



Parametrização de Radiação em modelos Atmosféricos

Worketa 2016
São José dos Campos, 6/abr

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

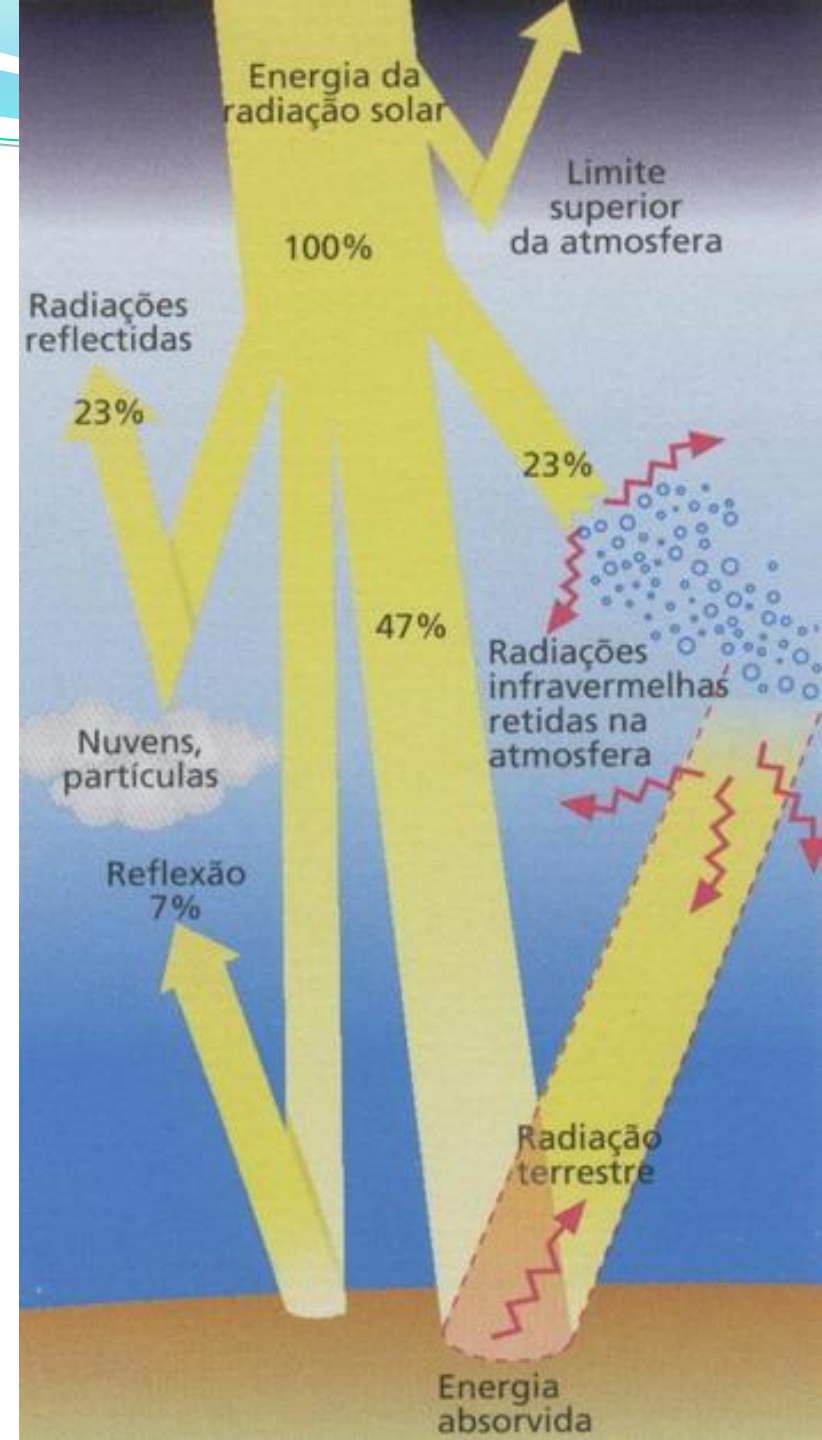
<http://www.fap.if.usp.br/~hbarbosa>



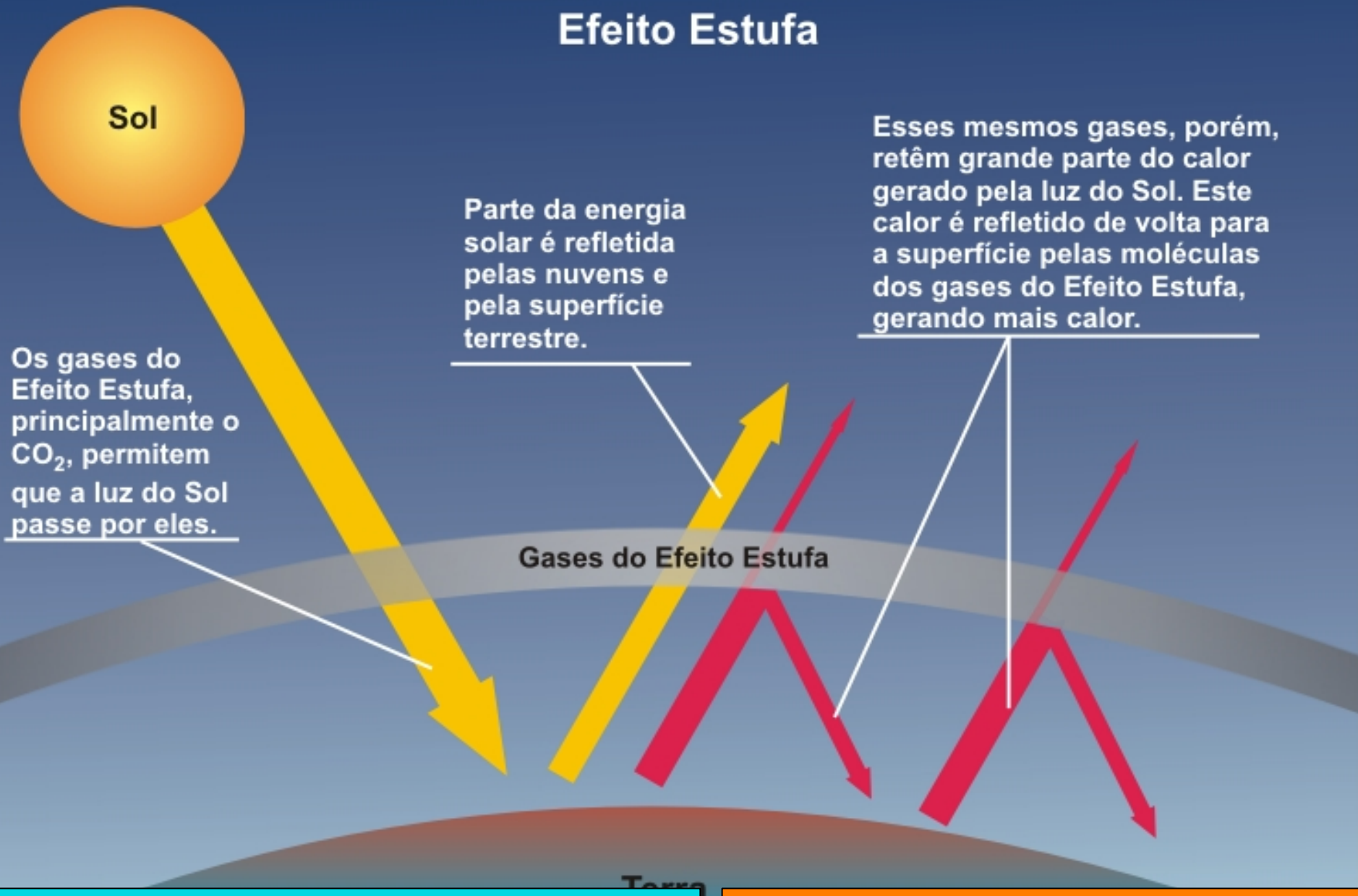
Sun-Earth Day 2008: Space Weather Around the World
sunearthday.nasa.gov

Energia do sol

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



Efeito Estufa

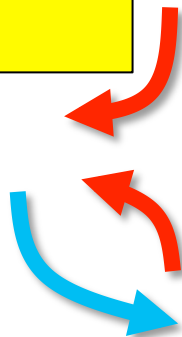


Sem o efeito estufa, a temperatura média seria de apenas -18°C

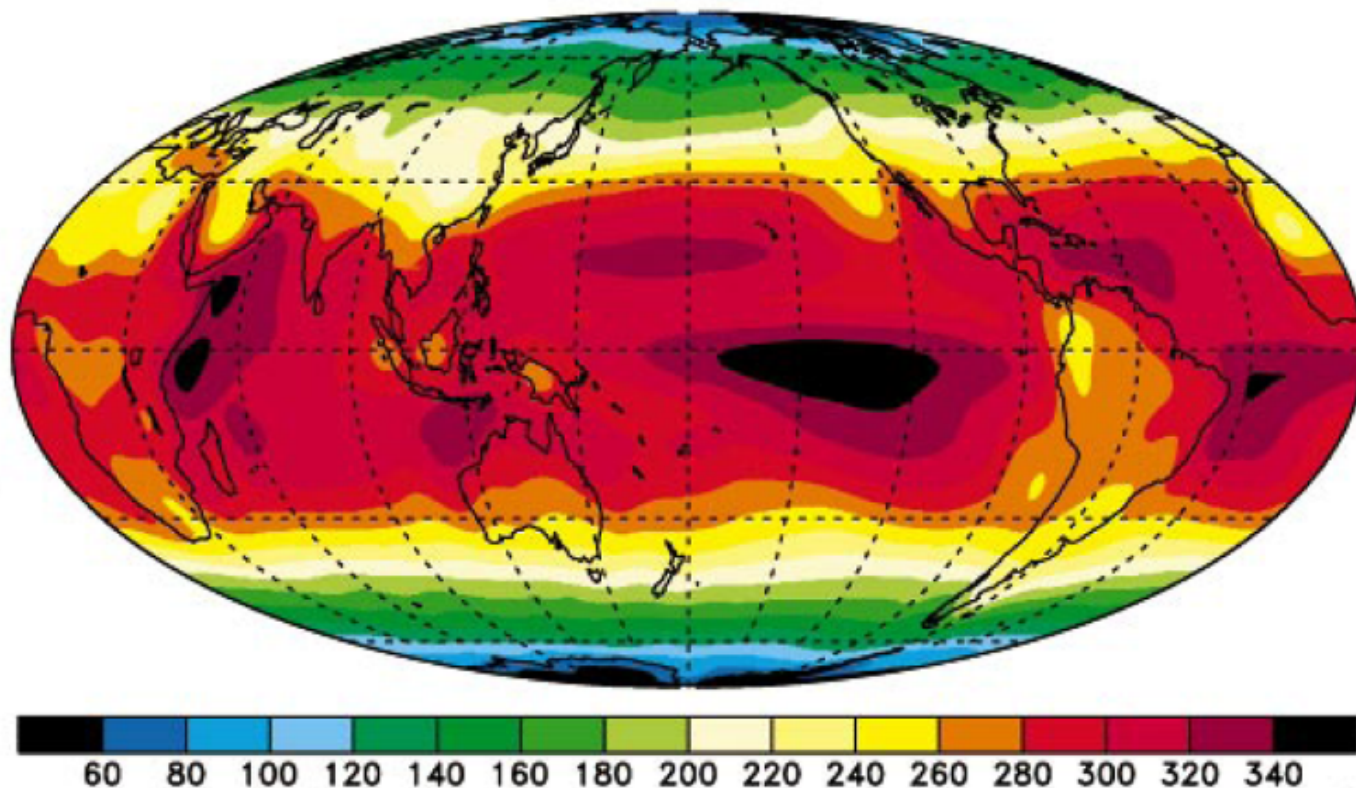
Com o efeito estufa, fica em torno de $+15^{\circ}\text{C}$

Distribuição da radiação

O ar quente
no equador
sobe

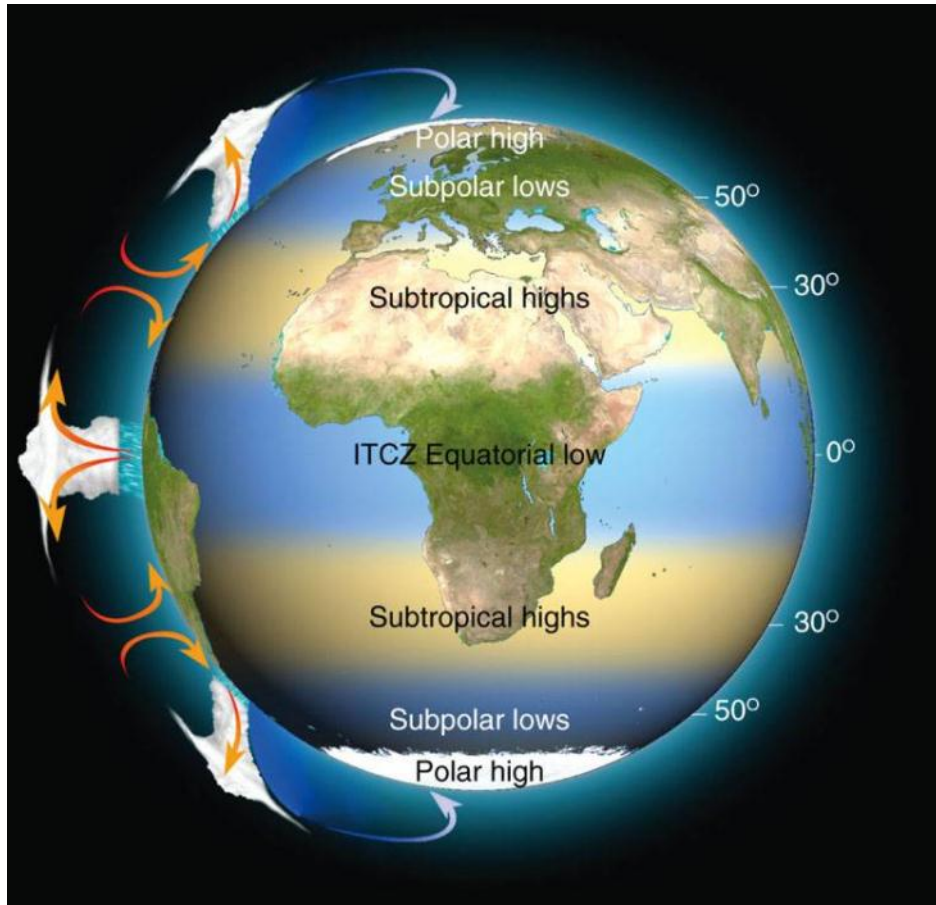


O ar frio desce
em latitudes
mais altas

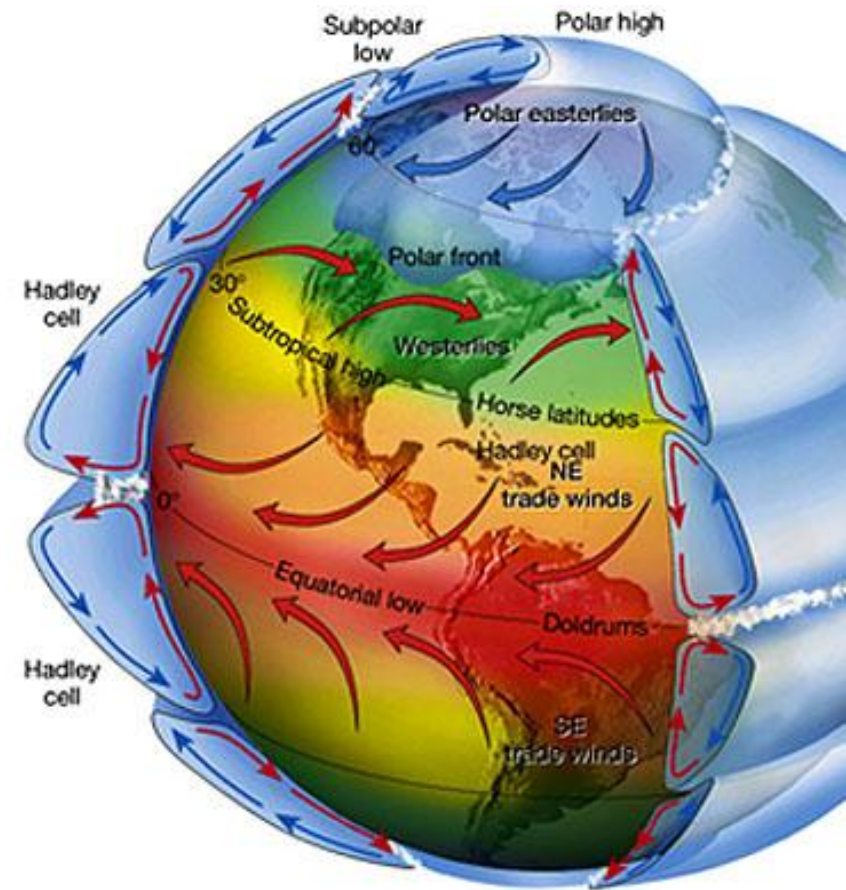


Saldo de radiação solar no topo da
atmosfera, média anual (W/m²)

Circulação de grande escala



© 2007 Thomson Higher Education



Equações Básicas

$$p_a = \rho_a R' T_v \quad dp_a = -\rho_a g dz \quad T_v = T(1 + 0.608 q_v)$$

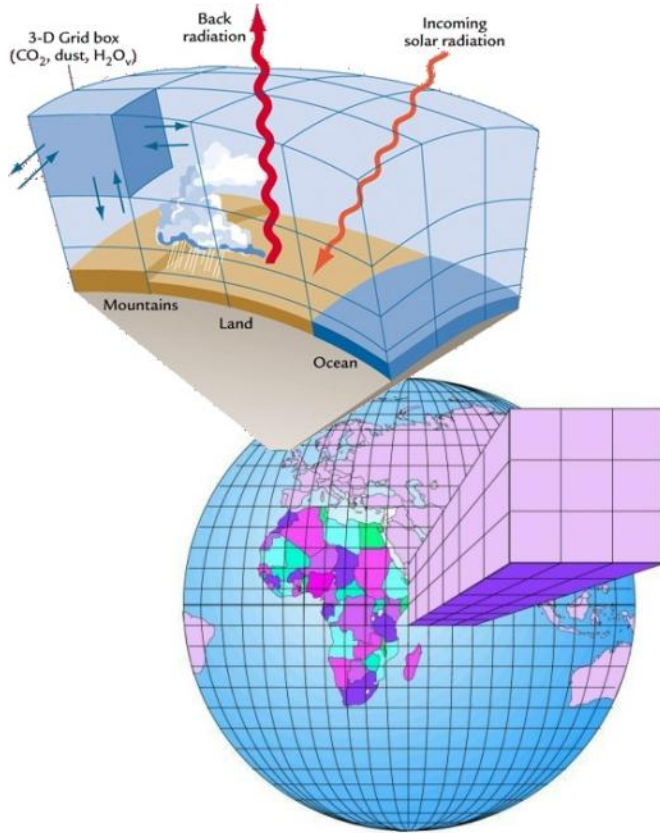
$$\frac{d\theta_v}{dt} = \frac{1}{c_p^d} \frac{\theta_v}{T_v} \frac{dQ}{dt} \quad \theta_v = T_v \left(\frac{1000 \text{ hPa}}{p_a} \right)^\kappa$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = -\mathbf{V} \cdot \nabla \mathbf{V} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{\nabla P}{\rho} + \mathbf{g} \quad \frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \rho$$

Resolvemos os movimentos: da atmosfera, das correntes oceânicas, da água em um cano, do ar passando sobre uma asa, das estrelas em uma galáxia

Como resolver?

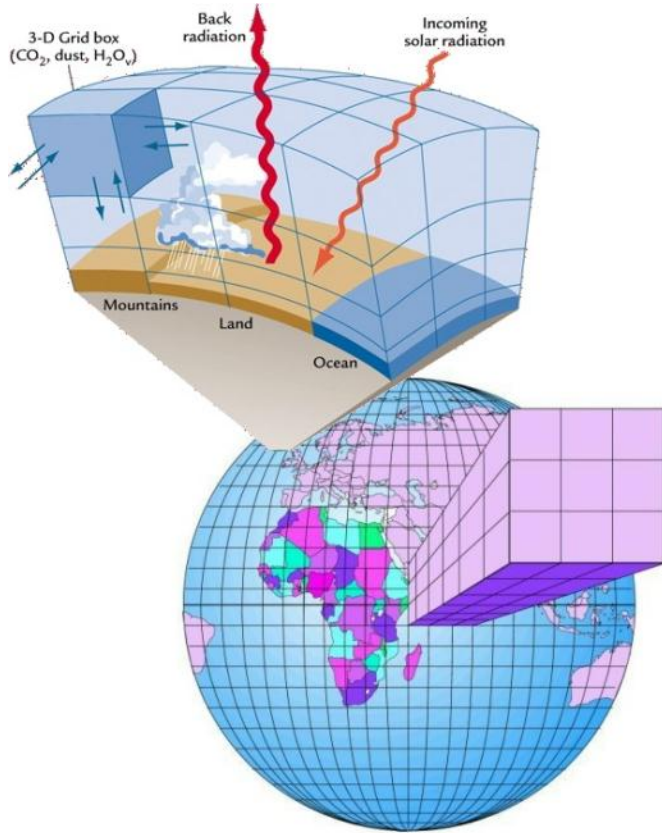
$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla\rho$$



- Dividir o problema em pequenos pedaços (**discretização numérica**).
- As equações são calculadas apenas nos pontos definidos por essa **grade**.

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial x} (Nu) \quad \Rightarrow \quad \frac{N_{t+1}^i - N_t^i}{\Delta t} = - \frac{Nu_t^{i+1} - Nu_t^{i-1}}{2\Delta x}$$

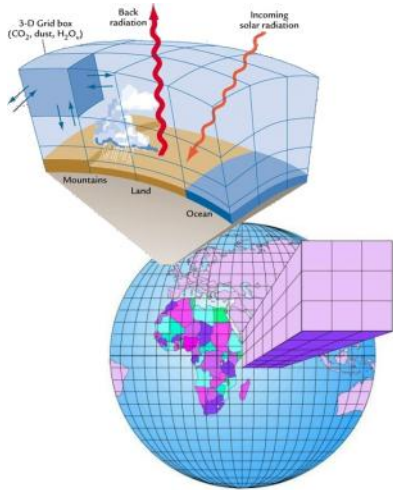
Como resolver?



- Neste exemplo, precisamos:
 - $u(x, t=0)$ e $N(x, t=0)$
 - $u(0, t)$ e $N(0, t)$
 - $u(L, t)$ e $N(L, t)$
- Problema de C.I. em t e problema de CC em x

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(Nu) \quad \Rightarrow \quad N_{t+1}^i = N_t^i - \frac{Nu_t^{i+1} - Nu_t^{i-1}}{2\Delta x} \cdot \Delta t$$

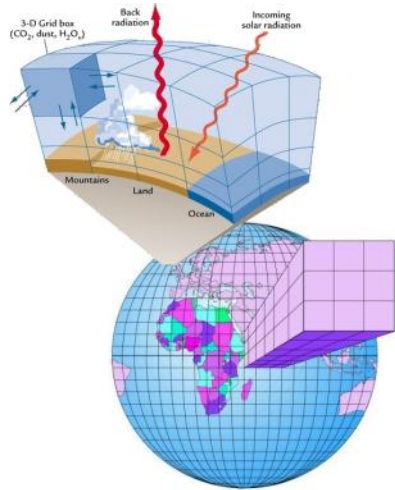
As eq. básicas resolvem tudo?



Como
incluir
processos
sub-grade?



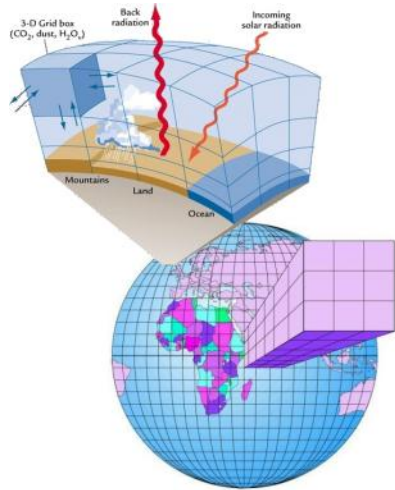
Como incluir processos sub-grade?



Nuvens,
chuva,
vegetação,
cidade, rios,
etc...



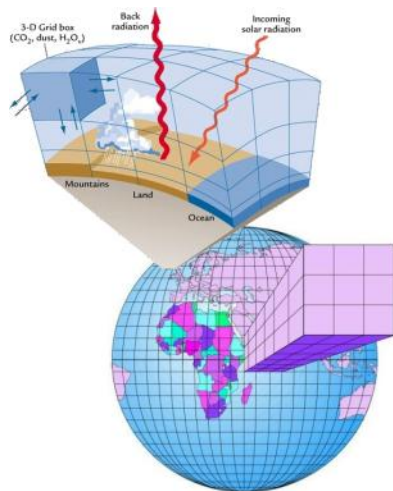
Como incluir processos sub-grade?



Poluição,
aerossóis,
turbulência,
etc...



Como incluir processos sub-grade?



Fisiologia,
atividades
humanas,
etc...

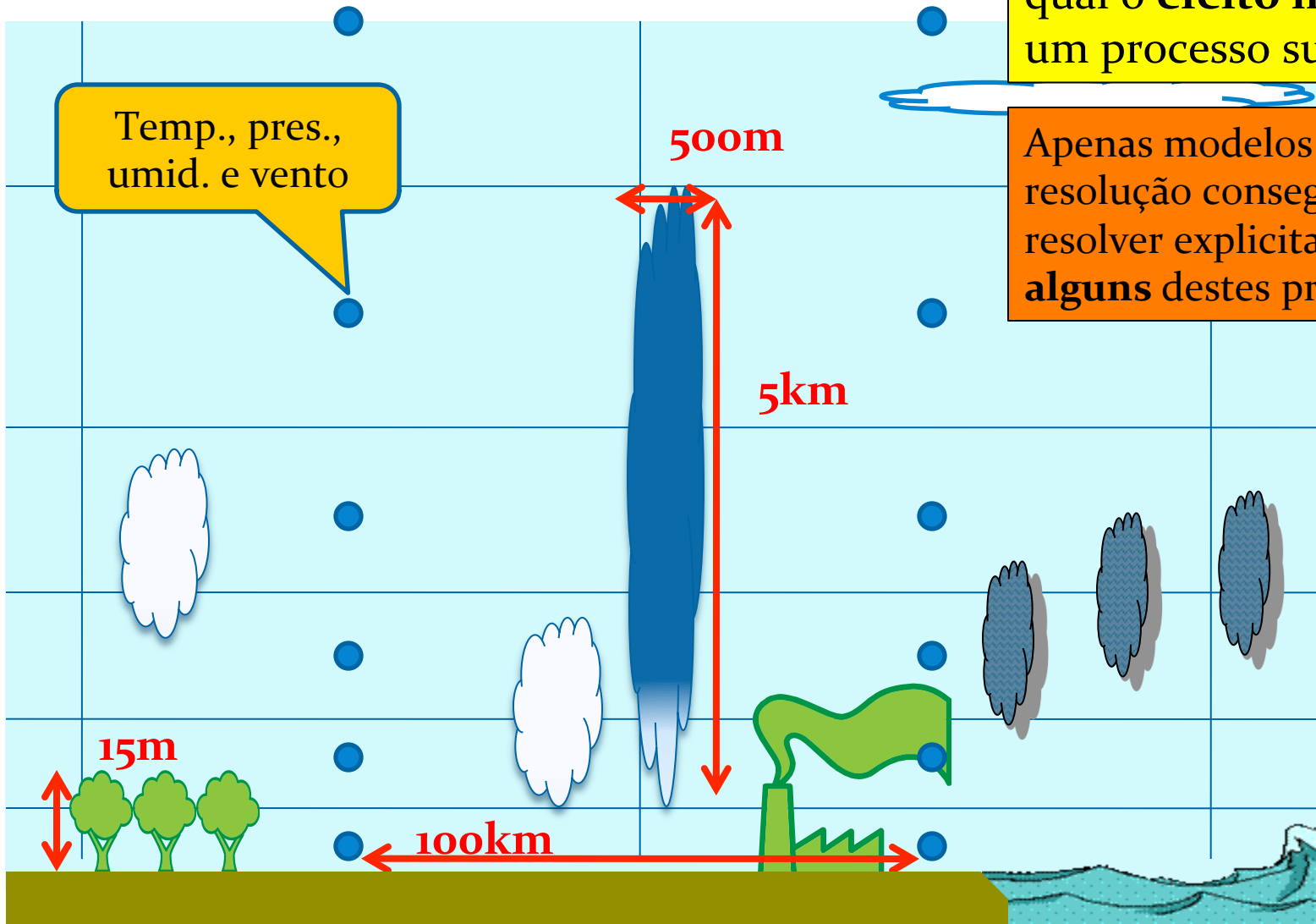


Parametrização

é um conjunto de equações **empíricas** usadas para determinar o qual o **efeito médio** de um processo sub-grade

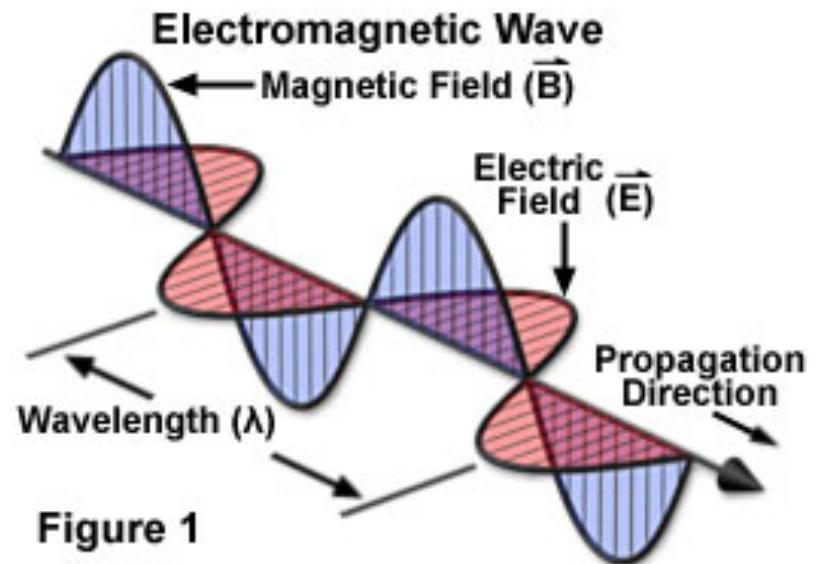
Temp., pres.,
umid. e vento

Apenas modelos de altíssima resolução conseguem resolver explicitamente **alguns** destes processos.

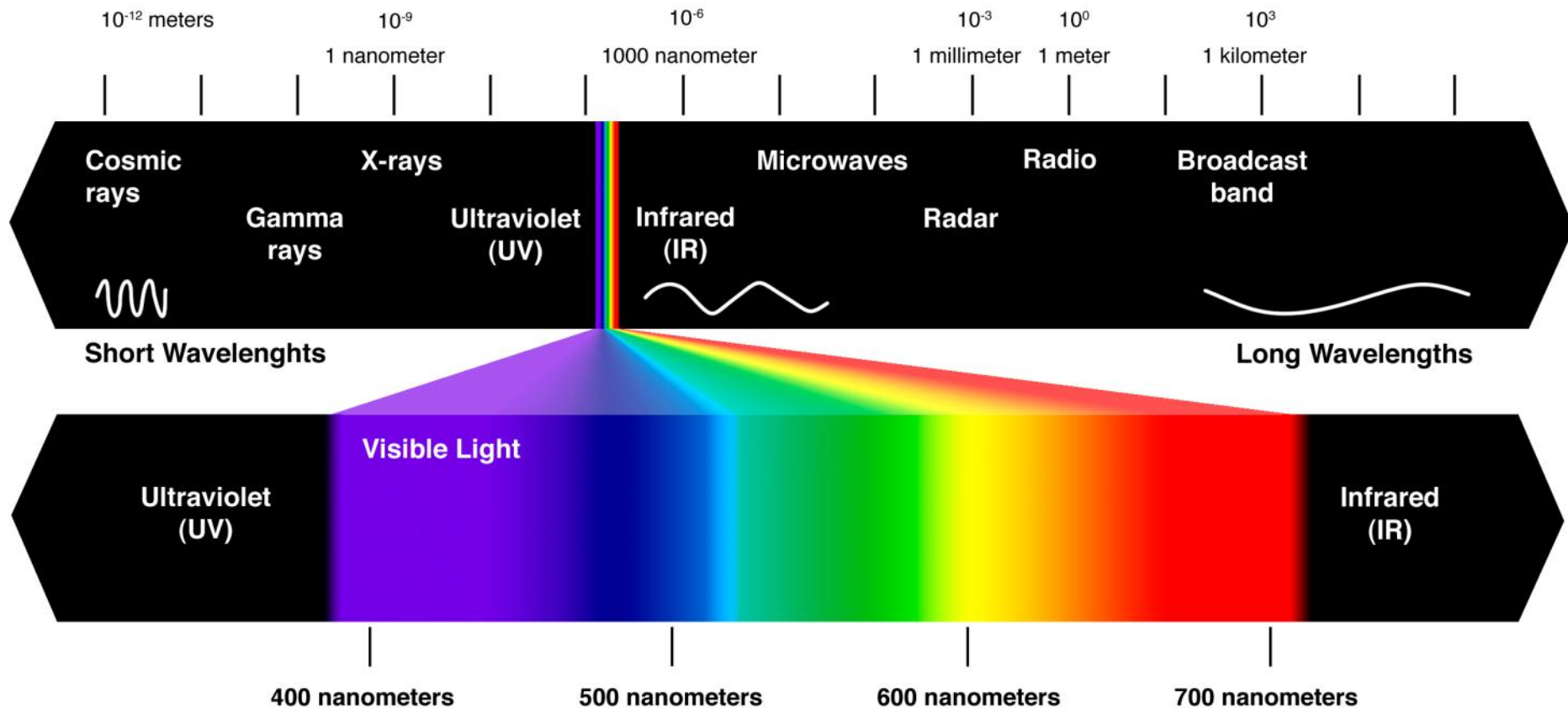


Radiação eletromagnética

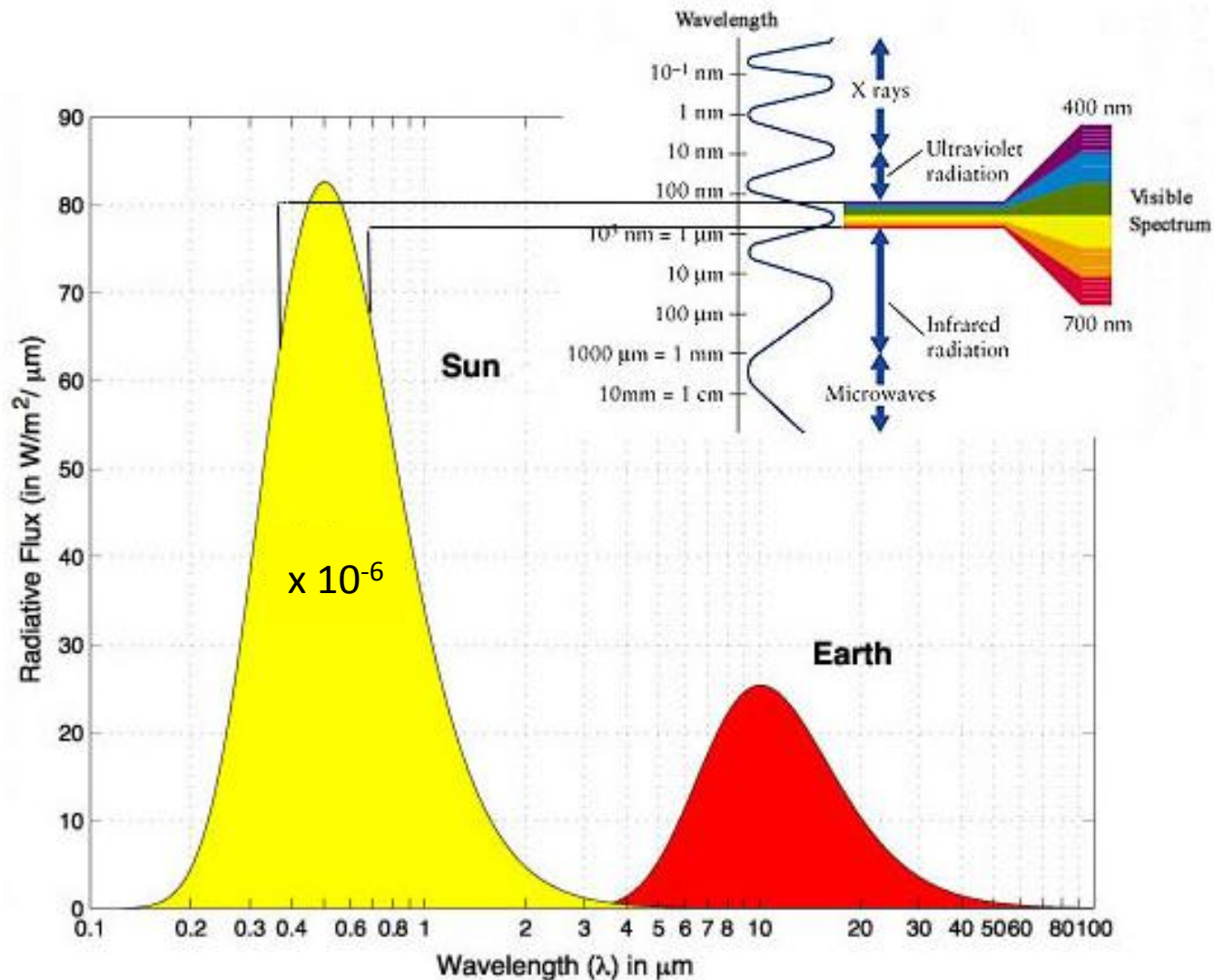
- É uma forma de energia emitida e absorvida por partículas carregadas e que se propaga no espaço como uma onda e como partícula ao mesmo tempo;
- É formada por um campo magnético e um campo elétrico que vibram em fase, perpendiculares entre si e a direção de propagação;
- A velocidade de propagação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



Espectro eletromagnético

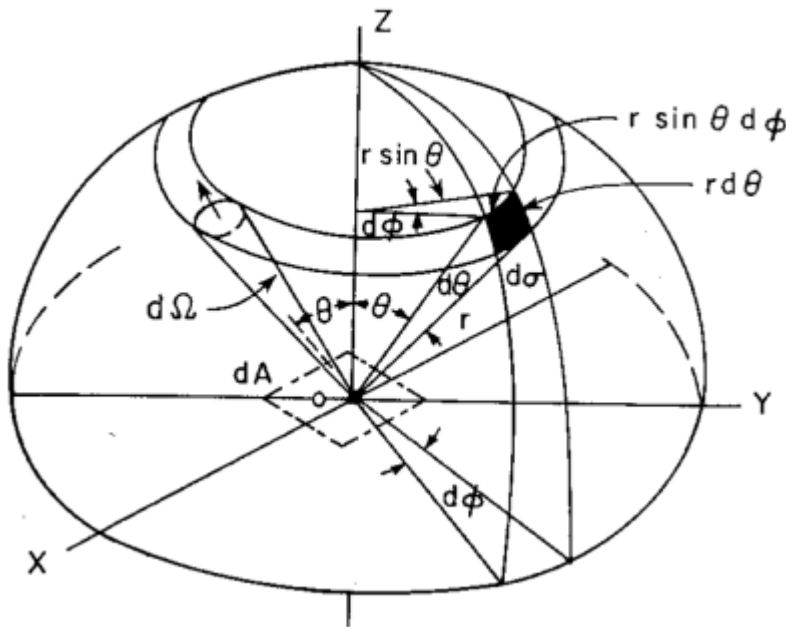


Espectro Solar e Terrestre



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



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

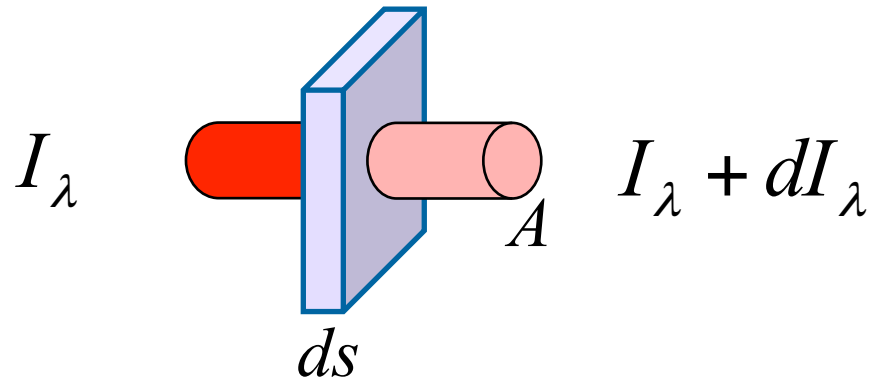
Unidades: $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$

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

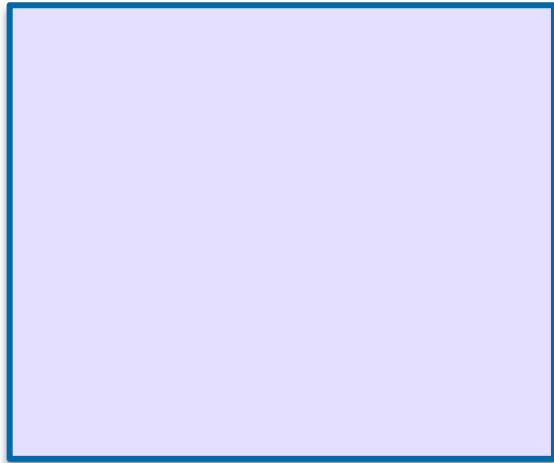
Extinção

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

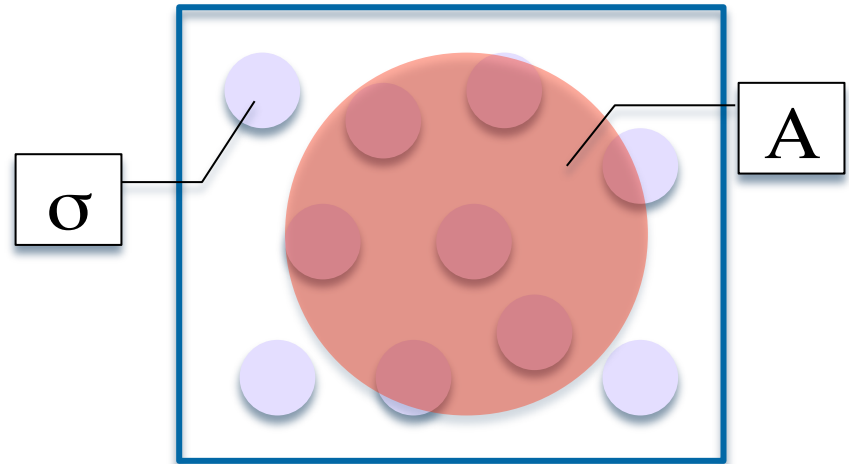


- Se ds é pequeno o suficiente, não há sobreposição entre os núcleos espalhadores (1 camada)

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

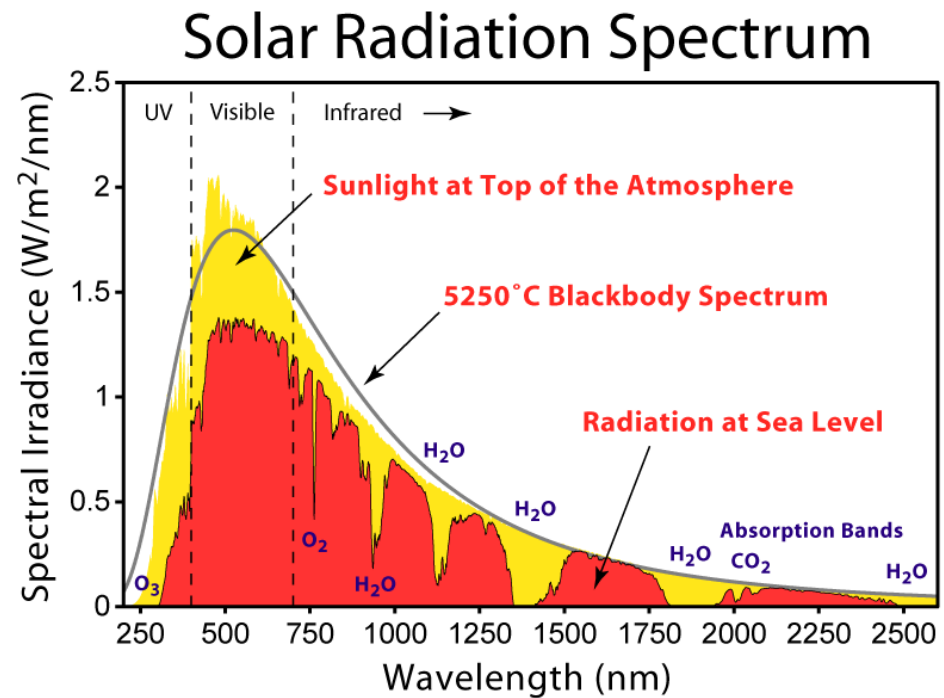
- A função de Planck explica a intensidade (**radiância**) emitida por um corpo negro (**ideal**):

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

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

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 :

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

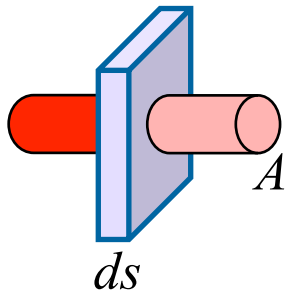
- Onde $\sigma = 5.671 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ é a constante de Stefan-Boltzmann

Lei de Kirchhoff

- A lei de Kirchhoff 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 processo:

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

- ... E que a lei de Kirchhoff'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

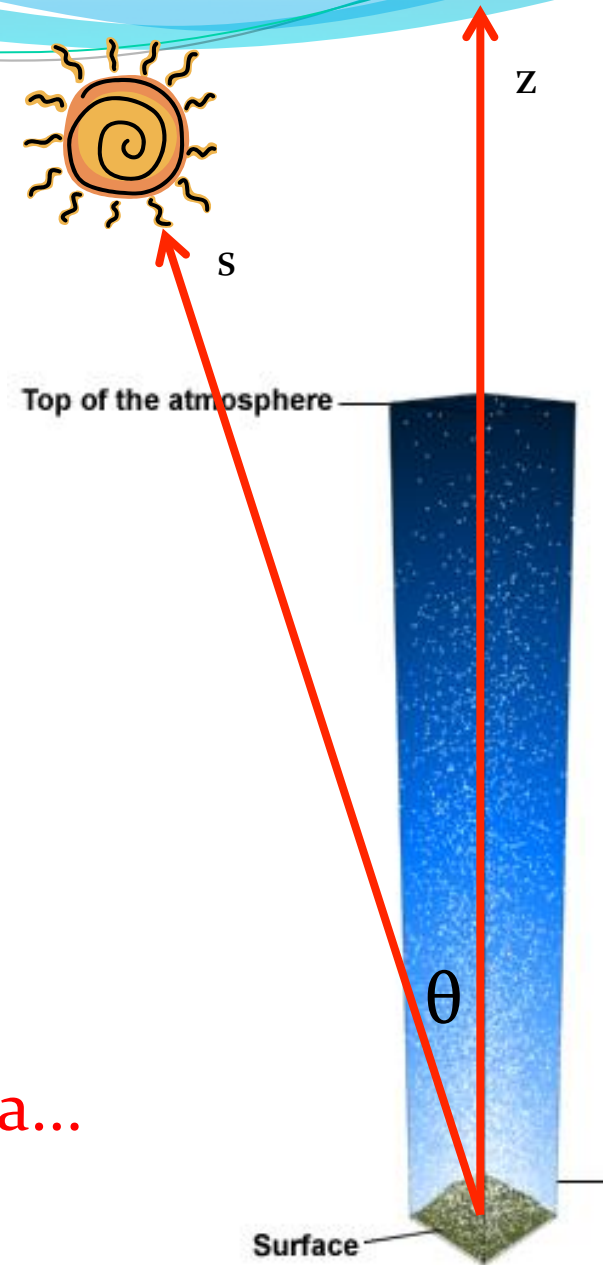
- Se a direção de propagação (s) não for a vertical (z), aproximamos:

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



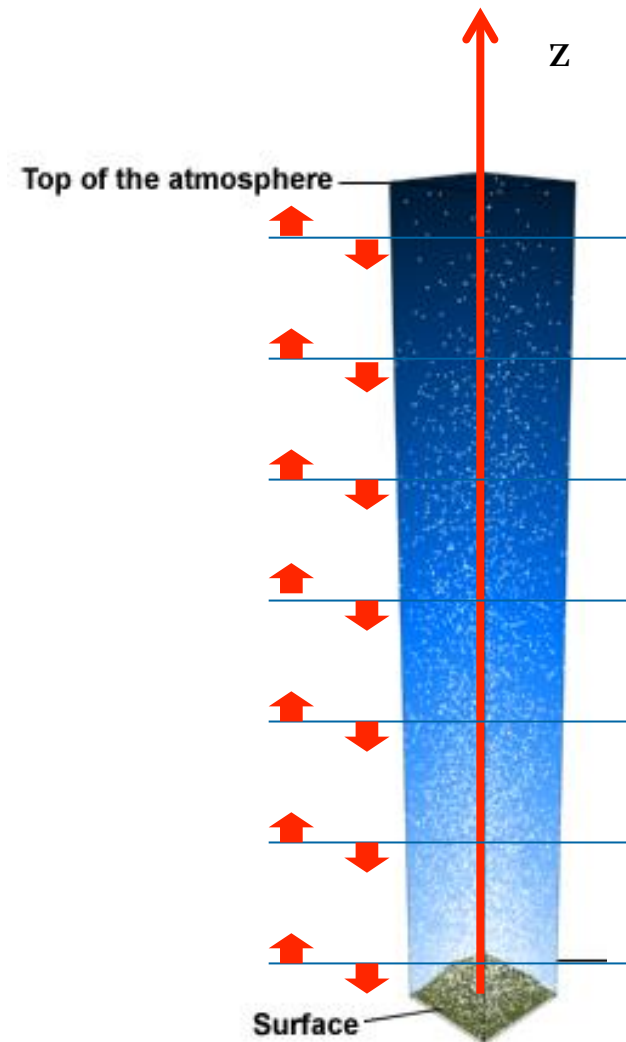
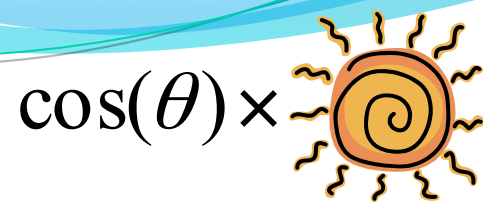
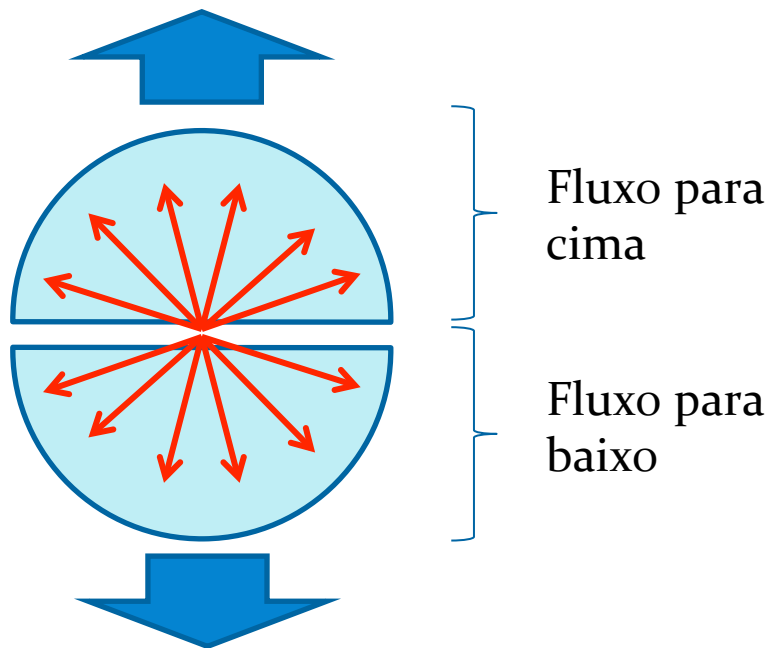
$$\cos(\theta) \frac{dI_{\lambda}}{\alpha dz} = -I_{\lambda} + B_{\lambda}$$

E a solução fica ainda mais complicada...



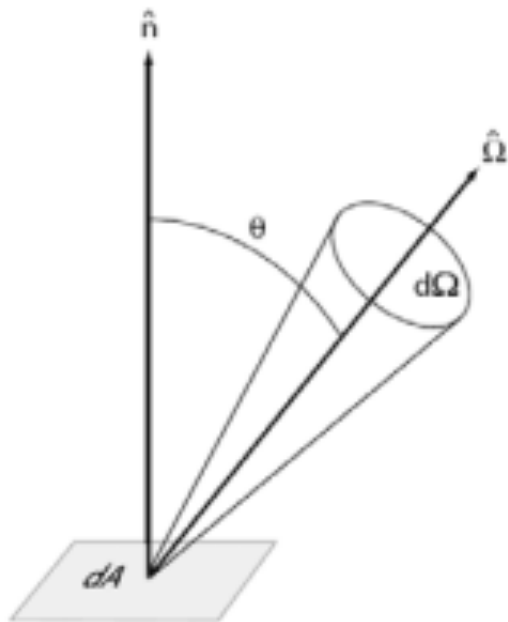
Observação 2

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



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: W m⁻² m⁻¹

Fluxo hemisférico

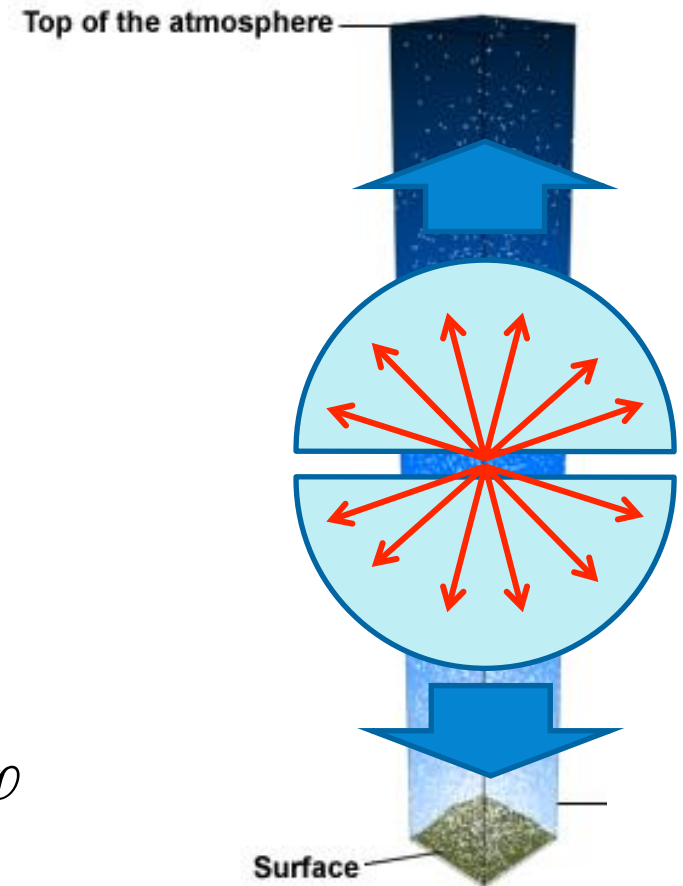
- Integrando o hemisfério superior (fluxo para cima) ou inferior (fluxo para baixo):

- 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:

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

- Radiação de onda longa emergente:

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

- 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)...

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

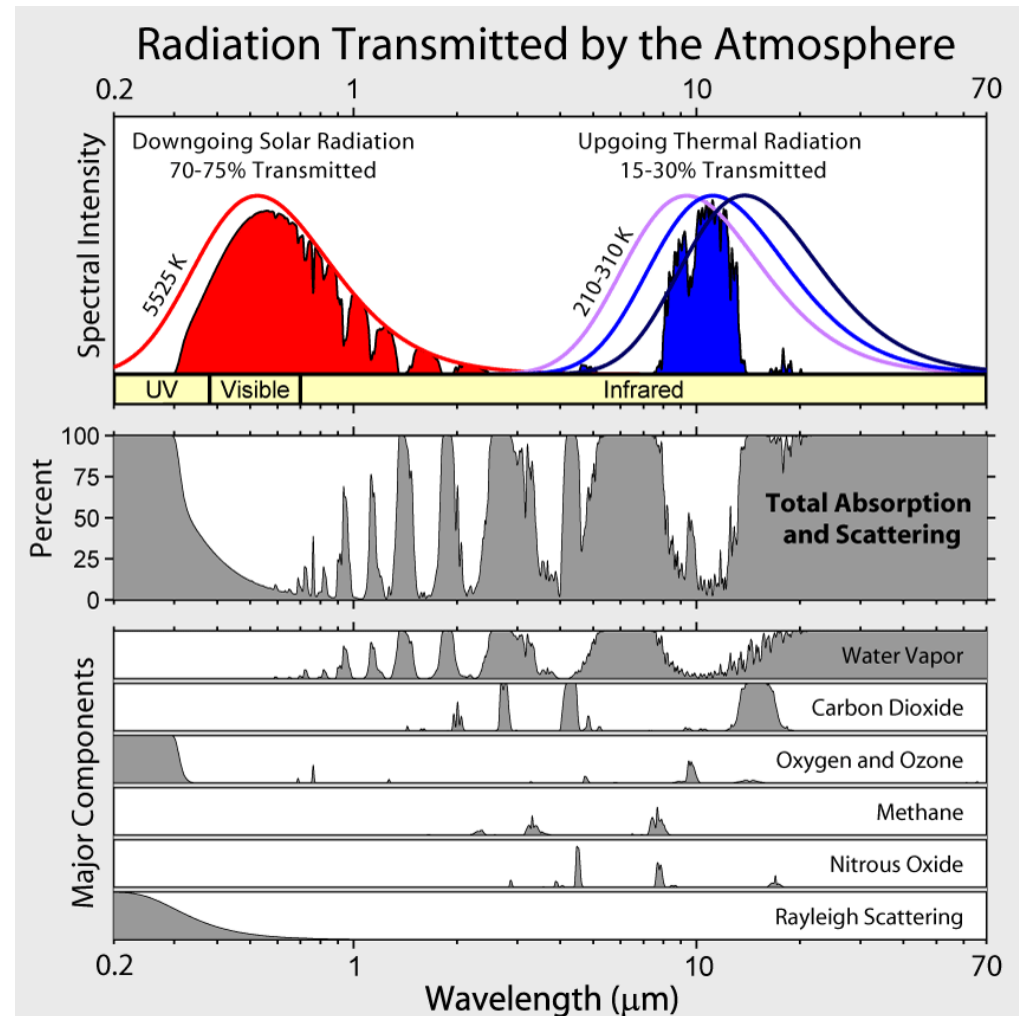
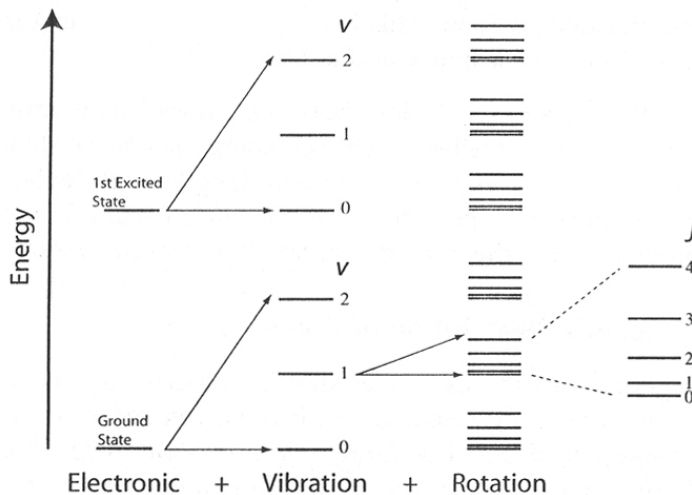
Mas de onde tiramos os coeficientes de absorção e espalhamento?

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

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

Absorção gasosa

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



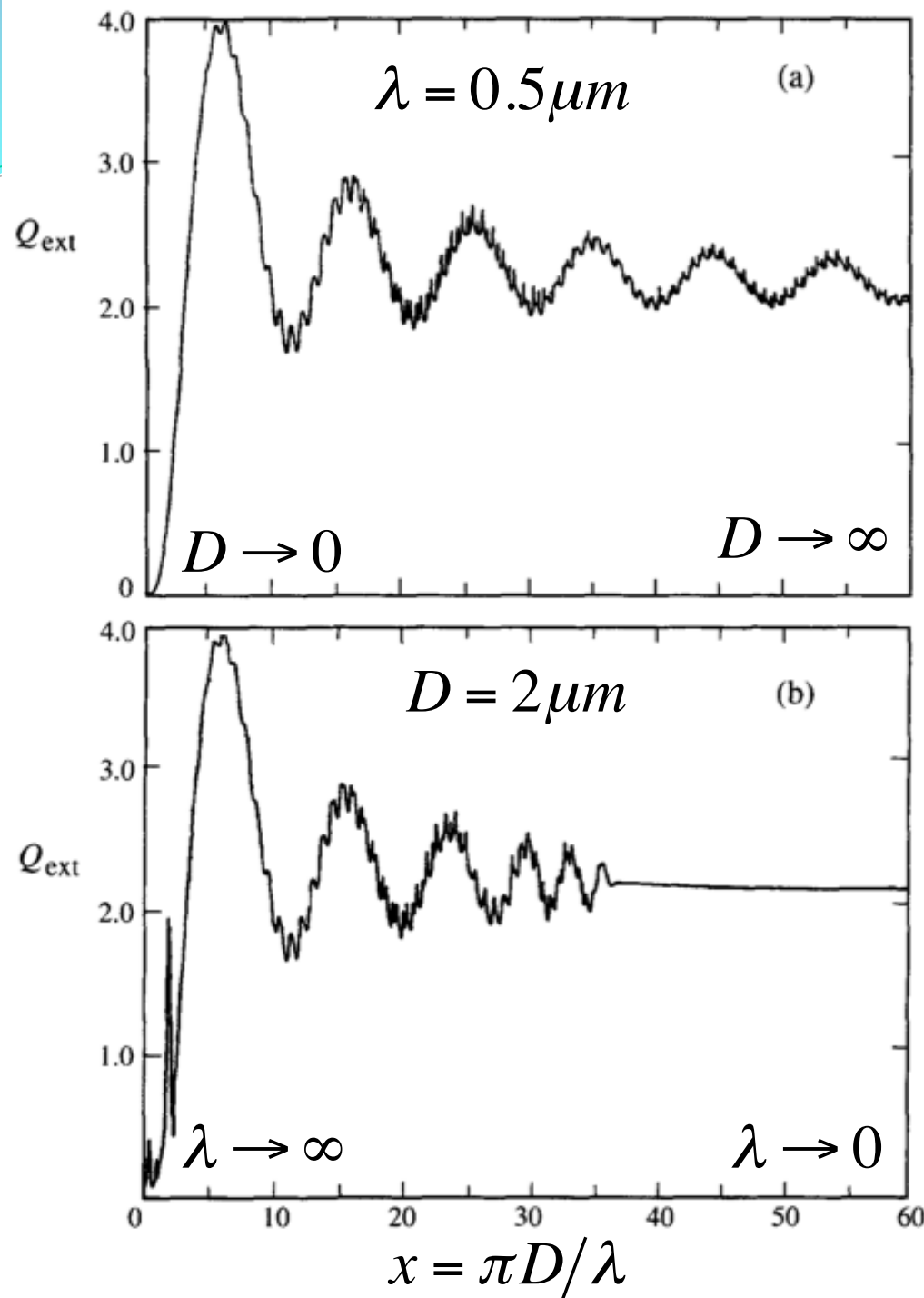
Extinção de luz

- 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,
- 
$$x = \pi D / \lambda$$
$$\tilde{n} = n + iK$$
- 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

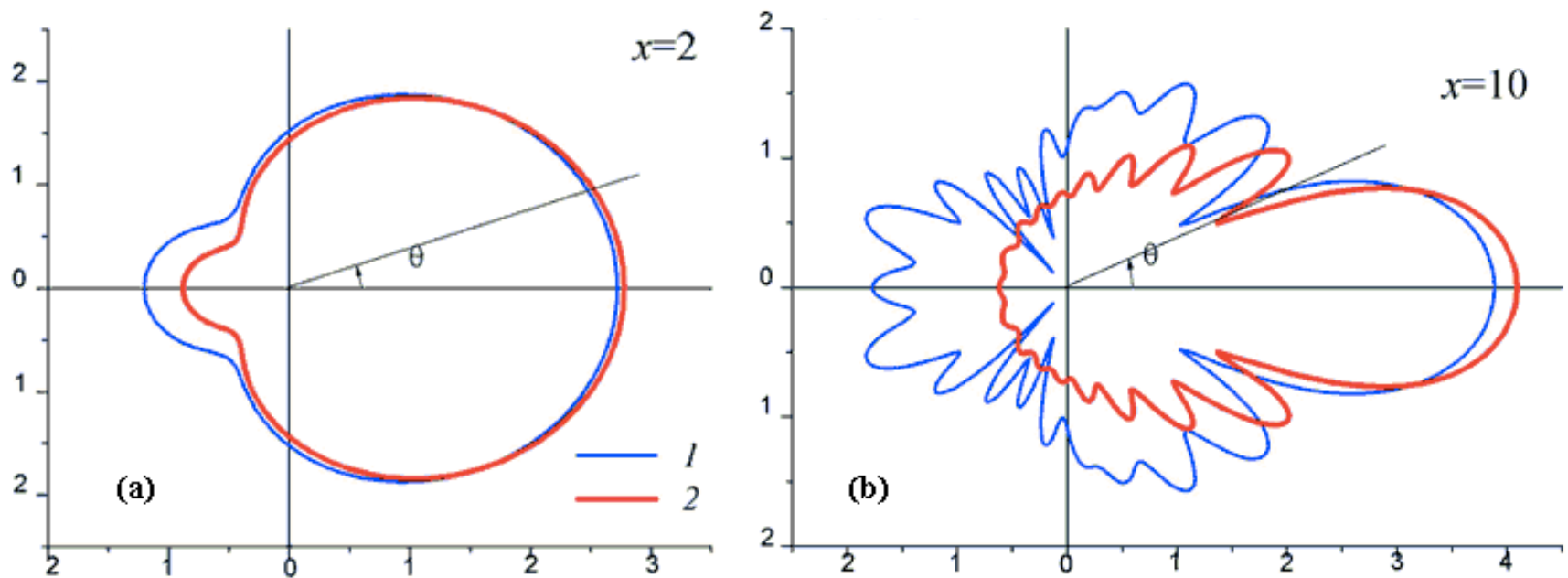


Ex: gotas

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

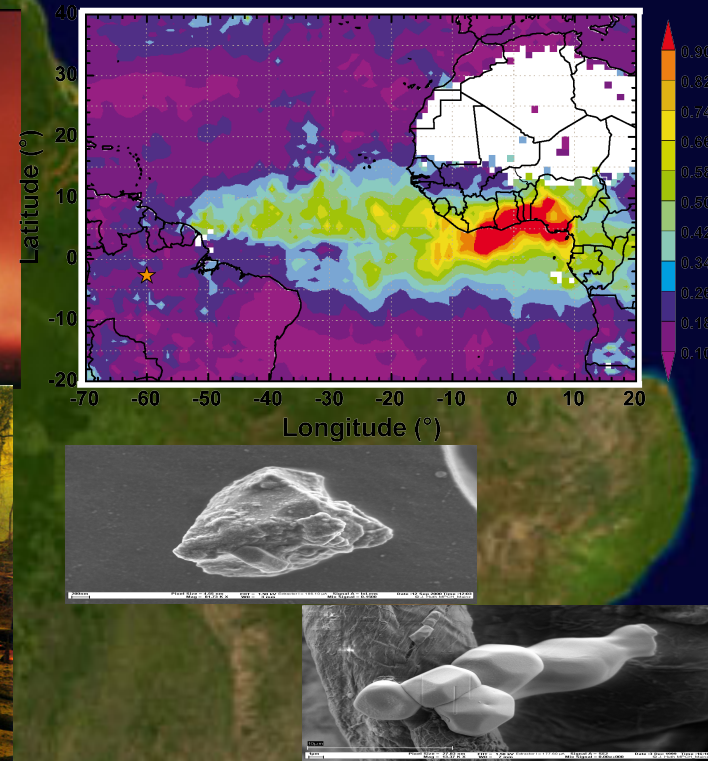
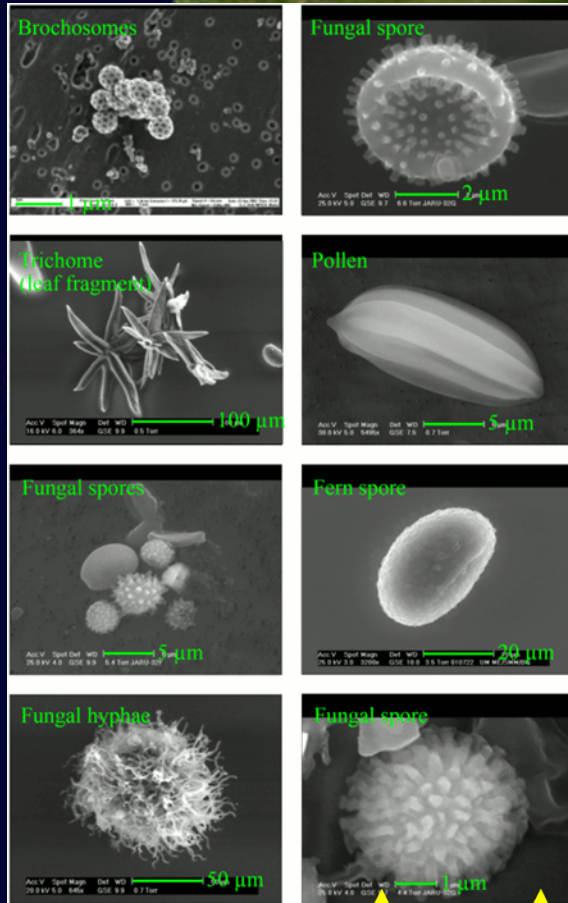
- A atmosfera contém
 - Moléculas (~ 0.1 a 0.5 nm)
 - Partículas de Aerossol (10 nm a $1\mu\text{m}$)
- Radiação Solar ~ 0.1 a $4\mu\text{m}$, dois tipos de espalhamento:
 - Moléculas tem $\pi D/\lambda \ll 1 \Rightarrow$ Rayleigh
 - Aerossóis tem $\pi D/\lambda \sim 1 \Rightarrow$ Mie
- O espalhamento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

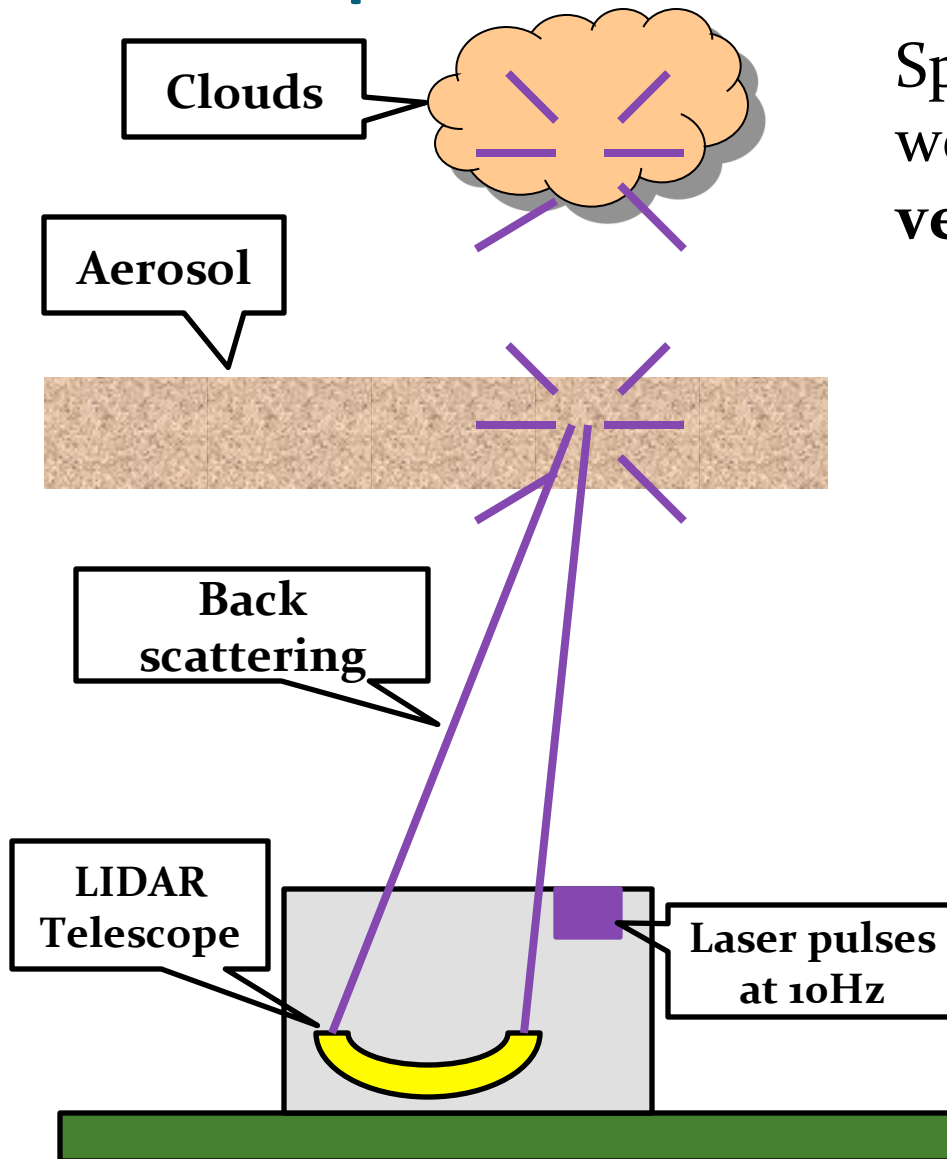
Espalhamento pelas partículas

- 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

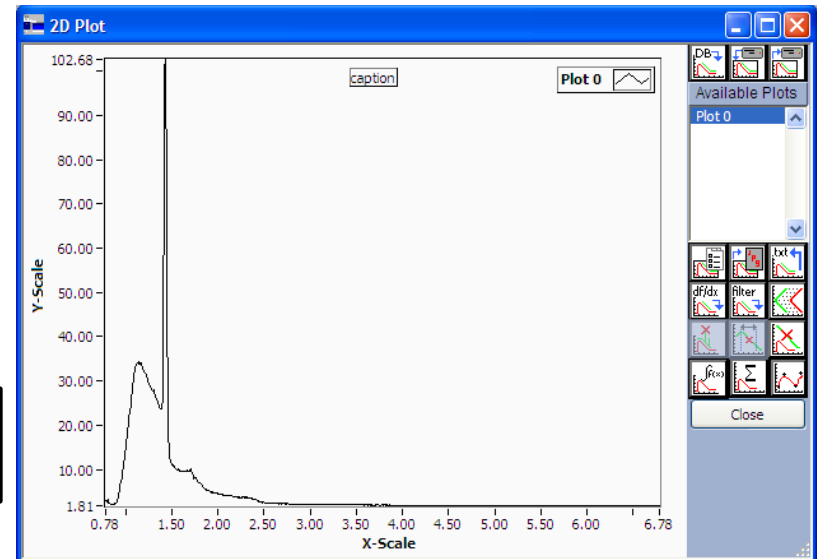


Exemplo: Lidar



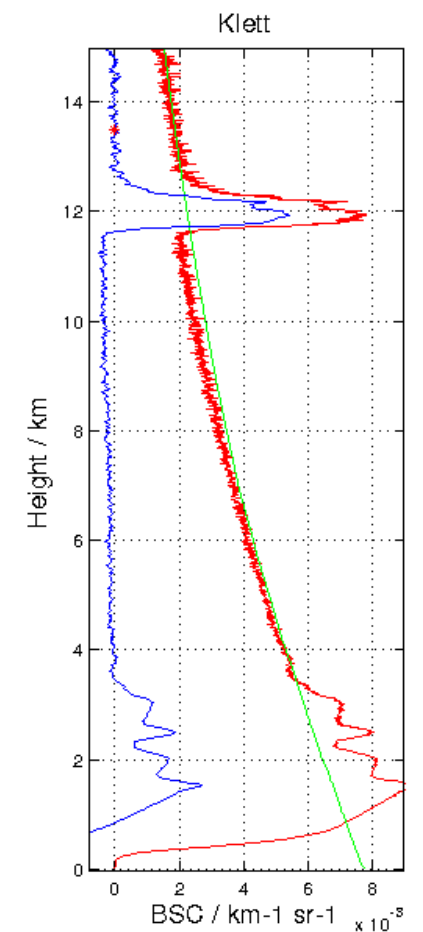
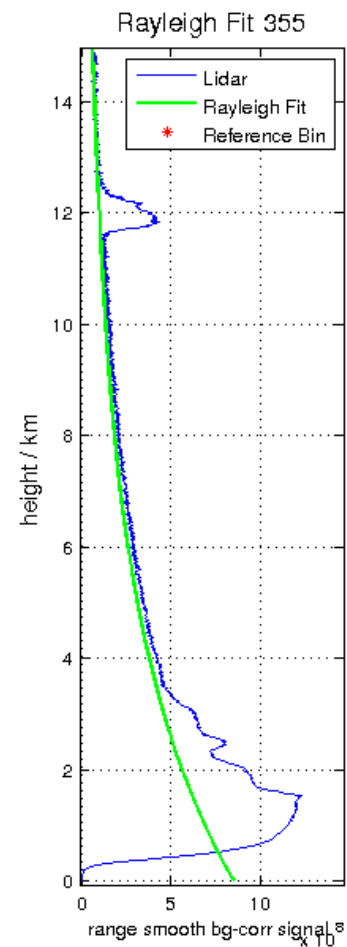
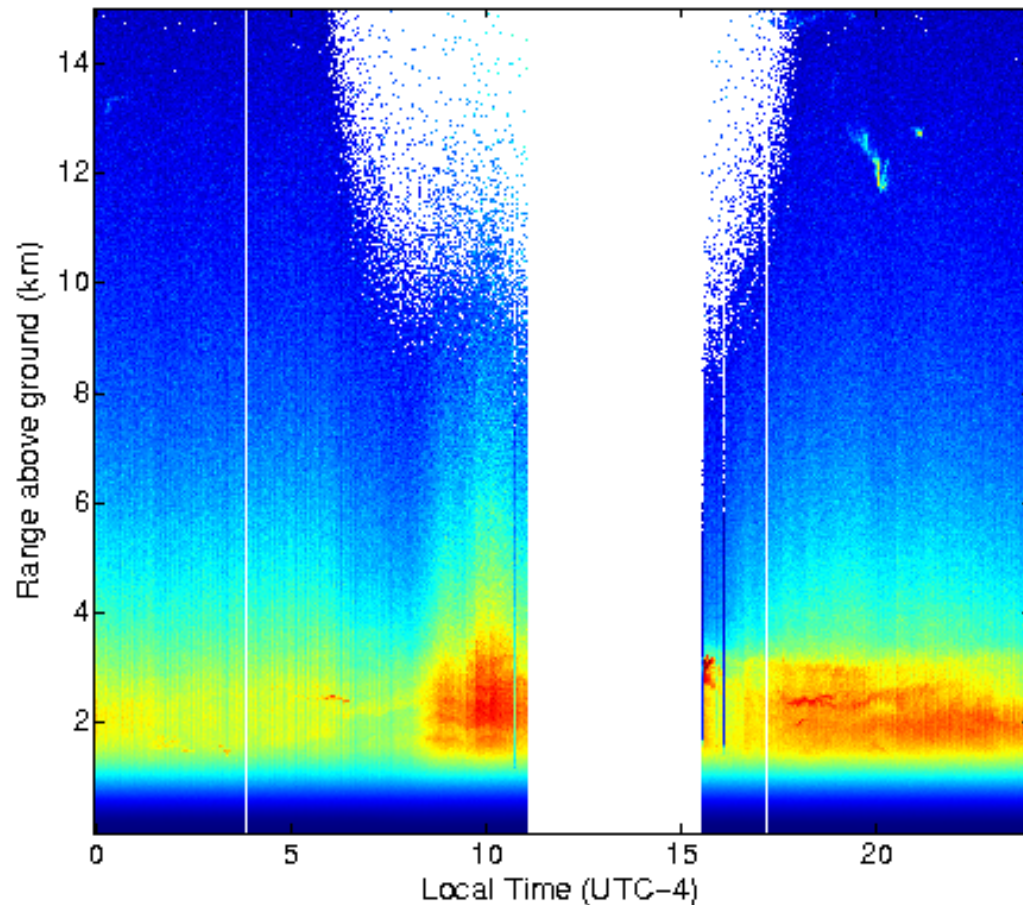
Speed of light is 3×10^8 m/s and we measure at 20Mhz, hence **vertical resolution is 7.5m**

We measure light intensity vs time

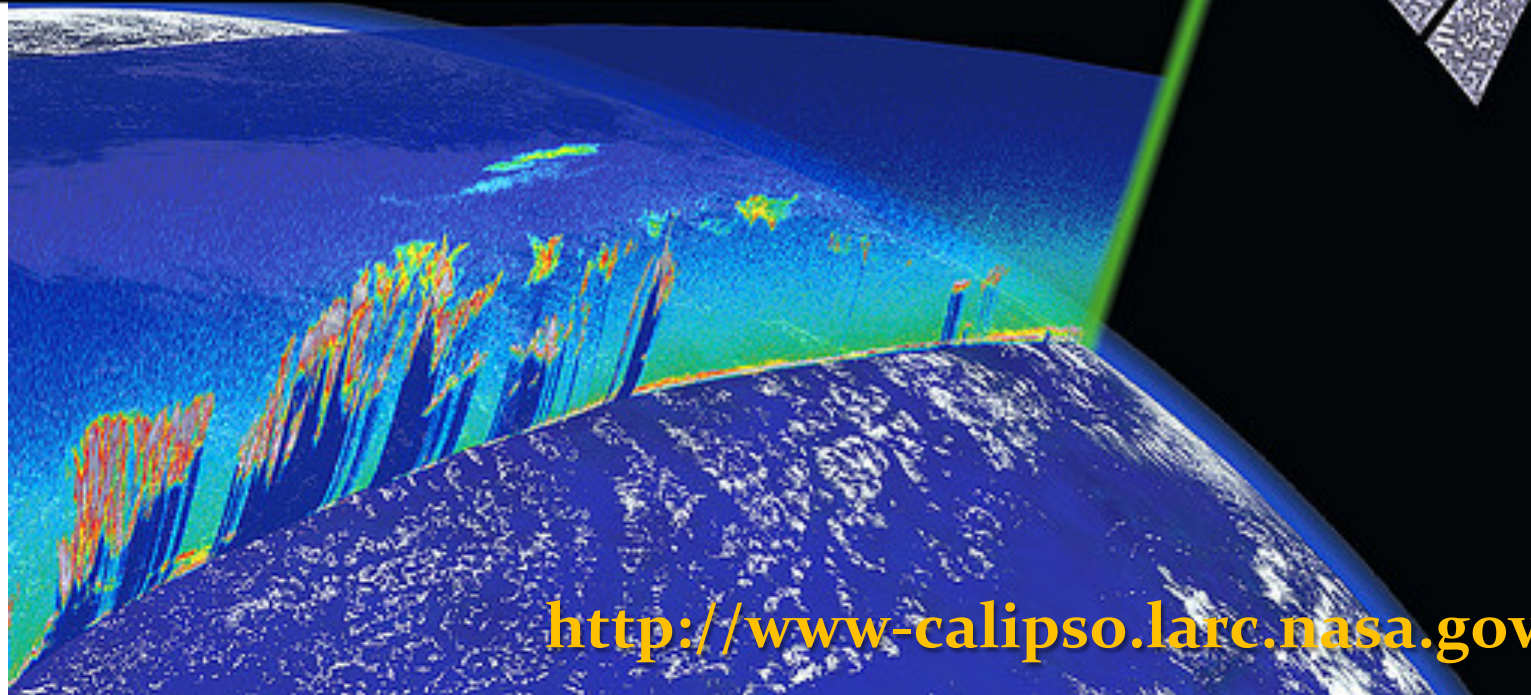
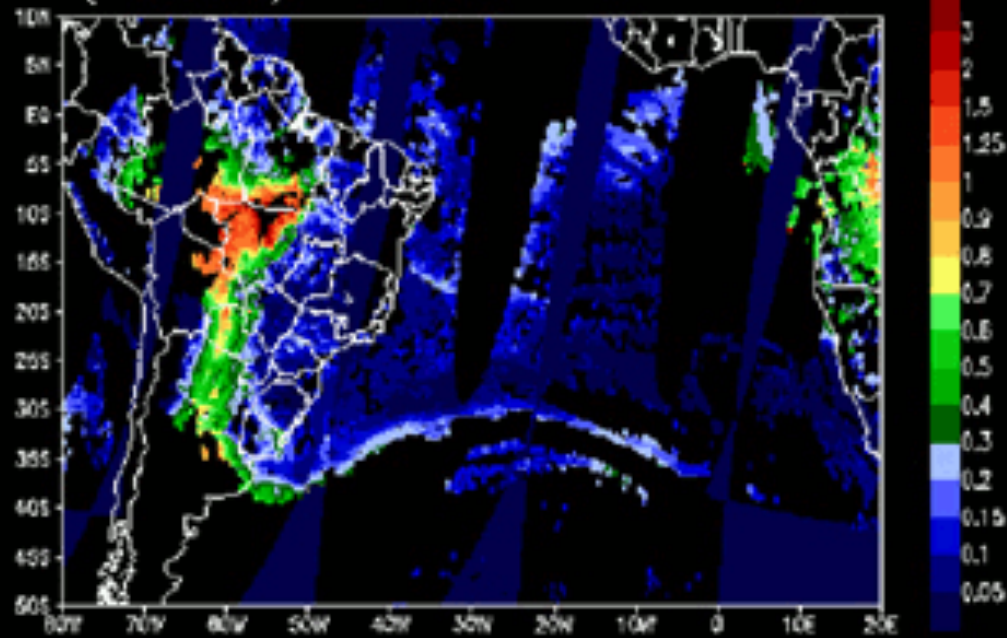


Exemplo: Lidar

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



AOT (550 nm) MODIS MOD04-L2 27AGO2002



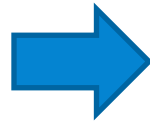
<http://www-calipso.larc.nasa.gov/>

Ok. Quase lá....

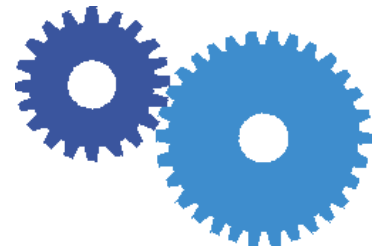
- Já temos a equação de transferência radiativa...
- Já sabemos resolvê-la (ou quase)
- Já sabemos de onde vem os coeficientes de absorção e espalhamento



Código fonte:
um texto escrito em
uma linguagem de
programação



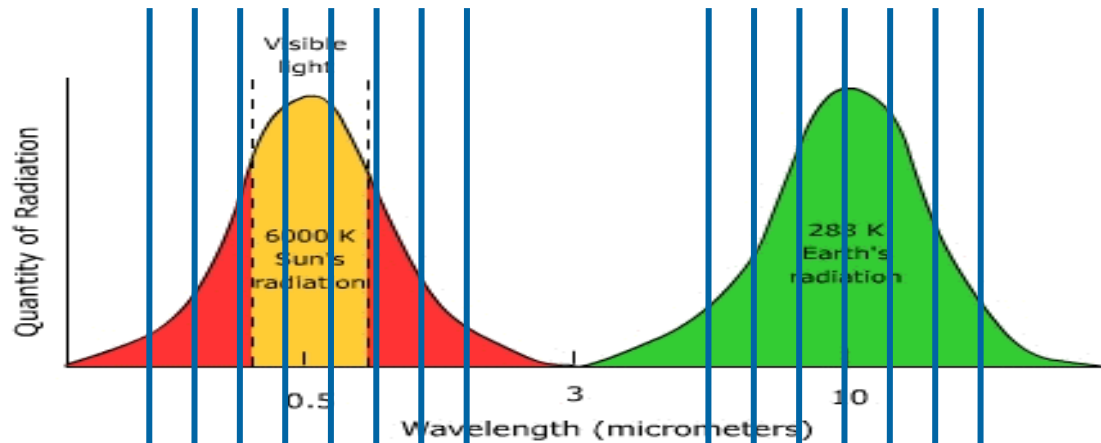
Compilador



Programa executável:
Linguagem de
máquina

Este programa resolve a equação...

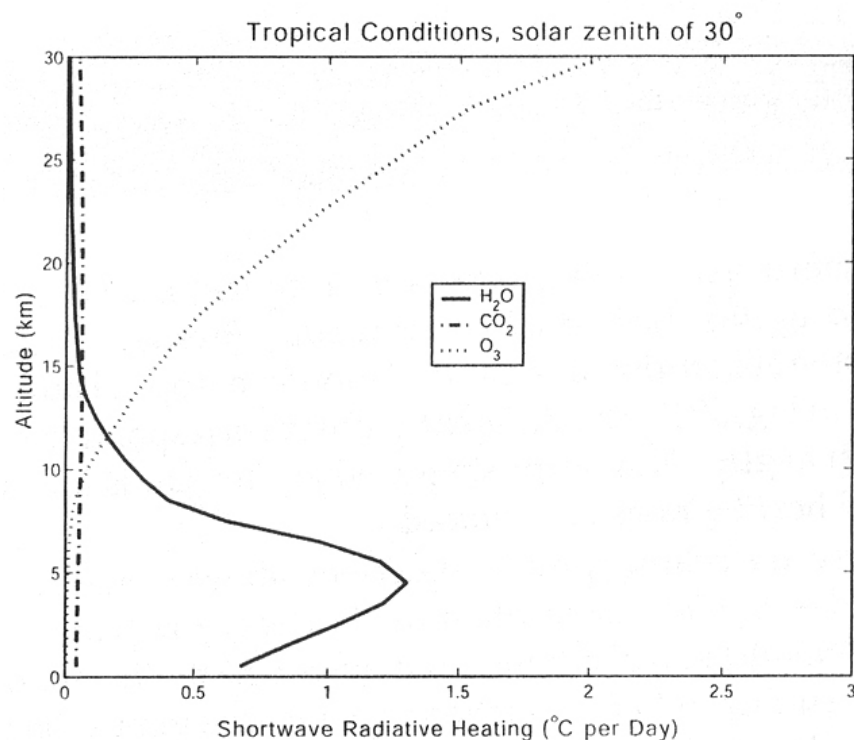
- Para cada comprimento de onda
 - Para cada gás
 - Para cada tipo de aerossol
 - Para cada tipo de nuvem



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

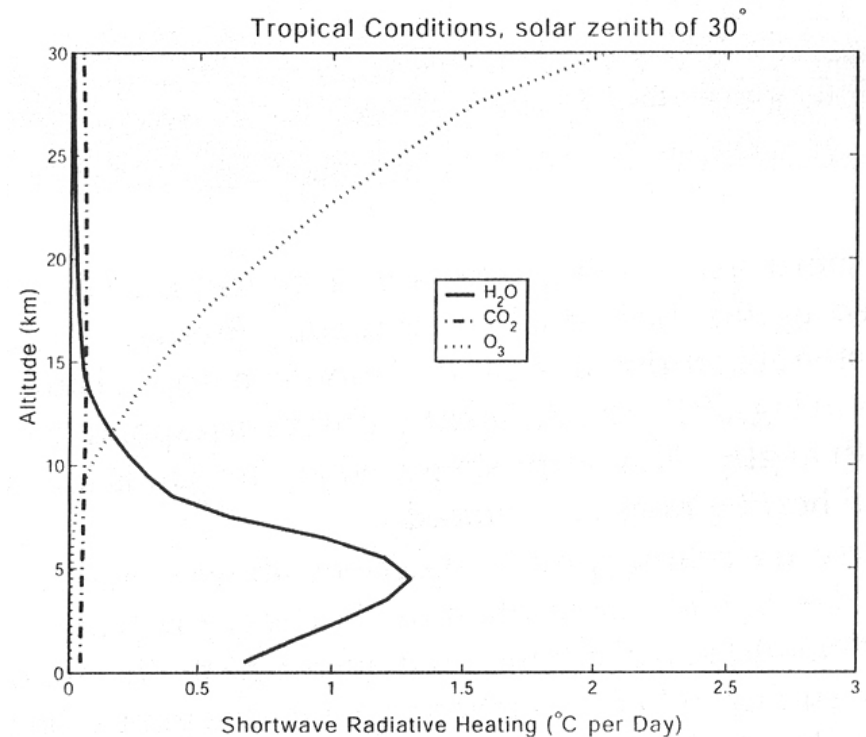
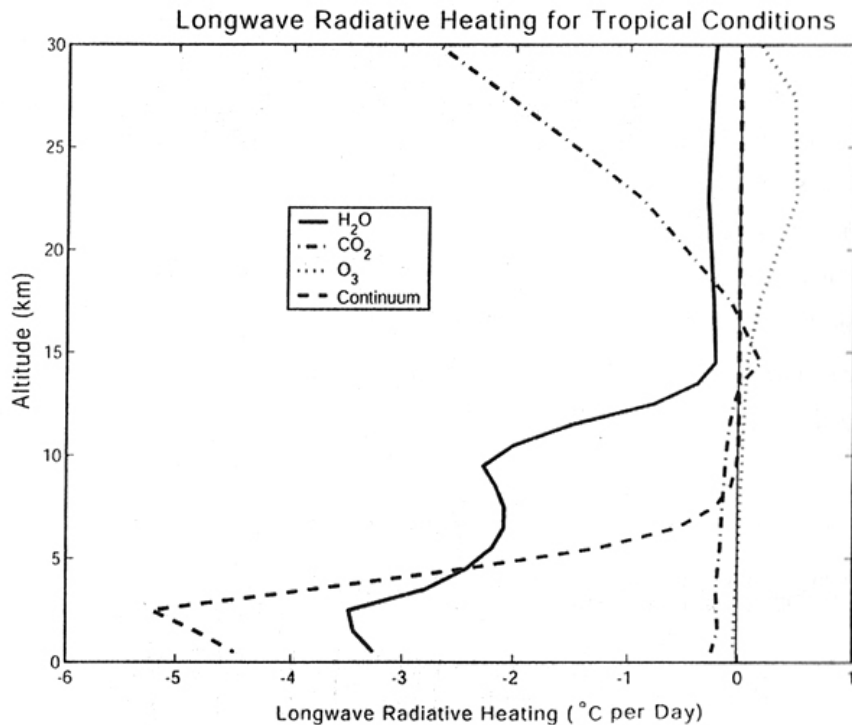
Parametrização de radiação Off-Line

- 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.



Exemplo:

- Cálculos em 1-coluna para as taxas de aquecimentos de alguns gases



Cortesia: Julio Chagas

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:

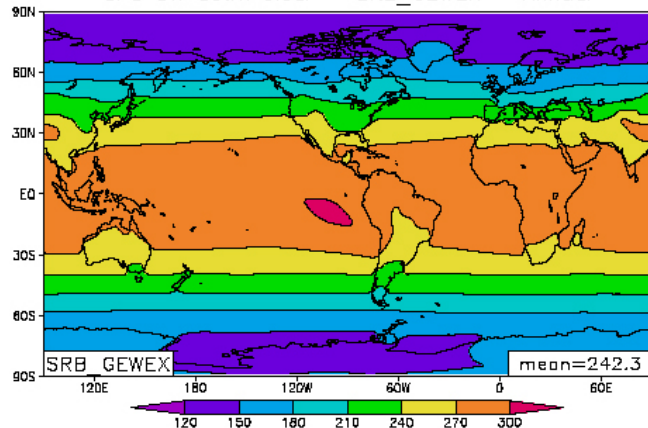
Fluxos de radiação (irradiância, W/m^2):

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

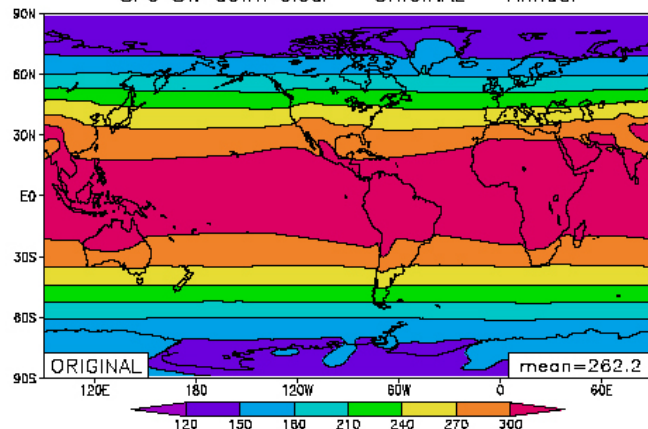
Taxas de aquecimento radiativo:

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

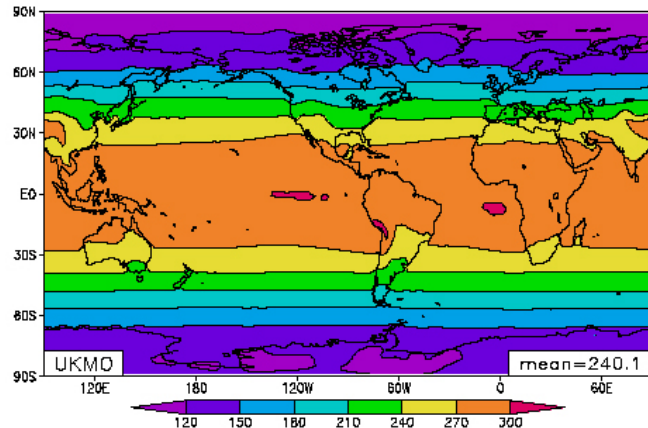
SFC SW down clear – SRB_GEWEX – Annual



SFC SW down clear – ORIGINAL – Annual

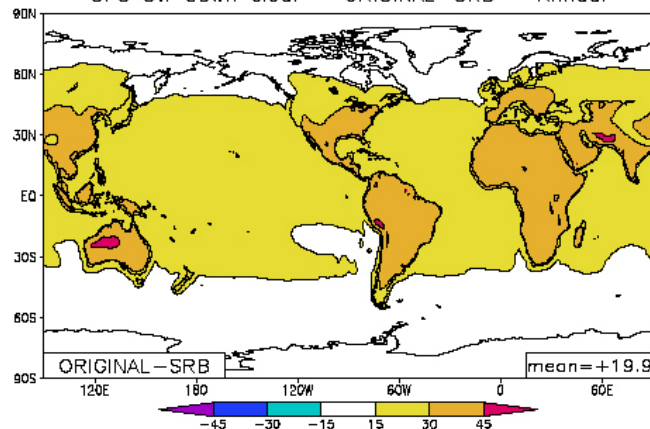


SFC SW down clear – UKMO – Annual

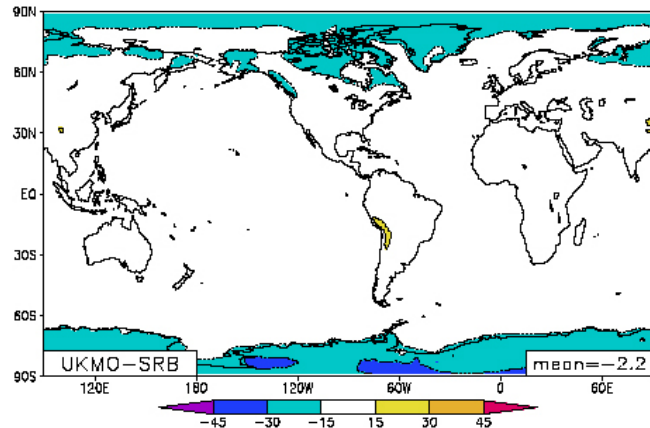


Exemplo: Edwards & Slingo (96) no
modelo global do cptec
SW – Down – SFC – Clear Sky

SFC SW down clear – ORIGINAL-SRB – Annual

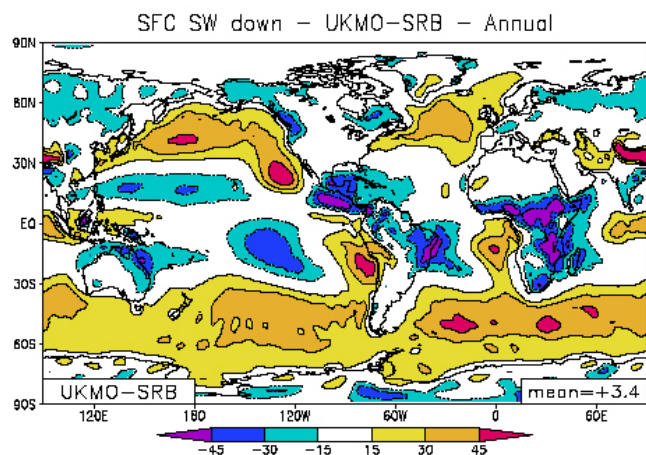
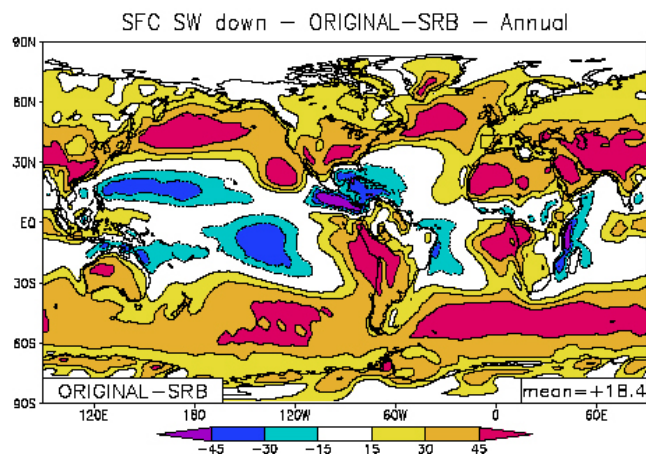
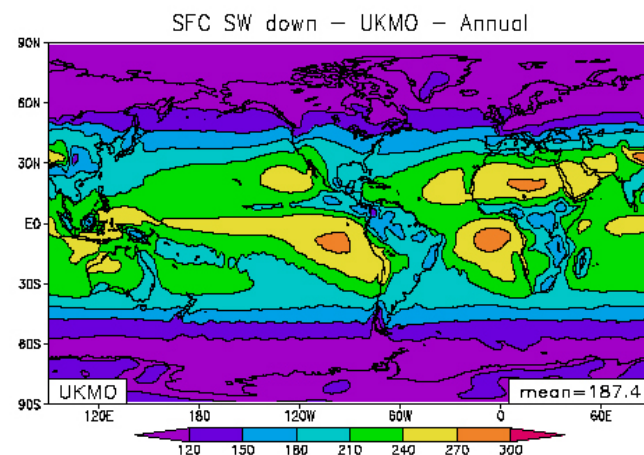
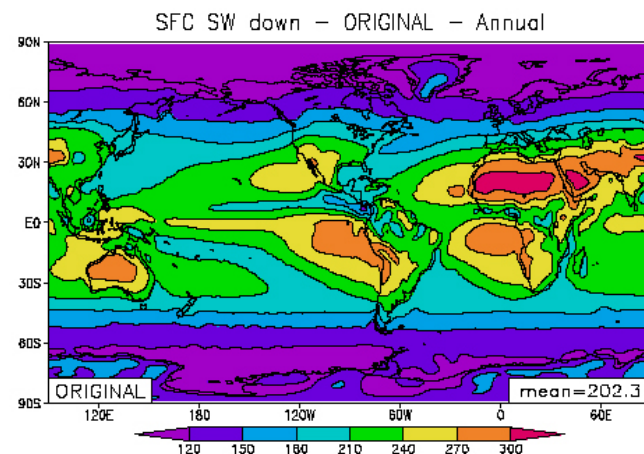
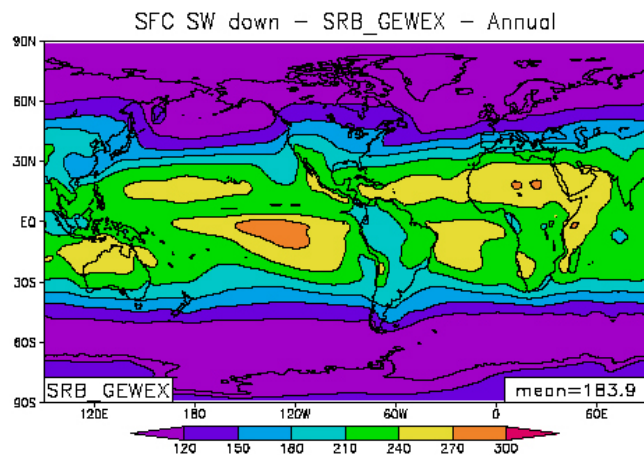


SFC SW down clear – UKMO-SRB – Annual



Exemplo: Edwards & Slingo (96) no modelo global do cptec

SW – Down – SFC – Cloudy Sky



Experimentos

+ CHUVA
+GoAmazon
+ATTO

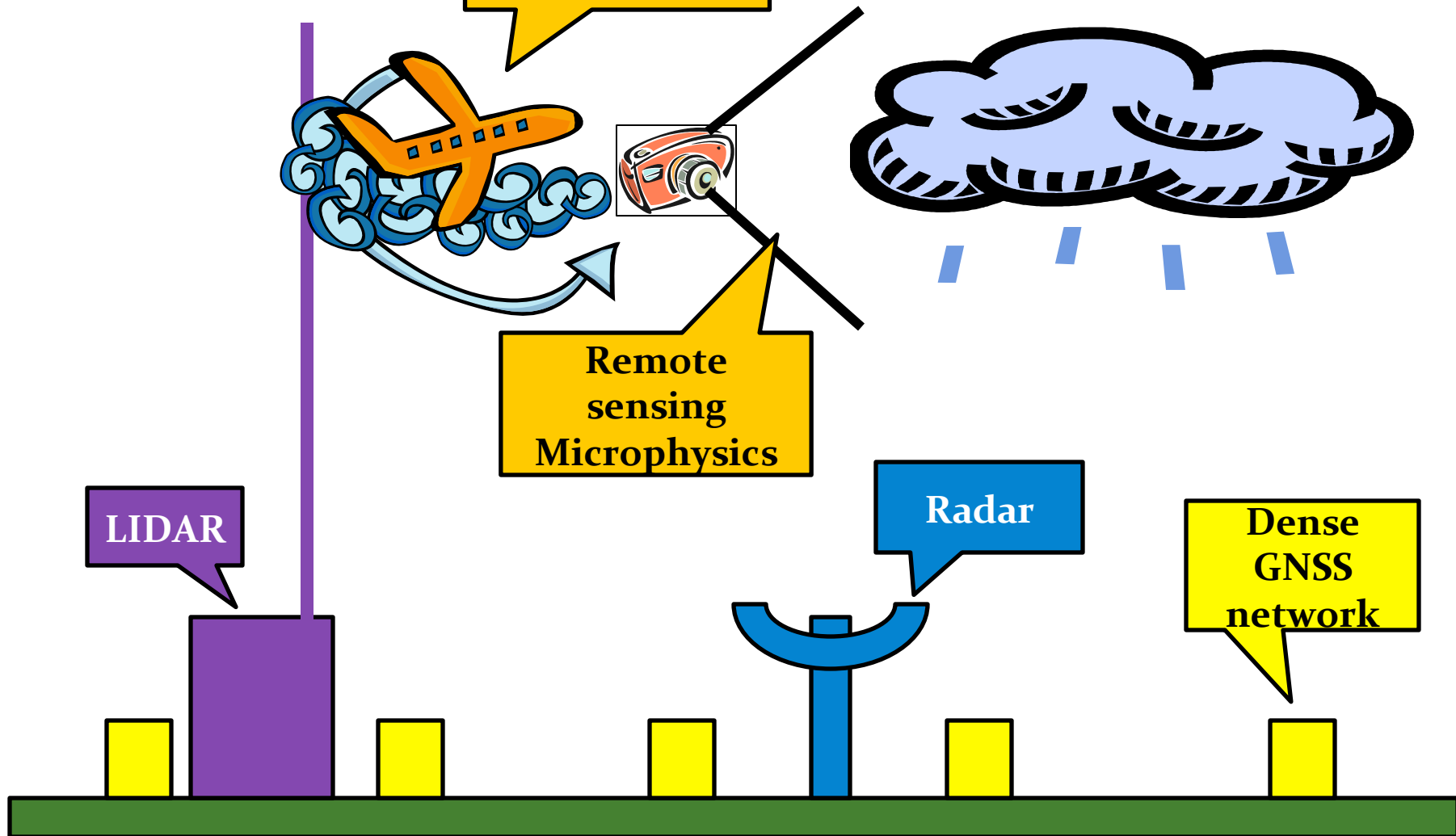
In situ
Microphysics

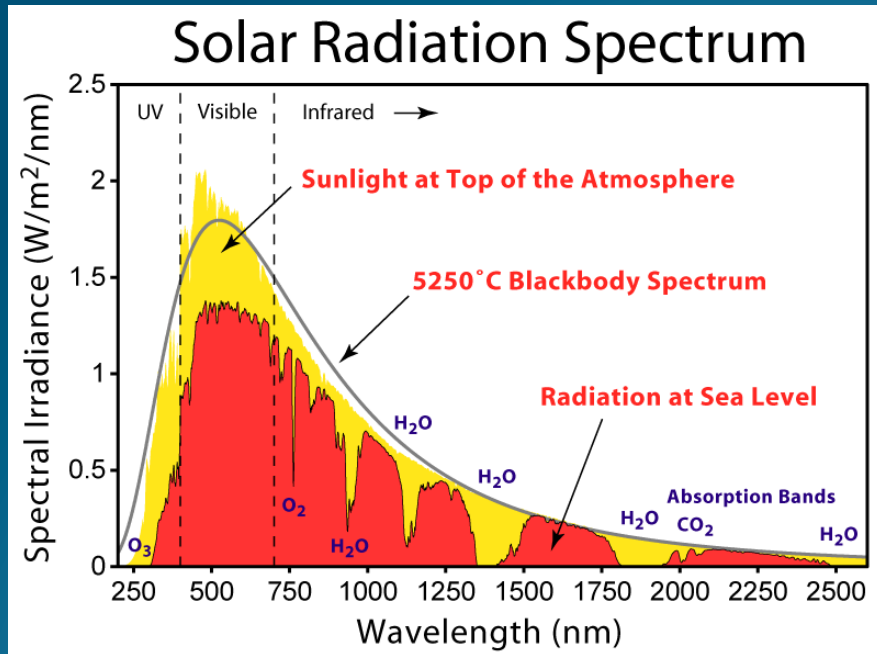
Remote
sensing
Microphysics

LIDAR

Radar

Dense
GNSS
network





hbarbosa@if.usp.br

www.fap.if.usp.br/~hbarbosa