

# PLASMA

## el Cuarto Estado de la Materia

Isabel Tanarro

*Inst. de Estructura de la Materia, CSIC*

*i.tanarro@csic.es*



## ¿ Por que “CUARTO ESTADO DE LA MATERIA” ?



*Los PLASMAS en la TIERRA son mucho más escasos,  
y efímeros que Sólidos, Líquidos y Gases.*

*Sus características son mucho más complejas  
y se han estudiado y comprendido más tarde.*

*Pero el plasma es la materia “conocida” más abundante del Universo: Sol, Estrellas, Nebulosas... ( >99% )*

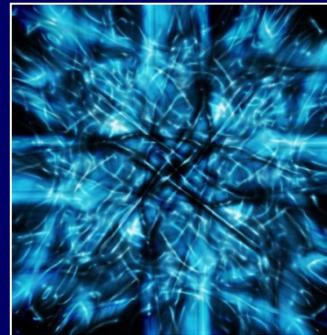


*Fácilmente detectable a distancia: ¡Todos los plasmas emiten luz!*

*¡ y casi todo lo que emite luz es plasma !*

# Índice de la presentación

- Clases de Materia e Introducción al Plasma
- Procesos más importantes en el Plasma
- Plasmas Naturales
- Aplicaciones Tecnológicas

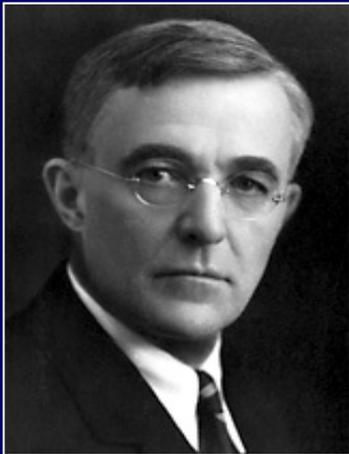


+ *Algunas demostraciones experimentales...*

# ¿QUÉ ES EL PLASMA?

*“Materia Gaseosa Fuertemente Ionizada,  
con Igual Número de Cargas Eléctricas Libres  
Positivas y Negativas”*

*Diccionario de la Real Academia  
Española de la Lengua*



*Denominado Plasma por 1ª vez en 1920  
por Irving Langmuir, Nobel de Química (1932).  
General Electric.*

# Clasificación Antigua de la Materia

*La clasificación de los cuatro elementos clásicos griegos*

*Tierra , Agua , Aire , Fuego*

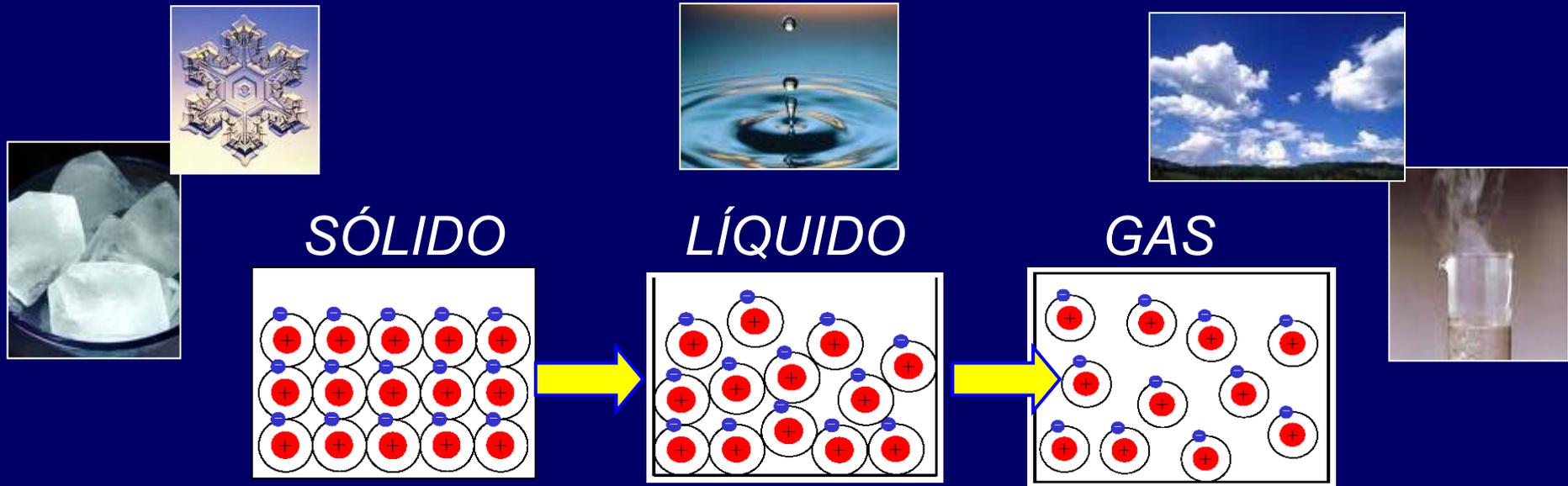
*data de ~ 450 a. C. y persistió hasta el Renacimiento.*



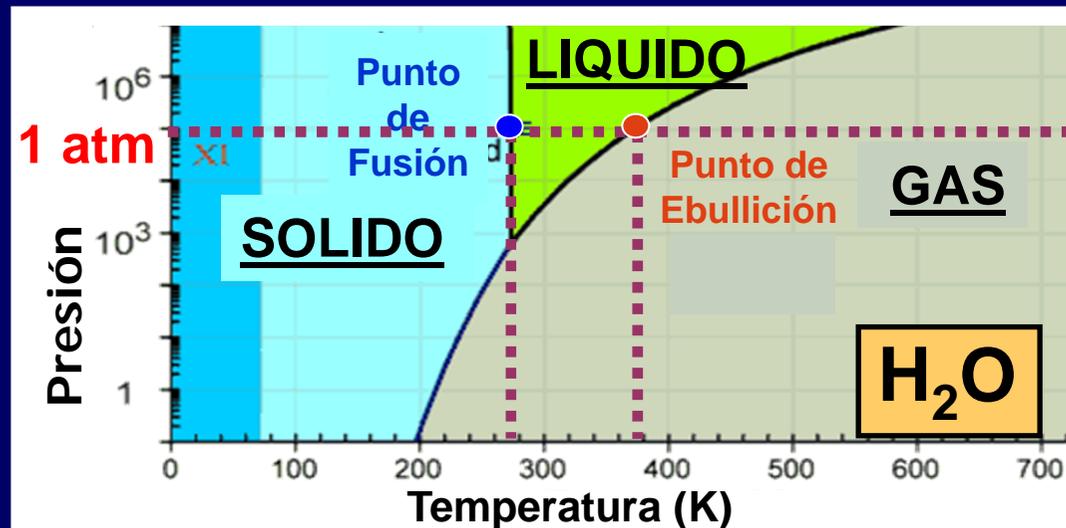
*También aparece en otras culturas,  
como el Budismo o el Hinduismo*

# Estados de Agregación (clasificación actual)

7



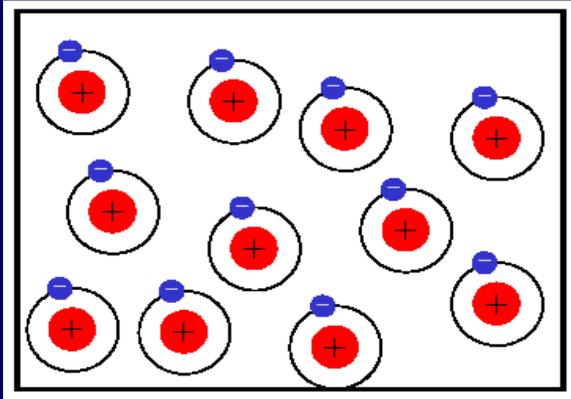
*Aporte de Energía Calorífica  $\Rightarrow$  Aumento de Temperatura*



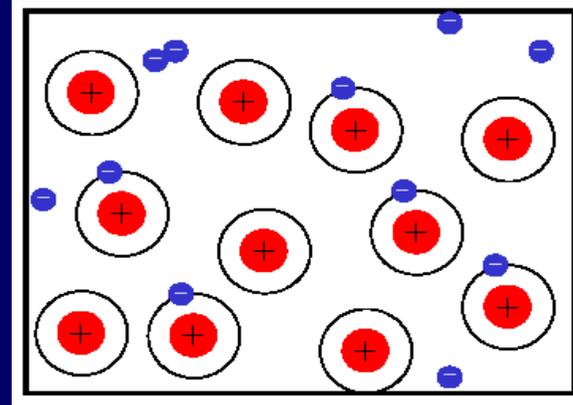
*Diagrama de fases del agua*

7

## GAS



## PLASMA



*Más Energía*



*Ionización*



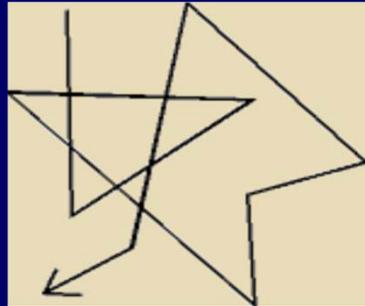
*Eléctrica  
Térmica  
Luminosa  
Química  
Nuclear*

**Cargas Libres** ⇒

*¡ Al contrario que el Gas,  
el Plasma es  
buen Conductor Eléctrico !*

## GASES

- *Comportamiento independiente entre Partículas Neutras*
- *Transferencia de Energía por Colisiones Individuales*



*Partícula Neutra  
( choques individuales )*



*Partícula Cargada  
( acción a distancia )*

## PLASMAS

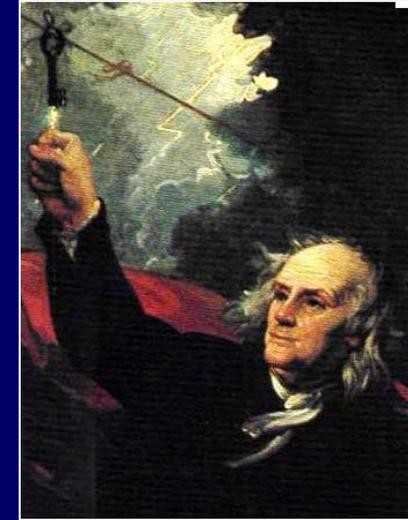
- *Comportamiento Colectivo de Iones y Electrones.*
- *Responden a Fuerzas Electro-Magnéticas*
- *Se pueden confinar lejos de las paredes*

## ESTUDIOS PIONEROS

### Benjamin Franklin (1752):

*Experimento del rayo y la cometa*

*⇒ origen eléctrico del rayo.*



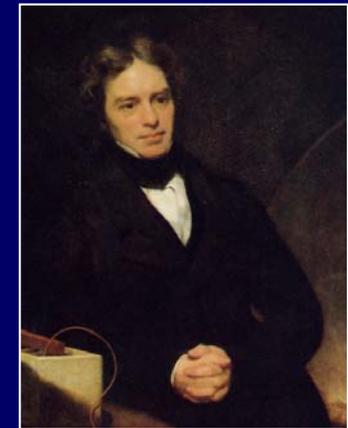
B. Franklin



### Michael Faraday (1820):

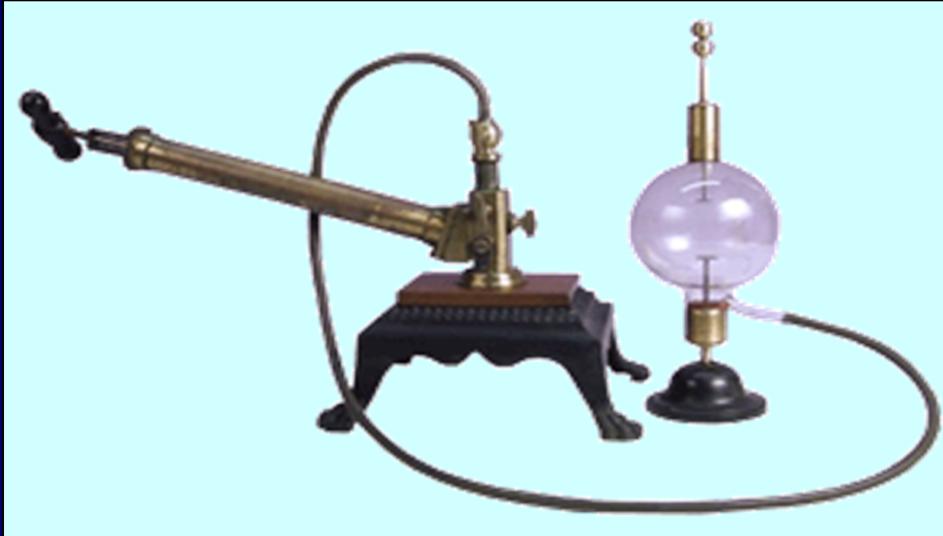
*Descargas en arco (inestables).*

*Al bajar la presión, las descargas se hacían estables y pasaban a emitir una luz tenue y difusa.*



M. Faraday

## *Descargas eléctricas en gases a baja presión*



**Célula de Descarga  
y Bomba de Vacío  
(1880)**

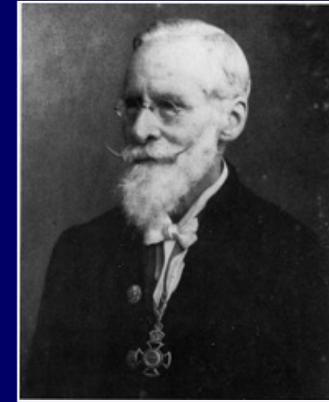
*Alto voltaje entre electrodos  $\approx 1000\text{ V}$*

*Presión  $\approx 0.001\text{ atm} \approx 2,5 \times 10^{16}\text{ moléculas/cm}^3$*

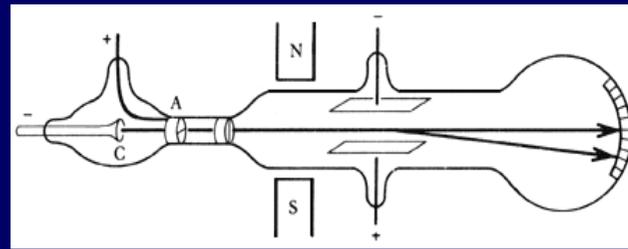
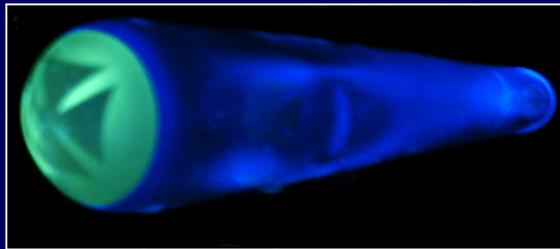
## William Crookes (~1880):

*Tubos de Crookes: Plasma = "GAS RADIANTE".*

*Interponiendo objetos, identificó unas partículas en el plasma que llamó rayos catódicos.*



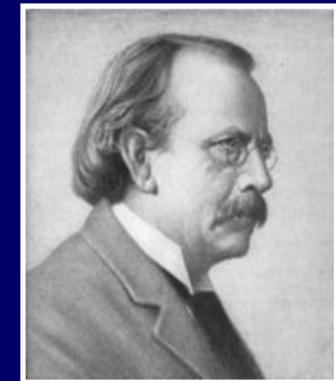
W. Crookes



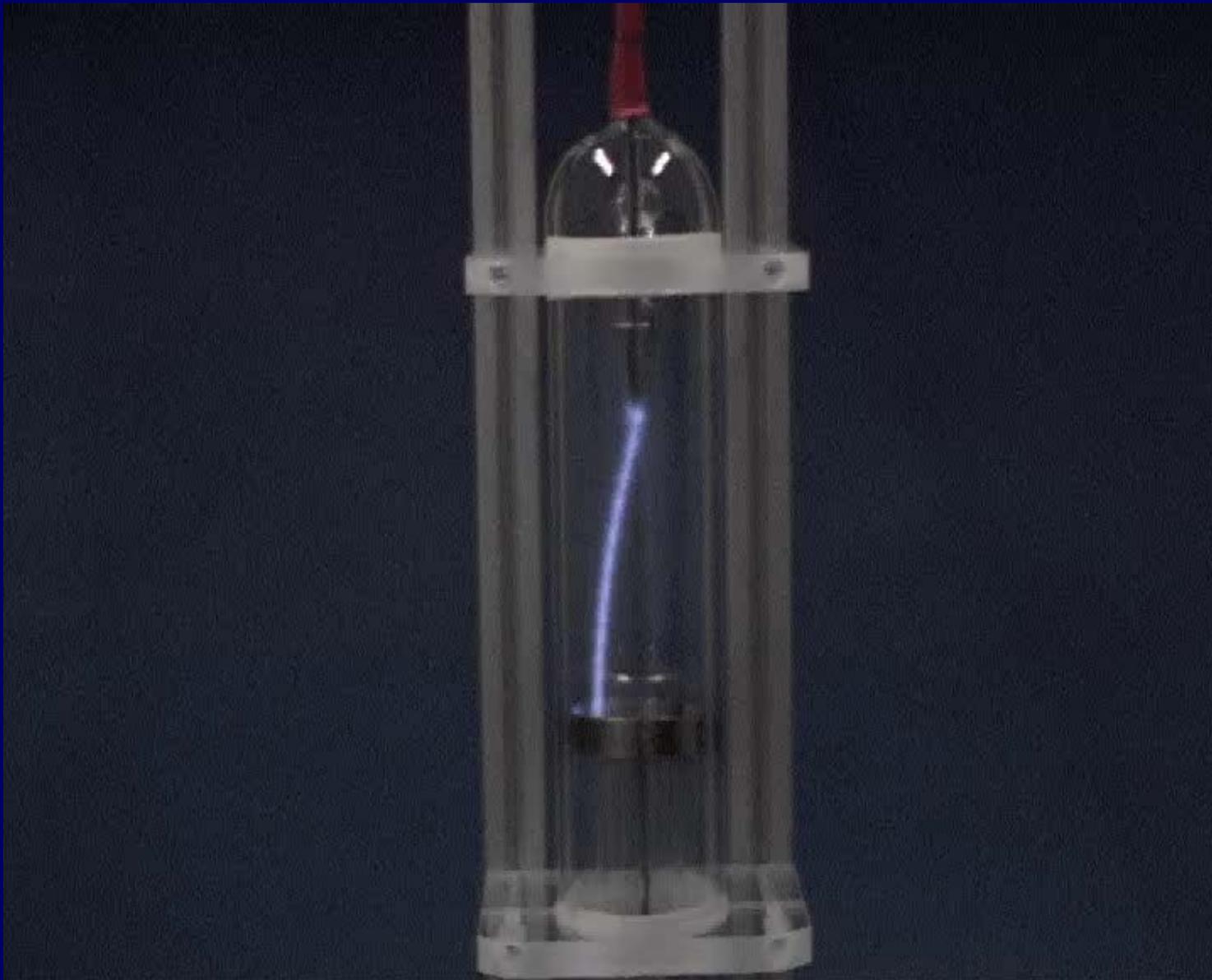
## Joseph J. Thomson (~ 1897):

*Desviación de rayos catódicos con campos electromagnéticos ( origen del televisor ).*

*Midió la carga del electrón y descubrió que procedía del interior del átomo. Primer modelo atómico.*



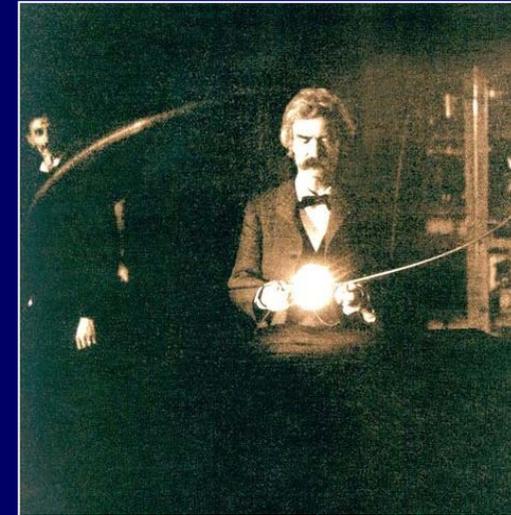
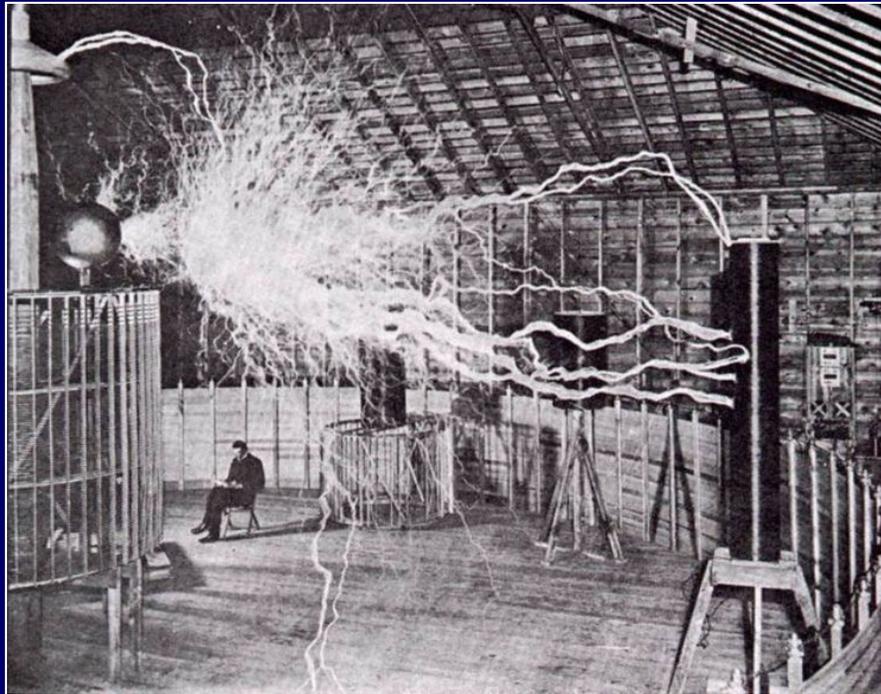
J. J. Thomson  
(P. Nobel Física 1906)



Plasma controlado por un campo magnético.  
*Prof. H. Kersten (Germany)*

## Nicola Tesla (1856-1943)

- *1<sup>er</sup> Motor de Corriente Alterna (1887)*
- *1<sup>a</sup> Central Hidroeléctrica (Niagara Falls 1893)*
- *Transmisión por radio (15 años antes que Marconi)*

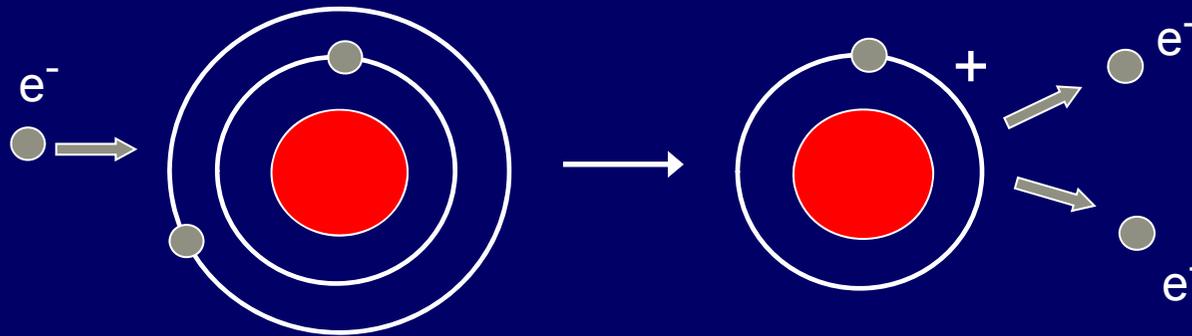


*Nicola Tesla  
& Mark Twain (1894)  
Bola de Plasma*

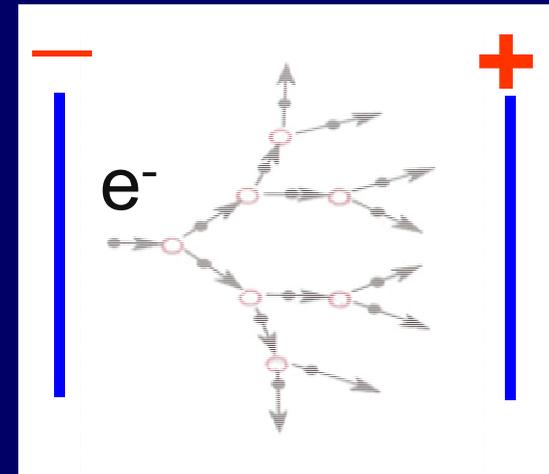
# PROCESOS MÁS IMPORTANTES EN EL PLASMA

## 1º. Ionización

Fenómeno desencadenante del plasma.

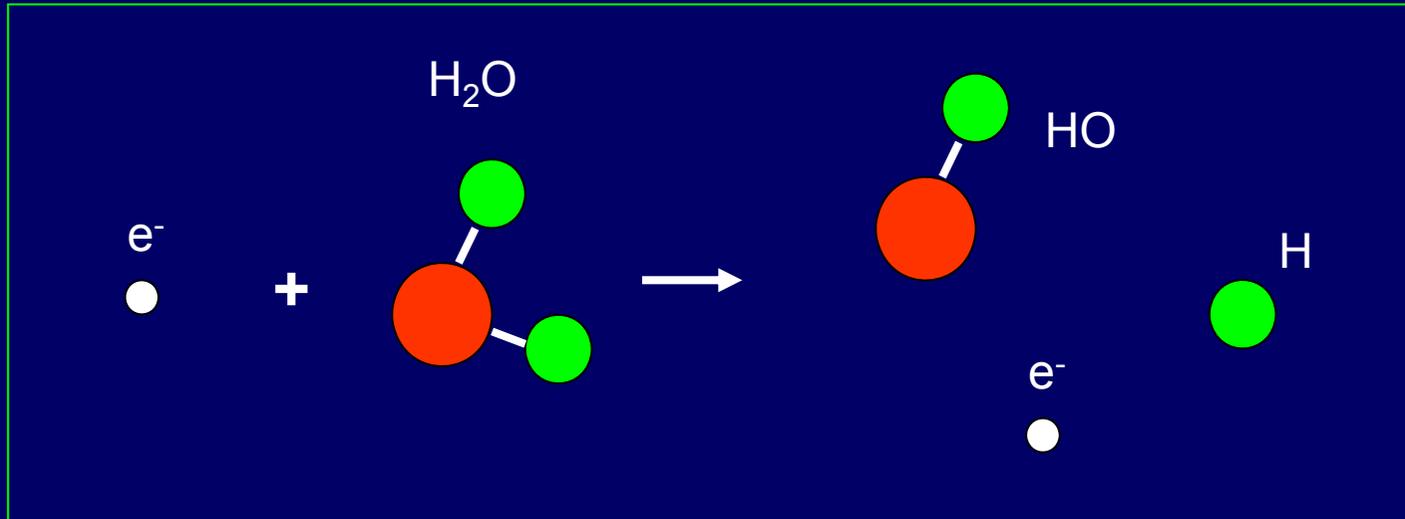


- Los electrones liberados en la ionización pueden ser acelerados por campos electro-magnéticos externos y GANAN ENERGÍA.



- Sucesivos choques  $\Rightarrow$  ionización en cadena. Se establece una CORRIENTE ELÉCTRICA.
- Pero si cesa el aporte de energía, las cargas +/- se recombinan y el plasma se extingue rápidamente.

## 2º. Disociación Molecular



*Las moléculas se rompen liberando átomos y radicales que reaccionan químicamente y forman con rapidez nuevas especies.  $H_2O \Rightarrow H_2, O_2, H_2O_2$*

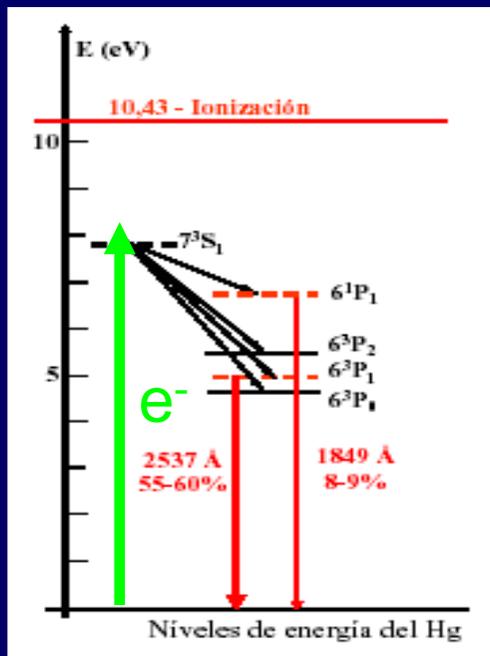
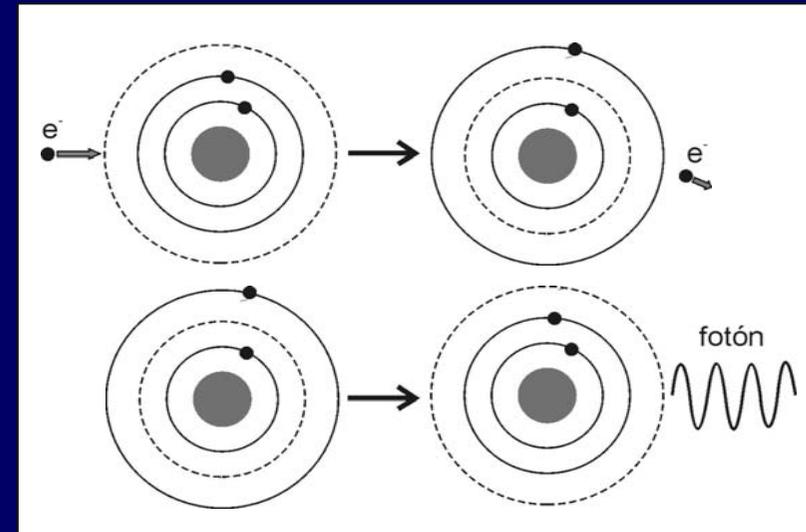
*$NO_2 \Rightarrow N_2, O_2, N_2O, NO$  (destrucción de contaminantes)*

*$CH_4 \Rightarrow C_2H_y, C_xH_y, \dots$  microdiamantes...*

*$SiH_4 + NH_3 \Rightarrow H_2 + N_2 + Si_3N_4$  (recubrimiento pasivante)*

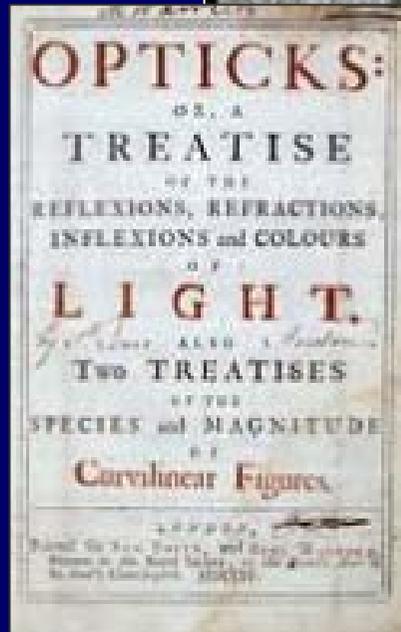
### 3°. Excitación y Desexcitación

- Excitación interna por impacto electrónico  
*¡ Solo con electrones de energías bien definidas !*
- Desexcitación y emisión de fotones de energías concretas.



*¡ Los plasmas emiten luz!  
Su análisis permite  
conocer las especies  
que contienen*

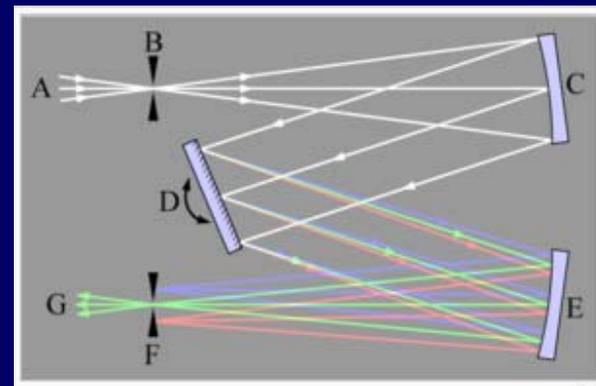
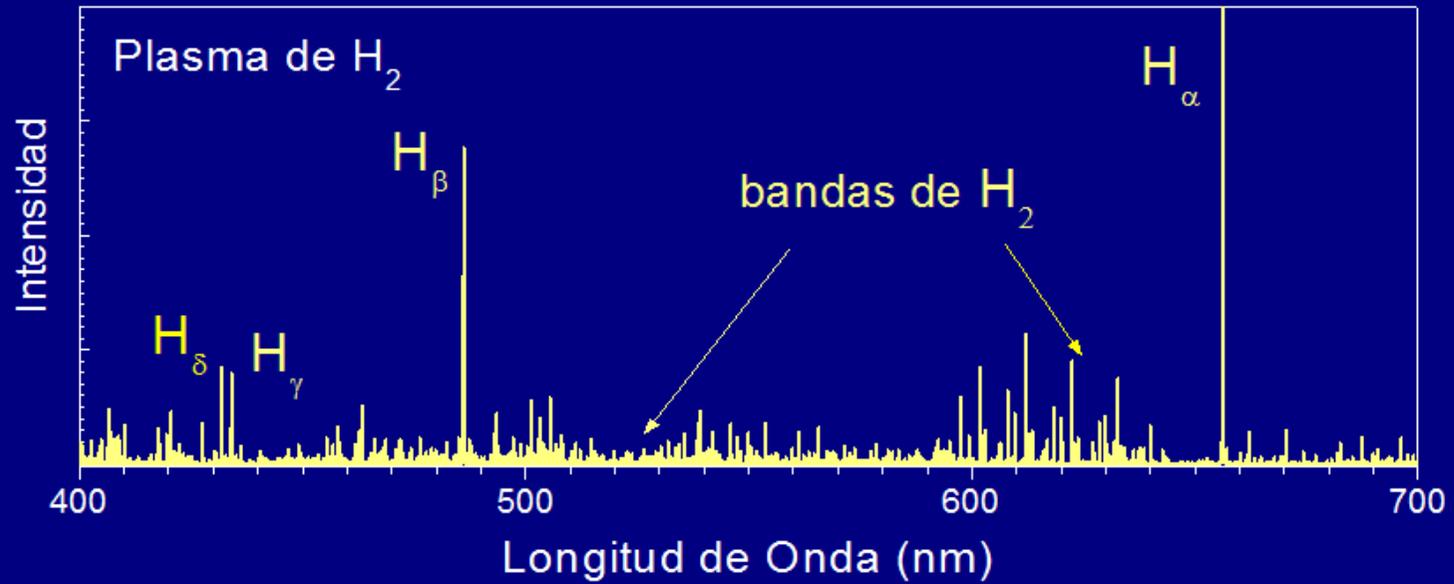




Primer análisis espectral:  
Isaac Newton (1642-1727)  
Refracción de la luz en un prisma de cuarzo

# Espectros de Emisión

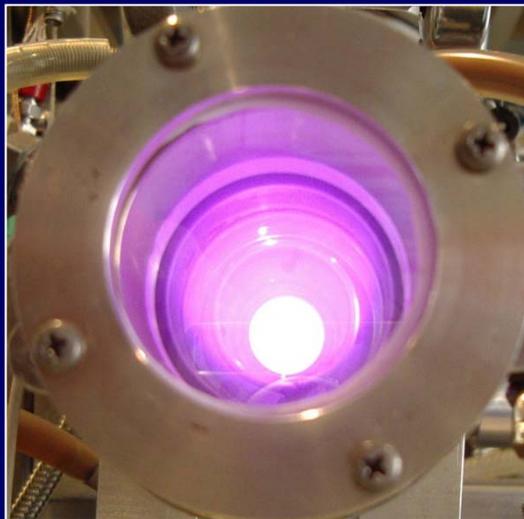
H



## 4°. Reacciones con las Superficies

*Los iones del plasma impactan con mucha energía sobre las superficies circundantes, y arrancan partículas que se incorporan al plasma.*

*A su vez, algunas partículas formadas en el plasma se depositan en las superficies.*



Reactor de plasma



Ventanas de observación recubiertas paulatinamente con material metálico de las paredes del reactor

*Laboratorio de Plasmas Fríos, CSIC*

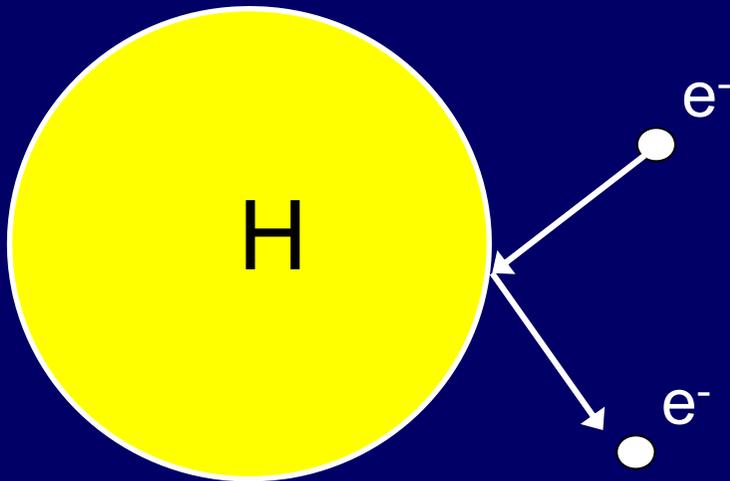
## Todo lo anterior da lugar a un gran número de componentes del plasma:

- Iones (+/-) y electrones libres
- Átomos y moléculas neutras  
( precursores del plasma y productos formados)
- Partículas procedentes de las paredes
- Especies excitadas (neutras o cargadas)
- Fotones

**PLASMA : ¡ MEDIO EXTRAORDINARIAMENTE REACTIVO Y COMPLEJO !**

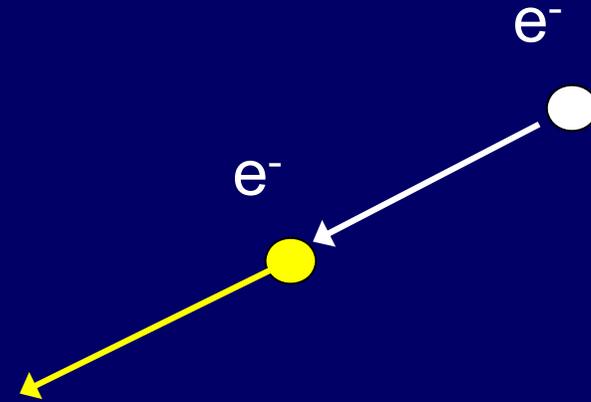
- Distribuciones de energías (temperaturas) muy dispares entre las distintas clases de partículas.

En COLISIONES ELÁSTICAS entre los electrones, muy ligeros,  
y los átomos o moléculas, mucho más pesados,  
APENAS se transfiere la ENERGÍA CINÉTICA  
ganada por los electrones en el campo electro-magnético.



Choque  $e^- + H$

$$m_e \sim M_H / 1800$$



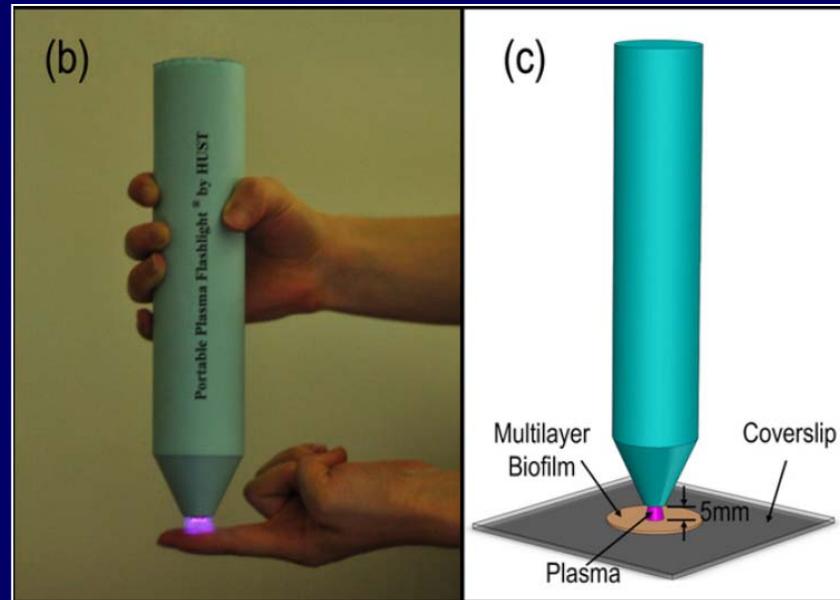
Choque  $e^- + e^-$

igual masa :  
el intercambio de  
energía es máximo

La energía media de los electrones del plasma (su temperatura) puede ser mucho mayor que la de las especies más pesadas

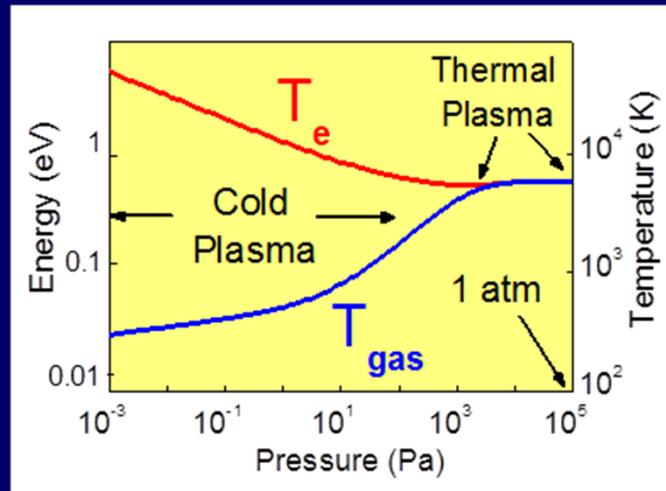
***“PLASMAS FRÍOS”***  
*importantes en multitud de aplicaciones*

$$T_e = 30.000 \text{ K}$$
$$T_{\text{gas}} = 300 \text{ K}$$



**¡ Solo en plasmas con bajo grado de ionización !**

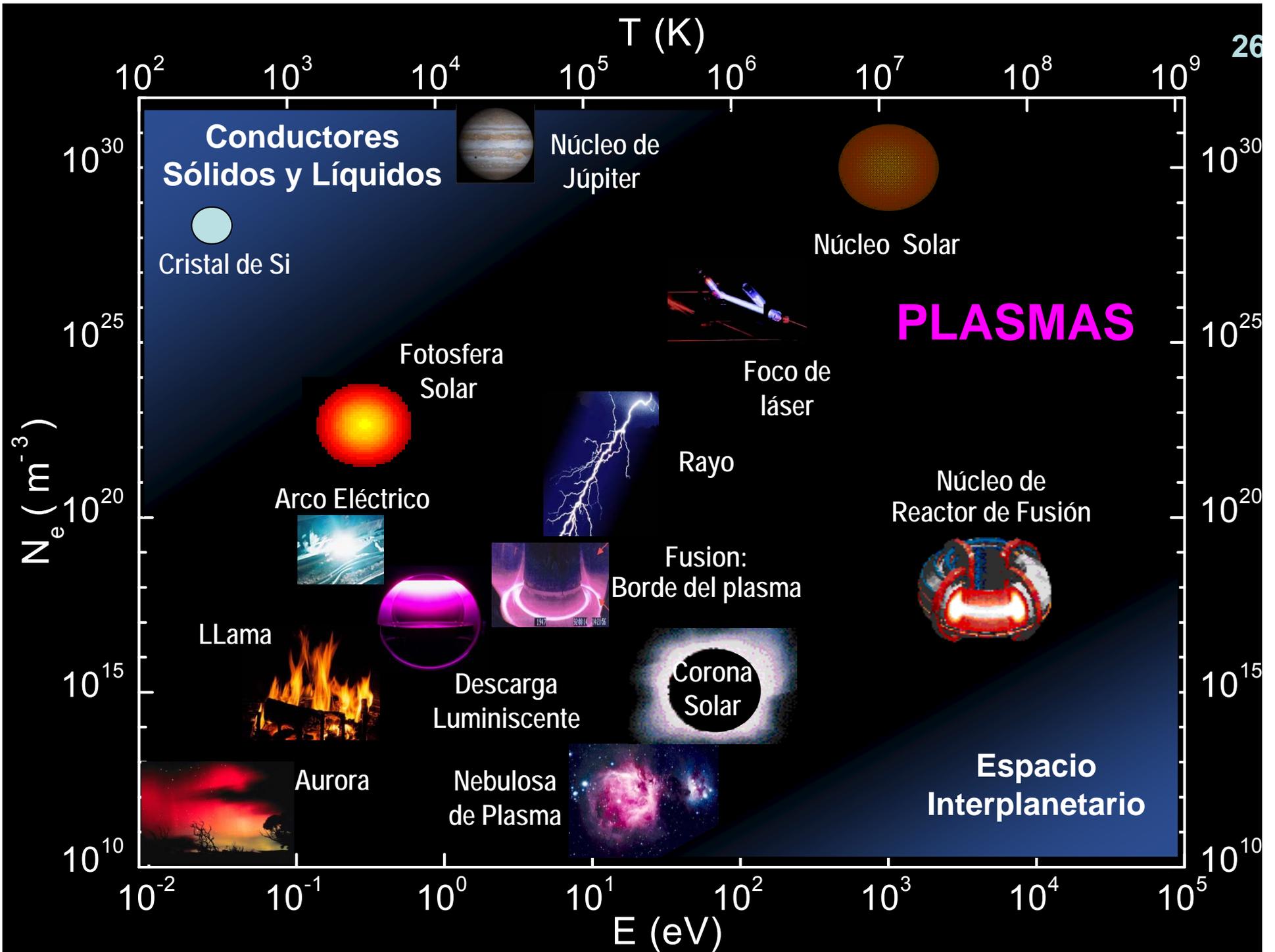
*Al aumentar la presión y el grado de ionización, la temperatura electrónica y del gas se igualan porque aumenta el número de colisiones.*



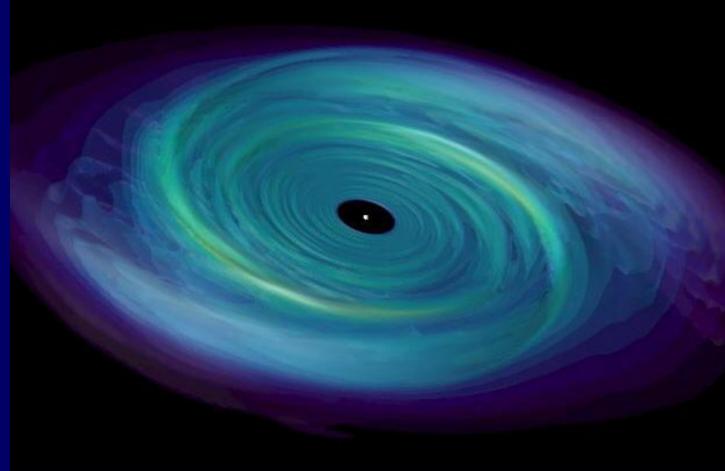
*Fluorescente: plasma frío*  
*Arco: plasma térmico*

## Magnitudes más importantes del Plasma

- **Densidad de Carga Eléctrica Libre**
- **Temperatura Electrónica**



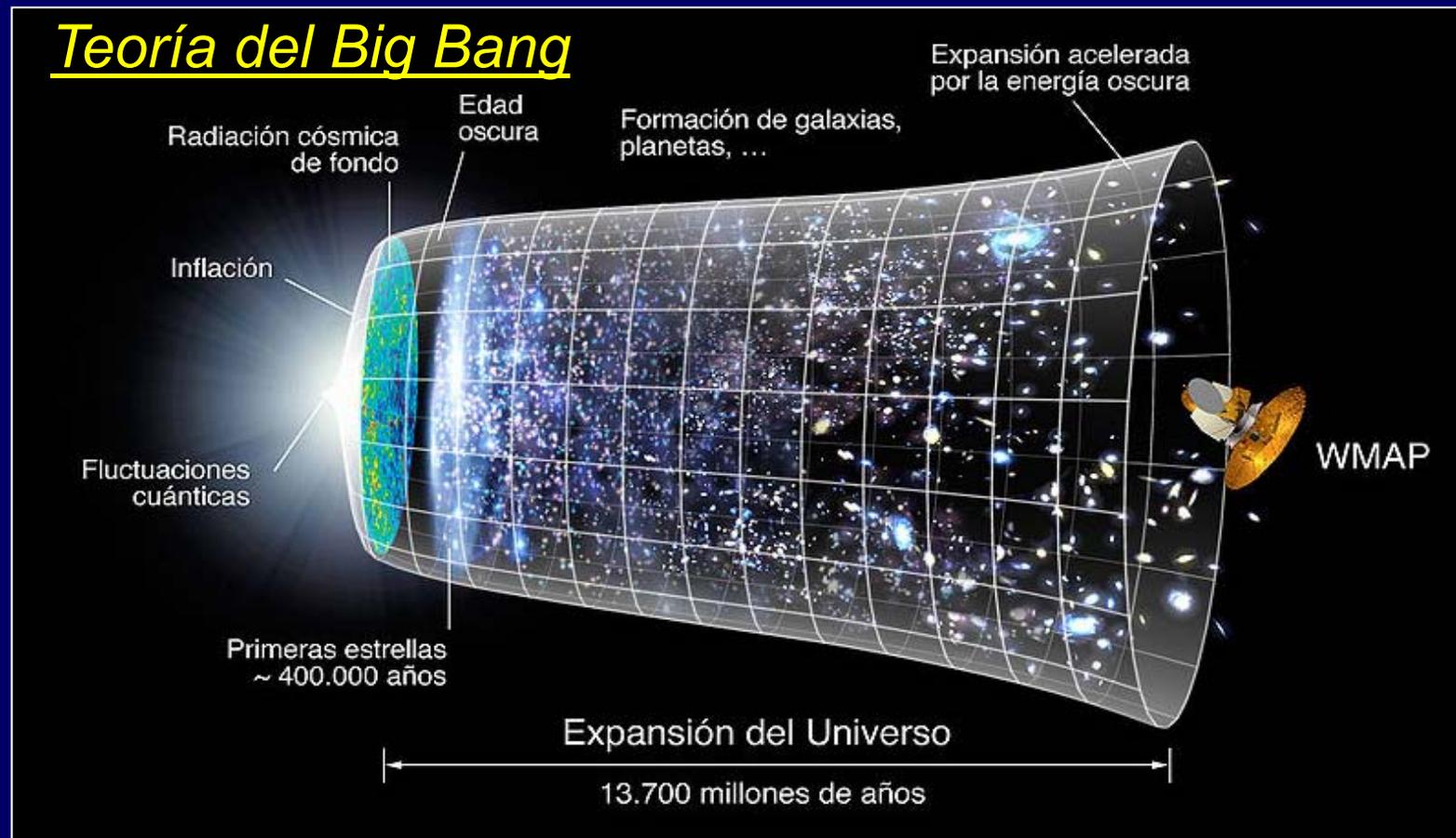
# PLASMAS NATURALES



100 s  $\rightarrow$  Nucleosíntesis  $\Rightarrow$   $^1\text{H}^+ + n (+ e^-) \Rightarrow$   $^2\text{D}^+, ^3\text{He}^+ (+ e^-)$

$10^9$  K Radiación atrapada en el denso plasma primigenio.

## Teoría del Big Bang



380.000 años  $\rightarrow$  Recombinación Núcleos – Electrones  $\Rightarrow$  Átomos neutros.

3.000 K Desacoplamiento Luz – Materia  $\Rightarrow$

Radiación de Fondo Cósmico MW ( 2,7 K - 160,2 GHz)

# Nebulosas

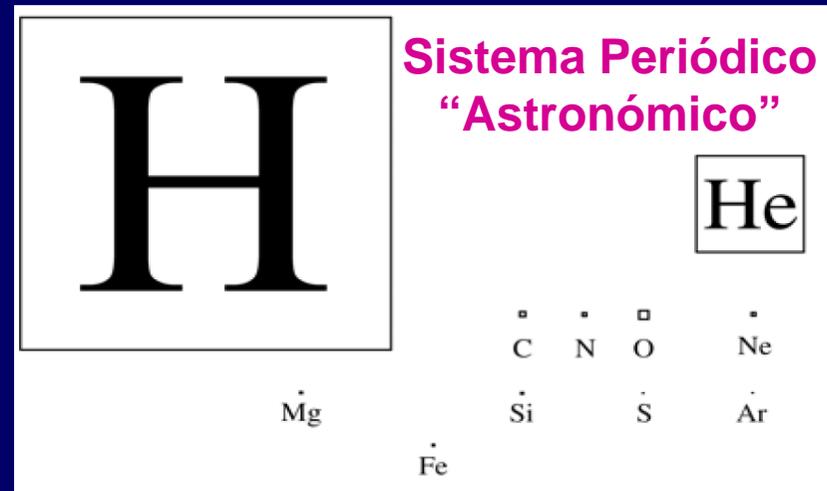
- Regiones de enorme masa muy dispersa (neutros, iones, polvo), se aproximan por gravedad y calientan hasta formar nuevas estrellas.



Orión

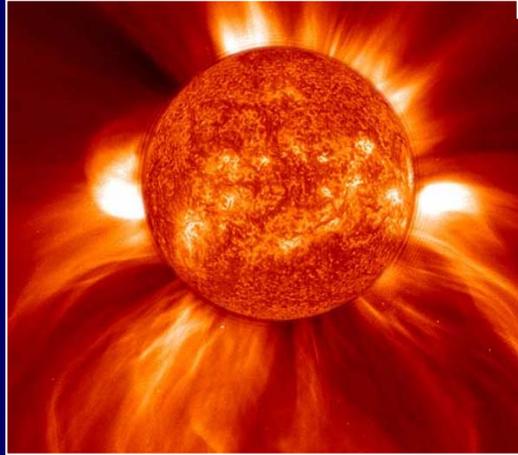


Masa total "conocida" / Masa estrellas ~ 14  
Temperaturas desde 4 K hasta  $10^8$  K



- Abundancia de moléculas (hasta de 200 átomos): juegan un papel importante en la actual formación estelar (de 3ª generación).
- Especies exóticas como  $H_3^+$ , crucial para formar nuevas moléculas, pueden producirse en Tierra por descargas eléctricas.

# El Sol



Fotosfera:  $T = 6.000 \text{ K} \Rightarrow$  Luz Visible

Núcleo:  $T = 15 \times 10^6 \text{ K}$ ,

¡Gas totalmente ionizado! (70% H, 28% He)

Densidad  $\approx (150 \text{ g/cm}^3)$  10 veces la del Pb

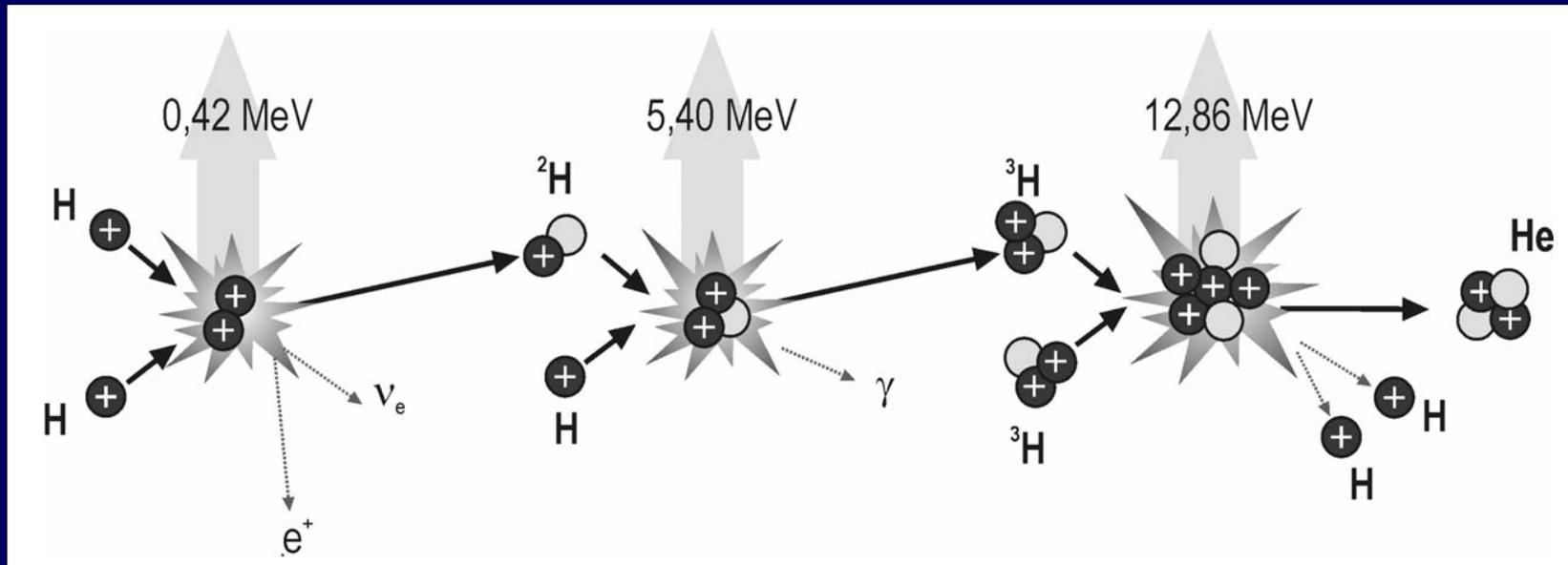
*Edad del Sol:  $4,5 \times 10^9$  años.*

*Hasta el primer tercio del S. XX se le atribuía  $\sim 10^7$  años*

*Por gravedad  $\Rightarrow$  William Thompson, Lord Kelvin (1824-1907)*

*Controversia con Charles Darwin (1809-1892): La Tierra, más joven de lo necesario para permitir la Evolución de las Especies.*

*1938 : Procesos de Fusión Nuclear  
Hans Bethe, Nobel (1.968)*



*600 MTm / s de H  $\Rightarrow$  596 MTm / s de He +  $4 \times 10^{20}$  MW (  $E = mc^2$  )*

*Sobre la Tierra inciden  $\sim 500$  W / m<sup>2</sup>*

*Pero el Sol pesa  $3 \times 10^{15}$  MTm  $\Rightarrow$*

*Rendimiento global de tan solo  $\approx$  5 W / TM !*

# Ionosfera Terrestre

*Producida por la radiación solar de alta energía (X, VUV)*

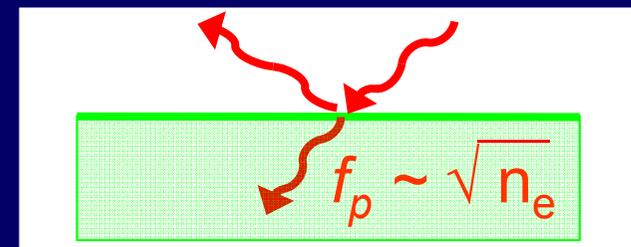
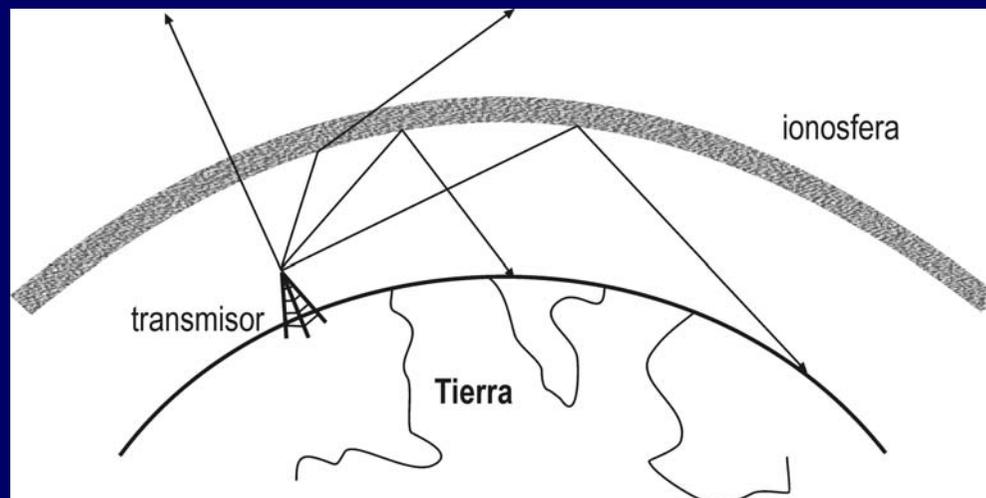
*Baja Ionización  $< 10^{-3}$*

*Altitud  $\sim 60 - 1000$  km*

**Descubierta por Marconi en 1.901 :**

**Reflexión de Ondas de Radio y Transmisión de Largo Alcance**

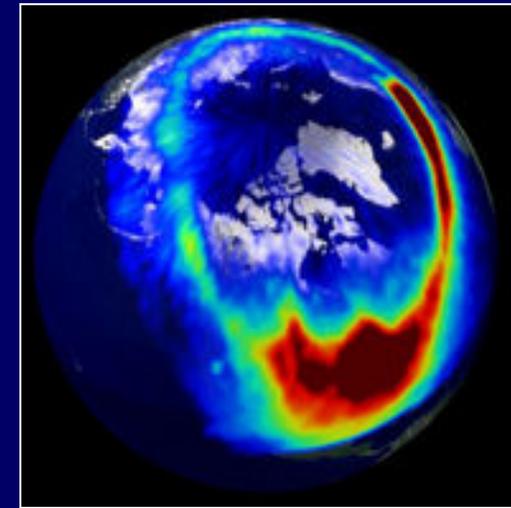
*Como los metales, los plasmas, al ser conductores, reflejan radiaciones de ciertas frecuencias*



# Auroras Boreales y Australes

Interacción entre viento solar y magnetosfera terrestre (R ~ 60.000 km)

Mas intensas cada 11 años : ciclo de tormentas solares.



Altitud > 100 km ( Ionosfera )

Latitud > 60° (norte, sur)

Fluctuaciones rápidas



# Rayos



*Plasma Totalmente Ionizado ,  $T \sim 30.000\text{ K}$*

*De Franklin (1752)... a Tesla (~1900)  
Interés por daños en tendido eléctrico*

*Voltajes       $\sim 1.000\text{ MV}$  }  
*Corrientes     $\sim 10.000\text{ A}$  }  
*Duración       $\sim 10\ \mu\text{s} - 100\text{ ms}$***

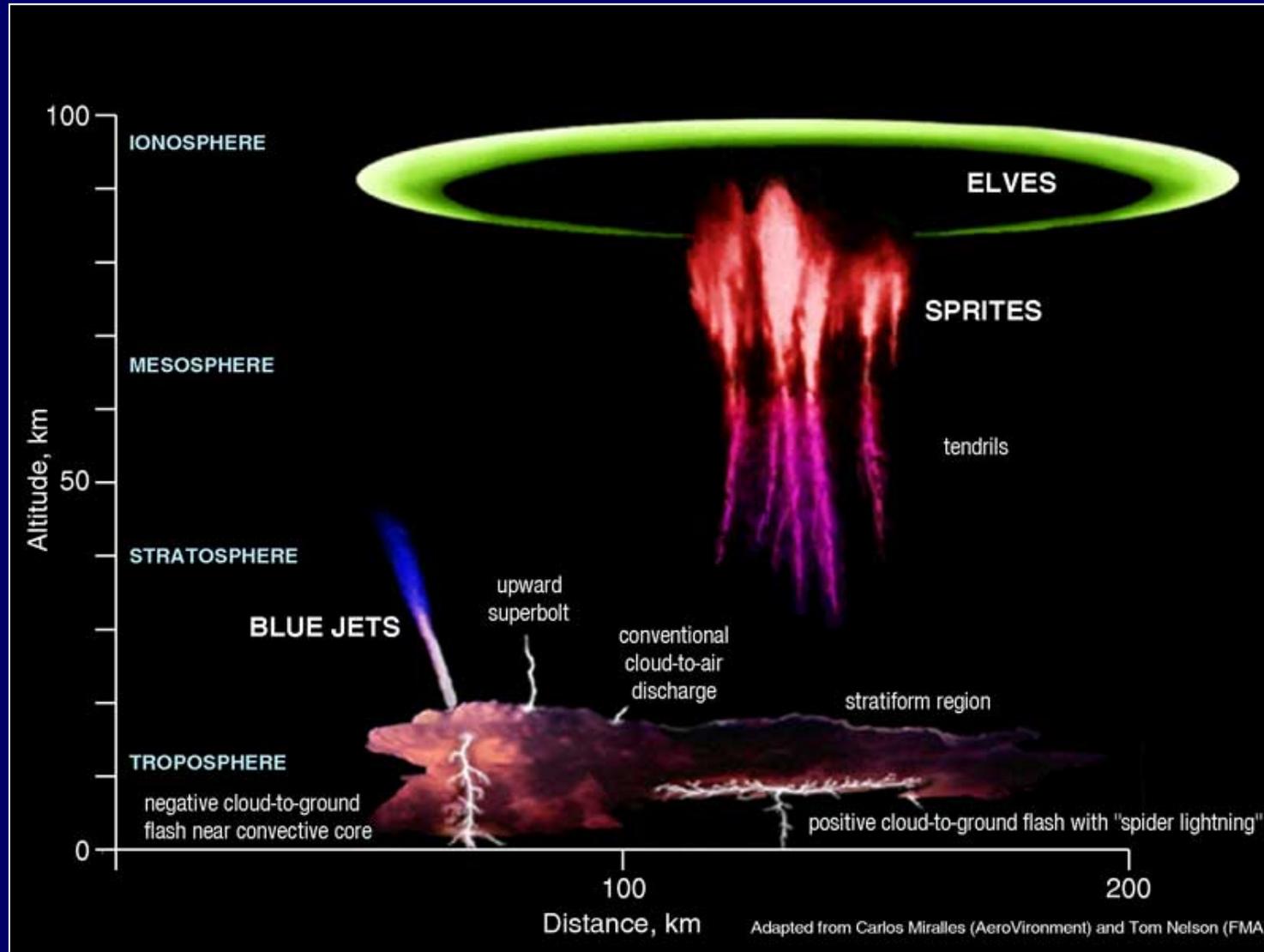
**$i P > 10^{12}\text{ W!}$**





# “Lightning Sprites & Elves” (*Mesosfera Terrestre*)

Grabados accidentalmente por primera vez en 1989  
y por la lanzadera espacial de la NASA en 1990.





Videos de Sprites. Cámara normal y cámara rápida

# Llamas

*Único plasma manejado por la especie humana hasta el S.XIX.*

*Baja ionización ( $\sim 10^{-9}$ ),  $T \sim 2.000\text{ K}$*

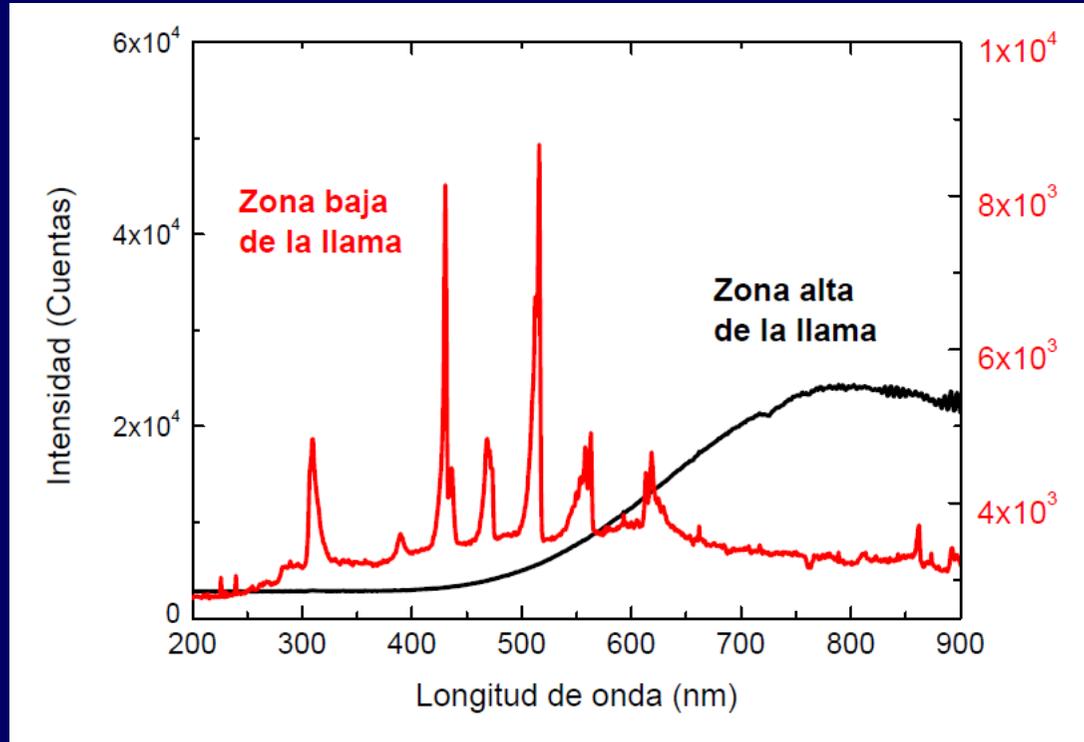
*Predominio de Reacciones Químicas por Combustión*

*Especies producidas: CO, CO<sub>2</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, cenizas...*

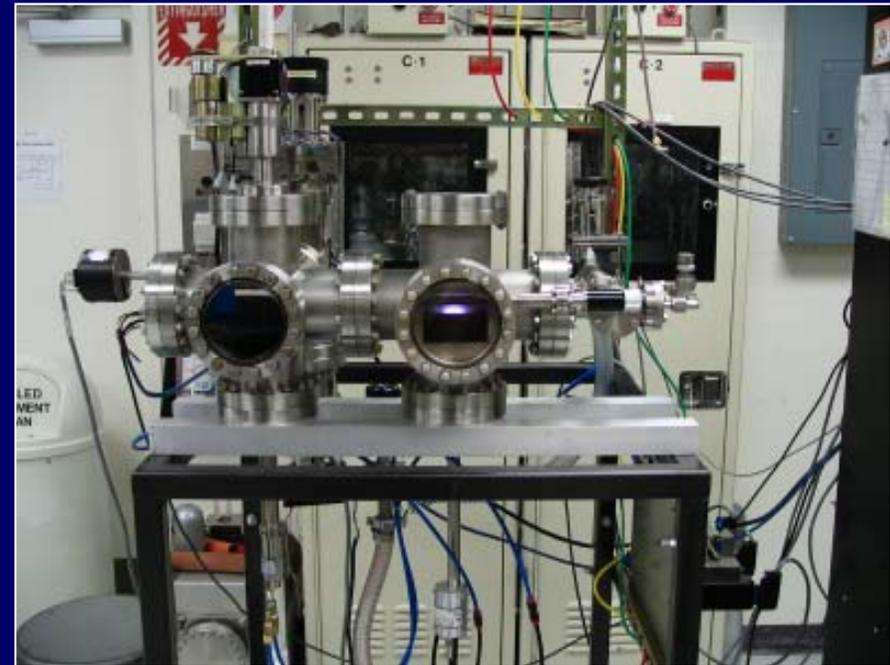


*Conducen la Electricidad  
Academia de Ciencias de Florencia (1667)*

# Espectros de la llama

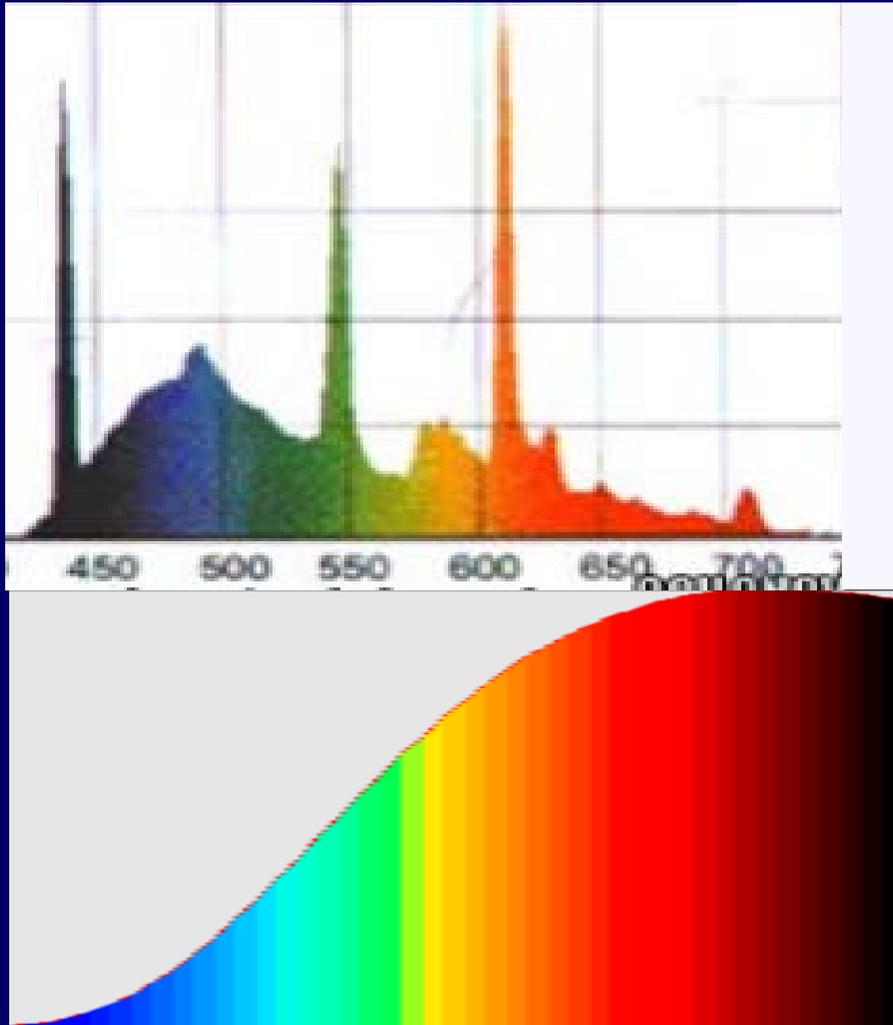


# APLICACIONES TECNOLÓGICAS



*Ejemplo de descarga*  
*¡sin electrodos!*

## Iluminación por Plasma



*Fluorescentes  
de bajo consumo*



← **Bombilla de Filamento  
Incandescente**

## Esterilización por Plasmas Fríos



*Aplicaciones médicas...*

*Envases de alimentos...*

*Materiales que no soportan  
altas temperaturas.*



Catéteres para diálisis,  
y tubos de ensayo  
de materiales plásticos

*Doble acción bactericida:*

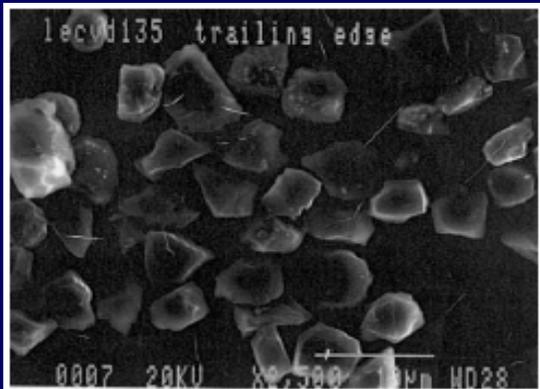
*Radiación ultravioleta.*

*Radicales fuertemente oxidantes.*

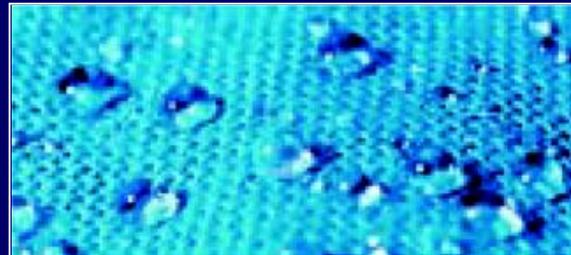
# Cambios superficiales de materiales

Gran valor añadido a sus propiedades estructurales

*Resistencia al rozamiento o al ataque químico,  
impermeabilidad, conductividad, propiedades ópticas,  
biocompatibilidad de implantes...*



Microcristales de diamante  
para recubrir  
herramientas de corte

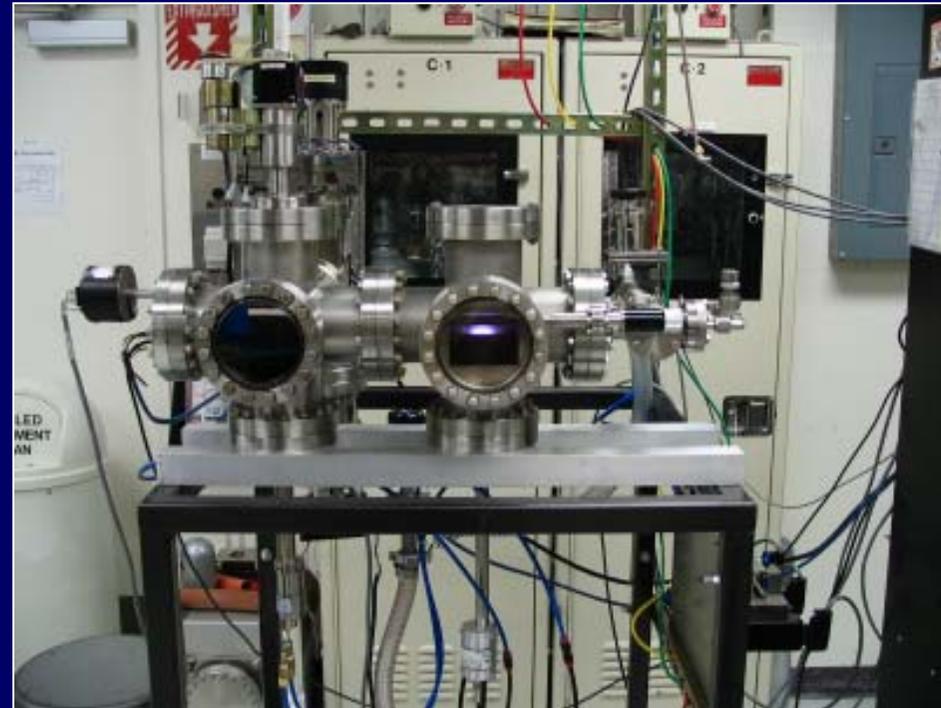
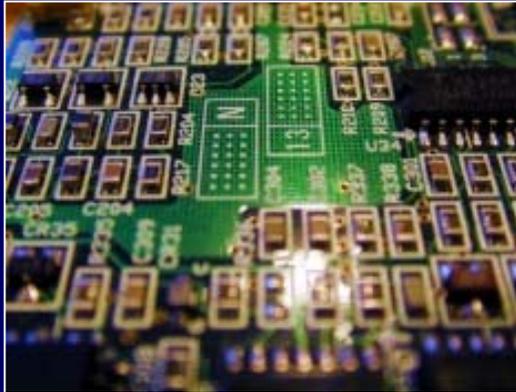


Tejidos tratados con plasma,  
para repeler la humedad  
y las grasas



Prótesis metálica de  
rodilla recubierta de  
material biocompatible

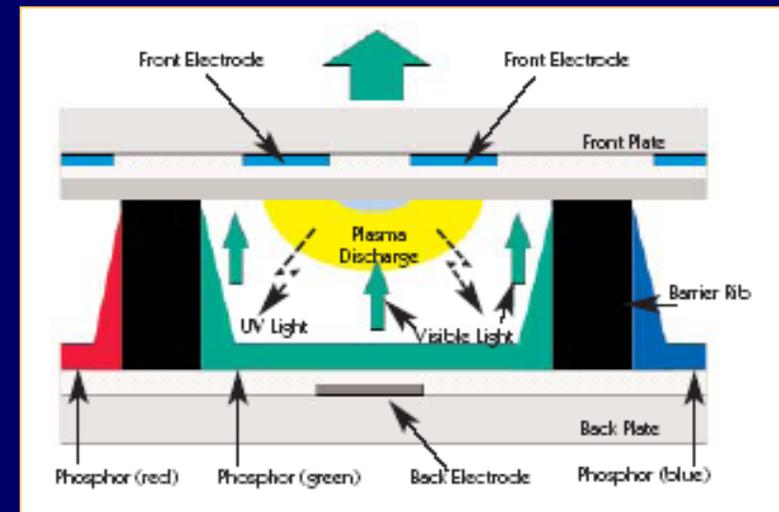
# Microelectrónica



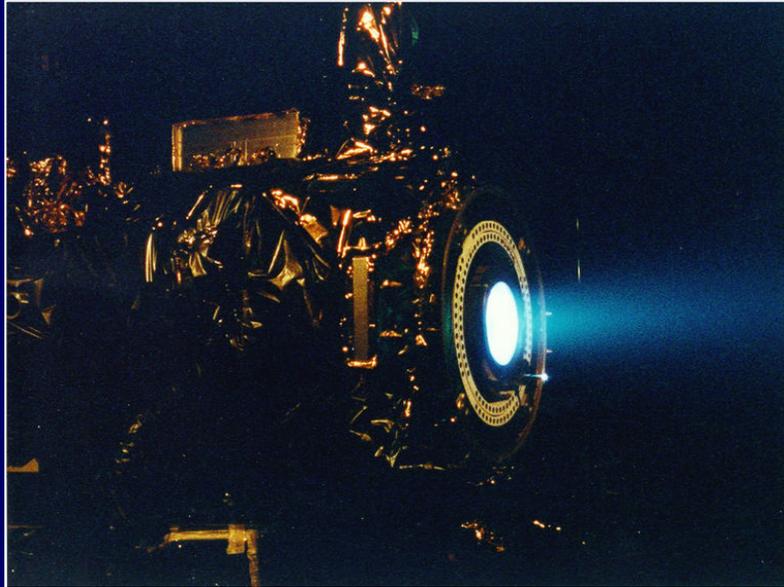
Fabricación de microcircuitos  
mediante depósito o erosión por plasma  
(tratamientos multicapa)



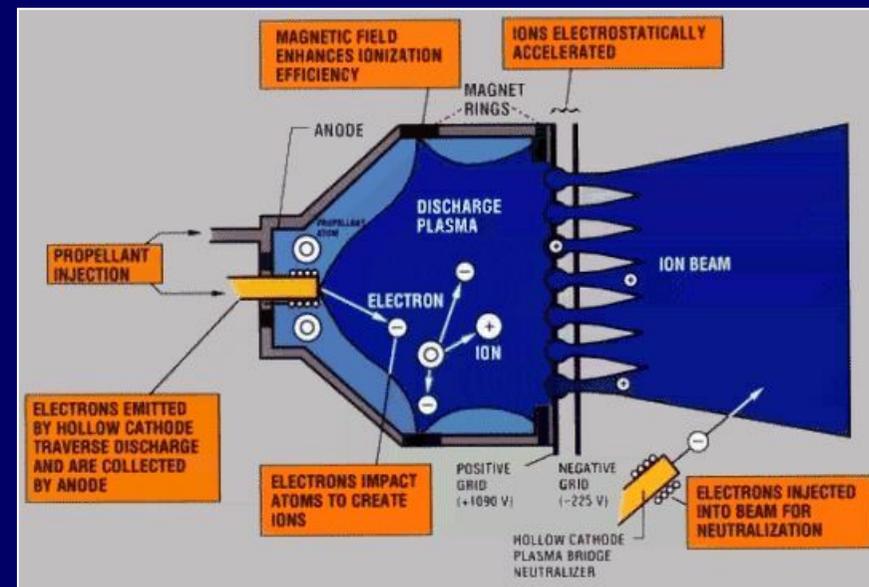
## Pantallas de Plasma



# Motores Iónicos para Propulsión Espacial



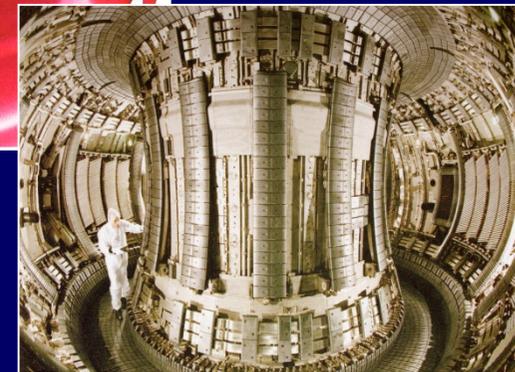
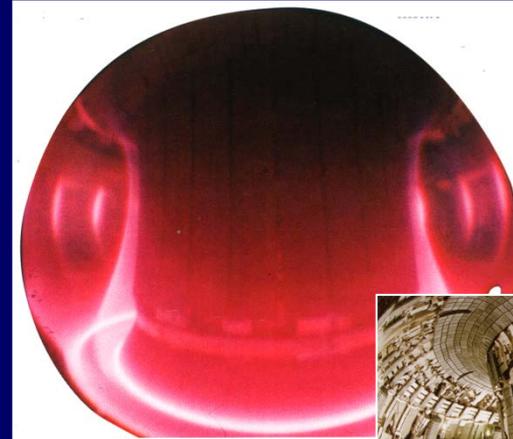
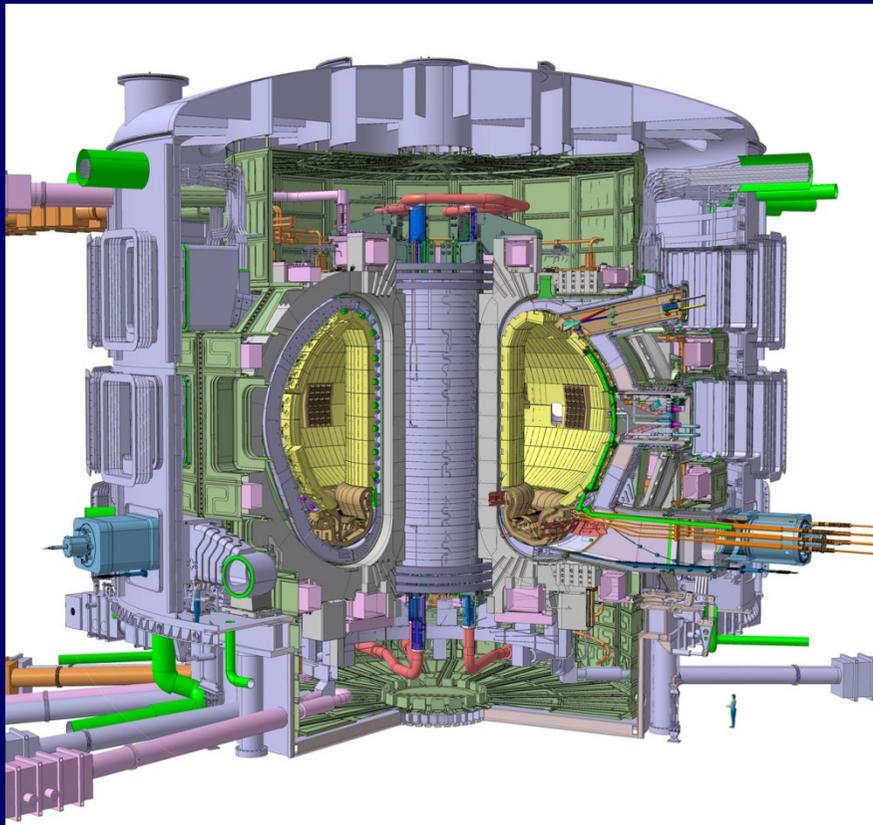
Sonda Lunar “Smart-1” , ESA  
Tierra 2003 – Luna 2006,  
1/6 de combustible de combustión



Se genera un plasma de Xe.  
Los iones pesados se aceleran  
en un campo eléctrico y se recombinan  
a la salida (poder de propulsión).

# Reactores de Fusión Termonuclear

Reactor tipo Tokamak  
"Joint European Torus"  
Confinamiento magnético



ITER

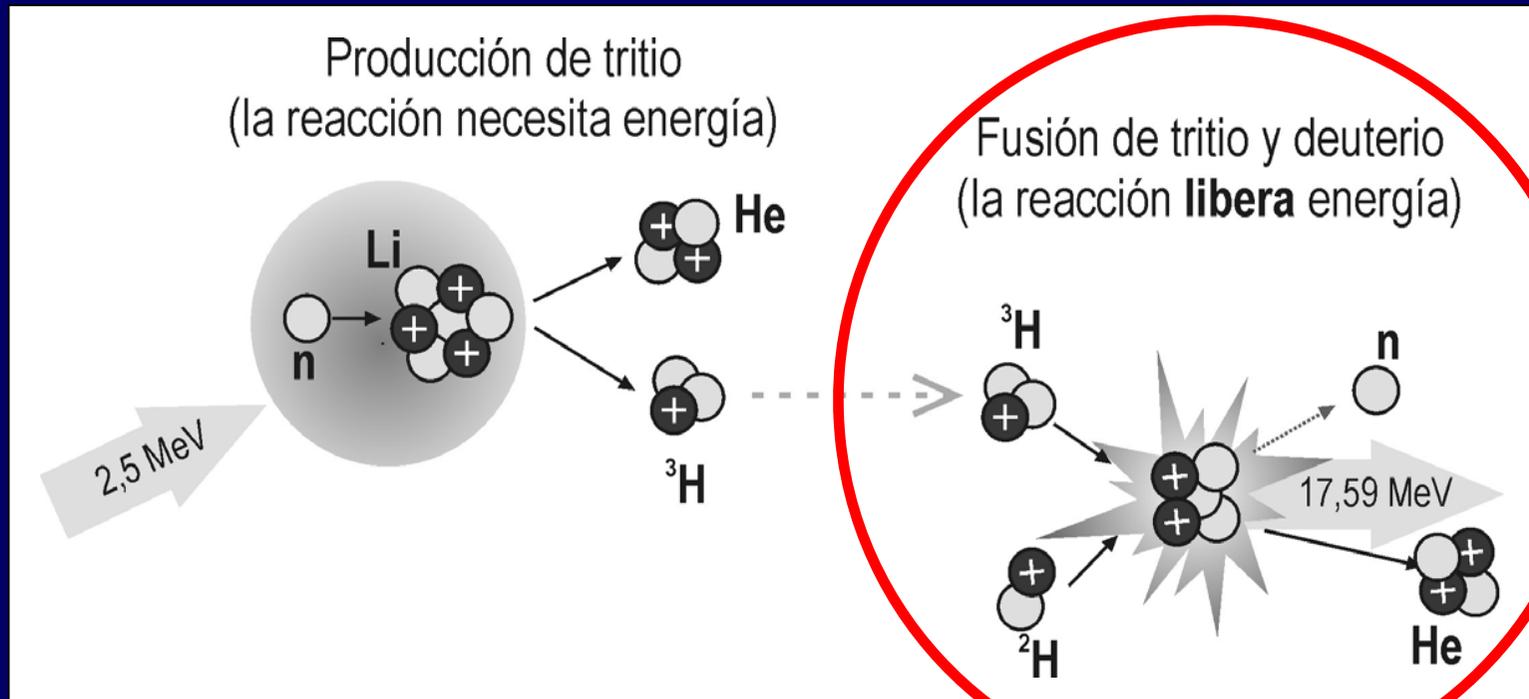
500 MW

$\frac{P \text{ producida}}{P \text{ consumida}} = 10$

## Deuterio + Tritio

$T = 10^8 \text{ K}$  ¡Mayor que en el núcleo solar!

$P = 10^{-5} \text{ Atm}$  ¡Muy baja presión!



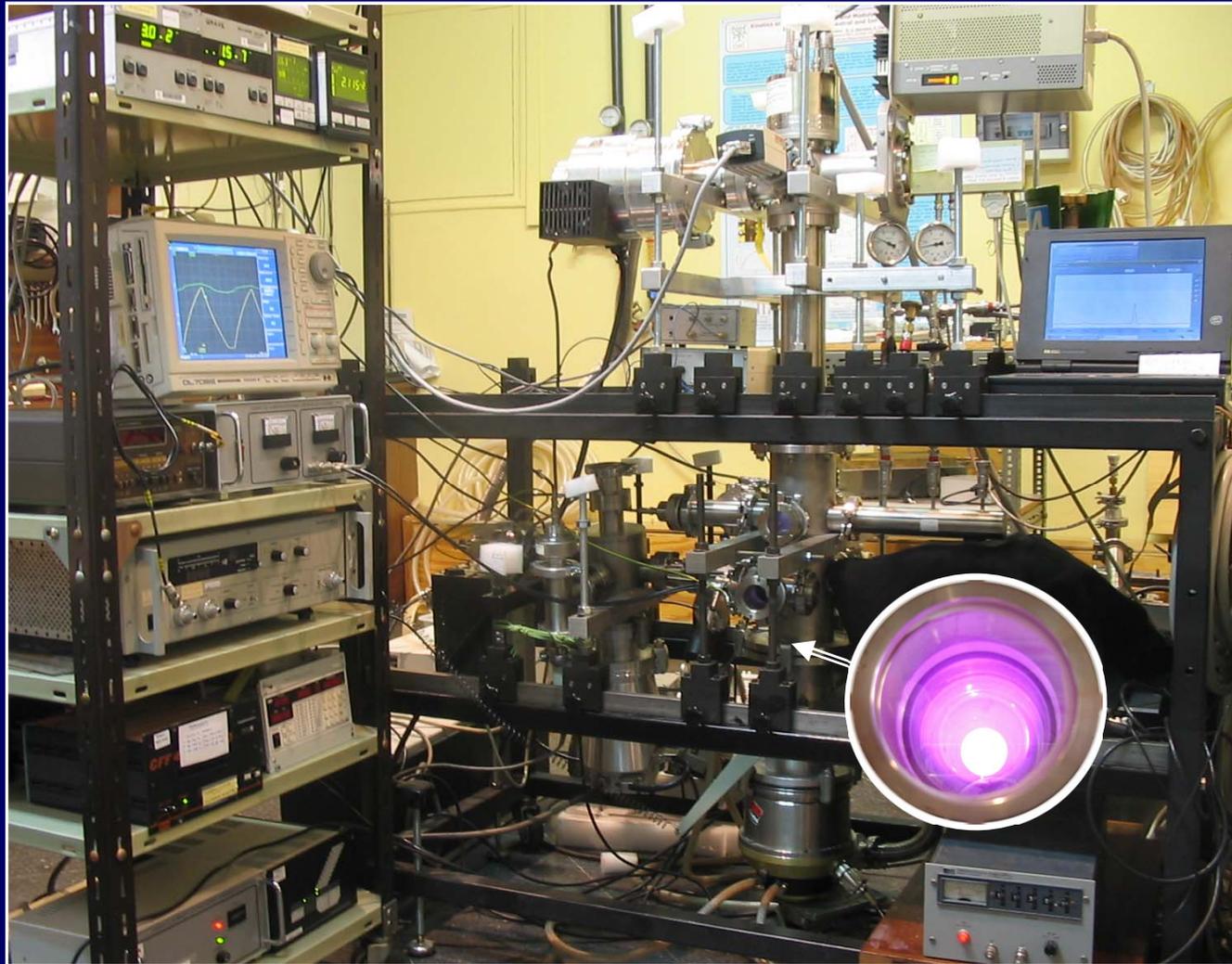
*Consumo de combustible por persona  
de un país industrializado en toda su vida:  
10 g D ( en  $0,5 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$  ) + 30 g Li*

## Consideraciones Finales

*Los plasmas constituyen  
la mayor parte del Universo conocido ( > 99% ),  
con manifestaciones extraordinariamente  
luminosas, interesantes y bellas.*

*Los plasmas en nuestro planeta  
representan un papel  
cada vez más importante  
para el desarrollo científico y tecnológico.*

¡Muchas gracias por su atención!



Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM - CSIC