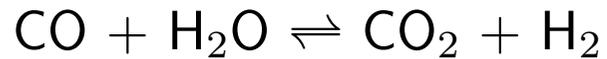
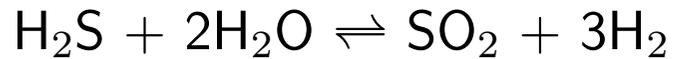
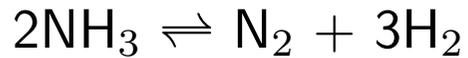
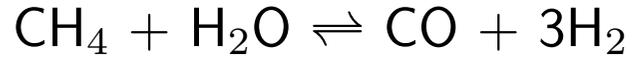


# TEMA 4: Atmósferas

- \* Origen de las atmósferas. Captura isotérmica y adiabática.
- \* Desgaseamiento de los minerales.
- \* Escala de altura.
- \* Escape de Jeans.
- \* Descripción de algunas atmósferas: Venus, Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Io, Titán, Tritón, Plutón.

## Moléculas gaseosas predominantes

Dependiendo de la abundancia de hidrógeno, la atmósfera será reductora u oxidada, de acuerdo al sentido de las siguientes reacciones químicas:



## Compuestos químicos principales antes y después de la pérdida de hidrógeno

Elemento	Abundancia cósmica (Si=10 <sup>6</sup> )	Compuestos dominantes	
		Cuando $X_{H_2} \simeq 1$	Cuando $X_{H_2} \ll 1$
H	$2.66 \times 10^{10}$	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
O	$1.84 \times 10^7$	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>
C	$1.12 \times 10^7$	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub> , CO, C (grafito)
N	$2.32 \times 10^6$	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub>
S	$5.0 \times 10^5$	H <sub>2</sub> S	COS, SO <sub>2</sub> , S <sub>8</sub> (sólido)

**Problema del Ne:** Sumamente escaso en las atmósferas cuando es cósmicamente muy abundante  $\implies$  Las atmósferas no pueden ser primordiales

# Captura de gases isotérmica y adiabática

## Captura isotérmica

El modelo asume la introducción de un cuerpo masivo de radio  $R$  y masa  $M$  en un medio de temperatura constante. La envoltura gaseosa se asume en equilibrio hidrostático:

$$P_s = P_\infty \exp\left(\frac{G\bar{\mu}m_H M}{kT_\infty R}\right)$$

donde  $\bar{\mu}$  es el peso molecular medio del gas, y  $k$  la constante de Boltzmann. En un modelo de nebulosa solar asumimos que el gas capturado es  $H_2$ , de donde  $\bar{\mu} = 2$ .

### Captura de gas (proceso isotérmico)

Objeto	$R$ (km)	$T_\infty$ (K)	$P_s/P_\infty$
Mercurio	2430	1400	6
Venus	6050	900	$1.5 \times 10^7$
Tierra	6370	600	$3.6 \times 10^{12}$
Luna	1735	370?	8?
Marte	3390	450	$2.3 \times 10^3$
Ceres	470	$\sim 300$	1
Titán	2500	$\sim 80$	$3.3 \times 10^5$

## Captura adiabática

Para una atmósfera rápidamente capturada (tiempo de captura más corto que el tiempo de enfriamiento radiativo) podemos asumir que se cumple aproximadamente un proceso adiabático. La captura adiabática suministra atmósferas mucho menos masivas que la captura isotérmica.

### Captura de gas (proceso adiabático)

Objeto	$\Delta T_{ad}$	$P_s/P_\infty$
Mercurio	315	2.5
Venus	1900	$1.3 \times 10^3$
Tierra	2200	$1.4 \times 10^3$
Luna	240	5
Marte	1000	50
Ceres	8	1
Titán	360	50

# Estructura térmica de la atmósfera de la Tierra y otros planetas

**Troposfera:** Es la capa más baja. El calor acumulado en la superficie se trasmite hacia el exterior esencialmente por convección, tenemos pues un proceso adiabático en donde

$$P = C\rho^\gamma$$

donde  $C$  es una constante y  $\gamma = C_P/C_V$  es el cociente de calores específicos. Para un gas ideal tenemos:

$$P = \frac{\rho k T}{\bar{\mu}}$$

donde  $\bar{\mu}$  es el peso molecular medio. Asumimos además equilibrio hidrostático:

$$\frac{dP}{dh} = -g\rho$$

donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Combinando las ecuaciones anteriores obtenemos:

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{\bar{\mu}g(\gamma - 1)}{k\gamma}$$

La temperatura de la atmósfera disminuye hasta alcanzar la tropopausa.

**Estratosfera:** La temperatura vuelve a aumentar debido a la acción de la radiación UV solar que forma ozono:



El ozono se forma por recombinación colisional con la participación de una molécula M (p. ej.  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) que lleva la energía excedente permitiendo la unión del  $\text{O}_2$  con el  $\text{O} \Rightarrow \text{M}$  gana energía lo cual calienta la estratósfera.

**Mesosfera:** La producción de ozono disminuye en esta capa y con ella la energización de las moléculas M. Las moléculas de  $\text{CO}_2$  se desexcitan emitiendo radiación infrarroja. La temperatura vuelve a disminuir.

**Termosfera:** La temperatura vuelve a aumentar debido a la fotodisociación y fotoionización de moléculas (especialmente  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) por la radiación UV solar. La mayoría de la radiación IR la emiten  $\text{O}$  y  $\text{NO}$  pero son menos eficientes en radiar energía que el  $\text{CO}_2$  (que escasea en la termosfera). Al no haber procesos eficientes de disipación de energía por radiación, la termosfera se calienta hasta unos 1200 K.

**Ionosfera:** Es la región de la atmósfera donde predominan los átomos ionizados. Comprende la termosfera, la exosfera y parte de la mesosfera.

## Escape atmosférico - Escape de Jeans

- Es la capa superior de la atmósfera donde la trayectoria libre media de las partículas gaseosas es tan larga que pueden escapar sin impedimento.

Para escapar la energía cinética de un átomo o una molécula debe superar la energía potencial gravitatoria:

$$\frac{1}{2}\mu v^2 = \frac{3}{2}kT \geq \frac{GM\mu}{(R + h_e)}$$

donde  $\mu$  es la masa de la partícula,  $M$  la masa del planeta,  $k$  la constante de Boltzmann,  $R$  el radio planetario y  $h_e$  la base de la exósfera.

Las partículas gaseosas tienen una distribución maxwelliana de velocidades, o sea:

$$f(v)dv = \frac{1}{\pi^{3/2}u^3} \exp\left(-\frac{v^2}{u^2}\right) v^2 dv$$

donde  $u = (2kT/\mu)^{1/2}$  es la velocidad cuadrática media.

Para escapar, la partícula debe cumplir la condición:  $v \geq \left[\frac{2GM}{(R+h_e)}\right]^{1/2}$

El flujo de partículas de una cierta especie con densidad numérica  $N_c$  que escapa está dado por:

$$\Phi_{esc} = N_c \int_{v_e}^{+\infty} v f(v) dv$$

Integrando y sustituyendo por los valores de  $u$  y  $v_e$  nos queda:

$$\Phi_{esc} = N_c \left( \frac{kT}{2\pi\mu} \right)^{1/2} \left[ 1 + \frac{GM\mu}{(R + h_e)kT} \right] \exp \left[ -\frac{GM\mu}{(R + h_e)kT} \right]$$

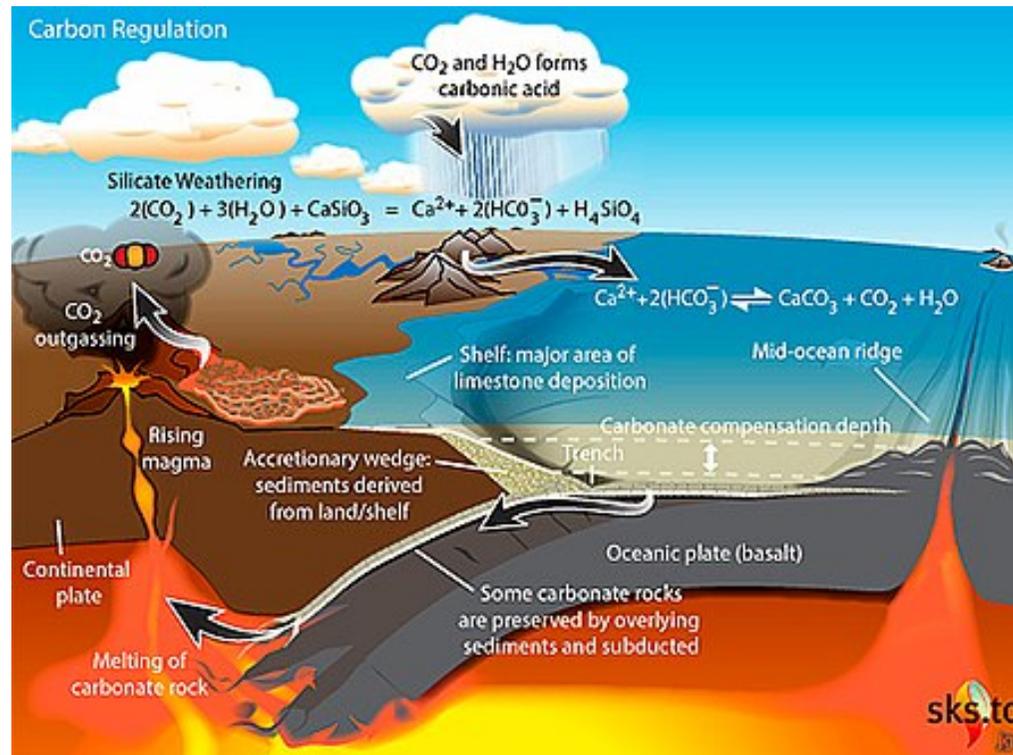
La cual se conoce como fórmula de Jeans (1928) y a este mecanismo de pérdida como *escape de Jeans*. Veamos la vida media de algunas especies en la atmósfera terrestre, teniendo en cuenta que la temperatura de la exosfera es  $T \simeq 1000$  K.

### Escape Jeans en la Tierra

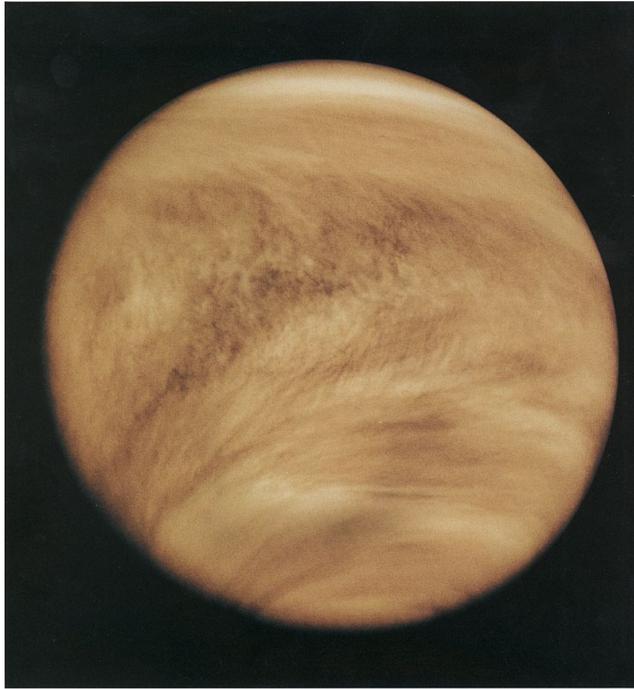
Especie	$t$ (años)
H	$8 \times 10^4$
O	$4 \times 10^{51}$
N <sub>2</sub>	$10^{90}$

# Regulación del CO<sub>2</sub> atmosférico a través de su interacción océano-atmósfera

El CO<sub>2</sub> es removido de la atmósfera a través de su disolución en el agua de lluvia formando ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). En contacto con el suelo esta lluvia causa *meteorización* ("weathering") que consiste en la disolución de minerales en iones. A través de reacciones inorgánicas o por microorganismos marinos, los iones se combinan para formar minerales carbonatados. El CO<sub>2</sub> retorna a la atmósfera a través de volcanismo.



# Atmósfera de Venus



Estructura de nubes en la atmosfera de Venus observada en el UV por la sonda *Pioneer Venus Orbiter* en 1979.

## DATOS GENERALES:

CO<sub>2</sub> : 96.5%

N<sub>2</sub> : 3.5%

SO<sub>2</sub> : 150 ppm

Ar : 70 ppm

H<sub>2</sub>O : 20 ppm

CO : 17 ppm

He : 12 ppm

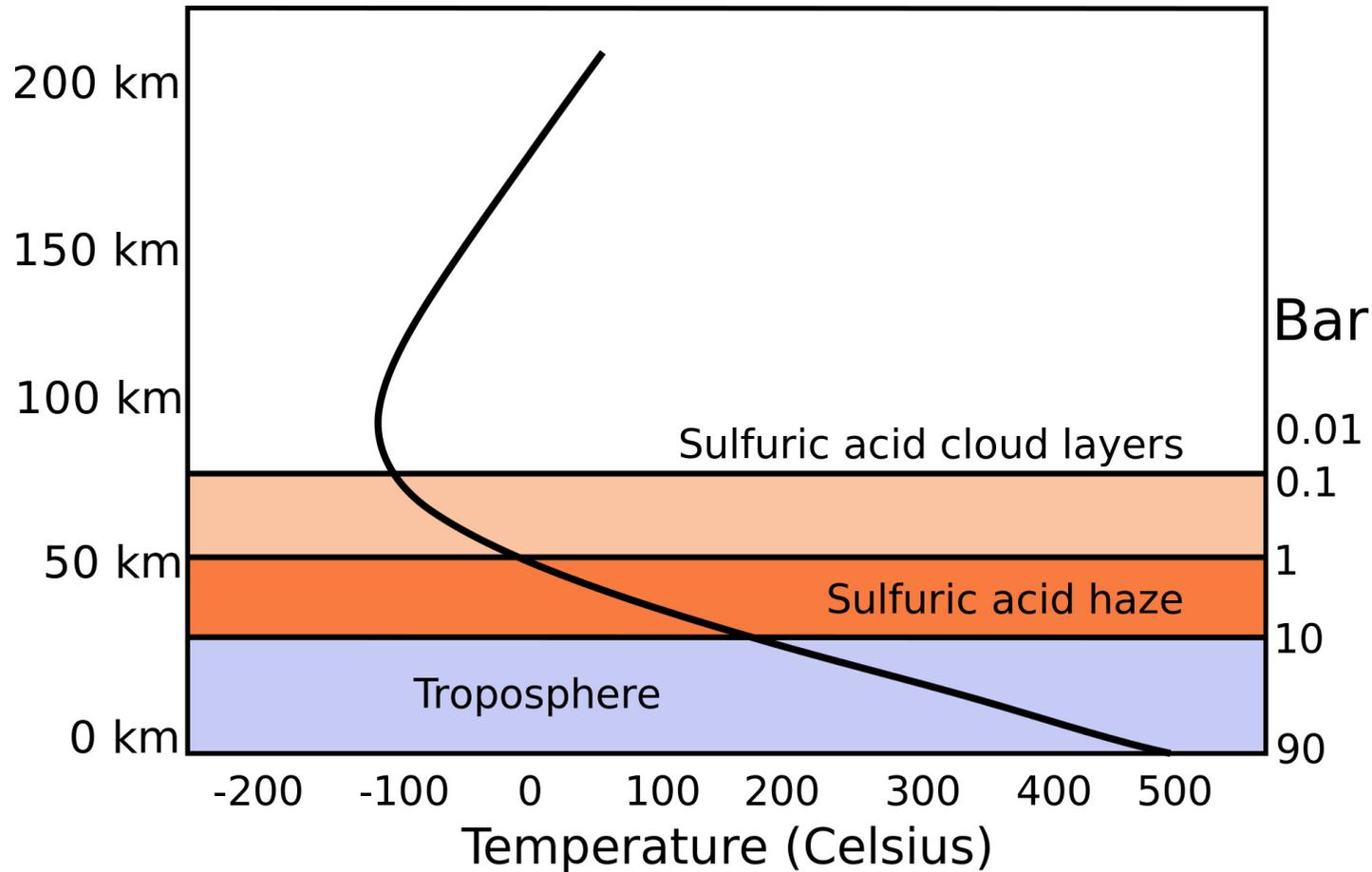
Ne : 7 ppm

Temperatura superficial : 740 K

Presión superficial : 93 bar (9.3 MPa)

Se observa una relación isotópica D/H en la atmósfera de Venus 100-150 veces más alta que en la Tierra, lo que demuestra una pérdida importante de hidrógeno (se retiene más el isótopo más pesado).

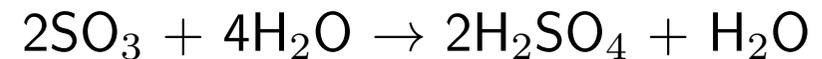
## Perfil y composición de las nubes



La capa superior de la troposfera exhibe un fenómeno de super-rotación con un período de unos 4 días, en claro contraste con el período de rotación de la superficie de 243 días. Los vientos en esa zona alcanzan velocidades de  $\sim 360$  km/h. Sin embargo en la superficie son apenas una brisa de unos 10 km/h.

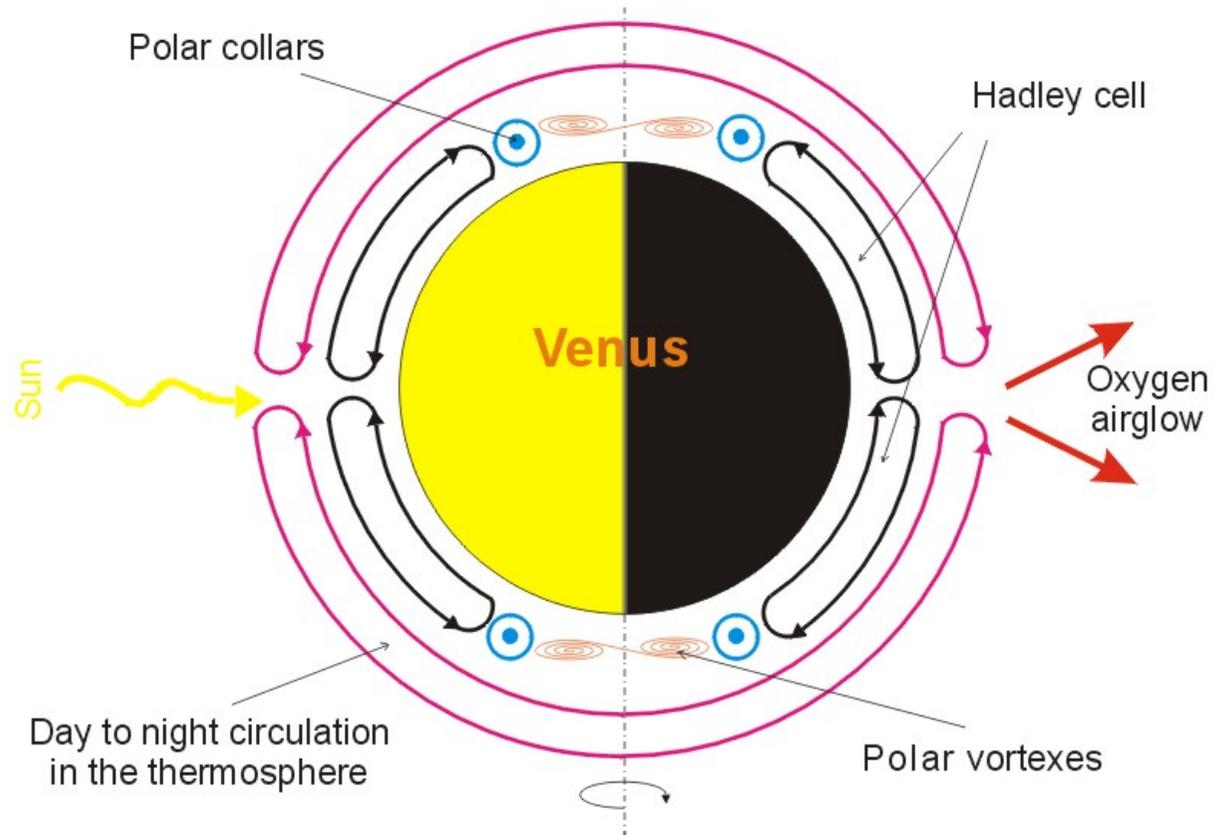


La gruesa capa de nubes está compuesta principalmente por gotas de ácido sulfúrico. Estas nubes oscurecen la superficie de Venus y reflejan  $\sim 75\%$  de la luz solar que incide en ellas. El ácido sulfúrico es producido por la acción fotoquímica del Sol sobre el dióxido de carbono, dióxido de azufre y vapor de agua, de acuerdo a las siguientes reacciones:



Un día típico en Venus sería como un día de la Tierra parcialmente nublado. La radiación solar que alcanza la superficie es menor que en la Tierra debido a la alta reflectividad de las nubes.

# Circulación atmosférica



Todos los vientos en Venus están en última instancia potenciados por convección. El aire caliente se eleva en la zona ecuatorial donde el calor solar se concentra y fluye hacia los polos dando origen a la circulación de Hadley. A aproximadamente  $\pm 60^\circ$  de latitud el aire comienza a descender y retorna al ecuador por debajo de las nubes.

# Atmósfera de la Tierra



## DATOS GENERALES:

$N_2$  : 78.08%

$O_2$  : 20.95%

Ar : 0.93%

$H_2O$  (vapor) : 0.25% (promedio)

$CO_2$  : 0.041%

Ne : 0.0018%

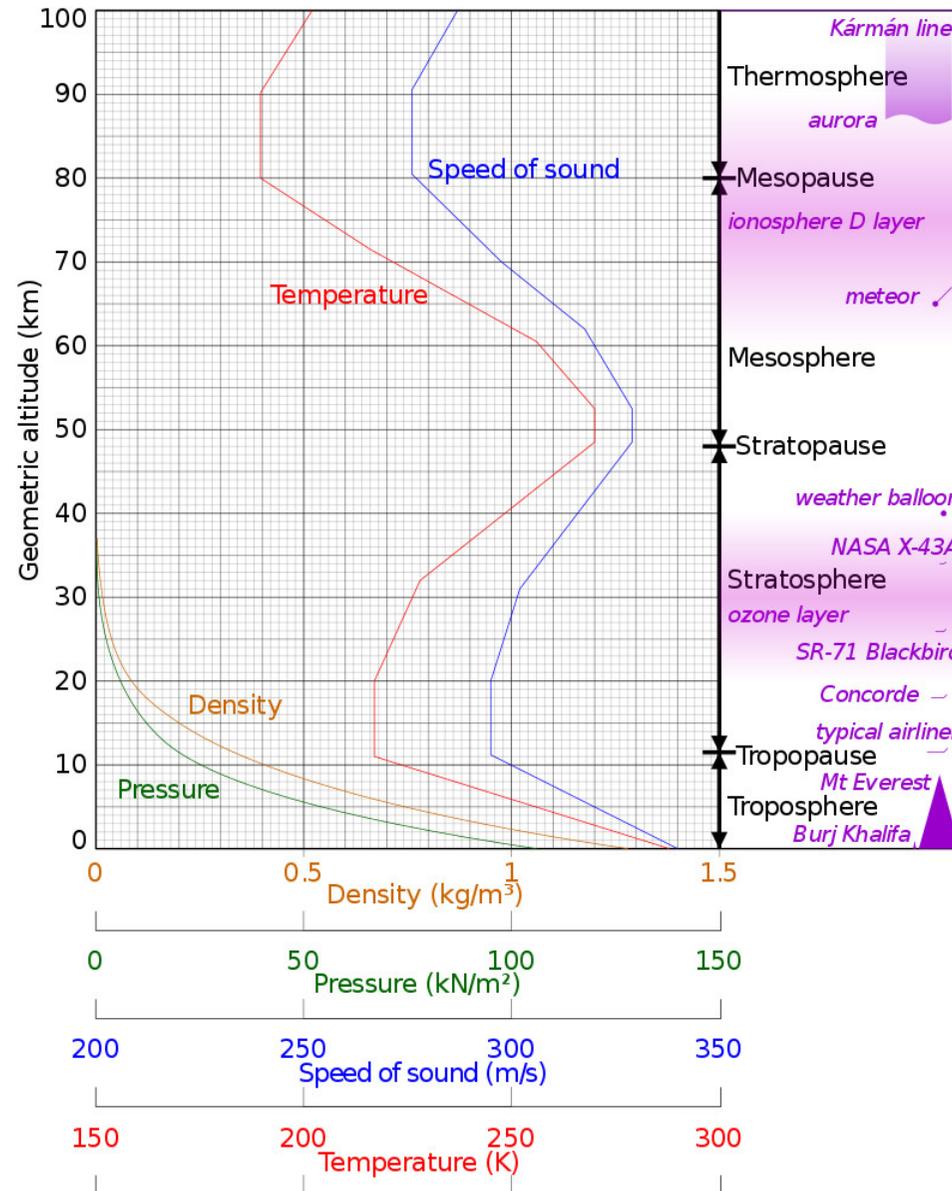
He : 0.00052%

$H_2$  : 0.000055%

$H_2O$  : 20 ppm

Presión superficial : 101325 Pa

# Estructura térmica de la atmósfera



# Circulación atmosférica

**Escala de altura  $H$ :** Describe el espesor de una atmósfera supuesta isotérmica y en equilibrio hidrostático. Tenemos

$$\frac{dP}{dh} = -g\rho$$

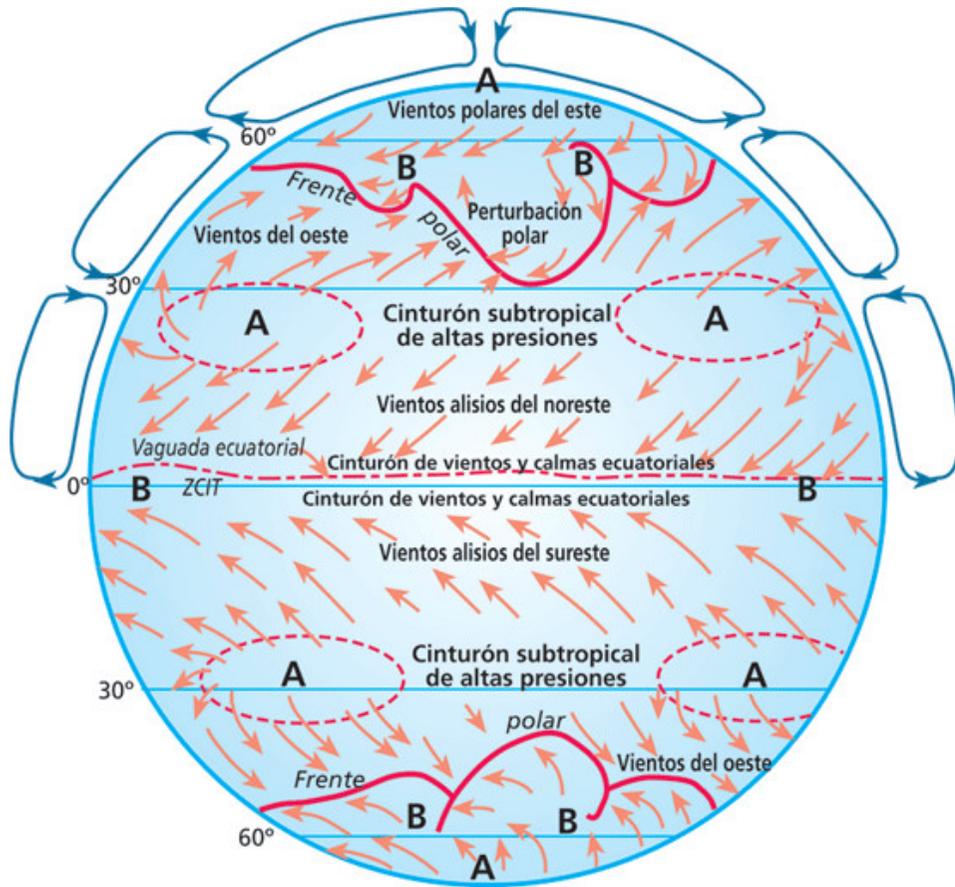
Asumiendo  $\rho$  constante queda:

$$P = g\rho H$$

Por otro lado:

$$P = \frac{\rho kT}{\mu}$$

$$\implies H = \frac{kT}{\mu g}$$



En la zona ecuatorial el aire más caliente tiene una escala de altura mayor que en la zona polar. El aire caliente en las regiones ecuatoriales tiende a fluir sobre la cima de la atmósfera a latitudes cada vez mayores debido a la disminución de  $H$ . El aire caliente desplazado hacia las zonas polares es remplazado por aire frío proveniente de las zonas polares. Esta se conoce como *circulación de Hadley*.

La alta rotación de la Tierra transforma la circulación N-S en una E-W debido a la fuerza de Coriolis. La célula de Hadley se descompone en tres generando los vientos alisios, vientos del oeste y los vientos polares del este.

# Atmósfera de Marte



## DATOS GENERALES:

CO<sub>2</sub> : 95.3%

N<sub>2</sub> : 2.7%

Ar : 1.6%

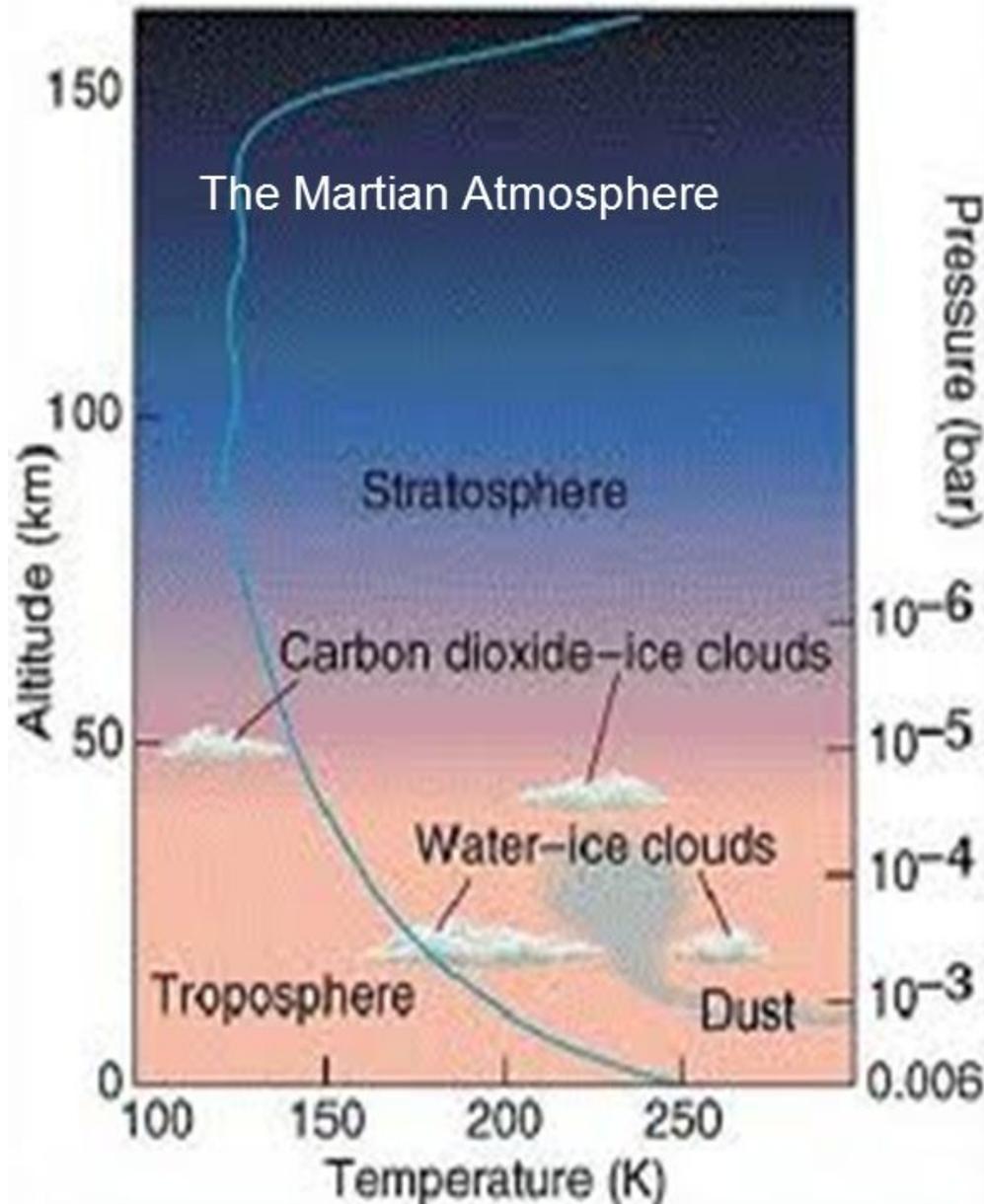
O<sub>2</sub> : 0.13%

CO : 0.08%

Presión superficial : 600 Pa ( $6 \times 10^{-3}$  de la presión atmosférica al nivel del mar en la Tierra).

Muy escasa proporción de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) ( $\sim 0.2$  ppb) que es una sustancia trazadora de actividad volcánica reciente.

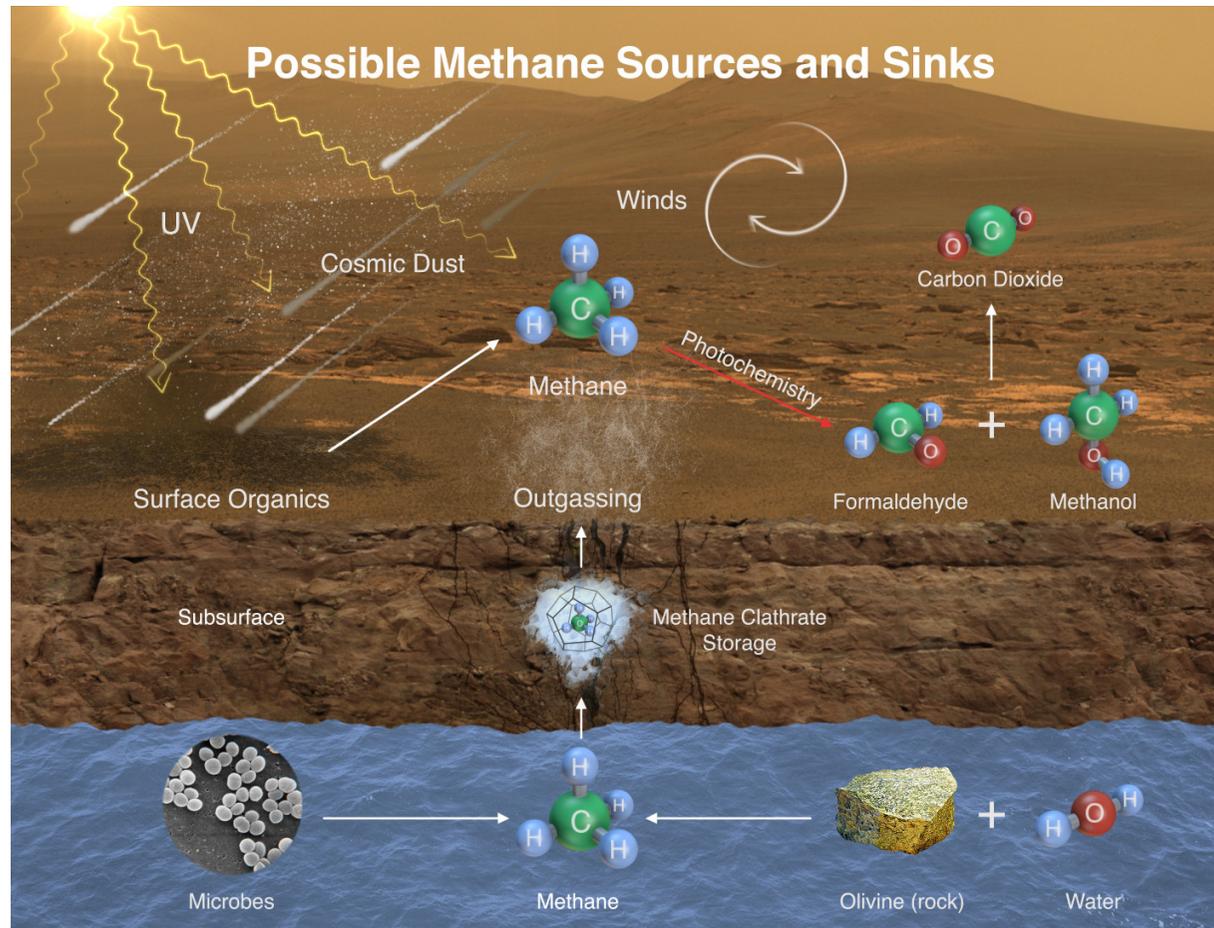
## Estructura térmica de la atmósfera



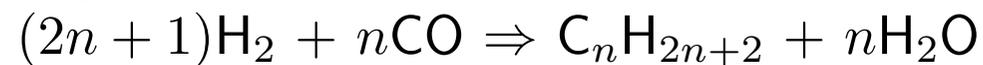
The Martian atmosphere is very different from Earth's

- **95% carbon dioxide,**
- **3% nitrogen**
- Surface pressure is very low – same pressure as Earth at 35 km!

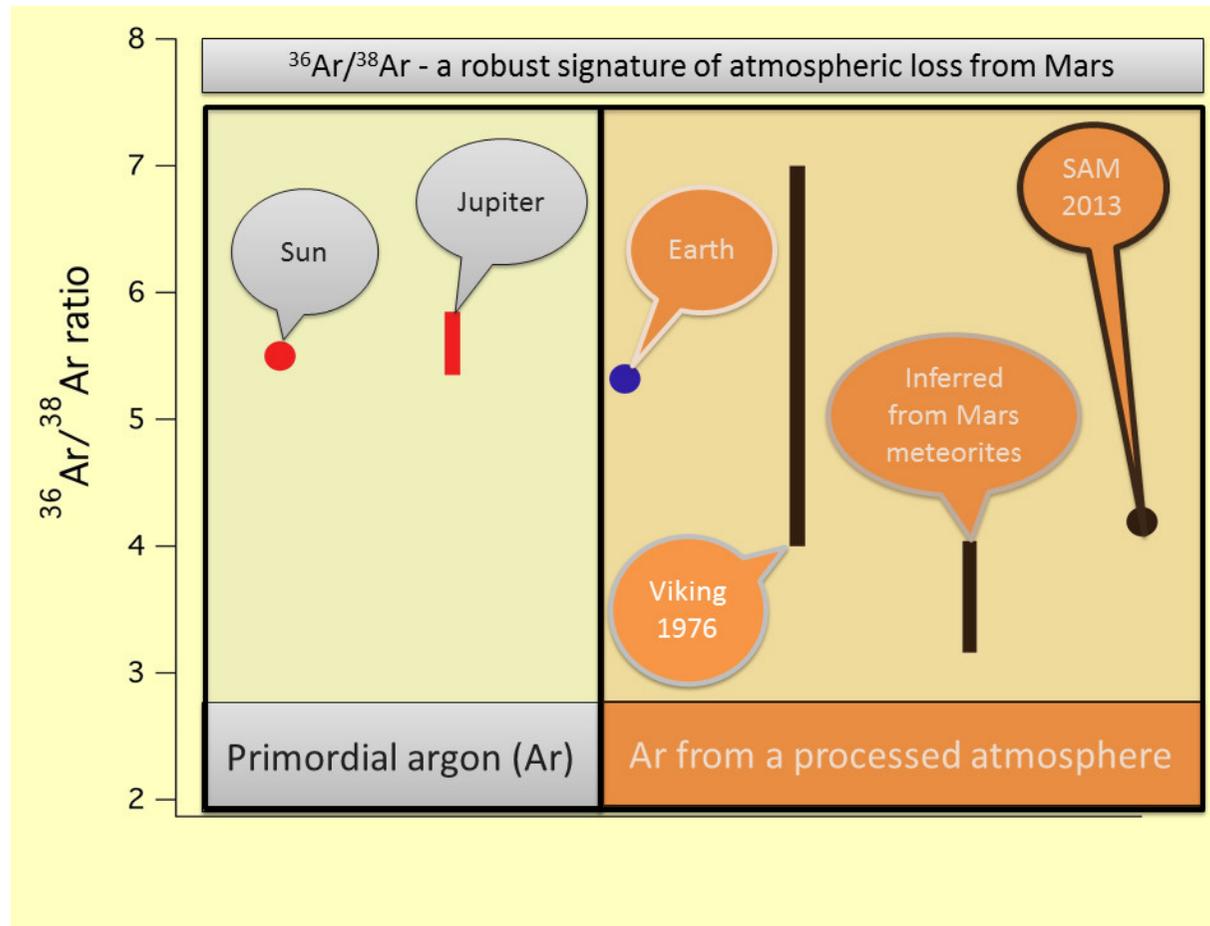
# El ciclo del metano: ¿Biogénico o mineral?



La explicación mineral involucra reacciones de agua con minerales de la superficie que liberan hidrógeno, el cual puede producir hidrocarburos a través de reacciones del tipo:

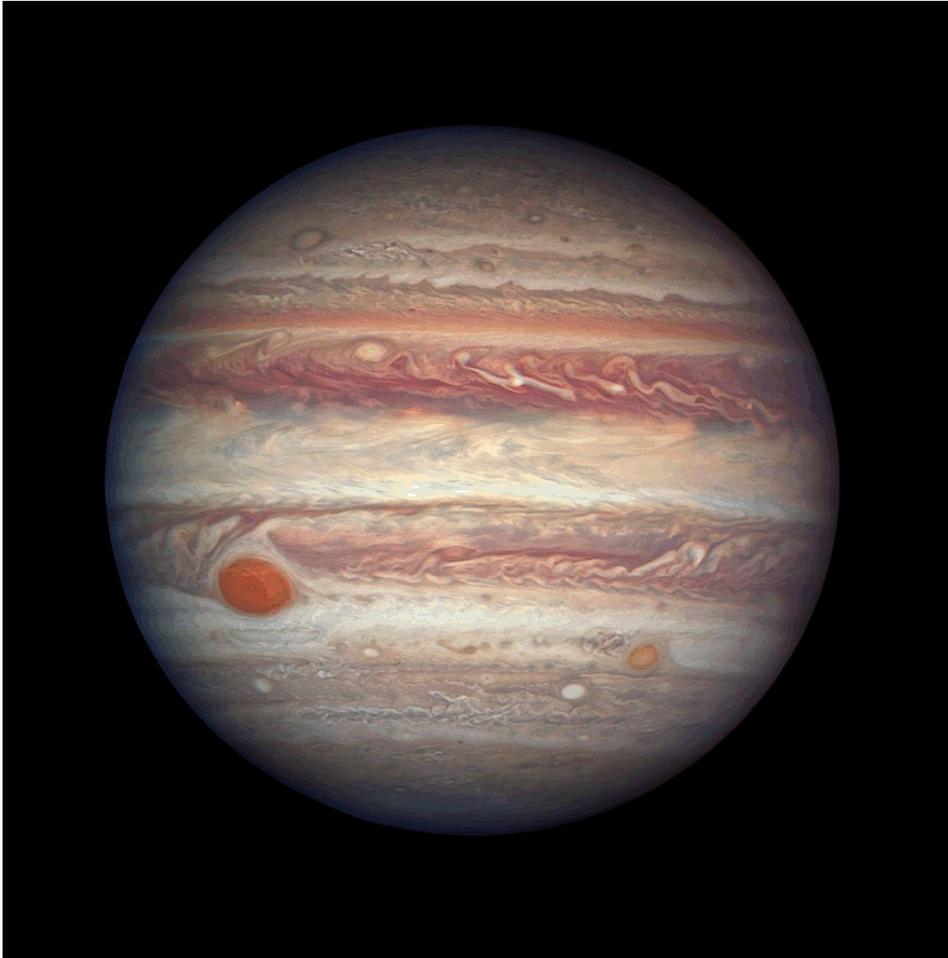


# Argón y la pérdida de la atmósfera primitiva



La atmósfera de Marte está enriquecida considerablemente en argón. Como no se combina con otros elementos ni condensa, su cantidad en la atmósfera marciana es constante. También se constata un enriquecimiento en  $\text{Ar}^{38}$  con respecto a  $\text{Ar}^{36}$  que es una fuerte indicación de que Marte ha perdido una parte considerable de su atmósfera primitiva.

# Atmósfera de Júpiter



DATOS GENERALES	
Elemento	Júpiter/Sol
He/H	$0.807 \pm 0.02$
Ne/H	$0.10 \pm 0.01$
Ar/H	$2.5 \pm 0.5$
Kr/H	$2.7 \pm 0.5$
Xe/H	$2.6 \pm 0.5$
C/H	$2.9 \pm 0.5$
N/H	$3.6 \pm 0.5$
O/H	$0.033 \pm 0.015$
P/H	0.82
S/H	$2.5 \pm 0.15$

## Compuestos químicos en la atmósfera y nubes

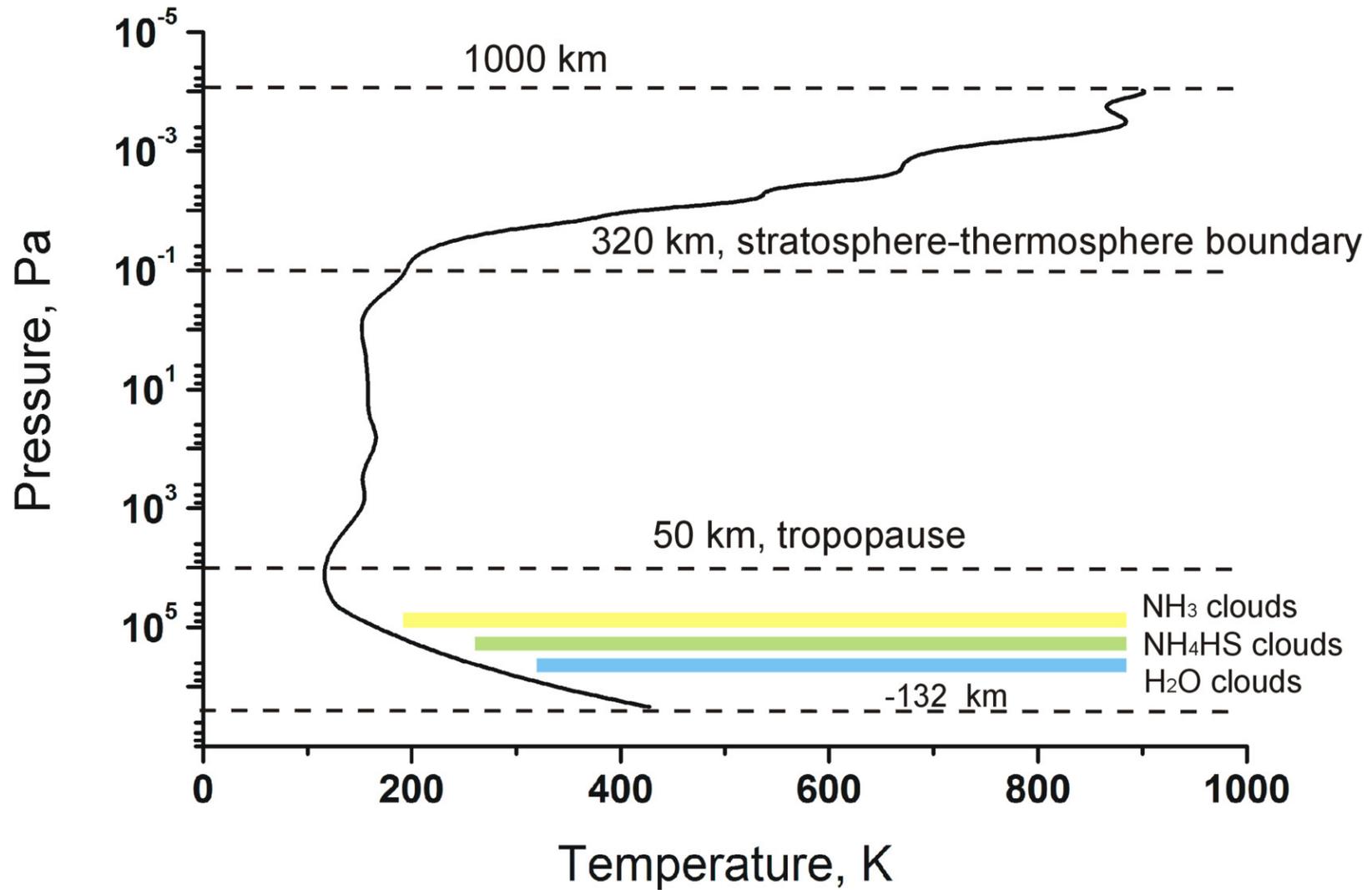
Predominantes:  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y  $\text{H}_2\text{O}$  (esta última reside a mayores profundidades, su concentración en la atmósfera es muy baja).

La troposfera tiene un sistema complicado de nubes y niebla, compuesto por capas de  $\text{NH}_3$ , hidrosulfuro de amonio ( $\text{NH}_4\text{SH}$ ) y  $\text{H}_2\text{O}$ .

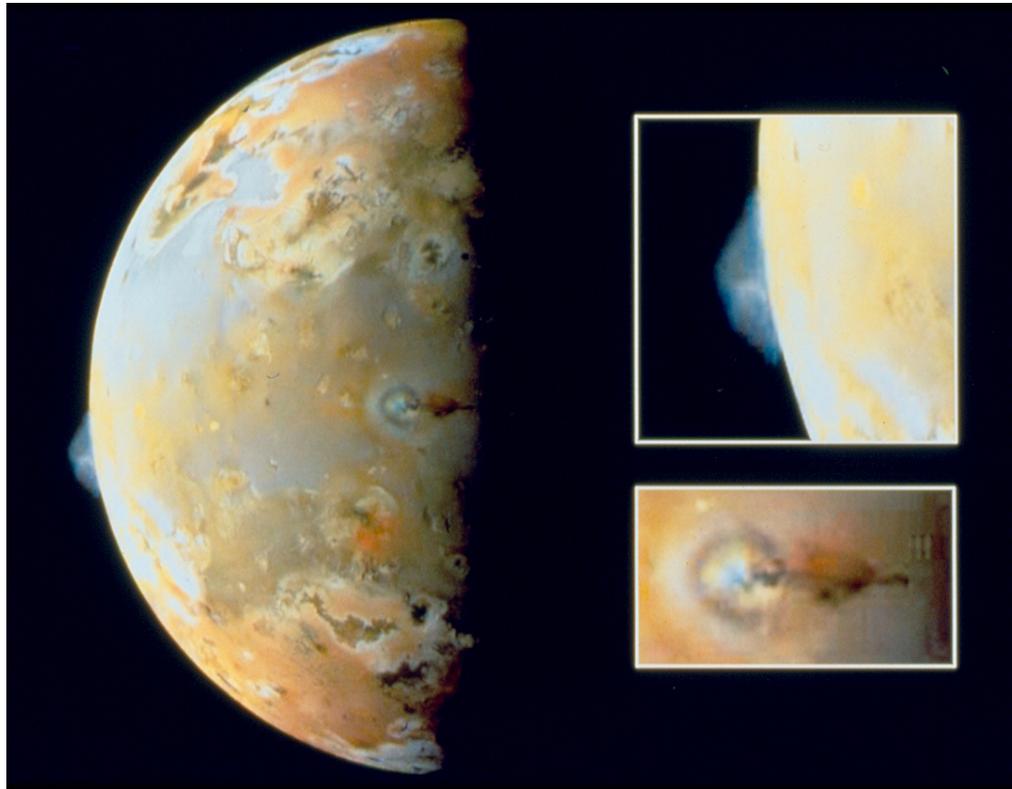
Las nubes se organizan en bandas paralelas al ecuador donde zonas oscuras (*cinturones*) se intercalan con zonas claras (*zonas*). Las zonas corresponden a gas ascendente mientras que los cinturones corresponden a gas descendente.

La atmósfera es muy activa mostrando: ciclones, anticiclones, tormentas y relámpagos. La gran mancha roja es un ejemplo de anticiclón.

# Estructura térmica de la atmósfera



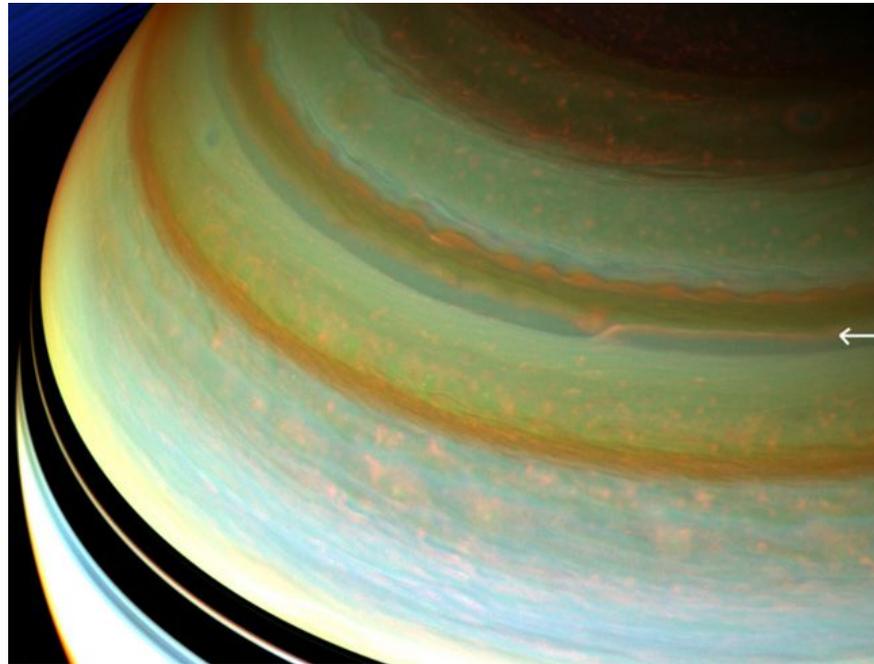
## Atmósfera de Io



La atmósfera consiste esencialmente de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), y menores constituyentes como monóxido de azufre ( $\text{SO}$ ), cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), y oxígeno y azufre atómico.

Io es el objeto geológicamente más activo del sistema solar con más de 400 volcanes activos. La fuente de energía proviene de la fricción en su interior por las mareas generadas por Júpiter y los otros satélites galileanos.

# Atmósfera de Saturno



COMPOSICION (por volumen):

H<sub>2</sub> : 96.5%

He : 3.25%

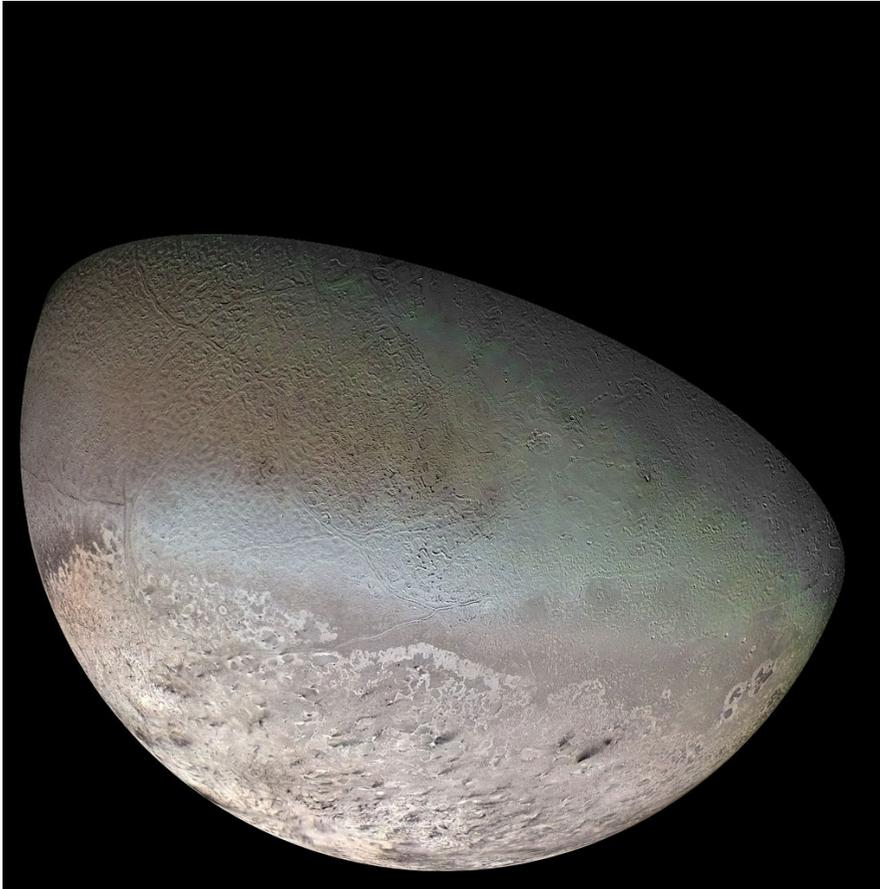
Metalicidad: no bien conocida.

La atmósfera de Saturno también es deficiente en He.

Trazas de acetileno, etano, propano, fosfina (PH<sub>3</sub>) y metano.

Composición de las nubes: cristales de amoníaco (superiores), hidrosulfuro de amonio (NH<sub>4</sub>SH) o agua (inferiores).

# Atmósfera de Titán

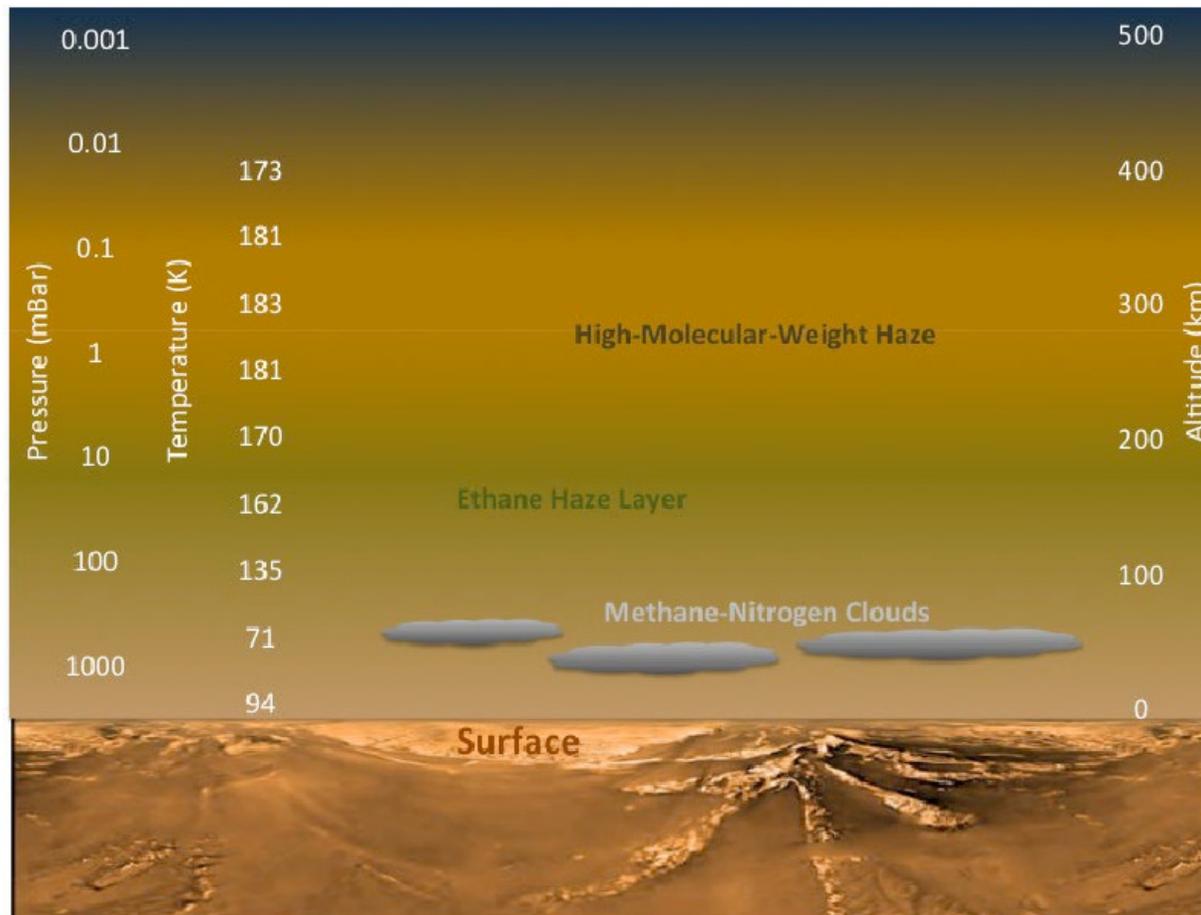


COMPOSICION (por volumen)  $N_2$  : 97.0%  
 $CH_4$  : 2.7%  
 $H_2$  : 0.1-0.2%

Temperatura : 93.7 K

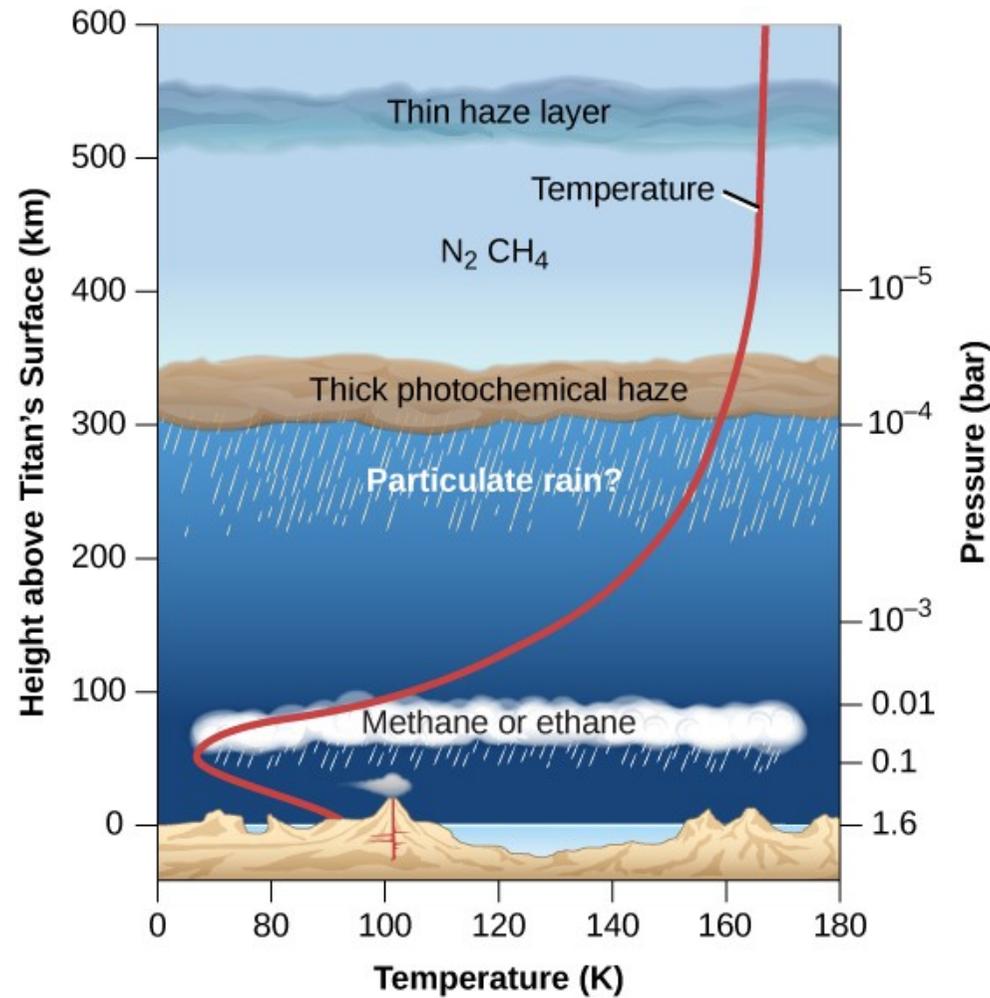
Presión superficial : 146.7 kPa (1.45 atm.)

La atmósfera de Titán resulta ser algo más masiva que la de la Tierra en términos absolutos.



La inmensa niebla que rodea a Titán está compuesta por materia orgánica formada a partir de la disociación de moléculas de metano por la radiación UV del Sol. Esos polímeros que se forman a partir de moléculas más simples como el metano ( $\text{CH}_4$ ) o el etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) reciben el nombre de tolinas. Estas son sustancias sólidas que, en suspensión en la atmósfera, forman la niebla de coloración anaranjada. Con el tiempo precipitan en la superficie formando una densa capa de “arena” de materia orgánica.

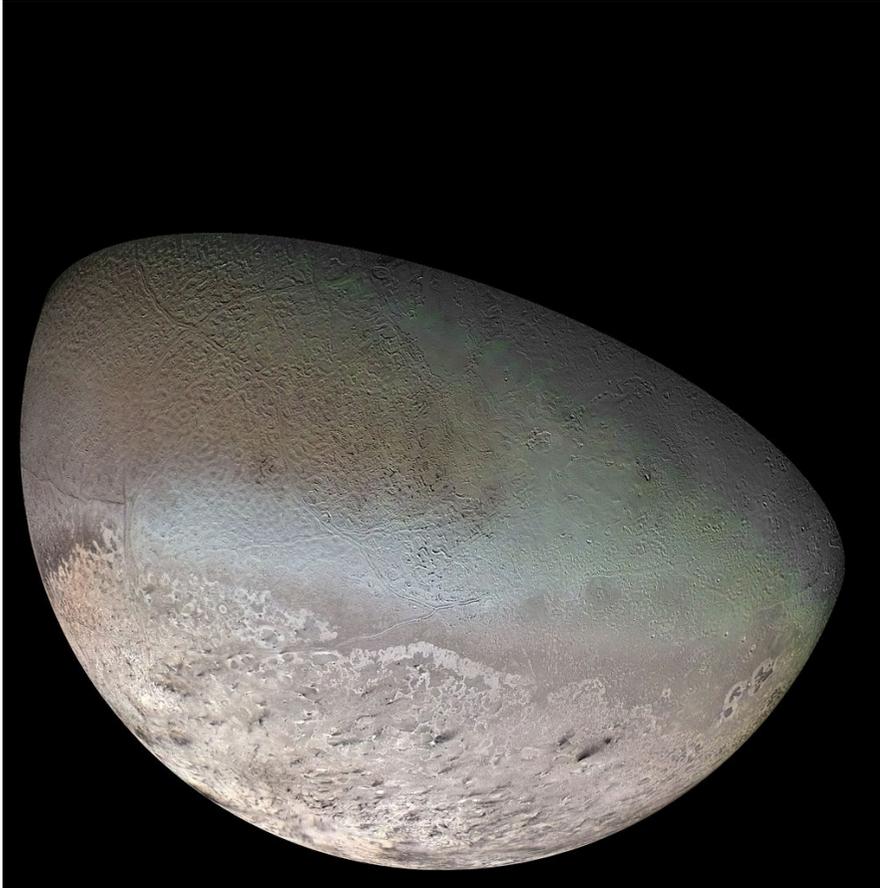
# Ciclo hidrológico en Titán



En Titán el metano y el etano cumplen el rol del agua en la Tierra. Esos gases se vaporizan se incorporan en la atmósfera de Titán donde forman nubes y precipitan como lluvia nutriendo los ríos y lagos del satélite.

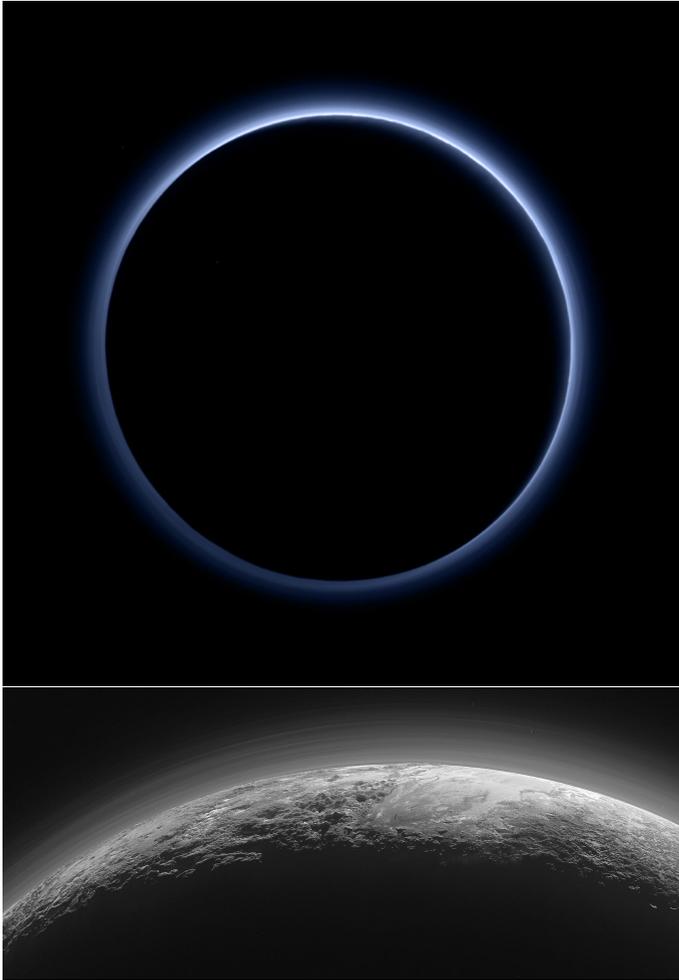
# Atmósfera de Tritón

Tritón es el satélite más grande de Neptuno visitado por la sonda *Voyager 2*. Su radio es 1353 km.



Gas dominante:  $N_2$  y trazas de  $CH_4$  y  $CO$ . La superficie está cubierta de  $N_2$  congelado (temperatura  $\sim 36$  K) que origina la atmósfera por evaporación. Presión superficial :  $1.4 \times 10^{-5}$  atm.

## Atmósfera de Plutón



La atmósfera de Plutón consiste principalmente de nitrógeno, con pequeñas cantidades de metano y CO. En Plutón también se forman tolinas que precipitan a la superficie como sólidos siendo responsables del color marrón de la superficie. La atmósfera es extremadamente tenue, la sonda *New Horizons* midió en su superficie aproximadamente 1 Pa ( $10^{-5}$  de la presión atmosférica al nivel del mar en la Tierra).

Imágenes de Plutón con su tenue atmósfera tomadas desde la sonda *New Horizons*.