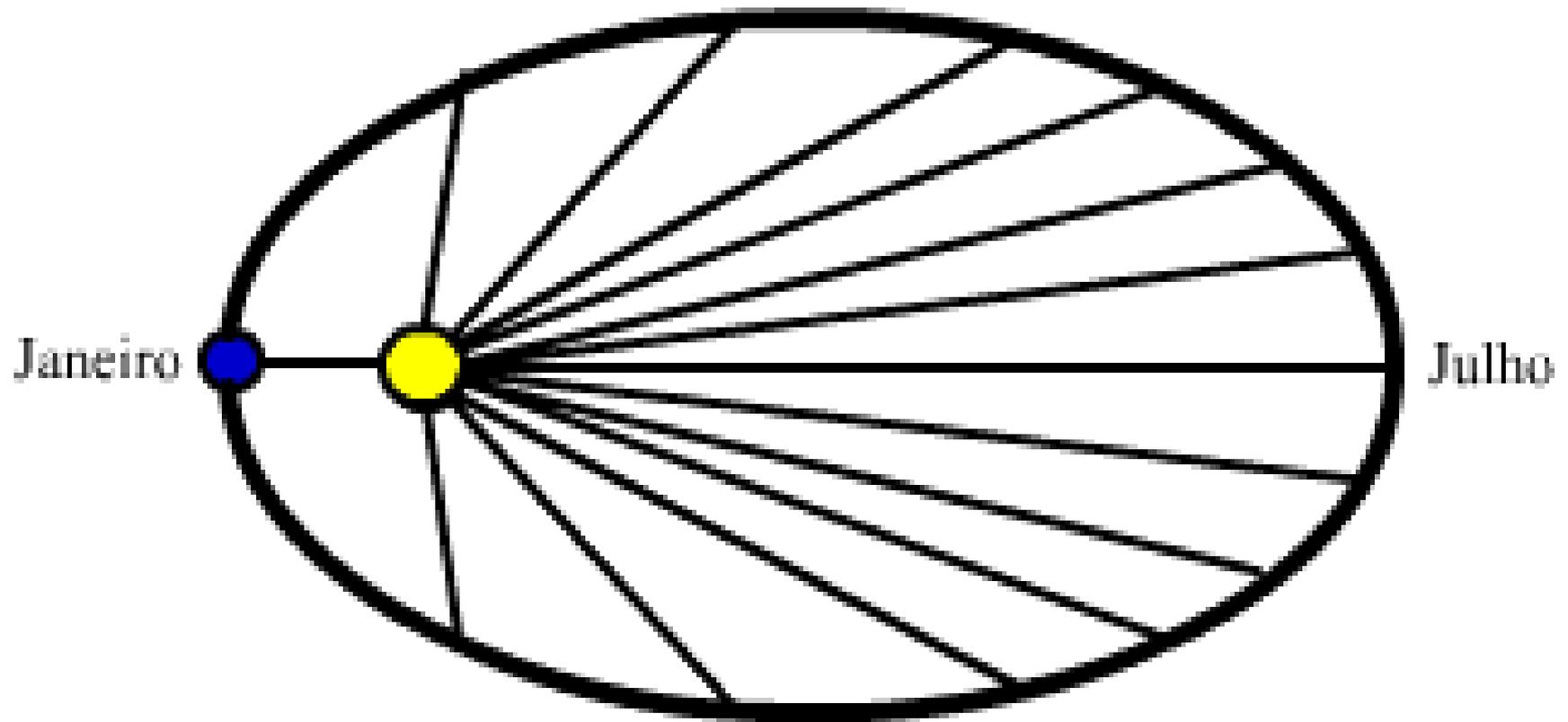


# ÓRBITA DA TERRA



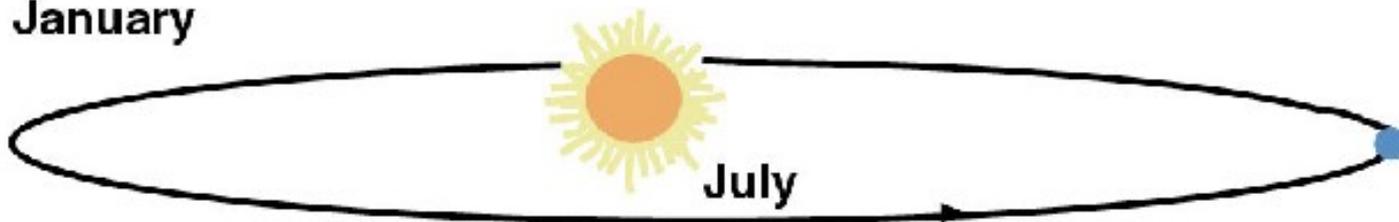


# Periélio

- O periélio não tem data fixa.
- O último periélio ocorreu em 03/01/1995.
- A Terra estará no periélio no dia 04/01, somente em 2067.
- Isso ocorre porque a mudança de posição acontece de 72 em 72 anos.

# A energia solar que chega

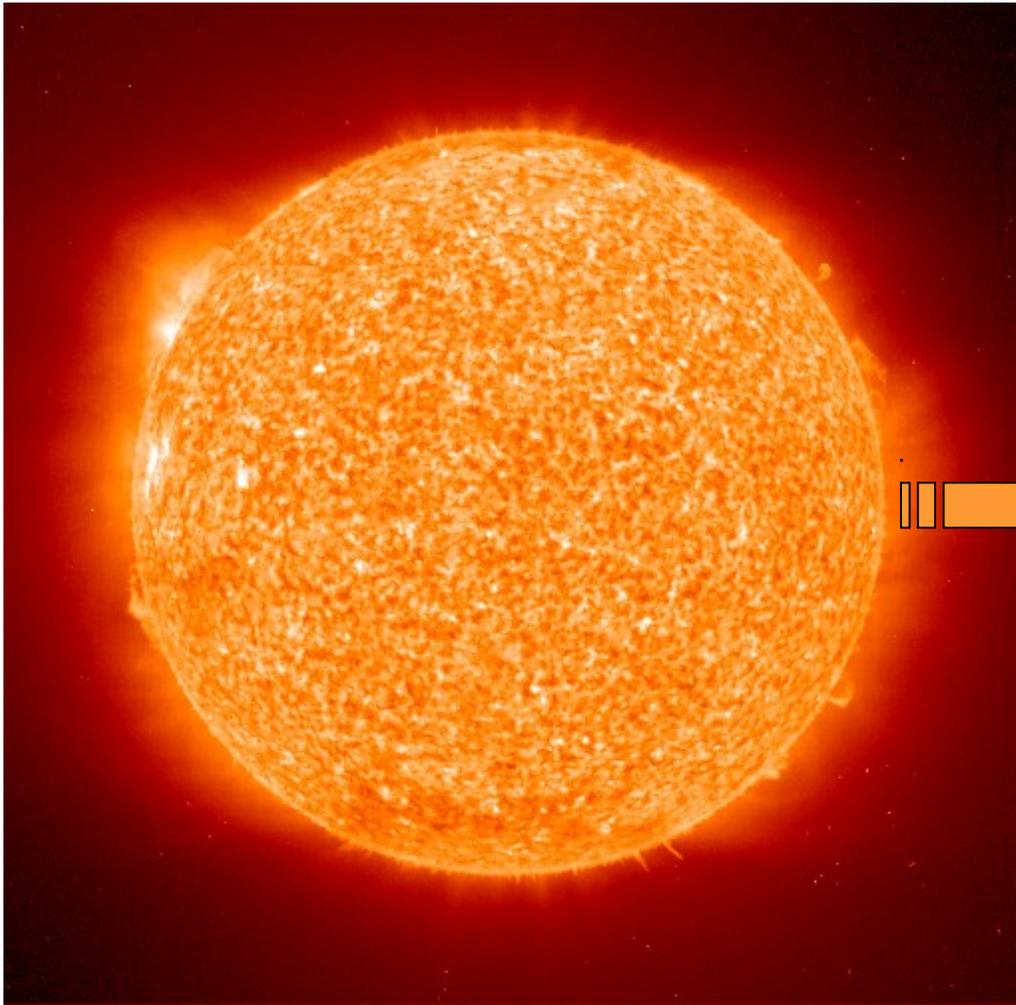
January



periélio  
(Janeiro)

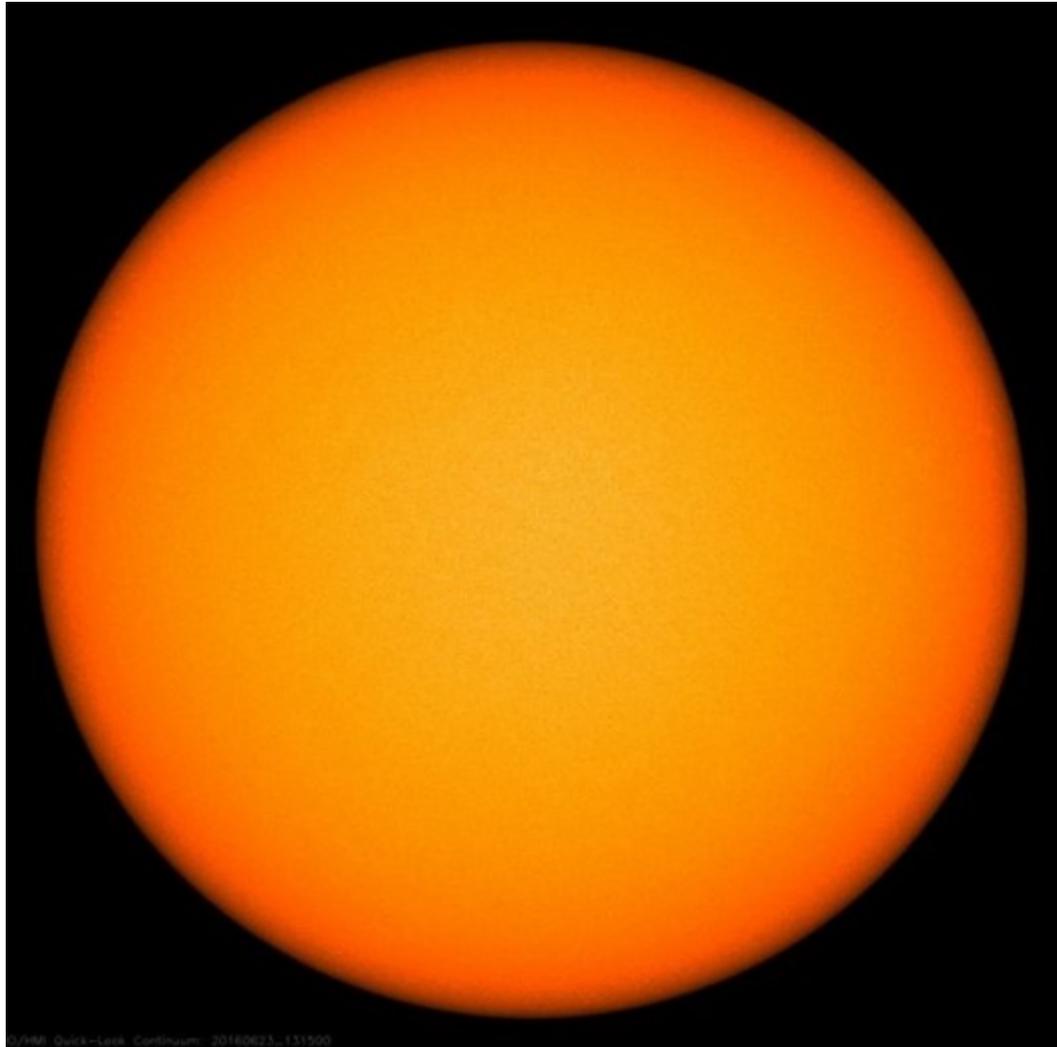
afélio  
(Julho)

# Radiação Solar



Radiação solar – maior fonte de energia para a Terra, principal elemento meteorológico e um dos fatores determinantes do tempo e do clima. Além disso, afeta diversos processos: físicos (aquecimento/evaporação), bio-físicos (transpiração) e biológicos (fotossíntese)

SOL SEM MANCHAS EM 29/06/2016





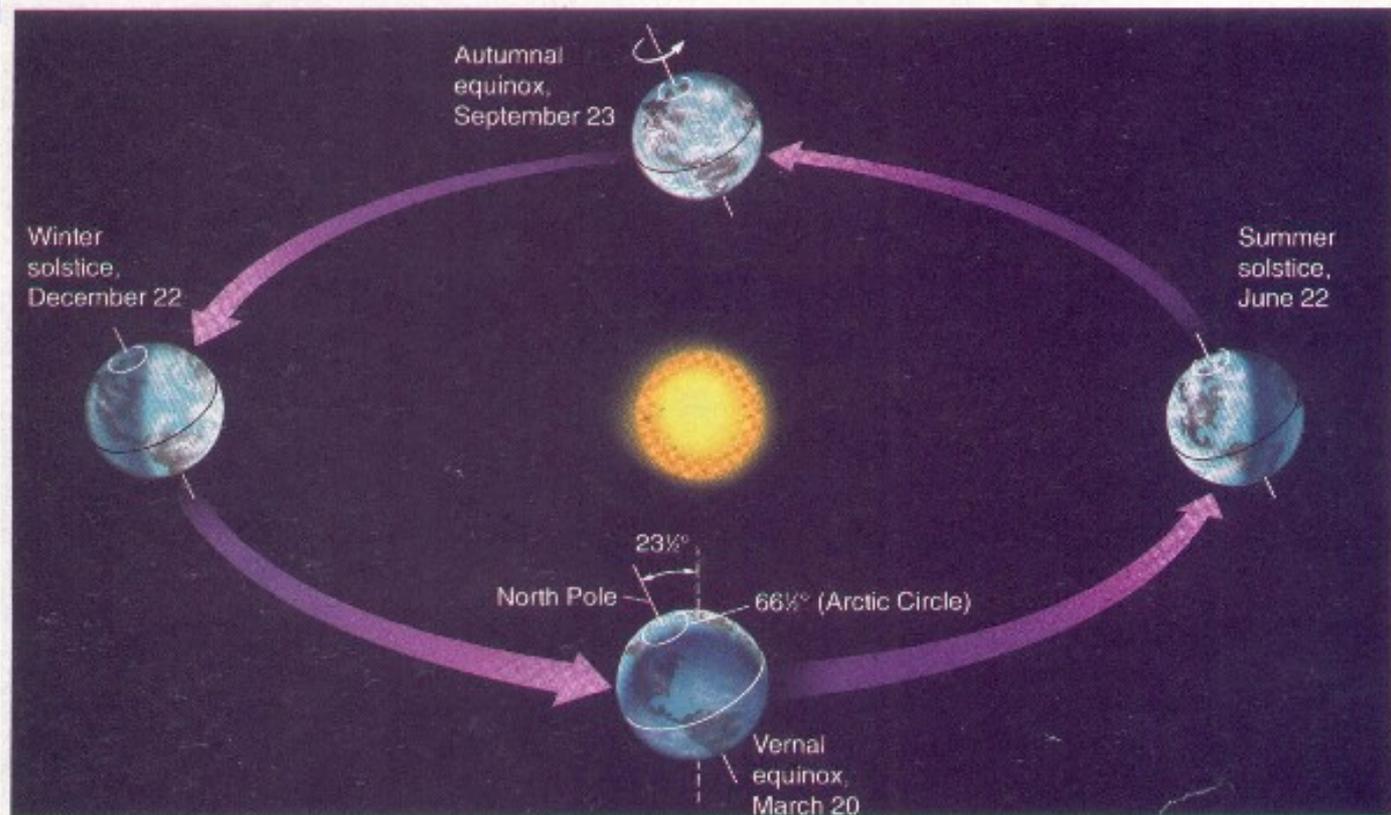
## Estações do ano

---

- Por que os dias de verão têm mais horas de luz do que os dias de inverno e o sol de meio dia no verão “passa mais alto no céu” do que nos dias de inverno?

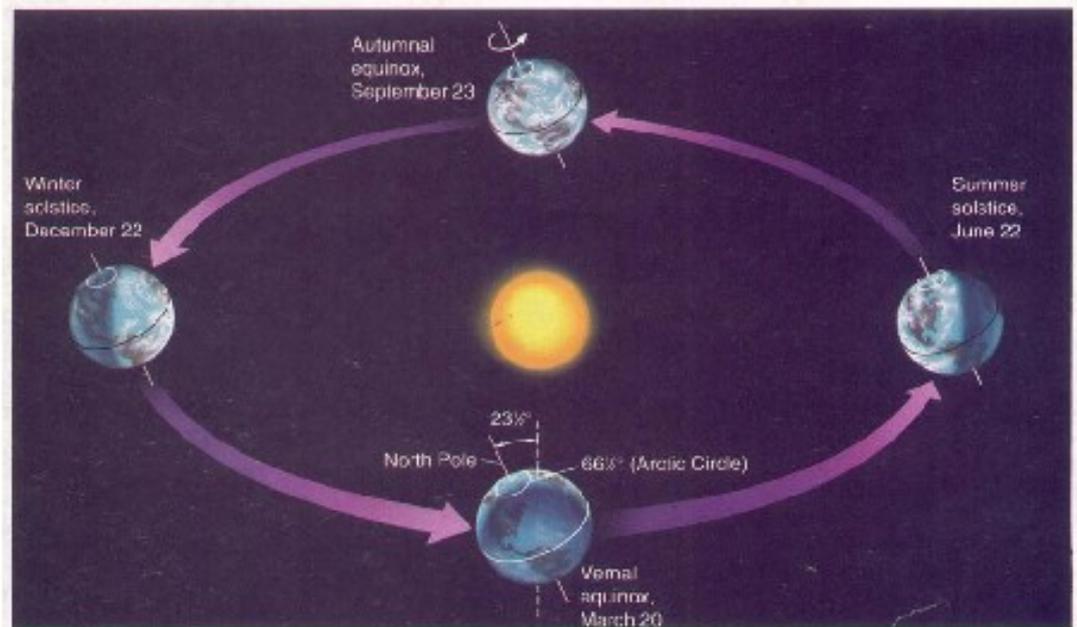
***Ângulo do eixo da terra =  $23,5^\circ$  e aponta sempre na mesma direção***

# A energia solar que chega



# A energia solar que chega

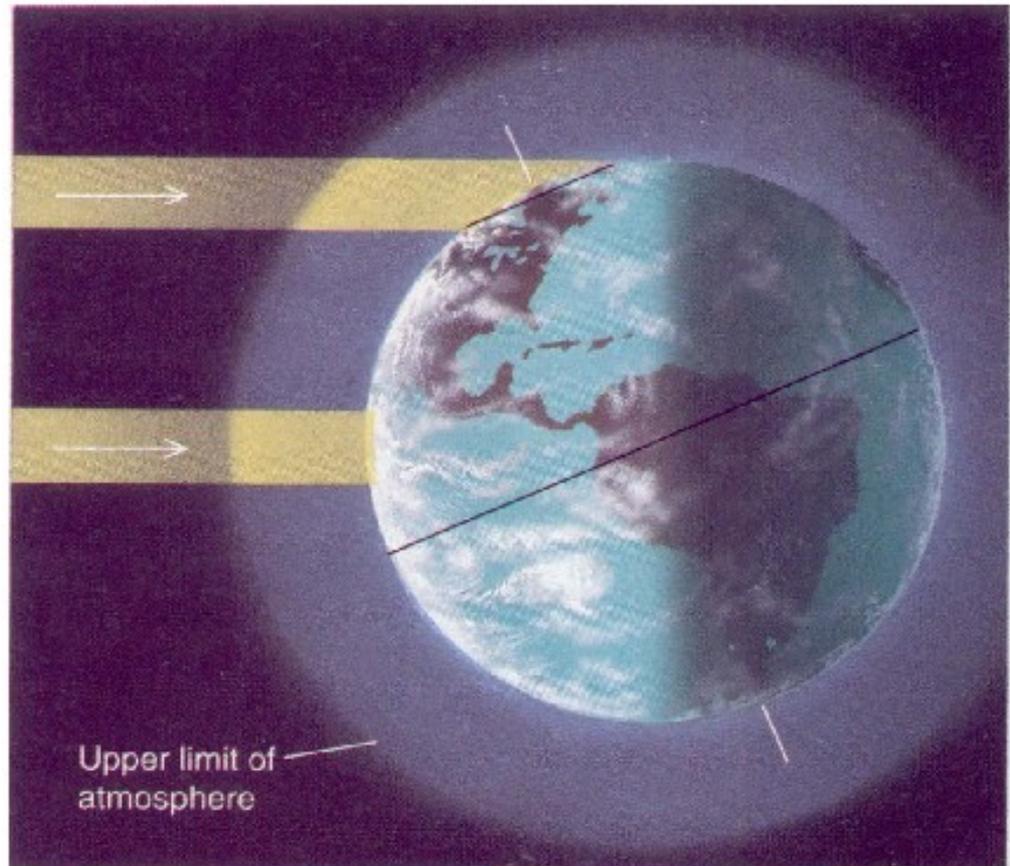
O hemisfério sul recebe mais radiação do sol em janeiro (verão) e recebe menos radiação em julho (inverno).



# A energia solar que chega

Se o polo é iluminado por 6 meses consecutivos, por que não fica mais quente que os trópicos?

Os raios percorrem um longo caminho na atmosfera e a mesma energia é distribuída sobre uma grande área.





## A energia solar que chega

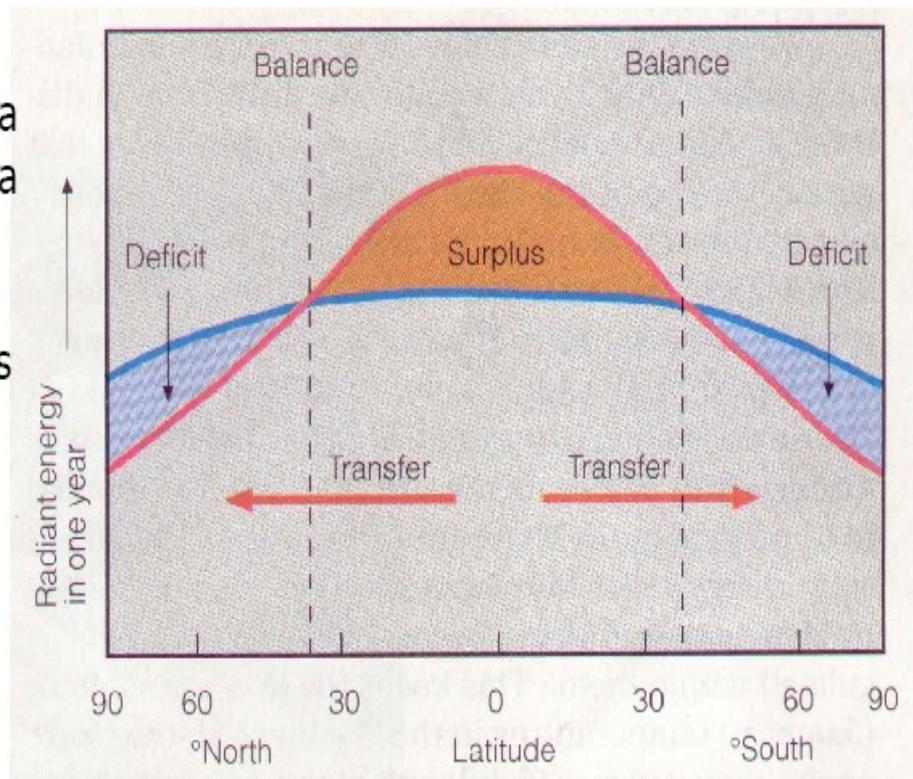
---

- Altas latitudes tendem a perder mais energia para o espaço do que recebem do sol, enquanto que as baixas latitudes tendem a receber durante o ano mais do que perdem.
- As regiões polares estão ficando mais frias?
- Quem compensa estas perdas e ganhos de energia?

# A energia solar que chega

Ventos na  
atmosfera

Correntes  
nos  
oceanos



Linha vermelha = radiação solar que chega

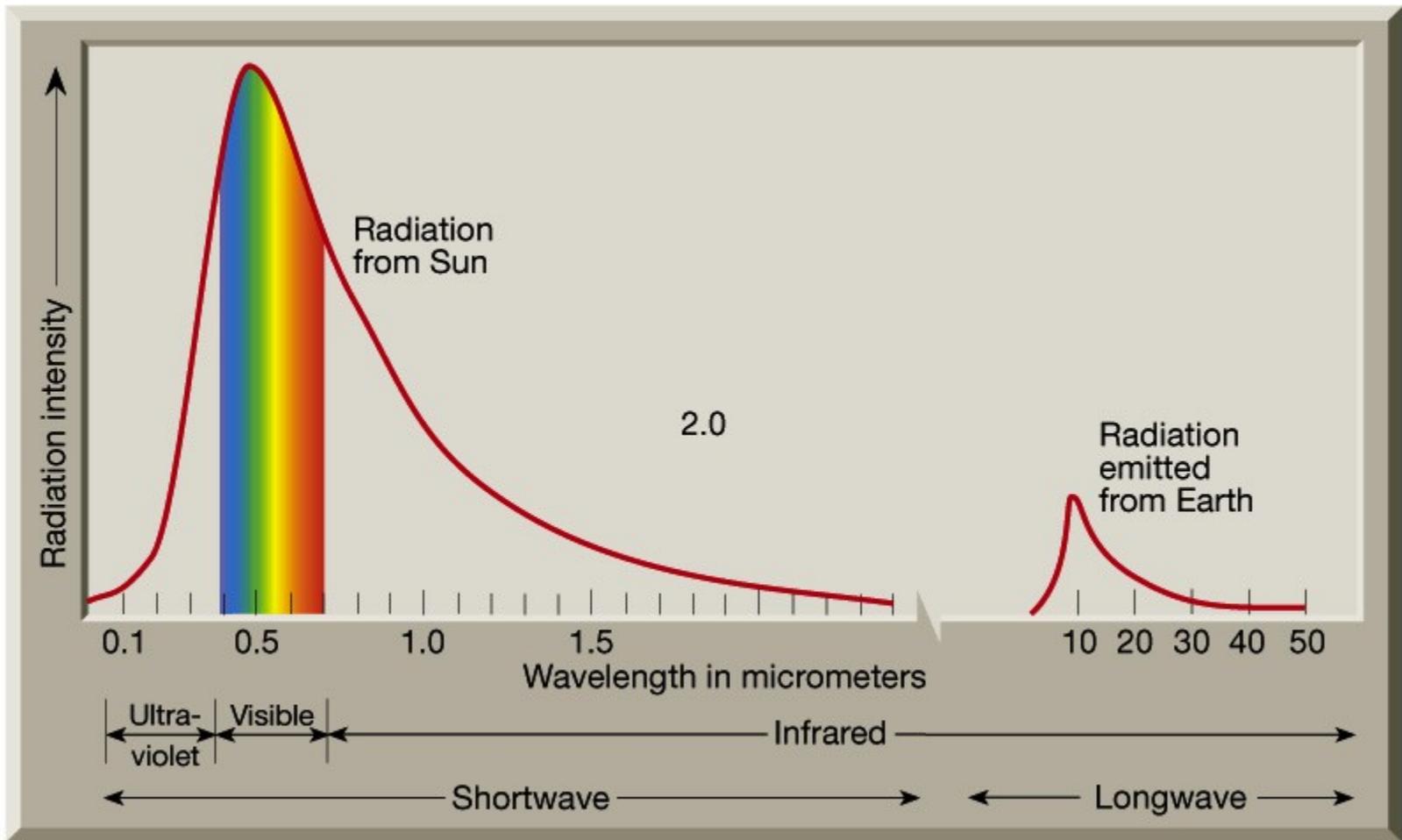
Linha azul = radiação terrestre que sai



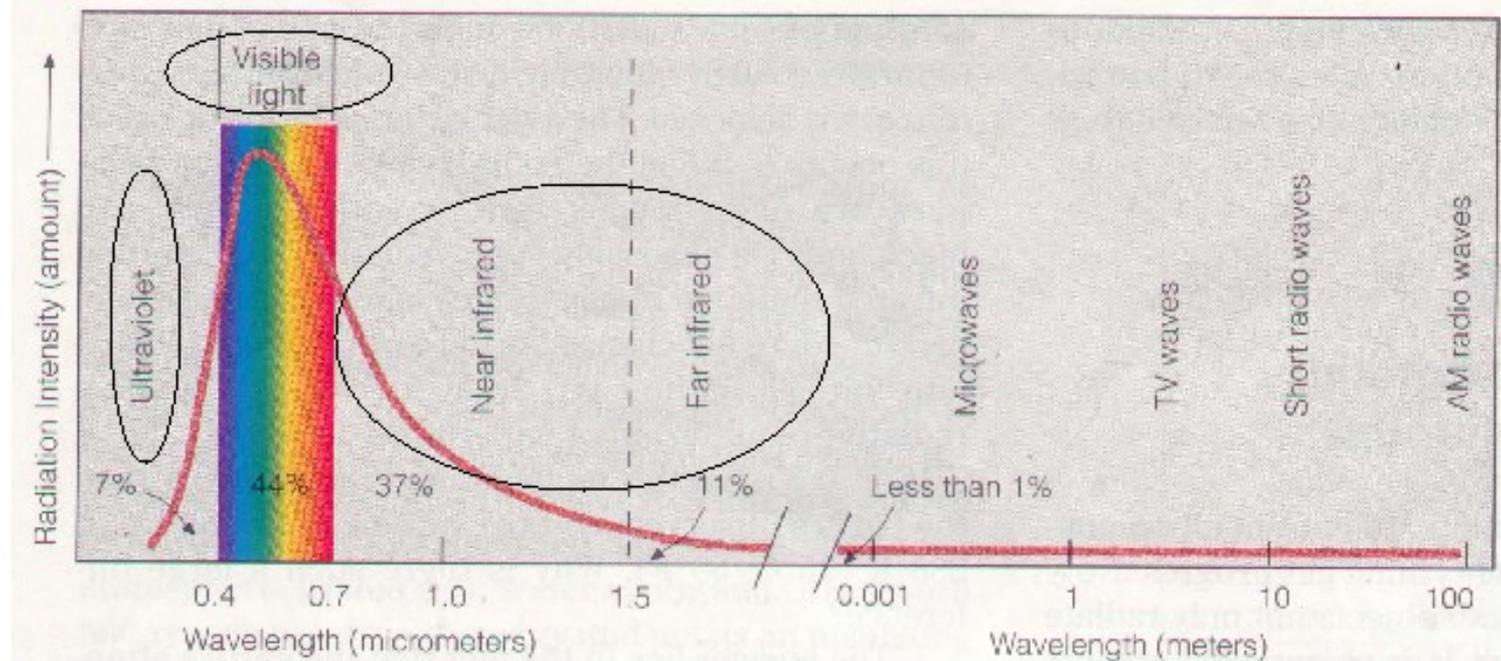
# Radiação

---

- Todas as coisas com temperatura  $> 0$  K emitem radiação
- O comprimento de onda desta radiação depende da temperatura do objeto
- A quantidade de radiação emitida é proporcional à temperatura do objeto

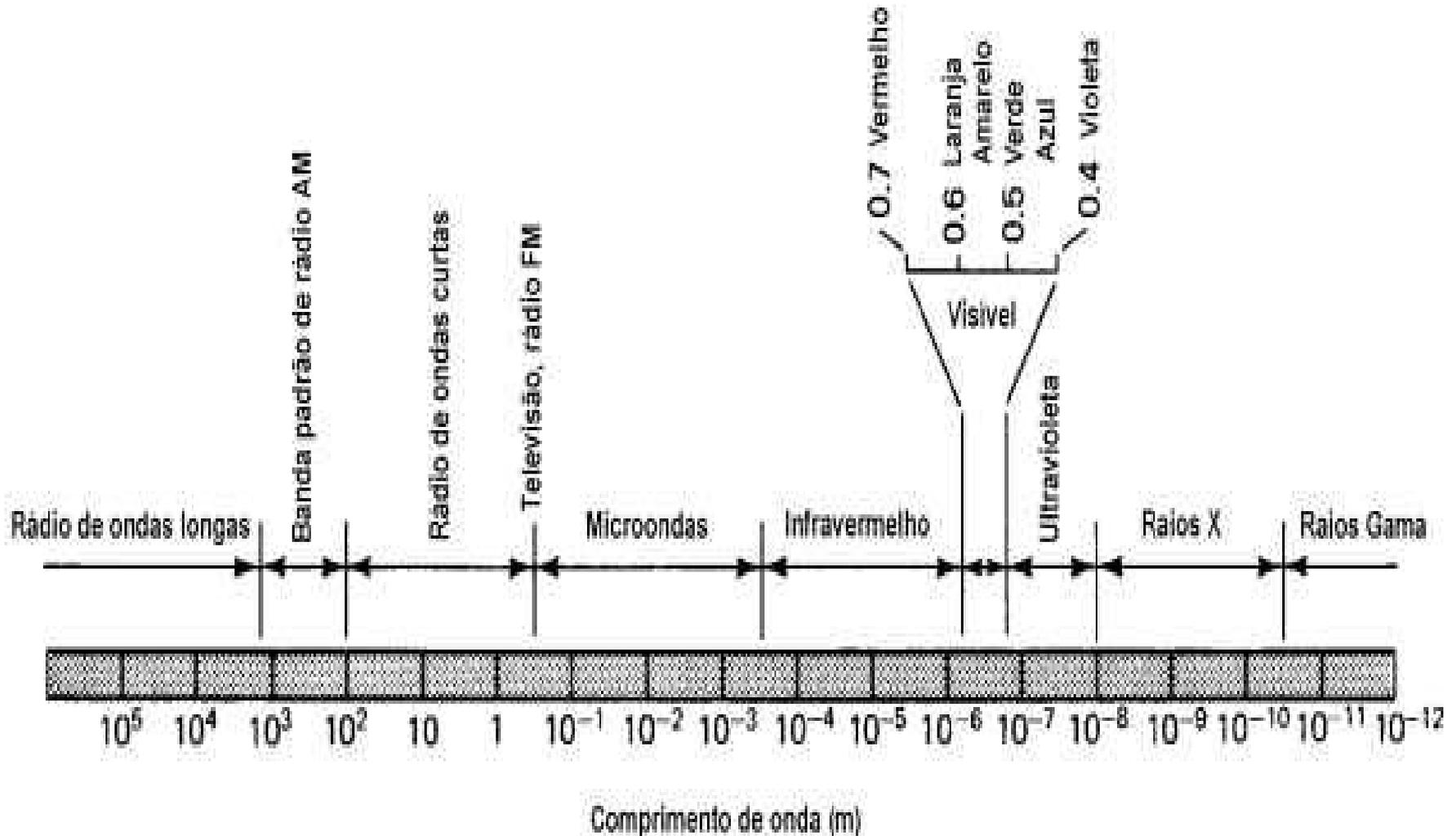


# Radiação



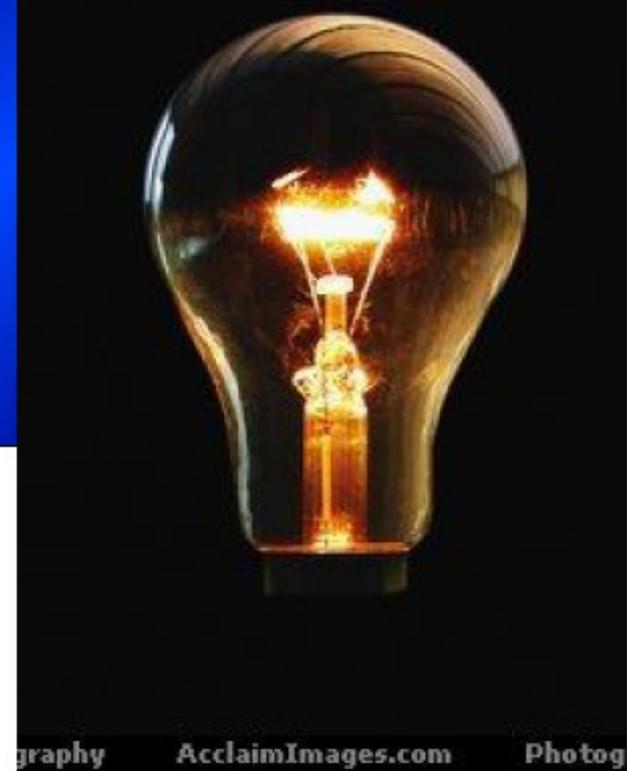
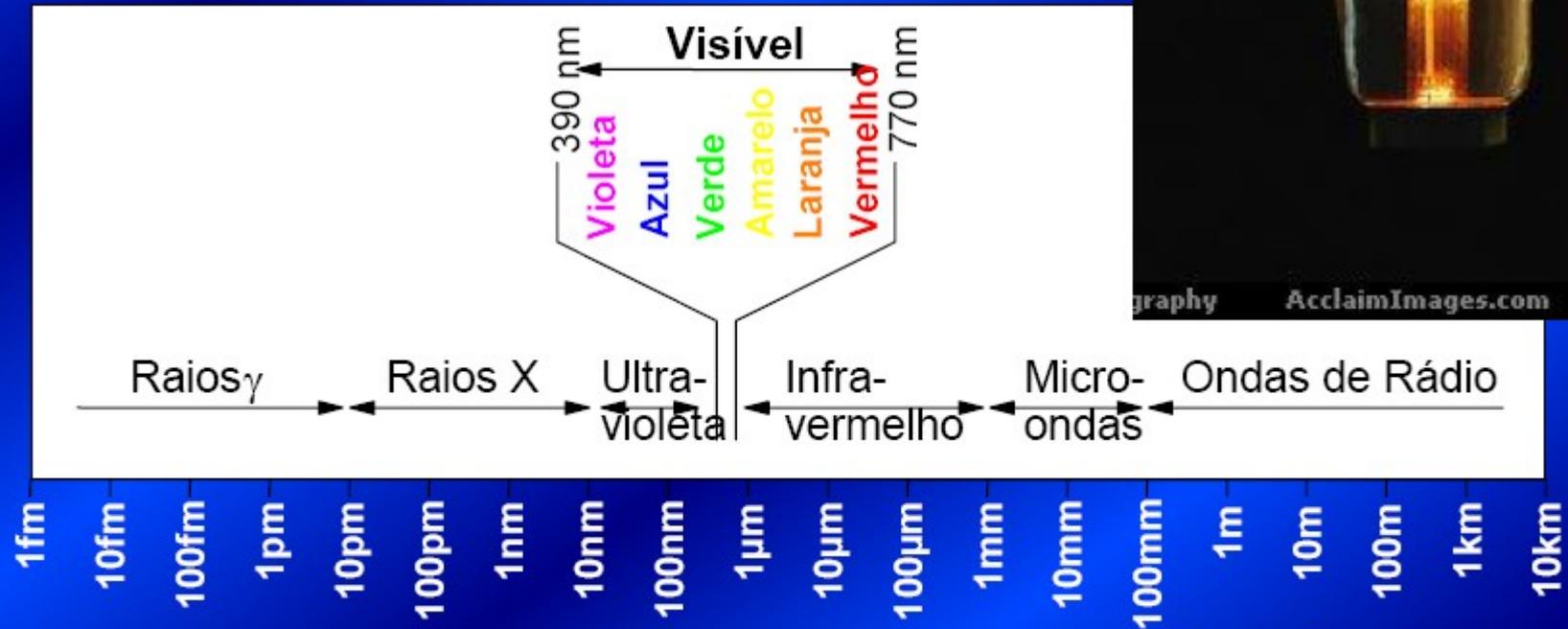
Espectro de radiação emitida pelo sol

# Espectro eletromagnético



# Radiação

## Espectro eletromagnético

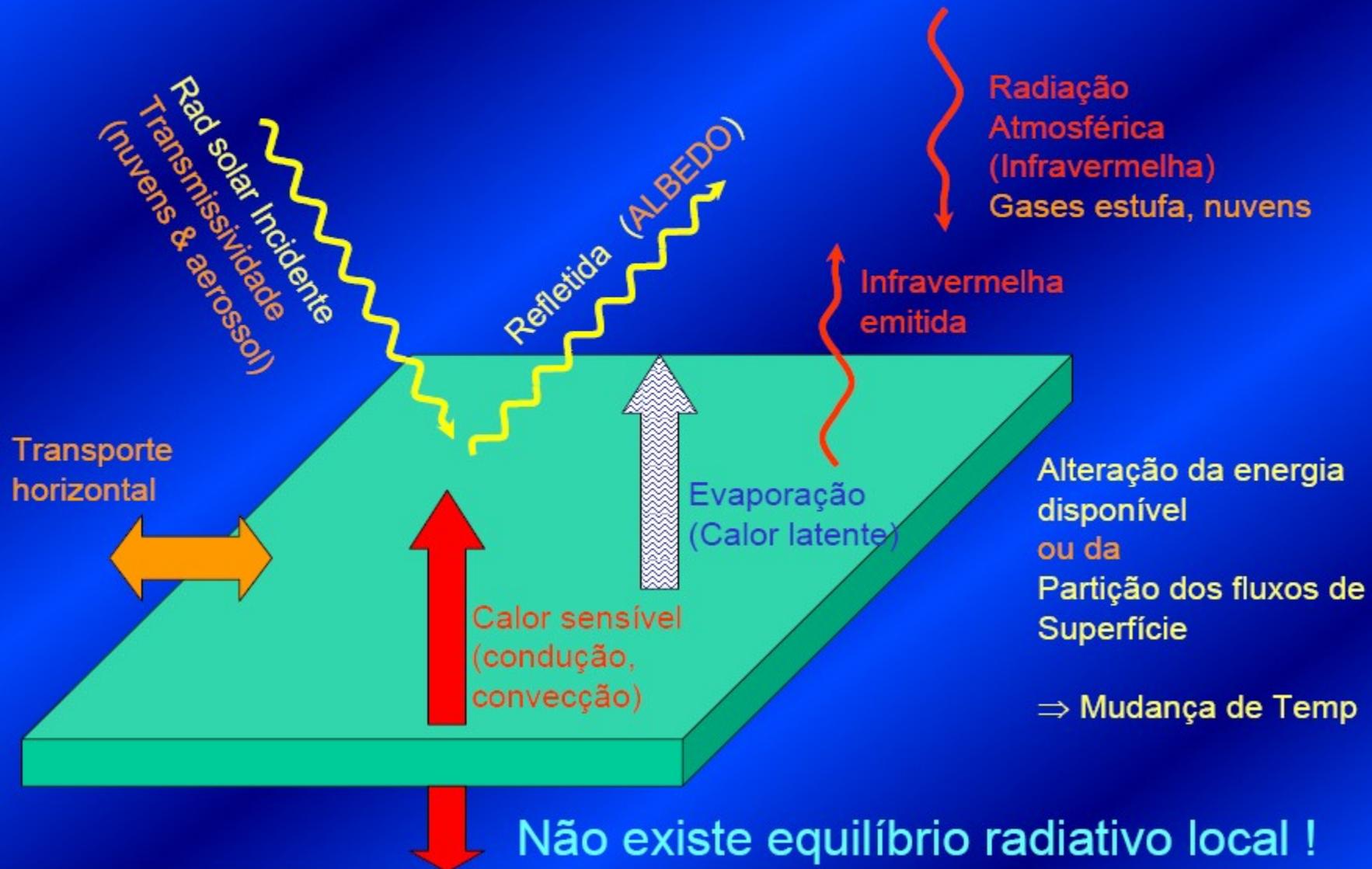


Comprimento de onda

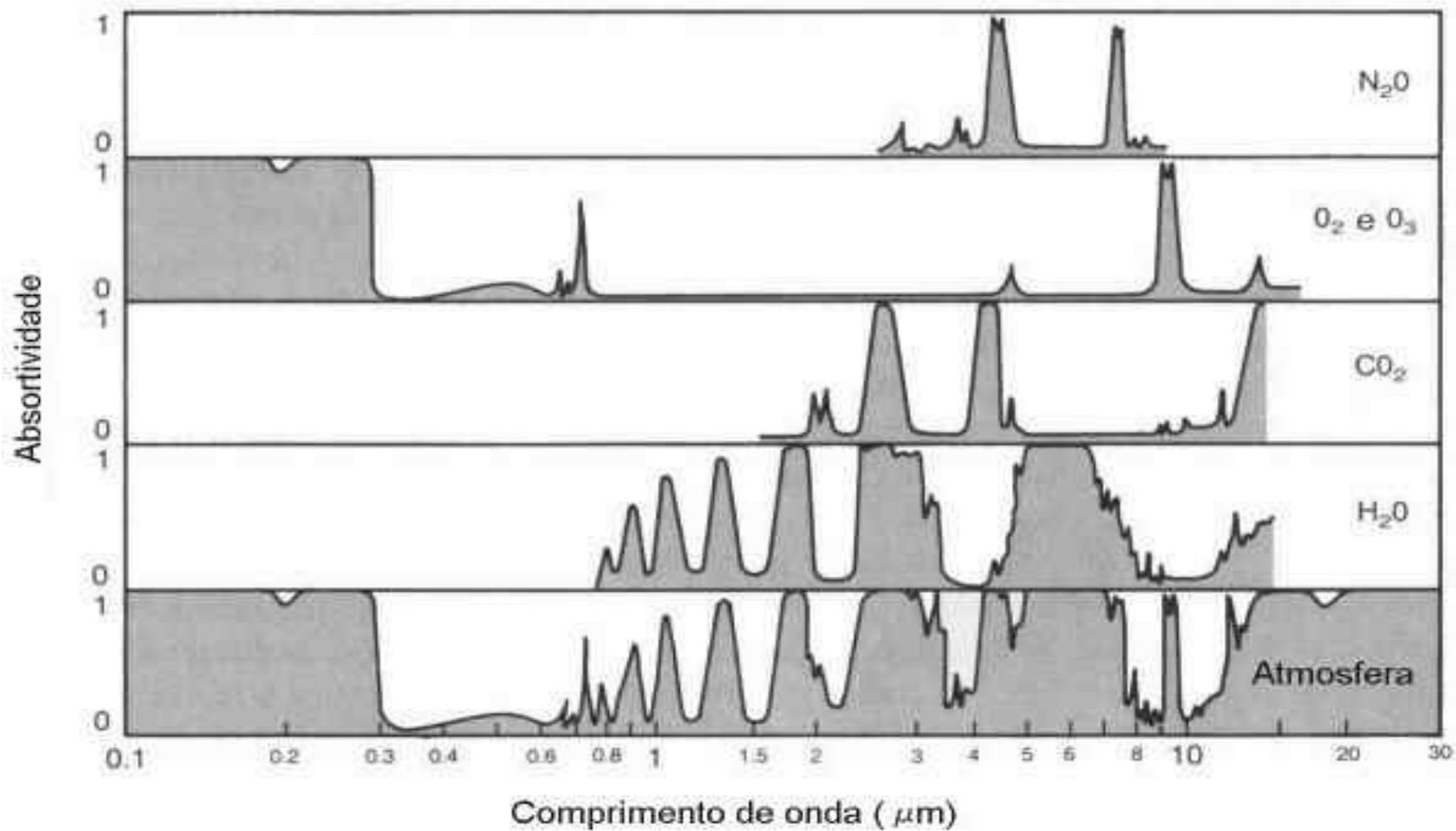
# Equilíbrio Radiativo

**O sistema Terra-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria radiação para o espaço. Numa média de longo prazo, as taxas de absorção e emissão são aproximadamente iguais, de modo que o sistema está muito próximo do equilíbrio radiativo.**

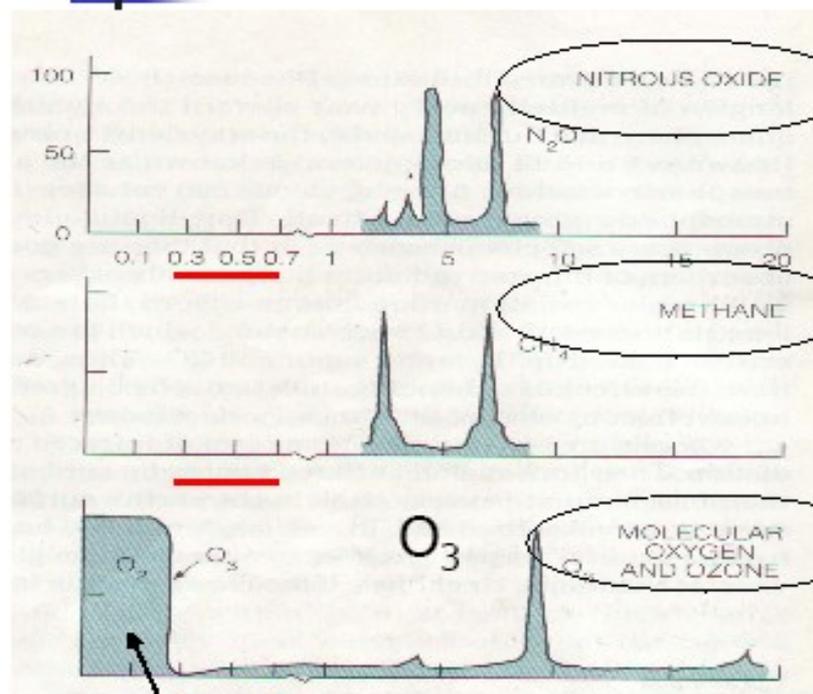
# Regulação climática na superfície



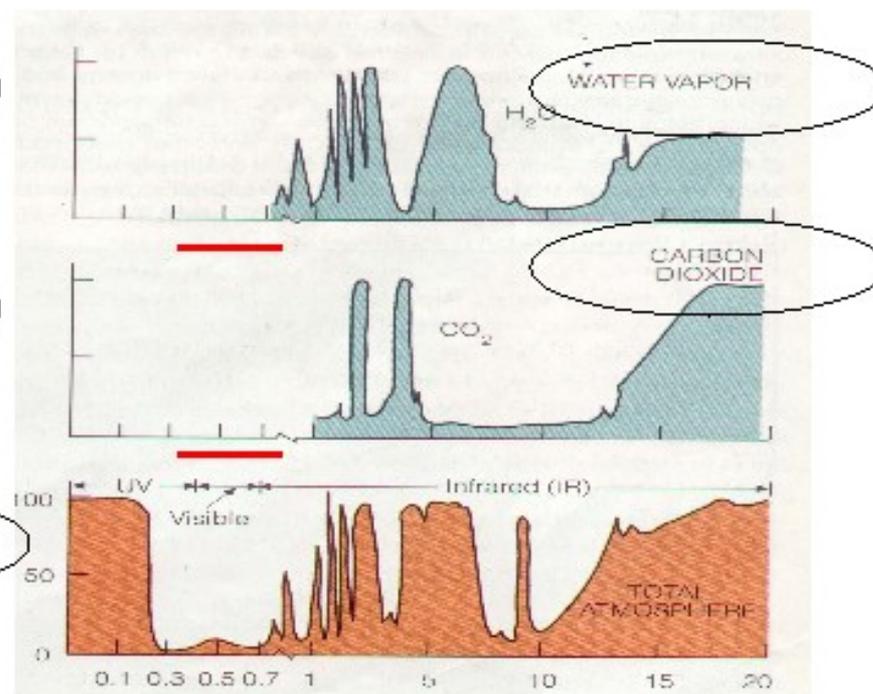
# Absortividade Seletiva

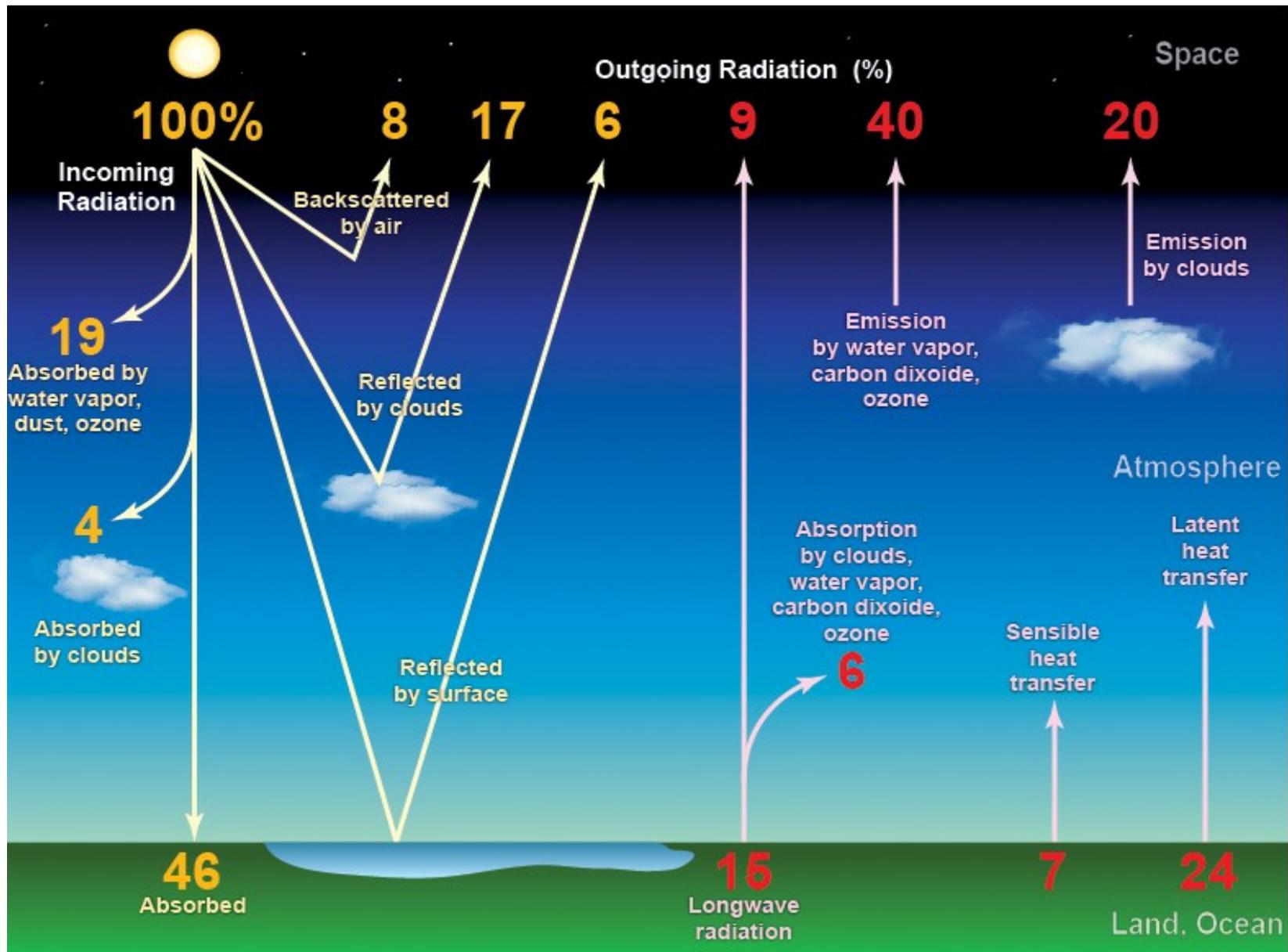


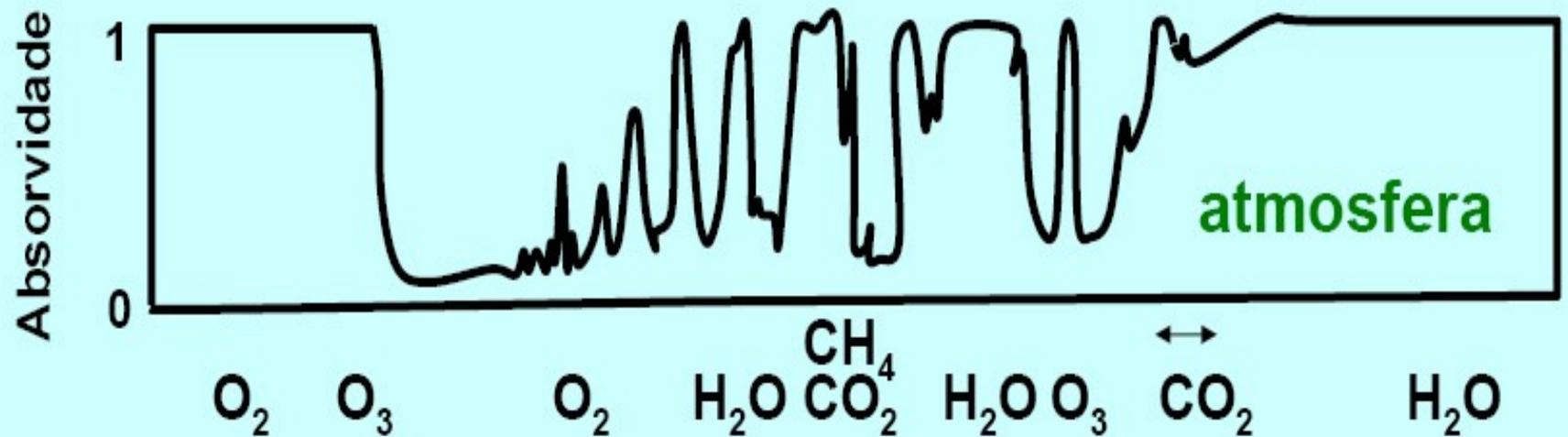
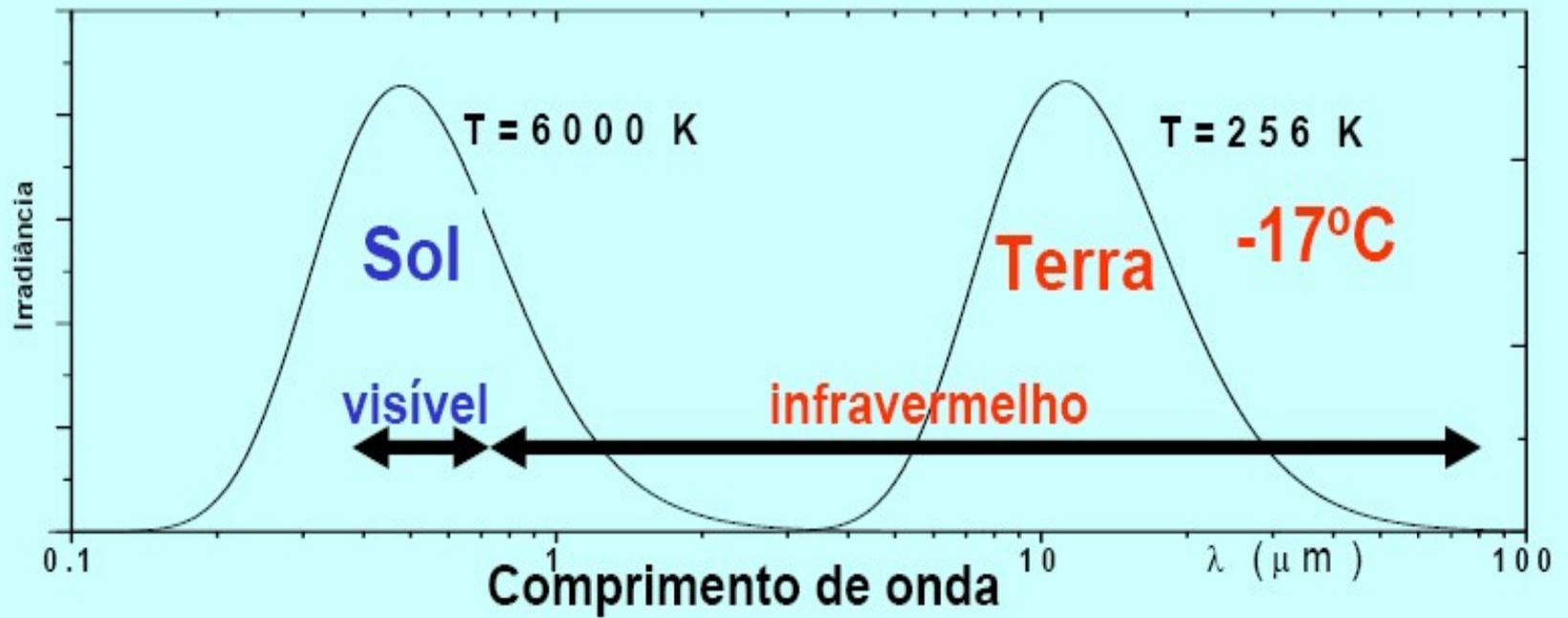
# Absorção de radiação



ultravioleta







# DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO

A radiação monocromática incidente sobre uma camada **não opaca** (como a atmosfera) pode ser **espalhada, refletida, absorvida ou transmitida**. Como na equação anterior:

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} + s_{\lambda} + T_{\lambda} = 1$$

A radiação será absorvida, espalhada ou refletida de volta dependendo, em grande parte, do comprimento de onda da energia que está sendo transportada, assim como do tamanho e natureza do material que intervém.

# DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO

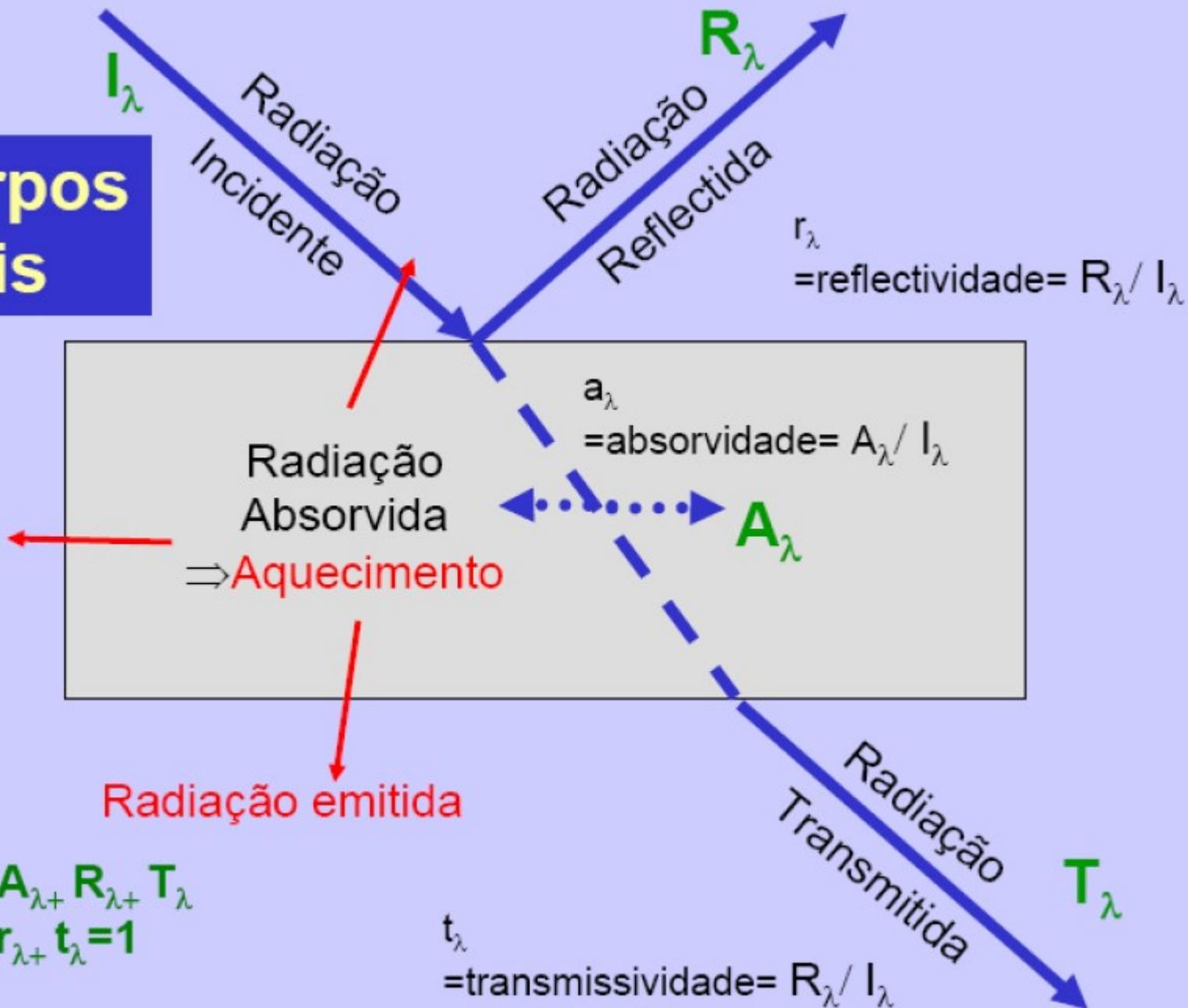
A radiação monocromática incidente sobre qualquer superfície **opaca** (como a superfície da Terra) é absorvida ou refletida:

$$E_{\lambda}(\text{absorvido}) + E_{\lambda}(\text{refletido}) = E_{\lambda}(\text{incidente})$$

Dividindo-se cada termo desta expressão pela radiação monocromática incidente obtemos:

$$a_{\lambda} + r_{\lambda} = 1$$

# Corpos reais

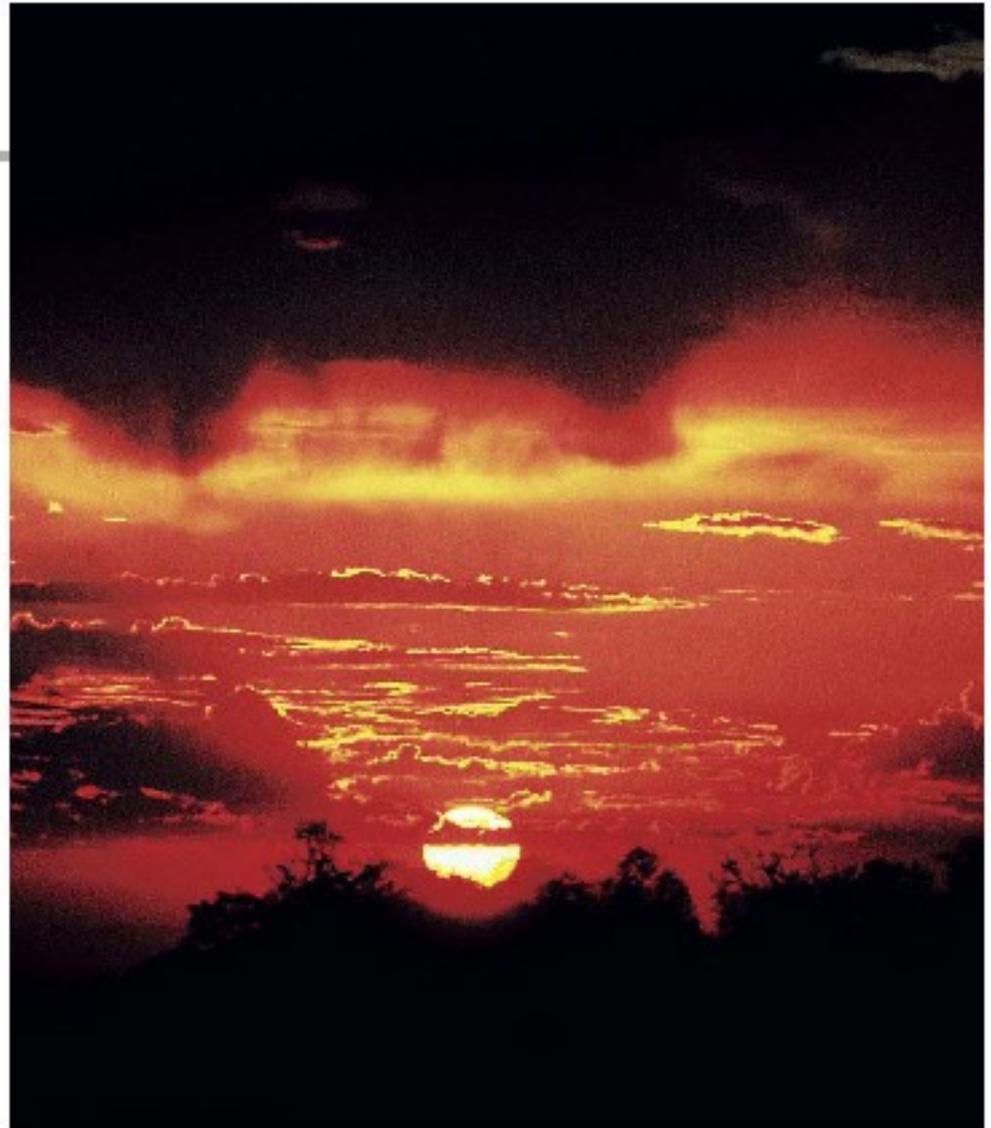


$$I_\lambda = A_\lambda + R_\lambda + T_\lambda$$
$$a_\lambda + r_\lambda + t_\lambda = 1$$



# Espalhamento

---



## ESPALHAMENTO

Embora a radiação solar incida em linha reta, os gases e aerossóis podem causar seu **espalhamento** (dispersando-a em todas as direções para cima, para baixo e para os lados). A reflexão é um caso particular de espalhamento. A **radiação difusa** é constituída de radiação solar que é espalhada ou refletida de volta para a Terra. Esta **radiação difusa** é responsável pela claridade do céu durante o dia e pela iluminação de áreas que não recebem iluminação direta do sol.

As características do **espalhamento** dependem, em grande parte, do tamanho das moléculas de gás ou aerossóis. O espalhamento por partículas cujo raio é bem menor que o comprimento de onda da radiação espalhada, como o caso do espalhamento da luz visível por **moléculas de gás da atmosfera**, é dependente do comprimento de onda (**espalhamento Rayleigh**), de forma que a radiação monocromática espalhada é inversamente proporcional à 4ª potência do comprimento de onda

$$E_{\lambda s} \sim \frac{1}{\lambda^4}$$

Esta dependência é a base para explicar o azul do céu.

## ESPALHAMENTO

A luz azul é aproximadamente 5,5 vezes mais espalhada que a luz vermelha. É também mais espalhada que o verde, amarelo e laranja. Assim, o céu, longe do disco do sol, parece azul. Se a luz violeta tem um comprimento de onda menor que a luz azul, por que então, o céu não é violeta?



Porque a energia contida no **violeta** é muito menor que a contida no **azul** e, porque o olho humano é mais sensível à luz **azul** que à luz **violeta**.

## ESPALHAMENTO

Como a densidade molecular decresce fortemente com a altura, o céu, visto de alturas cada vez maiores, iria gradualmente escurecer até tornar-se totalmente escuro, longe do disco solar. Por outro lado, o Sol apareceria cada vez mais branco e brilhante. Quando o Sol se aproxima do horizonte (no nascer e por do Sol) a radiação solar percorre um caminho mais longo através das moléculas de ar, e, portanto, mais e mais luz azul é espalhada do feixe de luz. Assim, o feixe luminoso contém mais luz do extremo vermelho do espectro visível. Isto explica a coloração avermelhada do céu ao nascer e por do Sol. Este fenômeno é especialmente visível em dias nos quais **pequenas partículas de poeira ou fumaça estiverem presentes.**

# ESPALHAMENTO

A radiação é espalhada igualmente em todos os comprimentos de onda. Quando a radiação é espalhada por **partículas** cujos raios se aproximam ou excedem em **até 8 vezes** o comprimento de onda da radiação incidente, o **espalhamento não depende do comprimento de onda** e é chamado de **espalhamento de Mie**. Partículas que compõem as nuvens (pequenos cristais de gelo ou gotículas de água) e a maior parte dos aerossóis atmosféricos espalham a luz do Sol desta maneira. Por isso, as nuvens parecem brancas e quando a atmosfera contém grande concentração de aerossóis o céu inteiro fica **esbranquiçado**.

# Cor do céu



# Cor do Céu



# Cor do céu





# **CORPO NEGRO**

- O sol e a Terra atuam como corpo negro**
- A atmosfera é um absorvedor seletivo**

## LEIS DA RADIAÇÃO (PARA CORPOS NEGROS )

Um **corpo negro** é um corpo hipotético que emite (ou absorve) radiação eletromagnética em todos os comprimentos de onda, de forma que:

- toda a radiação incidente é completamente absorvida;
- a radiação máxima possível, para todos os comprimentos de onda e em todas as direções, depende da temperatura do corpo.

A radiação do corpo negro é isotrópica, isto é, não depende da direção.

O Sol e a Terra irradiam aproximadamente como corpos negros. Portanto, as leis da radiação dos corpos negros podem ser aplicadas a **radiação solar e terrestre com algumas restrições**.



# Reflexão

---

- Albedo – porcentagem de radiação que é refletida pela superfície quando comparada com a radiação que a atinge. **Refletividade da superfície.**
- Em média o “albedo da terra” é de 30%.

# ALBEDO

- O albedo varia no espaço e no tempo, dependendo da natureza da superfície e da altura do Sol. Dentro da atmosfera, os topos das nuvens são os mais importantes refletores. O albedo dos topos de nuvens depende de sua espessura, variando de menos de 40% para nuvens finas (menos de 50m) a 80% para nuvens espessas (mais de 5000m) cumulonimbus (cb).

## **Albedo para algumas superfícies no intervalo visível ( % )**

<b>Solo descoberto</b>	<b>10-25</b>
<b>Areia, deserto</b>	<b>25-40</b>
<b>Grama</b>	<b>15-25</b>
<b>Floresta</b>	<b>10-20</b>
<b>Neve (limpa, seca)</b>	<b>75-95</b>
<b>Neve (molhada e/ou suja)</b>	<b>25-75</b>
<b>Superfície do mar (sol &gt; 25° acima do horizonte)</b>	<b>&lt;10</b>
<b>Superfície do mar (pequena altura do sol)</b>	<b>10-70</b>
<b>Nuvens espessas</b>	<b>70-80</b>
<b>Nuvens finas</b>	<b>25-50</b>

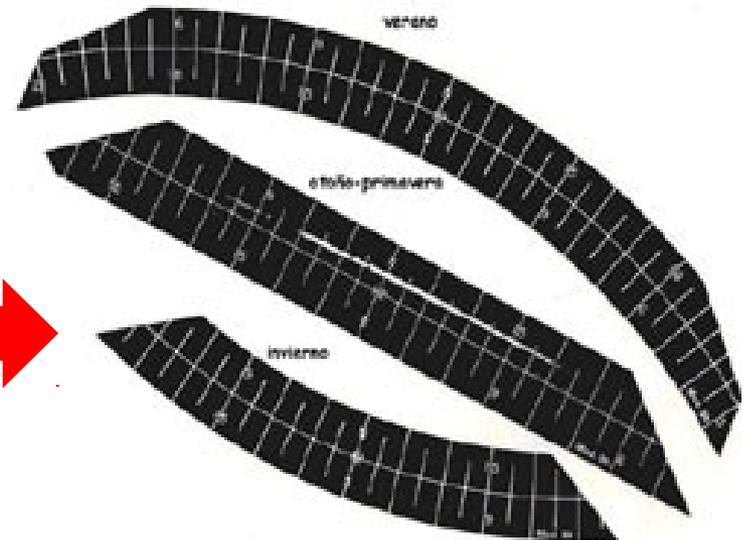
# Insolação

## Horas efetivas de brilho solar [horas/dia]



Heliógrafo – equipamento utilizado para a obtenção do número de horas efetivas de brilho solar (radiação solar direta)

Bandas de registro – o sol ao ter seus raios convergidos pela esfera de cristal queima as bandas, registrando o número de horas com brilho solar





Reações fotoquímicas e a  
formação de ozônio

Um átomo ou uma molécula pode absorver ou emitir radiação eletromagnética.

Uma molécula pode absorver radiação cuja energia seja suficiente para "quebrá-la" em seus componentes atômicos.

Nas reações **fotoquímicas** a absorção ou emissão de radiação eletromagnética tem papel crucial em fornecer ou remover energia.



O Nitrogênio, o mais abundante constituinte da atmosfera é um fraco absorvedor da radiação solar incidente, que se concentra principalmente nos comprimentos de onda entre  $0,2 \mu$  e  $2 \mu$ .

A fotodissociação do **oxigênio** entre 50 a 110 km de altitude

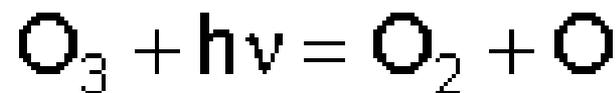


absorve virtualmente toda radiação solar **ultravioleta** para  $0,1\mu < \lambda < 0,2\mu$ ômico assim obtido é altamente **reativo**, sendo de particular importância a reação



Esta é a reação dominante para a **produção de ozônio na estratosfera** (M é uma 3<sup>a</sup> molécula necessária para retirar o excesso de energia liberada na reação). Como a probabilidade de ocorrência desta reação cresce com o quadrado da densidade do gás, o oxigênio atômico é estável na alta mesosfera e termosfera, enquanto na **estratosfera ele se combina rapidamente para formar o ozônio**.

A radiação ultravioleta para  $0,2\mu < \lambda < 0,3\mu$  é absorvida na reação de **fotodissociação do ozônio** (na estratosfera, entre 20 a 60 km).





O átomo de oxigênio combina rapidamente com o  $O_2$  para formar outra molécula de  $O_3$ . Quando as equações anteriores ocorrem sequencialmente não há mudança na estrutura química, mas somente absorção de radiação e resultante entrada de calor e aumento de temperatura na estratosfera.

# Unidades de Irradiância Solar

Valores  
instantâneos

SI



$W/m^2 = J/m^2s$

CGS



$cal/cm^2min$

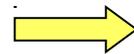
Valores  
diários

SI



$MJ/m^2dia$

CGS



$cal/cm^2dia$

# DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DA RADIAÇÃO

**Fluxo radiante:** taxa de transferência de energia, Joules/segundo = Watts. Para o sol:  $3,9 \times 10^{26} \text{ W}$

**Irradiância (E) :** fluxo radiante por unidade de área, Watts/m<sup>2</sup> .

A irradiância da radiação eletromagnética que passa através dos limites do disco visível do sol, raio  $\approx 7 \times 10^8 \text{ m}$

é dada por:

$$\frac{3,90 \times 10^{26}}{4\pi(7 \times 10^8)^2} = 6,34 \times 10^7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

# DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DA RADIAÇÃO

A irradiância média da radiação solar que atinge a órbita da Terra, num plano perpendicular aos raios solares, no topo da atmosfera é  $\sim 1,38 \times 10^3 \text{ W/m}^2$  (ou  $1,97 \text{ cal/cm}^2/\text{min}$ ) que constitui a chamada **constante solar**. A diferença entre a irradiância no afélio e perihélio é de:  $\sim 6,7\%$ .



O Sol irradia, isotropicamente, aproximadamente  $56 \times 10^{26}$  cal de energia.

**Caloria (cal)** – quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de 1 grama de H<sub>2</sub>O de 1 °C (de 14,5 a 15,5 °C).



A energia por unidade de área e de tempo incidente em uma superfície concêntrica com o Sol e de raio  $1,5 \times 10^{13}$  cm (distância média entre o Sol e a Terra) é igual a:


$$\frac{\pi a^2}{4\pi a^2} S = \frac{S}{4} = 344 W.m^{-2}$$

$\pi a^2$  - área da seção vista pela radiação

$4\pi a^2$  - área da superfície da Terra

$344 W.m^{-2}$  Terra sem atmosfera

Terra com atmosfera e albedo de 30% ou 0.3, temos:

$$(1 - \alpha) \frac{S}{4} = (1 - 0,3) \times 344 \text{ W.m}^{-2}$$
$$= 241 \text{ W.m}^{-2}$$

Considerando a Terra um corpo negro, a temperatura de **equilíbrio radiativo** ( $T_e$ ) é:

$$E = \sigma T^4 = \sigma T_e^4 = 241 \text{ W.m}^{-2}$$

$$T_e = \left( \frac{E}{\sigma} \right)^{1/4} = \frac{241}{5.7 \times 10^{-8}} = 255 \text{ K ou } -18^{\circ} \text{ C}$$

$$T_e = -18^{\circ} \text{ C}$$

Devido ao efeito estufa provocado pelos gases estufa, a temperatura da superfície observada é:

$T_s$  - temp. de emissão da superfície é:

$$T_s = T_e + \Delta T$$

$$T_s = -18^{\circ}C + \Delta T$$

$\Delta T$  representa a temp. relativa ao efeito estufa.

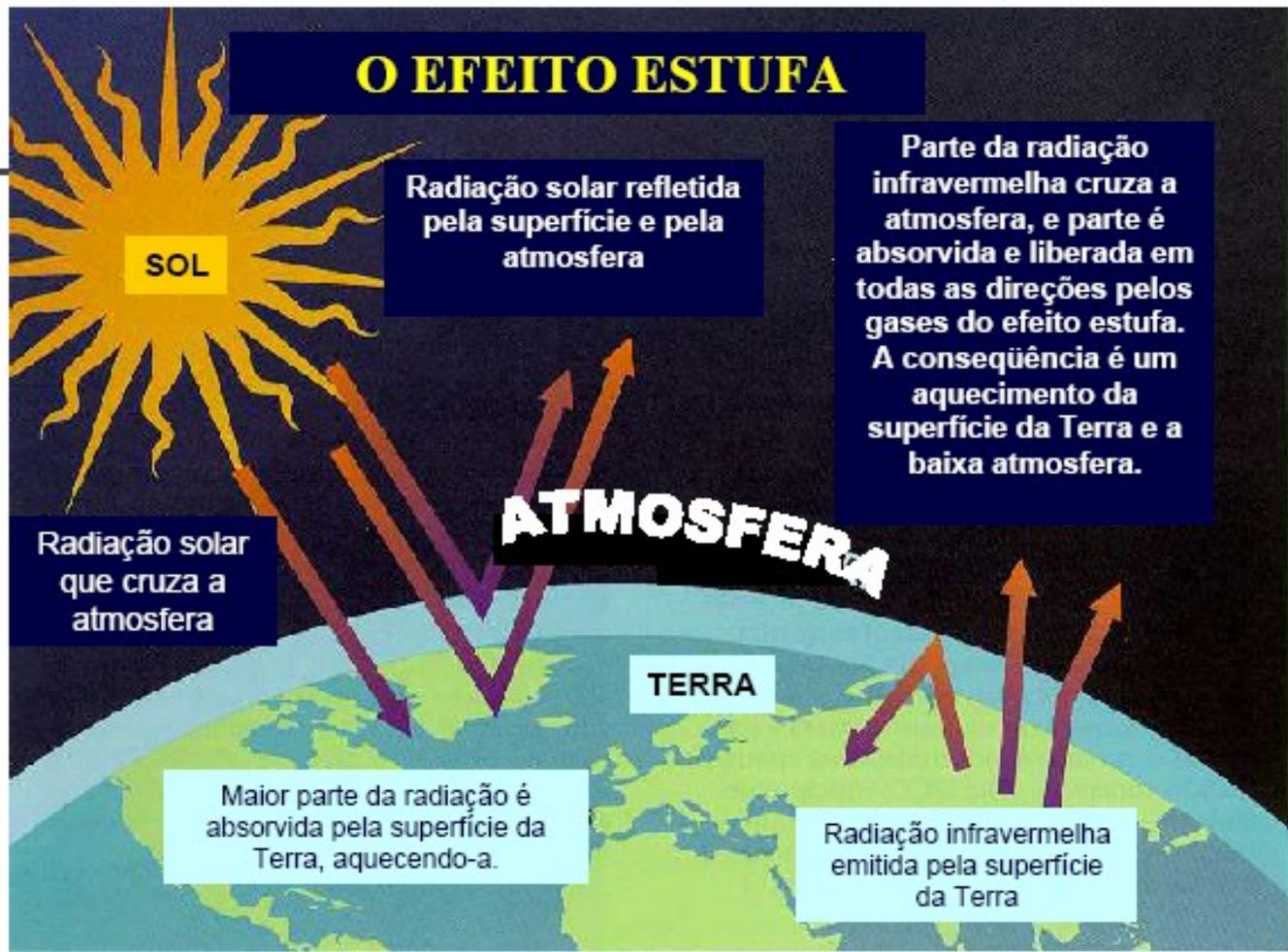
Como a temp. média da Terra, observada é

288K ou  $15^{\circ}C$ , então  $\Delta T = 33^{\circ}C$

$$T_s = -18 + 33$$

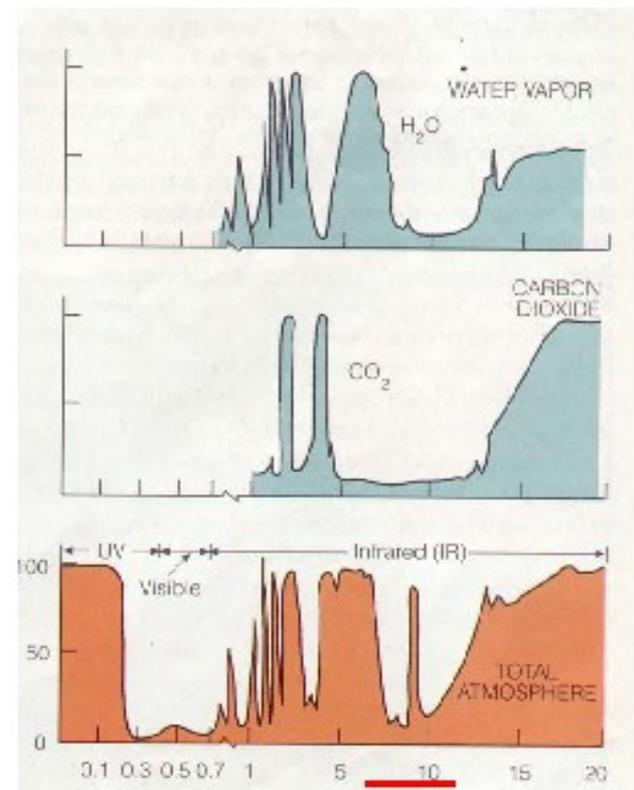
$$= 15^{\circ}C$$

## O EFEITO ESTUFA



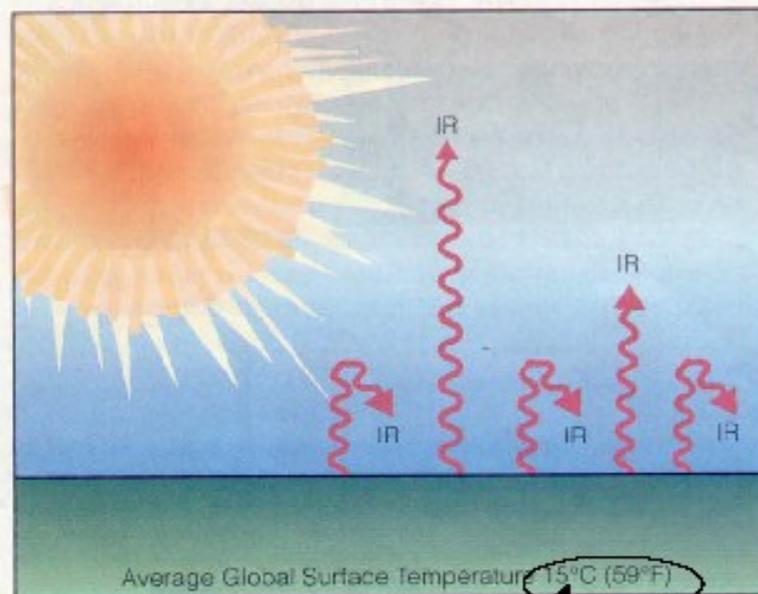
# Efeito estufa atmosférico

- Janela atmosférica
  - 8 a 11  $\mu m$
- As nuvens durante a noite fecham a janela atmosférica
- Noites nubladas são mais quentes



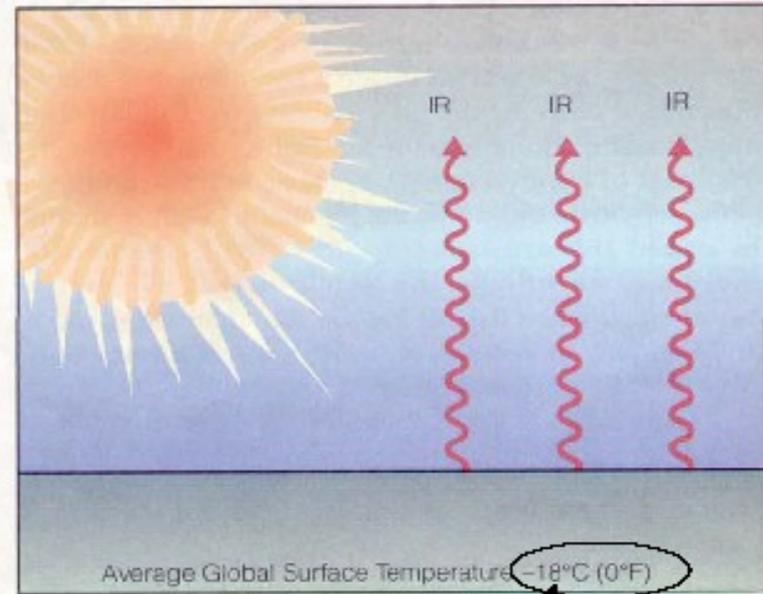
Janela Atmosférica

# Efeito estufa atmosférico



(a) Earth's atmosphere with H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>

Com atmosfera



(b) Earth's atmosphere without H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>

Sem atmosfera



# Intensificação do efeito estufa

---

- Vários estudos sugerem que nos últimos 100 anos a temperatura do ar aumentou 0,6<sup>o</sup> C.
- Quais seriam as causas?
  - Dióxido de carbono
  - Metano
  - Óxido Nitroso
  - Ozônio
  - Clorofluorcarbonos
    - Uma única molécula de CFC-12 na atmosfera equivale à adição de 10.000 moléculas de CO<sub>2</sub>



## Intensificação do efeito estufa

---

- Qual a porcentagem de CO<sub>2</sub> na atmosfera?
  - 377 ppm
- Prevê-se que esta quantidade dobre até o final deste século
- Com uma quantidade ainda tão pequena de CO<sub>2</sub>, porque prevê-se um aumento na temperatura média de 2° a 5° C?
  - Mecanismo de feedback positivo



# Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

---

- Reservatórios de CO<sub>2</sub>
  - Fixados nas raízes, ramos e folhas das plantas
  - Fitoplânctons nas superfícies dos oceanos (tecidos)
  - Misturados na água até grandes profundidades

***CO<sub>2</sub> oceanos = 50 vezes o CO<sub>2</sub> atmosfera***



## Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

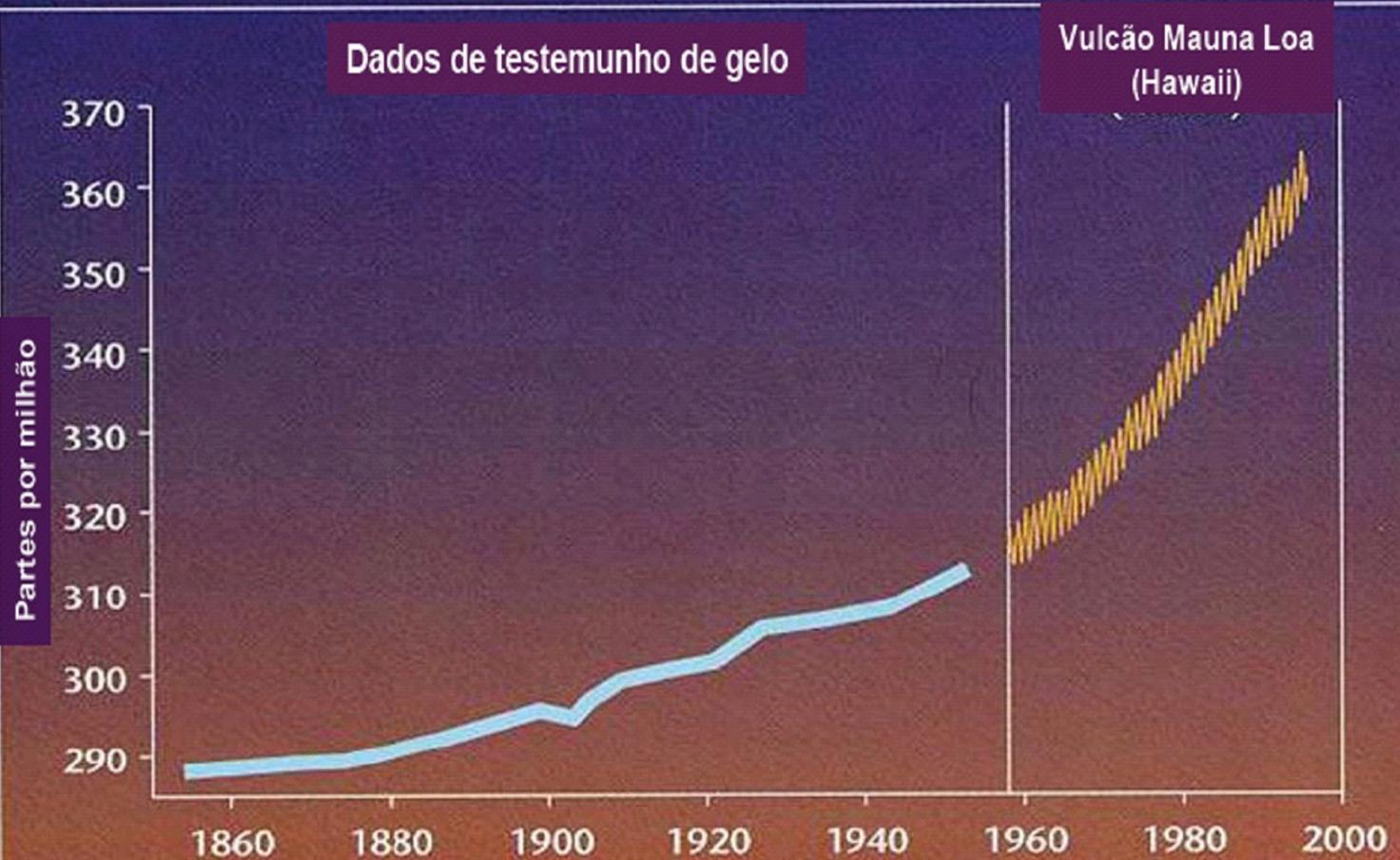
---

- Por que a preocupação com o aumento de CO<sub>2</sub> na atmosfera?

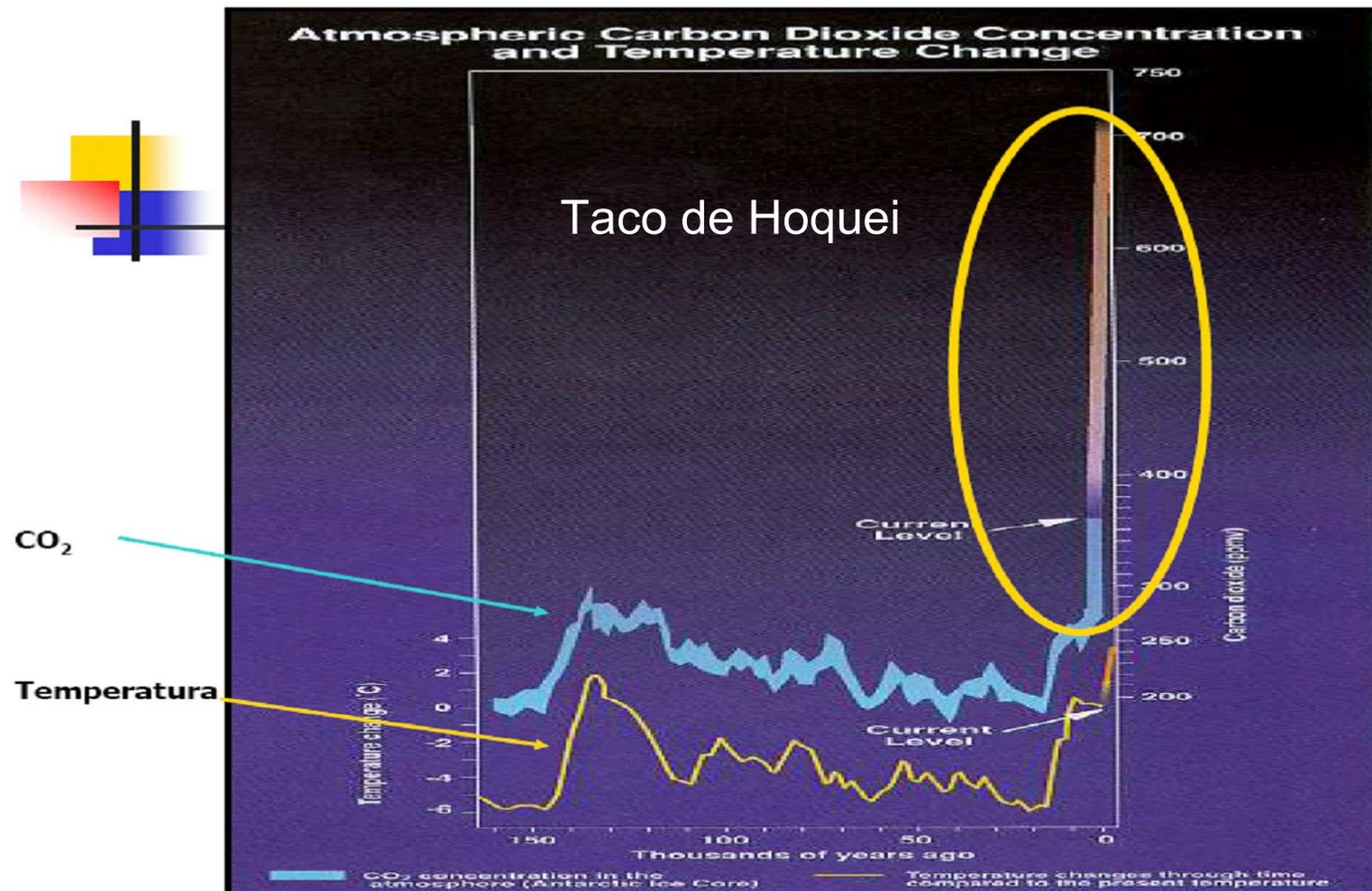
### ***Importante gás do efeito estufa***

- Aumentou
  - 25% desde o século 19
  - > 10% desde 1958
- Deve dobrar até o final deste século 21
- Causa do aumento:
  - Desflorestamento
  - Queima de combustíveis

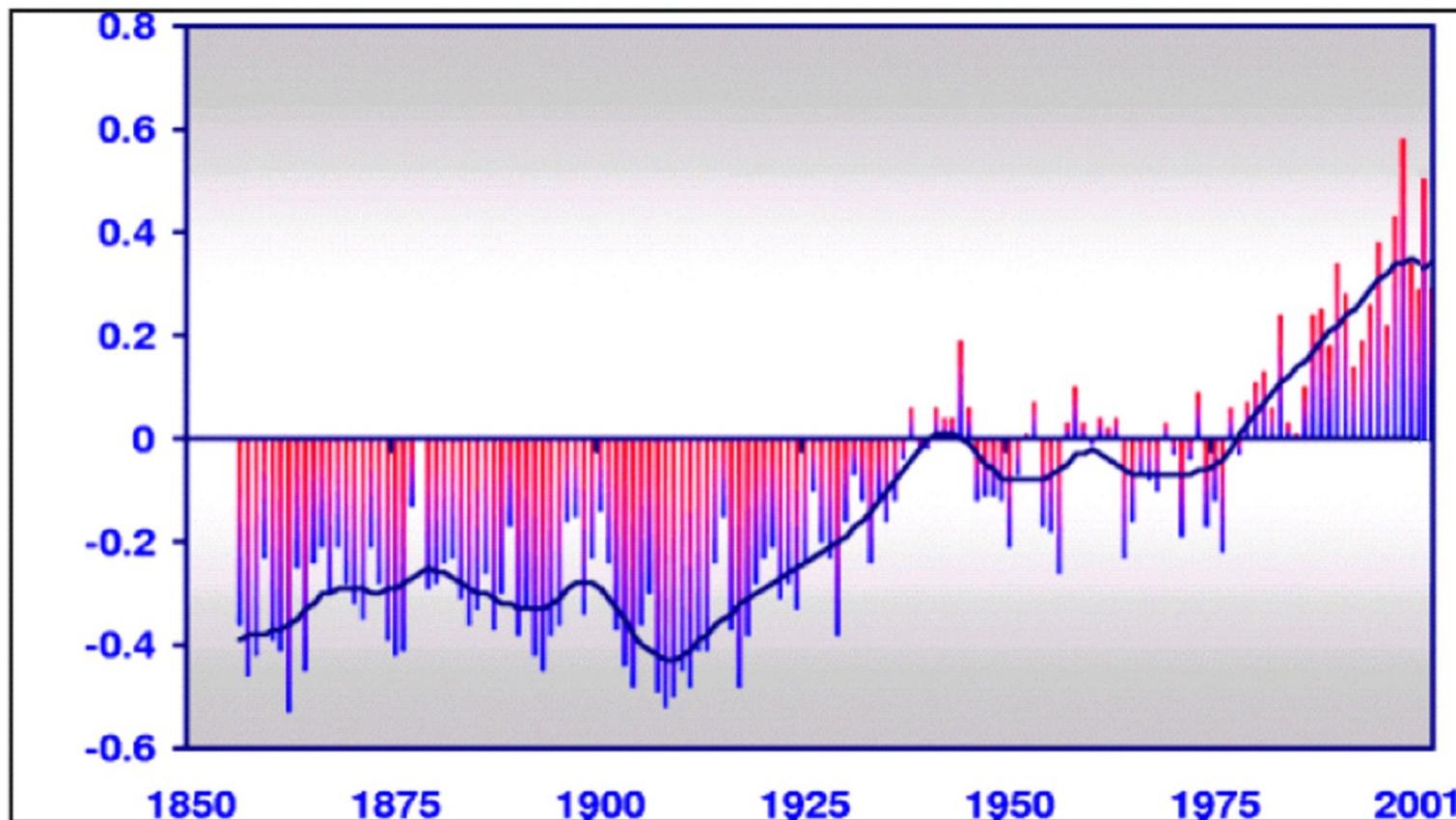
## Concentração de CO<sub>2</sub> 1860-2000.



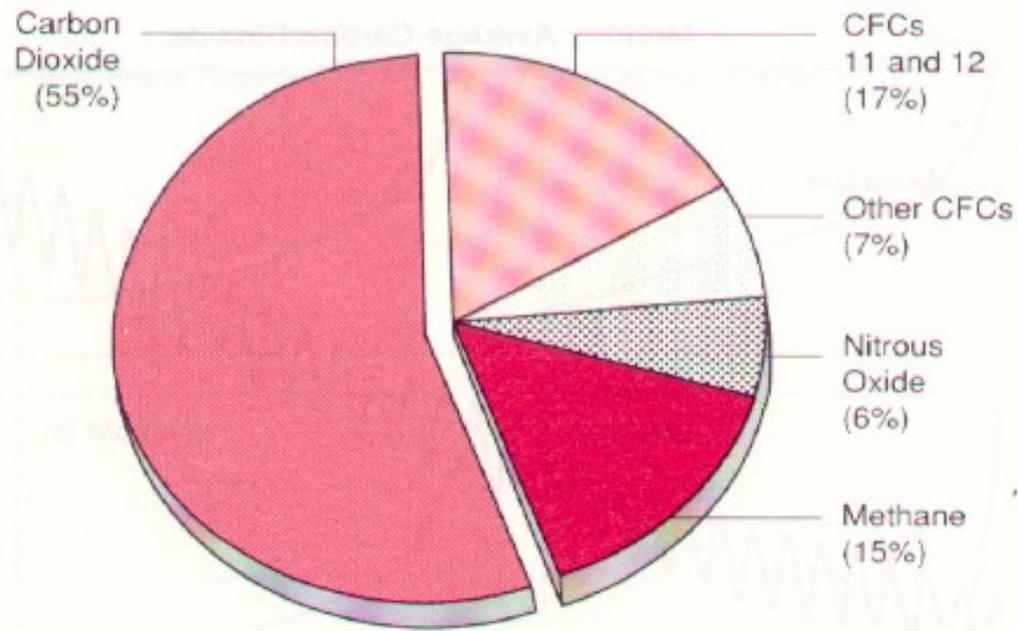
# FARSA CIENTÍFICA



## ANOMALIA DE TEMPERATURA



A década de 1990-2000 foi a mais quente de todo o período de registro instrumental. Os oito anos mais quentes a nível global ocorreram na década de 90.



Contribuição de cada um dos gases de efeito estufa antropogênicos para a **forçante** radiativa, no período 1980 a 1990.

A contribuição do ozônio, apesar de significativa, ainda não pode ser quantificada.

# Medida da Irradiância Solar na Superfície Terrestre

Os equipamentos que medem a irradiância solar recebem várias denominações, o que basicamente difere em função do tipo de equipamento, do princípio de funcionamento e do tipo de irradiância a ser medida

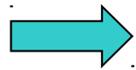
## Medida da Irradiância solar global

→ Actinógrafo: o sensor é constituído de placas bimetálicas (negras e brancas) que absorvem radiação solar, dilatando-se diferentemente. A diferença de dilatação é proporcional à irradiância solar e registrada continuamente por uma pena sobre um diagrama (actinograma).

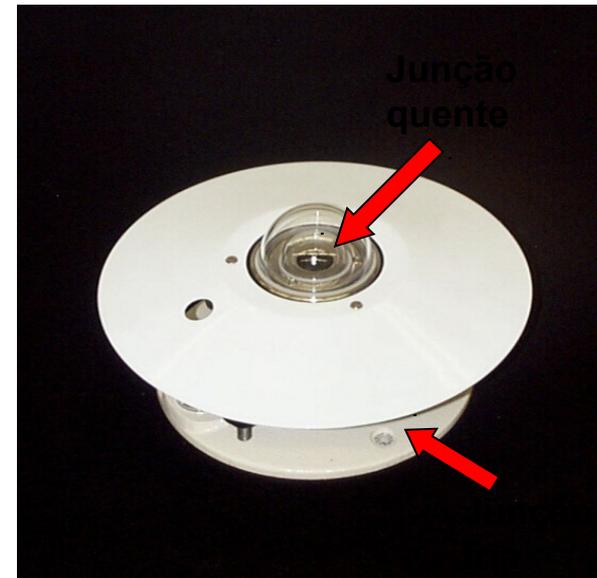
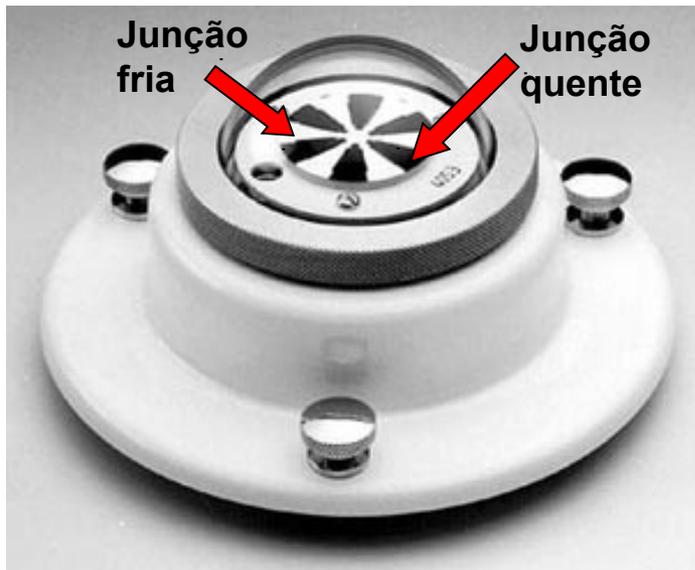
Sistema de registro mecânico



Placas bimetálicas, cobertas por uma cúpula de vidro ou quartzo, que impede que as ondas longas atinjam as placas

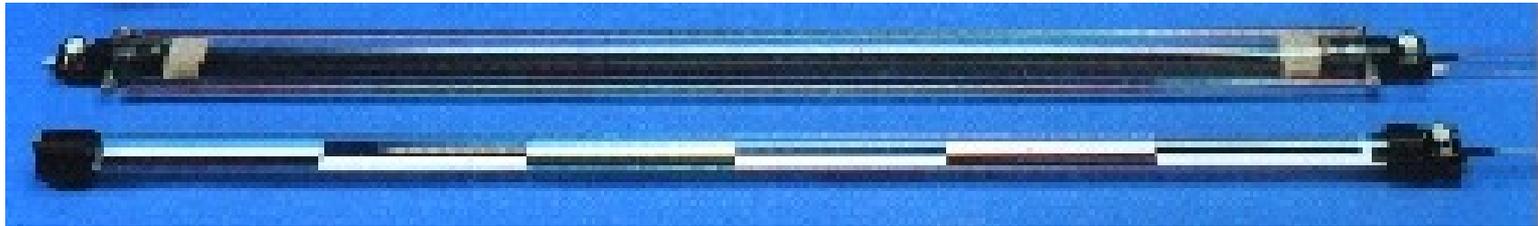


Piranômetro de termopar: o elemento sensor é uma placa com uma série de termopares (“termopilhas”), sendo que parte é enegrecida (junções “quentes”) e parte é branca (junções “frias”). O aquecimento diferencial entre as junções “frias” e “quentes” gera uma força eletromotriz proporcional à irradiância. O sinal gerado é captado por um sistema automático de aquisição de dados.



Na figura da esquerda vemos um piranômetro “branco e preto” com as junções “frias” e “quentes” expostas. Na figura da direita, o piranômetro tem as junções “quentes” expostas diretamente à radiação solar, enquanto que as frias encontram-se no interior do bloco do sensor. A cúpula de quartzo é para barrar as ondas longas provenientes da atmosfera.

- Tubo solarímetro: usa o mesmo princípio dos piranômetros, porém com as termopilhas instaladas numa placa retangular e longa, permitindo uma melhor amostragem espacial. O sinal gerado é captado por um sistema automático de aquisição de dados.



- Piranômetro de fotodiodo de silício: o sensor é o fotodiodo de silício, que responde à absorção de energia, gerando uma corrente elétrica proporcional à irradiância solar. O sinal gerado é medido da mesma forma que nos piranômetros.



## Medida da Irradiância solar fotossinteticamente ativa

➔ Sensor quântico: o sensor é o fotodiodo de silício, o qual é protegido por um filtro que permite apenas a passagem da radiação solar na banda do visível, ou especificamente, na banda da radiação fotossinteticamente ativa, expressa em mol de fótons por unidade de área e tempo (fluxo de fótons fotossintéticos).



## Medida da Irradiância solar direta

➔ Emprega os piranômetros acoplados a um sistema específico que permite apenas a incidência da radiação direta no elemento sensor. Esse tipo de equipamento é denominado Pireliômetro



## Medida da Irradiância solar difusa

→ Emprega os piranômetros com o sensor parcialmente protegido por um sistema específico (arco metálico) que permite apenas a incidência da radiação difusa no elemento sensor.



## Medida da Irradiância infra-vermelha

→ Emprega os piranômetros com uma cúpula específica que reflete as ondas curtas e permite a passagem das ondas longas. Esses sensores contêm um termistor para medida da sua temperatura, possibilitando assim se conhecer a sua emissão de IV e conseqüentemente se calcular a densidade de fluxo do ondas longas incidente.

