



# Física das Mudanças Climáticas

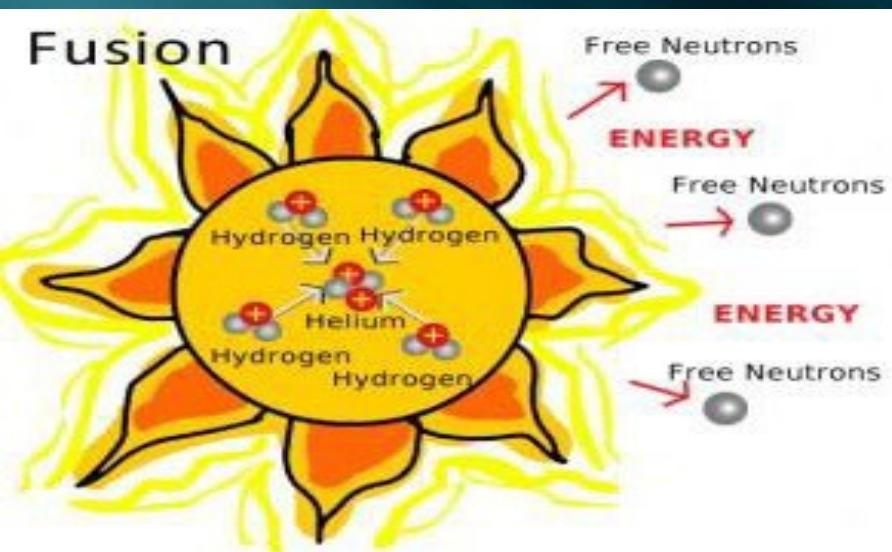
Balanço de Radiação

**Prof Reinaldo Haas**

Departamento de Física | CFM | UFSC

# Física da Atmosfera Solar – O interior do sol

- O interior do sol é constituído basicamente de **hidrogênio** (90%) e **hélio**.
- O sol gera grandes quantidades de energia pela **fusão** de prótons (4 átomos de hidrogênio) em hélio.
- A cada segundo o sol destrói  $4 \times 10^6$  ton de massa e gera  $4 \times 10^6$  Joules de energia. (equivalente á um milhão de vezes a produção anual de energia);



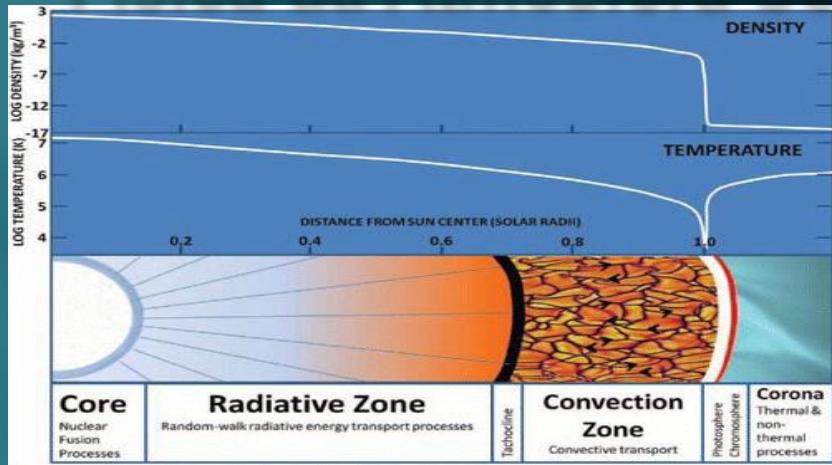
*De acordo com a Teoria de Einstein  $E = mc^2$  temos uma redução de massa que gera energia (radiação).*

# Agenda da Apresentação

- Energia solar e produção no interior do Sol
- Características da atmosfera solar e radiação
- Interação do vento solar com a Terra
- Composição da atmosfera terrestre e gases do efeito estufa
- Fenômenos atmosféricos e impacto climático
- Modelagem e balanço energético planetário



# Física da Atmosfera Solar - A viagem do fóton



Neste caminho tortuoso o fóton demora **30 milhões** de anos para escapar.

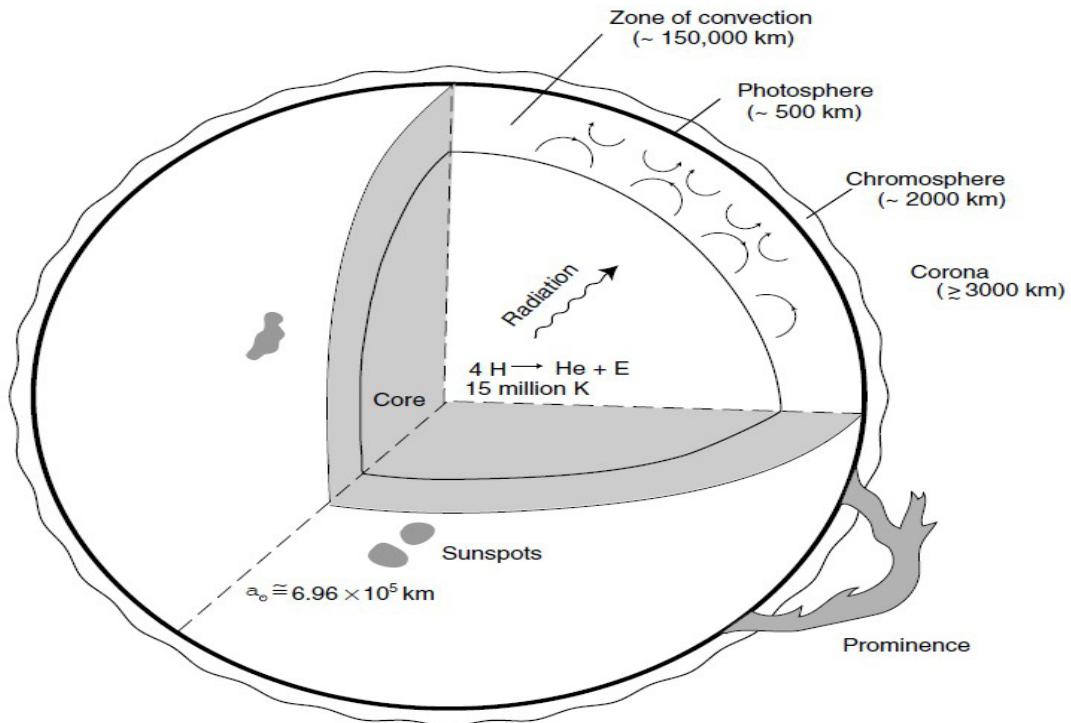
Portanto, a luz solar que vemos foi gerada no tempo do Oligoceno, quando os continentes estavam começando a ser organizar como são hoje.

Esta produção tem ocorrido nos últimos **4 bilhões** de anos.

O produto da **fusão** são neutrinos e fótons de **radiação gama**.

Conforme os fótons transferem energia para o plasma ambiental, eles perdem energia e aumenta seu comprimento de onda, gerando luz visível e atingem a fotosfera (a superfície solar) onde escapam.

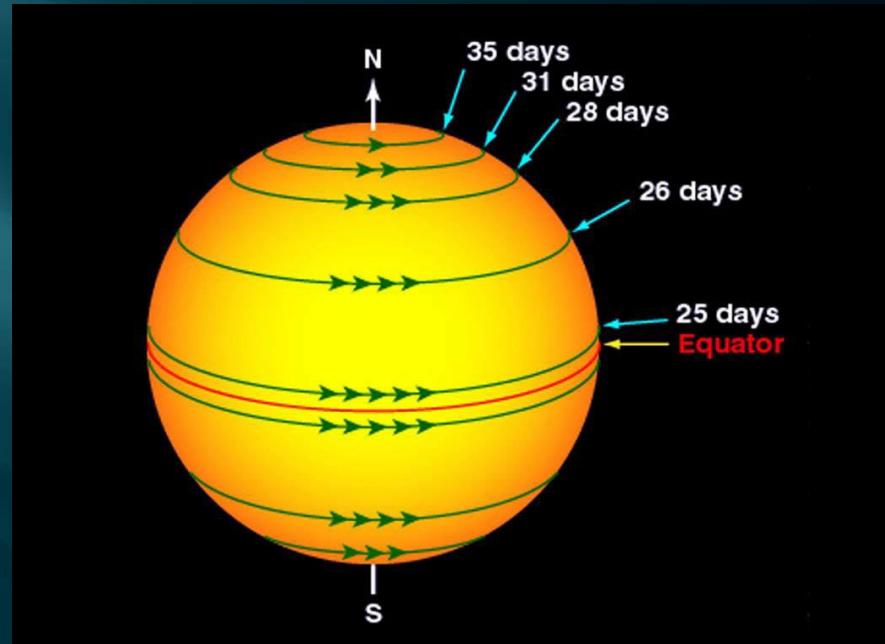
# Física da Atmosfera Solar – A viagem do fóton



Livro: *Introduction to Atmospheric Radiation* , by Liou,

A região acima da fotosfera é denominada de **atmosfera solar**.  
Ela é caracterizada por uma camada de gases solares.  
A atmosfera solar é dividida em duas regiões denominadas **cromosfera** e **corona**.

# Rotação Solar



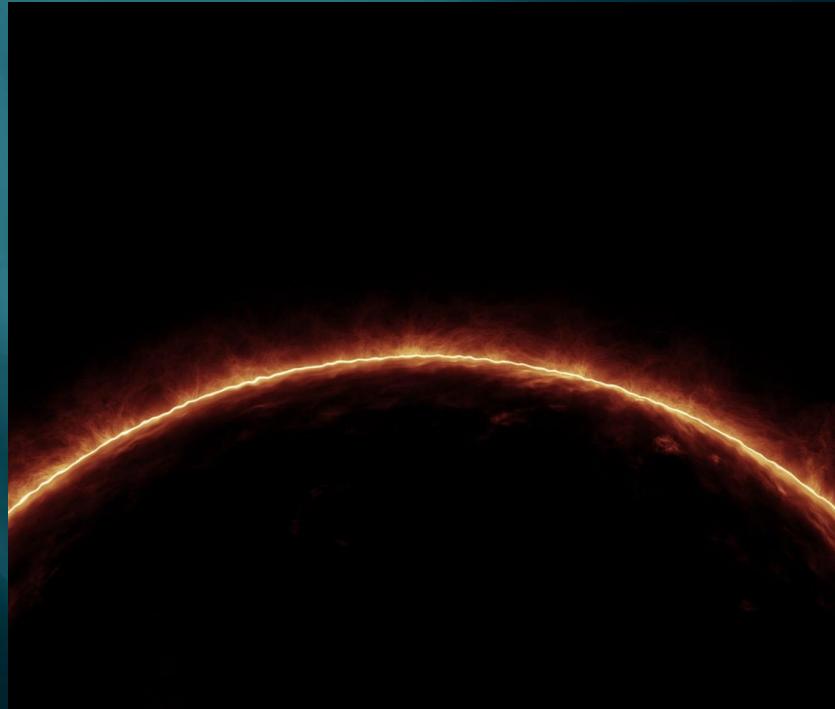
O sol não é um corpo sólido e portanto sua **rotação** não é simétrica.

Nas regiões polares a rotação é mais lenta (**36 dias**) do que no equador (**26 dias**), no centro ocorre rotação como corpo sólido (**27 dias**).

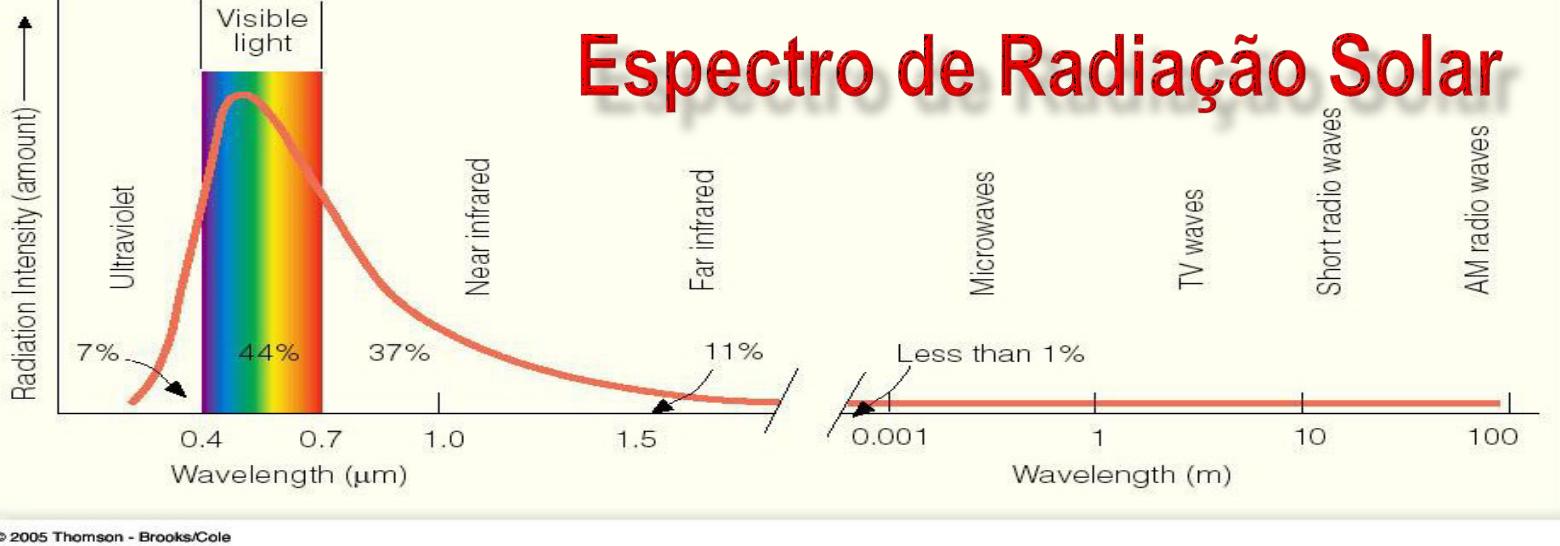
Estas rotações provocam fortes campos magnéticos.



# Entendendo o Ciclo Solar

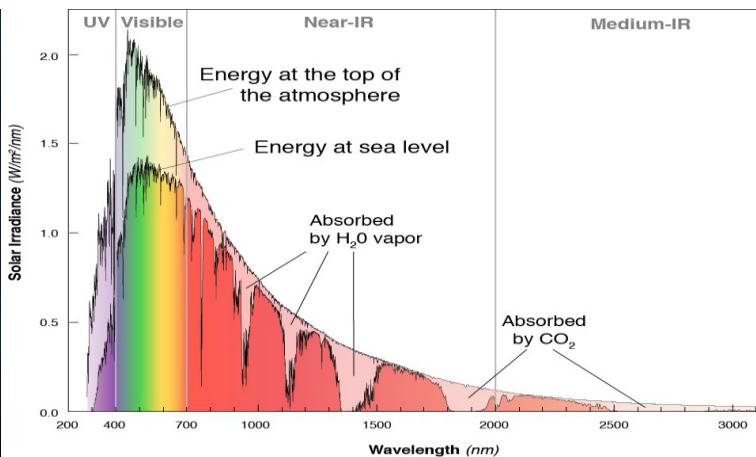


- O ciclo solar dura cerca de 11 anos, variando a atividade solar.
- Durante o pico do ciclo, ocorre aumento de manchas e explosões solares.
- O ciclo influencia o vento solar e o clima espacial na Terra.
- As variações no ciclo afetam a radiação e o balanço energético planetário.
- Estudar o ciclo é crucial para prever impactos no clima terrestre.

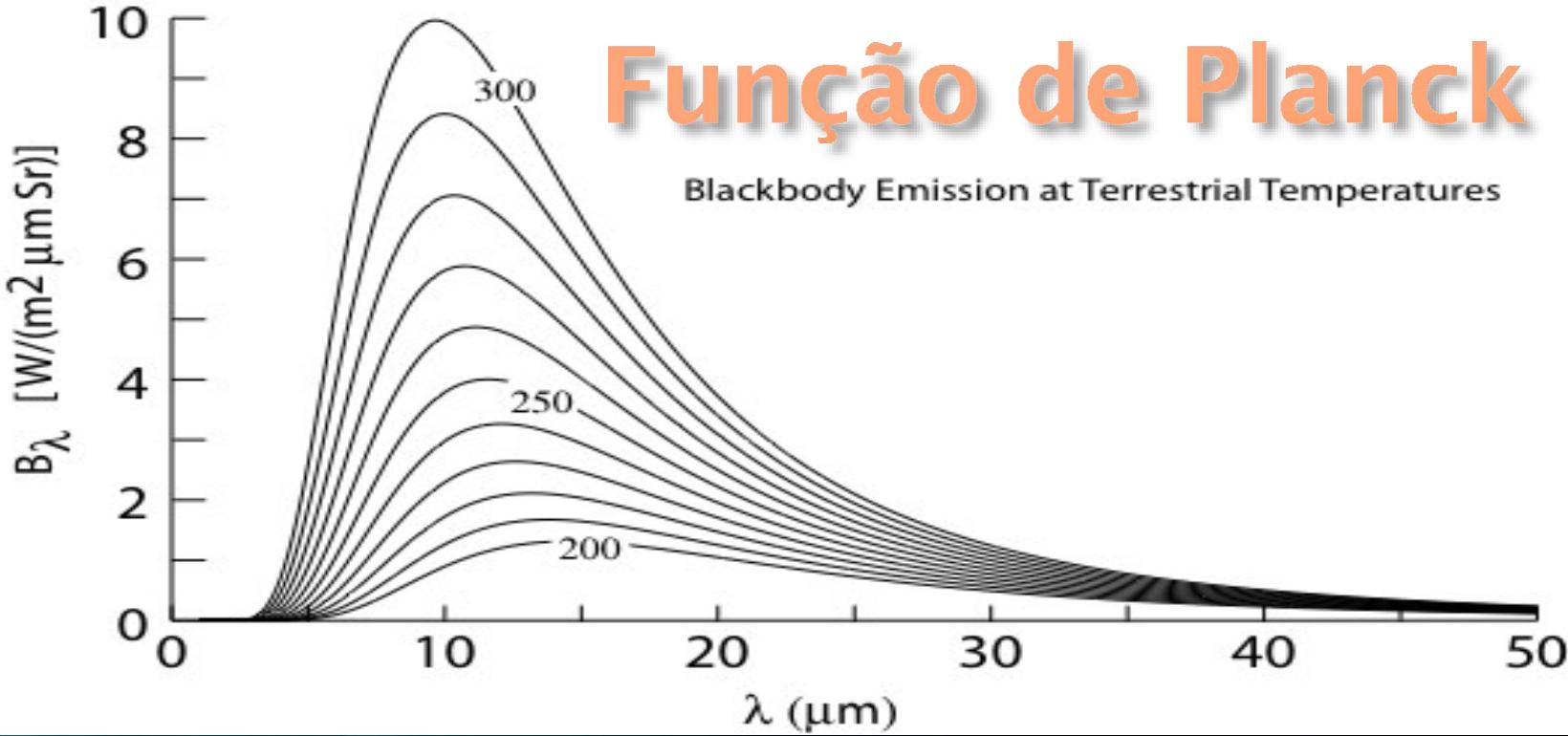


© 2005 Thomson - Brooks/Cole

[https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/blackbody-spectrum/latest/blackbody-spectrum_en.html)



# Função de Planck



$$B_\lambda(T) \approx \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( \exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1 \right)}$$

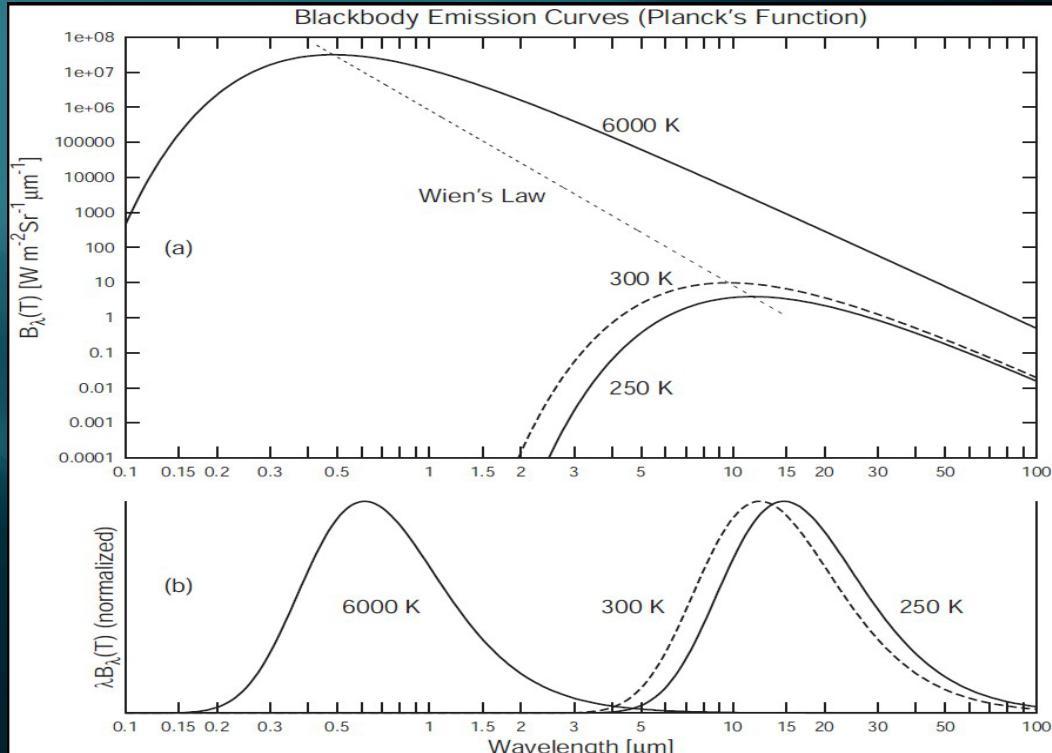
*(General Expression)*

**T = Temperatura,**  
 **$\lambda$  = comprimento de onda**

$$B_\lambda(T) \approx \frac{2ck_B}{\lambda^4} T \quad (\text{Rayleigh - Jeans Approximation, microwave, } \lambda > 1 \text{ mm})$$

O comprimento máximo do pico da Função de Planck é dado pela Lei de deslocamento de Wien.

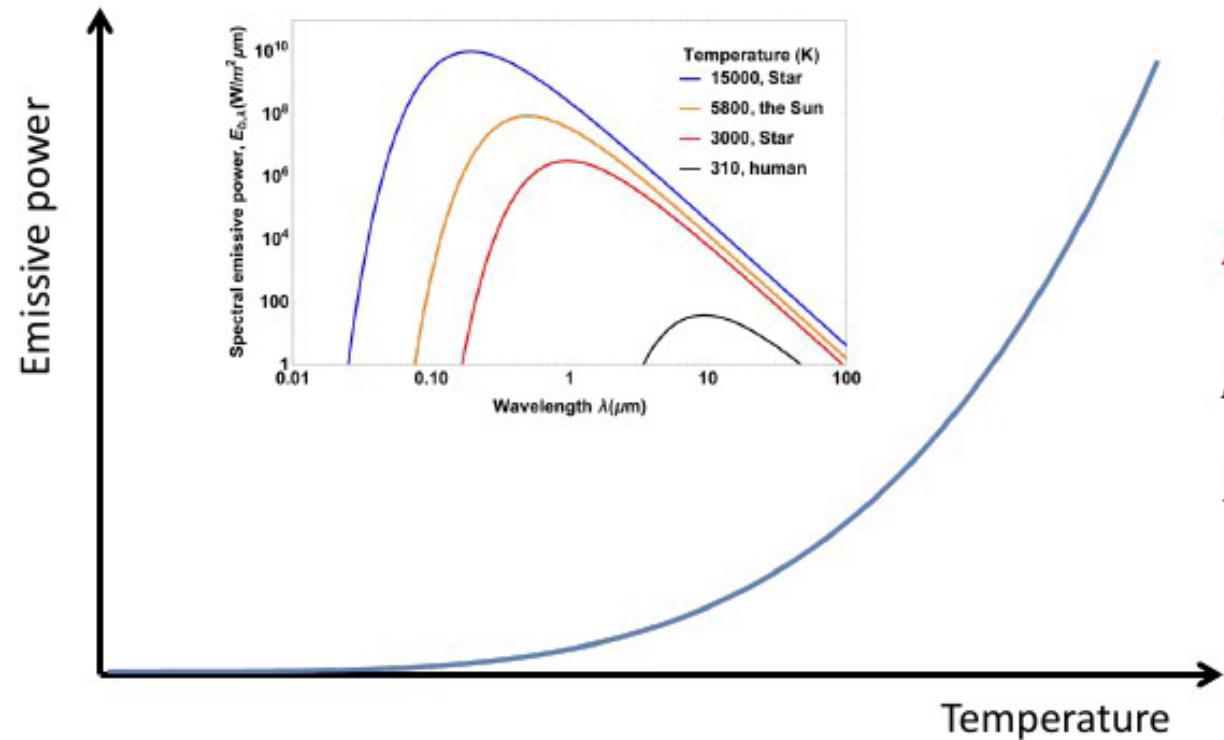
$$\lambda_{\max} = \frac{k_w}{T}$$



Onde  $k_w = 2897 \mu\text{mK}$

O pico de emissão de um corpo negro com temperatura de 6000 K (o sol) ocorre a um comprimento de onda  $= 0.48 \mu\text{m}$ , e para um objeto á temperatura de 200-300 K o pico de emissão ocorre entre 9.6-14.4  $\mu\text{m}$ .

# Stefan-Boltzmann $E = \sigma T^4$



$$E_{b,\lambda}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$

$$\lambda_{\max} T = 2898 \text{ } \mu\text{m K}$$

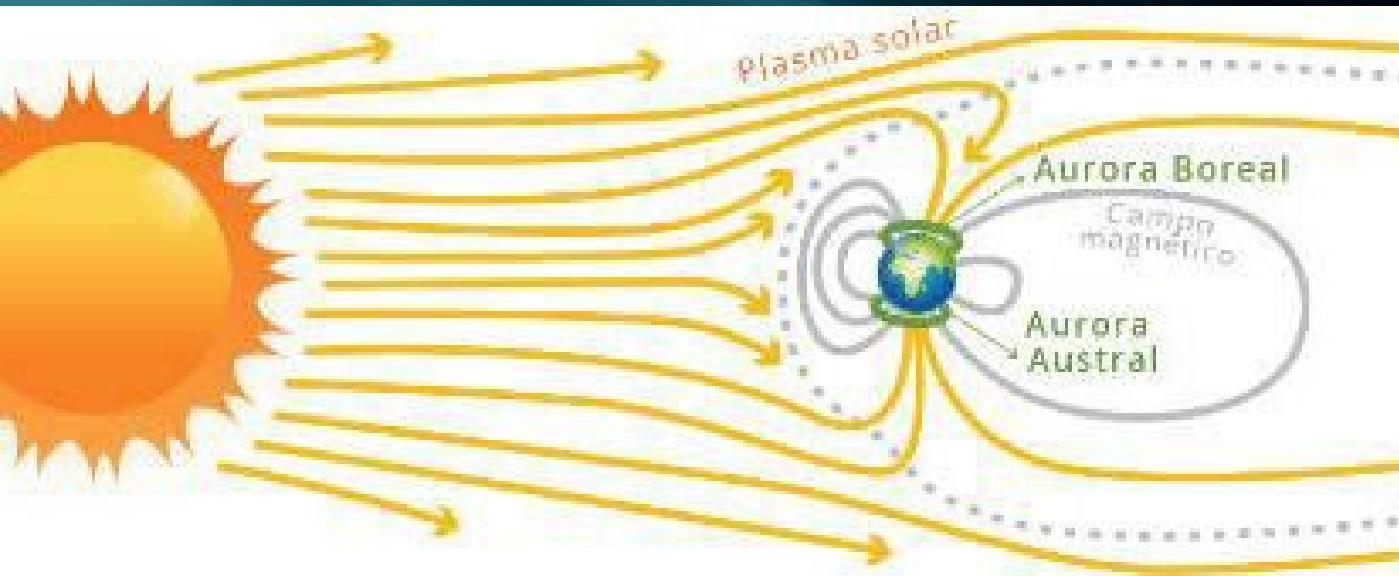
$$E_b = \sigma T^4$$

$$E_{\text{real}} = \varepsilon \sigma T^4 \quad \left( 0 < \varepsilon = \frac{E}{E_b} < 1 \right)$$

Obtida após a integração da Curva de Planck

# Radiação - magnetosfera

Interação do vento solar com a magnetosfera terrestre.



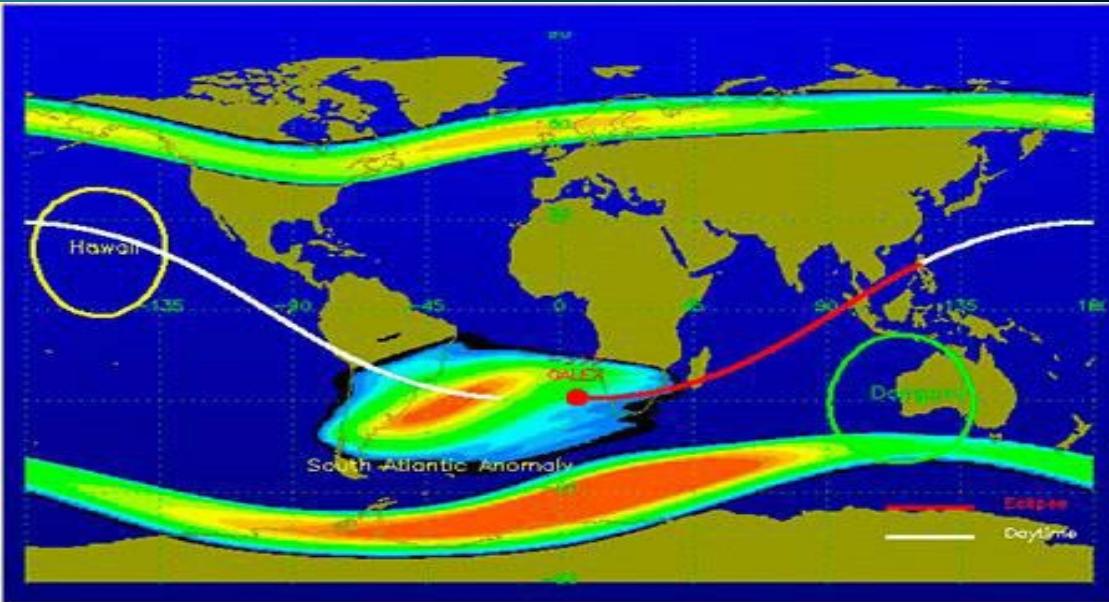


# Do Clima Espacial para o Clima Terrestre

- A Terra protege-se das partículas solares nocivas por meio de sua magnetosfera.
- A radiação solar, principal fonte de energia para o planeta, é determinante para o clima.
- A forma como a atmosfera e a superfície absorvem e refletem essa energia é fundamental.
- A interação entre a radiação solar e a Terra influencia os padrões climáticos globais.
- Compreender esse processo é essencial para o estudo das mudanças climáticas no planeta.
- "Qual a importância desse fenômeno para as alterações climáticas na superfície?"



# Anomalia Magnética do Atlântico Sul



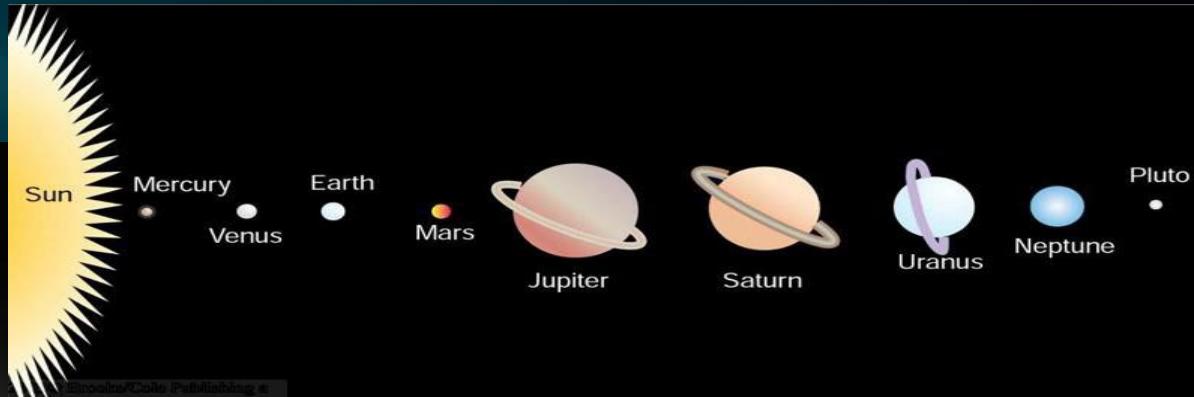
O telescópio Hubble não faz observações quando está passando por esta região.

Nesta região onde o campo magnético é mais fraco ocorre maior fluxo de raios cósmicos.

**Fluxo de elétrons (AP-8 MAX)**  
**>1 MeV em 500 km altitude.**

Os sensores de UV da sonda Galex (e vários outros) são desligados até que o satélite cruze a Anomalia.

# Planeta Terra.



Nosso planeta possui uma atmosfera composta de vários gases que interagem com a radiação solar produzindo importantes processos que permitem a presença de seres vivos.

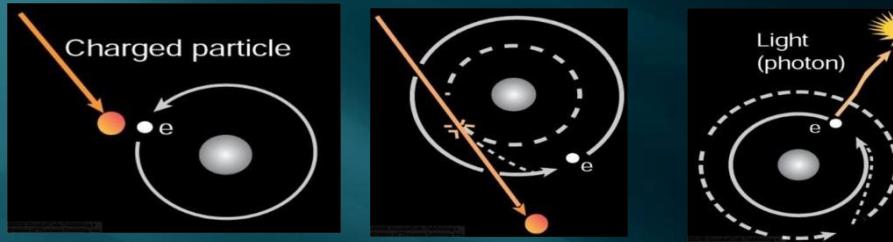
# Planeta Terra – Composição atmosférica.

## Gases Composição (% por volume)

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| □ N <sub>2</sub> (78,08 ) | Vapor d'água (0-4)                         |
| □ O <sub>2</sub> (20,95 ) | CO <sub>2</sub> (0,042) Dióxido de Carbono |
| □ Ar (0,93 )              | CH <sub>4</sub> (0,00017) Metano           |
| □ Ne (0,018)              | N <sub>2</sub> O (0,00003) Dióxido Nitroso |
| □ He (0,0005 )            | O <sub>3</sub> (0,000004) Ozônio           |
| □ Partículas              | Nuvens                                     |
- 99%



# Radiação - Aurora Boreal / Austral



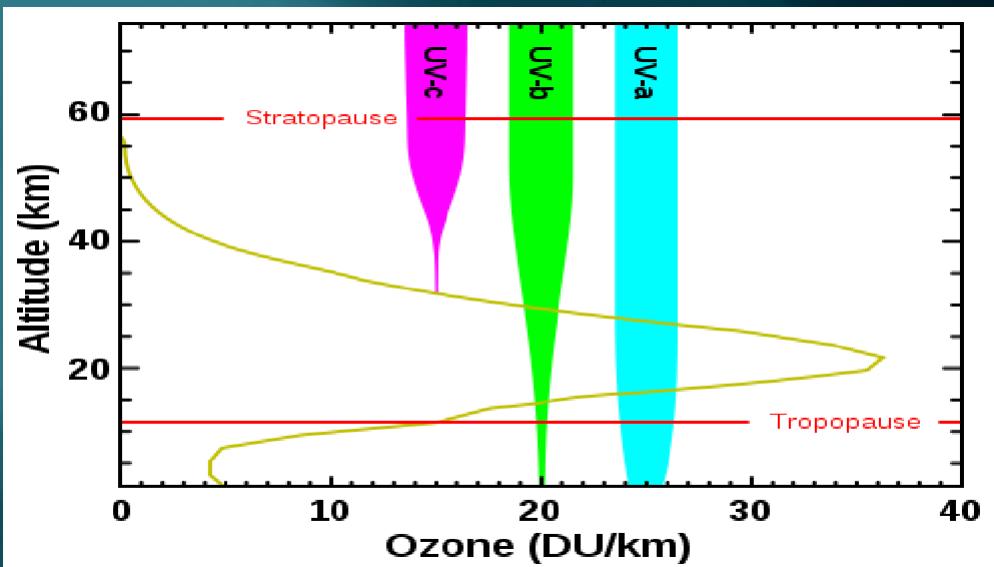
As cores emitidas depende do tipo de gás da alta atmosfera.  
(oxigênio = verde e vermelha,  
nitrogênio = violeta e vermelha)



Aurora (Galileu)  
= Deusa Romana  
do Amanhecer.

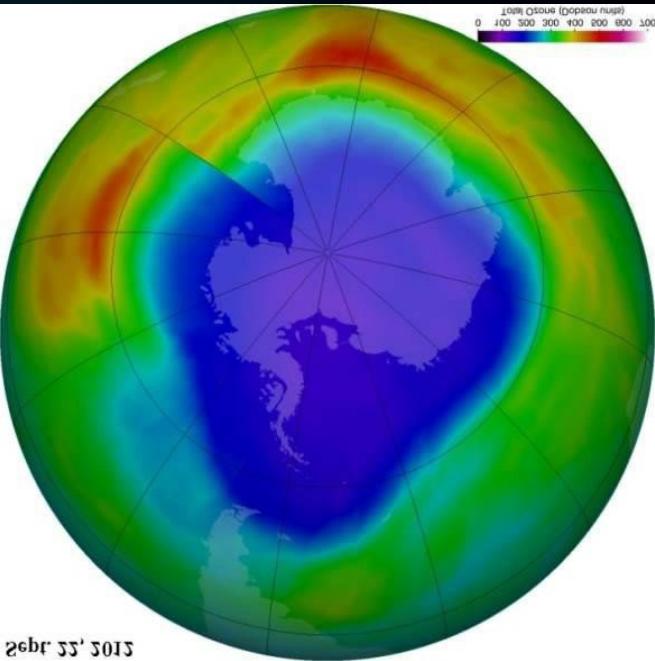
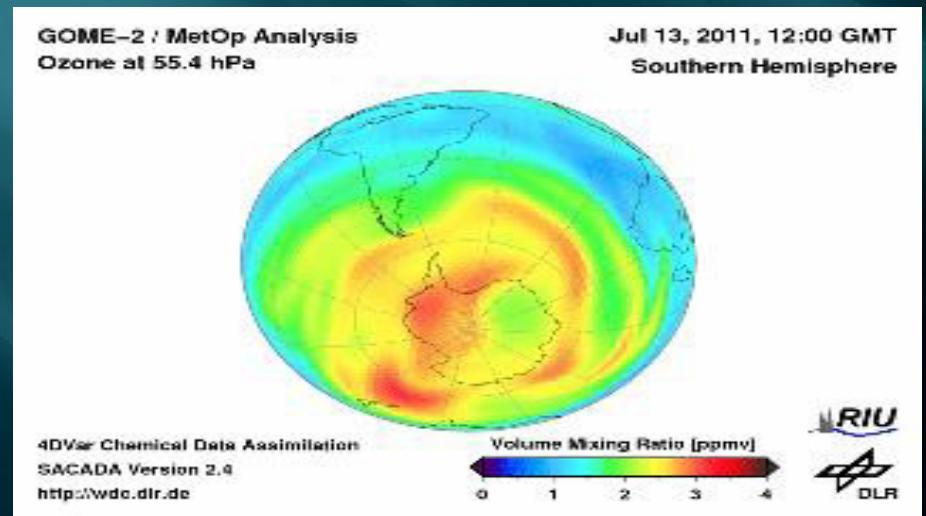
# UV & Camada de Ozônio

## Dissociação da Molécula de Ozônio (O<sub>3</sub>)



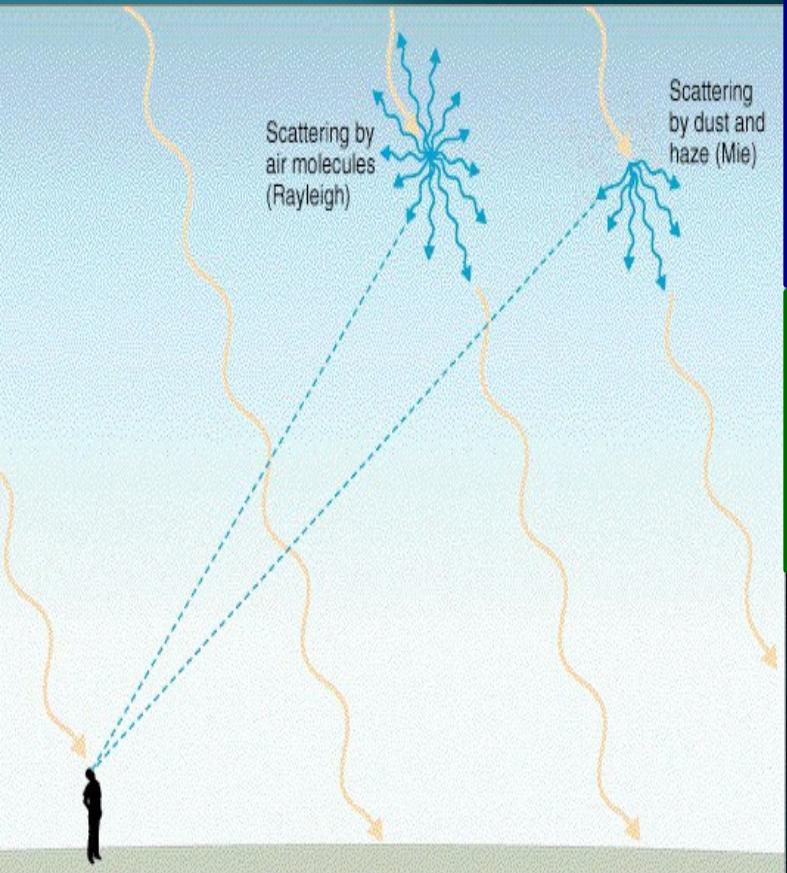
Nos meses de Setembro e Outubro (primavera no hemisfério sul) a concentração diminui tanto que tem aparecido um buraco na camada de O<sub>3</sub>.

# Buraco na Camada de Ozônio



<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>

# Radiação – espalhamento (céu azul e nuvens)

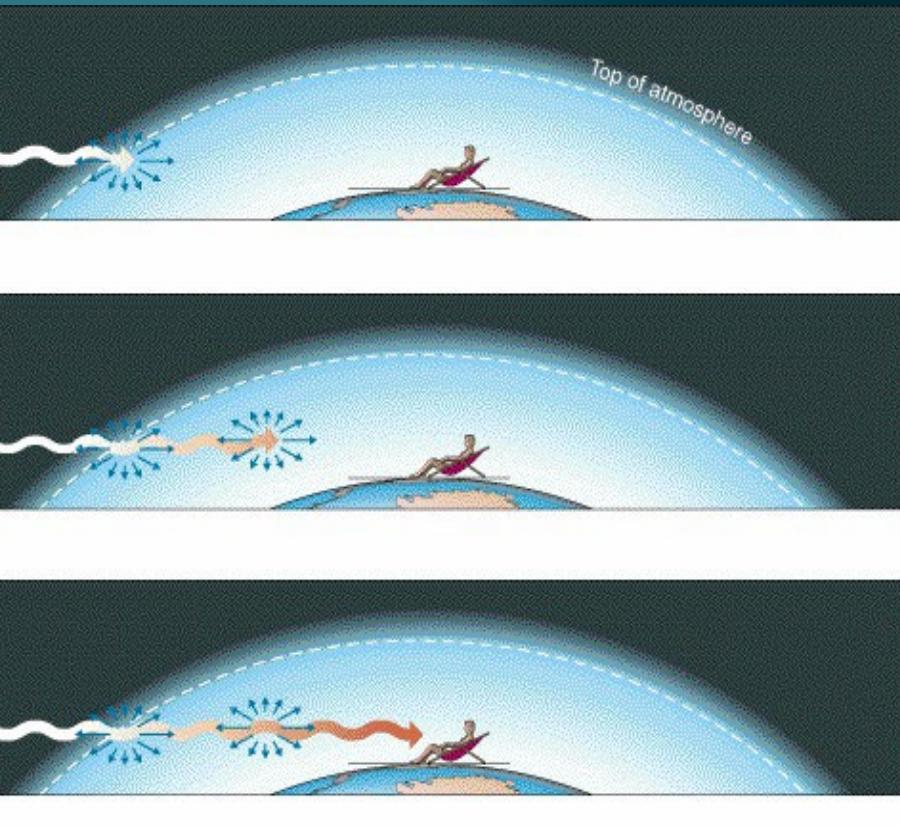


- **MOLÉCULAS DO AR** tendem a espalhar mais o comprimentos de ondas mais curtos, e em todas as direções → lado mais “azul” do espectro visível → a radiação difusa (do céu) parece “azul”

- **PARTÍCULAS** (gotículas e aerossóis) tendem a espalhar igualmente todos os comprimentos de onda) → mistura de todas as cores: luz branca → nuvens

# Radiação – transmissão pela atmosfera.

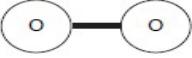
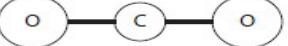
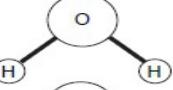
“quantidade de radiação que resta após atravessar toda a atmosfera”



- a) No topo da atm.: a luz começa a ser espalhada, principalmente sua parte “azul”
- b) Quando a rad. avança pela atm., mais rad. azul é espalhada
- c) A maior parte da luz transmitida é a luz amarela e vermelha

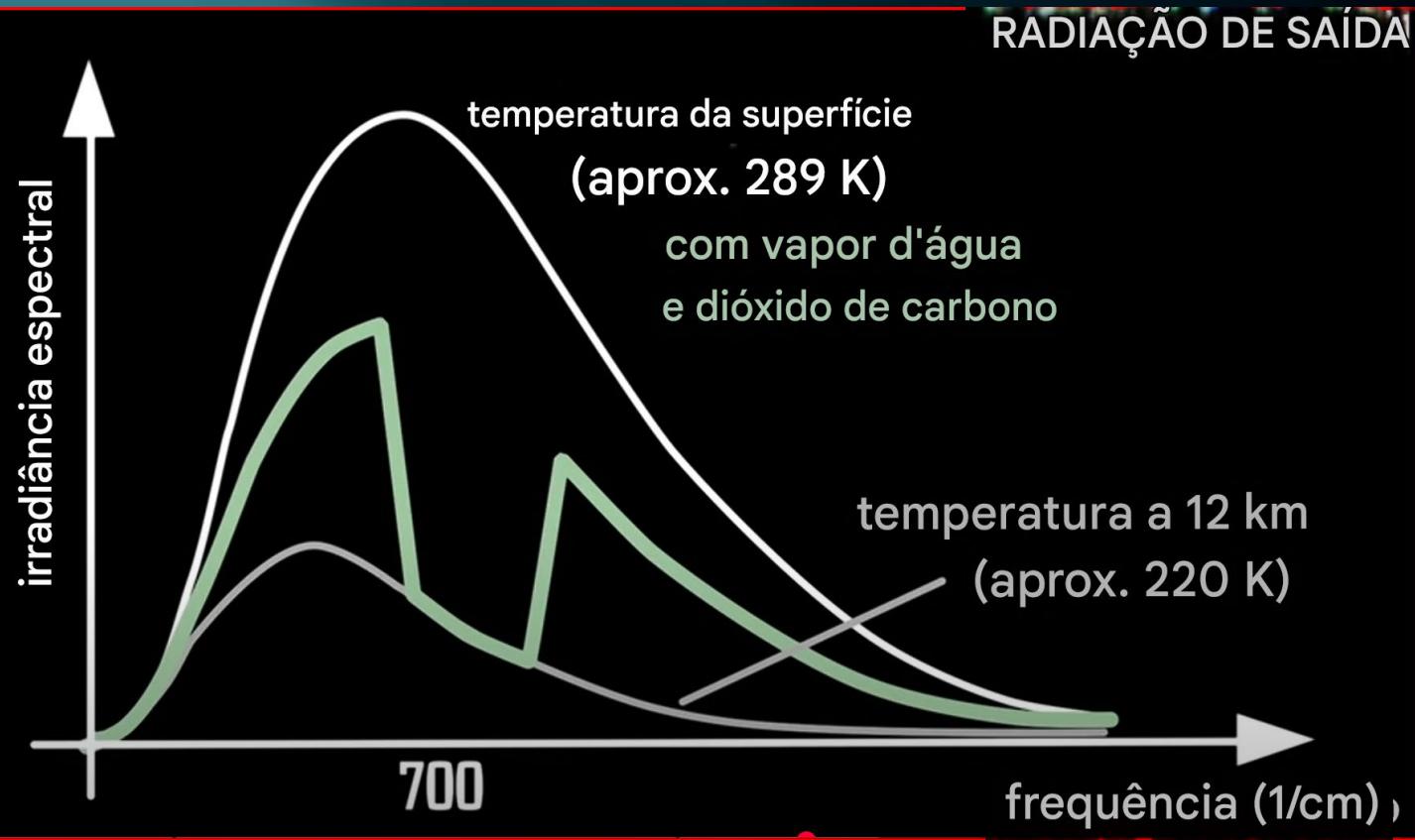
# Transições Rotacionais

## Conversão de energia radiativa em Energia Cinética

Molecule	Structure	Permanent Electric Dipole Moment?
Oxygen		linear
Nitrogen		linear
Carbon Monoxide		linear
Carbon Dioxide		linear
Nitrous Oxide		linear
Water		asymmetric top
Ozone		asymmetric top
Methane		spherical top

Estrutura molecular de vários constituintes atmosféricos depende do seu **momento de inércia**, e também se a molécula possui momento de dipolo elétrico ou magnético.

# Como o Efeito Estufa **REALMENTE** Funciona



# Absorção por Gases - Vibração

## Moléculas poliatômicas

Quando uma molécula consiste de mais do que dois átomos, temos um aumento substancial de possibilidades de movimentos vibracionais.

Diatomíco (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO)



Linear triatomic (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O)



Symmetric stretch  
v<sub>1</sub>

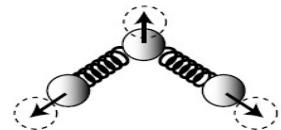


Bending  
v<sub>2</sub>

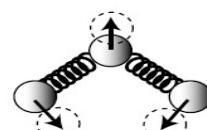


Asymmetric stretch  
v<sub>3</sub>

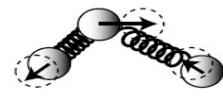
Nonlinear Triatomic (H<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>)



Symmetric stretch  
v<sub>1</sub>



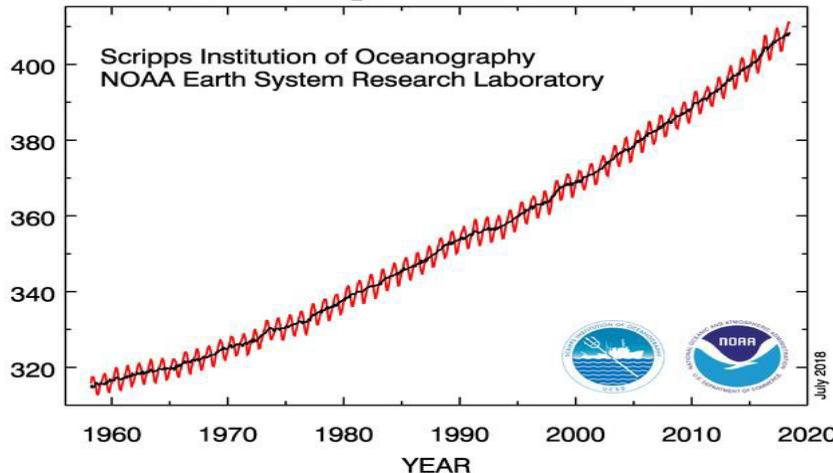
Bending  
v<sub>2</sub>



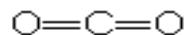
Asymmetric stretch  
v<sub>3</sub>

Forças inter-atômicas de ligação que envolvem **entortes** e **estiramentos** (estrutura molecular)

### Atmospheric CO<sub>2</sub> at Mauna Loa Observatory

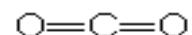


A concentração de CO<sub>2</sub> aumentou 40% desde a era industrial. 30 bi ton/ano.



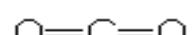
symmetric  
stretch

inactive  
no dipole  
change

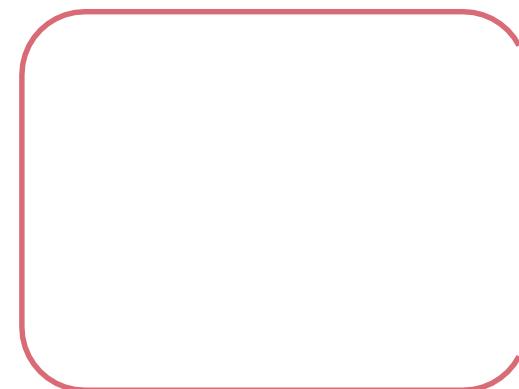
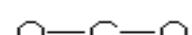


antisymmetric  
stretch

active

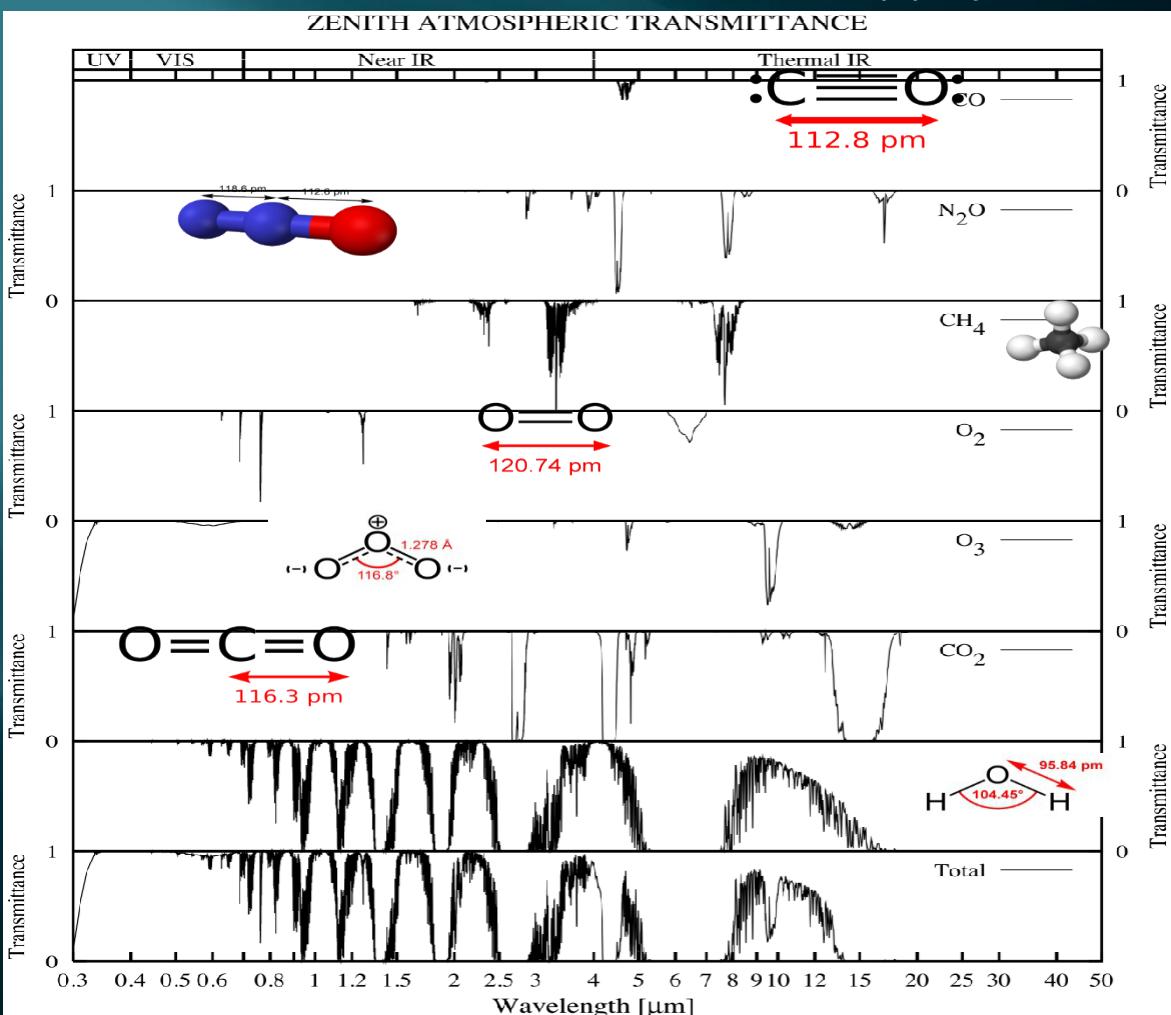


degenerate  
same energy  
one band



# Transmissão Atmosférica: Lei de Beer $I(x)=I_0 e^{(-\beta_{abs} x)}$

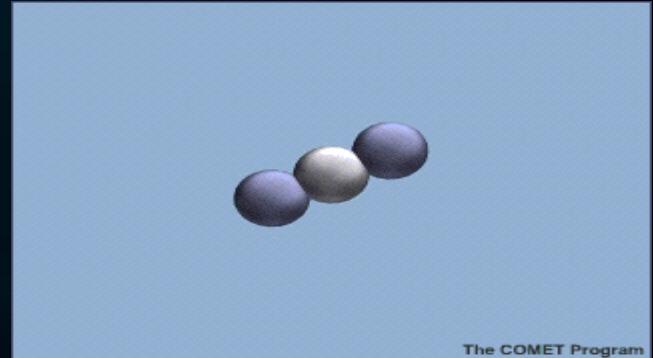
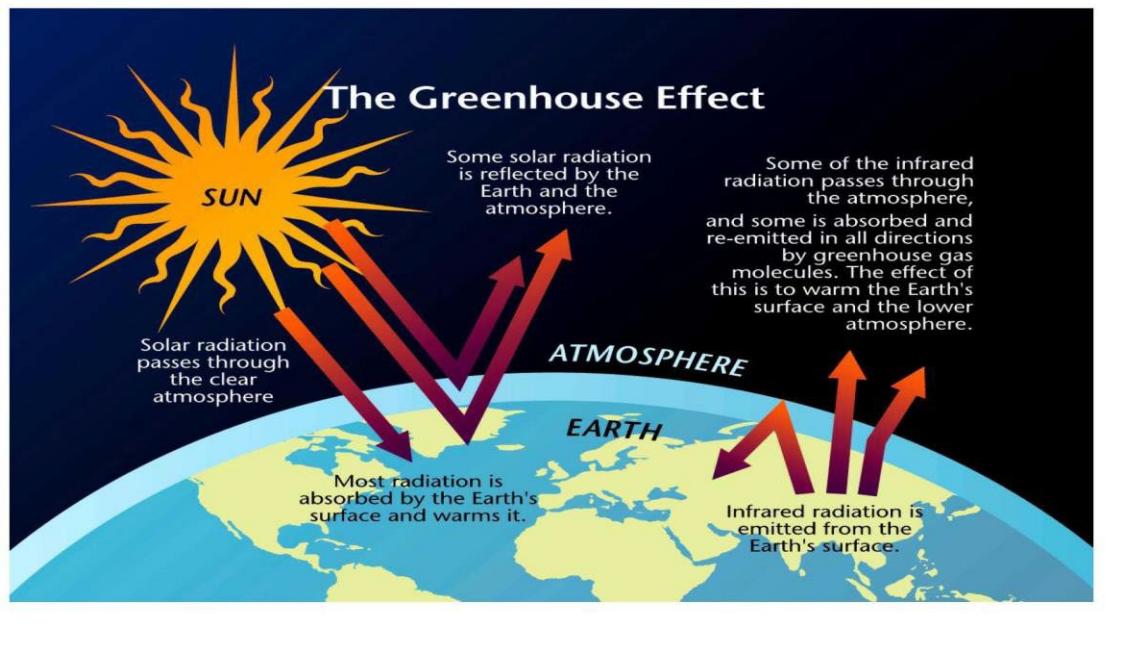
ZENITH ATMOSPHERIC TRANSMITTANCE



transmitância para céu claro e o efeito individual de alguns componentes.

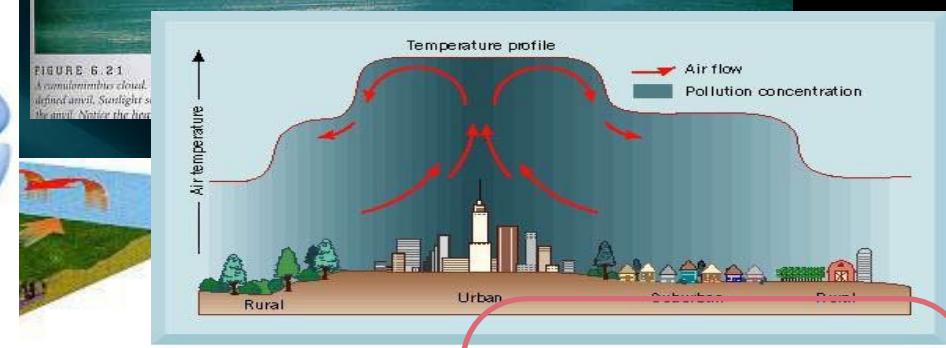
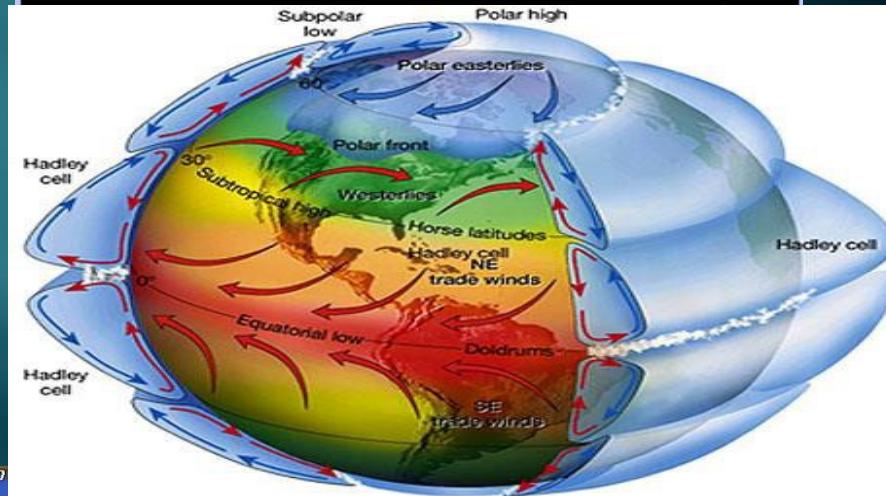
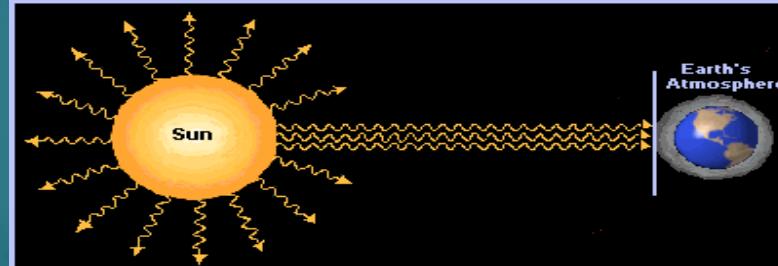
*Quais gases são ativos na banda IV e contribuem para o aquecimento do efeito estufa? Quais gases absorvem radiação solar?*

# Efeito estufa

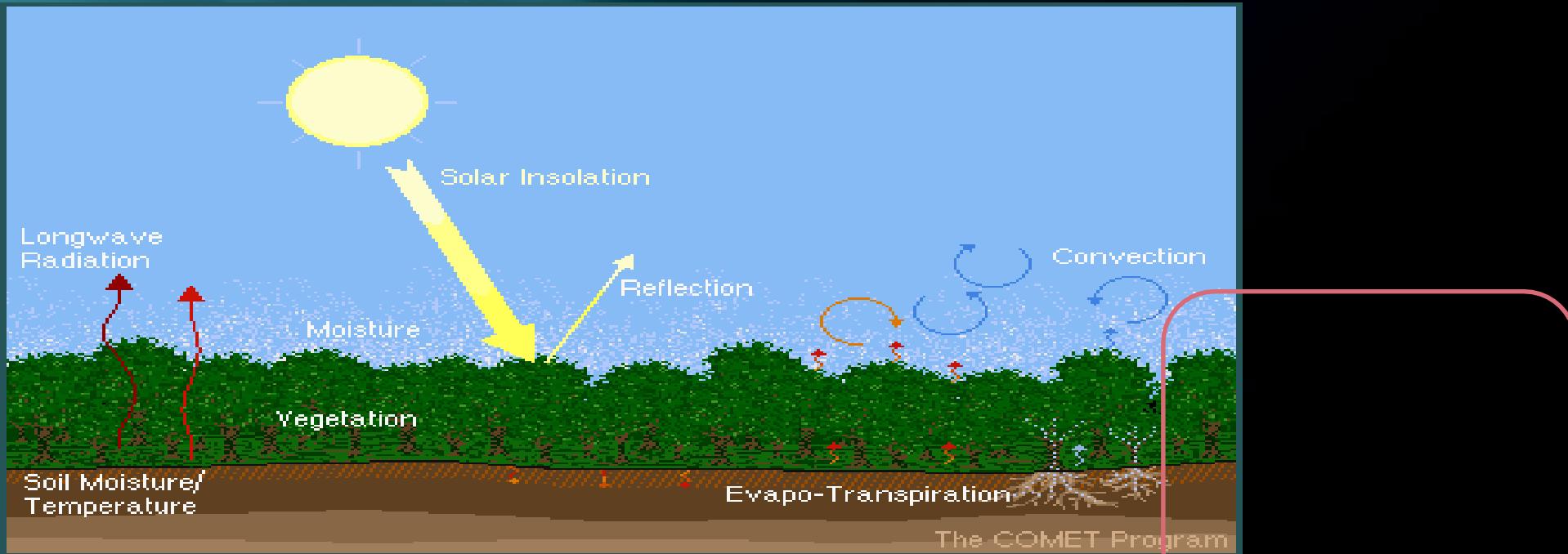


Gases estufa como  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  e  $\text{CH}_4$  possuem moléculas que podem vibrar ao receber energia de radiação de ondas longas e re-emiti-las em outra direção.

# Dinâmica da Atmosfera: Ventos



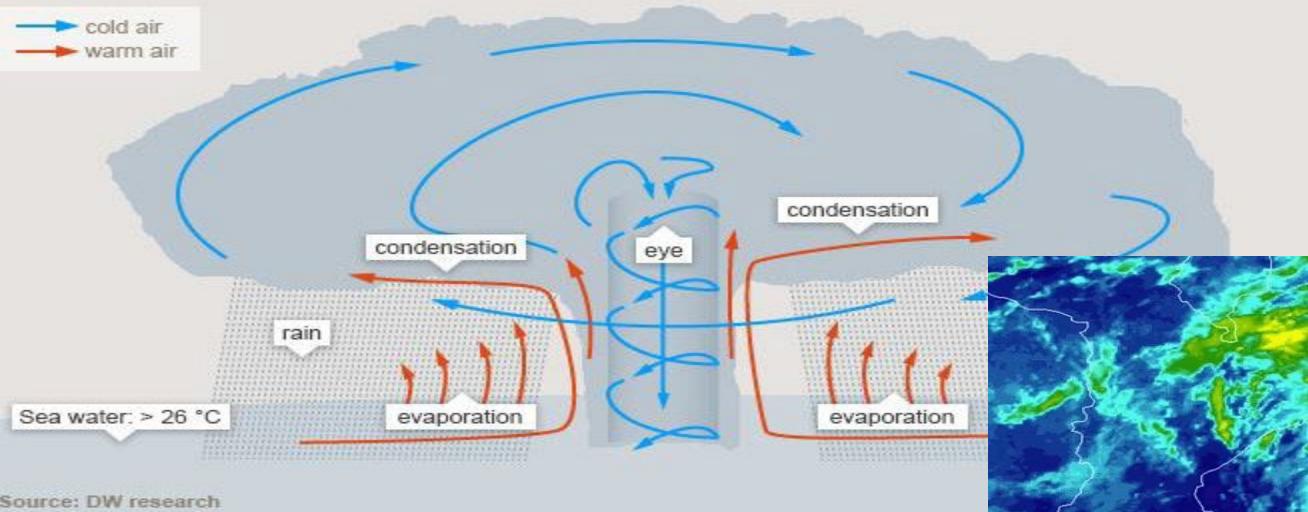
# *Condições de fronteira inferior: “interface solo-vegetação-atmosfera”*



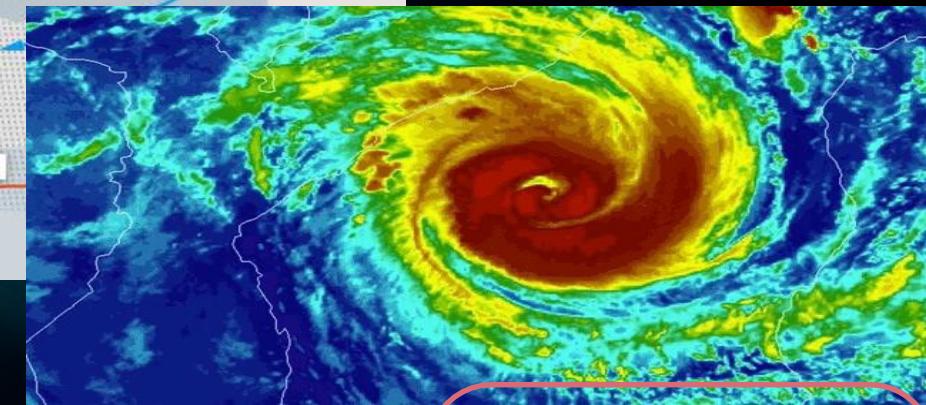
# Ciclo da Água



## Cross-section of a tropic twister



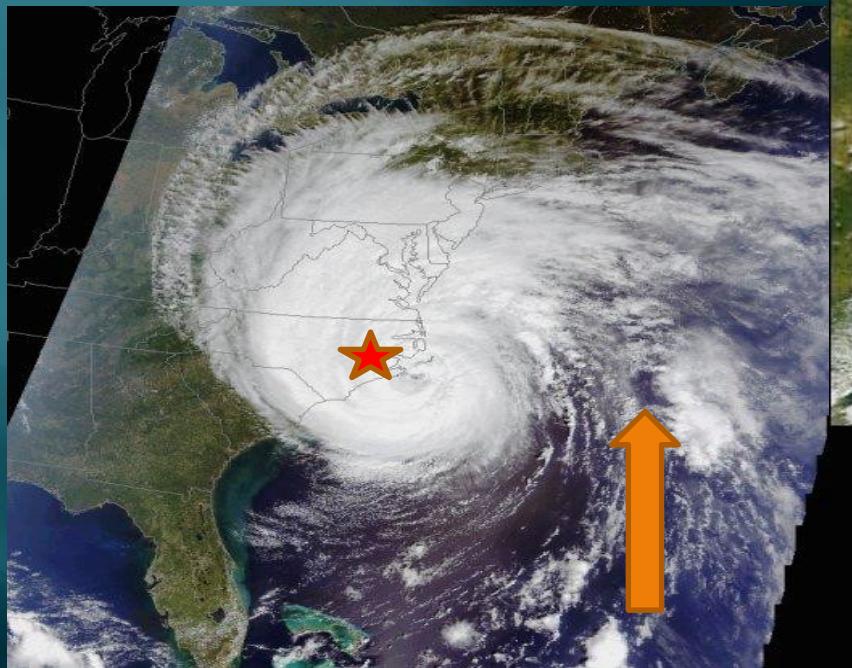
Quanto de  
energia possui  
um Furacão?



Furacão  
Idai – 14  
Março 2019

Após transformação de energia solar em evaporação e condensação (44 kJ/mol)  
Energia estimada de um furacão típico =  
 $2,9 \times 10^{17}$  kJ  
Energia estimada da bomba Little Boy =  
 $6,3 \times 10^{10}$  kJ (15 kT TNT)  
Equivale a 4,6 milhões de bombas  
nucleares (iguais de Hiroshima)

**Furacão Isabel (Atlântico Norte) –  
Setembro 2005**



**Furacão Catarina (Atlântico Sul) – 2004**

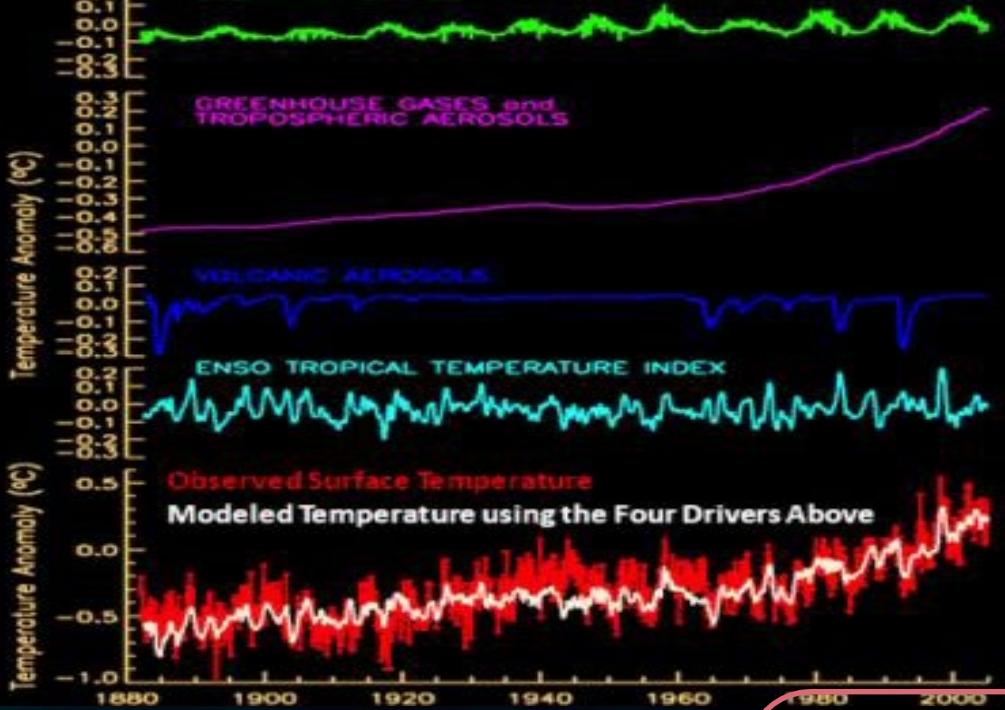


Redistribuição de Energia

## What Drives Modern Climate?

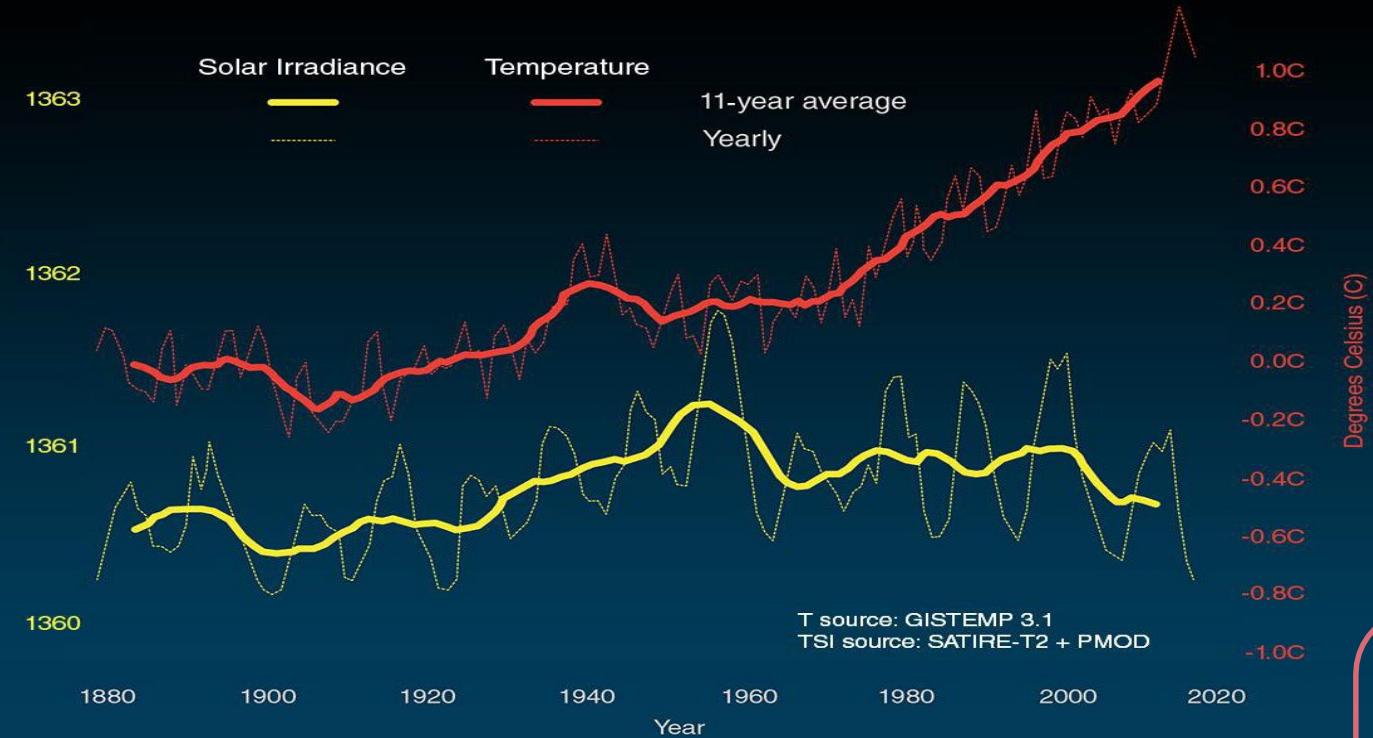
There are four major contributions to climate change. The sun is one of them

1. Solar Irradiance
2. Greenhouse Gasses
3. Volcanoes
4. ENSO (The El Niño Southern Oscillation)



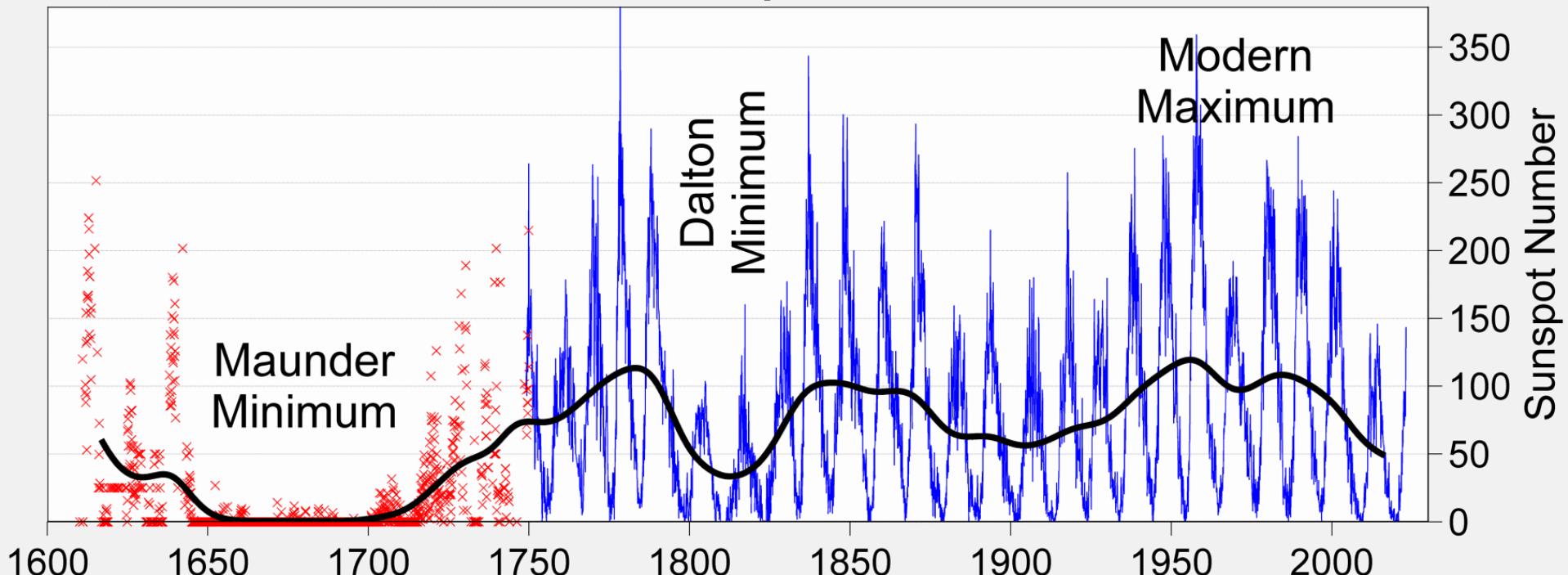
Os Gases de efeito estufa são a principal forçante da tendência de mudança climática

## Temperature vs Solar Activity

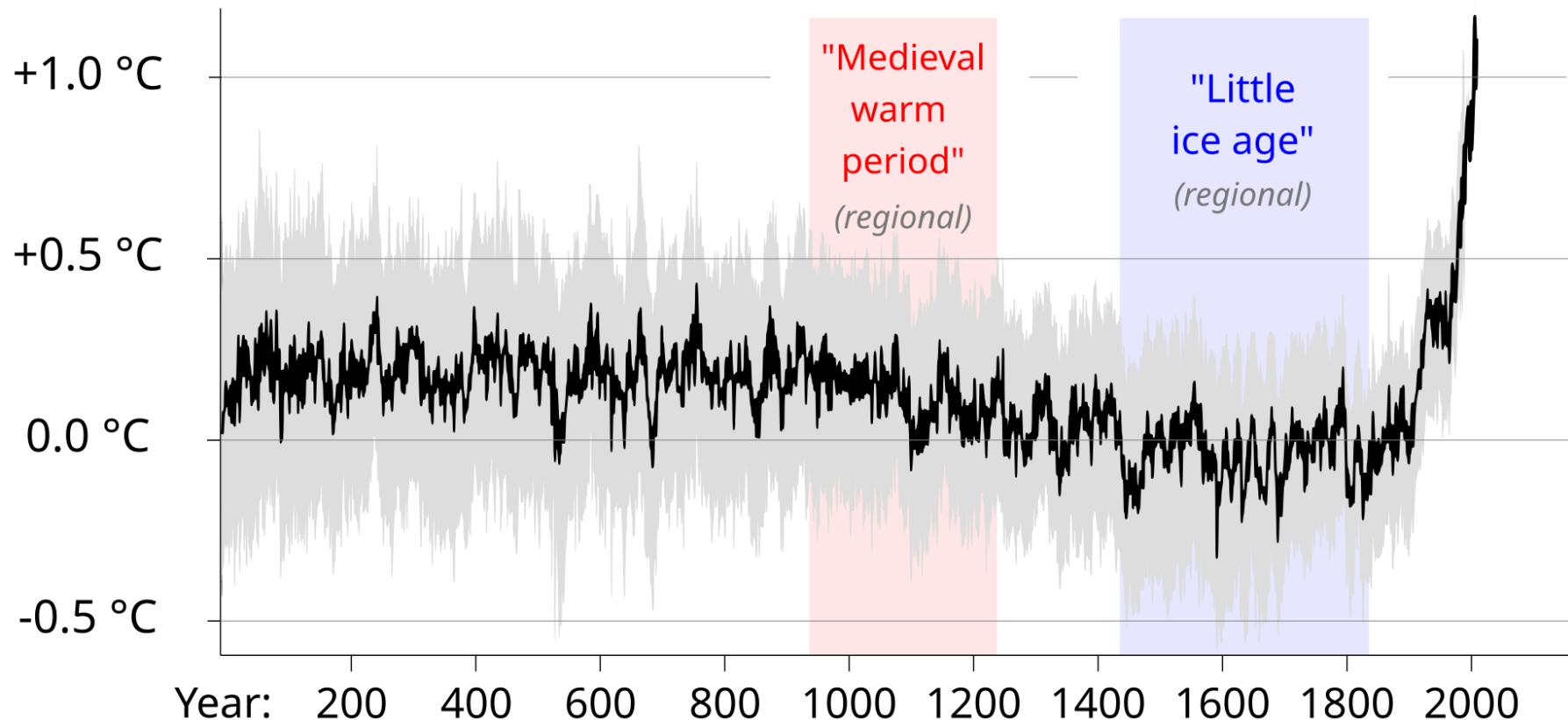


Variações  
Solares não  
influenciam no  
aquecimento  
global

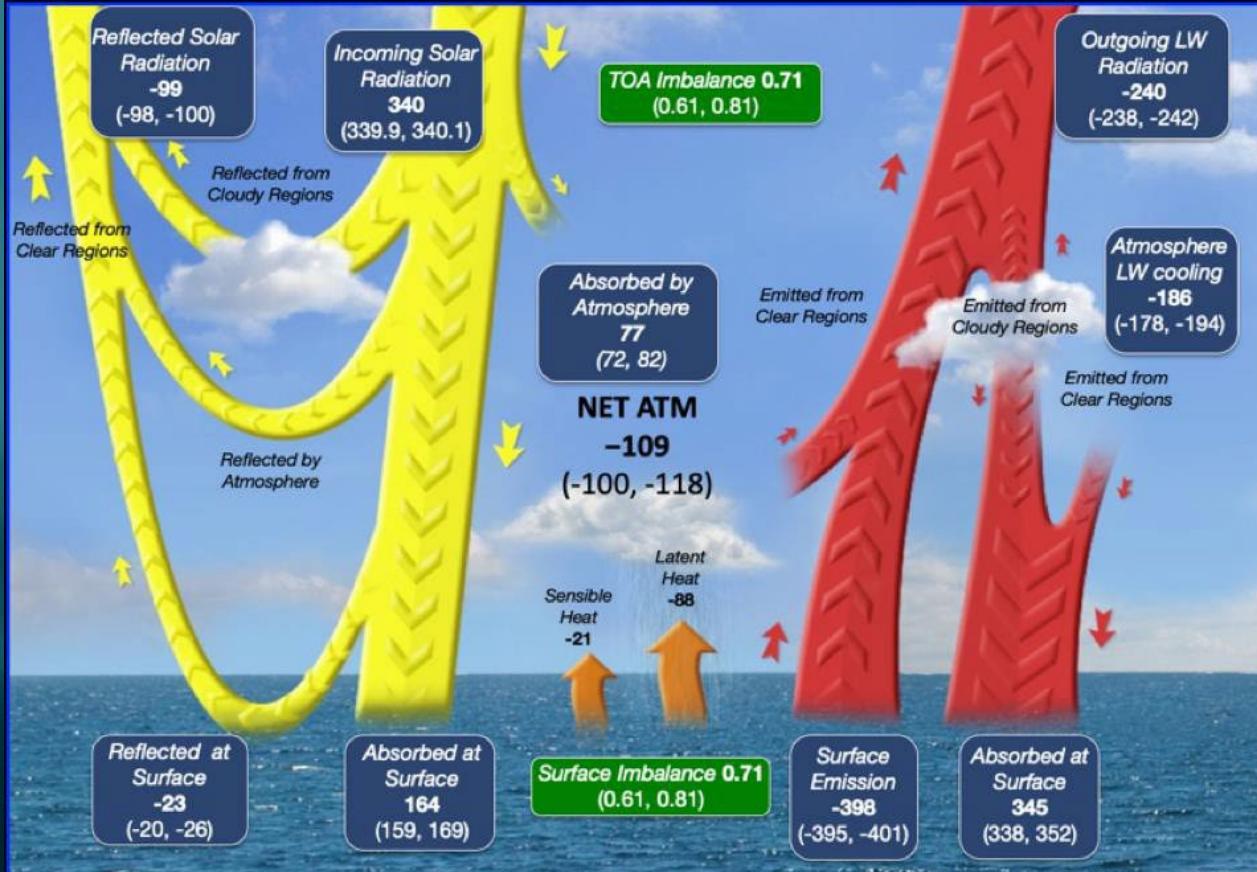
# 400 Years of Sunspot Observations



# Global Average Temperature Change



# CERES - Balanço de Radiação

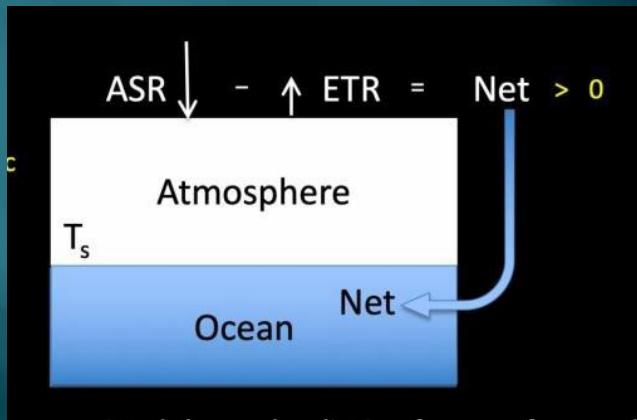


30 % é refletida de volta para o espaço pela atmosfera, nuvens e superfície.

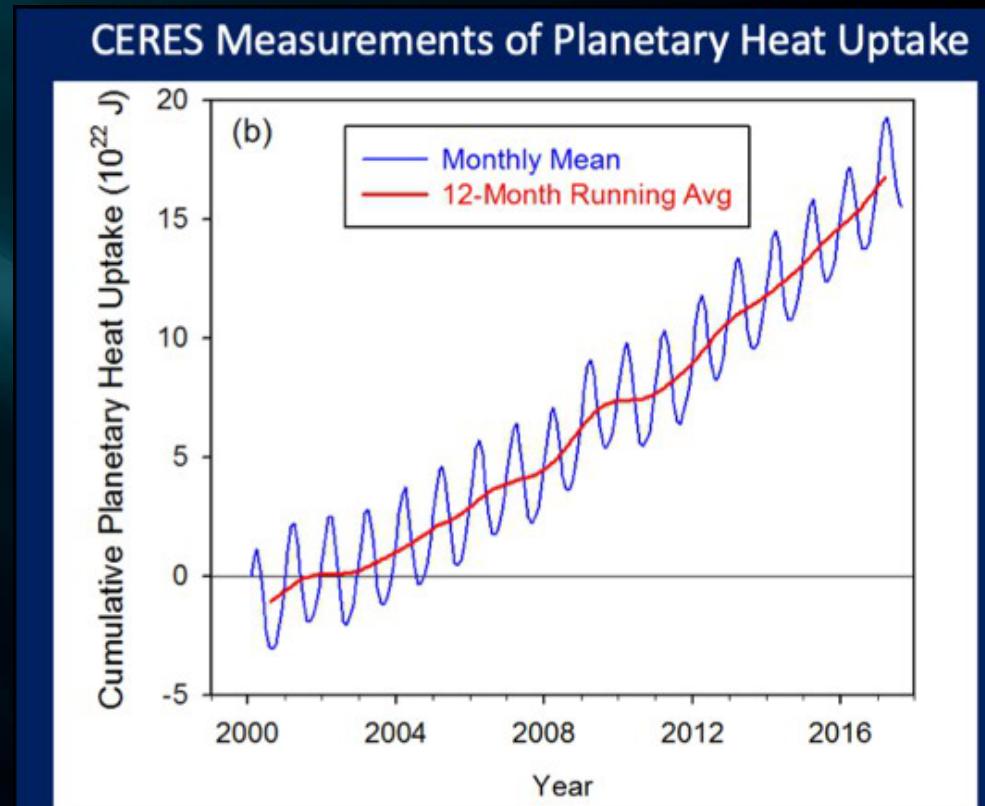
Com aumento da concentração dos gases menos energia tem sido emitida para o espaço. (~ 0.3% da Energia Solar).

# CERES – Balanço de Radiação

Estimativas do Balanço de Energia Planetária e Temperatura

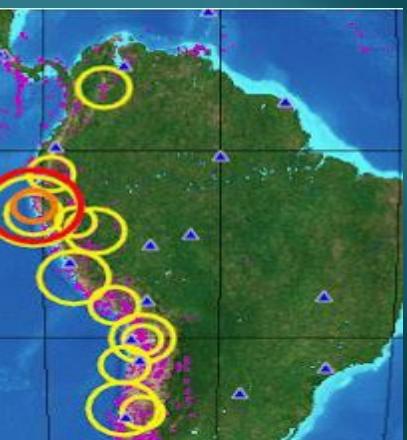


O aumento da concentração dos gases do efeito estufa, reduz a perda radiativa (ETR) e aumenta a energia térmica e temperatura da superfície (~93 % oceanos).

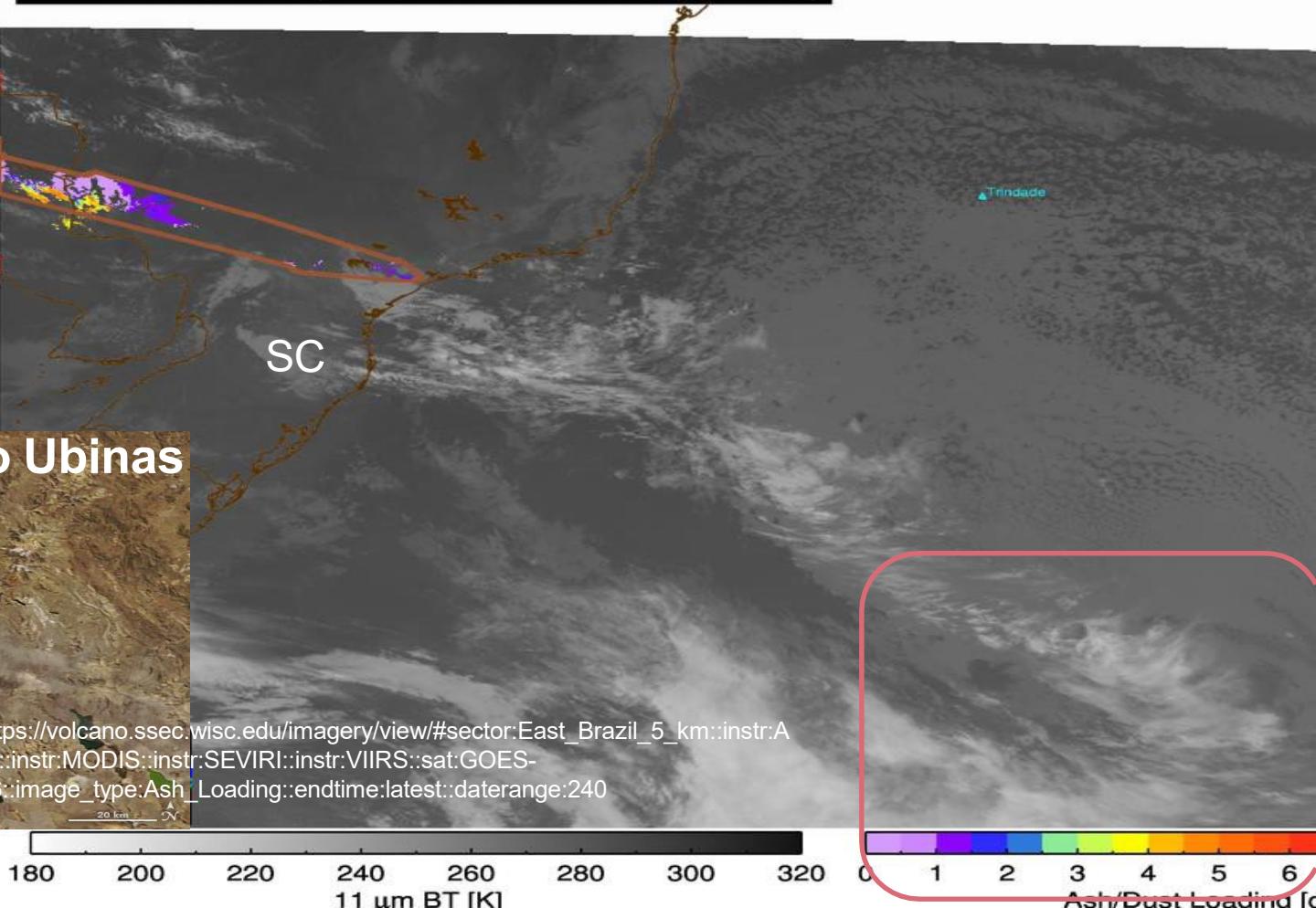


# IR Window Imagery and Ash/Dust Loading

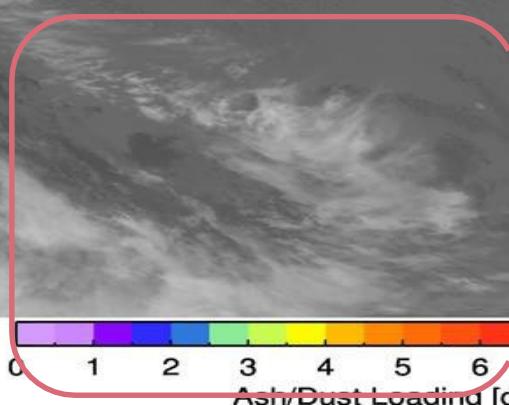
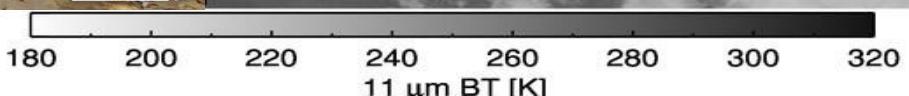
GOES-16 ABI (07/20/2019 – 12:00:30 UTC)



**Erupção do Vulcão Ubinas  
(Peru)  
19 Julho 2019**

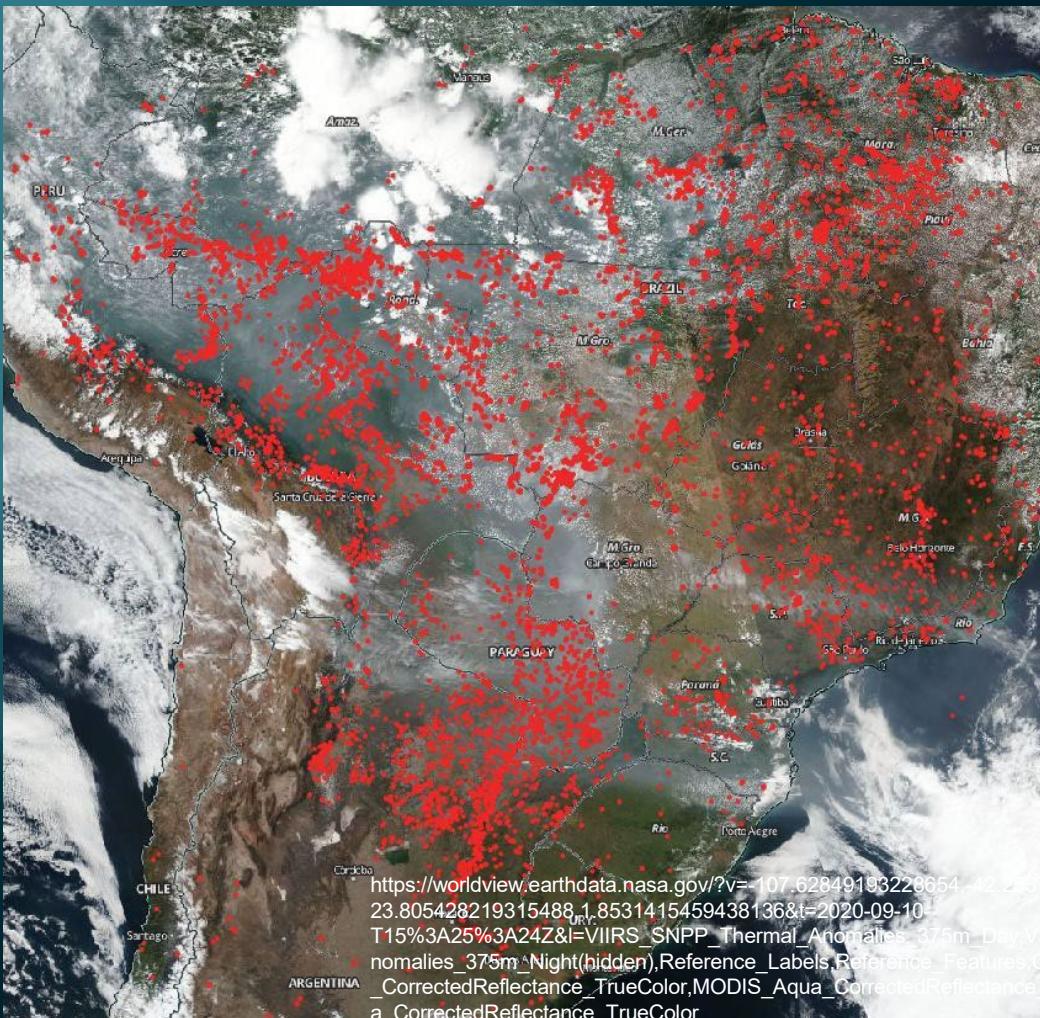


[https://volcano.ssec.wisc.edu/imagery/view/#sector:East\\_Brazil\\_5\\_km::instr:ABI::instr:MODIS::instr:SEVIRI::instr:VIIRS::sat:GOES-16::image\\_type:Ash\\_Loading::endtime:latest::daterange:240](https://volcano.ssec.wisc.edu/imagery/view/#sector:East_Brazil_5_km::instr:ABI::instr:MODIS::instr:SEVIRI::instr:VIIRS::sat:GOES-16::image_type:Ash_Loading::endtime:latest::daterange:240)

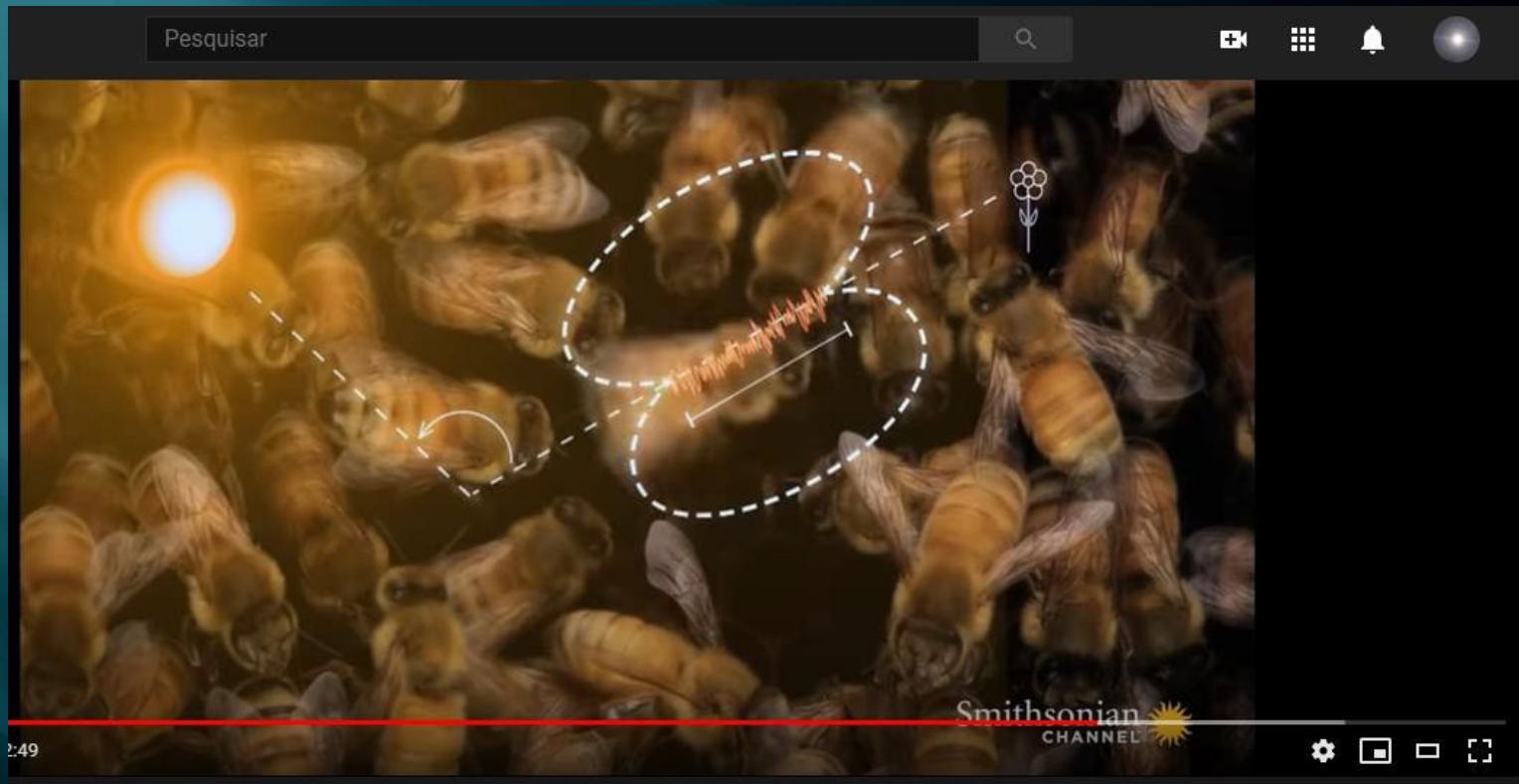


# Interação da radiação com fumaça

Satélite Suomi NASA  
11 Setembro 2020  
Focos de incêndio



# Importância do sol para o ecossistema (Abelhas)



[https://www.youtube.com/watch?v=LU\\_KD1enR3Q](https://www.youtube.com/watch?v=LU_KD1enR3Q)

## Sites intéressantes

[https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light\\_en.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/molecules-and-light/latest/molecules-and-light_en.html)

[https://youtu.be/kyhsBqB2x\\_Y](https://youtu.be/kyhsBqB2x_Y)

<https://worldview.earthdata.nasa.gov>

<https://ceres.larc.nasa.gov/science>

<https://volcano.ssec.wisc.edu/>

<https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>