

A satellite image of Earth showing the continent of South America and the surrounding Atlantic Ocean. The image is used as a background for the text.

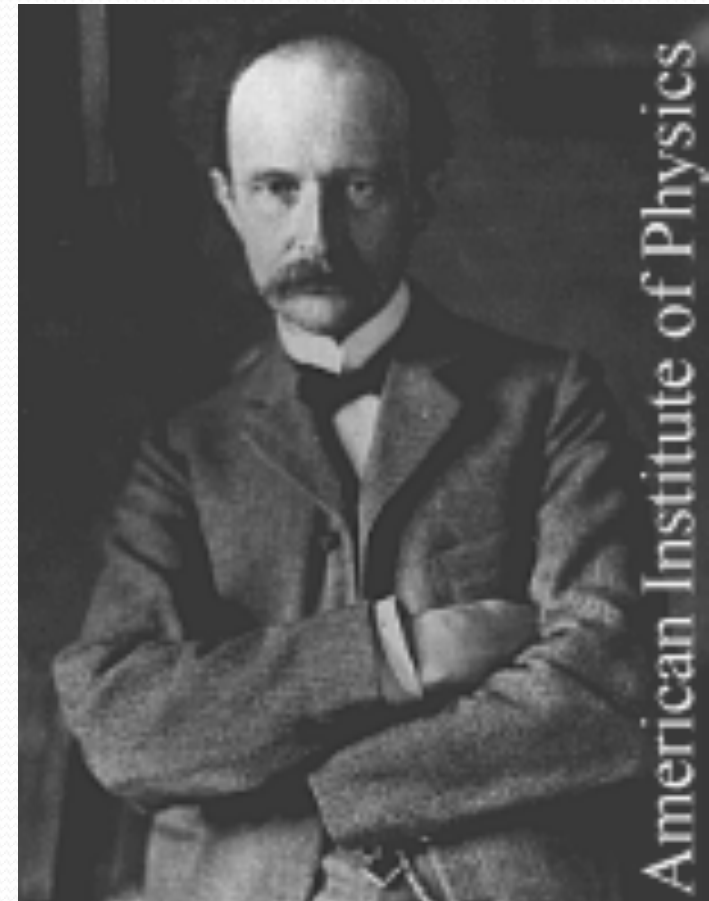
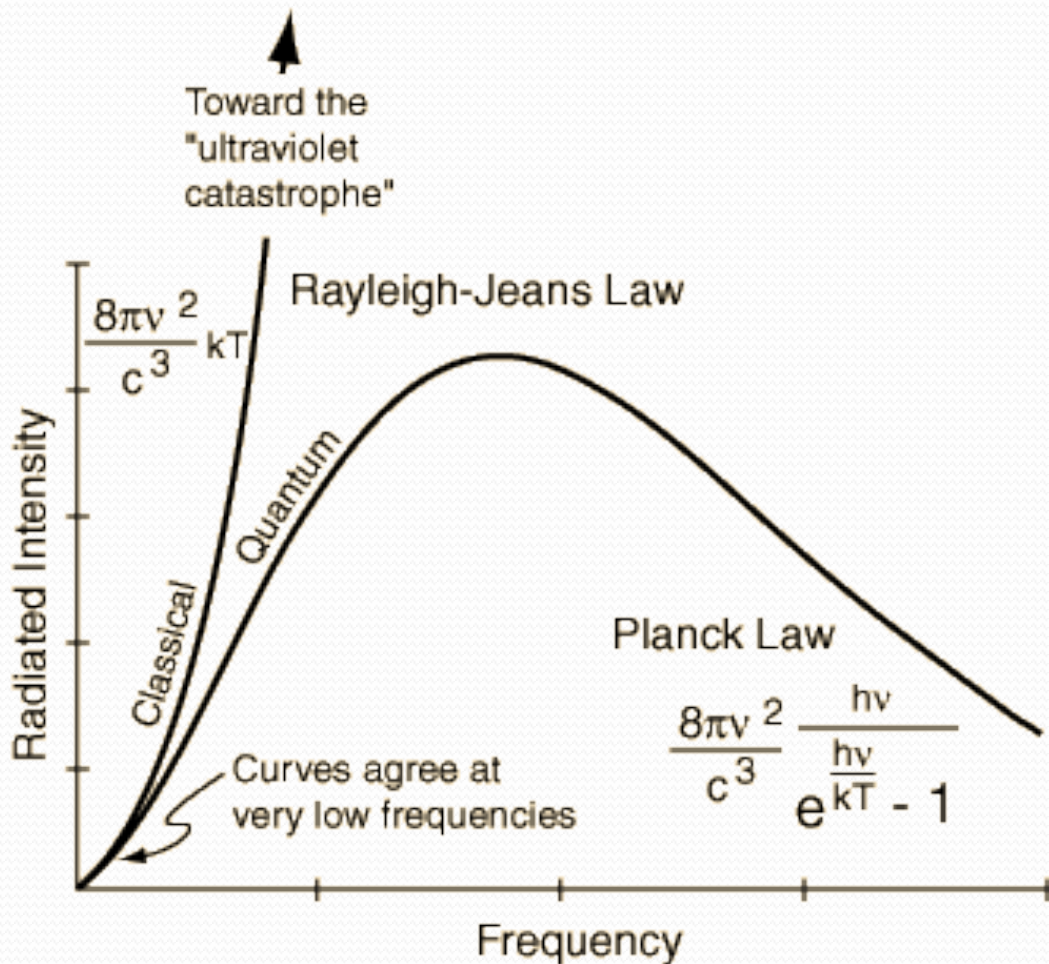
# Radiação atmosférica, aula 2

Física Atmosférica, 2019

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

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

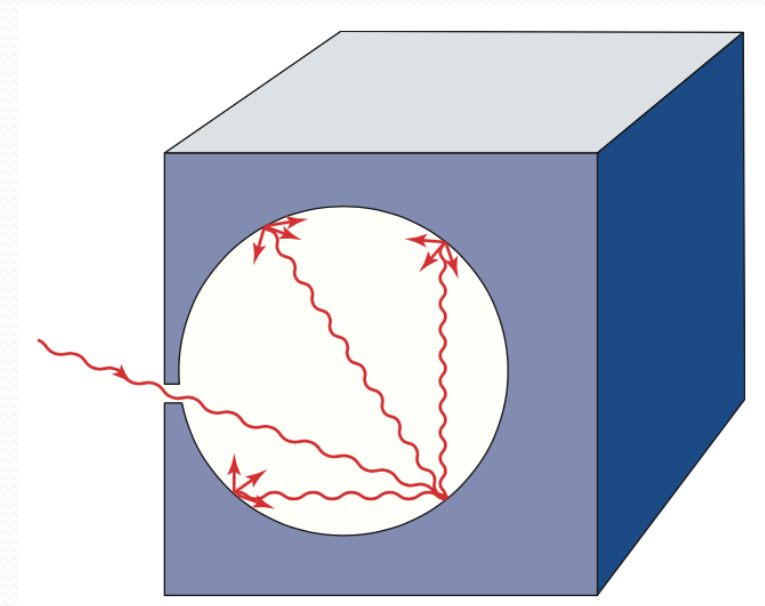
# Um pouco de física quântica



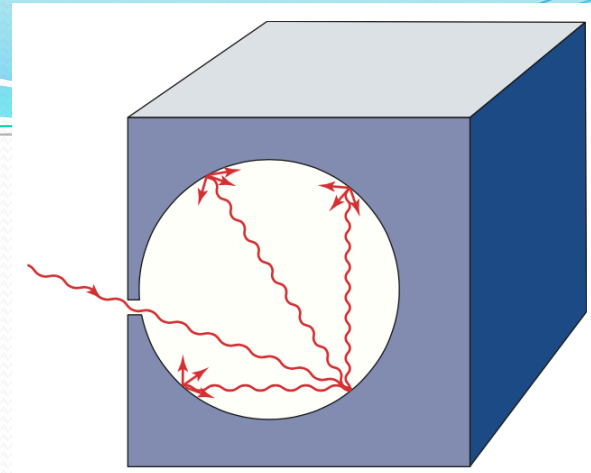
# No século 19

Uma grande atenção foi dada

- Ao estudo das propriedades térmicas de vários objetos (ex. Propagação do calor - Fourier, 1822).
- Ao estudo do eletromagnetismo (ex. 1831 Faraday, 1834 Lenz, 1873 Maxwell).



# Corpo negro

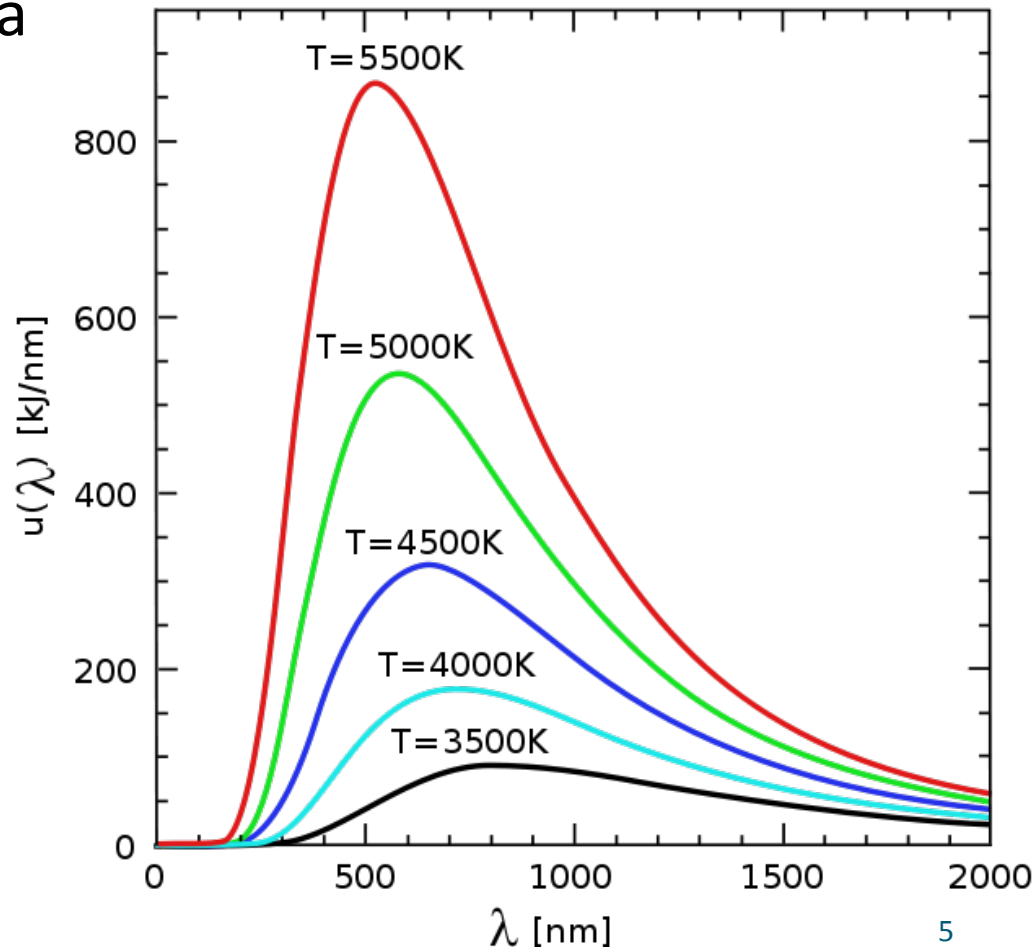


- Modelo idealizado de um objeto capaz de absorver toda a radiação incidente sobre ele.
  - Não reflete radiação incidente: ele é um absorvedor perfeito
- Em equilíbrio térmico, a absorção e a emissão de radiação tem que ser iguais.
  - Ele é também um emissor perfeito.
- O espectro (radiação em função do comprimento de onda) tem caráter universal.



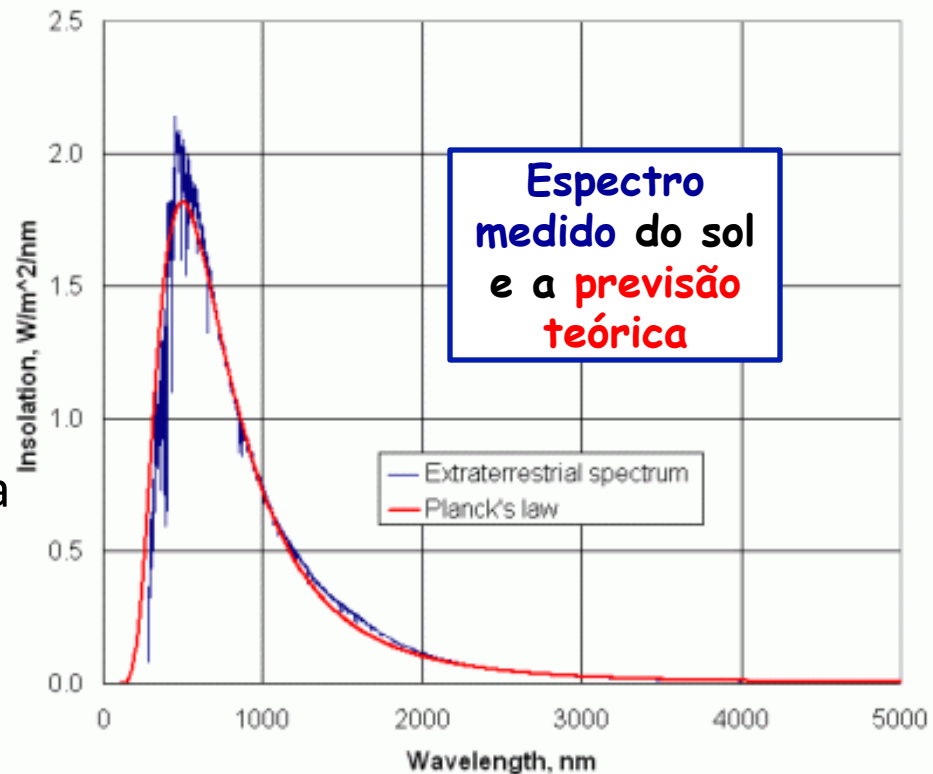
# Radiação de corpo negro

- Os corpos negros à mesma temperatura, independentemente de sua composição, emitem radiação com o mesmo espectro.
- A distribuição da radiação emitida em função da frequência depende só da temperatura do corpo



# Radiação de corpo negro: a teoria

- Como é a potência irradiada por um corpo negro a uma determinada temperatura?
- A potência irradiada é nula para comprimentos de onda muito pequenos
- Ela cresce rapidamente com o aumento do comprimento de onda
- Atinge um valor máximo para um determinado  $\lambda$
- Depois decai mais lentamente à medida que o comprimento de onda cresce
- Aproxima-se de zero novamente quando  $\lambda$  se aproxima do infinito



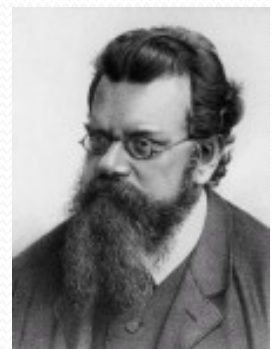
# A lei de Stefan-Boltzman



- Em 1879 J. Stefan verificou empiricamente que a potência emitida por um objeto era proporcional à quarta potência de sua temperatura:

$$P_{rad} = A\sigma T^4$$

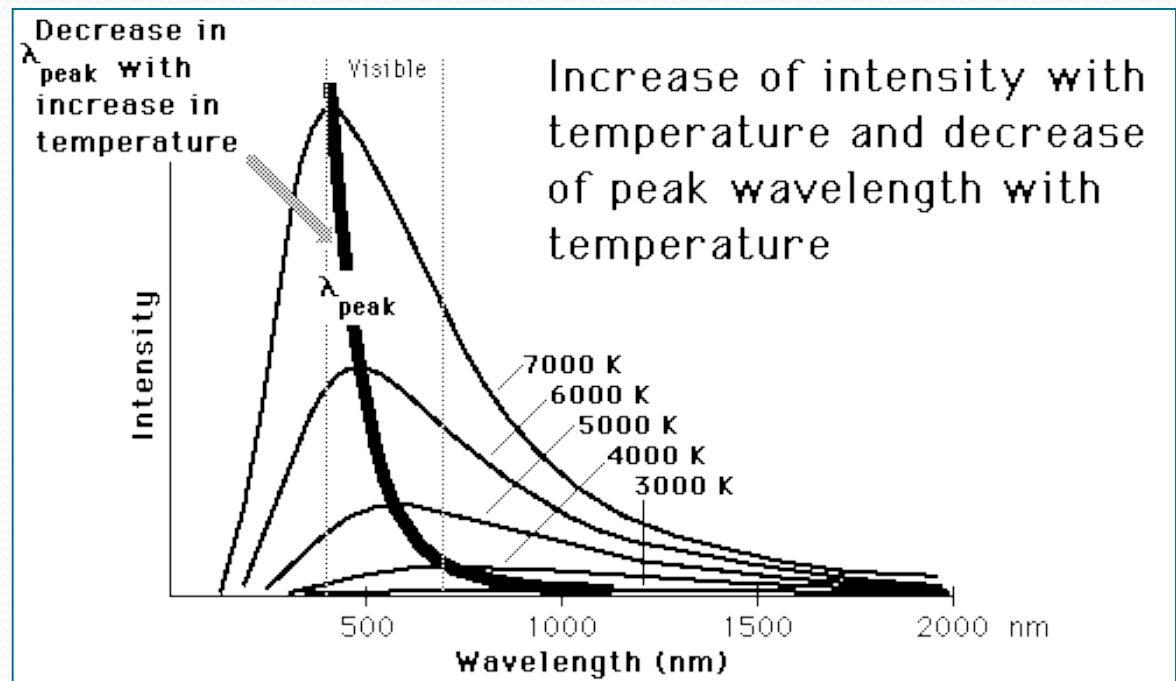
- $P_{rad}$  é a energia emitida por unidade de tempo, por unidade de área de um corpo a uma temperatura  $T$ .
- $A$  é a área do emissor



- Em 1884 Boltzman provou essa lei teoricamente.
  - $\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$  é a cte. de Stefan-Boltzman

# A lei do deslocamento de Wien

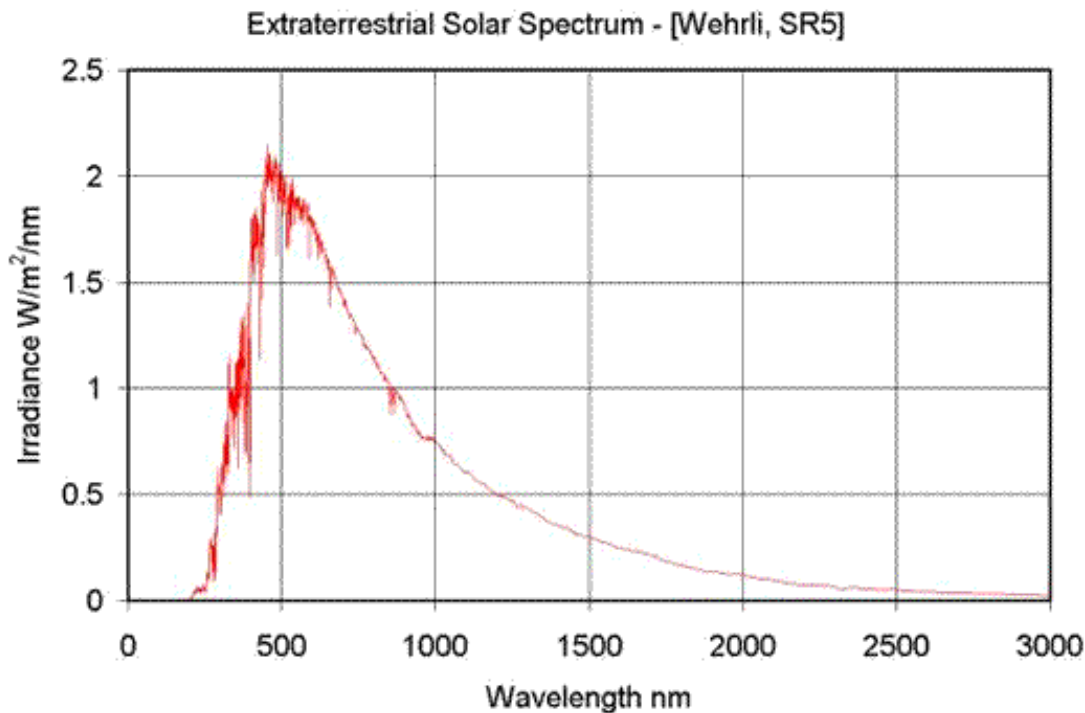
- Em 1893 Wien deduziu, através da termodinâmica, uma fórmula para a relação do comprimento de onda (ou a frequência) do pico com a temperatura:
- $\lambda T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$





# Temperatura de um corpo negro

- A lei do deslocamento de Wien permite encontrar a temperatura de um corpo negro (temperatura de cor).
- **Sol** :  $\lambda_{\max} = 475\text{nm}$  (amarelo esverdeado) »  $T=6100\text{K}$
- **Estrela Polar**:  $\lambda_{\max} = 350\text{nm}$  (ultravioleta) »  $T=8300\text{K}$

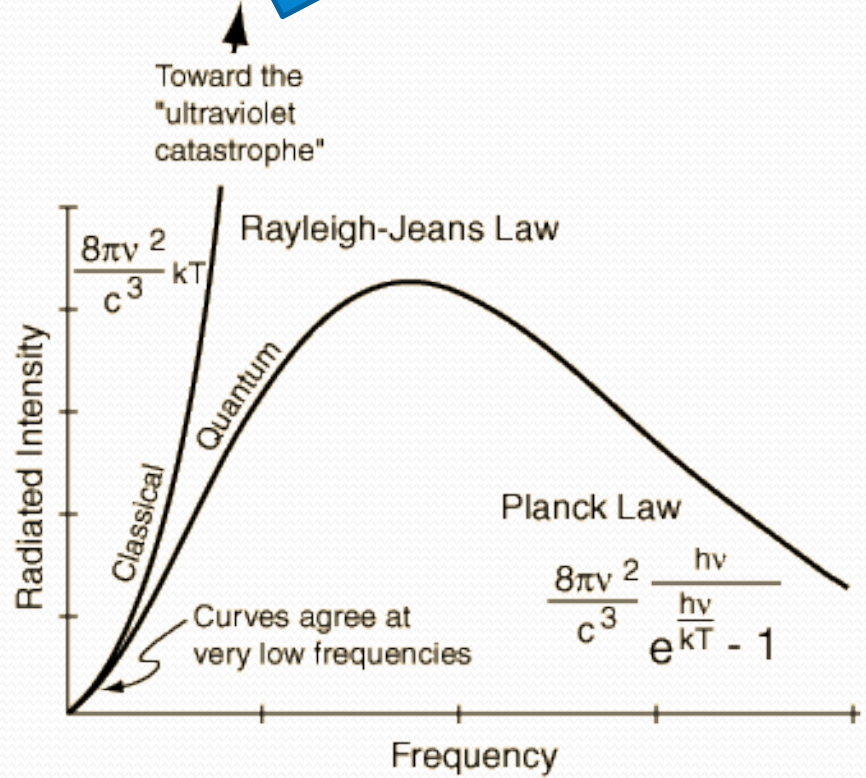


Wehrli, C.: *Extraterrestrial Solar Spectrum*, Publication no. 615, World Radiation Center (PMO/WRC) Davos Dorf, Switzerland, July 1985

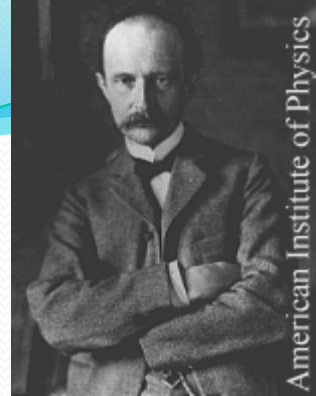
# A distribuição de energia da radiação de corpo negro

- No final do século XIX, com as melhorias no aparato experimental (O. Lummer, E. Pringsheim, H. Rubens e F. Kurlbaum), foi possível medir a potência (ou a radiância espectral) para um grande intervalo de frequências.
- Nessa época os físicos J.W.S. Rayleigh e J.H. Jeans fizeram o cálculo da distribuição de frequências da radiação de corpo negro, baseado em hipóteses da física clássica.

Totalmente discrepante da distribuição medida! Havia alguma concordância só para baixas frequências



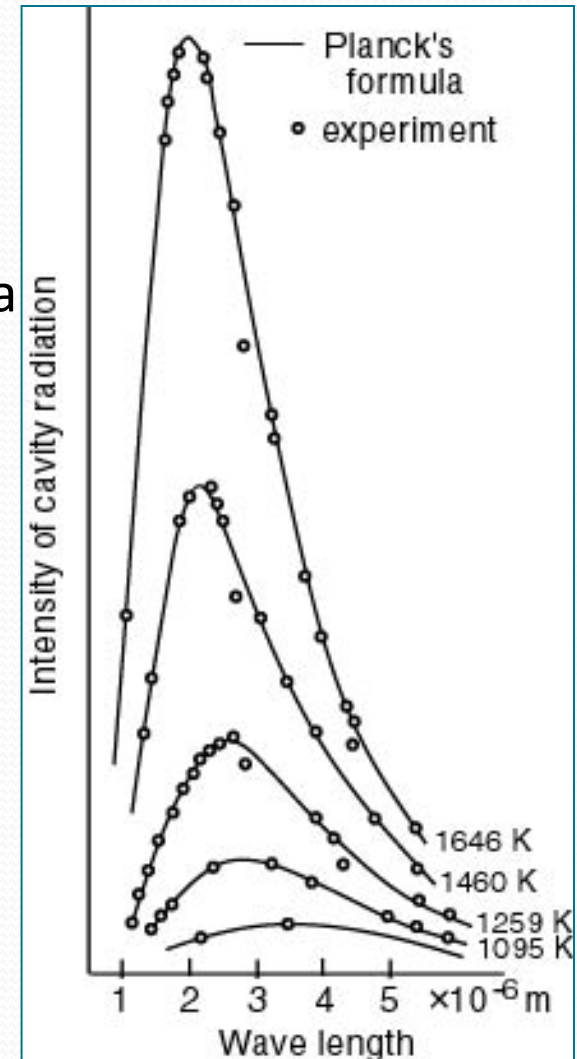
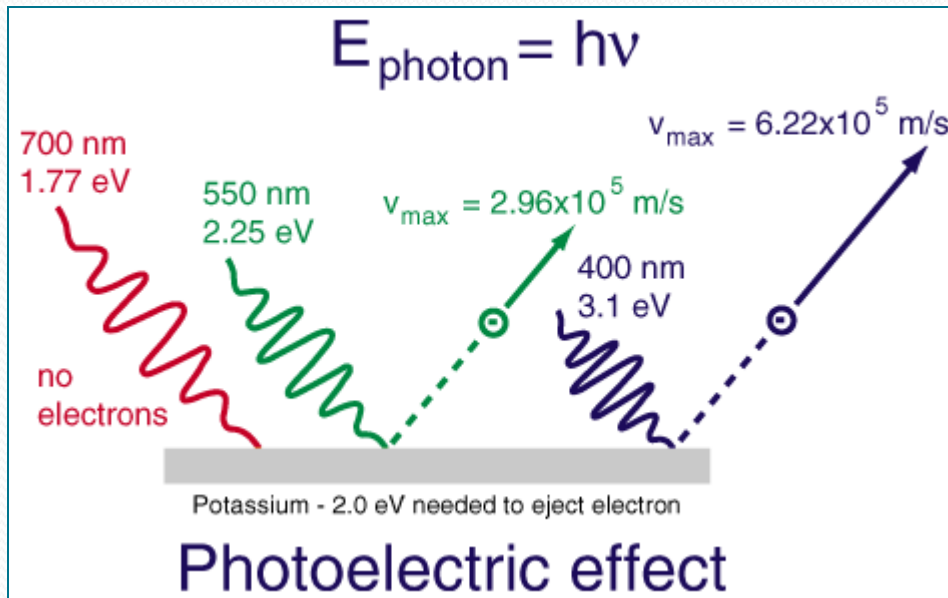
# A hipótese de Planck



- A ciência avança muitas vezes com revoluções, mas as pessoas têm, em geral, uma grande dificuldade em aceitar conceitos revolucionários.
- Na tentativa de explicar o comportamento da distribuição da radiação de corpo negro em função do comprimento de onda, em **1900**, Max Planck conseguiu reproduzir a forma da curva experimental considerando que **a energia associada à radiação de corpo negro** não era uma variável contínua (física clássica), mas **discreta**:
  - A energia radiante é emitida em pequenos “pacotes”, ou quanta (1 pacote= 1 quantum)
  - Cada quantum tem uma energia proporcional à frequência da radiação:  **$E=h\nu = hc/\lambda$**

# A fórmula de Planck

- A ideia da quantização da energia era tão revolucionária que o próprio Planck, na época em que a postulou não estava certo se ela era apenas um artifício matemático ou a descrição correta do fenômeno natural.
- A hipótese da quantização da energia não foi aceita até **1905** quando Einstein a usou para explicar o efeito fotoelétrico.





# A fórmula de Planck

- A fórmula (ou Lei) de Planck descreve a intensidade de radiação (irradiância) emitida por unidade de área da superfície emissora, por unidade de ângulo sólido, por unidade de frequência de um corpo negro ideal a uma temperatura  $T$ :

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad \text{ou} \quad I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$$

- A lei de Stephan ( $P_{\text{irr}} \sim T^4$ ) é obtida integrando-se a lei de Planck sobre todo o espectro de comprimentos de onda.
- A lei de Wien ( $\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m K}$ ) é obtida calculando-se o máximo da equação de Planck. Basta derivar a fórmula de Planck em função de  $\lambda$ :

$$\frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = 0$$

# Derivação da Lei de Wien

- A lei de Wien está embutida na lei de radiação de Planck, que nos diz que a intensidade irradiada vale:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad \text{para o máximo:} \quad \frac{dI}{d\lambda} = 0$$

- A constante não importa, então:

$$0 = \frac{-5}{\lambda^6} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-1} + \frac{-1}{\lambda^5} \left( e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)^{-2} e^{\frac{hc}{\lambda kT}} (-1) \frac{hc}{\lambda^2 kT}$$

- Como:

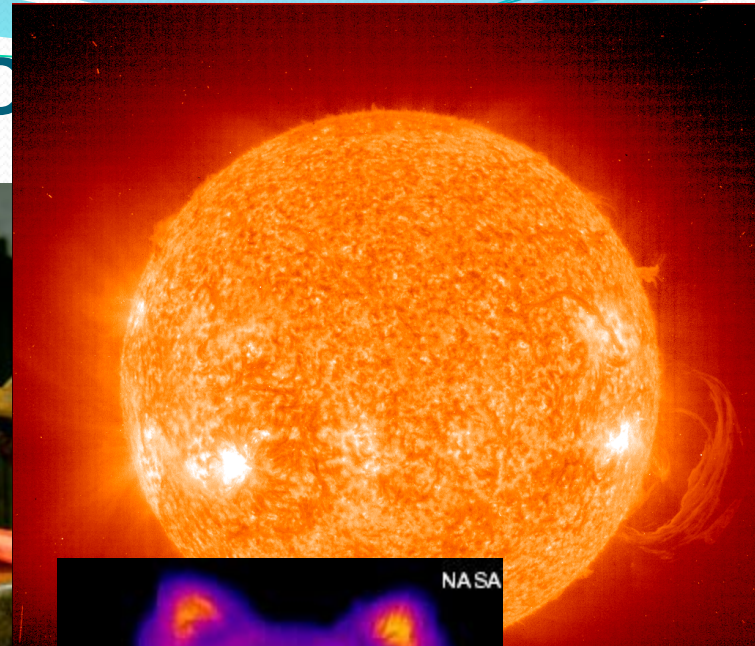
$$\begin{cases} \lambda \neq 0 \\ \lambda \neq \infty \end{cases} \Rightarrow \begin{aligned} x &= hc / \lambda kT \\ e^x &= \frac{5}{5 - x} \end{aligned} \Rightarrow \begin{aligned} x &= \frac{hc}{\lambda kT} = 4.965... \\ \lambda T &= 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

# Corpo negro real

- Nenhum objeto real é um corpo negro perfeito!
  - **carvão negro** tem uma absorptividade (e emissividade) quase igual a 1, mas somente para algumas frequências, que incluem a radiação visível  
→ a absorptividade (e emissividade) é muito mais baixa no infravermelho distante.
  - A pele dos seres humanos é quase um corpo negro perfeito para a radiação infravermelha, mas certamente não para o caso de frequências mais altas

# Exemplos de “bons” co

- Visível:

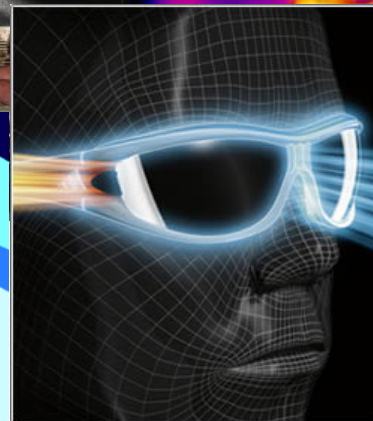
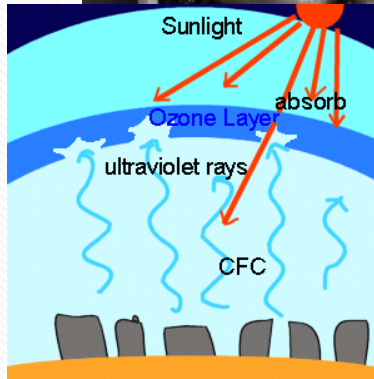


- Infravermelho:



tem o  
nm (IV)  
tb  
e ondas  
io

- Ultravioleta:





# Radiação

Um corpo a temperatura  $T$  em um meio a temperatura  $T_0$ .

- Emissão de radiação (Lei de S.B.)

$$P_{rad}^{Emitida} = A\varepsilon\sigma T^4$$

- $\varepsilon$  é a emissividade do corpo e depende do material.  $\varepsilon = 1$  significa um corpo negro ideal.  $S$  é um fator geométrico.

$$P_{rad}^{Absorvida} = A\mu\sigma T_0^4$$

- Absorção de radiação do meio (Lei de S.B.)
  - $\mu$  é a absortância do corpo e depende do material.  $\mu = 1$  significa um corpo negro ideal.

# Corpo negro: definição



- A emissividade ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = \left( \frac{\text{quantidade de energia emitida por um corpo real}}{\text{quantidade de energia emitida por um corpo negro}} \right)_{\text{T}}$$

- importante: a definição é válida para corpos na mesma temperatura  $\mathbf{T}$
- $\varepsilon$  é um coeficiente adimensional .
- caracteriza a habilidade relativa da superfície de um corpo real (não negro) de emitir radiação.

# Qual a T da fotosfera do Sol?

- Dados:  $F_{terra} = 1368 Wm^{-2}$

$$d = 1.5 \times 10^{11} m$$

$$R = 7 \times 10^8 m$$

- Primeiro, calculamos o fluxo na superfície do Sol:

$$F_{Sol} R^2 = F_{terra} d^2$$

$$F_{Sol} = 1368 \times \left( \frac{1.5 \times 10^{11}}{7 \times 10^8} \right)^2 = 6.28 \times 10^7 Wm^{-2}$$

# Qual a T da fotosfera do Sol?

- E aplicamos a lei de Stefan-Boltzmann:

$$\sigma T^4 = 6.28 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}$$

- Portanto:

$$T^4 = \left( \frac{6.28 \times 10^7 \text{ Wm}^{-2}}{5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}} \right)$$

$$T = 5570 \text{ K}$$

A temperatura de cor é diferente da temperature de corpo negro equivalente porque o Sol não é um corpo negro perfeito.

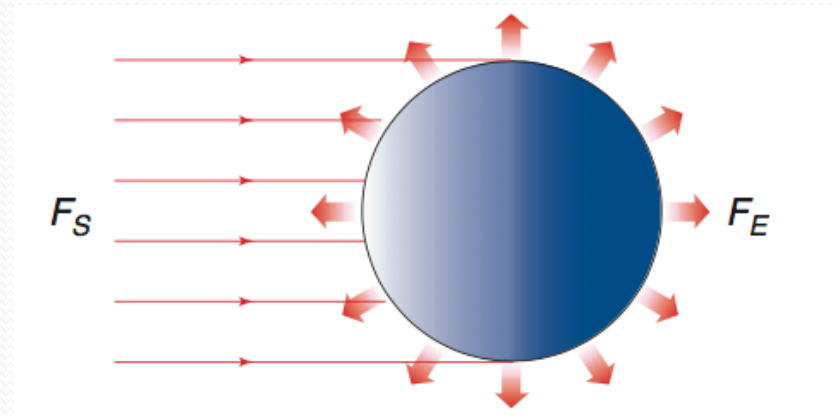


# Qual a temperatura de corpo negro da Terra?

- Dados:

$$F_S = 1368 \text{ W m}^{-2}$$

$$A = 0.3$$

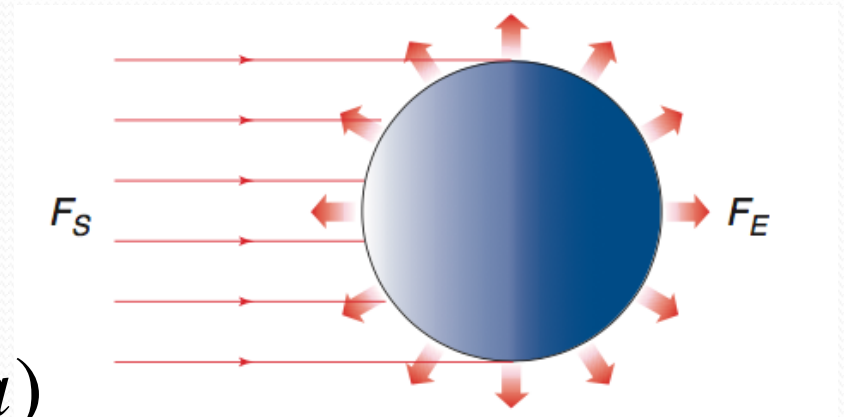


- Em equilíbrio, a temperatura da Terra não muda. Ou seja, o fluxo  $F_S$  tem que equilibrar o fluxo  $F_E$ .

# Qual a temperatura de corpo negro da Terra?

$$F_E \cdot A_{\text{sup}} = F_S \cdot A_{\text{disco}}$$

$$\sigma T^4 \cdot 4\pi r^2 = F_S \cdot \pi r^2 \cdot (1 - a)$$



$$\sigma T^4 = \frac{1368 \cdot (1 - 0.3)}{4} = 239.4 \text{ Wm}^{-2}$$

$$\Rightarrow T = \sqrt[4]{\frac{239.4 \text{ Wm}^{-2}}{5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}}} = 255 \text{ K}$$

-18 °C

# Outros planetas

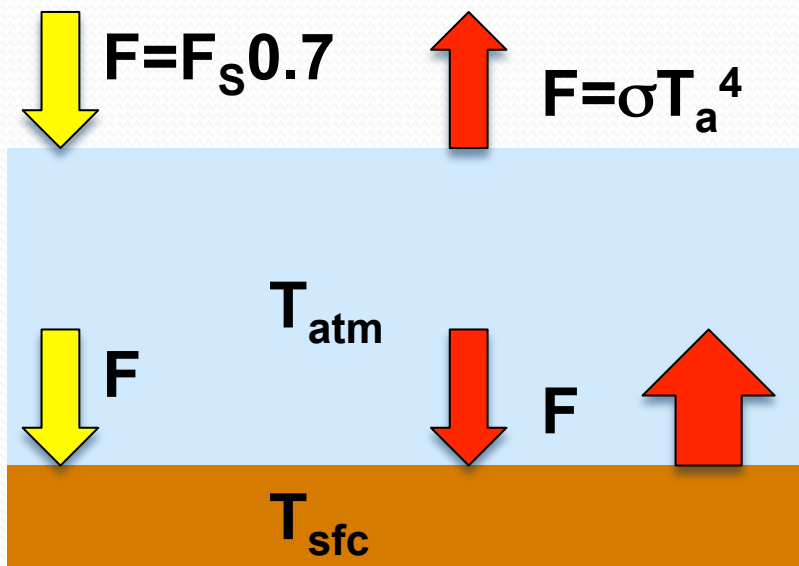
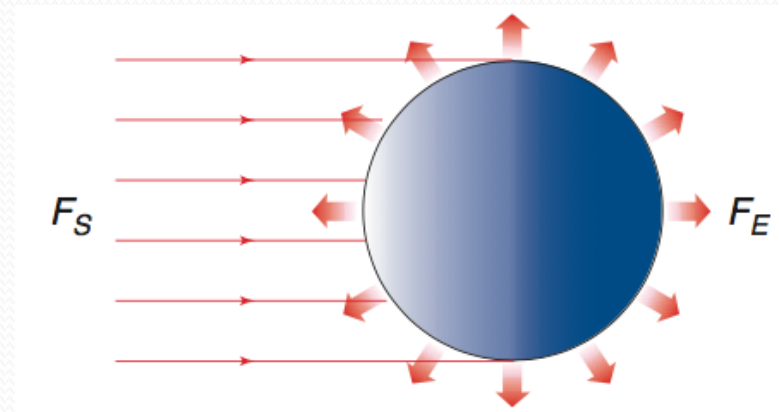
<b>Planet</b>	<b>Distance from sun<sup>a</sup></b>	<b><math>F_s</math> (<math>\text{W m}^{-2}</math>)</b>	<b><math>A</math></b>	<b><math>T_E</math> (K)</b>	<b>Surf. Temp</b>
Mercury	0.39	8994	0.06	439	440
Venus	0.72	2639	0.78	225	730
Earth	1.00	1368	0.30	255	287
Mars	1.52	592	0.17	216	218
Jupiter	5.18	51	0.45	105	

<sup>a</sup> Astronomical units are multiples of Earth–Sun distance.

# Efeito estufa

- Vamos considerar o mesmo exemplo, mas agora com uma atmosfera composta de 1 camada: que é transparente a SW e opaca a LW.

- O que muda?



$$\Rightarrow T_a = 255K$$

$$2F = \sigma T_{sfc}^4 \quad \Rightarrow T_{sfc} = 303K$$

# The Greenhouse Effect

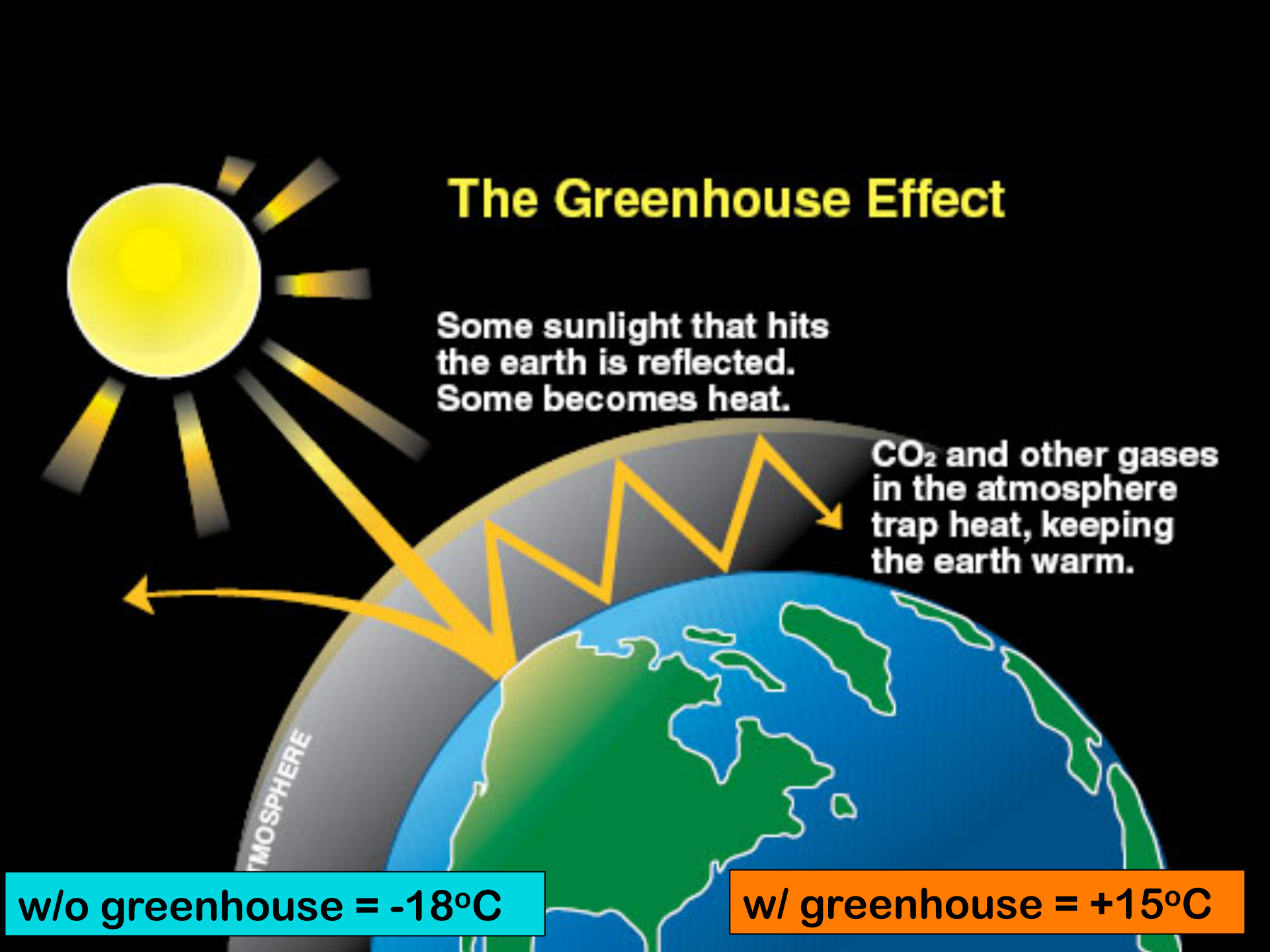
Some sunlight that hits the earth is reflected. Some becomes heat.

CO<sub>2</sub> and other gases in the atmosphere trap heat, keeping the earth warm.

ATMOSPHERE

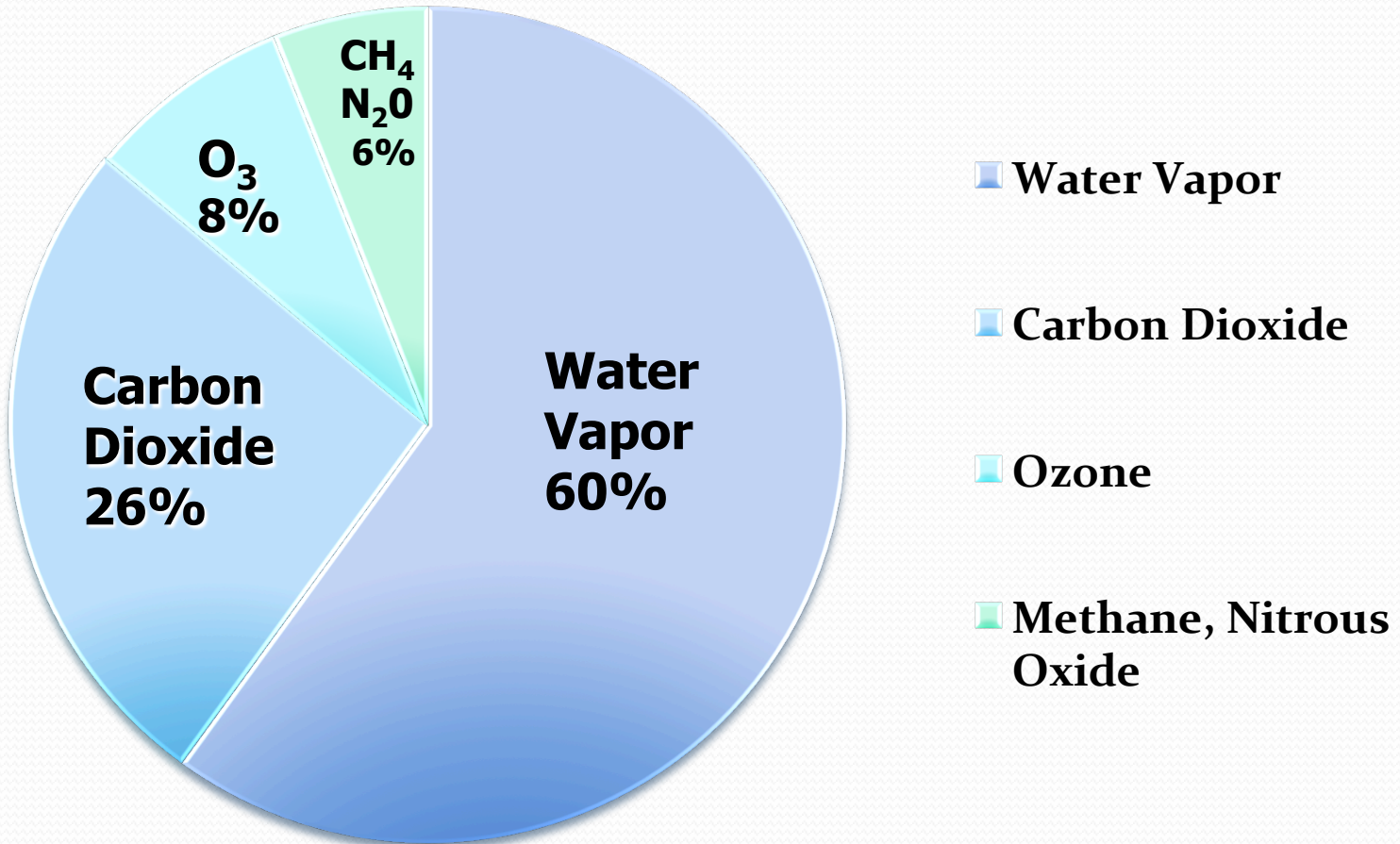
w/o greenhouse = -18°C

w/ greenhouse = +15°C





# The Natural Greenhouse Effect: clear sky

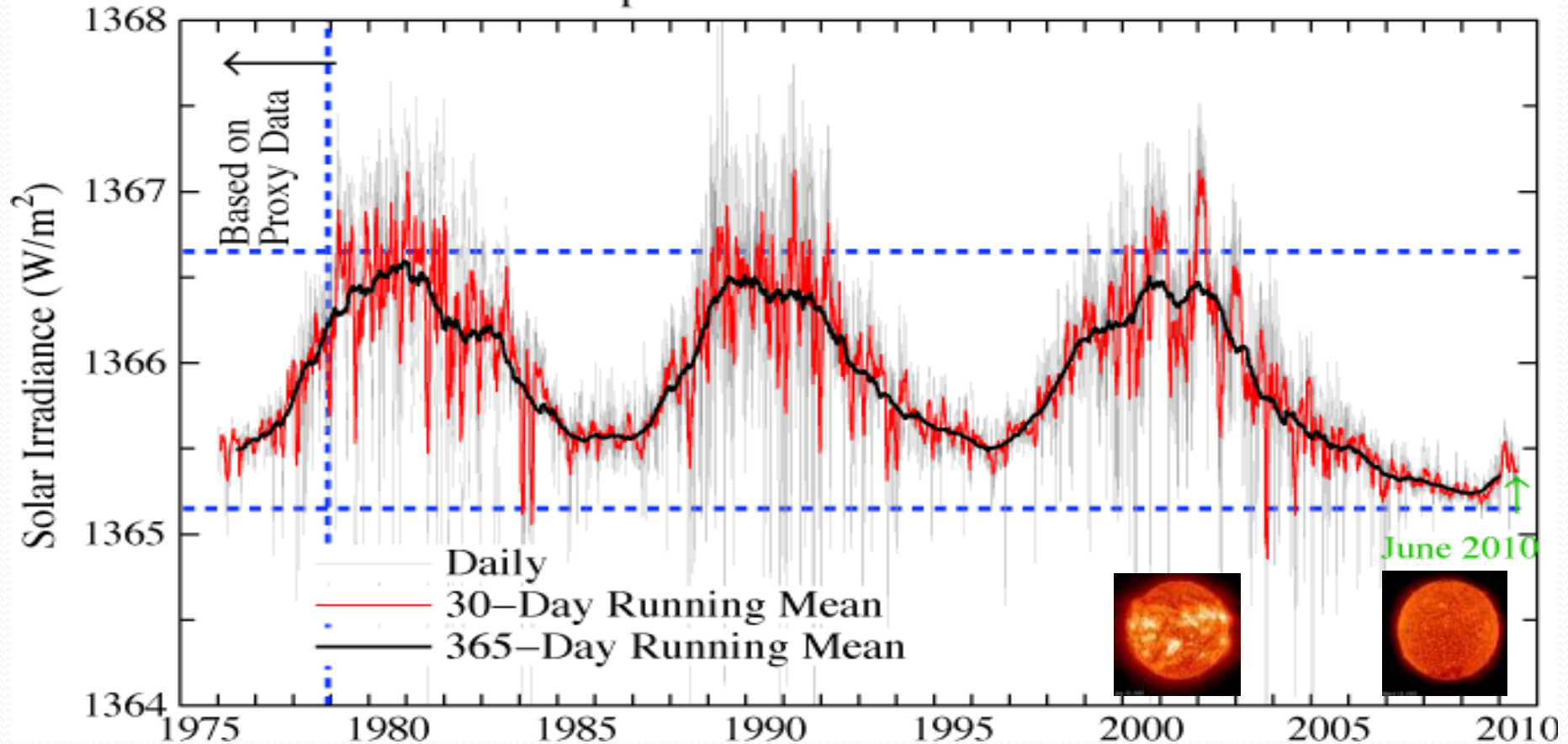


**Clouds also have a greenhouse effect**

*Kiehl and Trenberth 1997*

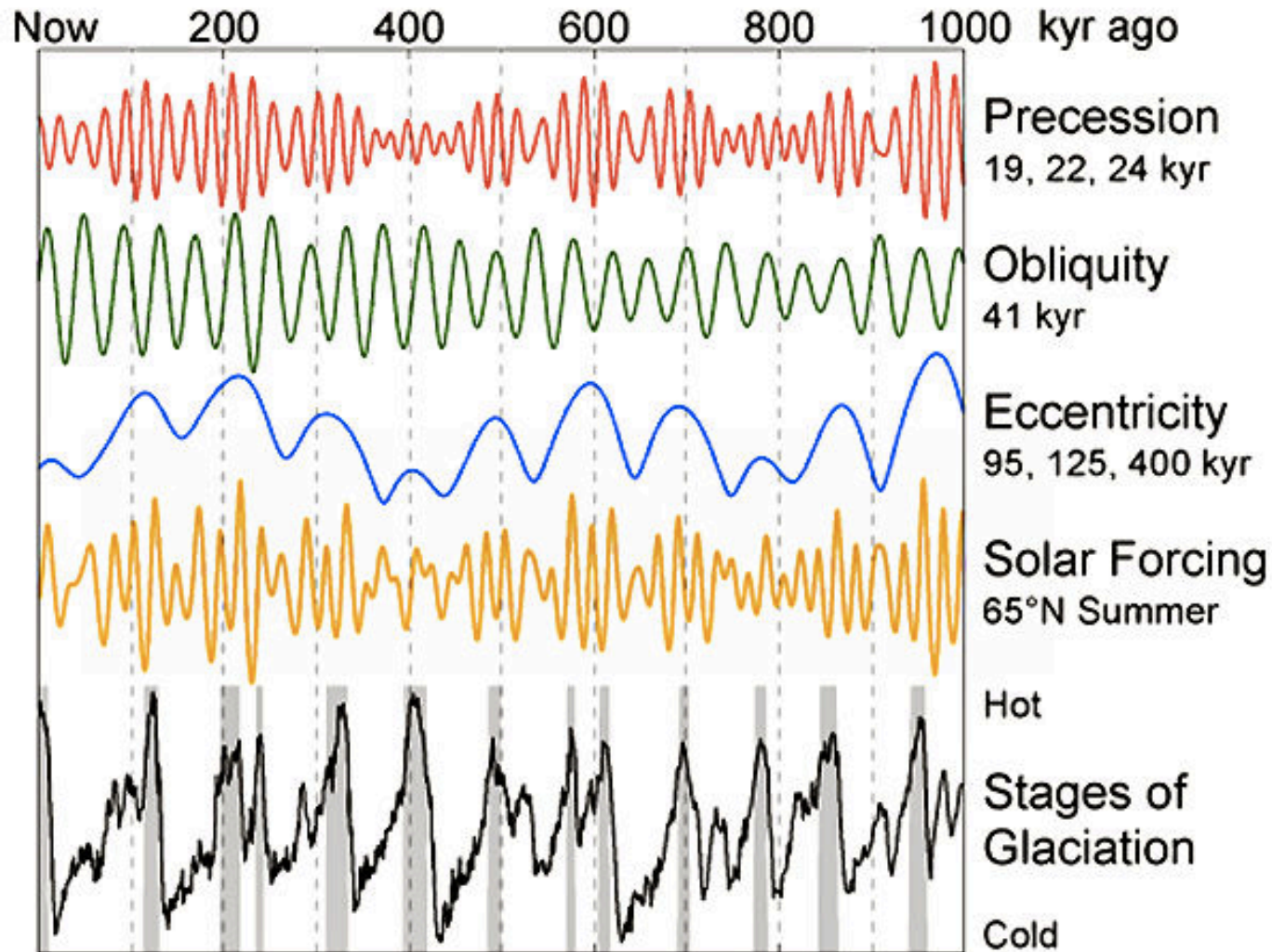
# Irradiância solar 1975-2012

Composite Total Solar Irradiance

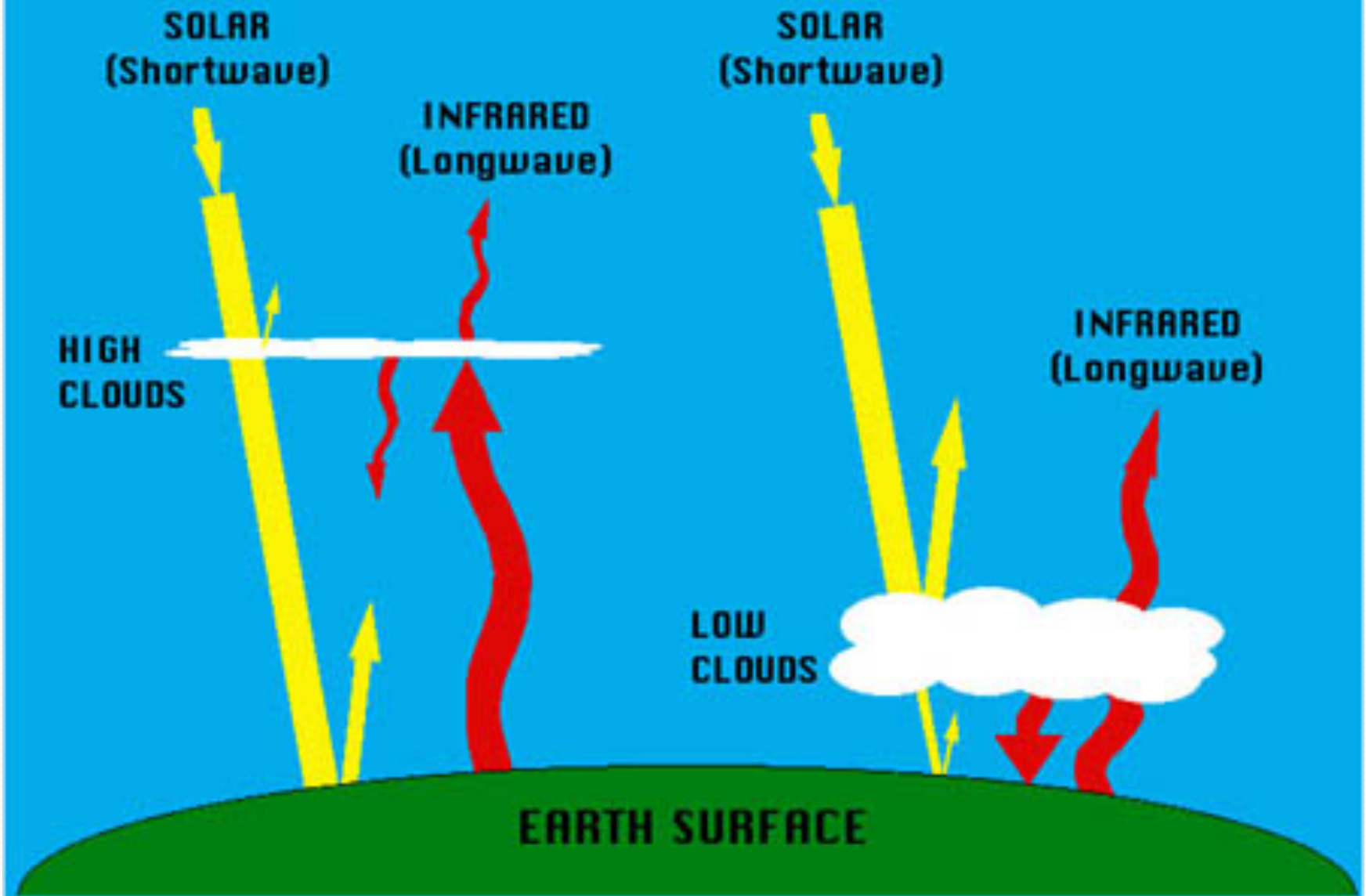


The drop of  $1.2 \text{ W m}^{-2}$  since 2001 is equivalent to  $-0.2 \text{ Wm}^{-2}$  in radiative forcing

# ...changes in Earth's orbit

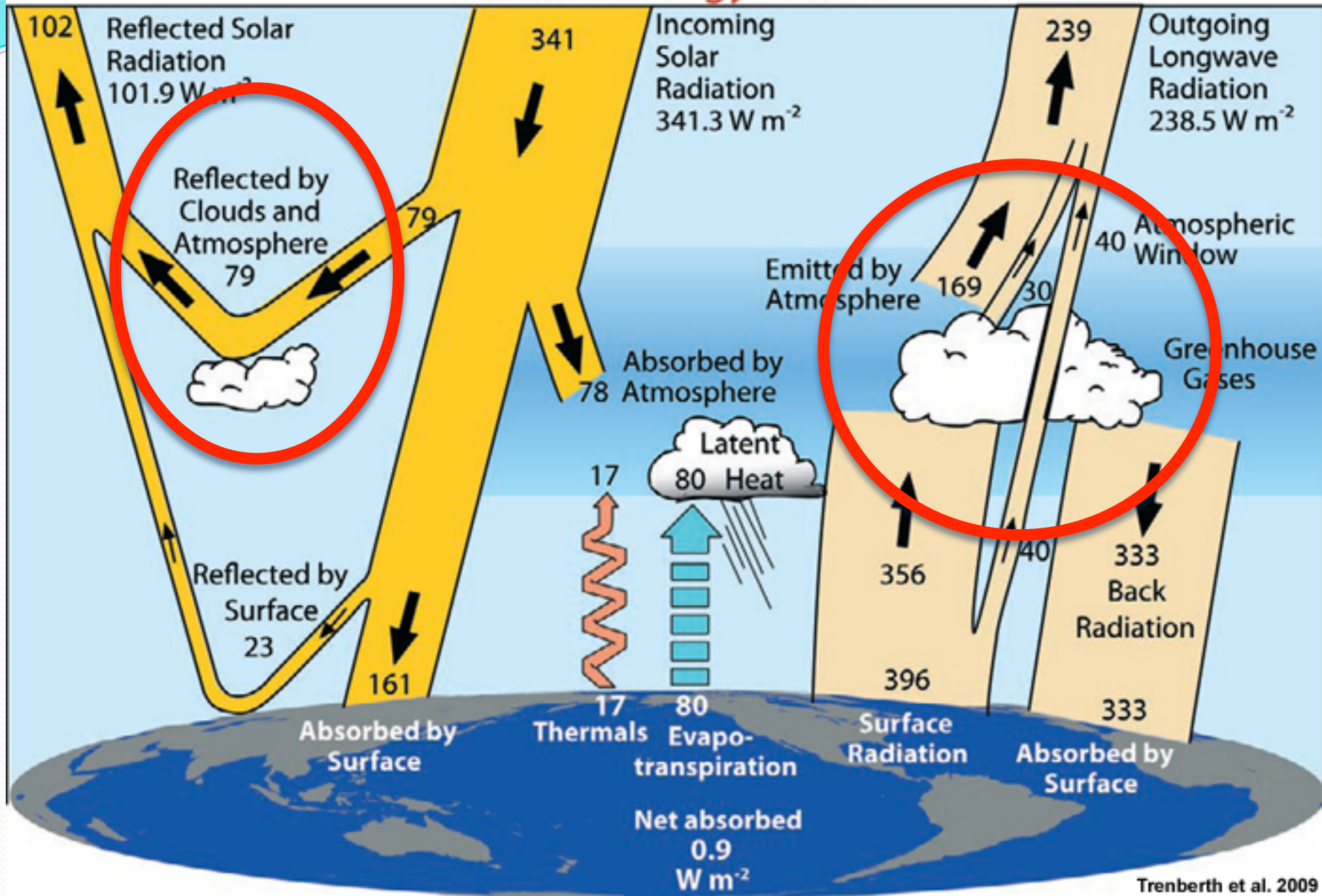


# CLOUD EFFECTS ON EARTH'S RADIATION



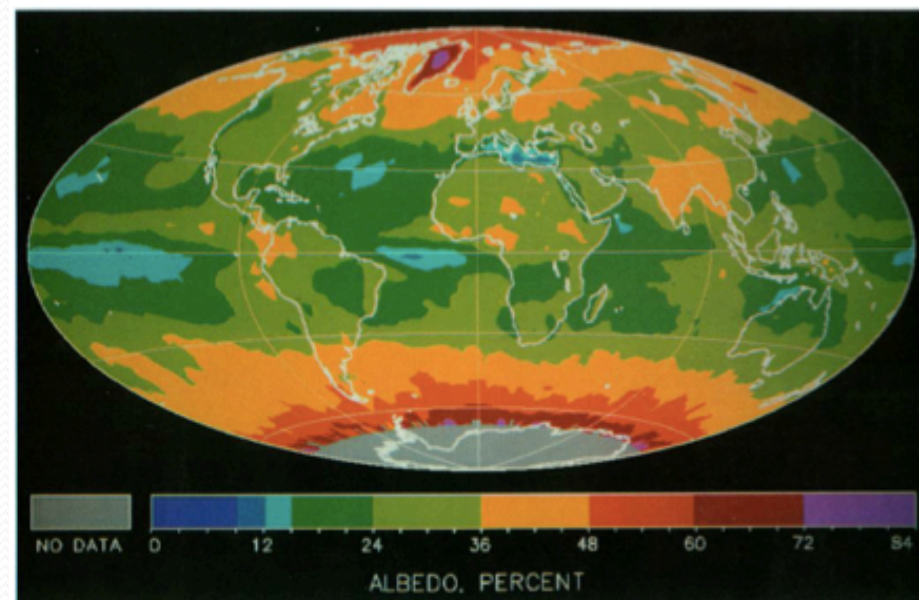
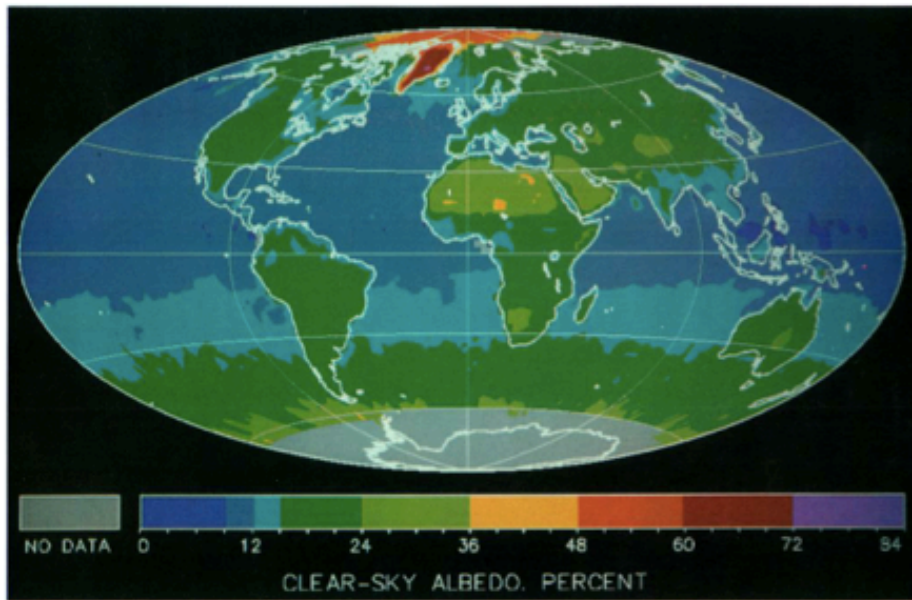


# Global Energy Flows $W m^{-2}$





# Effects of clouds on SW radiation

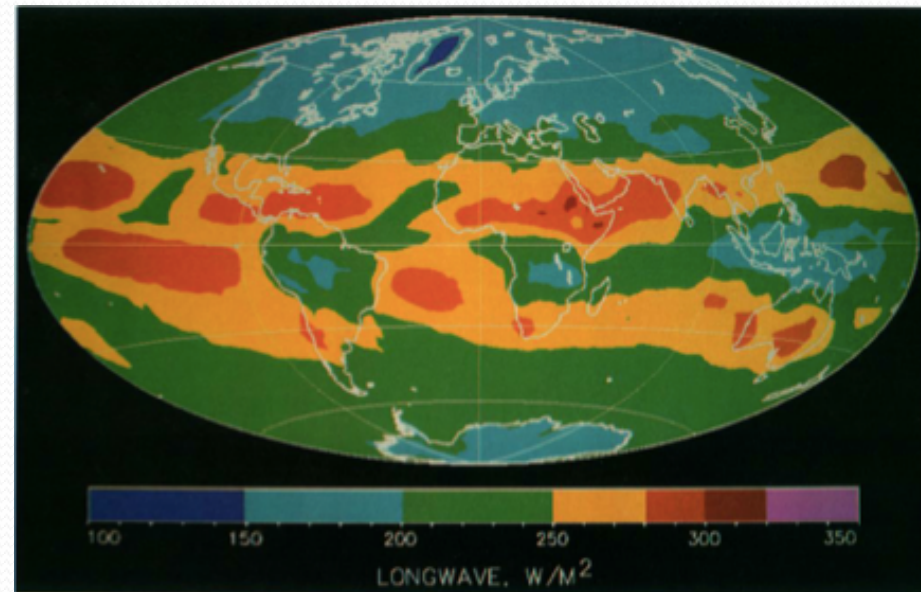
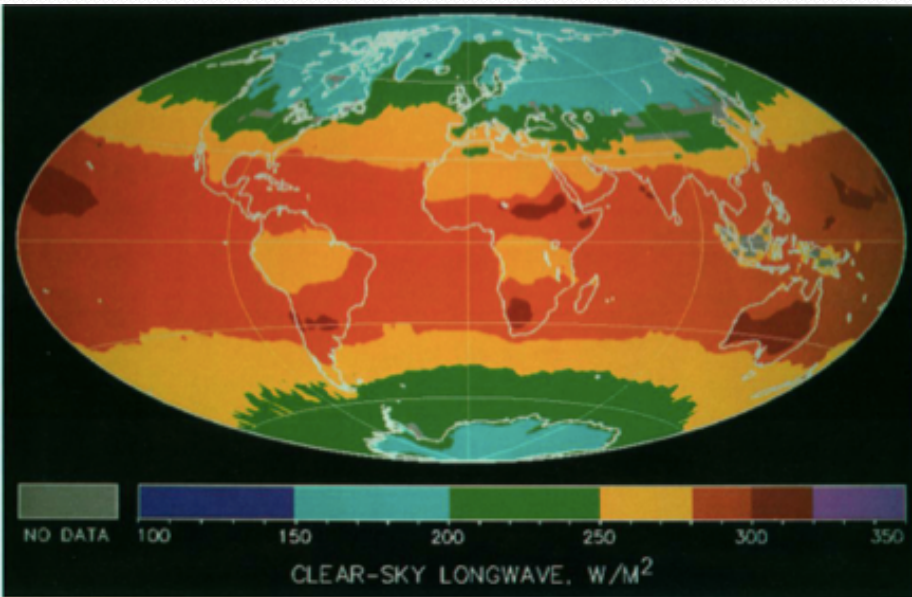


Harrison et al, JGR 1990

TABLE 1. Summary of Cloud Radiative Forcing Parameters ( $W/m^2$ )

Date	Longwave	Clear-Sky Longwave	Longwave Cloud Forcing	Shortwave Absorbed	Clear-Sky Shortwave Absorbed	Shortwave Cloud Forcing	Net Cloud Forcing
April 1985	234.5	265.8	31.3	236.5	281.6	-45.1	-13.8
July 1985	237.5	267.6	30.1	234.4	281.1	-46.7	-16.6
Oct. 1985	234.1	266.3	32.2	243.0	293.1	-50.1	-17.9
Jan. 1986	231.9	262.5	30.6	243.3	295.0	-51.7	-21.1
Annual	234.5	265.6	31.1	239.3	287.7	-48.4	-17.3

# Effects on LW radiation

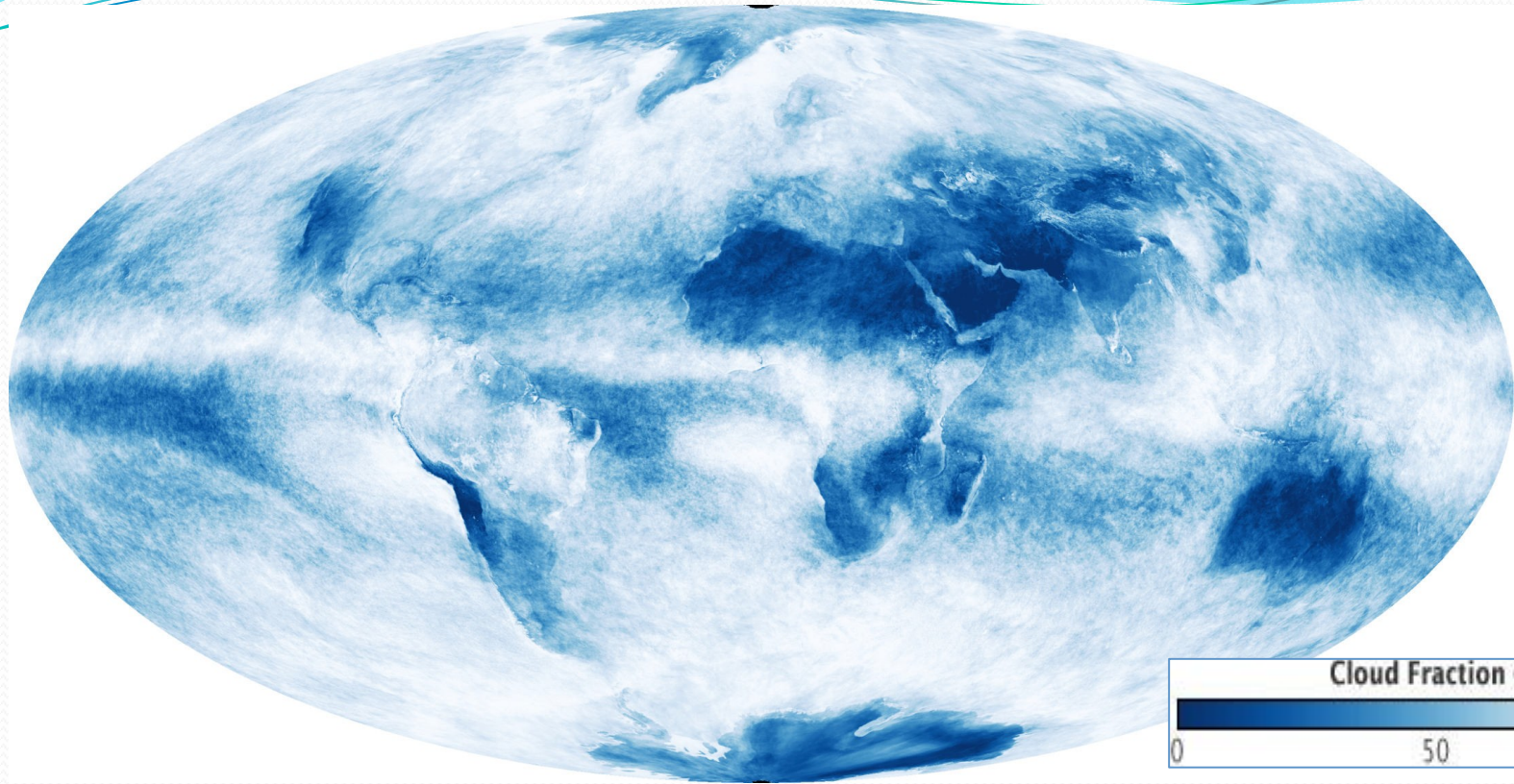


Harrison et al, JGR 1990

TABLE 1. Summary of Cloud Radiative Forcing Parameters ( $W/m^2$ )

Date	Longwave	Clear-Sky Longwave	Longwave Cloud Forcing	Shortwave Absorbed	Clear-Sky Shortwave Absorbed	Shortwave Cloud Forcing	Net Cloud Forcing
April 1985	234.5	265.8	31.3	236.5	281.6	-45.1	-13.8
July 1985	237.5	267.6	30.1	234.4	281.1	-46.7	-16.6
Oct. 1985	234.1	266.3	32.2	243.0	293.1	-50.1	-17.9
Jan. 1986	231.9	262.5	30.6	243.3	295.0	-51.7	-21.1
Annual	234.5	265.6	31.1	239.3	287.7	-48.4	-17.3

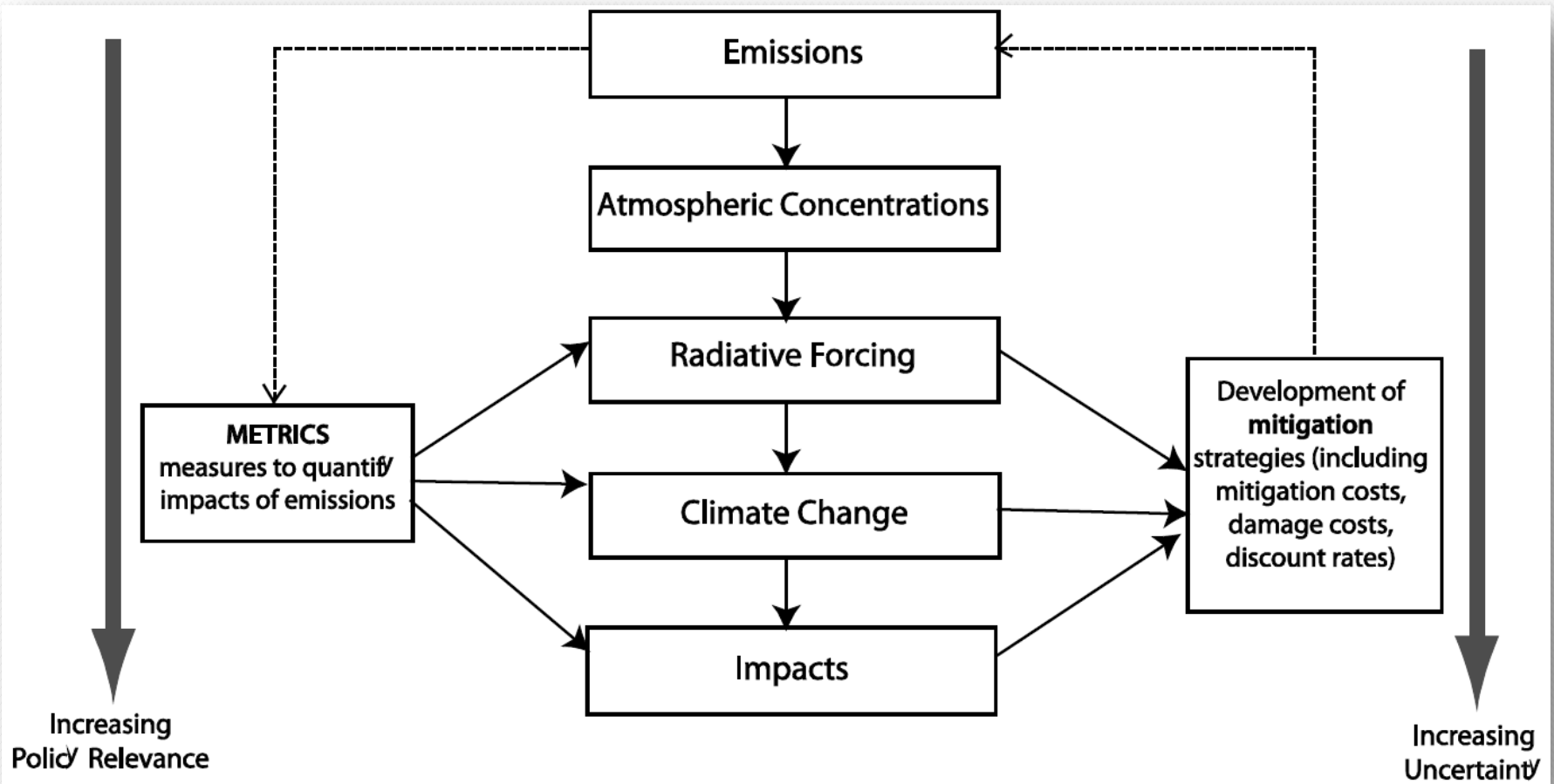




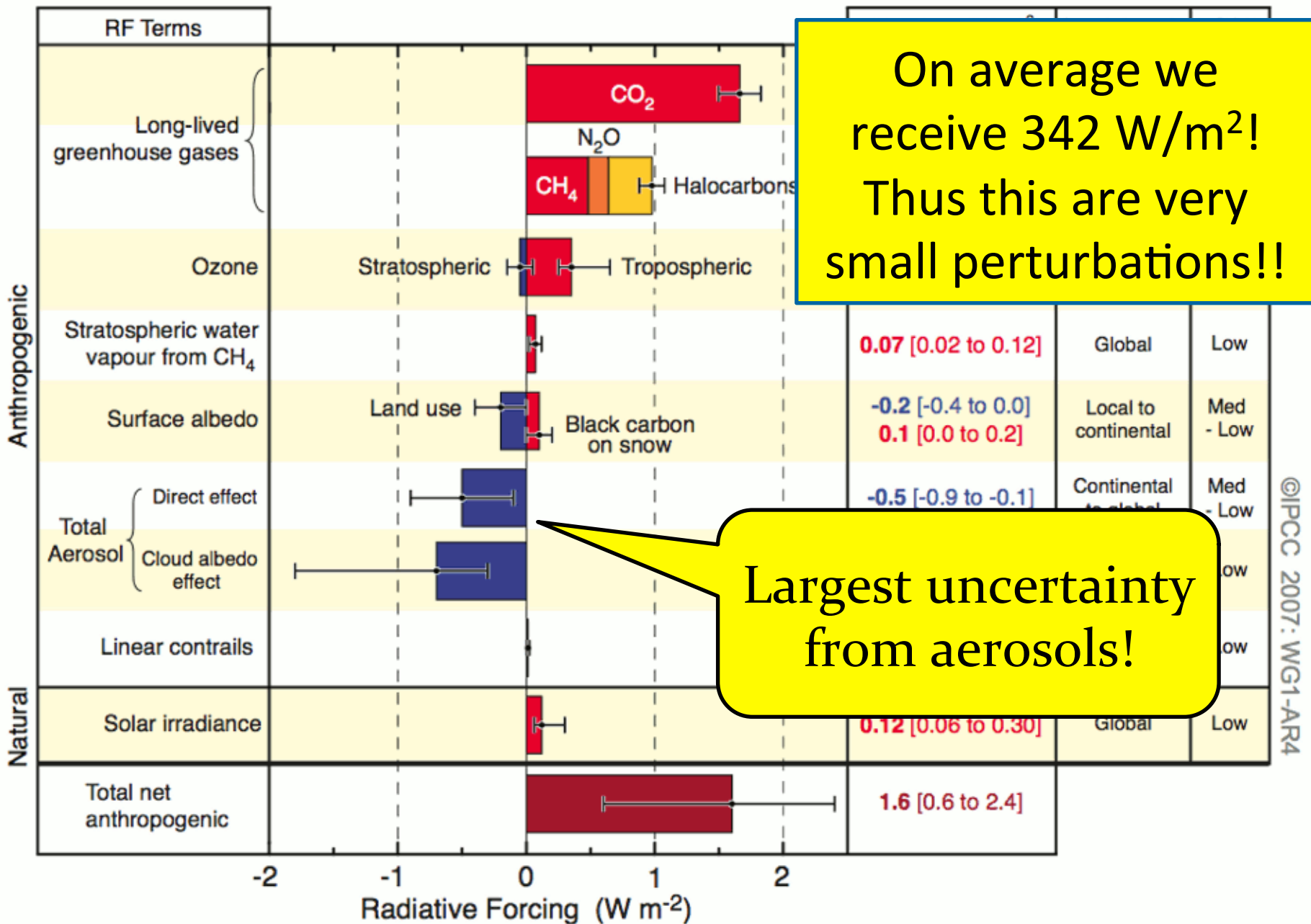
	Cloud density			All densities
	Thin	Thick	Opaque	
Cloud level	$N_e < 0.5$ $\sigma_{vis} < 1.4$	$0.5 < N_e < 0.95$ $1.4 < \sigma_{vis} < 6$	$N_e > 0.95$ $\sigma_{vis} > 6$	
High (<440 mb)	15%	15%	3%	33%
Middle (440–700 hPa)	7%	10%	9%	26%
Low (>700 hPa)		2%	47%	49%
Total	20%	23%	32%	75%

# What is Radiative Forcing?

- Change in energy flux caused by natural or anthropogenic drivers of climate change (in  $W/m^2$ )
- Positive: near-surface warming
- Puts various drivers on common scale, indicates magnitude of impact
- Includes rapid adjustments (e.g. cloud formation on aerosols)
- Stratospheric temperature adjustment included in TAR & AR4 RF; additional adjustments included in Effective RF (ERF)

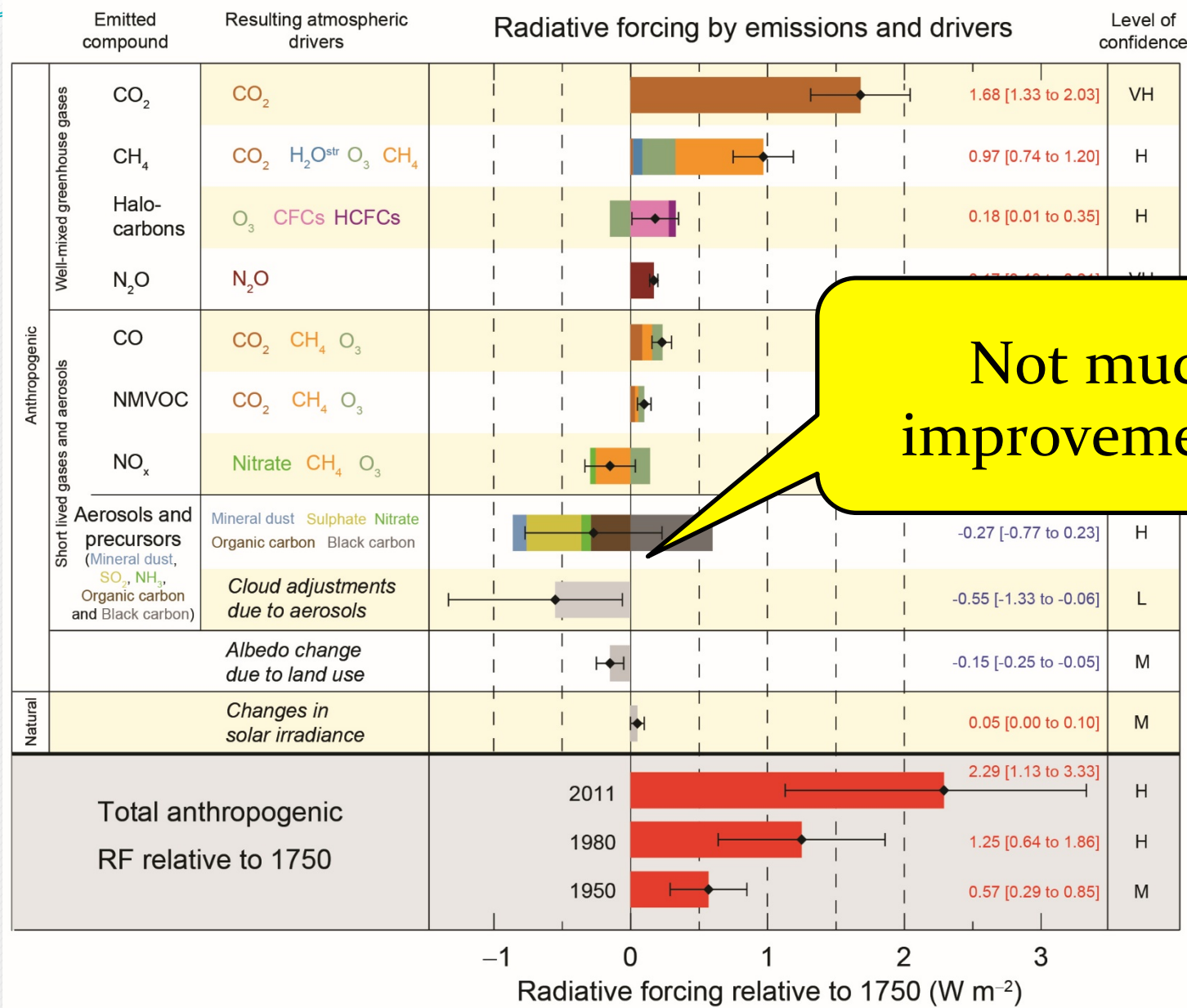


# Radiative forcings of the global climate system IPCC 2007



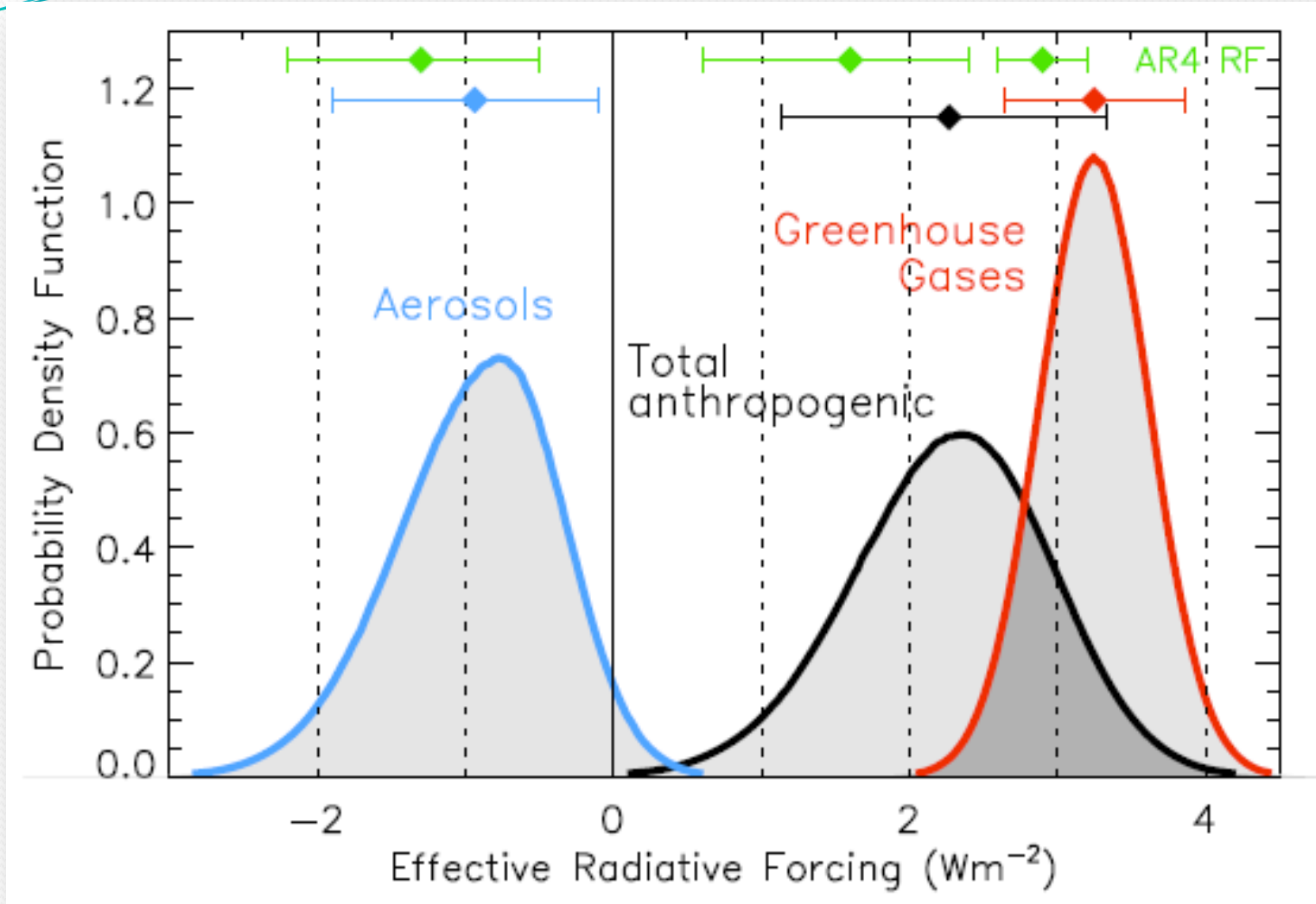


# Forçante radiativa do sistema climático global (IPCC 2013)



Not much improvement...

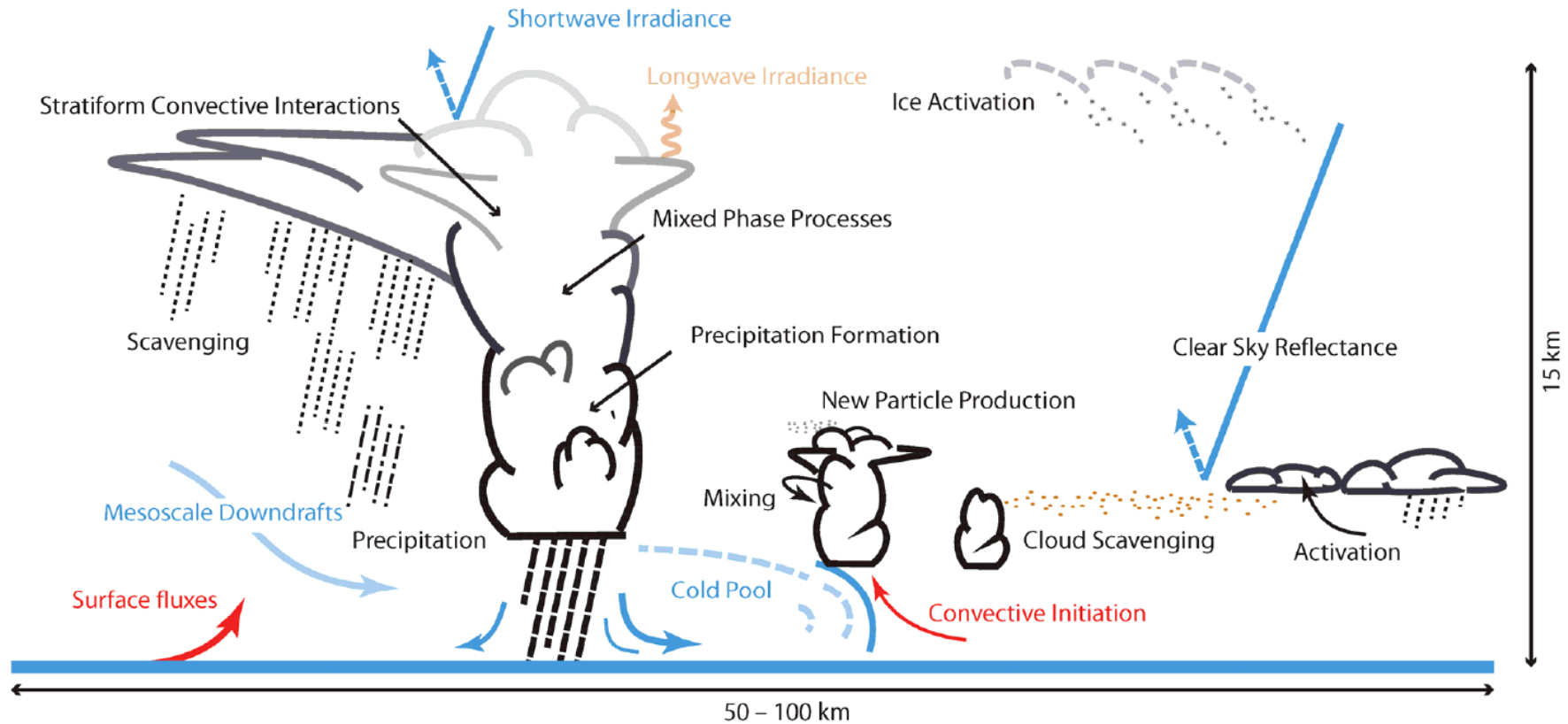
# Climate forcing



IPCC AR5, Chapter 8, 2013

“There is *high confidence* that aerosols ... have offset a substantial portion of global mean forcing from well-mixed greenhouse gases. They continue to contribute the largest uncertainty to the total RF estimate.”

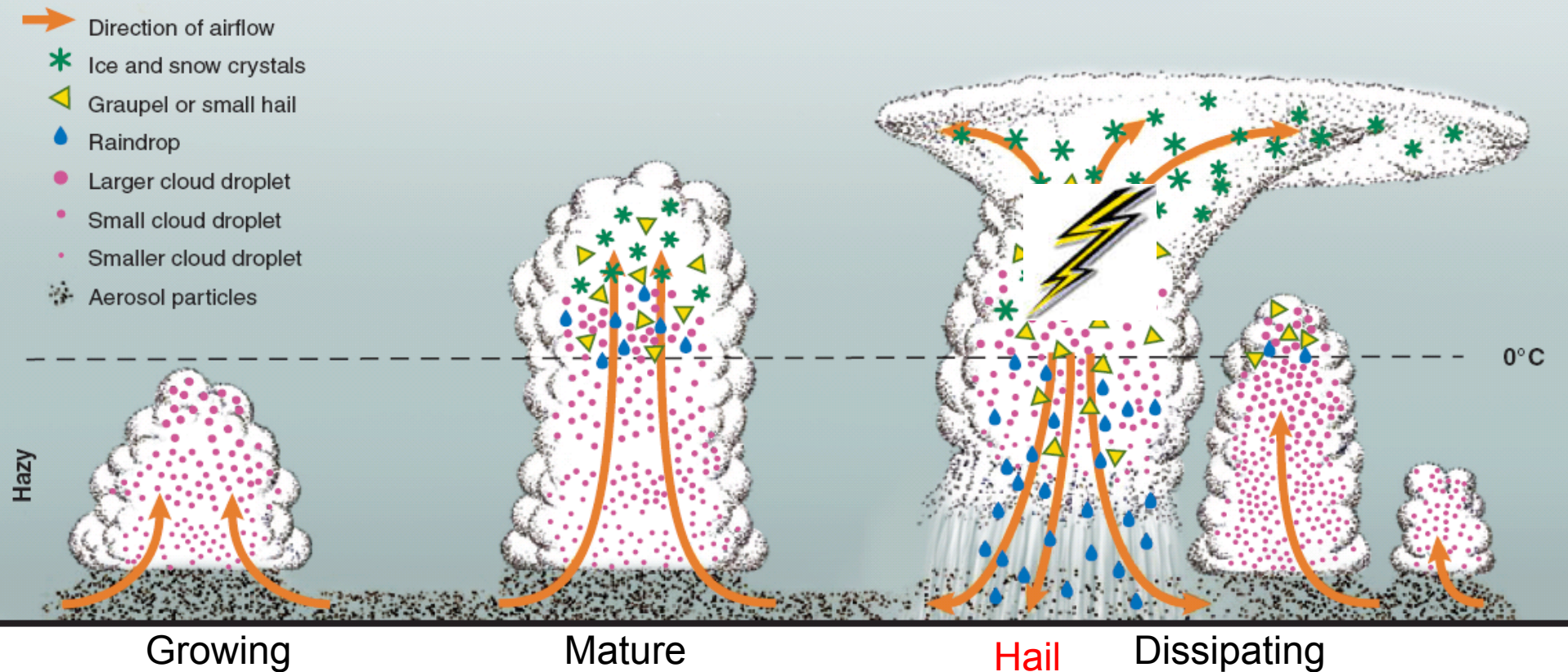
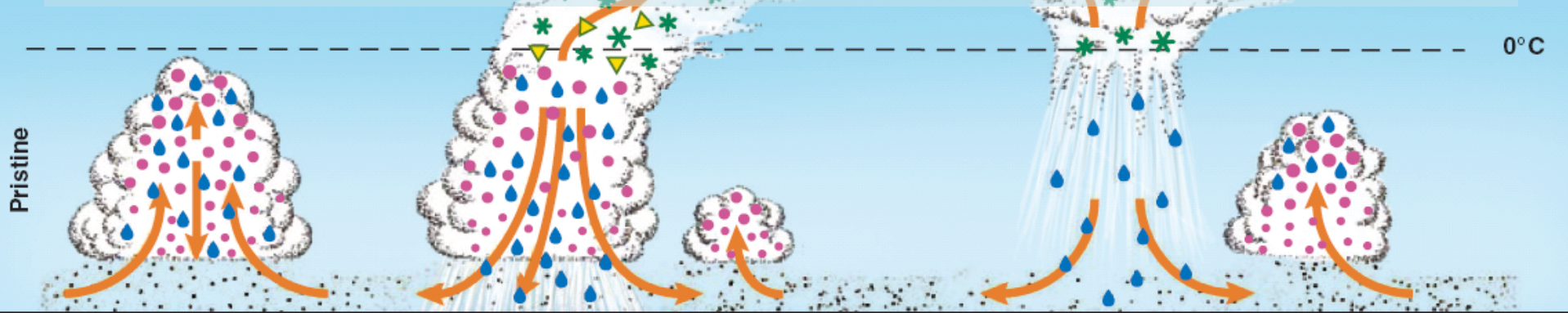
# Schematic depicting the myriad aerosol-cloud-precipitation related processes



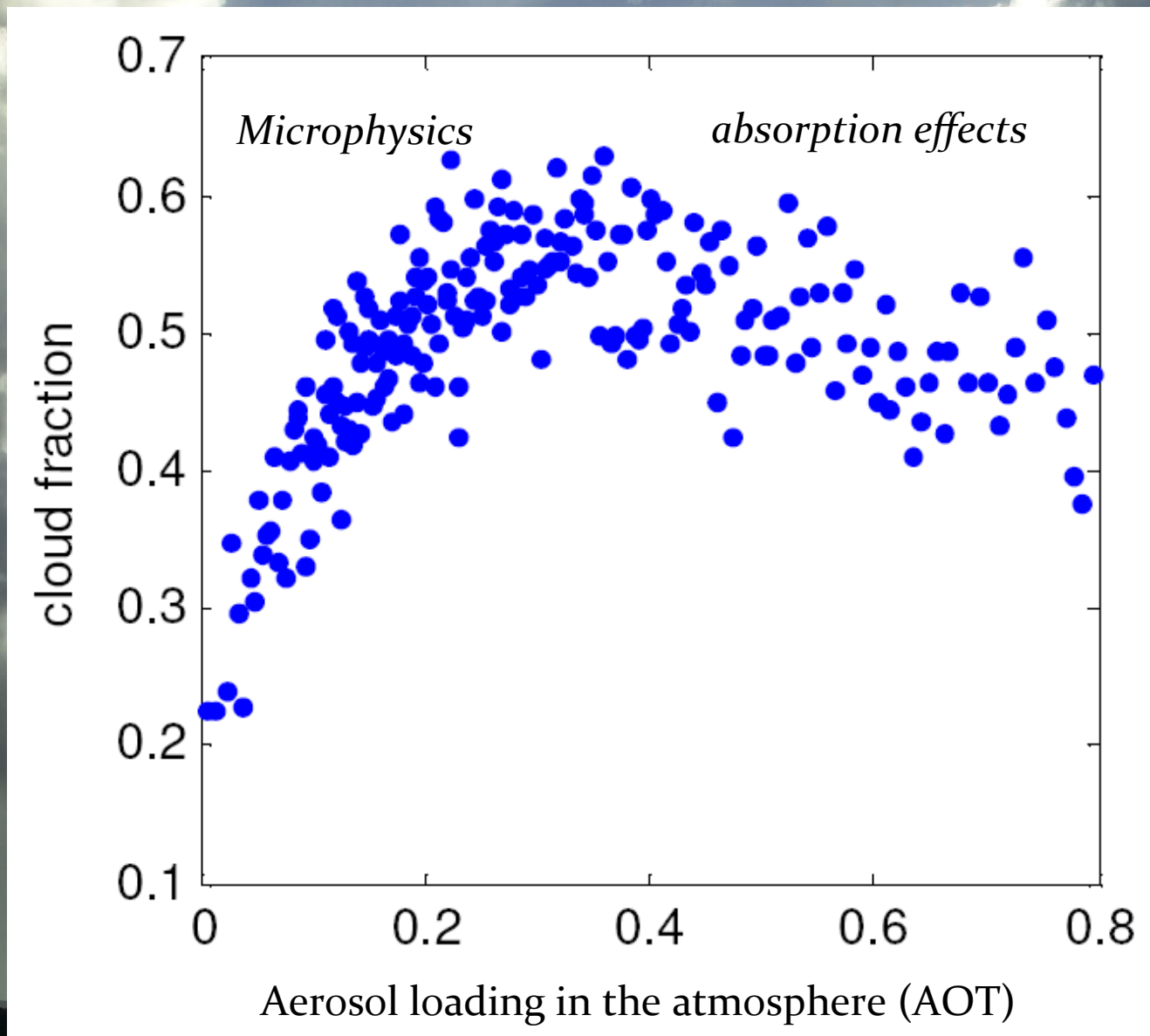
The schematic conveys the importance of considering aerosol-cloud-precipitation processes as part of an interactive system encompassing a large range of spatiotemporal scales. These processes influence the short- and longwave forcing of the system and hence climate



Rosenfeld D., U. Lohmann, G.B. Raga, C.D. O'Dowd, M. Kulmala, S. Fuzzi, A. Reissell, M.O. Andreae, 2008: Flood or Drought: How Do Aerosols Affect Precipitation? *Science*, 321, 1309-1313.



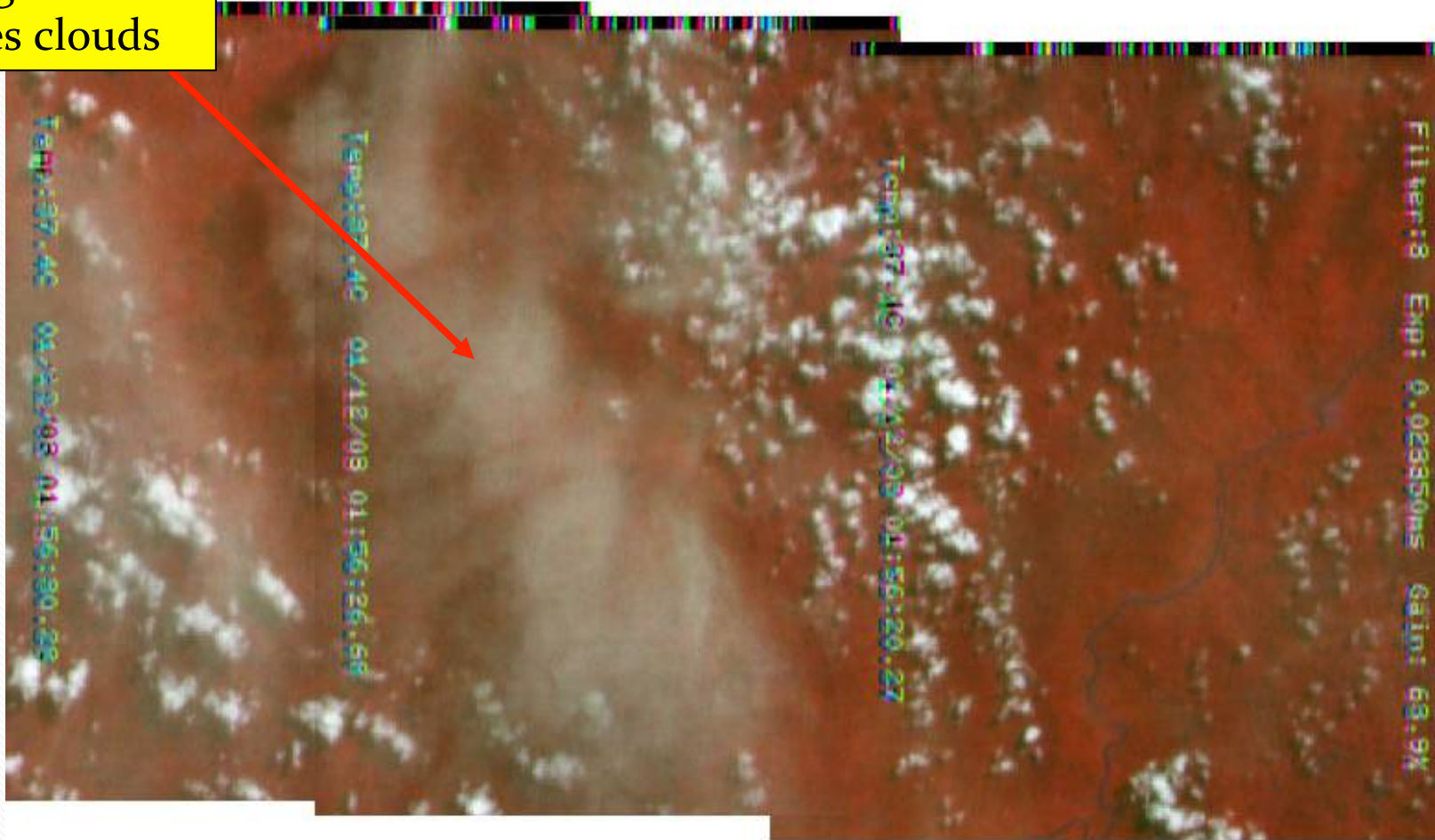
# Relationships between cloud properties and aerosol loading in Amazonia





# With too much aerosols: Cloud suppression

Absorbing aerosol suppresses clouds



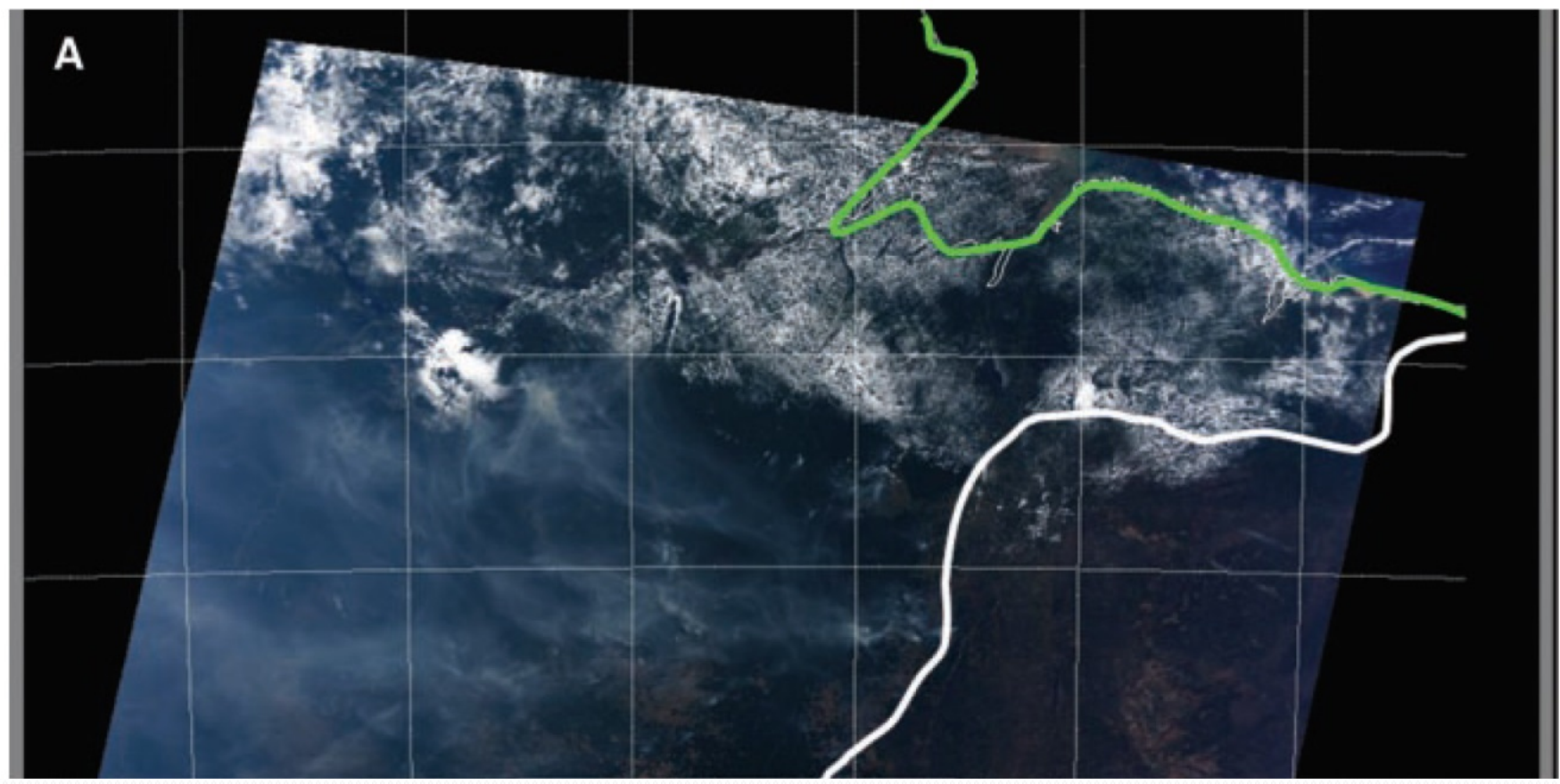
- Stabilization
- Suppression of surface fluxes
- Microphysical influences on droplets

**Columbia  
Shuttle  
January 2003**



# Terra and Aqua satellite images of the east Amazon basin, 11 August 2002. (*From Koren et al., 2004*)

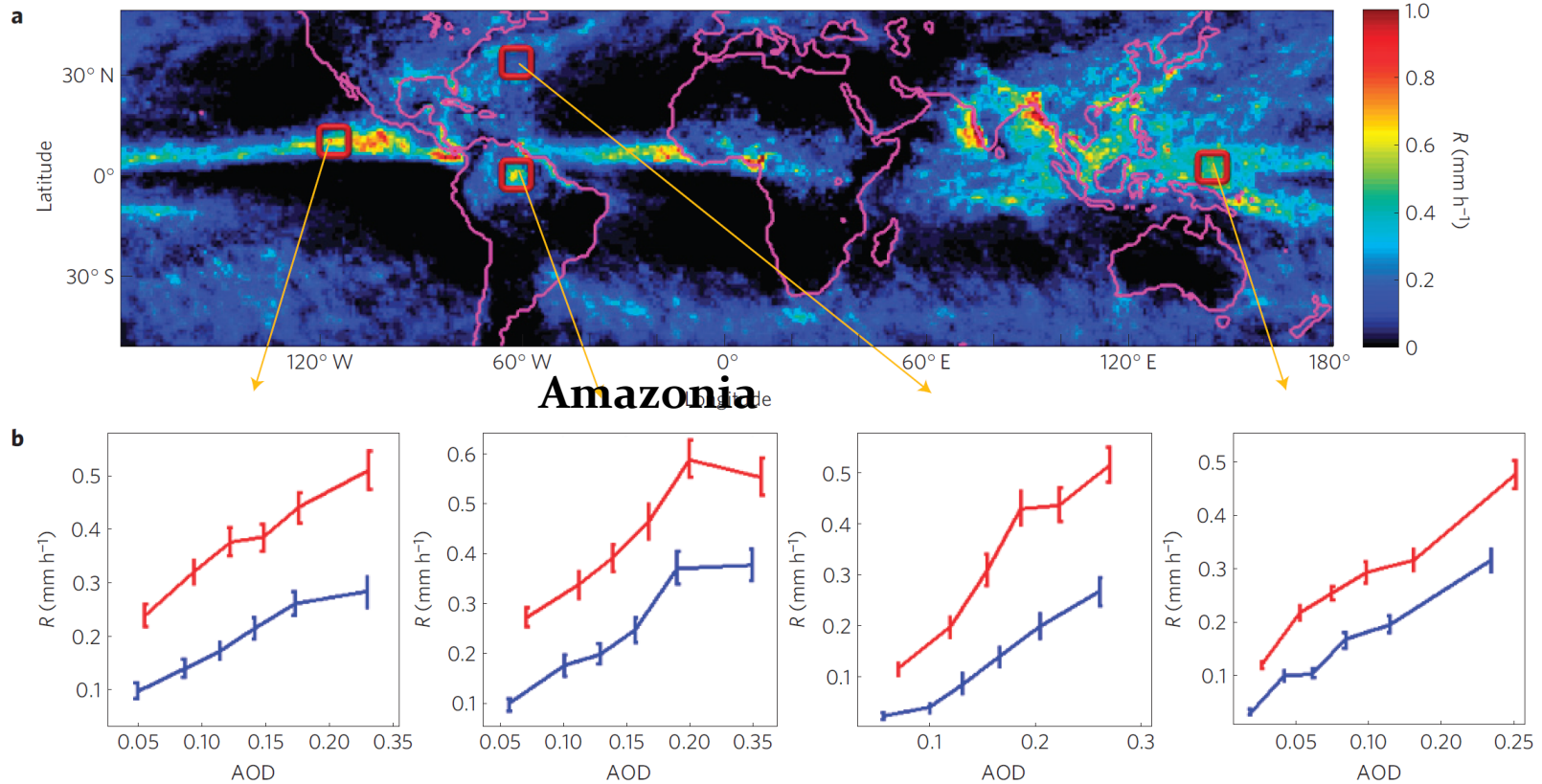
Large scale low cloud suppression



# Rain rate (TRMM) versus Optical Depth (MODIS)

NATURE GEOSCIENCE DOI:10.1038/NCEO1364

LETTERS



13:30 local-time map of rain rate ( $R$ ) and the observed trend with aerosol loading in four selected regions. Period: July and August 2007. **b**, The average  $R$  values are plotted for six aerosol-loading sets (blue, including zero  $R$  grid squares; red, without zero  $R$  grid squares). Note the  $R$  intensification as a function of AOD in all cases. (Koren et al., Nature 2012)



# Wait, clouds are complicated but...

Disagreement between modeled DIRECT aerosol forcing!!!

