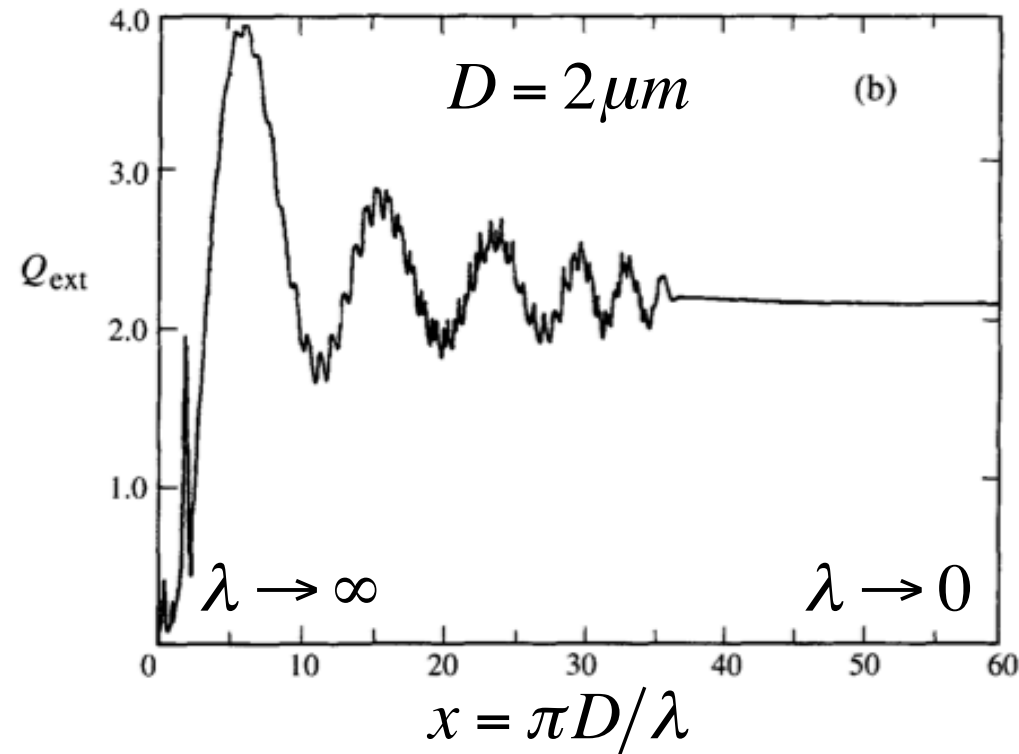
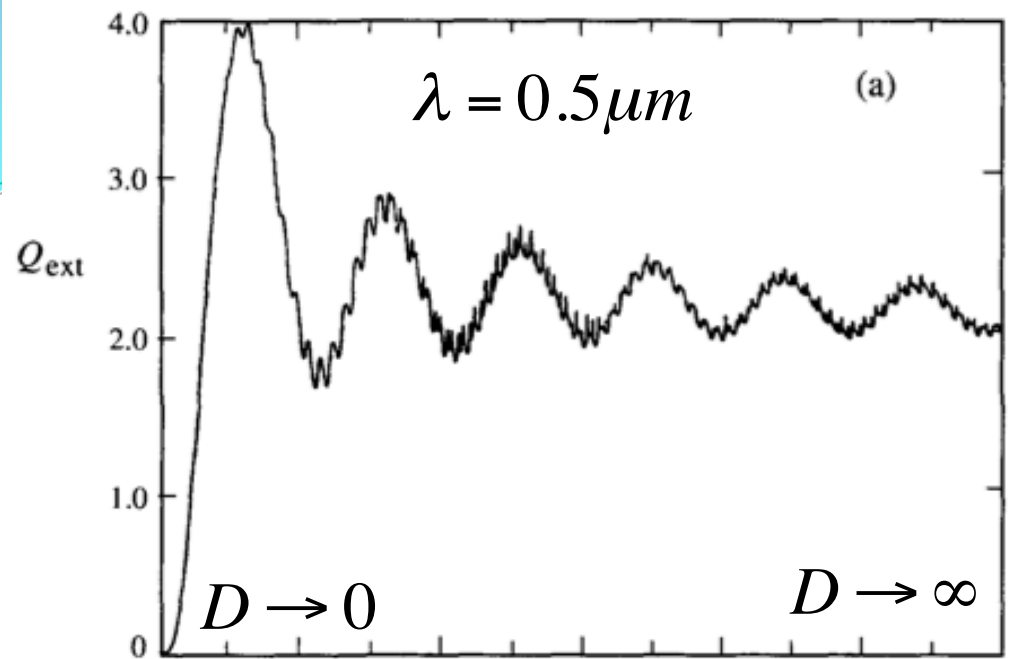
Extinção de luz

- **Absorção** e **espalhamento elástico** da luz por um objeto esférico é um problema clássico da física.
 - Os parâmetros que governam estes processos são:
 1. Comprimento de onda, λ
 2. Diâmetro da esfera, D
 3. Índice de refração,
- $x = \pi D / \lambda$
 $\tilde{n} = n + i\kappa$
- O formalismos matemático usado para resolver este problema é a **Teoria Mie**.

Teoria Mie

A teoria Mie permite calcular o espalhamento e a absorção da luz por uma esfera em função do comprimento de onda.

- Casos limites:
 - $\pi D/\lambda \ll 1$ Espalhamento **Rayleigh**
 - $Q_{\text{scat}} \sim \lambda^{-4}$ e $Q_{\text{abs}} \sim \lambda^{-1}$
 - $\pi D/\lambda \sim 1$ Espalhamento **Mie**
 - Q_{scat} e Q_{abs} variam muito com x e \tilde{n}
 - $\pi D/\lambda \gg 1$ Óptica geométrica
 - Reflexão, refração e difração

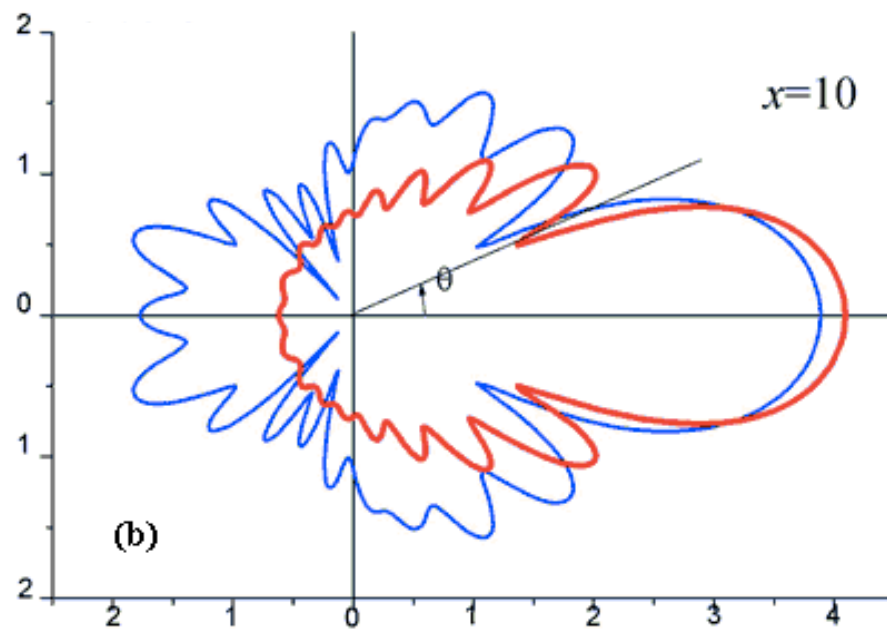
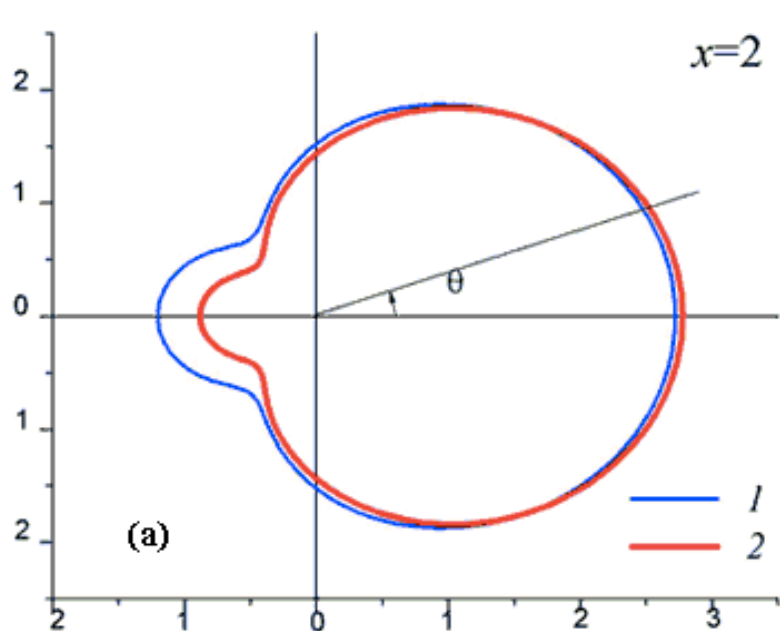


Ex: gotas

A eficiência de extinção é muito maior do que o que seria previsto pela óptica geométrica.

Função de fase

A distribuição angular da luz espalhada por uma partícula de certo tamanho é a **função de fase**:



$$\tilde{n} = 1.5 + i \cdot 0.005$$

$$\tilde{n} = 1.5 + i \cdot 0.2$$

Para lembrar #2

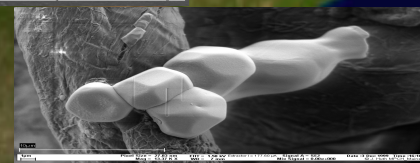
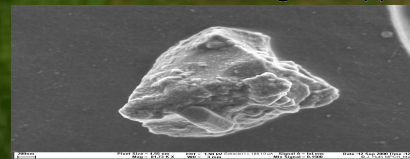
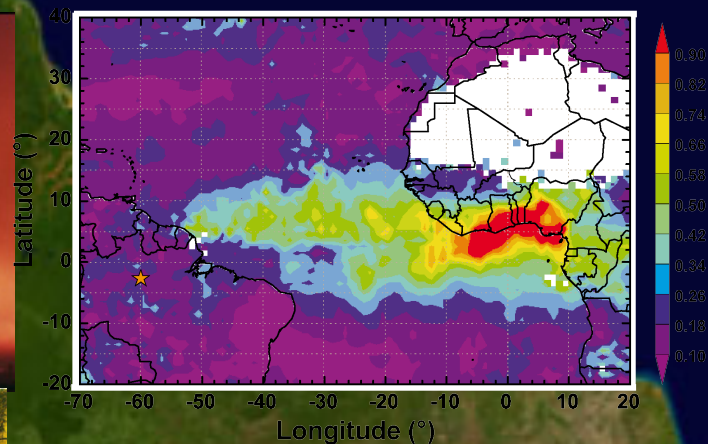
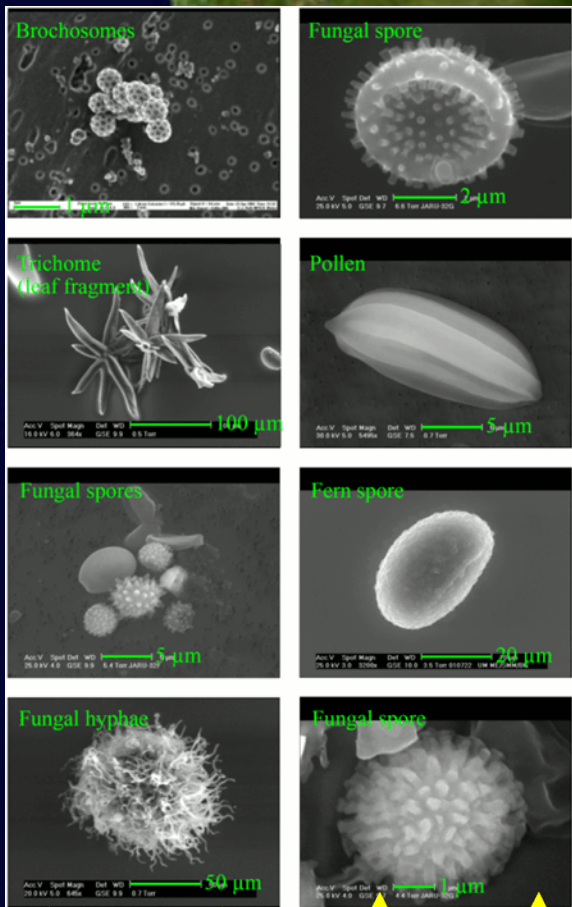
- A atmosfera contém
 - Moléculas (~ 0.1 a 0.5 nm)
 - Partículas de Aerossol (10 nm a $1\mu\text{m}$)
- Radiação Solar ~ 0.1 a $4\mu\text{m}$, dois tipos de espalhamento:
 - Moléculas tem $\pi D/\lambda \ll 1 \Rightarrow$ Rayleigh
 - Aerossóis tem $\pi D/\lambda \sim 1 \Rightarrow$ Mie
- O espalhamento Mie depende:
 - $\pi D/\lambda$
 - \tilde{n}
 - formato

Amazonia: 3 different types of aerosols

Biogenic (primary and SOA)

Biomass Burning

Dust from Sahara

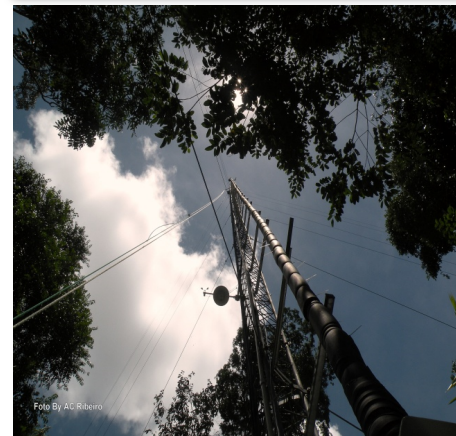


Each with VERY different properties and impacts

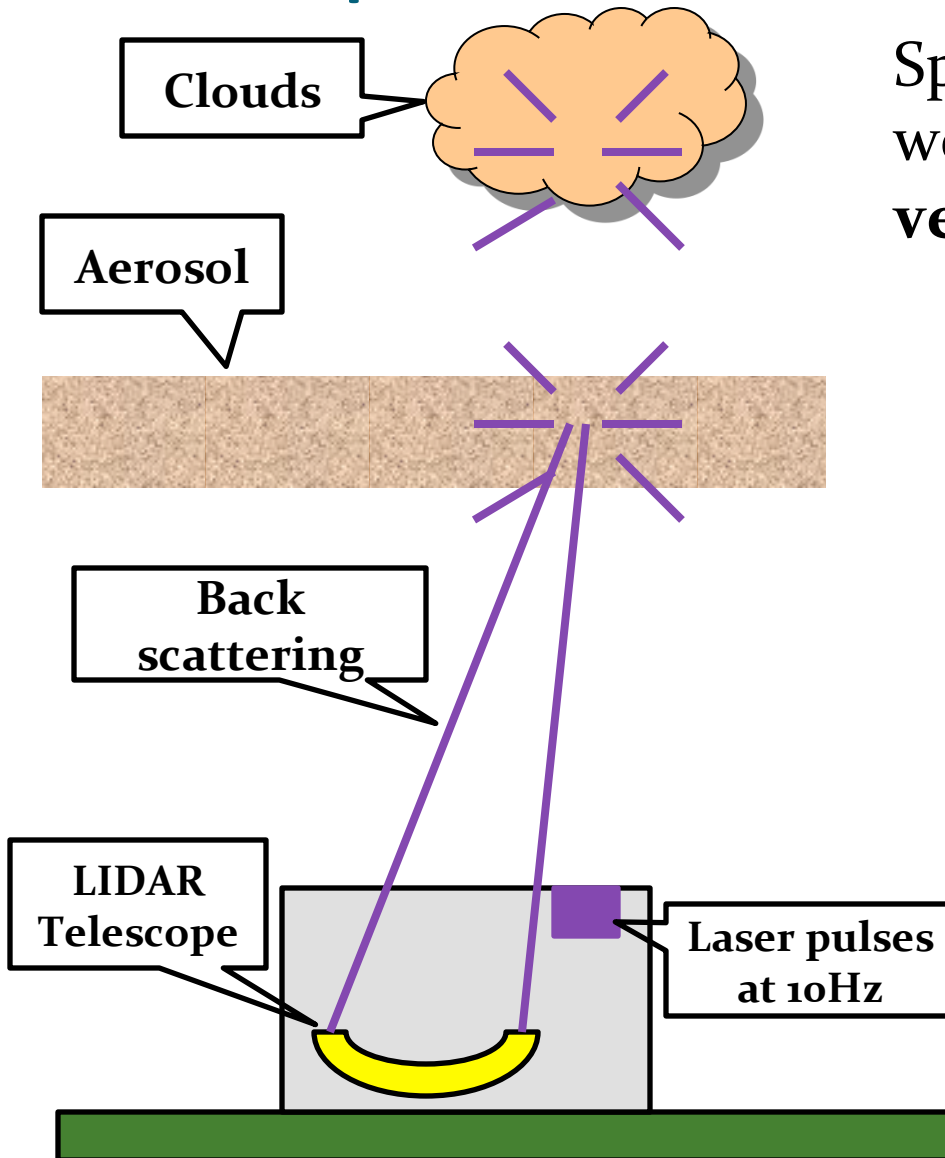
Espalhamento pelas partículas

- Medidas in-situ
 - SMPS, DMPS, Nephelometer, MAAP, TEOM, Aethalometer, etc...
- Sensoriamento remoto do chão
 - Fotômetros
 - Lidar
- Sensoriamento remoto do céu
 - Satélites

Medidas In-situ na Amazônia

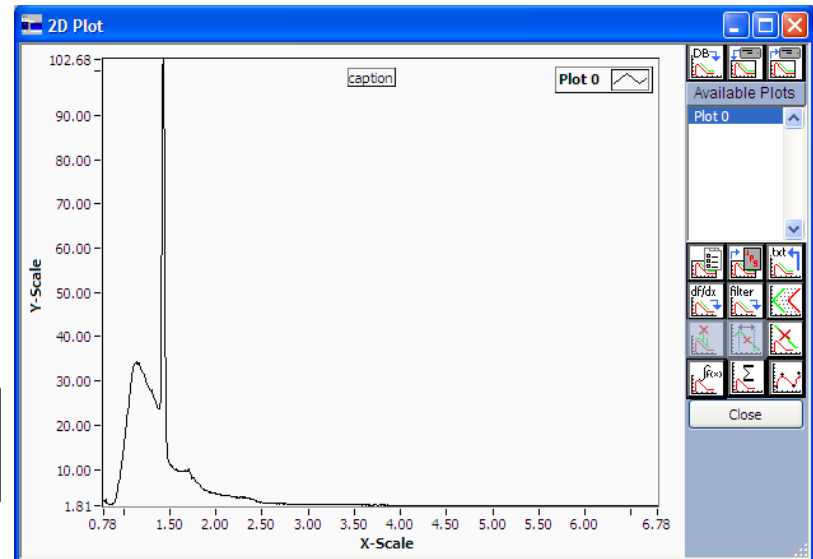


Exemplo: Lidar



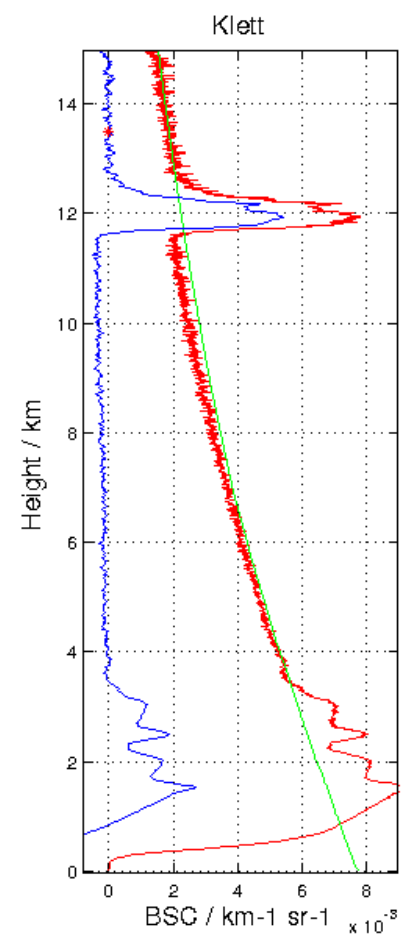
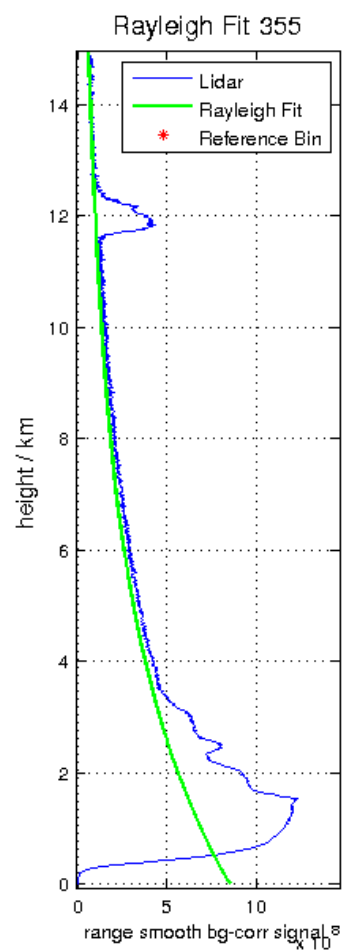
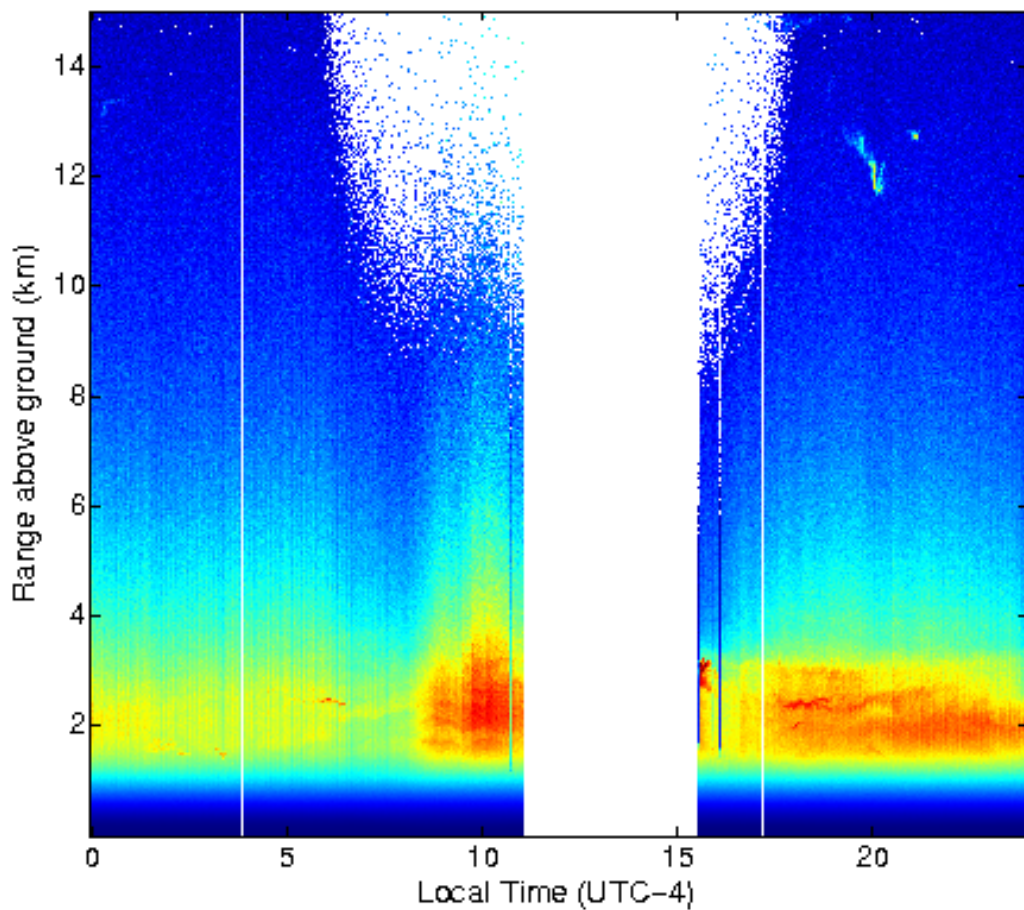
Speed of light is 3×10^8 m/s and we measure at 20Mhz, hence **vertical resolution is 7.5m**

We measure light intensity vs time

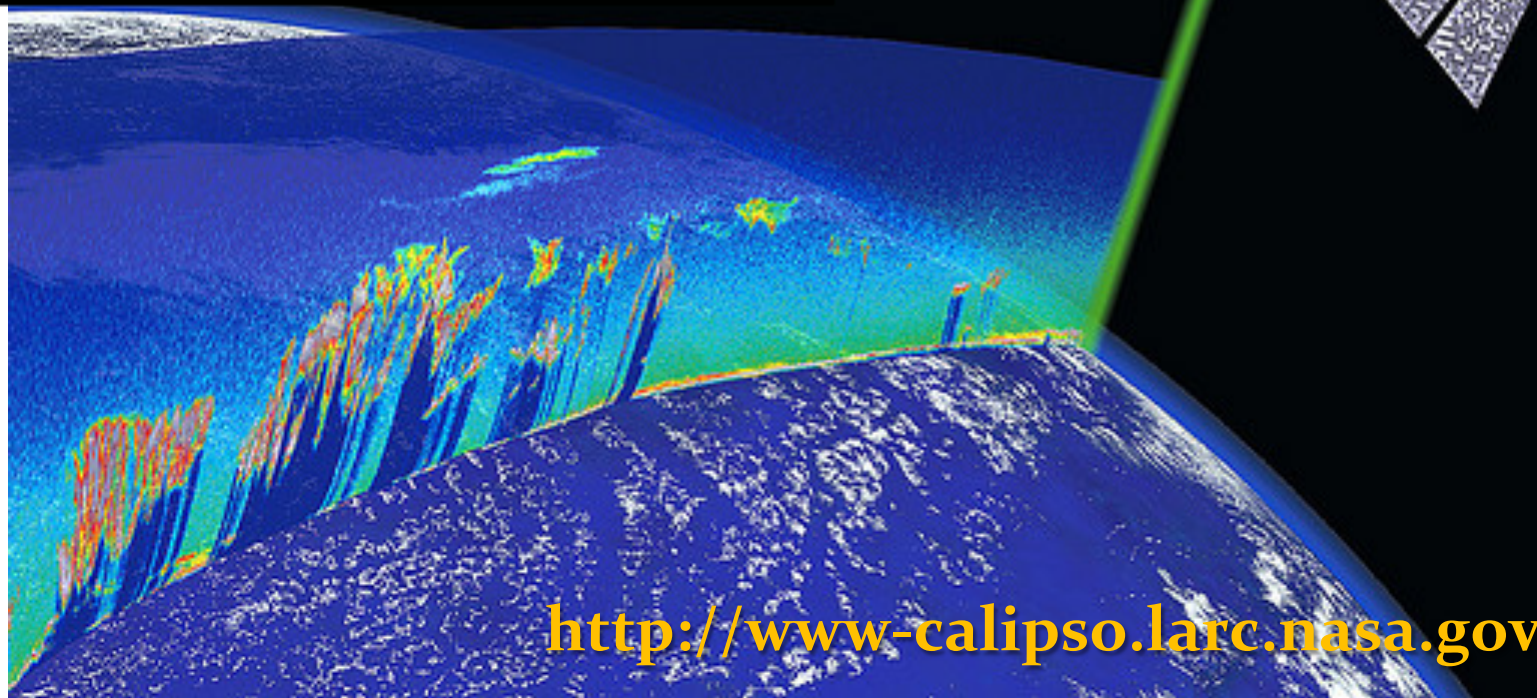
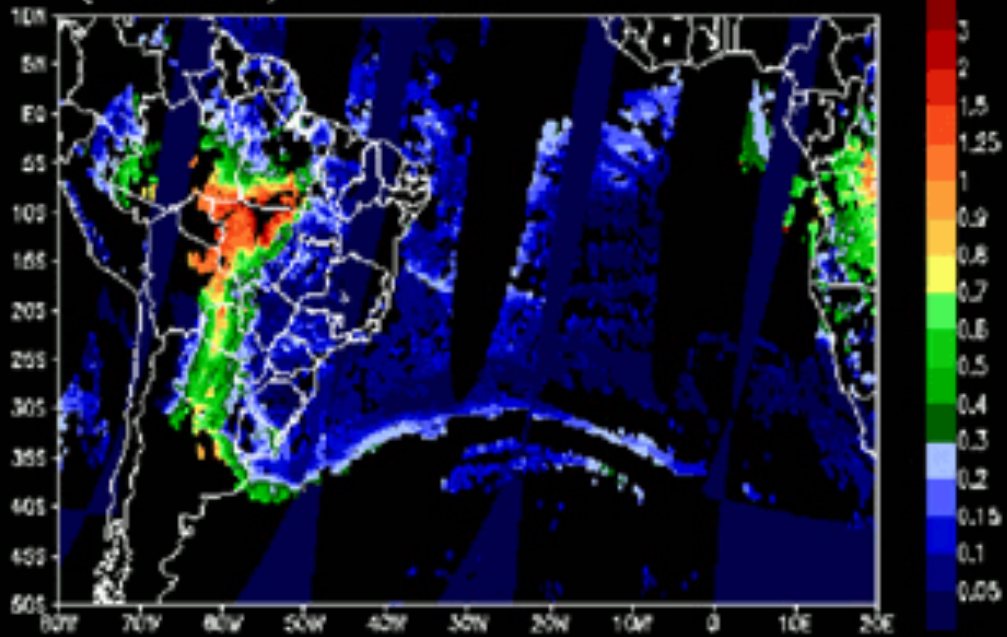


Exemplo: Lidar

Range and BG corrected signal [a.u.]
Elastic 355nm/PC 2011-08-31



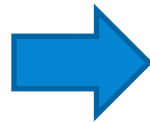
AOT (550 nm) MODIS MOD04-L2 27AGO2002



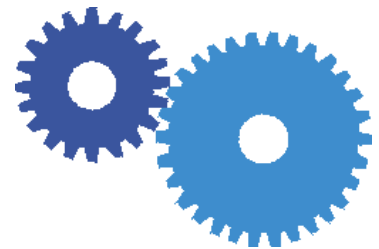
<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>

Ok. Quase lá....

- Já temos a equação de transferência radiativa...
- Já sabemos resolvê-la (ou quase)
- Já sabemos de onde vem os coeficientes de absorção e espalhamento



Compilador

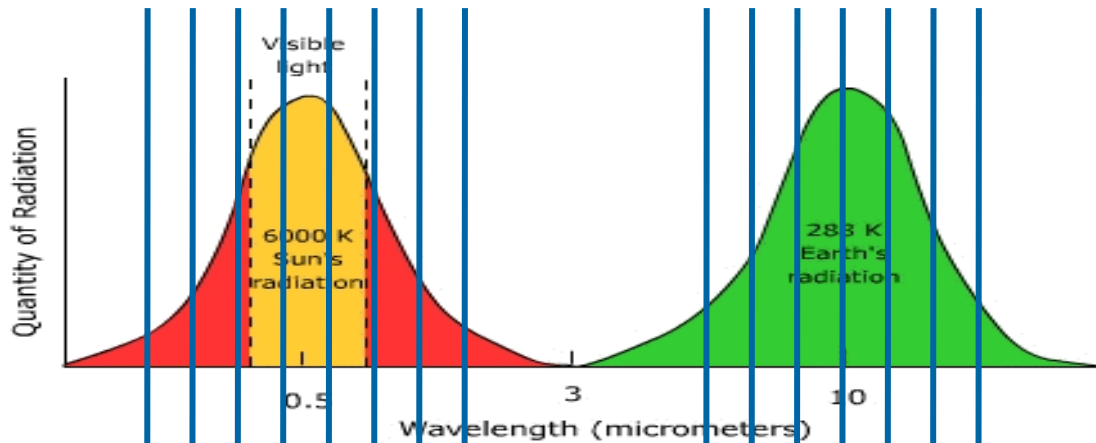


Código fonte:
um texto escrito em
uma linguagem de
programação

**Programa
executável:**
Linguagem de
máquina

Este programa resolve a equação...

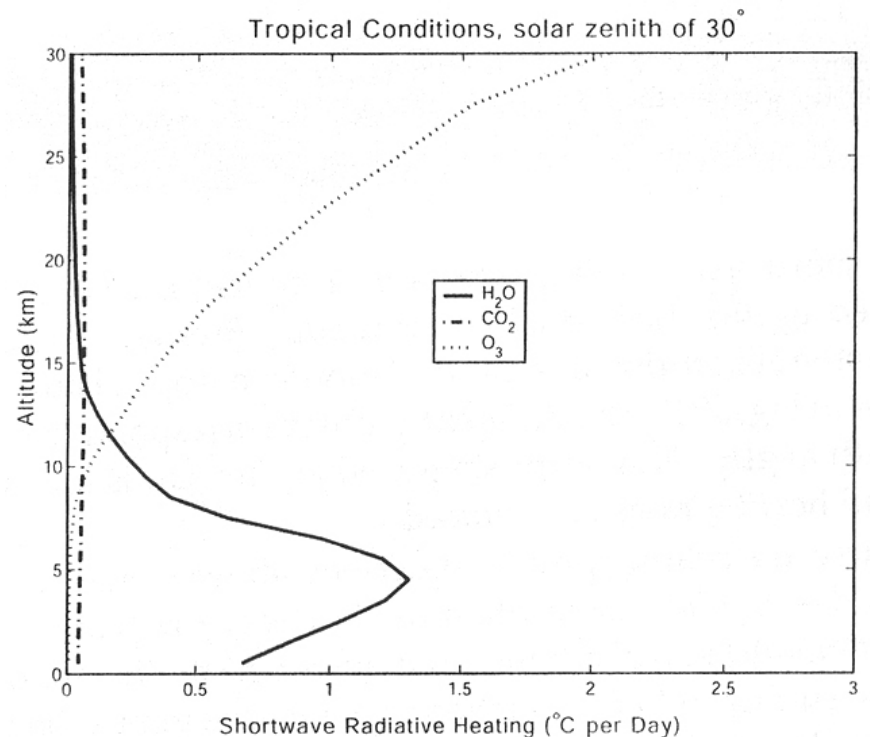
- Para cada comprimento de onda
 - Para cada gás
 - Para cada tipo de aerossol
 - Para cada tipo de nuvem



$$\tau(s_0, s) = \sum_{\text{constituente}} \sum_{\lambda} \int_{s_0}^s \alpha_{esp}(\lambda, s') + \alpha_{abs}(\lambda, s') ds'$$

Parametrização de radiação Off-Line

- Parametrização de radiação off-line é uma que não está rodando dentro de um modelo da atmosfera.
- Neste caso, todo o poder computacional pode ser usado apenas para a solução da equação de transferência radiativa
 - Portanto o programa pode dividir o espectro em muitos comprimentos de onda
- Modelos linha-a-linha (LAL) são o que há de mais preciso para calcular radiâncias, **mas existem incertezas experimentais:**
 - Precisão de 5% na intensidade e de 10% na espessura das linhas.



Parametrização de radiação em um modelo da atmosfera

Como parte de um modelo complexo, a radiação não pode gastar muito tempo! Assim, a integração é feita em faixas de comprimentos de onda (broad-band). Os resultados LBL são usados como validação.

O modelo fornece à parametrização:

Perfis verticais de:

- Temperatura
- Pressão
- Razão de mistura dos gases: H_2O , O_3 , CO_2 , O_2 , CH_4 , CFCs, ...
- Características das nuvens:
- Razão de mistura dos aerossóis

A parametrização devolve ao modelo:

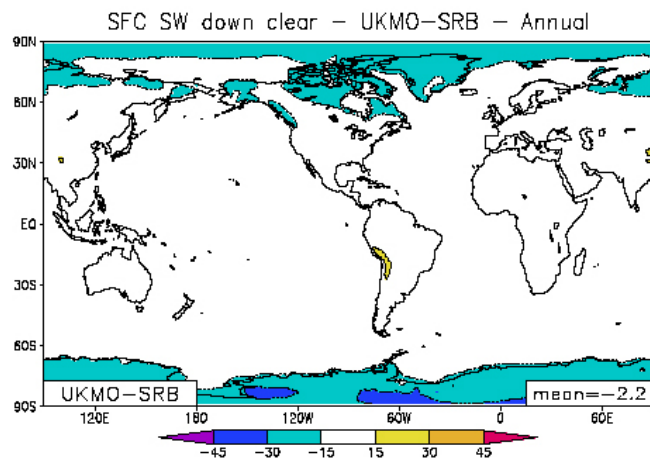
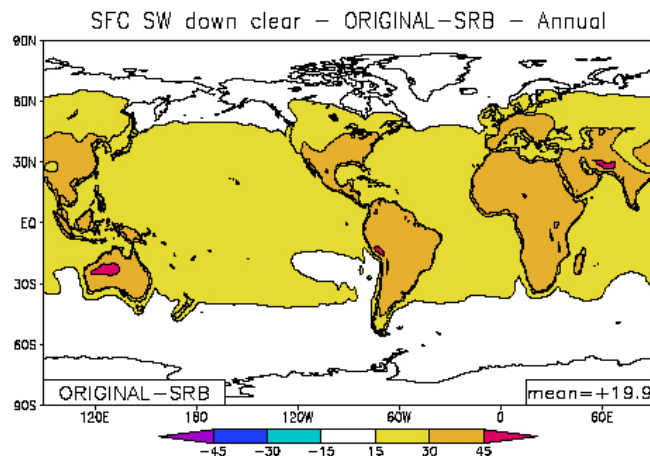
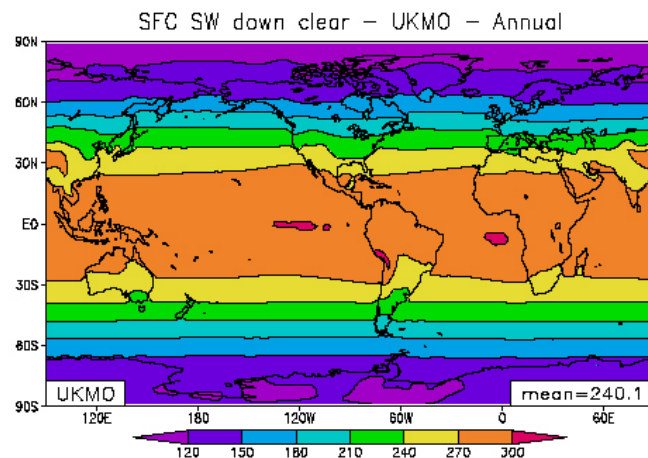
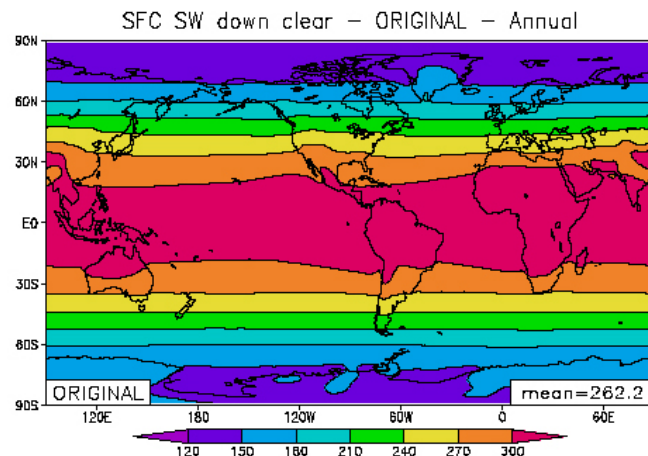
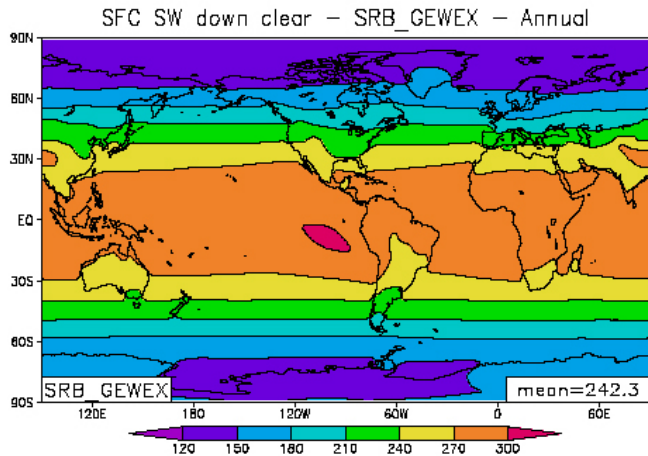
Fluxos de radiação (irradiância, W/m^2):

- no topo da atmosfera (up, down)
- na superfície (up, down)
(... que o modelo irá para forçar a parametrização de superfície)

Taxas de aquecimento radiativo:

- em cada camada
(... que o modelo usará no termo diabático da eq. da termodinâmica)

Exemplo: Edwards & Slingo (96) no modelo global do CPTEC-INPE SW – Down – SFC – Clear Sky





Solar Radiation Spectrum

