

**Notas de aula**  
**ASTRONOMIA DO SISTEMA SOLAR (AGA292)**

**Prof.: Enos Picazzio**

# **ATMOSFERA PLANETÁRIA**

Parte 1

# Atmosferas Planetárias

## Espalhamento

Processo radiativo predominante. A luz incidente muda de direção ao incidir sobre uma partícula espalhadora.

Tipos:

-**Espalhamento único** – o efeito total é a soma das contribuições individuais dos espalhadores. Isto ocorre em atmosfera relativamente rarefeitas.

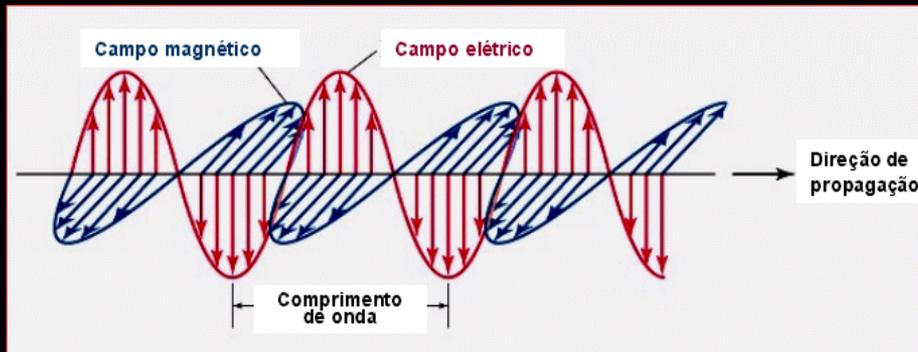
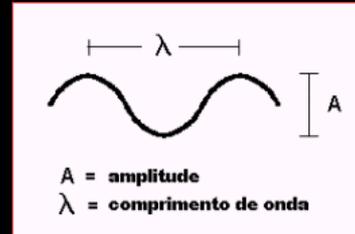
-**Espalhamento múltiplo** – efeito total não é a soma dos efeitos individuais, pois há “sombreamento”. É o que ocorre em atmosferas espessas.

A depender da relação entre o tamanho do espalhador e o comprimento de onda da radiação espalhada, predomina um tipo de espalhamento. Admitindo que o espalhador seja esférico (**raio** =  $a$ ) e o **comprimento de onda** seja  $\lambda$ , temos:

# Atmosferas Planetárias

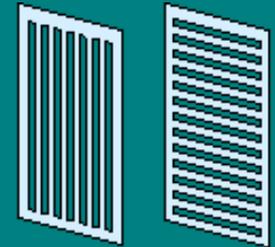
## Ondas Eletromagnéticas

- As ondas são descritas por:
  - comprimento de onda,  $\lambda$
  - frequência,  $\nu$
  - velocidade,  $v = \lambda \times \nu$  ( $v = 3 \times 10^8$  m/s, no vácuo)
  - energia,  $E_\nu = h \times \nu$  ( $h = 6,63 \times 10^{-34}$  Js, cte de Planck)
- **Onda luminosa (electromagnética):** é uma perturbação eletromagnética, que apresenta oscilações nos campos elétrico e magnético que não necessita de meio material para propagar-se. Ela resulta do movimento dos elétrons.

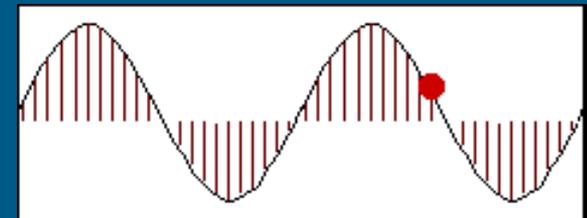
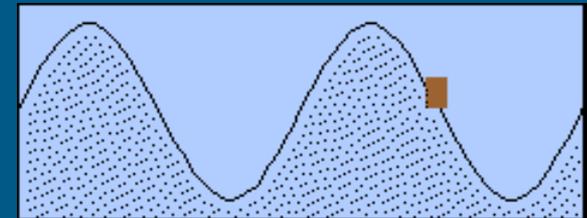


Light and Telescopes (ASTR 103, GMU, Dr. Correll, 14 Sept 2000)

## Polarização



rolha oscilando durante a passagem de uma onda na superfície de um lago.



carga elétrica oscilando durante a passagem de uma onda de rádio.

# Atmosferas Planetárias

## - Espalhamento Rayleigh

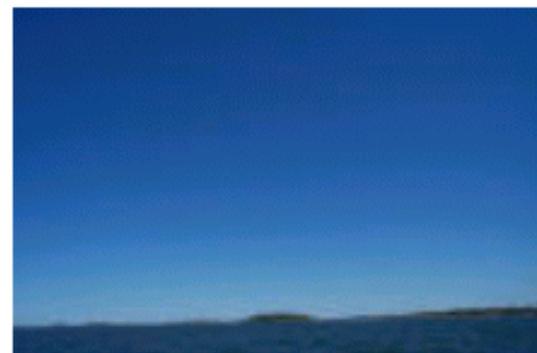
Ocorre quando  $a < 0.05 \lambda$

radiação incidente é polarizada pela matéria do espalhador  $\Rightarrow$  que oscila em sincronismo (mesma frequência)  $\Rightarrow$  passa a irradiar como dipólo elétrico  $\Rightarrow$  e apresenta a mesma polarização da radiação incidente

A intensidade da radiação espalhada é proporcional ao inverso da quarta potência de  $\lambda$ , ou seja:

$$I \propto \lambda^{-4}$$

Este é o mecanismo que determina a cor predominante do céu: a cor azul do espectro solar é fortemente espalhada pelas moléculas de nitrogênio. É isso que explica porque em dias de céu aberto, sem nuvens, a cor do céu vai-se tornando azul mais profundo à medida que se afasta da direção do Sol (que tem cor predominantemente amarela).





## **Espalhamento Mie:**

Ocorre quando  $a \rightarrow 0.05 \lambda$

Neste caso o espalhamento é provocado principalmente por poeira atmosférica.

## **Extinção por bloqueio:**

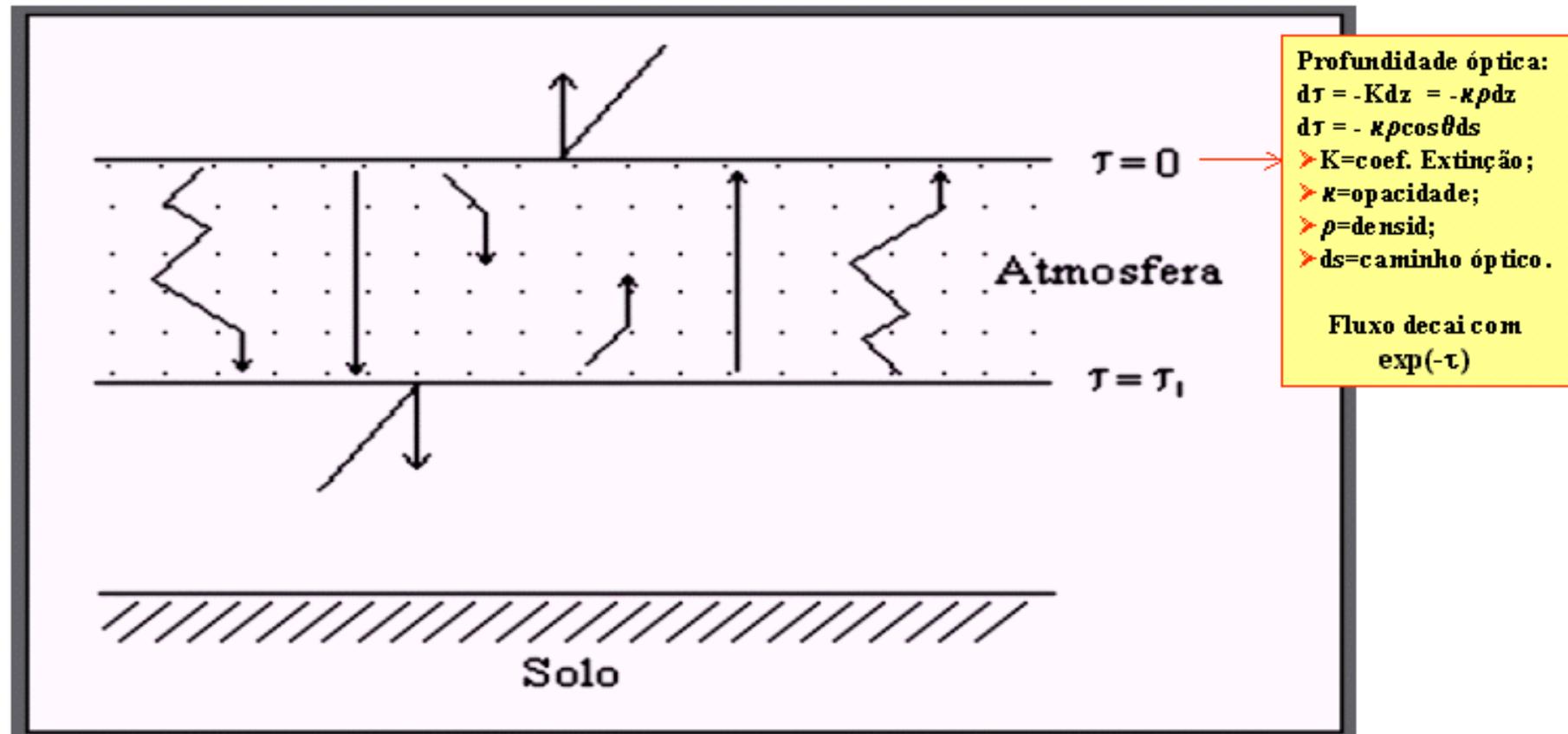
Ocorre quando  $a \gg 0.05 \lambda$

Neste caso a partícula espalhadora é muito grande, se comparada ao comprimento de onda da luz incidente.

# Atmosferas Planetárias

## O Problema Planetário:

O processo de difusão da luz solar na atmosfera de um planeta é relativamente complicado pois a difusão ocorre duas vezes, ao penetrar e ao emergir da atmosfera. Veja o esquema abaixo:



# Atmosferas Planetárias

## Estrutura Atmosférica

Admitamos que essa atmosfera seja governada pela **equação de equilíbrio hidrostático**, isto é:

$$(1) \quad \frac{dP}{dz} = -\rho(z)g(z) \quad \Rightarrow \quad z: \text{altura}$$

e que a pressão seja dada pela **equação do gás perfeito**:

$$(2) \quad P = n(z)kT(z) = \rho(z)kT(z) / \mu m_H$$

$\Rightarrow \mu$ : peso molecular médio     $m_H$ : massa

$$p(z) = p(0) \times e^{-z/H}$$

Combinando as eqs. 1 e 2:

$$(3) \quad \frac{dP}{P} = -\frac{dz}{H} \quad \text{onde: } H = kT / \mu g m_H \quad (\text{escala de altura})$$

ou seja: a pressão decresce de um fator "e" para cada acréscimo H na altura



# Atmosferas Planetárias

Exemplo de cálculo para o caso da Terra, admitindo-a esférica ( $R_T \sim 6.4 \times 10^6 \text{m}$ ) e com atmosfera fina (espessura da atmosfera  $\ll R_T$ ):

Equação de equilíbrio hidrostático:  $dp = -\rho g dh$

Integrando:

$$\int_0^{\infty} dp = -\int_0^{\infty} \rho g dh \rightarrow p(\infty) - p(0) = -g \int_0^{\infty} \rho dh \rightarrow p(0) = gm$$

onde:  $p(\infty) = 0$ ,  $m =$  massa de ar na coluna de área unitária ( $1 \text{ cm}^2$ )

$$\text{Ou: } m = \frac{p(0)}{g} = \frac{1,013 \times 10^6 \text{ dina} / \text{cm}^2}{981 \text{ cm} / \text{s}^2} \cong 1,033 \times 10^3 \text{ g} / \text{cm}^2$$

# Atmosferas Planetárias

ou seja, nessa aproximação uma coluna de  $1 \text{ cm}^2$  de base terá cerca  $1.033 \text{ g}$  de massa. Considerando a camada homogênea e com densidade igual a do nível do mar ( $\sim 1,293 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ), a espessura dessa camada será:

$$h = \frac{m}{\rho} = \frac{1,033 \times 10^3 \text{ g / cm}^2}{1,293 \times 10^{-3} \text{ g / cm}^3} \cong 8 \times 10^5 \text{ cm} = 8 \text{ km}$$

A massa total da atmosfera será:

$$M = Am \quad (A \text{ é área})$$

Como:  $A = 4\pi R_T^2 \sim 5,12 \times 10^{18} \text{ cm}^2$

chega-se à:  $M \sim 5,28 \times 10^{21} \text{ g}$

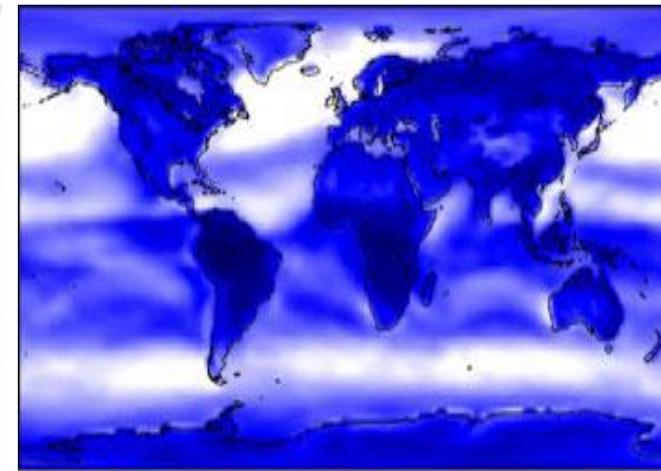
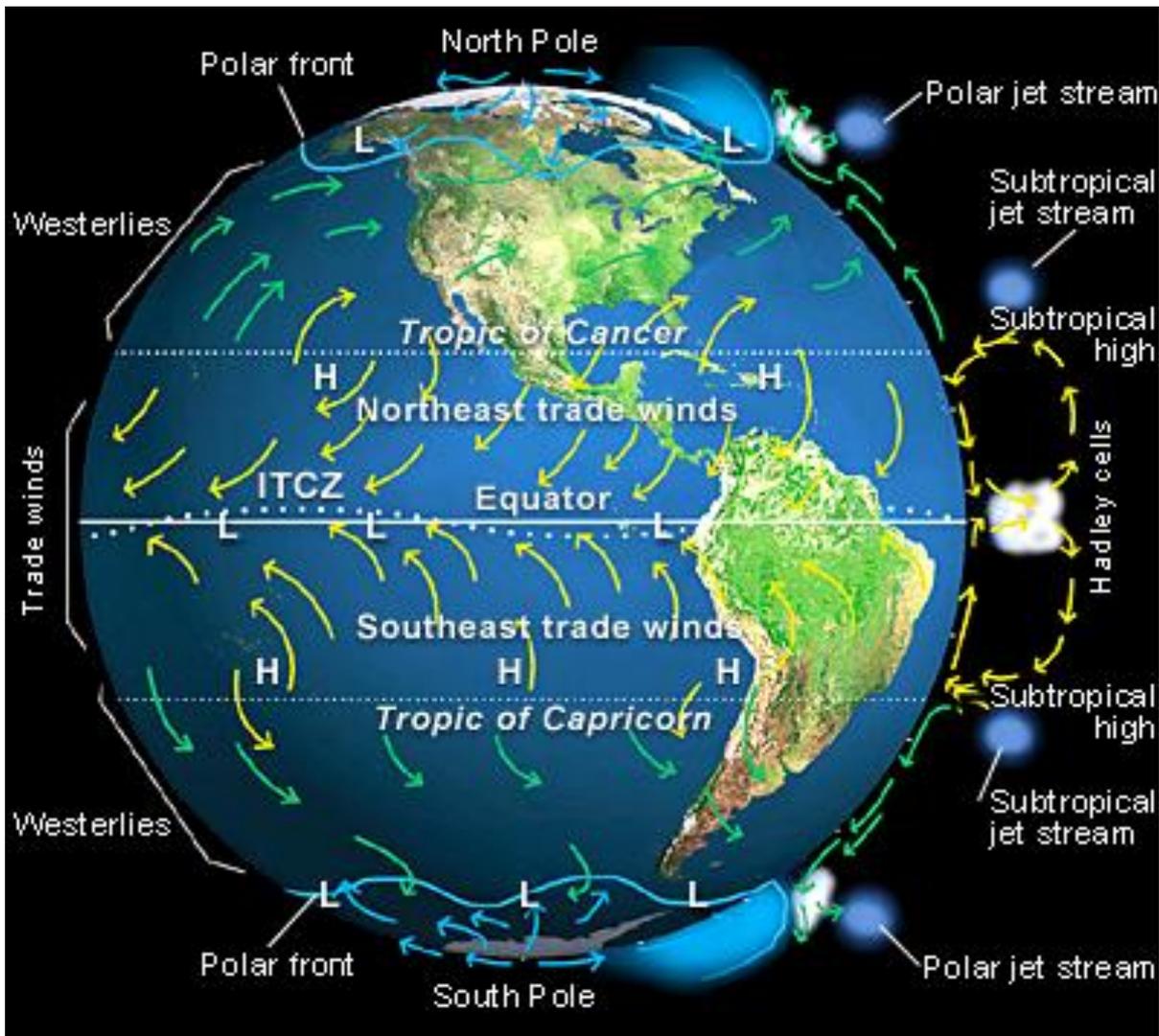
# Atmosferas Planetárias

Um cálculo mais criterioso e preciso revela que as temperaturas absolutas necessárias para escape das atmosferas nos planetas é a seguinte:

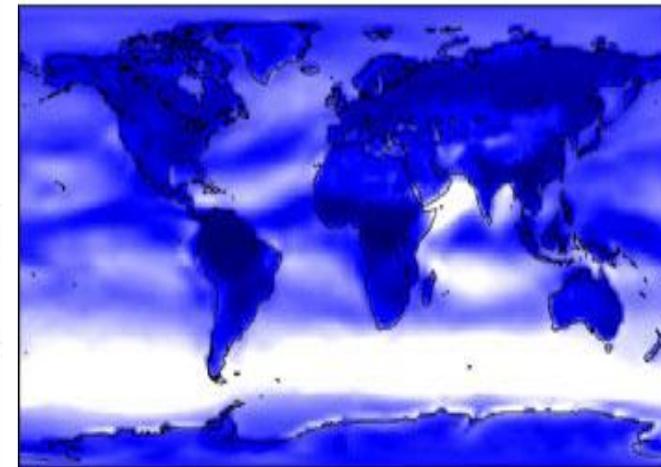
	$H_2$	$H_2O$	$N_2$	$O_2$	$CO_2$	Xe
<b>Mercúrio</b>	56	500	779	889	1.220	3.650
<b>Vênus</b>	339	3.030	4.720	5.390	7.410	22.100
<b>Terra</b>	403	3.600	5.620	6.400	8.810	26.300
<b>Marte</b>	83	739	1.150	1.310	1.800	5.390
<b>Júpiter</b>	10.700	95.500	148.000	170.000	233.000	696.000
<b>Saturno</b>	3.470	31.000	48.200	55.000	75.700	226.000
<b>Urano</b>	1.480	13.200	20.500	23.400	32.300	96.200
<b>Netuno</b>	2.000	17.900	27.900	31.800	43.800	131.000

Vê-se que os planetas pequenos têm dificuldade de reter gases de menor massa; Mercúrio, por exemplo, só retém gases de grande massa, que são rasos, portanto ele possui atmosfera extremamente fina e de gases pesados. Já os planetas gigantes, massivos e distantes do Sol, possuem atmosferas praticamente primitivas, isto é, com a composição química original.

# Atmosferas Planetárias



January

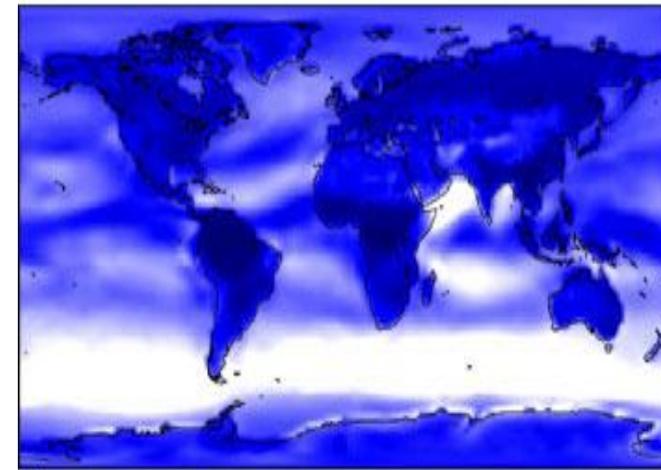
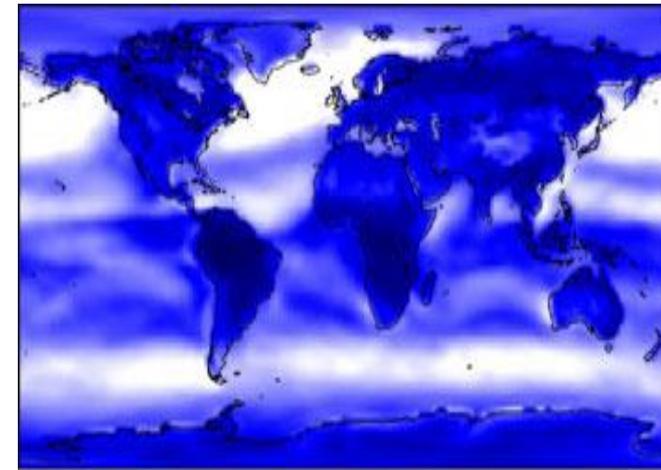
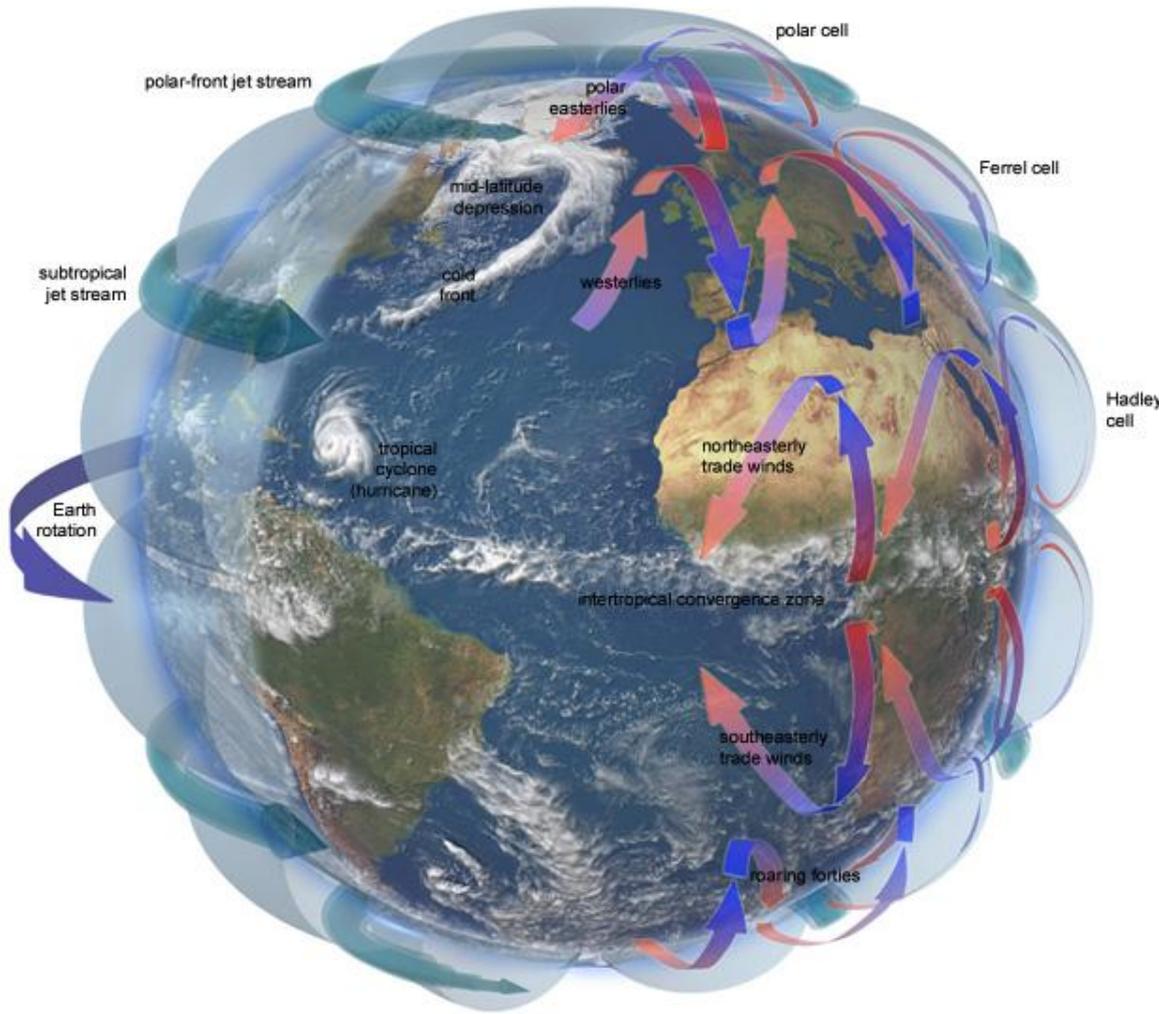


July



As células surgem em decorrência da rotação da Terra (efeito Coriolis). Massas de ar movendo-se em direção ao equador são deslocadas para oeste. As que se deslocam em direção aos pólos são defletidas para leste.

# Atmosferas Planetárias



As células surgem em decorrência da rotação da Terra (efeito Coriolis). Massas de ar movendo-se em direção ao equador são deslocadas para oeste. As que se deslocam em direção aos pólos são defletidas para leste.

# Atmosferas Planetárias – efeito estufa

Em Vênus ele foi o responsável pela elevação gradativa da temperatura atmosférica, até atingir o valor presente (~750 K, na superfície). A explicação provável parece ter sido a seguinte: a proximidade do Sol provoca maior aquecimento, eleva a temperatura, isto provoca vaporização da água, que também provoca o efeito estufa (de forma menos eficiente que o CO<sub>2</sub>), aquecendo ainda mais o ambiente. Este aquecimento começa a liberar o CO<sub>2</sub> retido quimicamente nas rochas, aumentando a eficiência da estufa... e o ciclo continua. O vapor de água na atmosfera ao atingir maiores alturas sofre dissociação pela radiação ultravioleta solar, e perde-se. Resumidamente:

luz solar → T ↑ → H<sub>2</sub>O ↑ → estufa → T ↑ → CO<sub>2</sub> (rochas) ↑ → estufa... H<sub>2</sub>O + UV  
→ H + OH → perda

Terra:                      *ácido*                      *carbonato de*                      *carbonato*  
                                 *carbônico*                      *hidrogênio*                      *de cálcio*  
CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O → H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> + silicatos → Ca<sup>++</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>--</sup> + plânctons → CaCO<sub>3</sub> → precipita → litosfera  
Fotossíntese: CO<sub>2</sub> → O

Marte:  
H<sub>2</sub>O (gelo) não remove quimicamente CO<sub>2</sub> atmosférico.

# Atmosferas Planetárias

## Origem e evolução das atmosferas planetárias

Lembrando a condição para retenção e perda de atmosfera:

A *velocidade térmica média* de um gás depende diretamente da temperatura e inversamente da massa da partícula:

$$(5) \quad v_t = c_1 \sqrt{\frac{T}{m}}$$

onde  $T$  e  $m$  são, respectivamente, temperatura e massa do elemento. Já a *velocidade de escape* depende diretamente da massa do planeta e inversamente da distância em que se encontra a partícula:

$$(6) \quad v_e = c_2 \sqrt{\frac{M}{R+h}}$$

onde  $M$  é massa,  $R$ , raio e  $h$ , altura da superfície (ou  $R+h$ , a distância).

# Atmosferas Planetárias

A condição para retenção de uma atmosfera será:

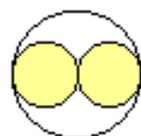
$$(7) \quad v_t < v_e ;$$

É importante lembrar que essa condição depende da altura em que se considera, ou seja, a condição muda com a altura. Como nas partes mais externas da atmosfera o fluxo de radiação solar mais energética (ultravioleta) aumenta, os átomos ou moléculas que atingem essas alturas podem ser "perdidos" caso não haja reação por colisão.

# Atmosferas Planetárias

O local de escape da atmosfera é a base da exosfera, definida pela altura crítica  $h_c$ .

A probabilidade de colisão entre partículas atmosféricas pode ser expressa por:



$$\pi(2a)^2 n(h) dh = 4\pi a^2 n(h) dh$$

onde  $a$  = raio da partícula,  $\pi(2a)^2$  = área da secção geométrica de colisão para partículas iguais,  $h$  = altura e  $n(h)$  = densidade em  $h$ , dada por:

$$n(h) = n_0 \frac{T_0}{T} \exp\left(-\int_0^h \frac{dz}{H}\right) \quad \text{onde} \quad H = \frac{kT}{\mu g m_H} \quad [cm]$$

# Atmosferas Planetárias

Considerando que acima de  $h_c$  não há colisão e admitindo aproximação isotérmica ( $T \approx T_0$ ):

$$\int_{h_c}^{\infty} 4\pi a^2 n_c \exp\left(\frac{h_c - h}{H}\right) dh = 1 \quad n_c = n \text{ em } h_c$$

i.é, numa coluna de secção  $4\pi a^2$  e altura infinita só há 1 partícula.  
Integrando tem-se:

$$4\pi a^2 n_c H = 1 \Rightarrow n_c = (4\pi a^2 H)^{-1}$$

$$n(h) = n_0 \frac{T_0}{T} \exp\left(-\int_0^h \frac{dz}{H}\right) \quad T \sim T_0 \quad n_0 \rightarrow n_c \quad n(h) = n_c \exp\left(\frac{h_c - h}{H}\right)$$

# Atmosferas Planetárias

O número total de partículas que abandonam a atmosfera em  $h_c$  será:

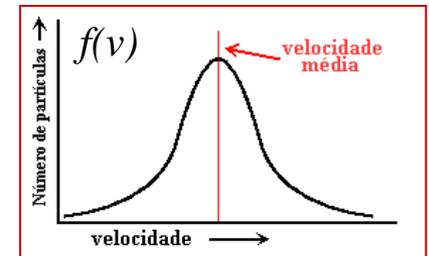
$$N = 4\pi(R_p + h_c)^2 n_c \int_{v_{esc}}^{\infty} v f(v) dv$$

com:  $R_p$  = raio do planeta,

$v_{esc}$  = velocidade de escape em  $h_c$ ,

$v$  = velocidade da partícula e

$f(v)$  = função de distribuição de velocidade.



No caso de Marte, a massa é pequena (logo o degasamento é pequeno) e a velocidade de escape também. Conseqüentemente, a probabilidade de escape é grande. Ele perdeu a atmosfera primitiva. Como o vulcanismo cessou rápido, a reposição gasosa cessou.

# Atmosferas Planetárias

## Atmosferas primitivas e secundárias

### *Primitivas:*

adquiridas diretamente da nebulosa solar primitiva que deu origem ao Sistema Solar. Estas são encontradas nos planetas gigantes.

### *Secundária:*

as alterações devidas ao degasamento e reciclagens de compostos atmosféricos através da hidrosfera, crosta e biosfera (quando presente) modificaram a atmosfera primitiva. Na realidade a atmosfera primitiva deve ter sido perdida no período imediatamente após cessar a fase de agregação violenta de massa, e que esses planetas ainda estavam muito quentes. Exemplo típico: Terra.

# Atmosferas Planetárias

## THE EARLY EARTH'S ATMOSPHERE WAS DIFFERENT

Today

78% N<sub>2</sub>

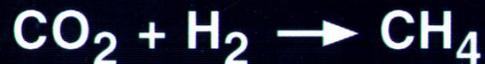
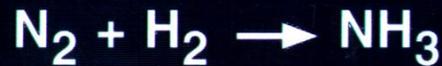
21% O<sub>2</sub>

0.03 % CO<sub>2</sub>

Billions of Years Ago

less O<sub>2</sub>

more H<sub>2</sub>



Question: Could these compounds form the complex molecules of life?