

# **HIELO EN EL UNIVERSO: de la Tierra al Medio Interestelar**

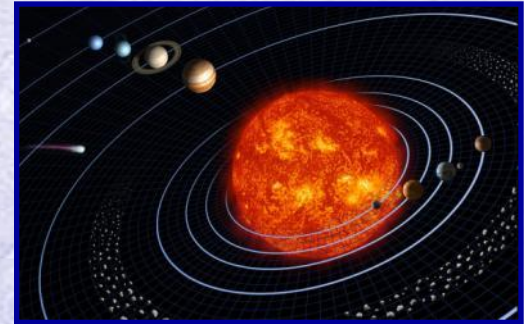
**Óscar Gálvez González**

**Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, Madrid**

**<http://www.iem.cfm.csic.es/departamentos/fismol/Oscar/index.htm>**

**[oscar.galvez@csic.es](mailto:oscar.galvez@csic.es)**

# ¿Qué vamos a ver hoy?



# ¿Qué es el Hielo?

## Real Academia Española de la Lengua

**Hielo:** Agua convertida en cuerpo sólido y cristalino por un descenso suficiente de temperatura

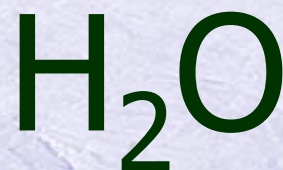
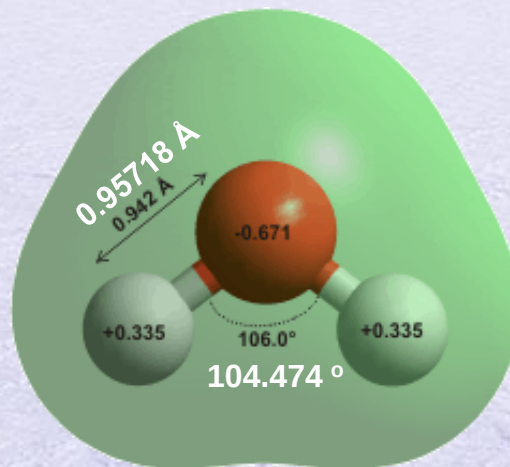
## Definición Científica

**Hielo:** se dice de una fase sólida, normalmente cristalina, de una sustancia que se presenta en estado líquido o gas a temperatura ambiente.

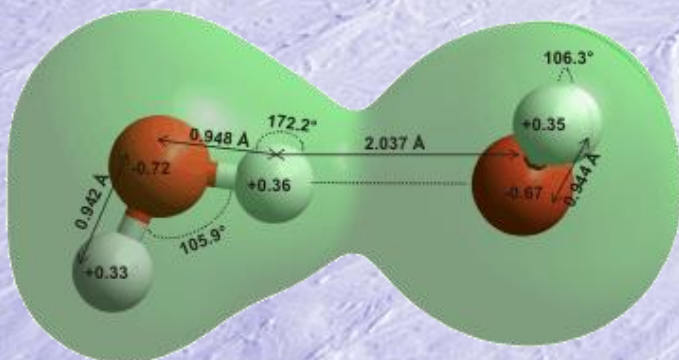
*Diferentes sustancias heladas.*

Sin embargo la palabra “hielo” normalmente se refiere al “hielo de agua”, más correctamente a una de sus **15** fases cristalinas conocidas, la denominada Ih.

# La molécula de agua



## El enlace de hidrógeno



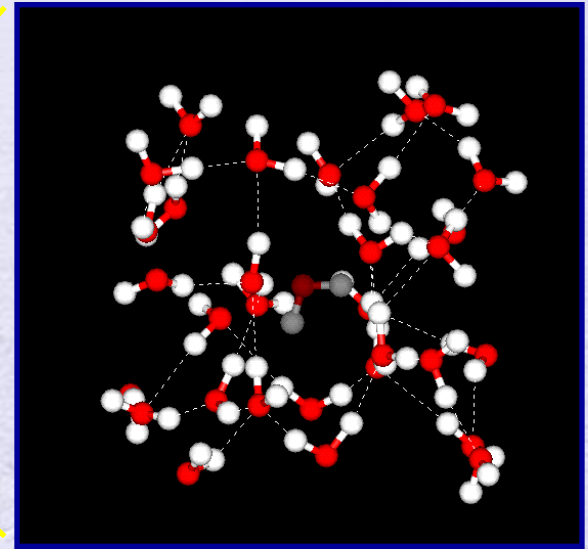
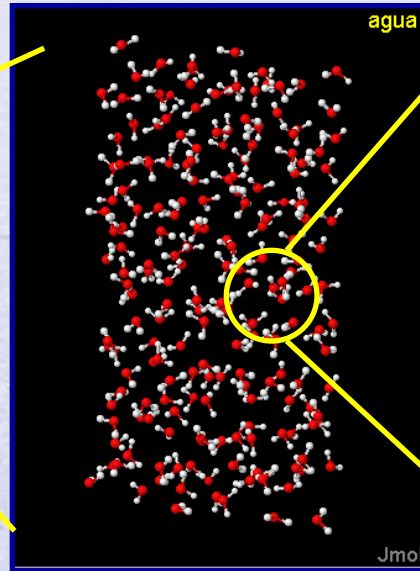
| Enlace       | Energía kJ/ mol | Distancia O-H (Å) |
|--------------|-----------------|-------------------|
| Covalente    | 458,9           | 0.96              |
| De hidrógeno | ~ 21            | ~ 1.9             |

$$1 \text{ Å} = 0,00000001 \text{ cm}$$

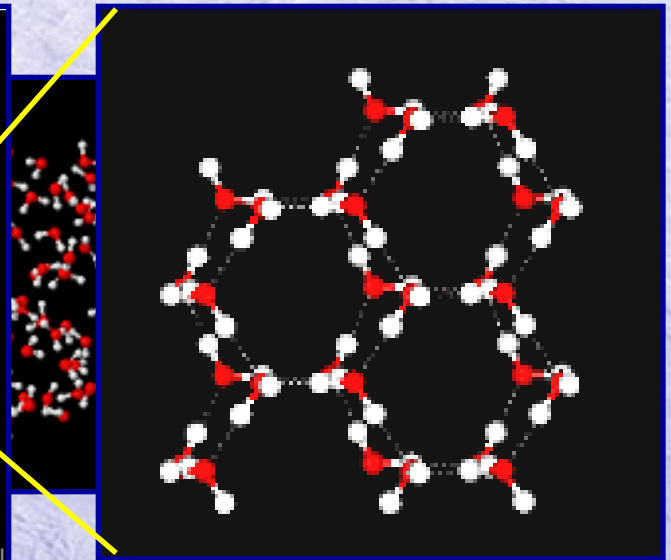
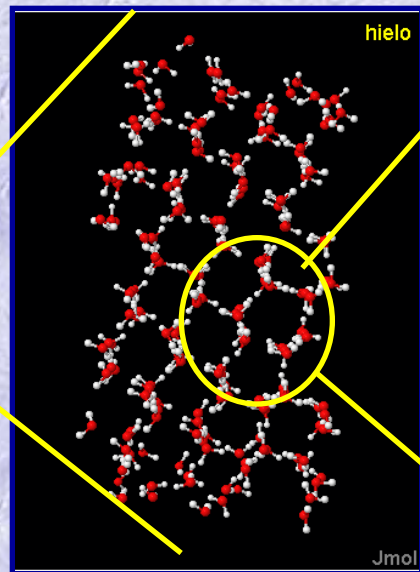
7 % + fuerte → sólido

# El cristal de hielo de agua

Agua



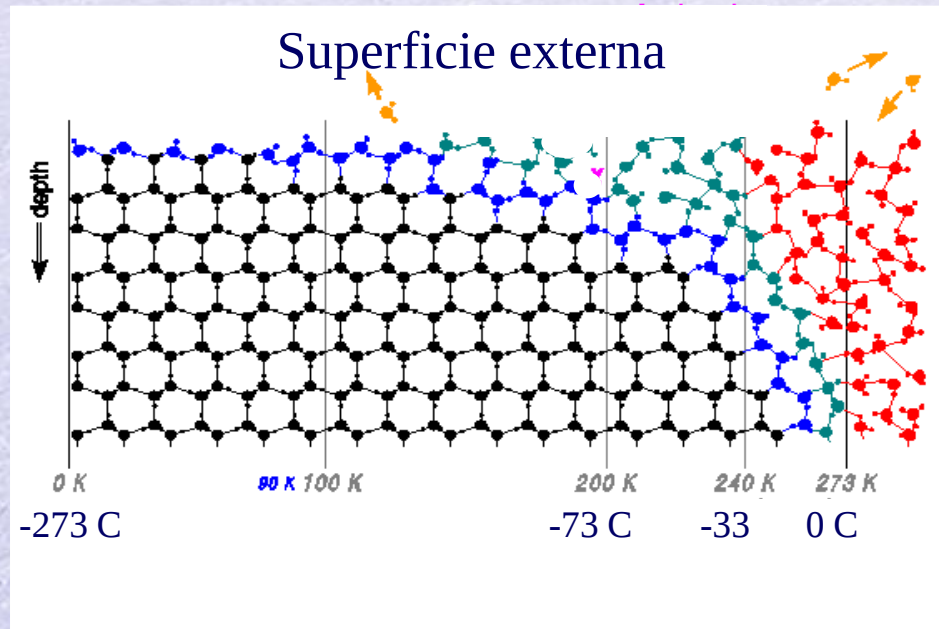
Hielo  
Ih



# Peculiaridades del hielo de agua

$\rho_{\text{max}}$  a 4 °C       $\rho_{\text{agua}} = 0.9999 \text{ g/cm}^{-3}$        $\rho_{\text{hielo}} = 0.9168 \text{ g/cm}^{-3}$

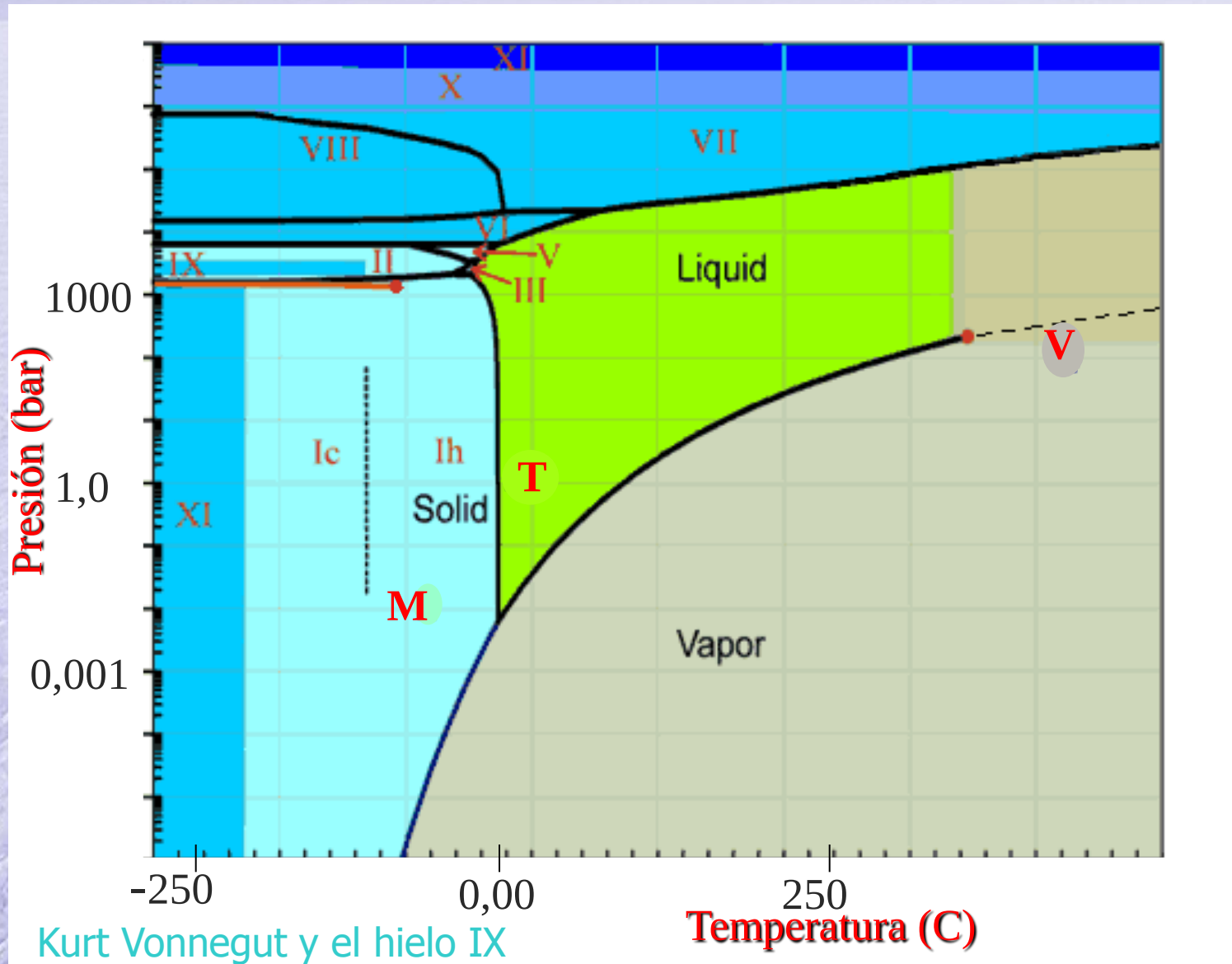
## Movilidad superficial y capa “casi líquida”



## Desorden protónico y “reglas del hielo”

- 1) Hay dos hidrógenos adyacentes a cada oxígeno
- 2) Sólo hay un hidrógeno por enlace

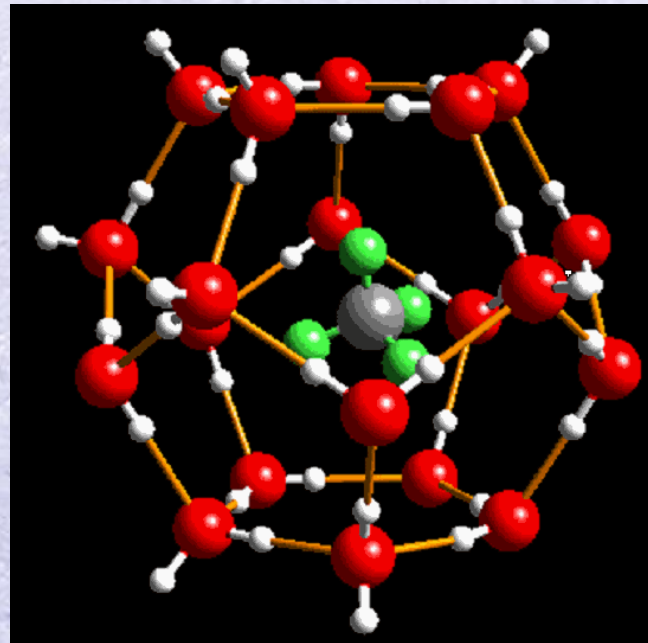
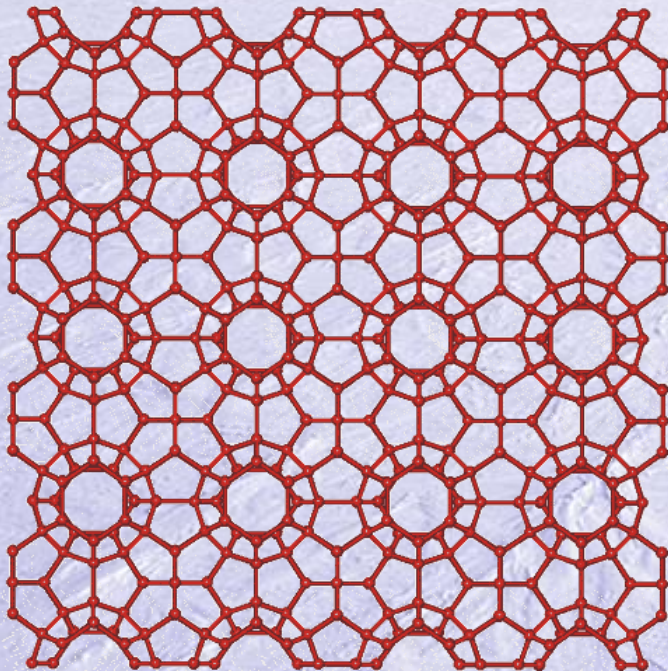
# Otros hielos de agua cristalinos



# Clatratos de hielos de agua

Cantidad no estequiométrica de agua y un compuesto no polar que se forma normalmente bajo presión y a temperaturas bajas

Diferentes tipos (dependen del tamaño de la molécula atrapada):  
cúbicos, hexagonales, etc.



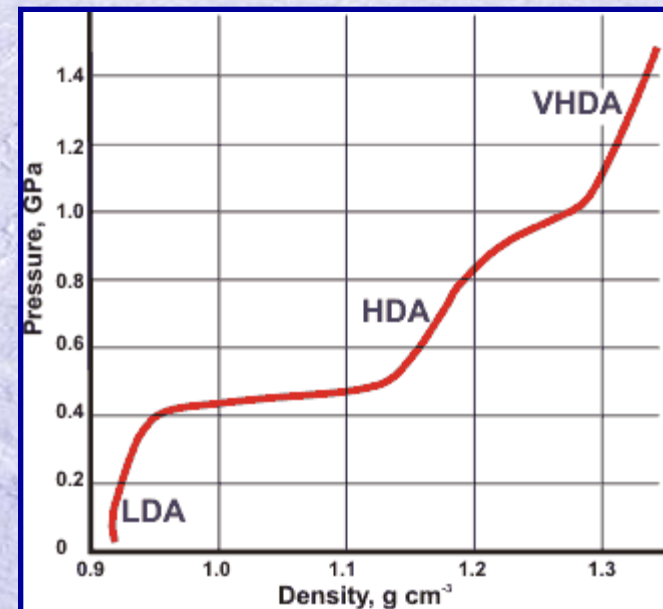
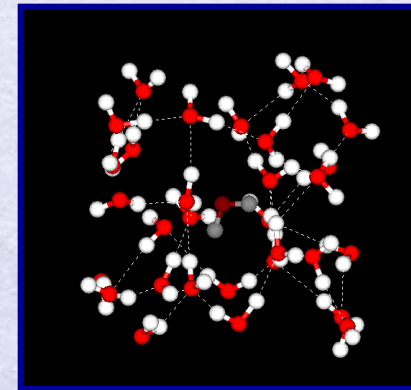
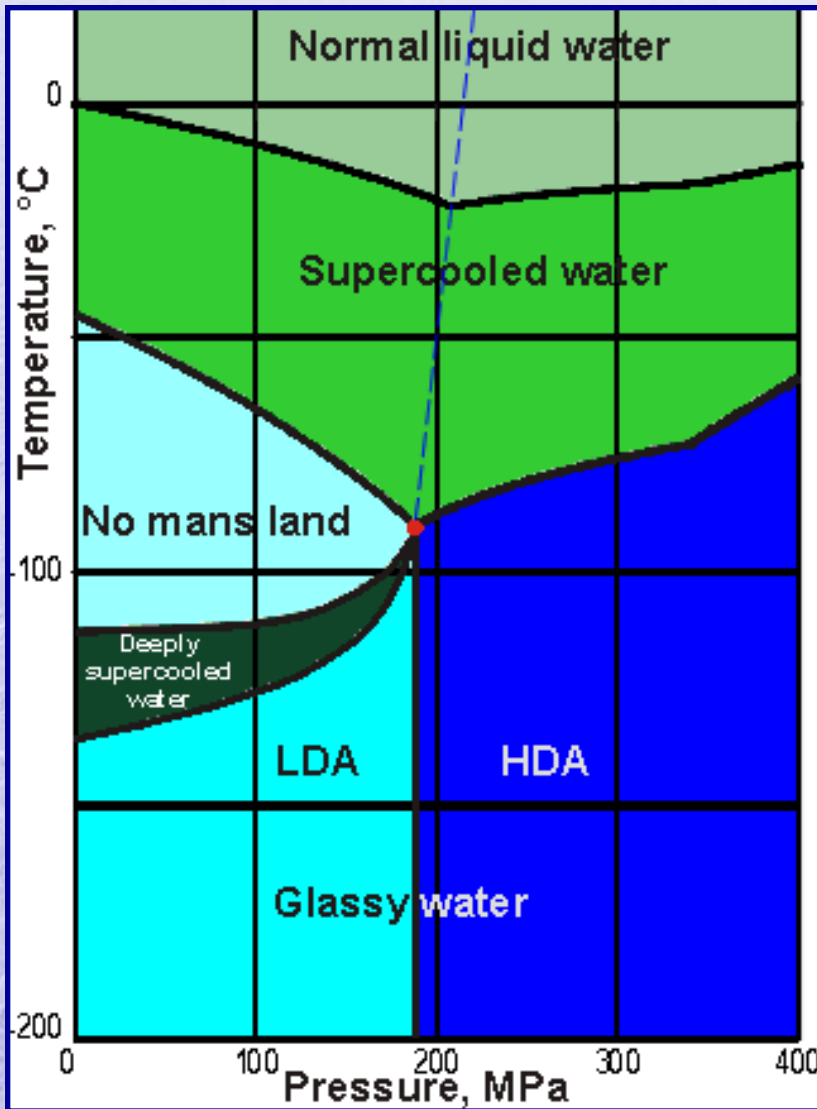
Unas 6.4 billones de toneladas ( $10^{12}$ ) de metano permanecen bajo los sedimentos de los fondos oceánicos en forma de clatrato de agua. "Fusil de clatrato". Efecto Invernadero

Chimeneas de metano en el Ártico – Septiembre 2008

Liberación en el permafrost Siberiano – Febrero 2013

# Hielos de agua amorfos

Desorden estructural



# El hielo de agua en la Tierra



70 % de la superficie Terrestre está cubierta por  $H_2O$  y un 10% por hielo, principalmente en torno a los polos.

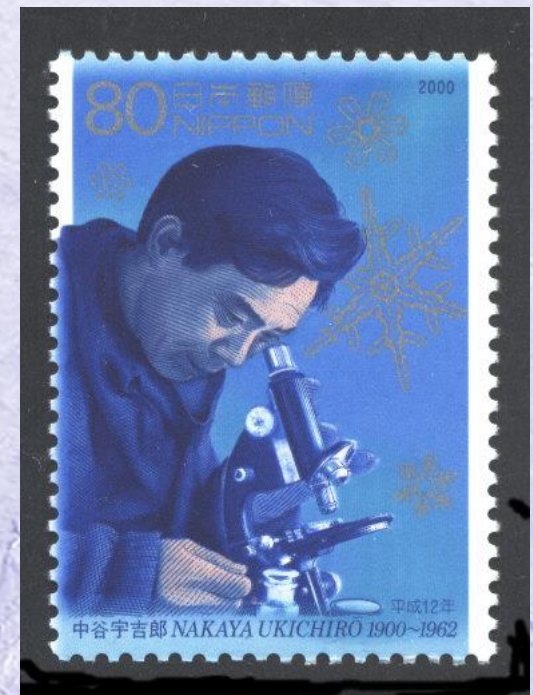
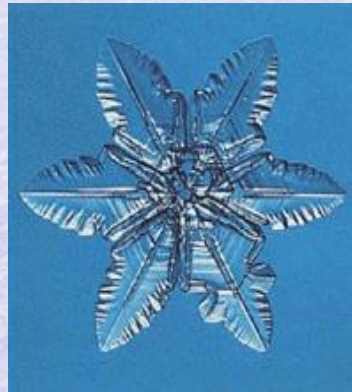
El 2% del agua de la Tierra está en forma de hielo.

Un 90% de ese hielo corresponde a la Antártida

Un 9% del hielo corresponde a Groenlandia.

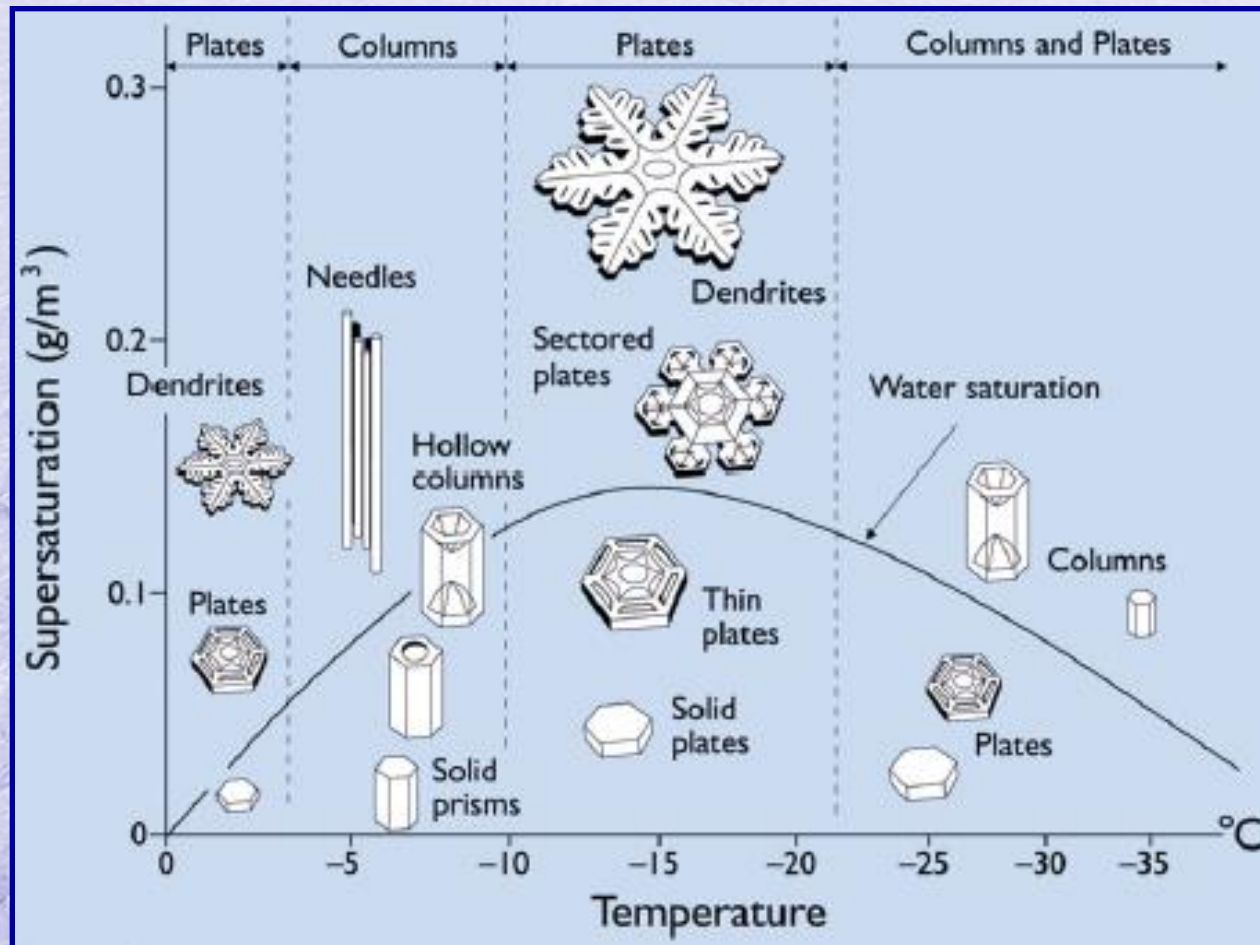
# Nieve

La nieve es un fenómeno meteorológico consistente en la precipitación de pequeños cristales de hielo. Estos cristales adoptan formas geométricas con características fractales y se agrupan formando copos. Normalmente tiene una estructura abierta y suave, excepto cuando es comprimida por la presión externa.

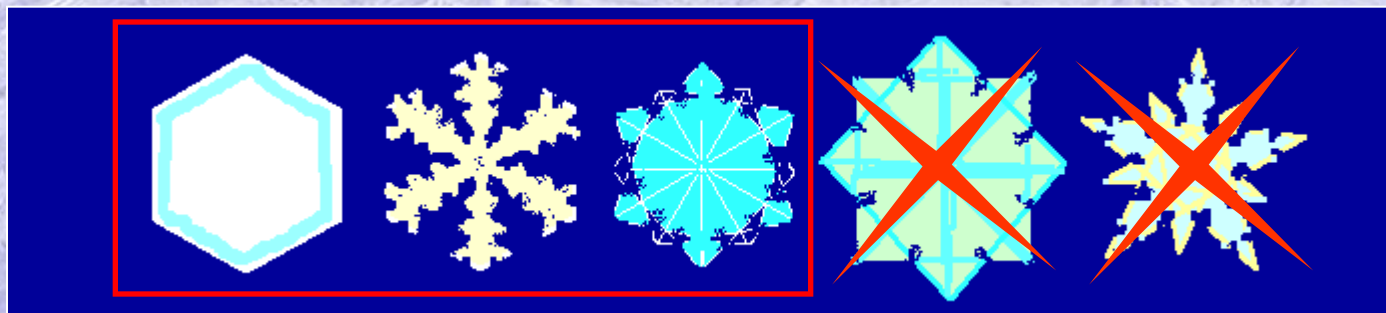
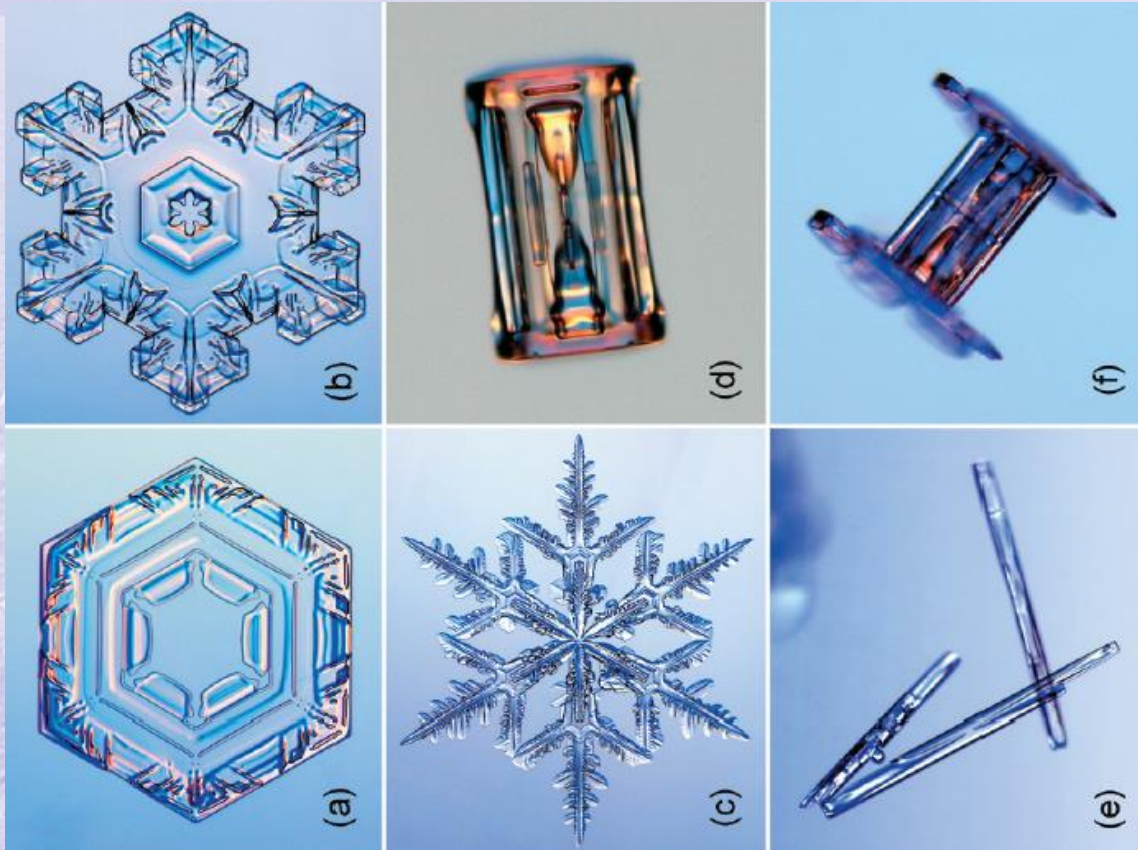


"Cartas del cielo"  
(U. Nakaya)

# Condiciones de formación de cristales de nieve



# Diferentes copos de nieve



# Granizo

El Granizo es una de las formas de precipitación y se llega a originar cuando estrechas masas de aire ascienden al cielo de forma muy violenta. Las gotas de agua se agregan a una partícula sólida y se convierten en hielo al ascender a las zonas más elevadas de la nube. Conforme transcurre el tiempo, esa gota de agua gana dimensiones, hasta que representa lo suficiente como para ser incontenible y permanecer por más tiempo en suspensión.



Megacriometeoro  
(en ausencia de nubes)

Puede estar relacionado con el cambio climático



Record: Bangladesh (1986) peso  $\sim 1$  kg

# Glaciares

Los glaciares se forman en áreas donde se acumula más nieve en invierno que la que se funde en verano



Noruega, glaciar de Briksdal

Bolivia, glaciar de Sorata

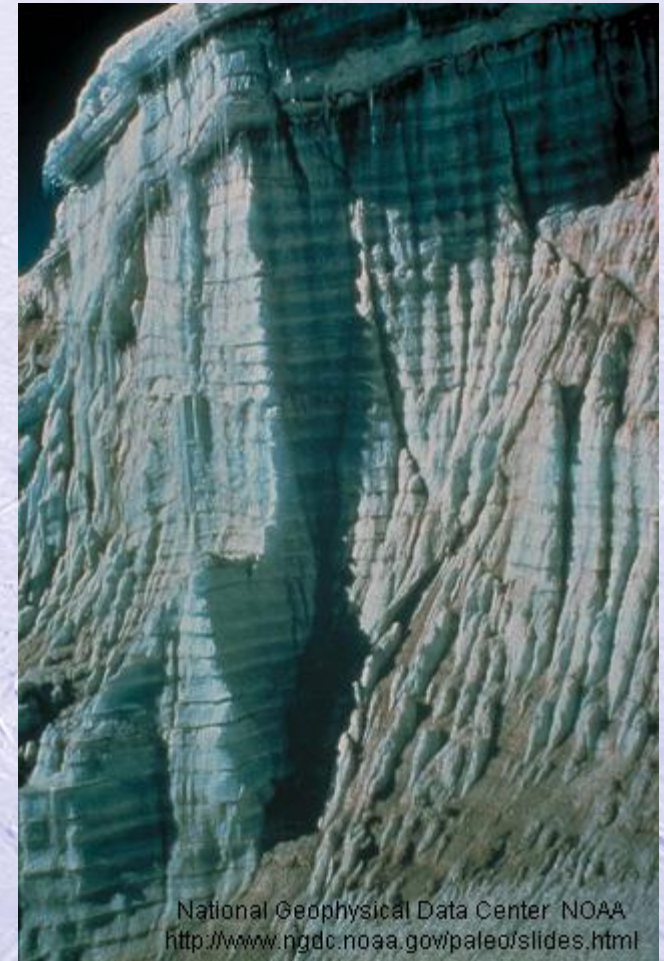


# Glaciares

Muchos tipos: alpino, casquete glaciar, meseta, piedemonte, etc.



Vatnajökull, Islandia

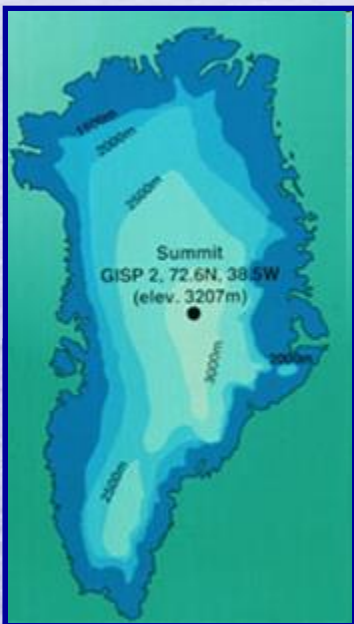


Quelccaya, Perú

# Glaciares continentales de casquete

Son los mayores Glaciares: Antártida y Groenlandia (99 % del hielo en la Tierra)

## Groenlandia



1.7 millones de km<sup>2</sup> (82 % de la Isla, como España+Francia+Alemania+Italia)

110.000 años la capa actual, aunque se piensa se formó en el Plioceno, ~ 5 millones años

Hasta 3 km de espesor



El enorme peso del hielo ha deprimido la zona central de Groenlandia acercando la superficie al nivel del mar y las sierras solo se alzan en la periferia confinando la capa de hielo. Si el hielo desapareciese, Groenlandia probablemente se convertiría en un archipiélago.

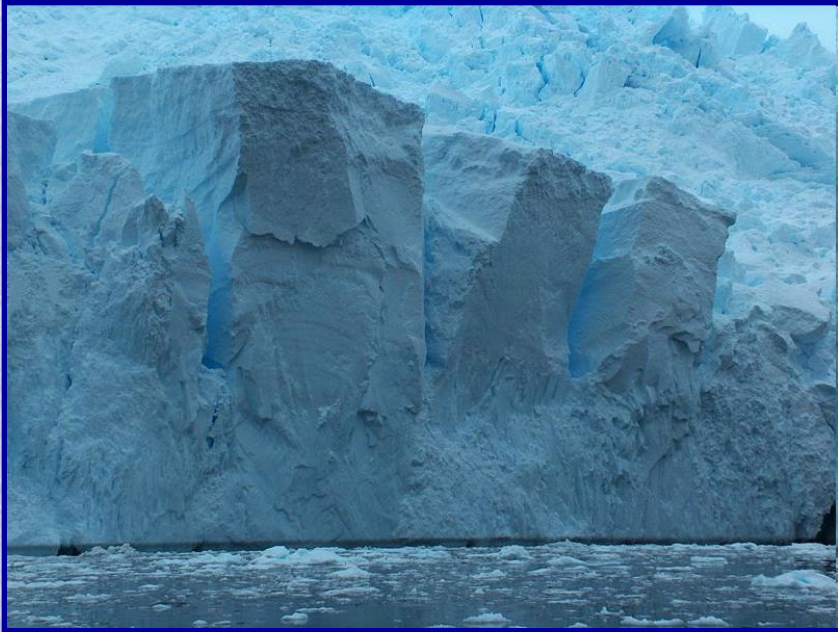
Fusión casquete Groenlandia aumentaría ~ 7 m nivel del mar

**Julio de 2012:** el 97% de la cubierta se había fundido en solo cuatro días

# Glaciares continentales de casquete

## Antártida

14 a 30 millones de km<sup>2</sup> (1 o 2 veces Europa) ~ 80 % del agua dulce de la Tierra  
Se formaron en el Oligoceno, ~ 33 millones años  
2.5 a 5 km de espesor

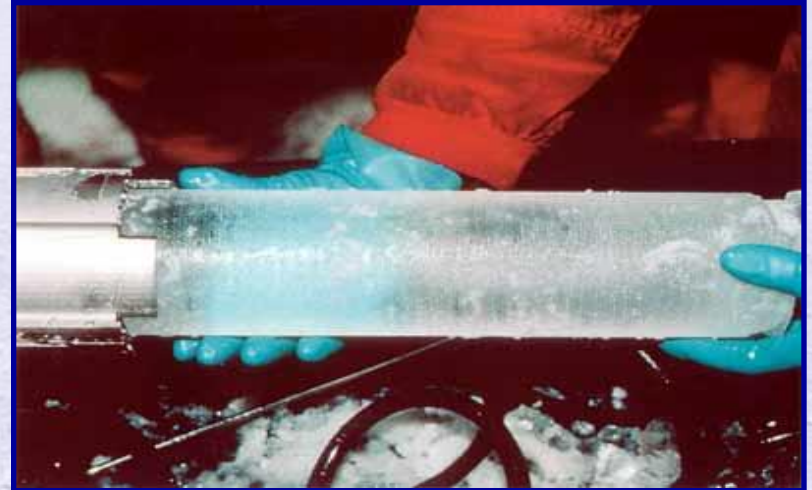
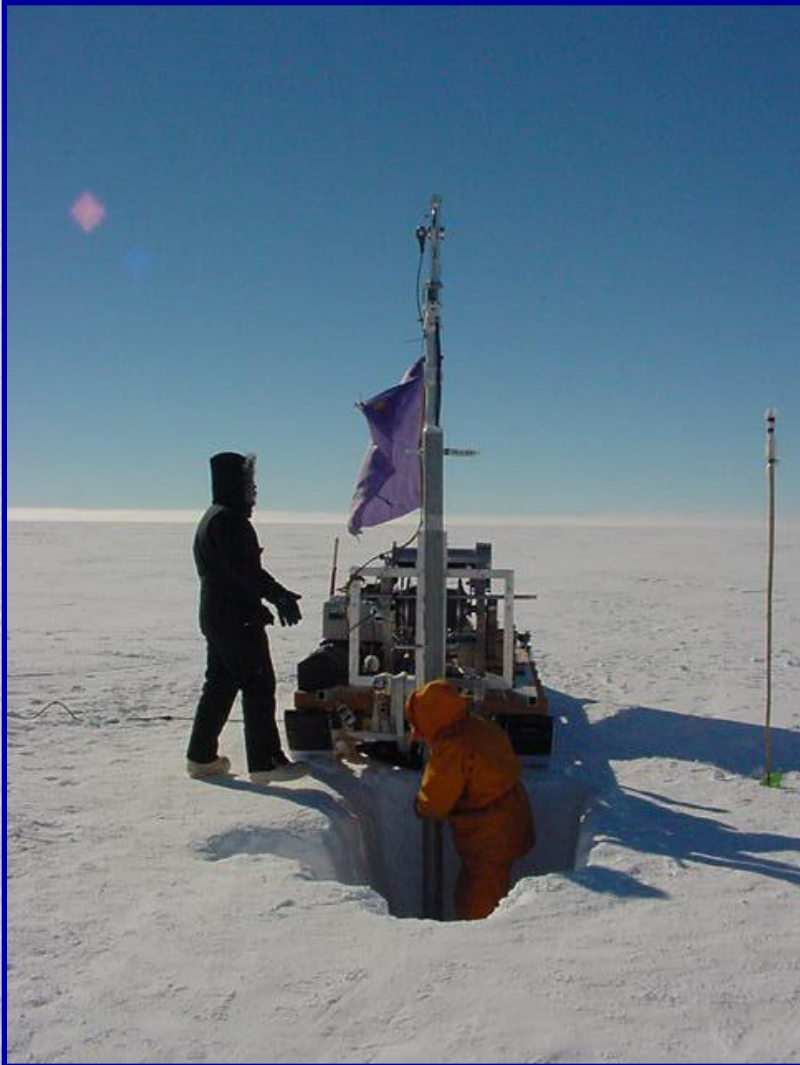


Base Vostok -89.2 °C el 21-07-83

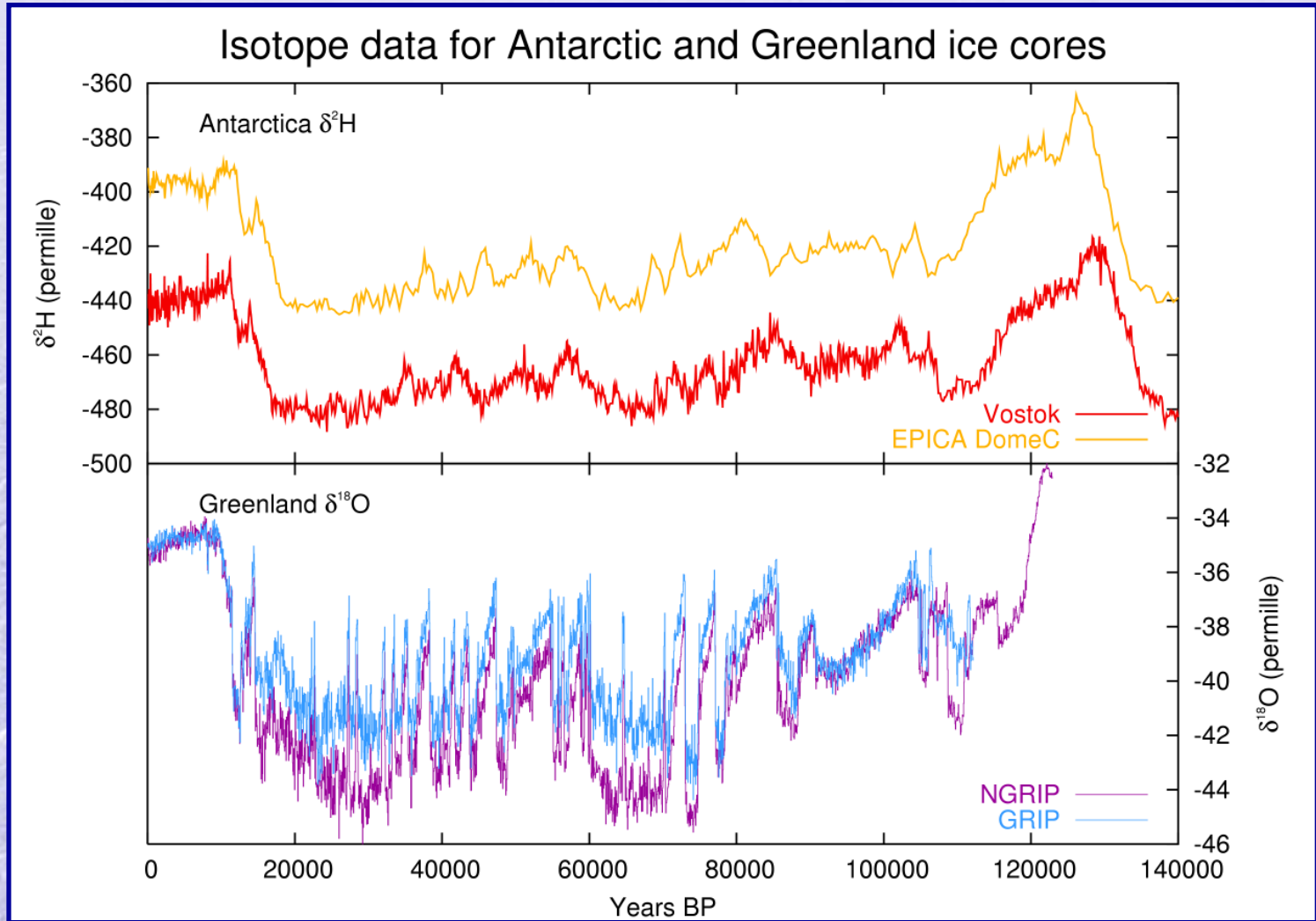
Fusión casquete Antártida aumentaría ~ 61 m nivel del mar

Emilio Marcos Palma, (Argentino) primer humano nacido en la Antártida, 7-1-1978

# Extracción de núcleos de hielo (ice cores)



# Paleoclimatología



Años antes del presente

# Ice cube

Telescopio o trampa de neutrinos enterrado a 2,5 kilómetros bajo el hielo del Polo Sur



Localizado en el mismo Polo Sur (base Amundsen-Scott)

Busca explosiones de estrellas, agujeros negros, estrellas de neutrones..

# Hielo Marino o Banquisa

Se forma lentamente a partir de agua salada y comienza a congelar a  $-1,8^{\circ}\text{C}$

Es un hielo estacional y móvil y dura entre varios meses y varios años

Puede llegar a cubrir un 15 % de la superficie oceánica y alcanzar varios metros de espesor (máximo 20, y uno de media)

Se forman primero pequeños cristales lenticulares de agua pura, que van luego reuniéndose. Agregado de hielo de agua con un relleno de salmuera en las grietas, lugar donde habitan algas y bacterias adaptadas específicamente a ese ambiente hipersalino



# Las dos Banquisas

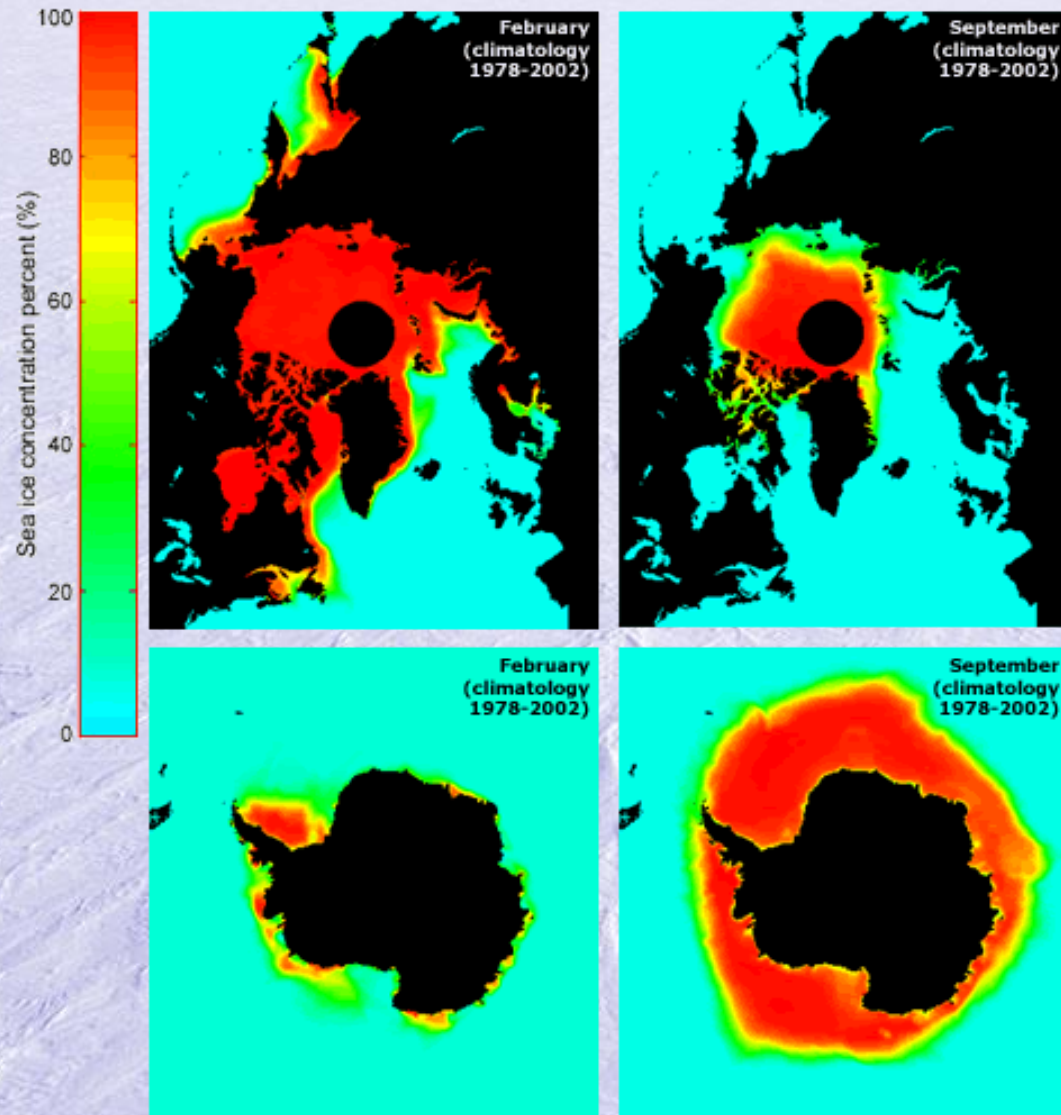
La **banquisa antártica** desaparece en su mayor parte durante el verano austral y se vuelve a formar en el invierno, alcanzando una extensión equivalente a la del continente. En septiembre alcanza los 18,8 millones de km<sup>2</sup>, mientras que en marzo es de sólo 2,6 millones de km<sup>2</sup>.

La **banquisa ártica** ha venido siendo permanente, fundiéndose cada año las partes más próximas a los continentes circundantes, época aprovechada para la circunnavegación del océano Ártico. En marzo alcanza los 15 millones de km<sup>2</sup> y en septiembre alcanza los 6,5 millones de km<sup>2</sup>



Hay razones para suponer que en un período de la historia del planeta, hace unos 700 millones de años, el clima fue tan frío como para que una gruesa banquisa permanente cubriera el conjunto de los océanos, salvo tal vez los ecuatoriales.

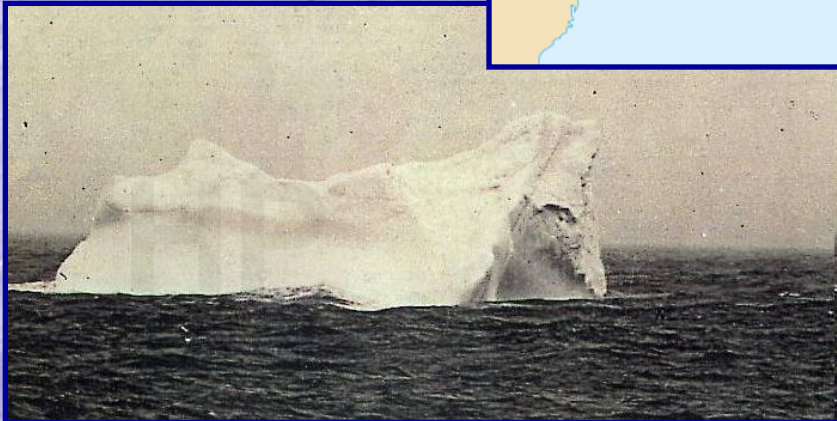
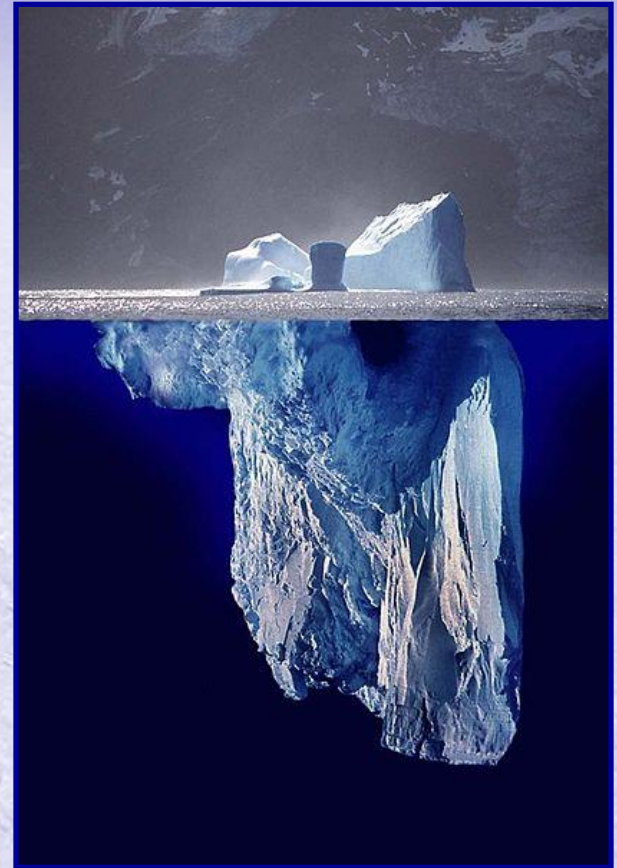
# Extensión de las Banquisas



# Iceberg

Un iceberg es un pedazo grande de hielo dulce flotante desprendido de un glaciar formado por nieve o de una plataforma de hielo

De un iceberg sobresale del agua sólo una octava parte su volumen total. Estas masas gélidas constituyen un peligro para la navegación, ya que pueden alcanzar dimensiones enormes. (Iceberg B-15 de la Antártida, del tamaño de la isla de Jamaica, se fragmentó en el 2000)



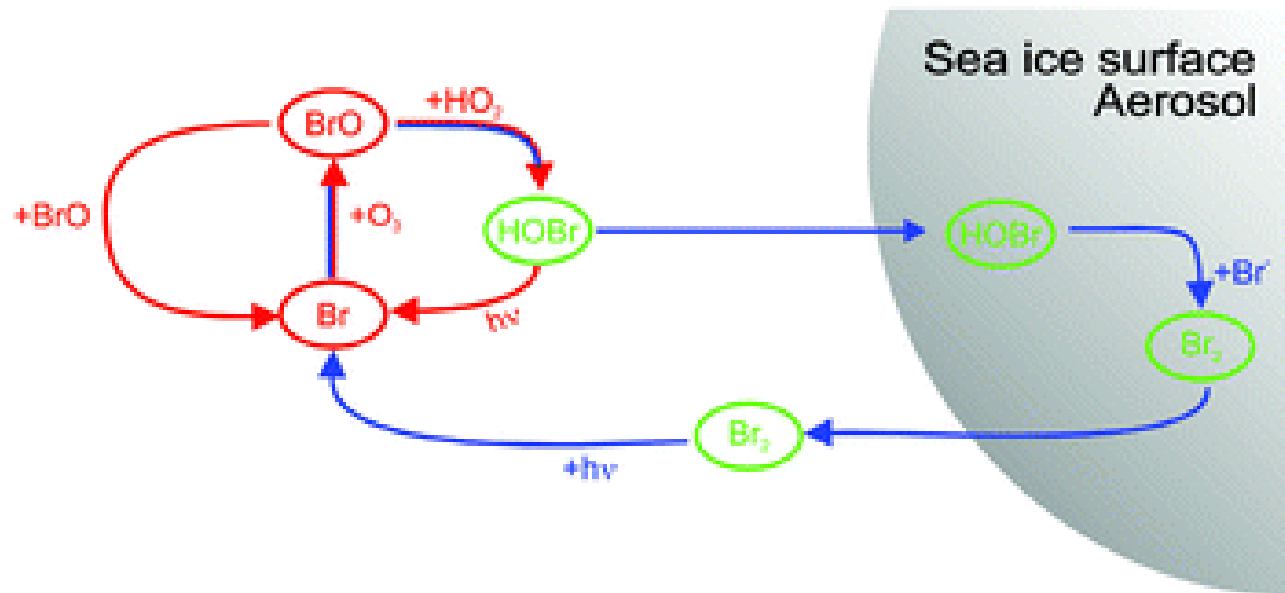
B15-D

# Flores de escarcha (“frost flowers”) sobre hielo marino



# Reacciones químicas sobre las flores

## The Bromine explosion



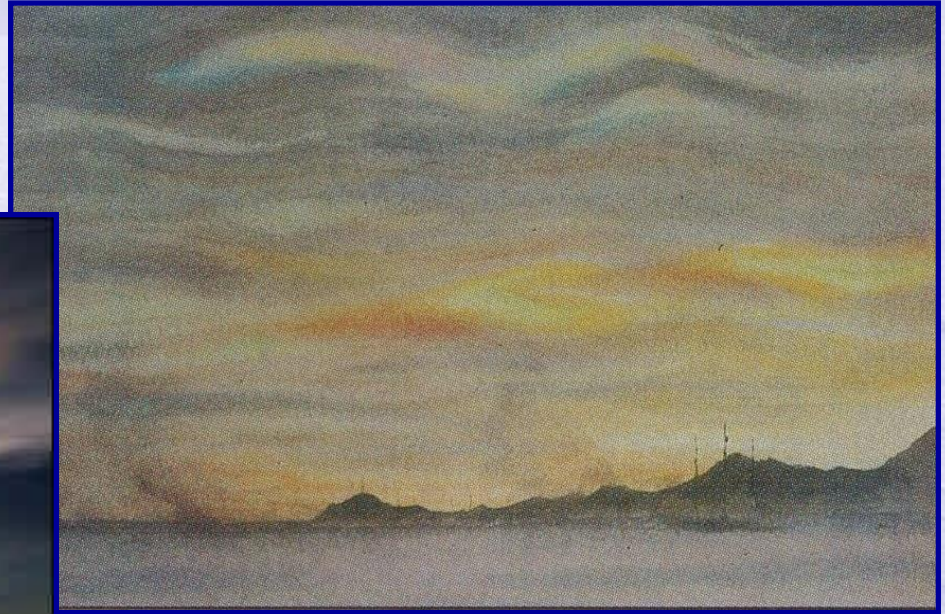
Heterogeneous release of bromine  
on sea salt surfaces



Catalytical ozone destruction



# Nubes estratosféricas polares



Dibujo de E. Wilson 17 agosto, 1903

¿19-02-08 En España?

En la estratósfera a 15-25 km de altura y  $-80^{\circ}\text{C}$

Las partículas de estas nubes contienen hielo de agua y de mezclas de agua con ácido nítrico y ácido sulfúrico

# La expedición de Scott

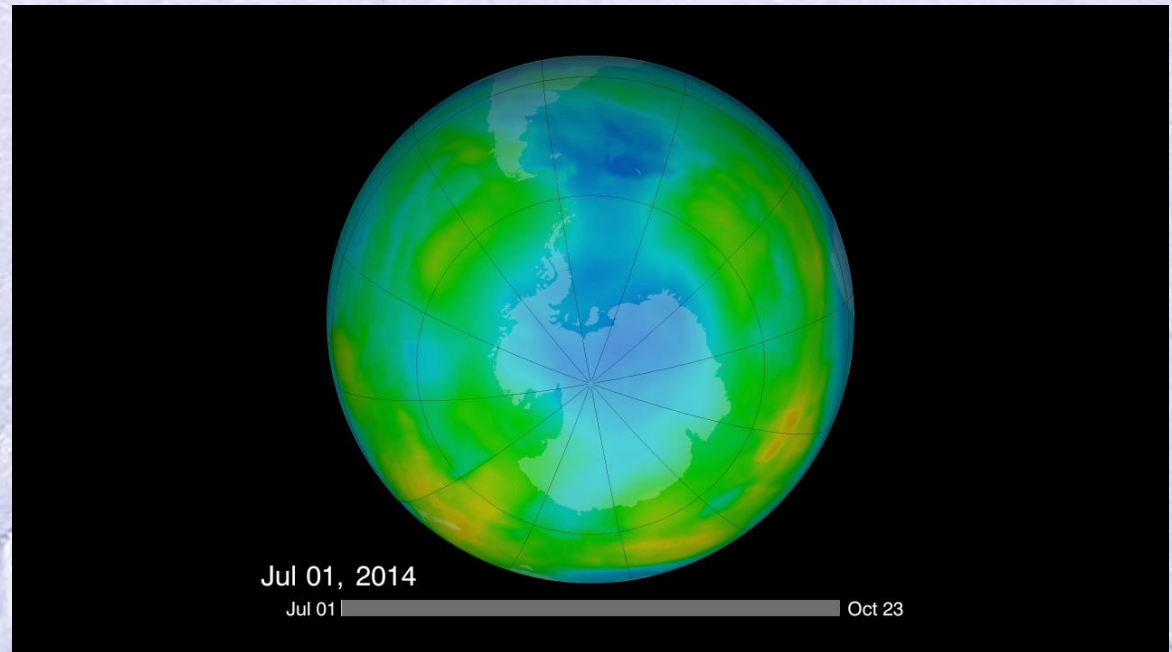


Wilson, Scott, Bowers (de pie), Evans y Oates (sentados)  
en el Polo Sur, enero 1912

(25/08/2009): Última expedición noruega para buscar a Roald Amundsen 81 años después.

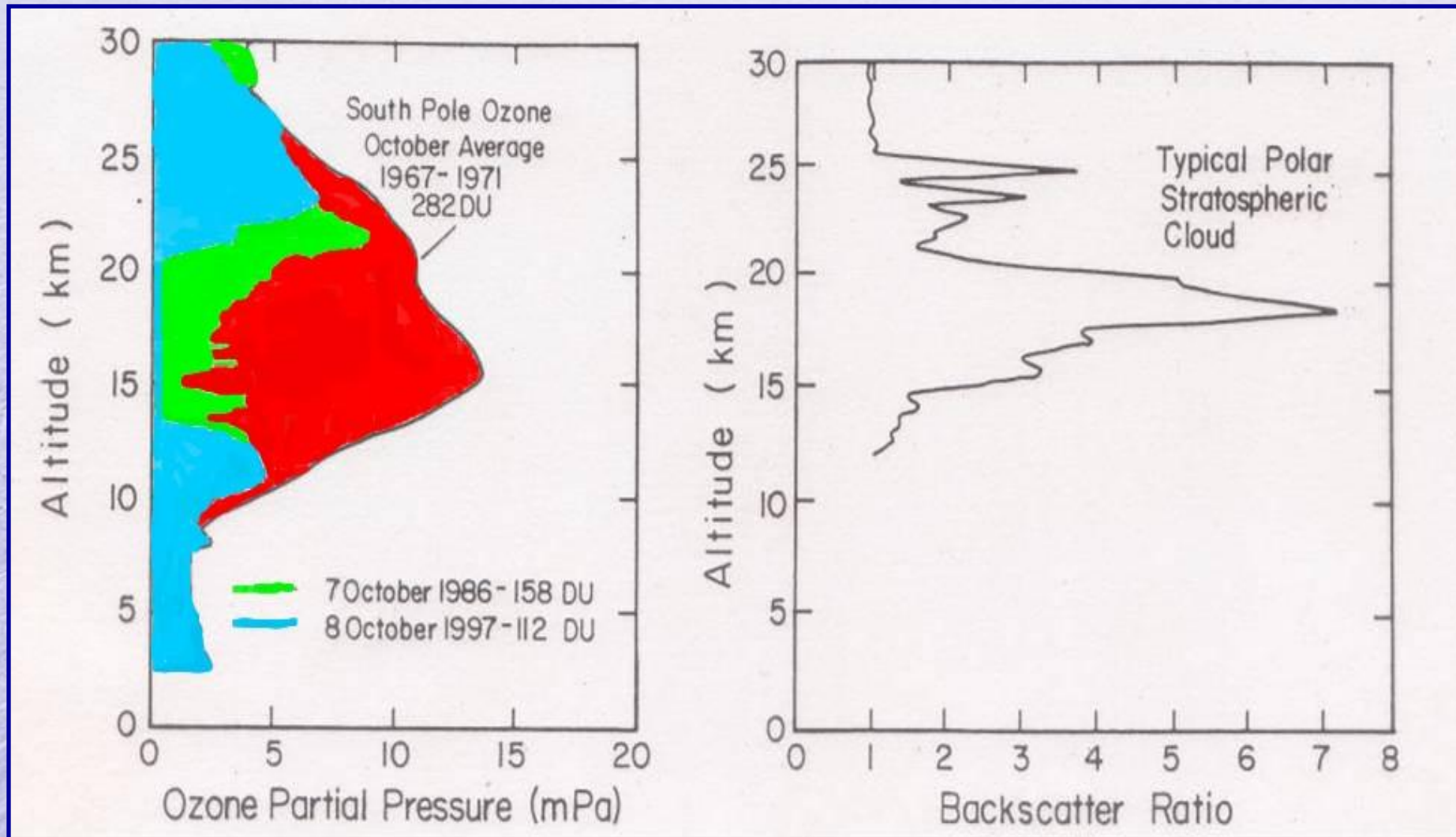
# El agujero de Ozono

Descubierto en los 80 por Farman, Gardiner y Shanklin del "British Antarctic Survey"

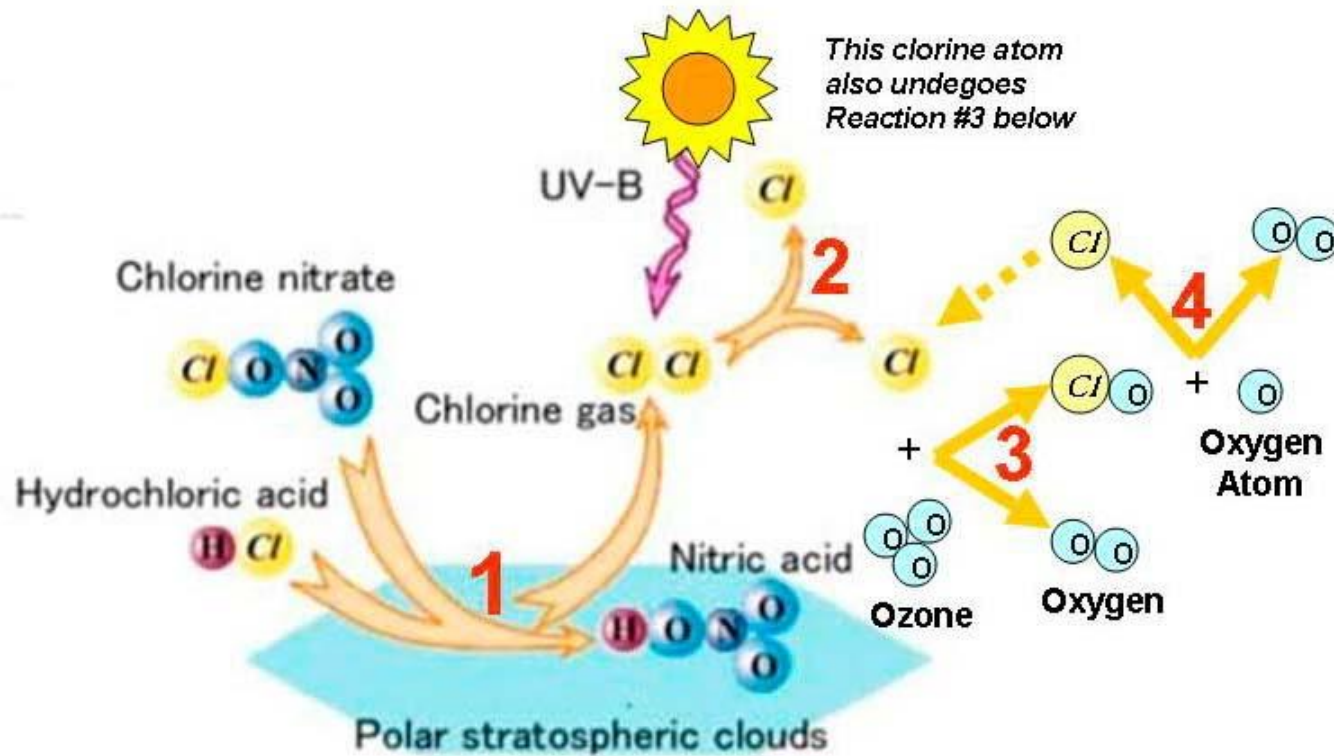


1 Julio-23 Octubre, 2014

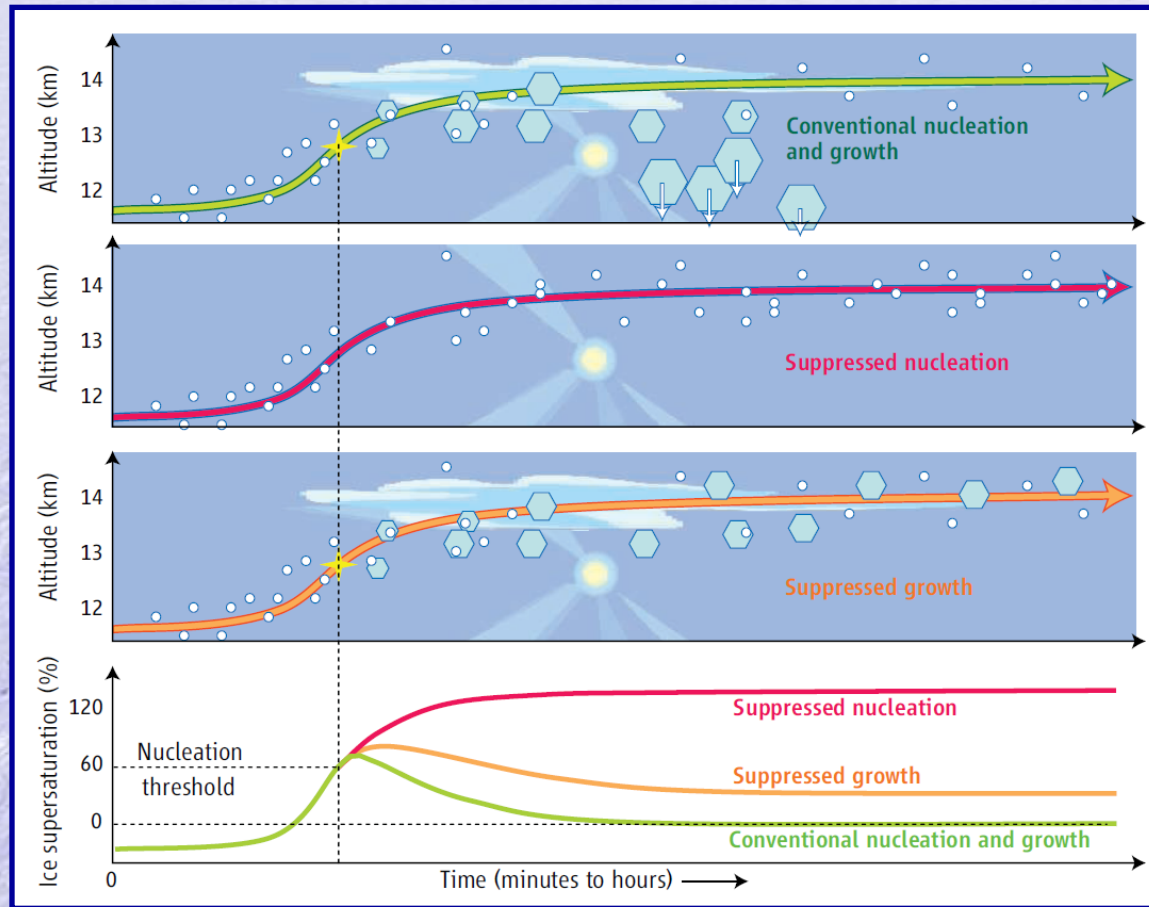
# Agujero de Ozono y PSC



# Reacciones químicas en las PSC



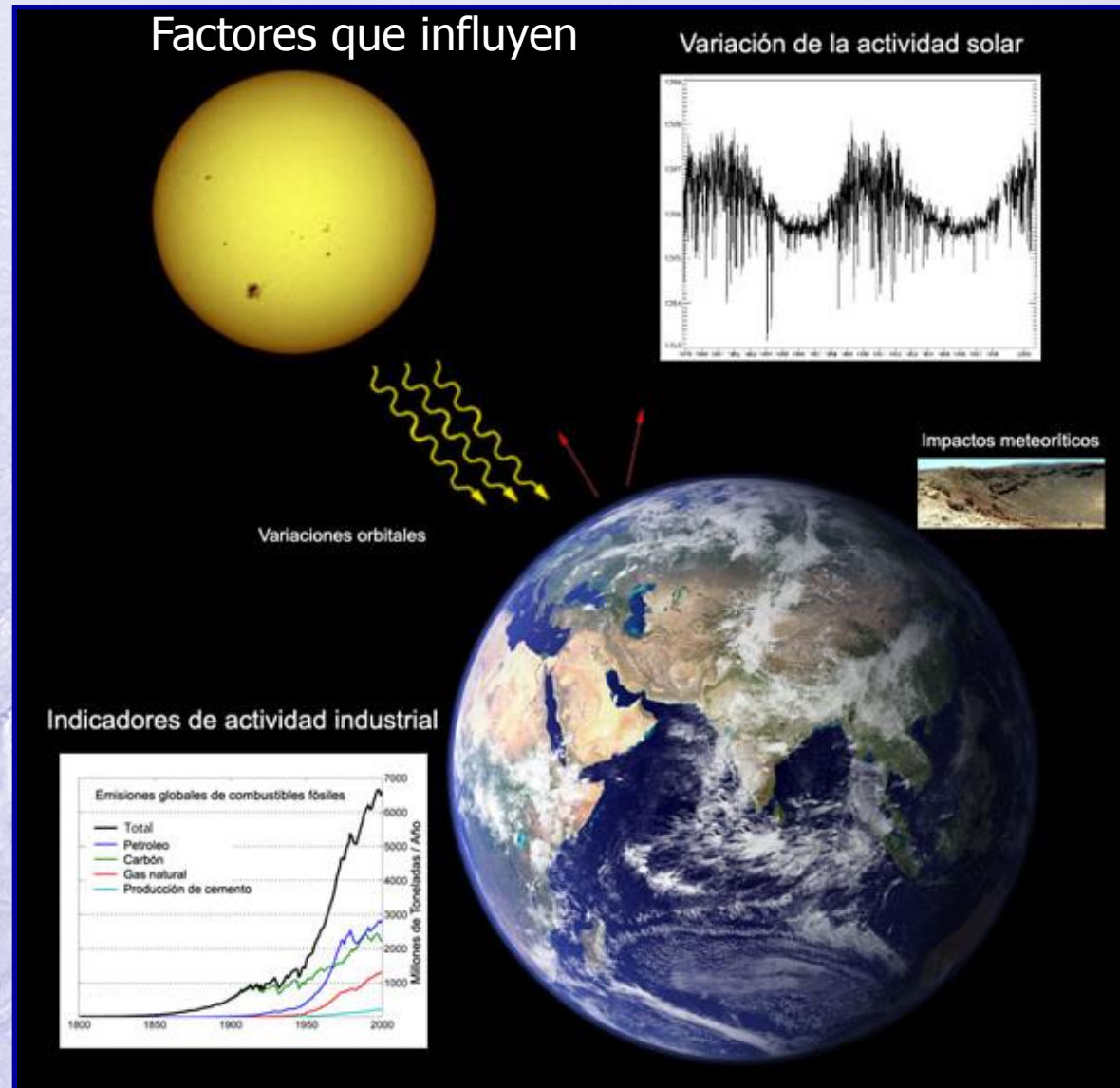
# ¿Existe hielo de agua cúbico ( $I_c$ ) en la Tierra?



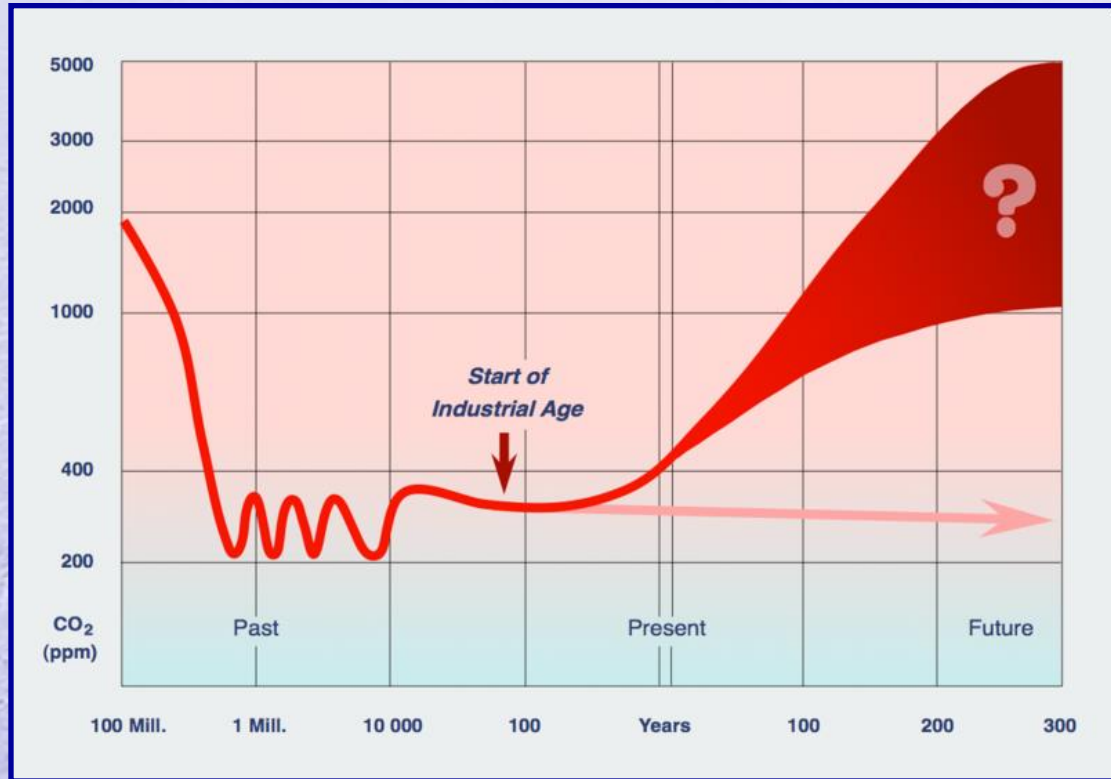
¿Formación  $I_c$  (10% más de presión de vapor)?  
2012-2013 Delta ice ó "Complex Habit"

# Cambio climático

Se llama cambio climático a la modificación del clima con respecto al historial climático a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos en los parámetros climáticos: temperatura, precipitaciones, nubosidad, etcétera. Son debidos a causas naturales y, en los últimos siglos se sospecha que también a la acción de la humanidad.



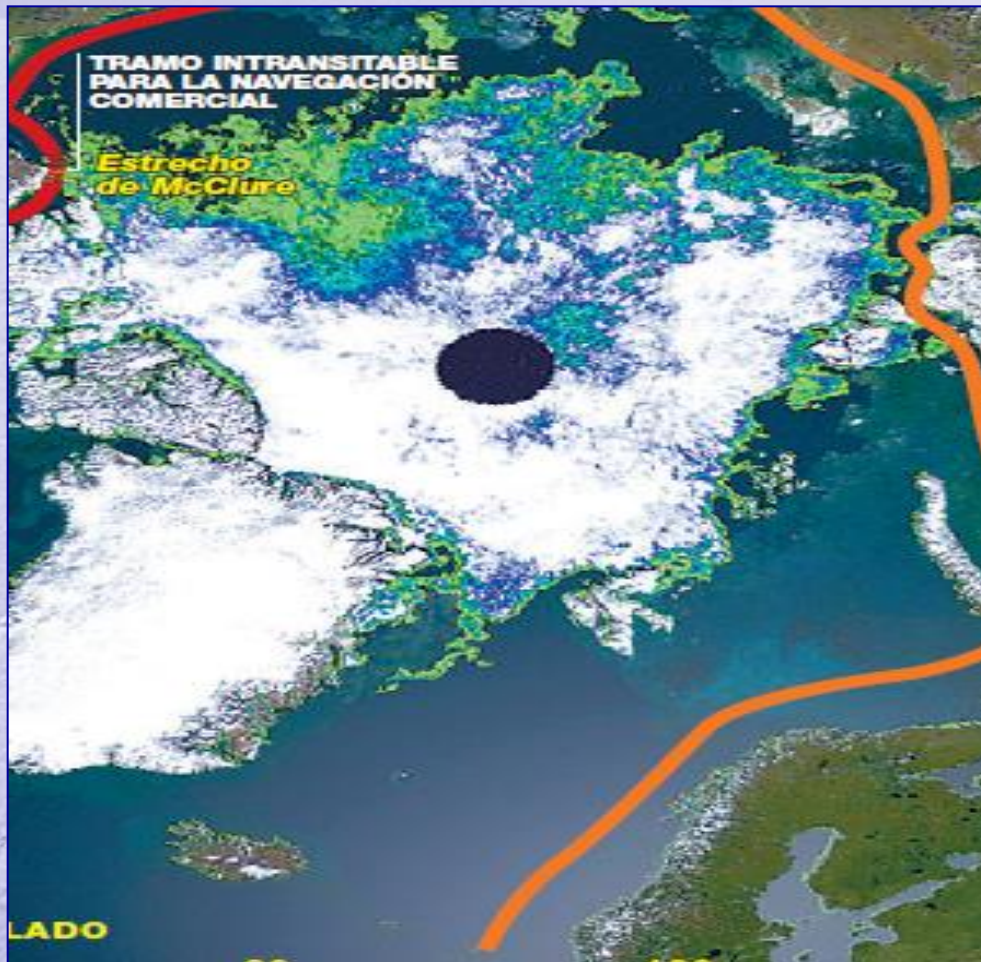
# Calentamiento global y efecto invernadero



Glaciación global (Tierra bola de nieve) – Proterozoico – 800 a 550 m.a

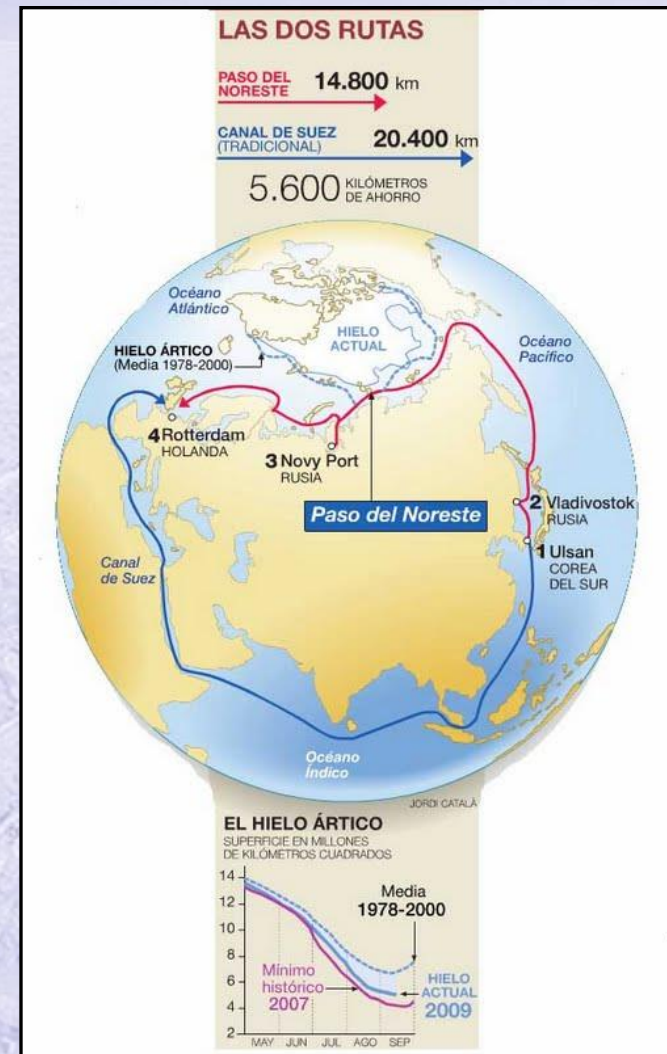
Extinción masiva del Pérmico-Triásico (La Gran Mortandad) 251 m.a.

# Deshielo del Ártico



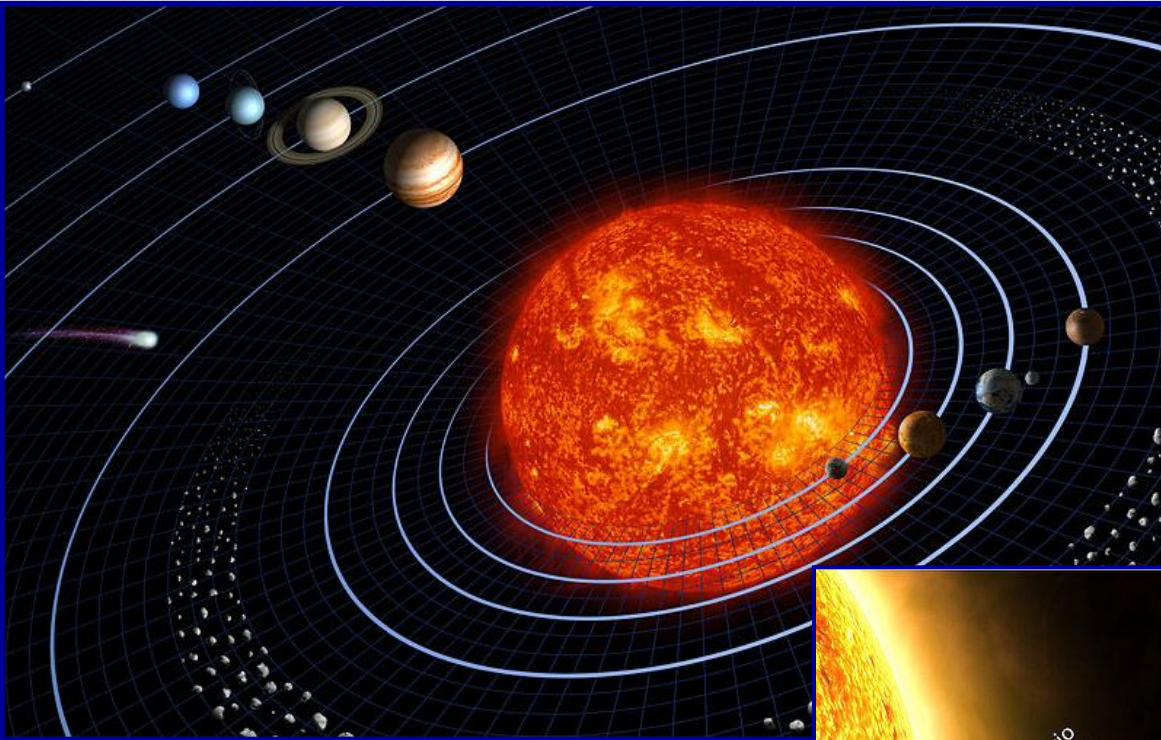
2003

Mínimo histórico el 16-9-2012  
Predicciones de deshielo total para 2030



Negocio: nuevas rutas de Navegación  
30/7/2012 Rusia aprueba la navegación por el ártico

# El Sistema Solar

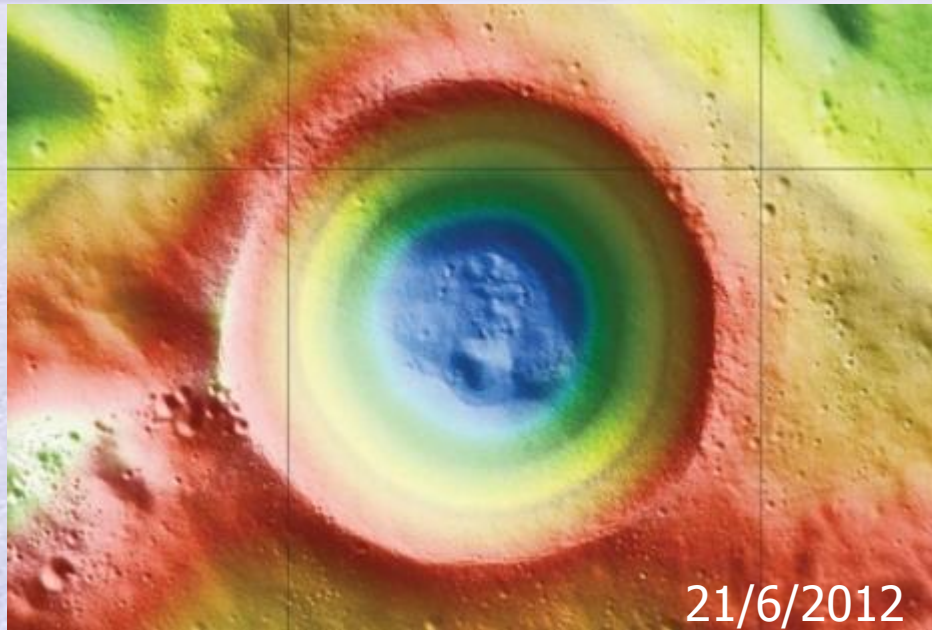


## Definición Científica

**Hielo:** se dice de una fase sólida, normalmente cristalina, de una sustancia que se presenta en estado líquido o gas a temperatura ambiente.

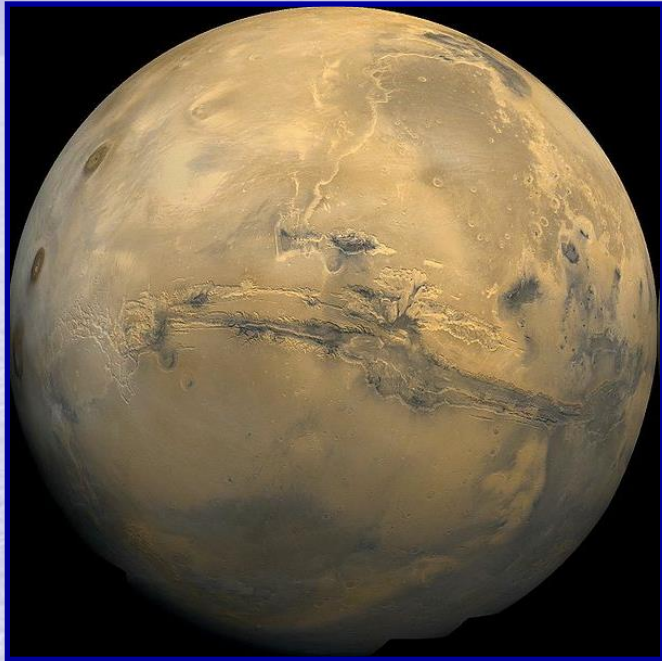


# H<sub>2</sub>O en la Luna



- (24/09/2009) Chandrayaan-1: Posible existencia de hidroxilo (OH), agua (H<sub>2</sub>O)
- (13/11/2009) Datos del "LCROSS Impact" descubre agua en la luna (12 cubos)
- (18/03/2010) Mini-SAR 40 cráteres con 2 m de agua en forma de hielo
- (26/05/2011) Agua en el interior de la Luna (magma) como en la Tierra  
Alberto Saal (U. Brown) Trozos de Lava de misiones Apollo
- (14/10/2012) Science: Agua traída por Neils Armstrong y producida por el Sol
- (28/08/2013) NASA: Agua en la superficie de la luna *Los rusos ya lo sabía (1976)*

# Marte: El planeta rojo



$T^a = -46\text{ }^{\circ}\text{C}$

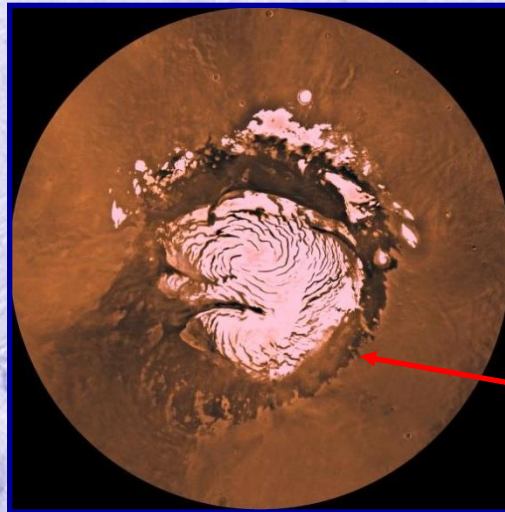
H<sub>2</sub>O líquida en el pasado, o quizás ahora...

(28/09/2012) Curiosity: Rocas talladas por corriente de Agua

(26/09/2013) Curiosity: 2% agua en la superficie



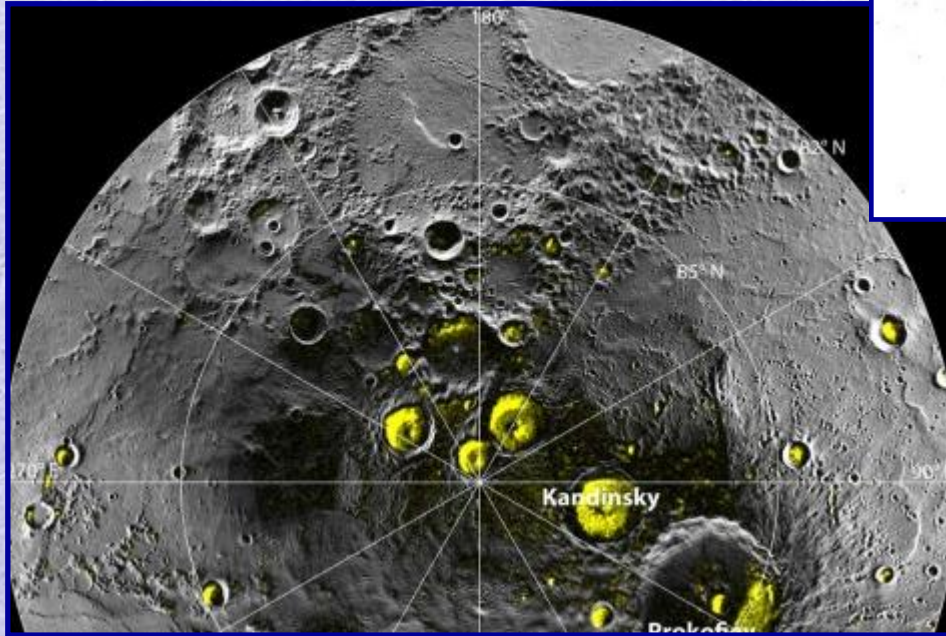
Curiosity: Marte a color



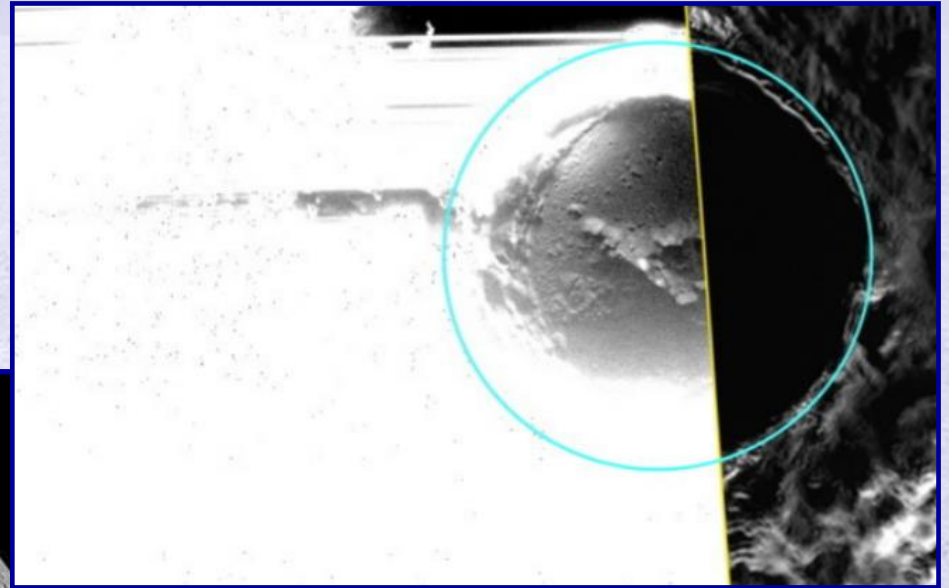
Hielo de CO<sub>2</sub> y también H<sub>2</sub>O



# Mercurio: Hielo a 400 °



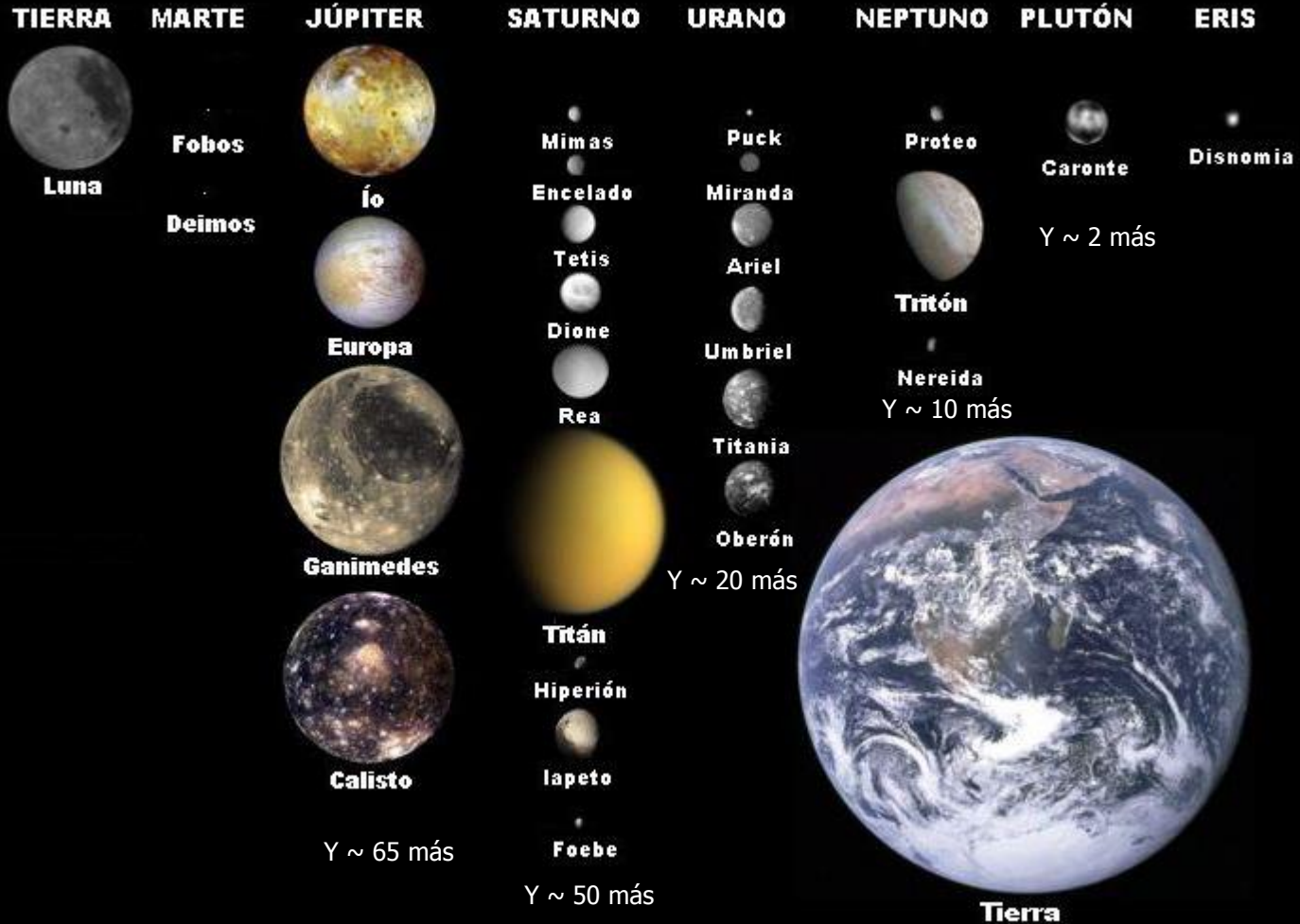
(2012) Messenger (NASA): Material Orgánico y Hielo en cráteres y polos



(Oct-2014) Messenger (NASA): Primeras imágenes del hielo de agua

# Lunas del Sistema Solar

## PRINCIPALES LUNAS DE LOS PLANETAS DEL SISTEMA SOLAR

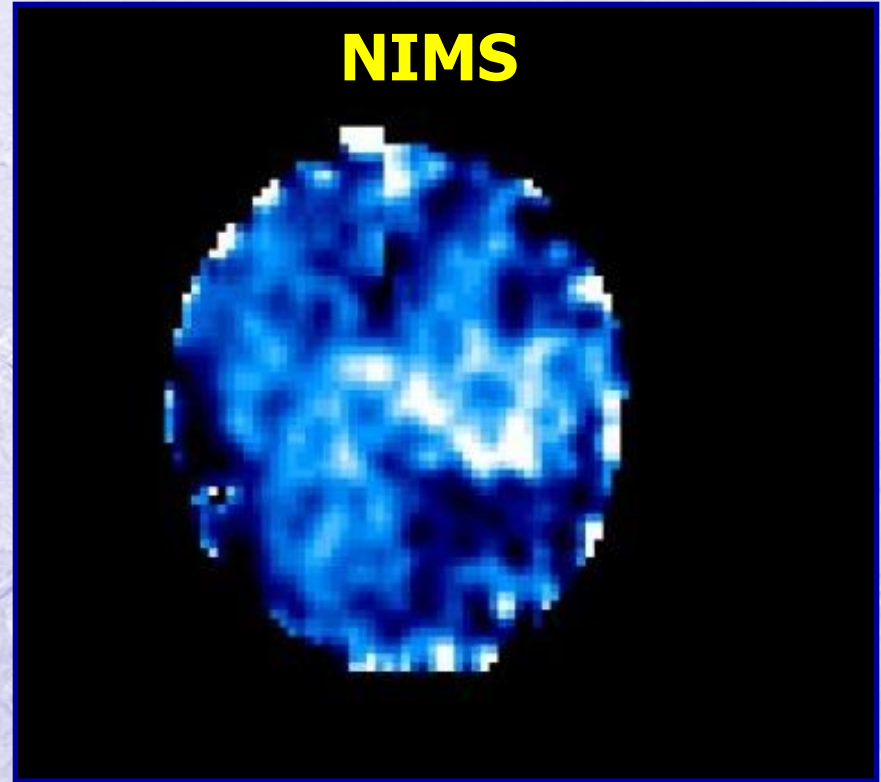


# Ío: hielo de $\text{SO}_2$



$T_a = -143\text{ }^\circ\text{C}$

Hielo de  $\text{SO}_2$ : Lava helada



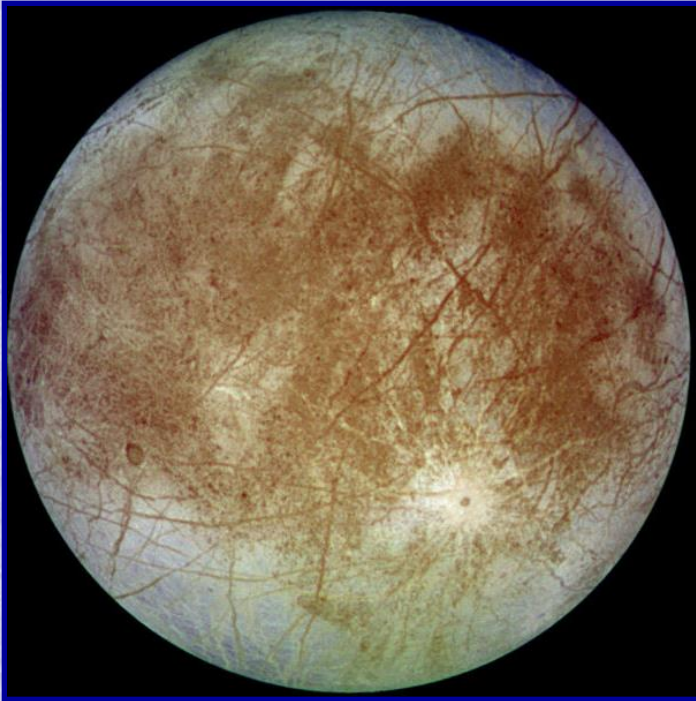
Blanco: más  $\text{SO}_2$ ;

Azul: menos  $\text{SO}_2$

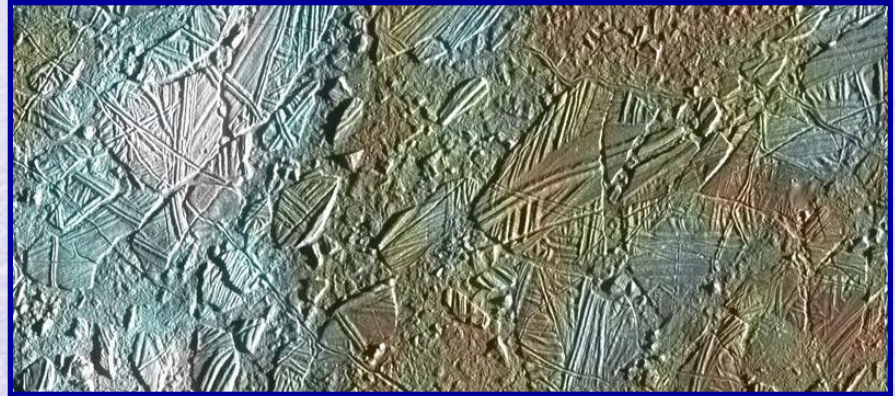
# Europa: hielo de H<sub>2</sub>O

Marrón: Material rocoso.

Azul: hielo de agua



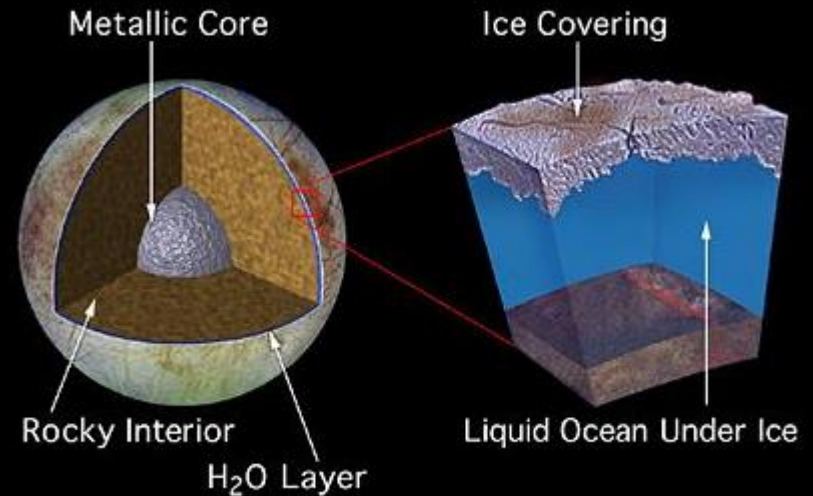
$T^a = -160\text{ }^{\circ}\text{C}$



¿Vida?



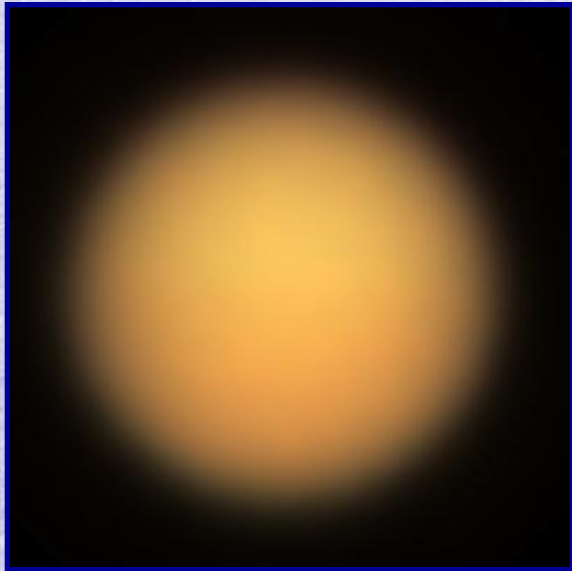
Confirmado por sonda espacial Galileo (1989)



# Titán: lluvia en la luna de saturno

Atmósfera densa. Satélite  
envuelto en niebla de derivados del metano

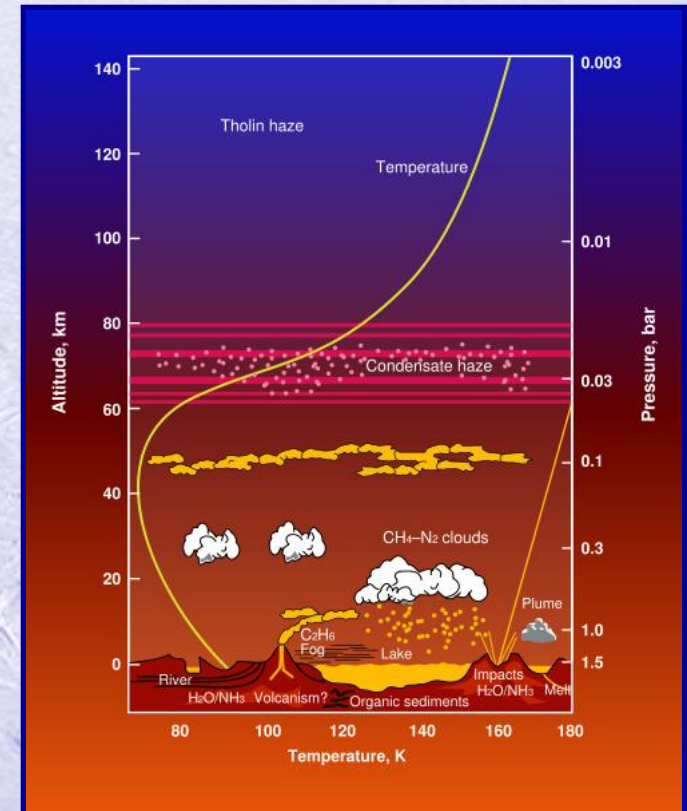
Sonda Huygens, ESA, 2005



$T^a = -180\text{ }^{\circ}\text{C}$

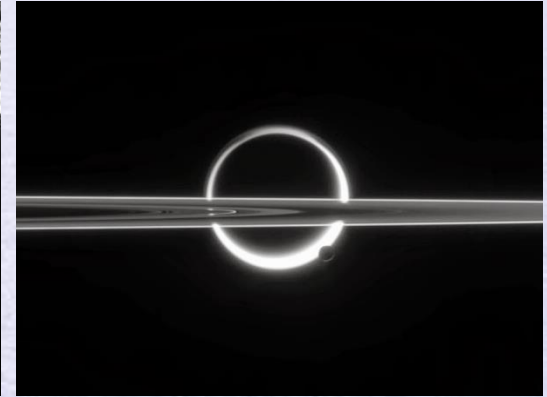
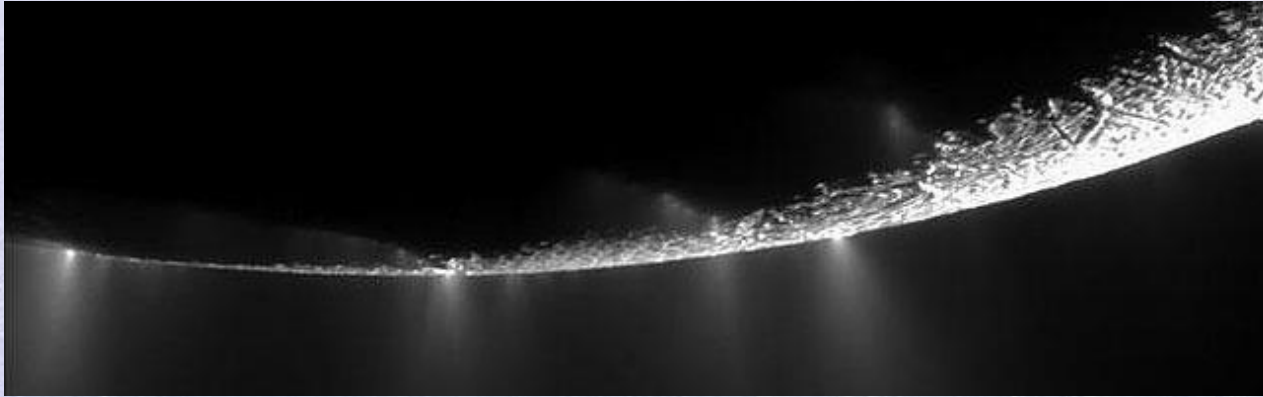


Bloques de hielo  
¿  $\text{H}_2\text{O}$  ó  $\text{CH}_4$  ?



Misión Cassini: Hielo y roca mezclado en su interior

# Encélado: océanos salados

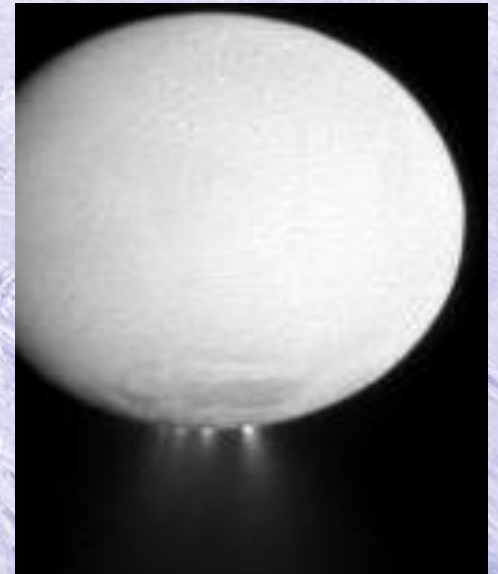


## Alta actividad geológica

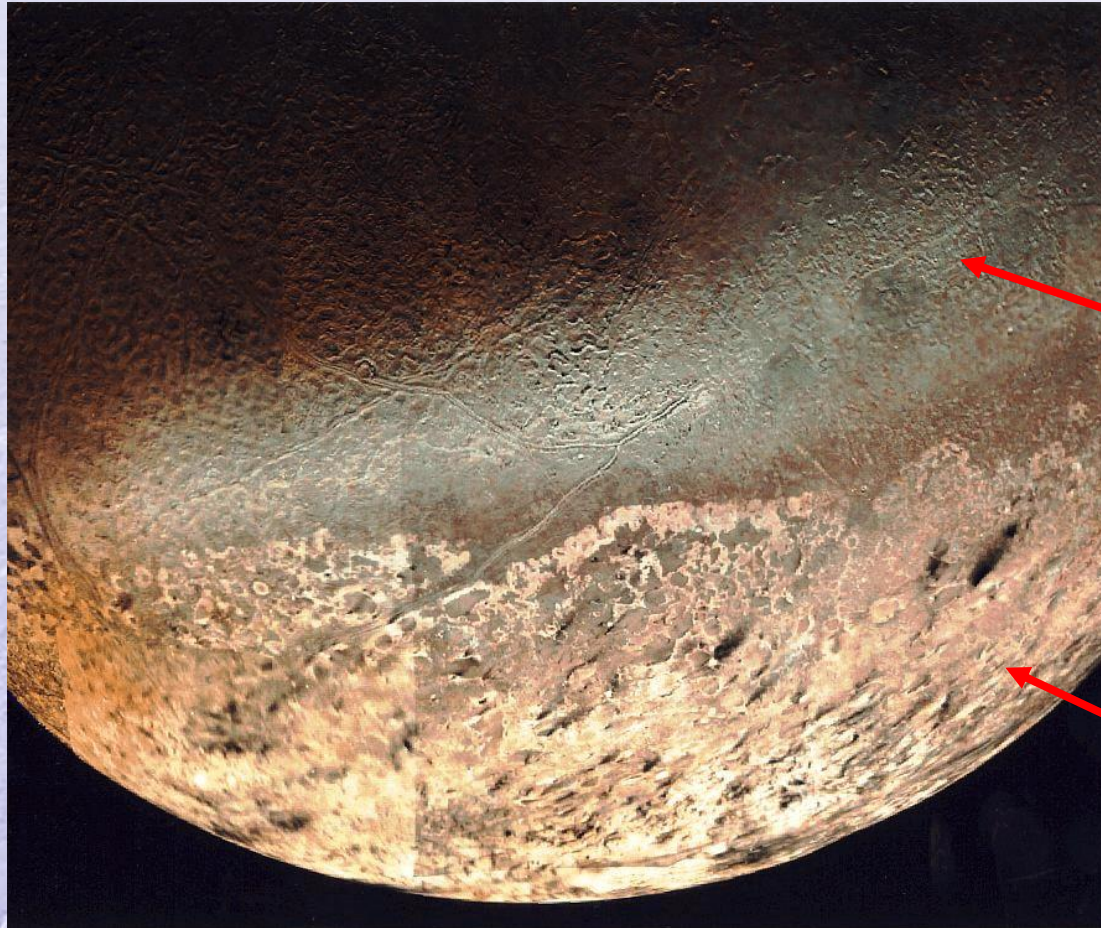
Misión Cassini: (23/06/2011)

Géiseres de chorros de agua, hielo y otros gases de un gran océano de agua salada en su interior

Nature (agosto, 2013): Los chorros los regula Saturno



# Tritón: La luna de Neptuno



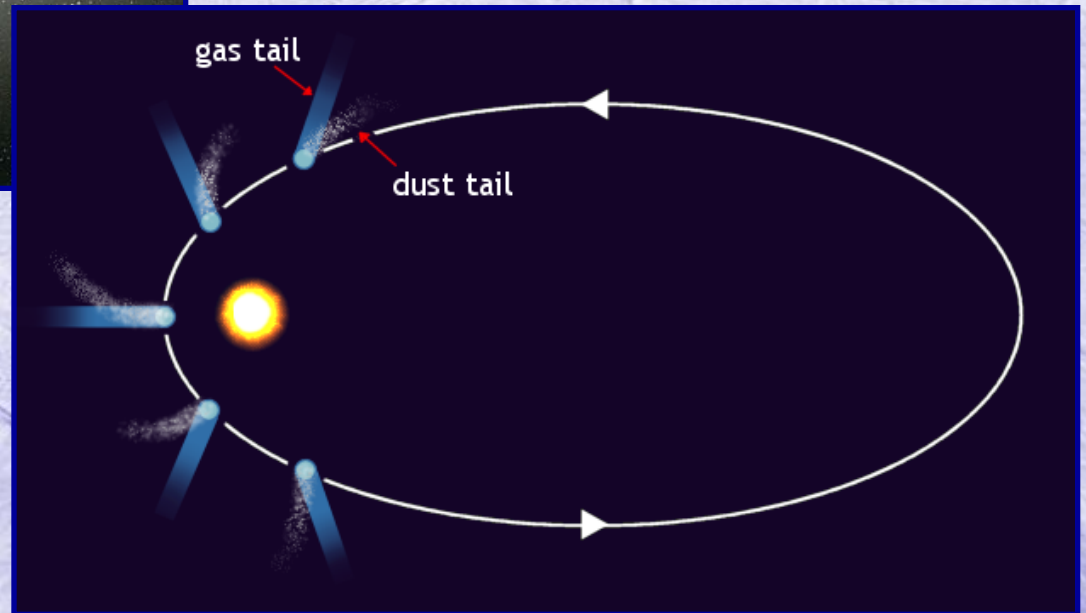
Hielo de  $N_2$  (?)

Hielo de  $CH_4$

$T^a = -230\text{ °C}$

Géiseres de Nitrógeno líquido

# Los cometas



# Misión Giotto (ESA)



Giotto (1301). Escena Navieña, Capella degli Scrovegni, Padua

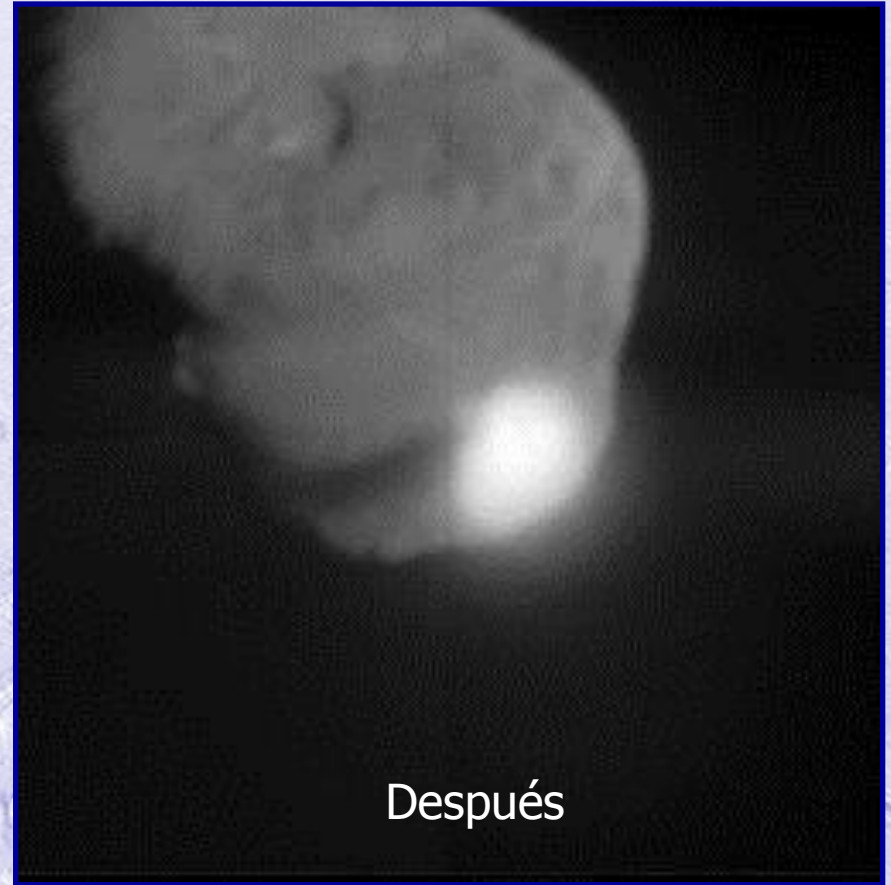


Núcleo del cometa Halley, 1986

# Misión Deep impact (NASA)



El impacto

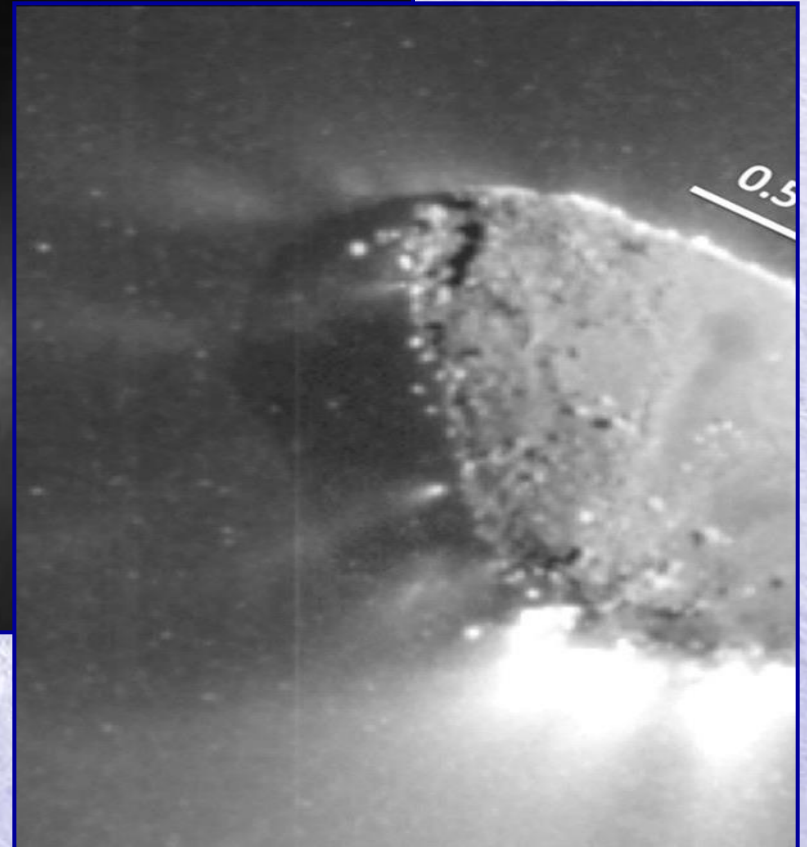
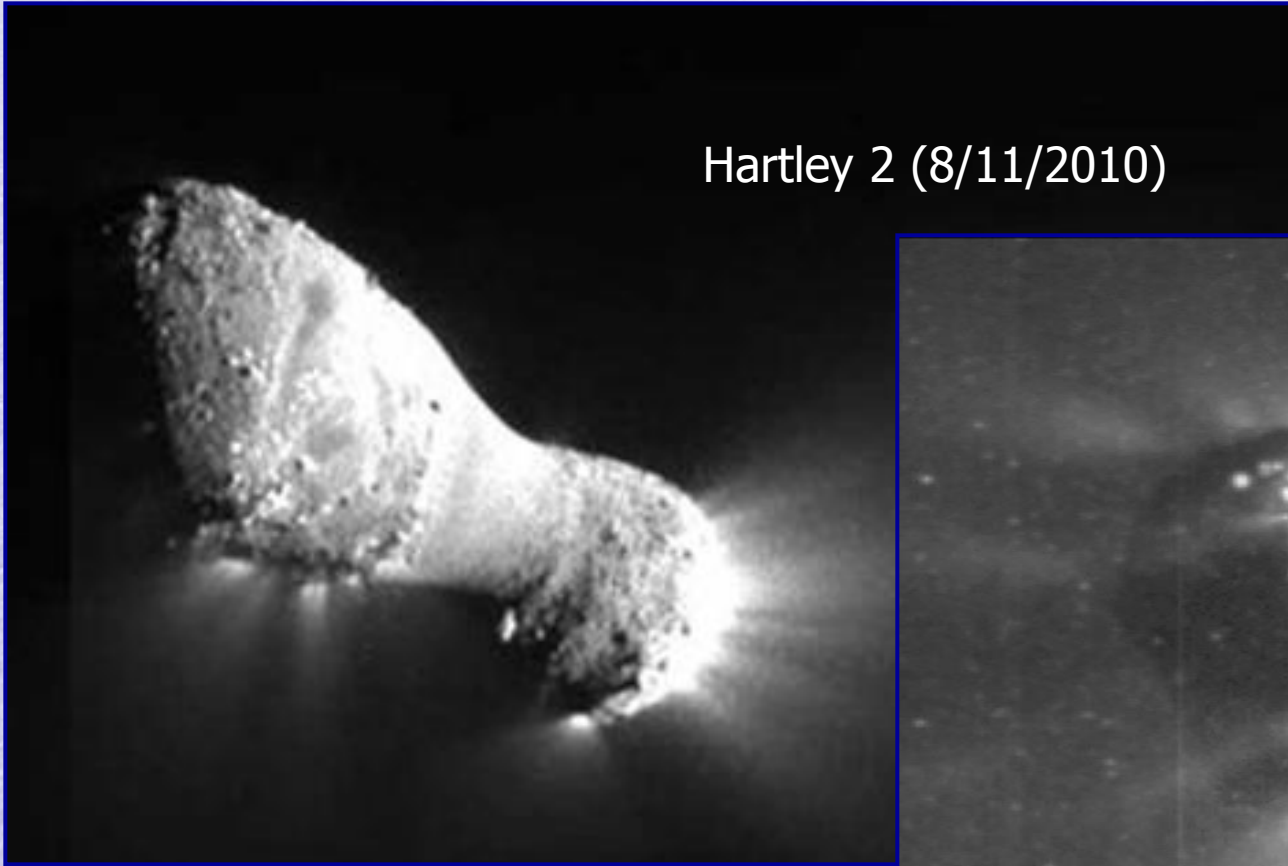


Después

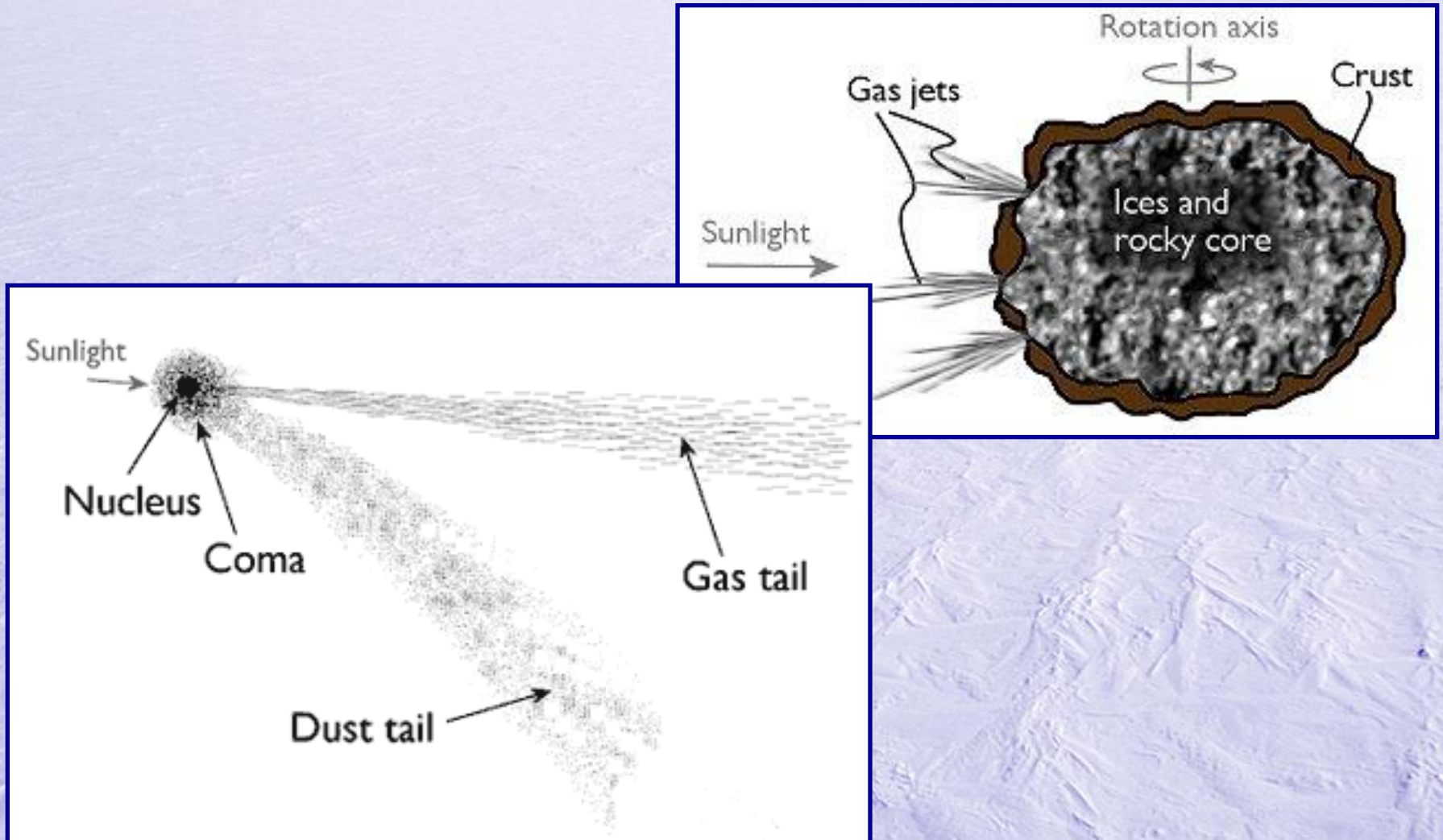
Núcleo del cometa Temple1 , 2006

# Misión Deep impact (NASA)

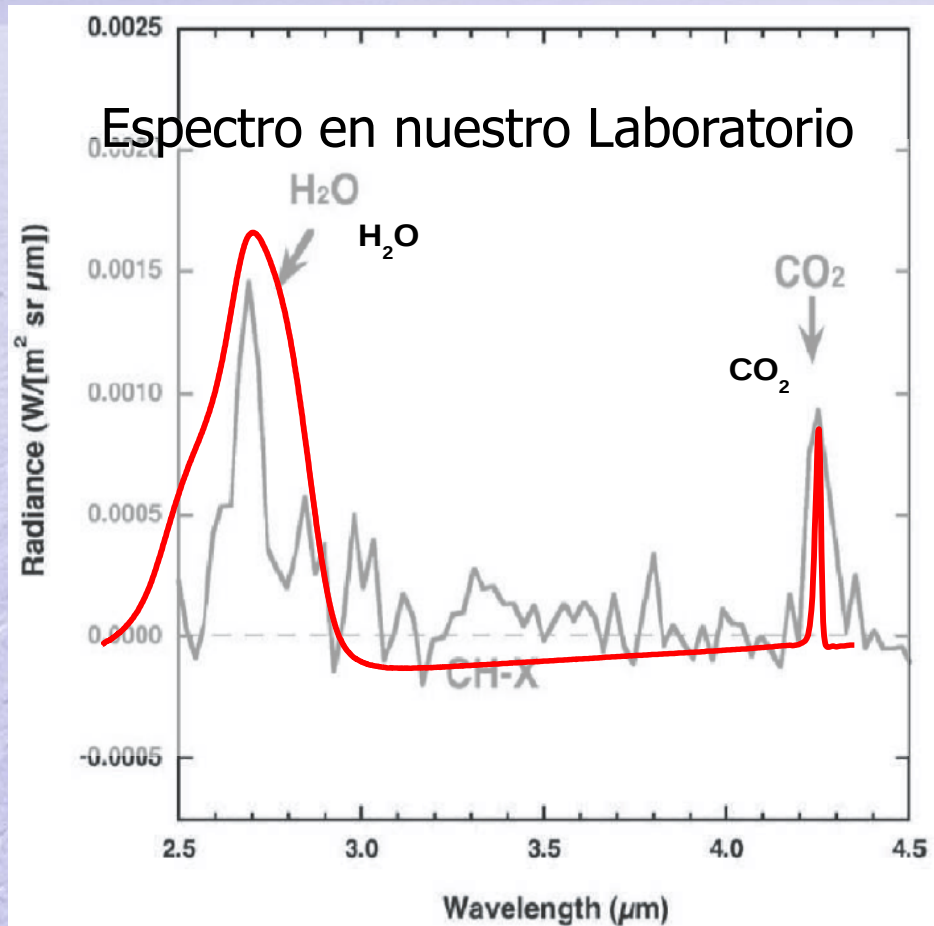
Hartley 2 (8/11/2010)



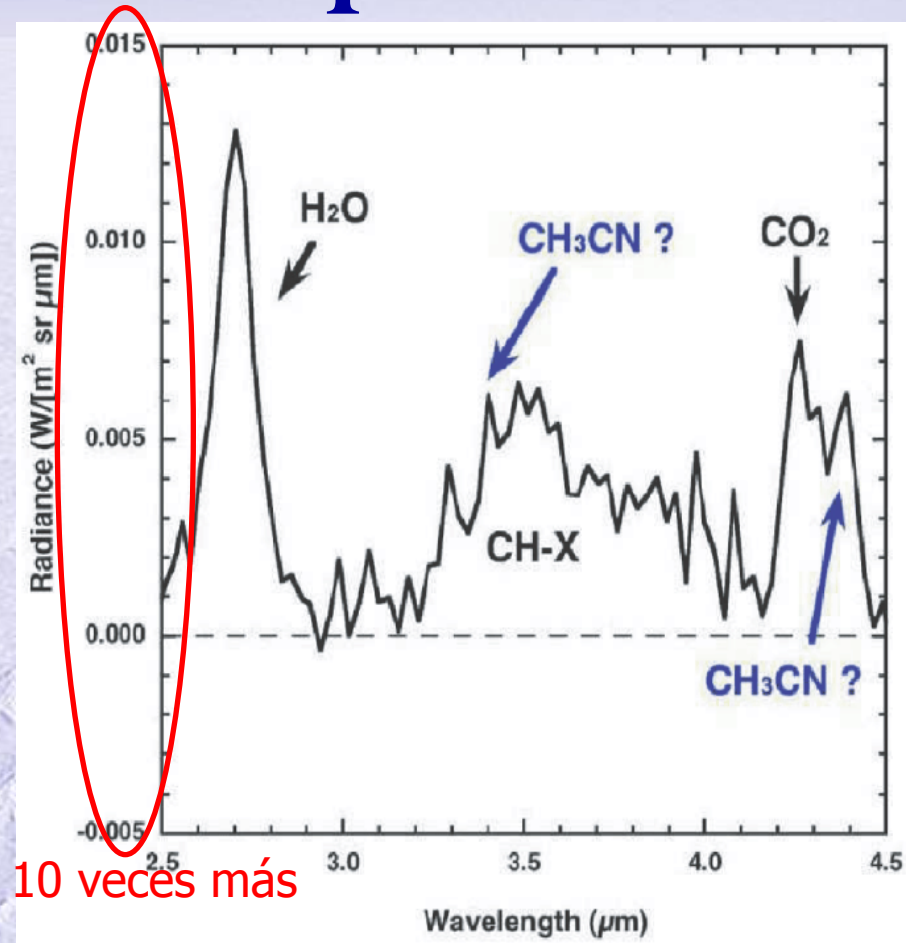
# Estructura de un cometa



# Evidencias de su composición



Antes del impacto



Después del impacto

**Misión Deep impact (NASA)**

A'Hearn et al, Science 310, 258 (2005)

# Misión Rosetta (ESA)

Lanzada el 2 de marzo de 2004. Aterrizará sobre el cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko en Noviembre de 2014. *Philae*, su módulo, con un peso de 100 kg, será soltado hoy a una altura de 1 km.



Se anclará a la superficie.

Activo en el perihelio.

Múltiples instrumentos.

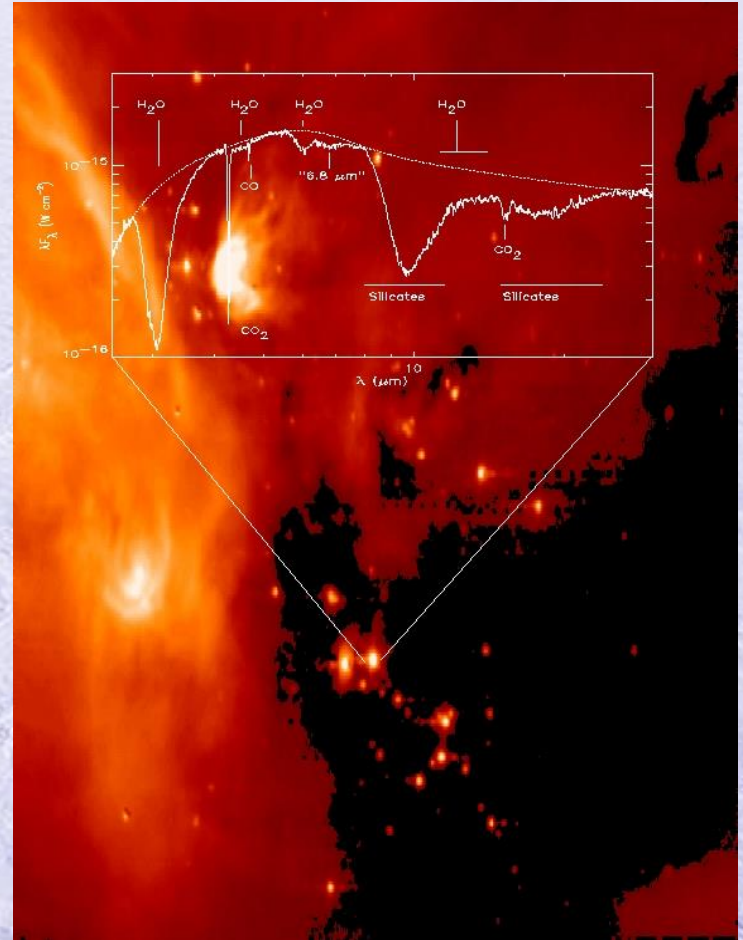
Hoy aterriza Philae

<http://new.livestream.com/esa/cometlanding>

# Espacio Interestelar

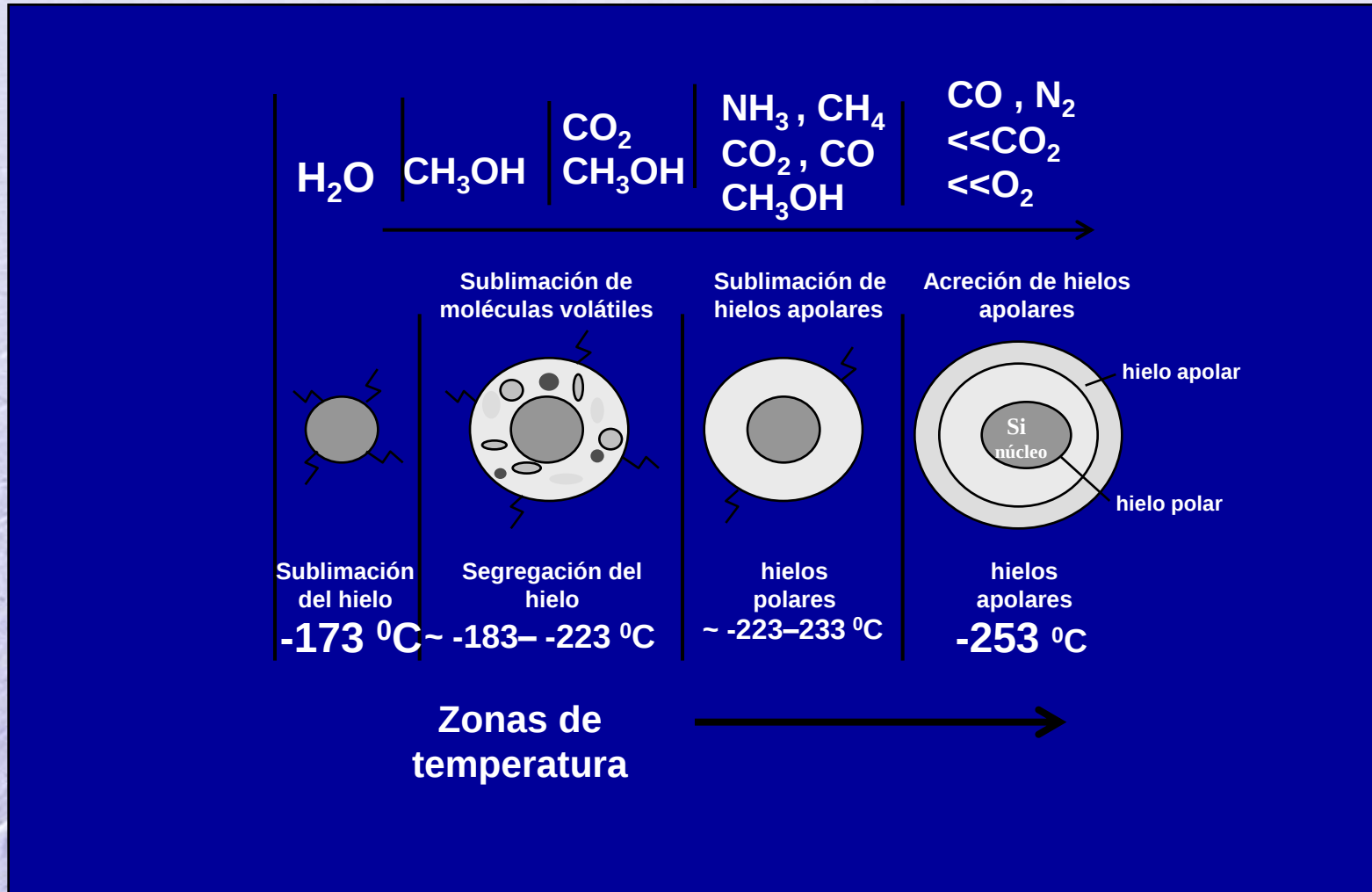


Nebulosa "cabeza de caballo"  
en la constelación de Orión  
(1500 años luz)



Protoestrella Elías 29 en  
 $\rho$  Ophiuci (500 años luz)

# Hielos en el Medio Interestelar

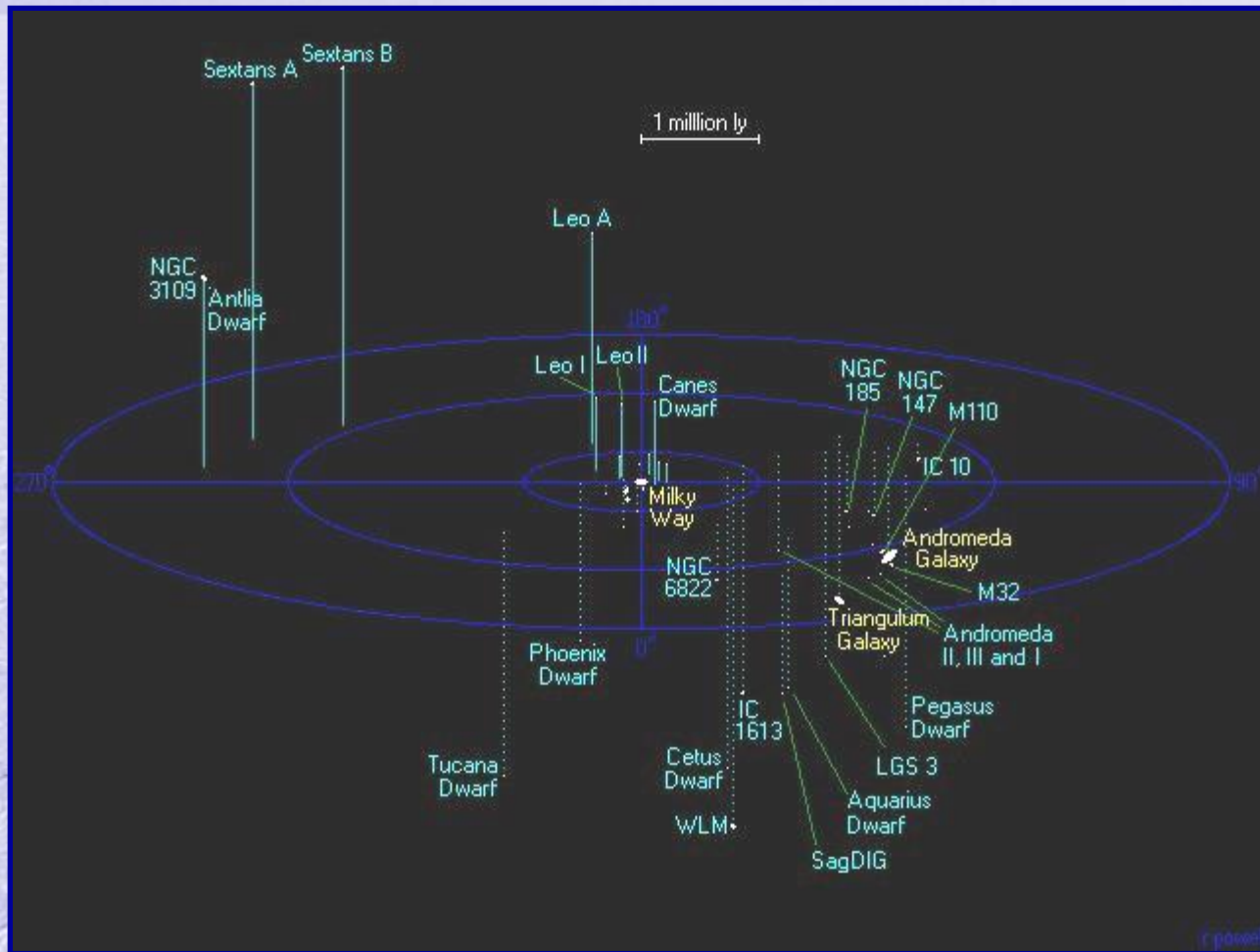


# Viviendo en el Brazo de Orión de la vía láctea



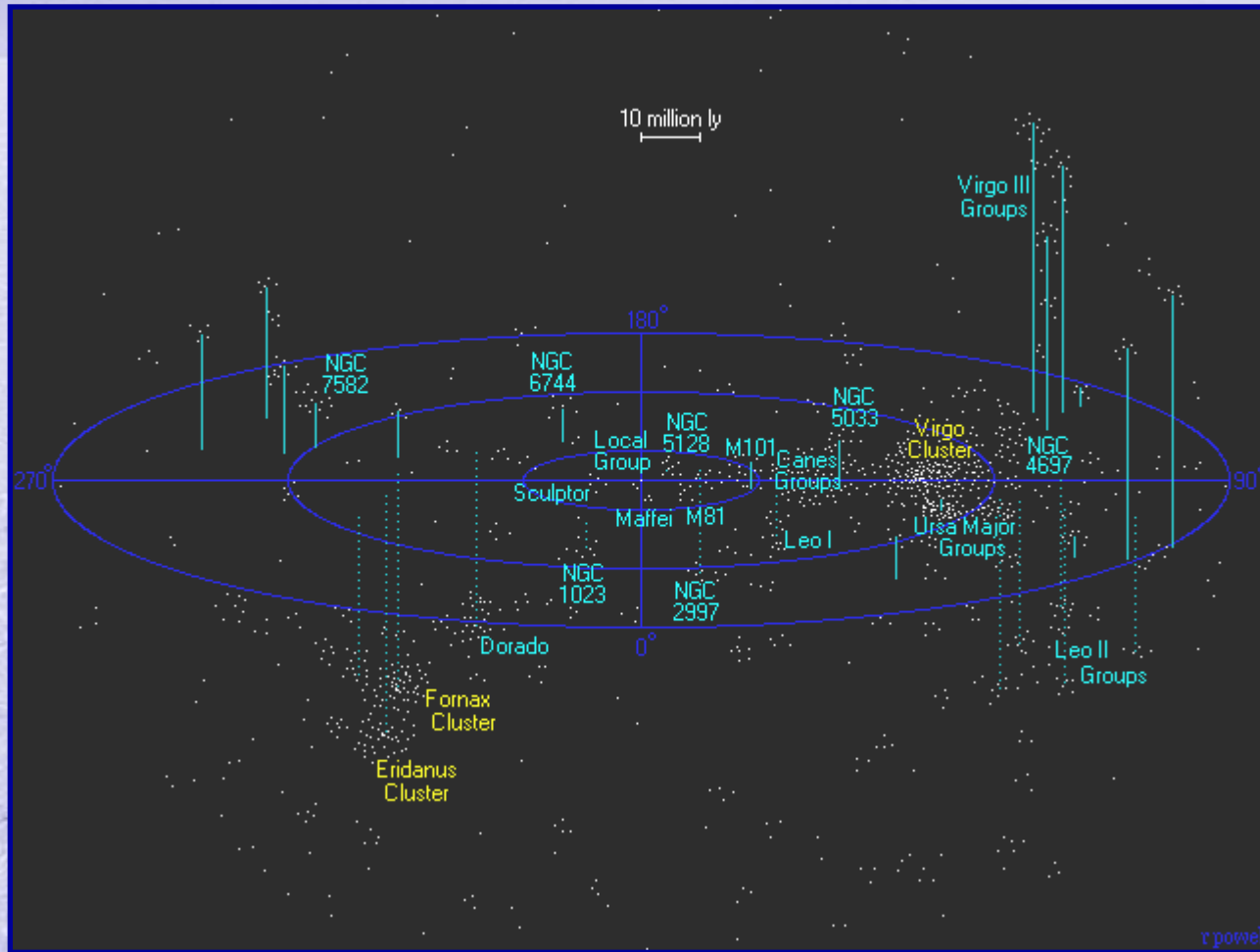
200 – 400 mil millones de estrellas (diámetro de 100 mil años luz)

# Viviendo en el grupo local



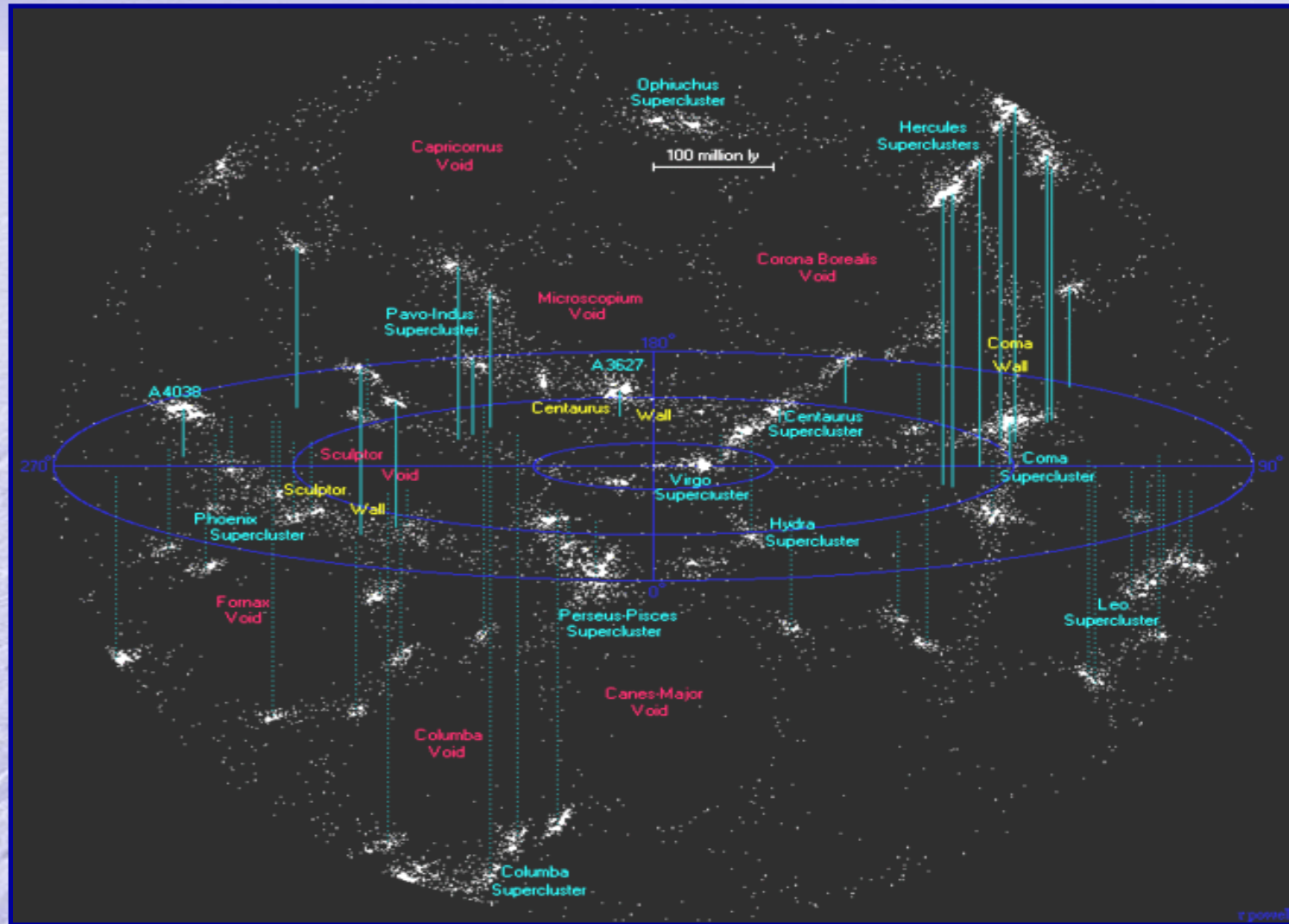
La vía láctea pertenece al “grupo local” de galaxias (formado por unos 35 más)  
(diámetro de unos 10 millones de años luz)  
El centro gravitacional está entre Andrómeda y la Vía Láctea

# Viviendo en el Supercúmulo de Virgo



El "grupo local" de galaxias pertenece al Supercúmulo de Virgo  
Lo forman unos 100 grupos y tiene una extensión de unos 200 millones de años luz  
El centro gravitacional está cerca del grupo de Virgo  
Nuestro supercúmulo se dirige al "Gran Atractor"

# Hasta el infinito y más allá



A muy gran escala, el universo visible se agrupa en filamentos y paredes que rodean grandes vacíos (estructura de esponja), extendiéndose a miles de millones de años luz

Y en todos estos sitios,  
muy presumiblemente,  
habrá HIELO



# Instituto de Estructura de la Materia (CSIC)



# **HIELO EN EL UNIVERSO: de la Tierra al Medio Interestelar**

**Óscar Gálvez González**

**Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, Madrid**

**<http://www.iem.cfm.csic.es/departamentos/fismol/Oscar/index.htm>**

**[oscar.galvez@csic.es](mailto:oscar.galvez@csic.es)**