

# *PLASMA , El Cuarto Estado de la Materia*

*Isabel Tanarro*

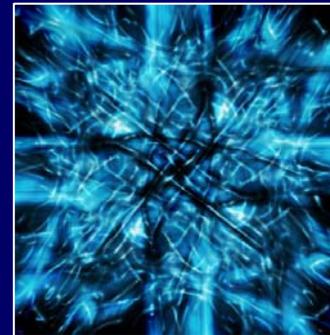
*Dpto. de Física Molecular  
Inst. Estructura de la Materia*

<http://hdl.handle.net/10261/42203>



# Esquema de la presentación

- 1 Introducción y concepto de Plasma
- 2 Procesos más importantes en el interior del Plasma
- 3 Plasmas en la naturaleza
- 4 Aplicaciones tecnológicas de los Plasmas



*Demostraciones Experimentales*

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



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

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



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



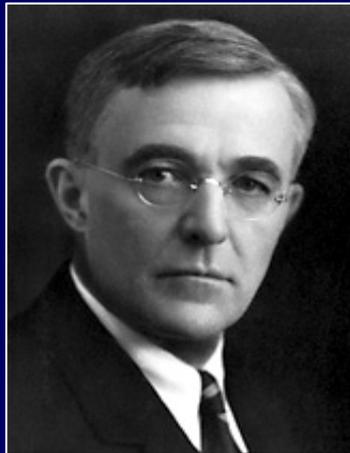
**“CUARTO ESTADO DE LA MATERIA”**

# ¿QUÉ ES EL PLASMA?

*Diccionario de la RAE*

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

*( iones  $+/-$ , electrones  $-$  )*



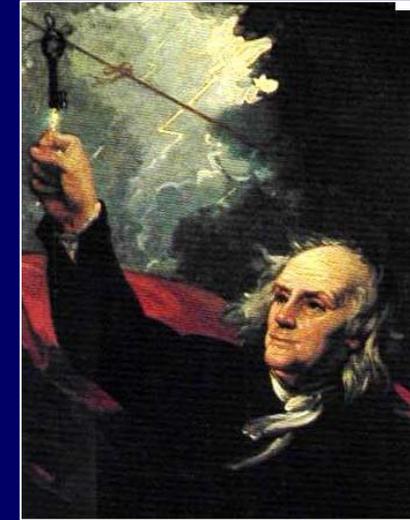
*Denominado Plasma por 1ª vez en 1920  
por Irving Langmuir, Nobel de Química (1932).*

## PRIMEROS ESTUDIOS DE PLASMAS

Benjamin Franklin (1752) :

*Experimento del rayo y la cometa*

*⇒ origen eléctrico del rayo.*

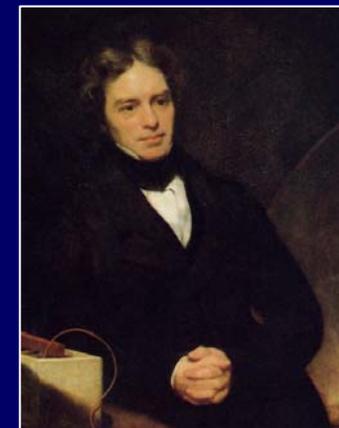


B. Franklin

Michael Faraday (1820):

*Descargas en arco: al bajar la presión*

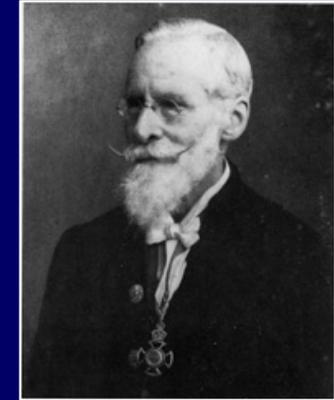
*pasaban a emitir una luz difusa.*



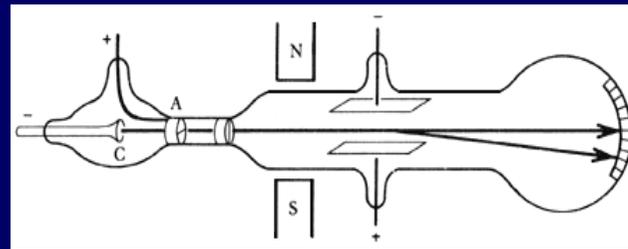
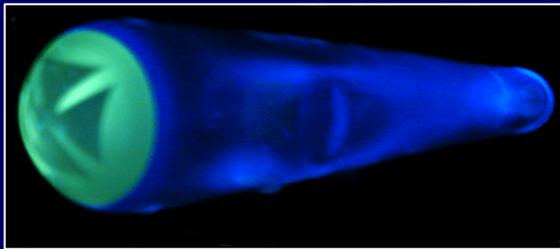
M. Faraday

## William Crookes (~1880):

*Estudio de descargas eléctricas a baja presión.  
Nombró al plasma "GAS RADIANTE".  
Identificó unas partículas en el plasma,  
que llamó rayos catódicos (electrones).*

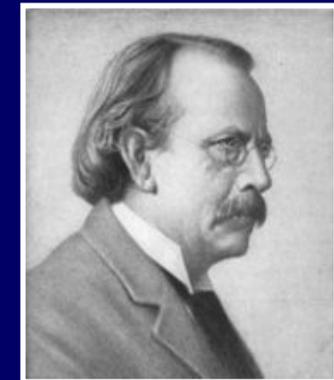


W. Crookes



## Joseph J. Thomson (~ 1897):

*Desviación de rayos catódicos con campos  
electromagnéticos (origen del televisor) ⇒  
Carga del electrón y su procedencia del interior  
del átomo. Primer modelo atómico.*



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

## *¿Cómo generar un Plasma?*

*Descargas eléctricas en gases a baja presión*

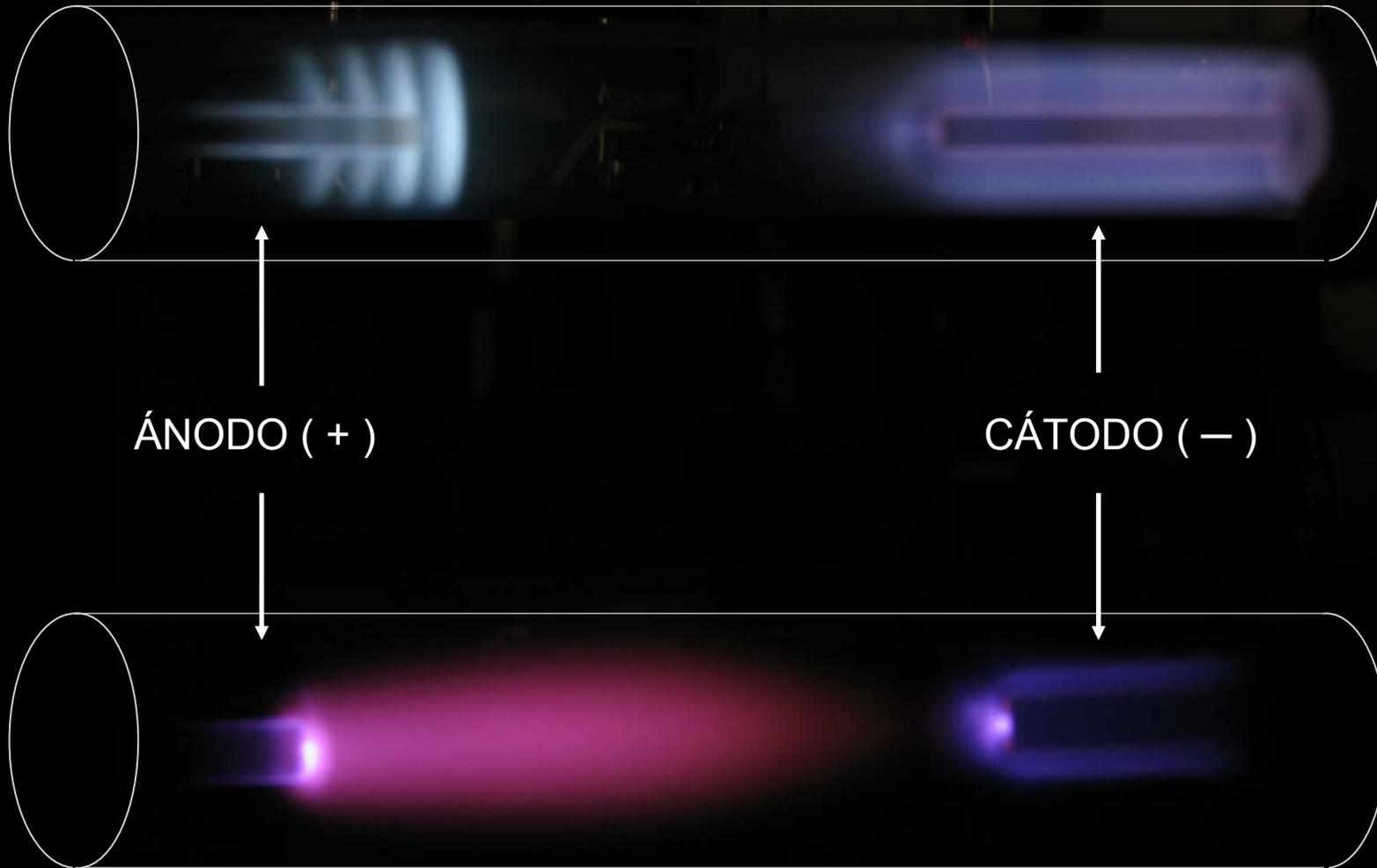


Célula de Descarga  
y Bomba de Vacío  
(1880)

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

*Baja Presión  $\approx 0.001\text{ Atm} \approx 25 \times 10^{15}\text{ moléculas/cm}^3$*

*Aspectos de un plasma de aire  
en un tubo de descarga.*



ÁNODO (+)

CÁTODO (-)

## Clases de Materia

*La clasificación de los cuatro elementos clásicos griegos*

*Tierra, Agua, Aire, Fuego*

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



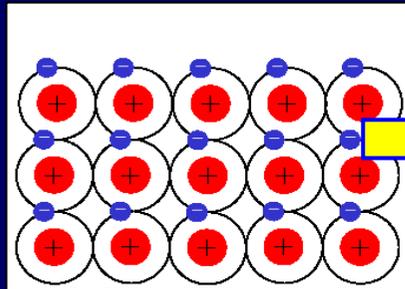
*También aparece en otras culturas,  
como el Budismo o el Hinduismo*

Actualmente ...

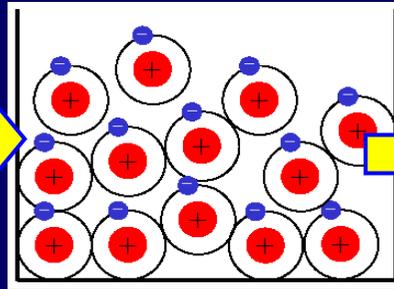
## ESTADOS de AGREGACIÓN



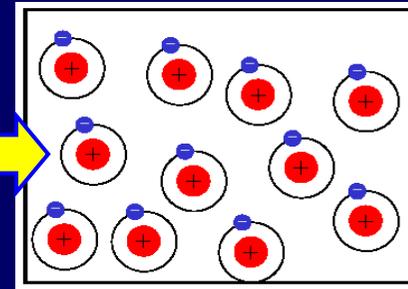
**SÓLIDO**



**LÍQUIDO**

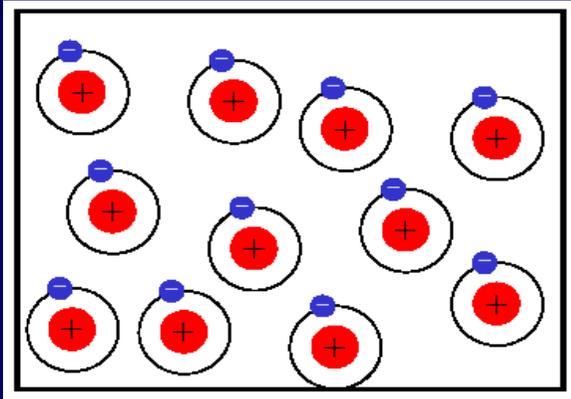


**GAS**

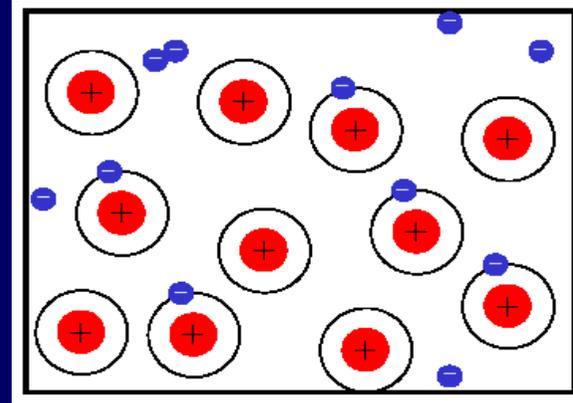


*Aporte de Energía Calorífica ⇒  
Aumento de Temperatura*

## GAS



## PLASMA



*Más Energía*



*Ionización*



*Eléctrica  
Térmica  
Luminosa  
Química  
Nuclear*

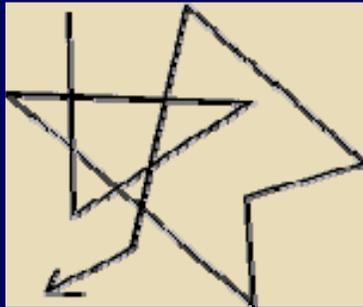
**Cargas Libres** ⇒

*¡ Al contrario que el Gas,  
el Plasma es buen  
conductor eléctrico !*

## Otras diferencias entre Gases y Plasmas

### GASES

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



*Partícula neutra  
( choques individuales )*

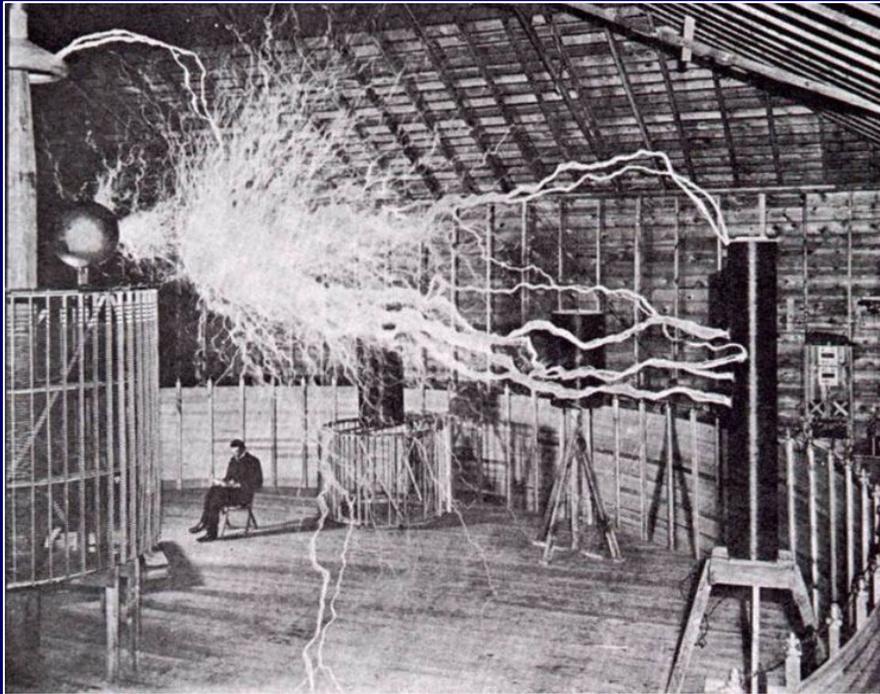


*Carga eléctrica  
( acción a distancia )*

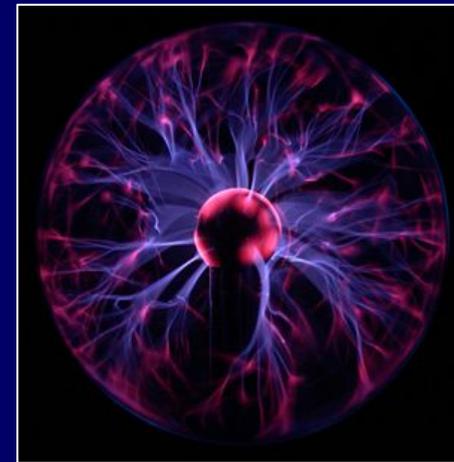
### PLASMAS

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

# Bolas de Plasma



*Inventadas por Nicola Tesla (1894)*



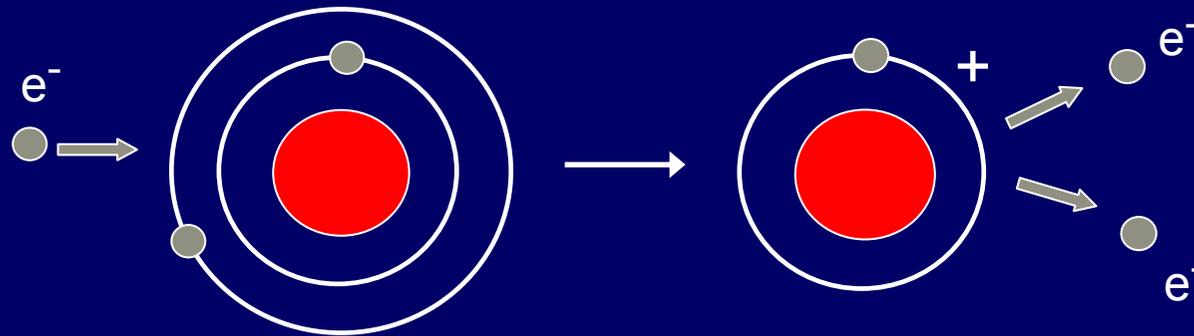
*B. Parker, MIT  
(1990)*

## 2ª Parte

# PROCESOS MÁS IMPORTANTES EN UN PLASMA

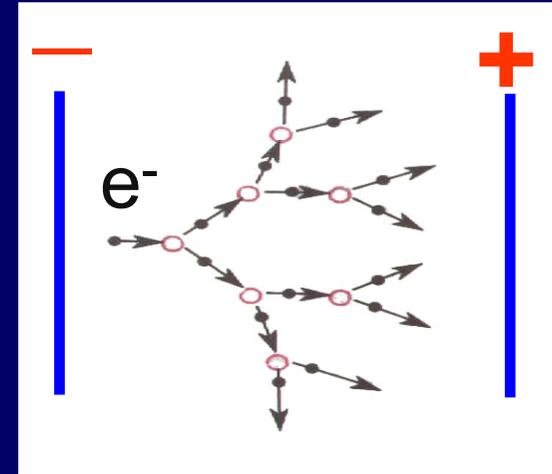
## 1. Ionización

Fenómeno desencadenante del plasma.



## 2. Como consecuencia ...

- 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.

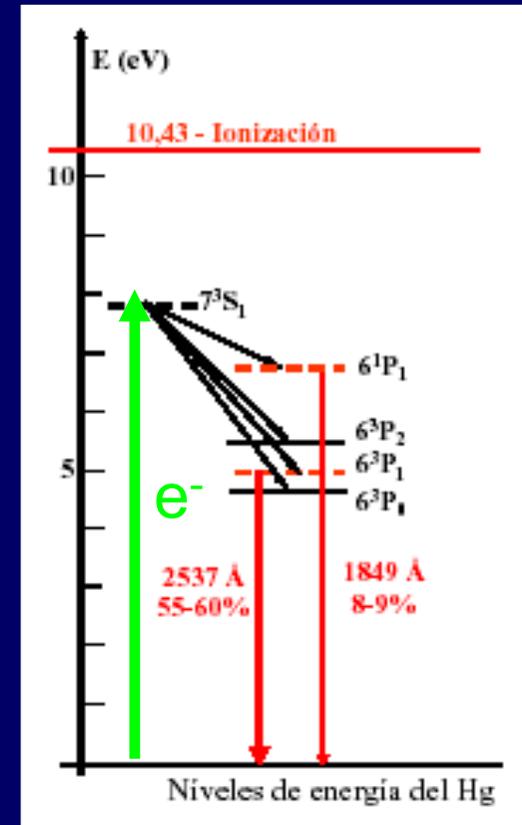


### 3. Otros procesos

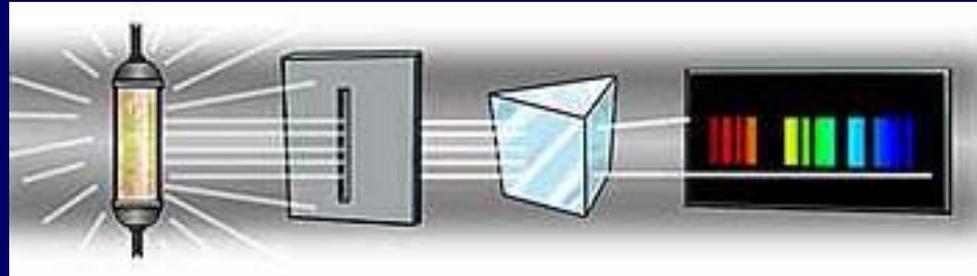
- Excitación atómica interna por impacto electrónico

*¡ Solo con electrones de energías bien definidas !*

- Desexcitación y emisión de fotones de energías concretas.



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



## Espectros de Emisión

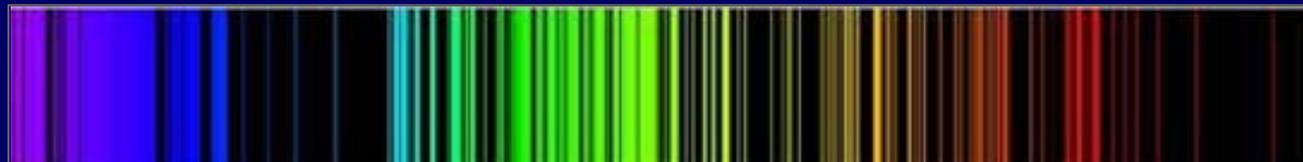
H



Au

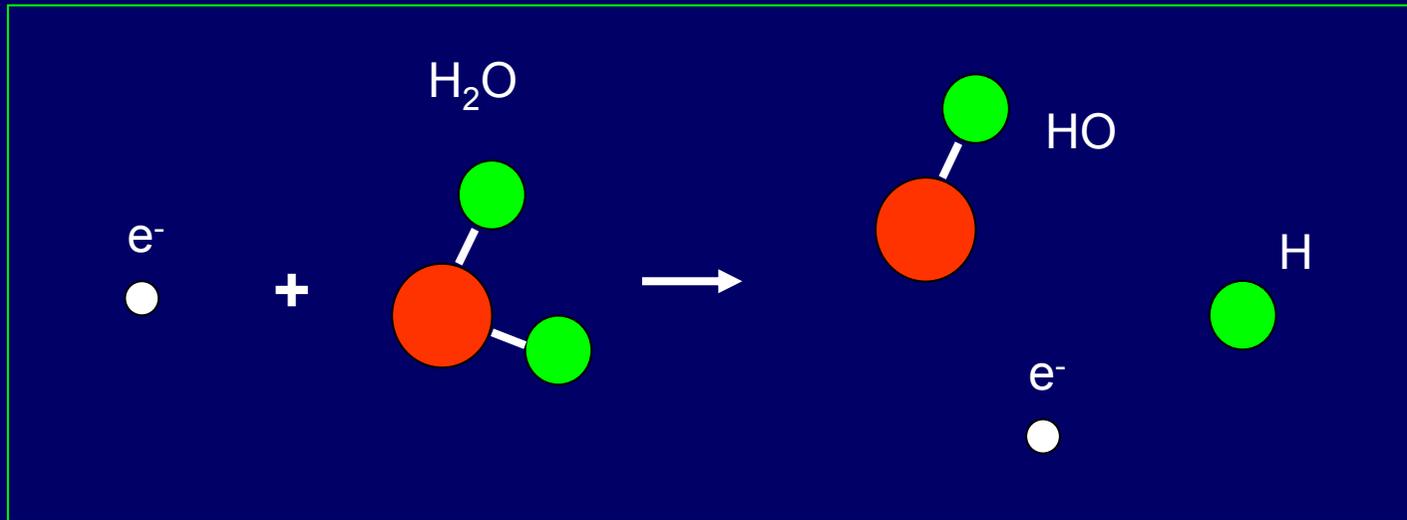


Fe



*Energías discretas : Fundamento de la Física Cuántica*

- **Disociación molecular**



*Las moléculas se rompen liberando átomos y radicales  
que reaccionan químicamente  
y forman con rapidez nuevas especies*

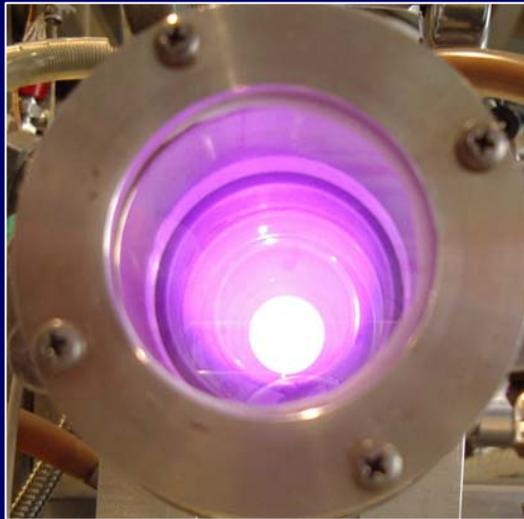
*En vapor de  $H_2O$  se forman  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$*

**Plasma: ¡ MEDIO MUY REACTIVO QUÍMICAMENTE !**

- **Reacciones con las superficies**

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

*A su vez, algunas partículas del plasma se incrustan o depositan en las superficies.*



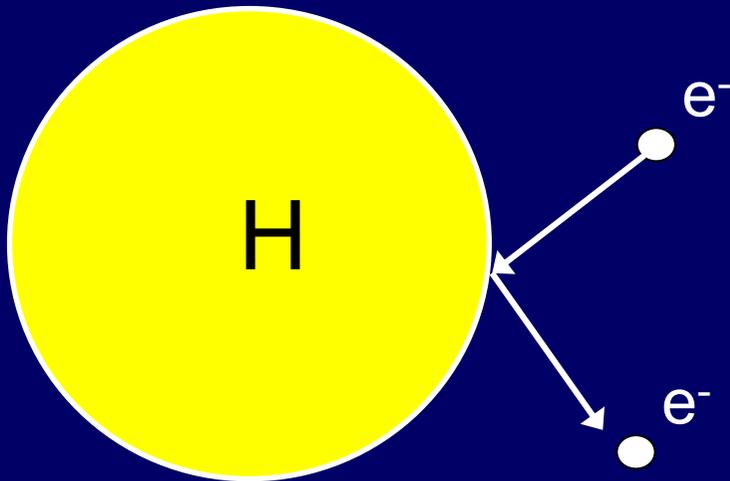
Reactor de plasma



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

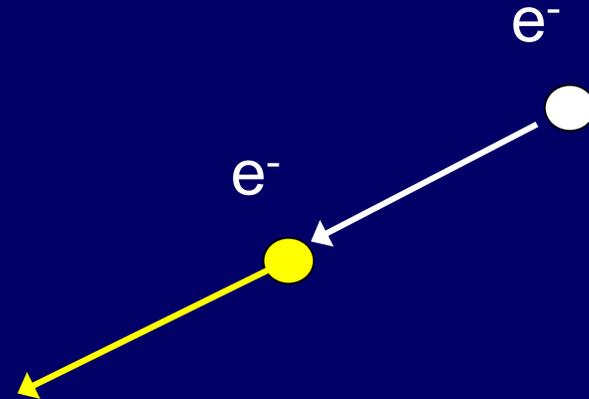
*Laboratorio de Plasmas Fríos, CSIC*

¡Pero en Colisiones Elásticas entre los ligeros electrones  
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<sup>-</sup> + H

$$m_e \sim M_H / 1800$$



Choque e<sup>-</sup> + e<sup>-</sup>

igual masa :  
el intercambio de  
energía es máximo

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

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



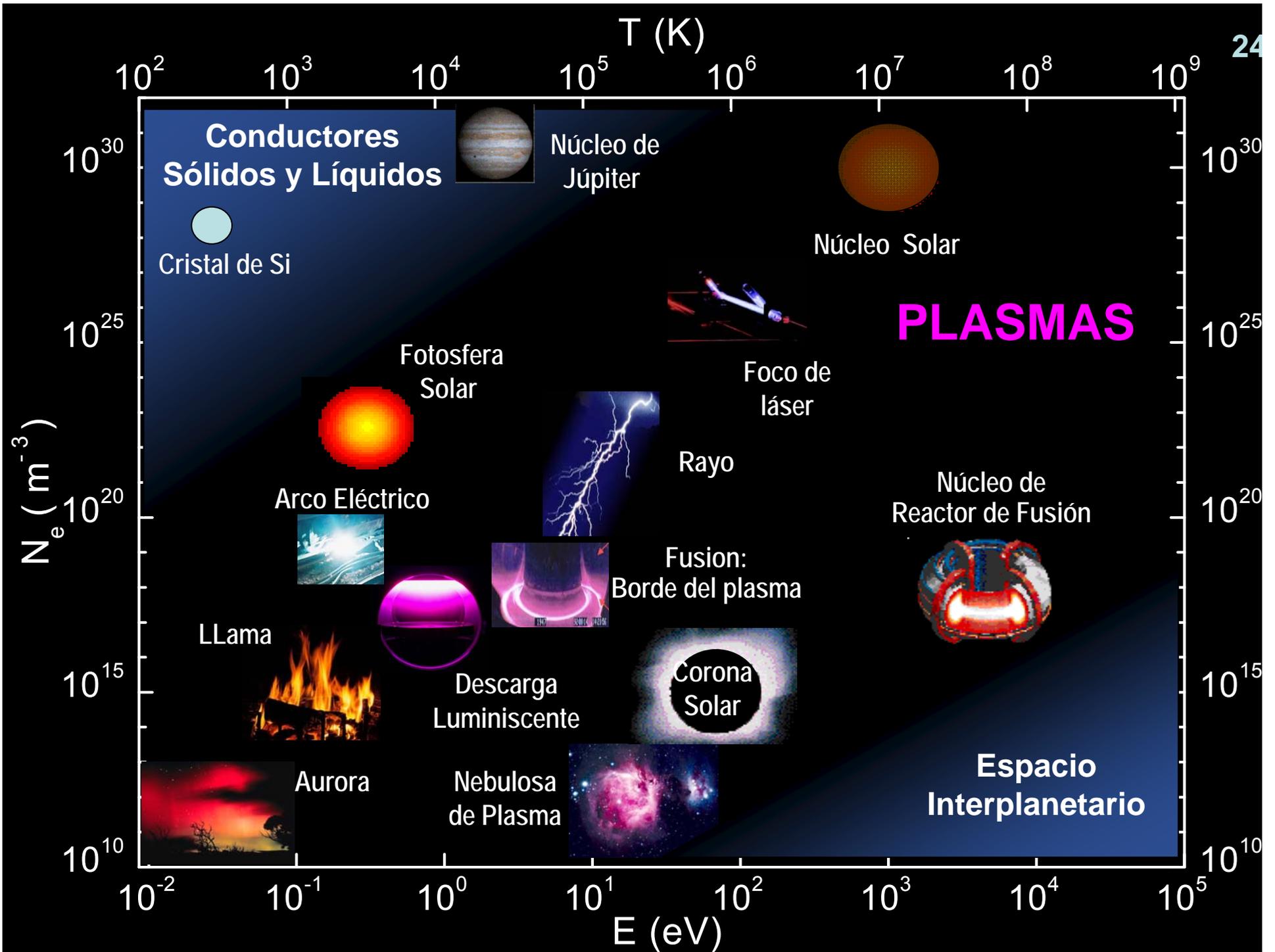
$$T_e = 30.000 \text{ K}, T_{\text{gas}} = 300 \text{ K}$$

¡ bajo grado de ionización !

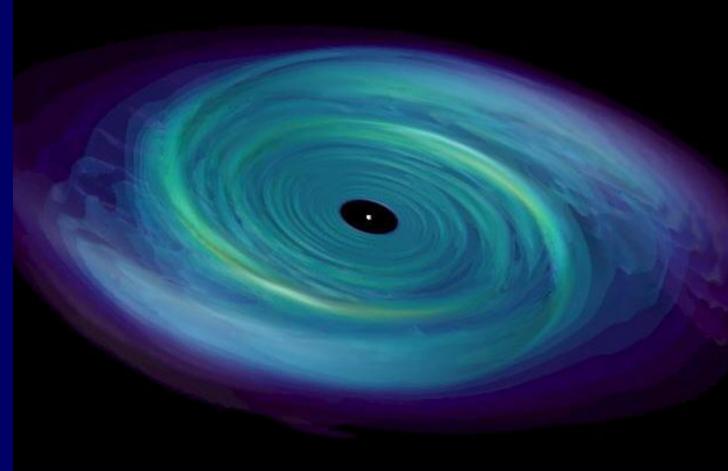
*Al aumentar el grado de ionización,  
la temperatura electrónica y del gas se igualan.  
( Fluorescentes vs. Descargas en Arco )*

## Magnitudes más importantes del Plasma

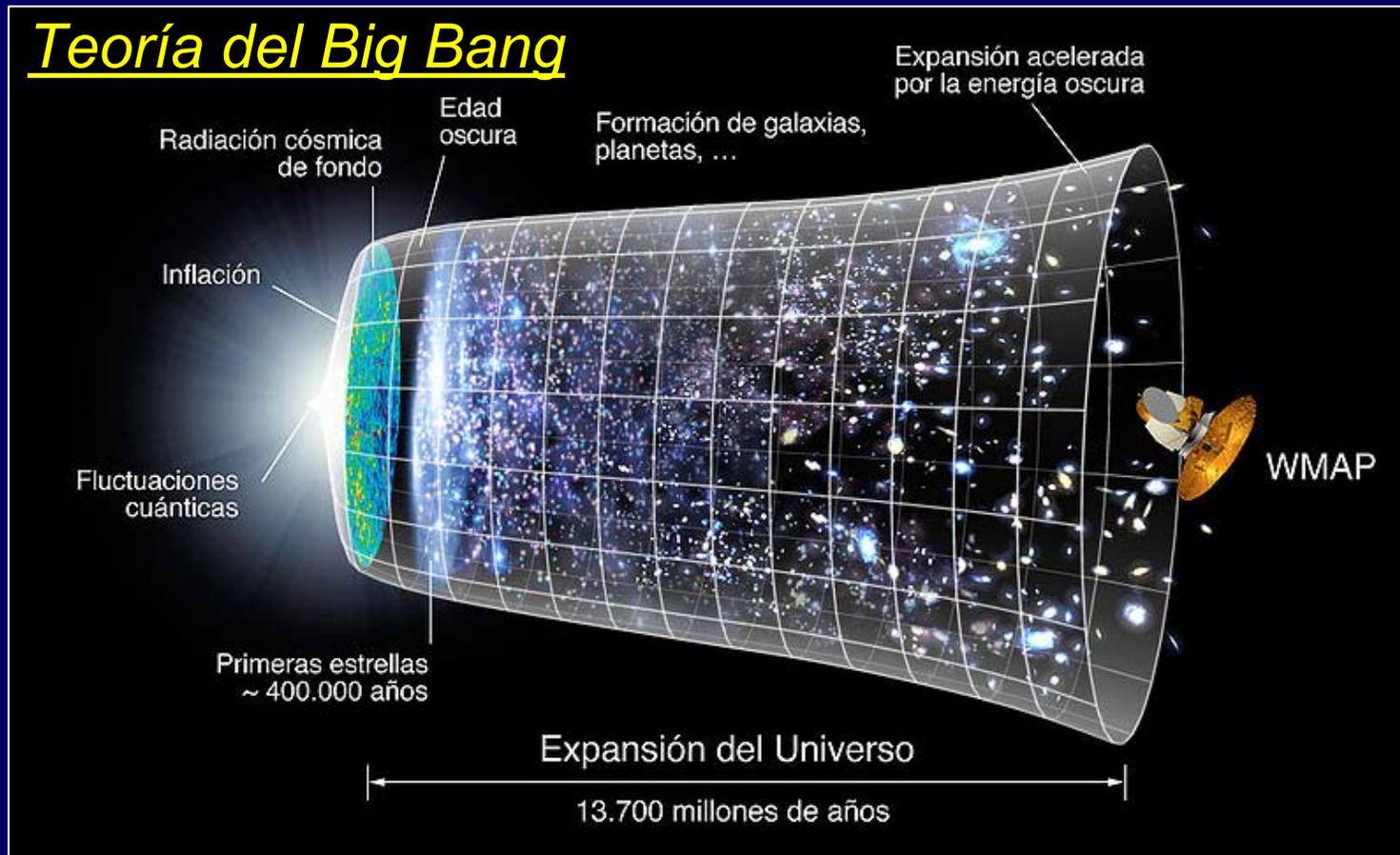
- **Densidad de carga eléctrica libre**
- **Temperatura electrónica**



# 3ª Parte : PLASMAS en la NATURALEZA



## Teoría del Big Bang



**100 s,  $10^9$  K** → Nucleosíntesis ( $^2\text{D}^+$ ,  $^3\text{He}^+$ ) +  $^1\text{H}^+$  +  $e^-$  → *PLASMA*  
Radiación atrapada en el denso plasma primigenio.

**380.000 años** → Recombinación de núcleos y electrones → Átomos.

**3.000 K** Desacoplo Luz – Materia ⇒

Radiación de fondo cósmico MW ( 2,7 K - 160,2 GHz)

## Nebulosas (Universo Actual)



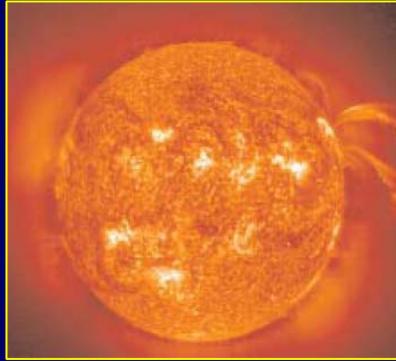
*Nebulosa de Orión*



*Zona de formación de estrellas  
en la Nebulosa del Águila*

- Regiones de enorme masa ionizada muy dispersa, que se aproximan por gravedad y se calientan hasta formar nuevas estrellas.
- Abundantes moléculas: juegan un papel importante en la formación estelar. Algunas, muy exóticas y de hasta 200 átomos.
- Algunas de estas especies solo pueden reproducirse en Tierra mediante descargas eléctricas.

# El Sol

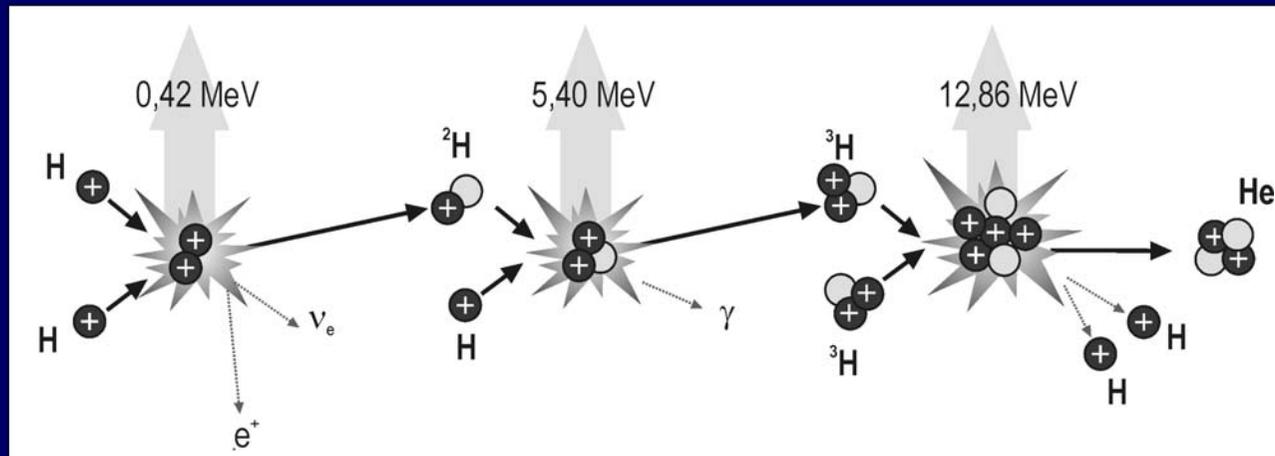


$T = 6.000 \text{ K}$  en la corteza  $\Rightarrow$  luz blanca

¡Núcleo: Gas totalmente ionizado!:  $T = 15 \times 10^6 \text{ K}$

Densidad  $\approx 10$  veces la del Pb ( $160 \text{ g/cm}^3$ )

*Edad:  $4,5 \times 10^9$  años. Hasta el S. XX se le atribuía una edad mucho menor ( $\sim 10^7$  años, S. XIX, W. Thomson)*



*Procesos de Fusión Nuclear*

*H. Bethe (1.938)*

*P. Nobel (1.968)*

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

*Sobre la Tierra inciden  $\sim 500 \text{ W / m}^2$*

*Pero el Sol pesa  $3 \times 10^{15} \text{ MTm} \Rightarrow$  Rendimiento global  $\approx$  ¡  $5 \text{ TM / W!}$*

# Ionosfera Terrestre

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

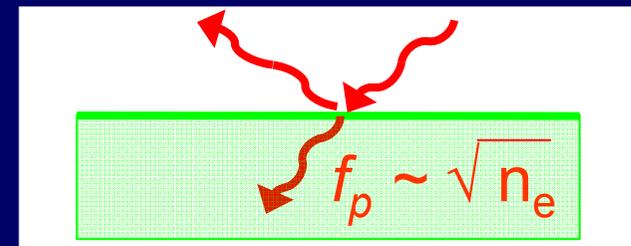
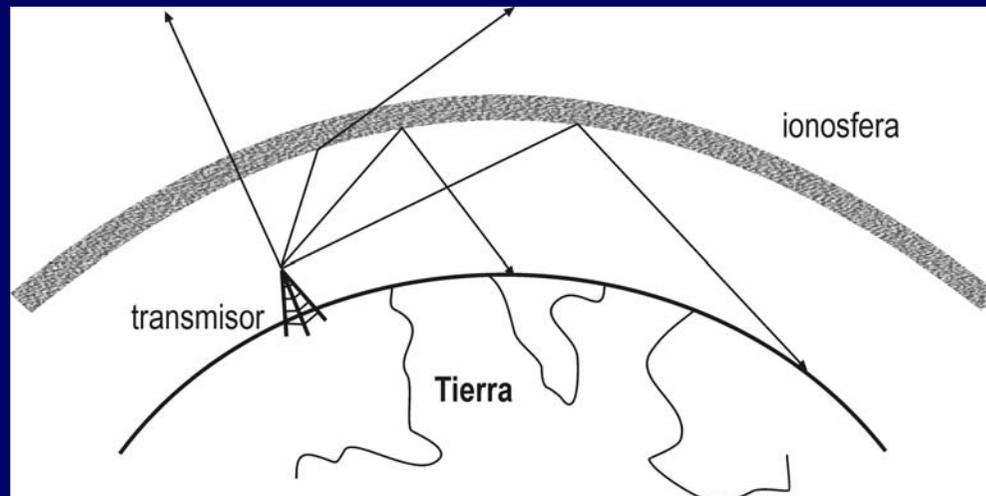
*Baja Ionización  $\lt 1/1000$*

*Altitud  $\sim 60 - 1000$  km*

**Descubierta por Marconi en 1.901 :**

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

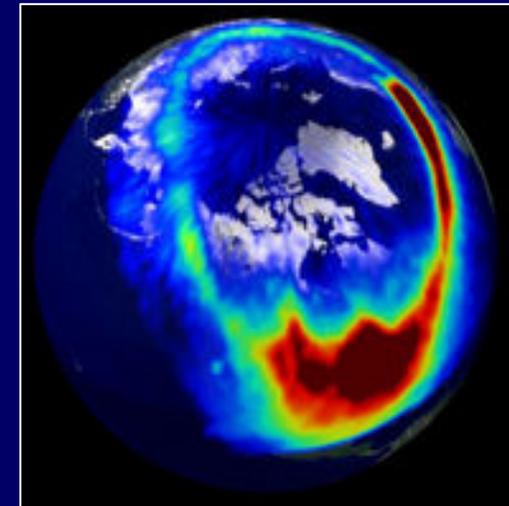
*Como los metales, los plasmas, conductores,  
reflejan radiaciones de ciertas frecuencias*



# Auroras Boreales y Australes

Interacción entre viento solar y magnetosfera terrestre ( $R \sim 60.000 \text{ km}$ )  
Mas intensas cada 11 años : ciclo de tormentas solares.

Altitud  $> 100 \text{ km}$  ( Ionosfera )  
Latitud  $> 60^\circ$  (norte, sur)  
Fluctuaciones rápidas



# Rayos

*B. Franklin (1752), N. Tesla (~1900)*

<i>Voltajes</i>	<i>~ 1.000 MV</i>	} <i><math>P &gt; 10^{12} W!</math></i>
<i>Corrientes</i>	<i>~ 10.000 A</i>	
<i>Duración</i>	<i>~ 10 <math>\mu s</math> - 100 ms</i>	

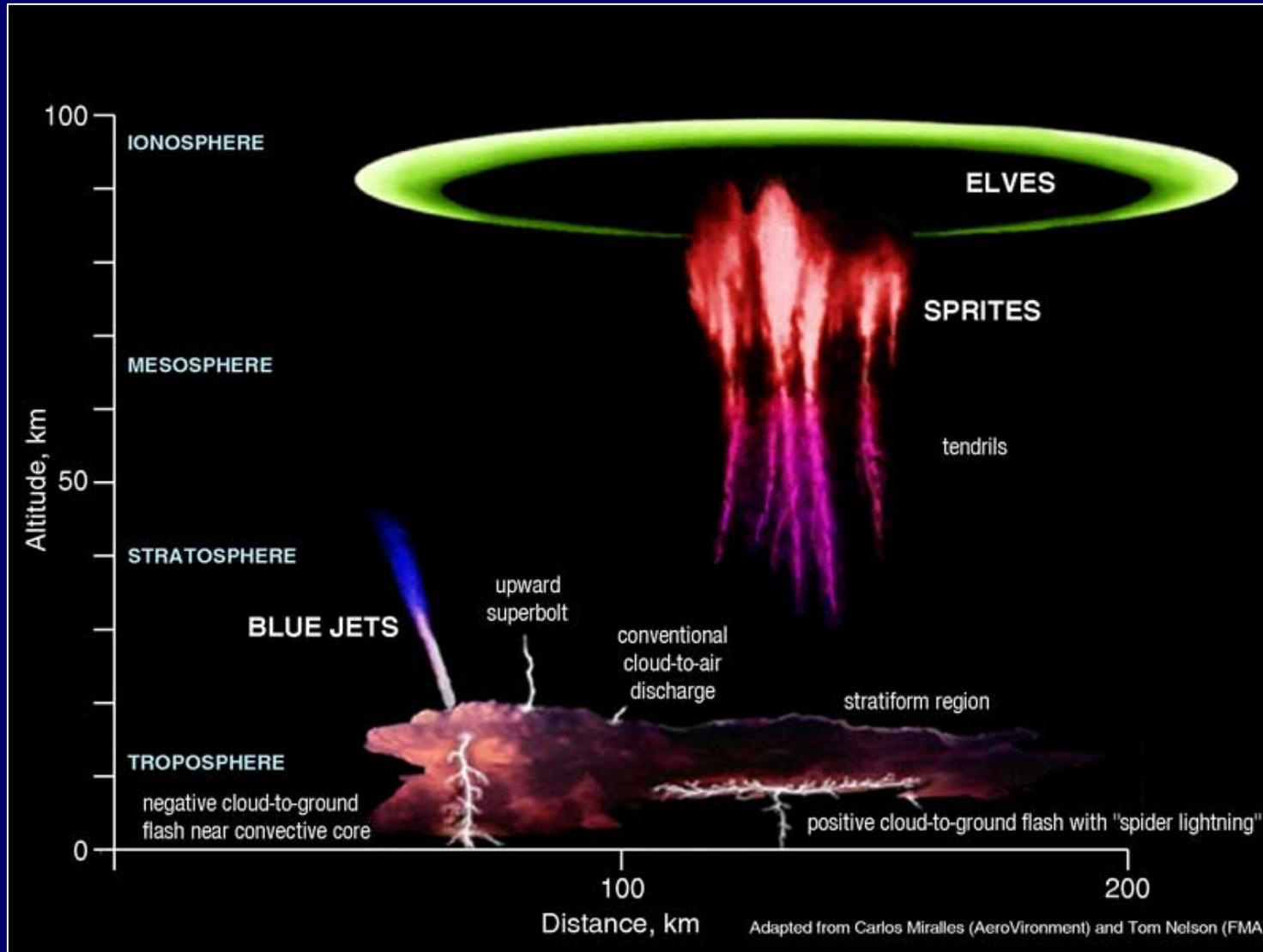
*Muy alta ionización (~100%)*

*Temperatura ~ 30.000 K*



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

Observados accidentalmente por primera vez en 1989.  
NASA Space Shuttle 1990.



# Llamas

*Baja ionización ( $\sim 10^{-9}$ ),  $T \sim 2000\text{ K}$*

*Predominio de Reacciones Químicas por Combustión*

*Especies producidas:  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  ...*

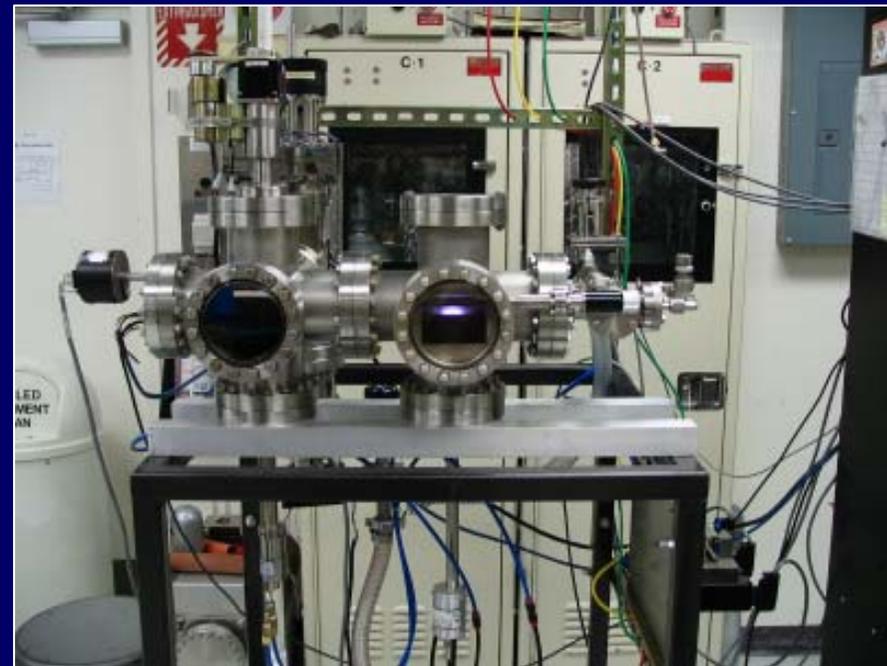
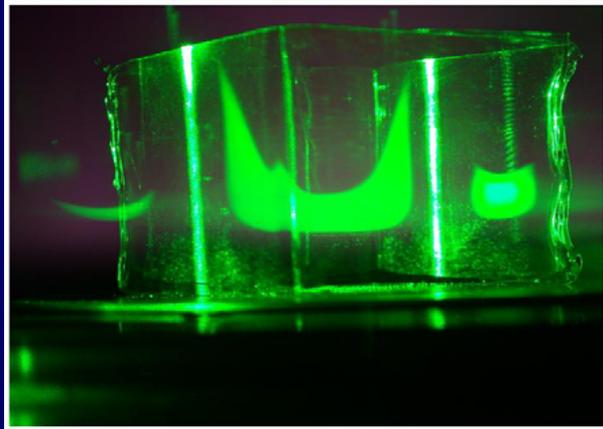


*Conducen la Electricidad*

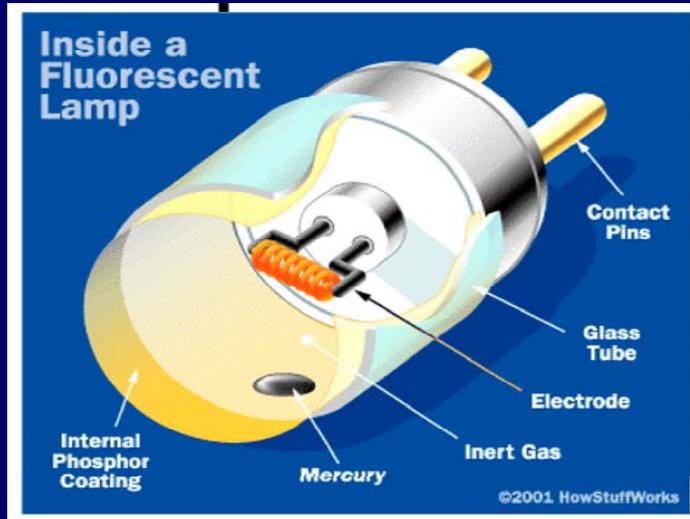
*1ª referencia: Academia de Ciencias de Florencia (1667)*

## 4ª Parte

# APLICACIONES TECNOLÓGICAS

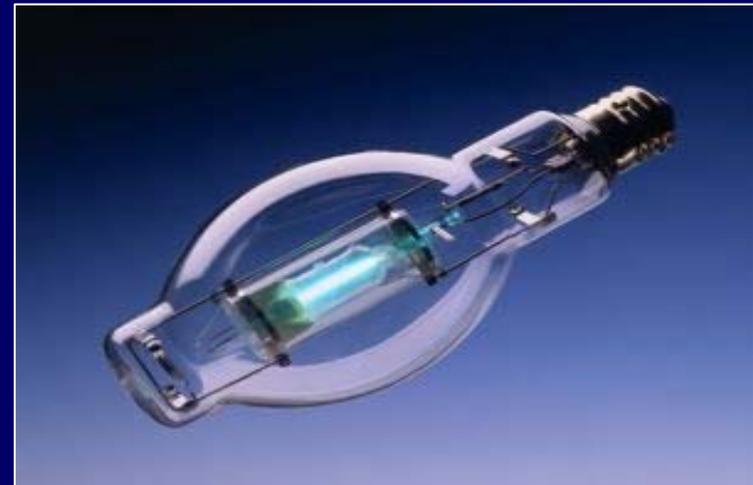


# Iluminación por Plasma



*Lámparas fluorescentes  
de bajo consumo*

*Lámparas de Arco  
de Alta Intensidad*



# Esterilización por Plasmas Fríos

*Aplicaciones médicas...*

*envases de alimentos...*

*materiales que no soportan  
altas temperaturas.*

*Doble acción bactericida:*

- *Radiación ultravioleta.*
- *Radicales fuertemente oxidantes.*

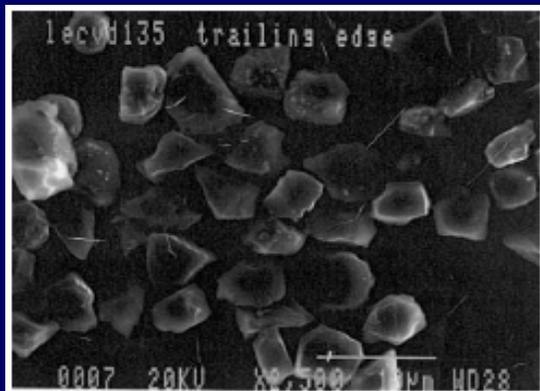


Catéteres para diálisis  
y tubos de ensayo  
de materiales plásticos

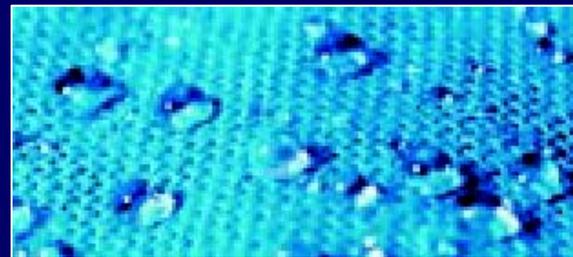
# Cambios superficiales de materiales

## Notable mejora de sus propiedades

*Dureza, 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,  
repelen la humedad  
y las grasas

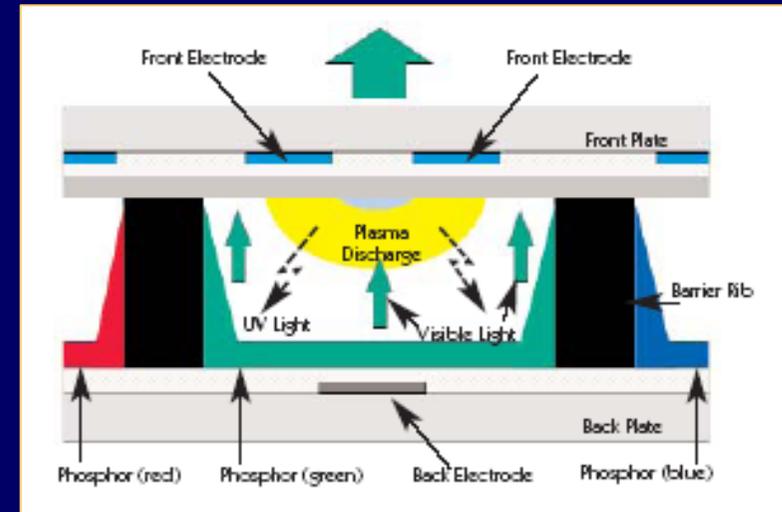


Prótesis metálica de  
rodilla cubierta de  
material biocompatible

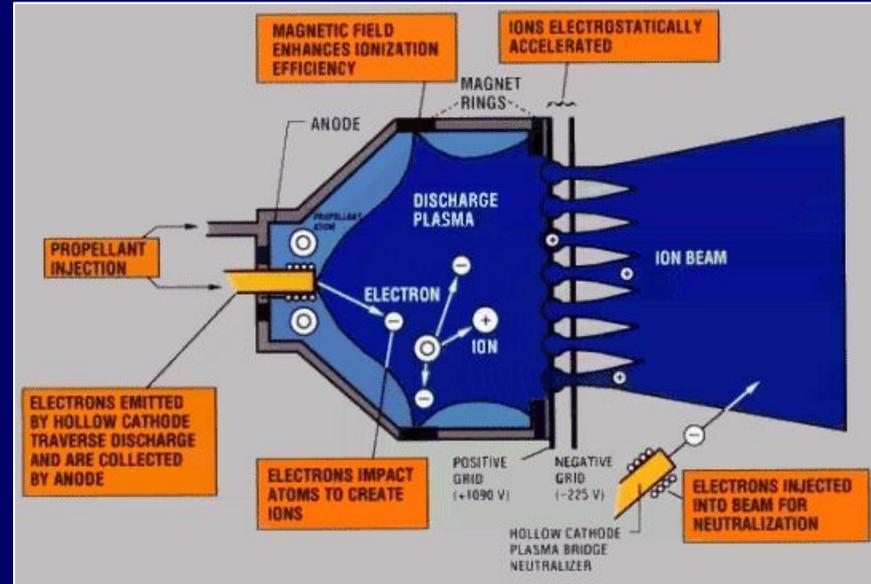
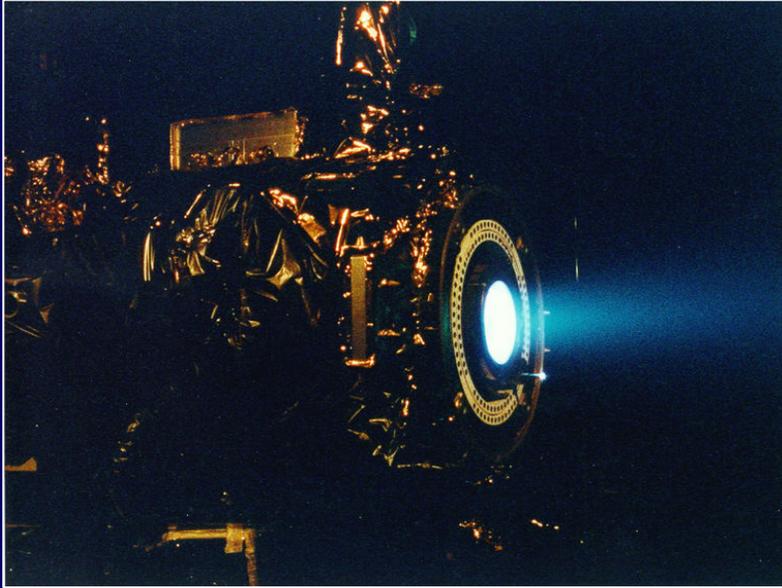




## Pantallas de Plasma



# Motores Iónicos para Propulsión Espacial

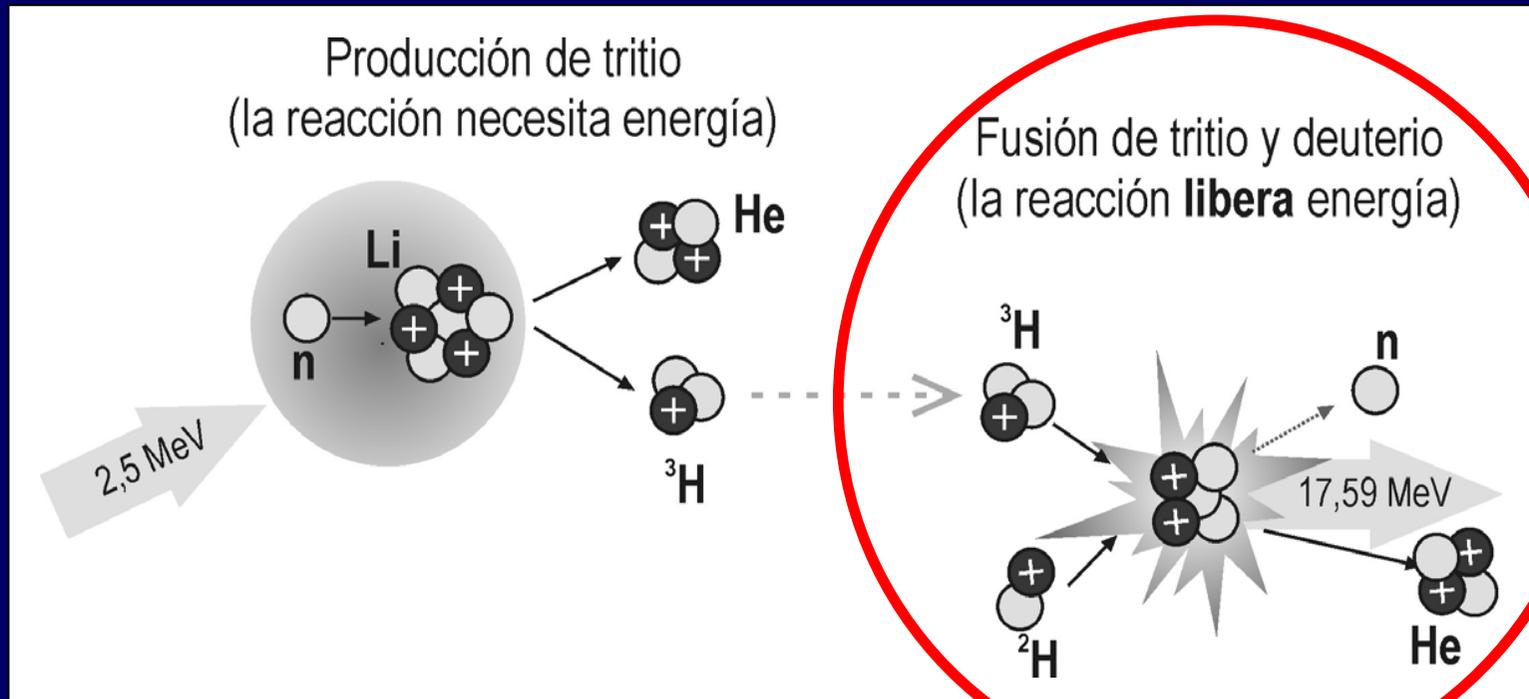


Se genera un plasma (Xe), los iones se aceleran en un campo eléctrico y se recombinan a la salida.

Sonda Lunar "Smart-1", ESA  
Tierra 2003 – Luna 2006,  
1/6 de combustible (combustión)

## Reactores de Fusión Termonuclear

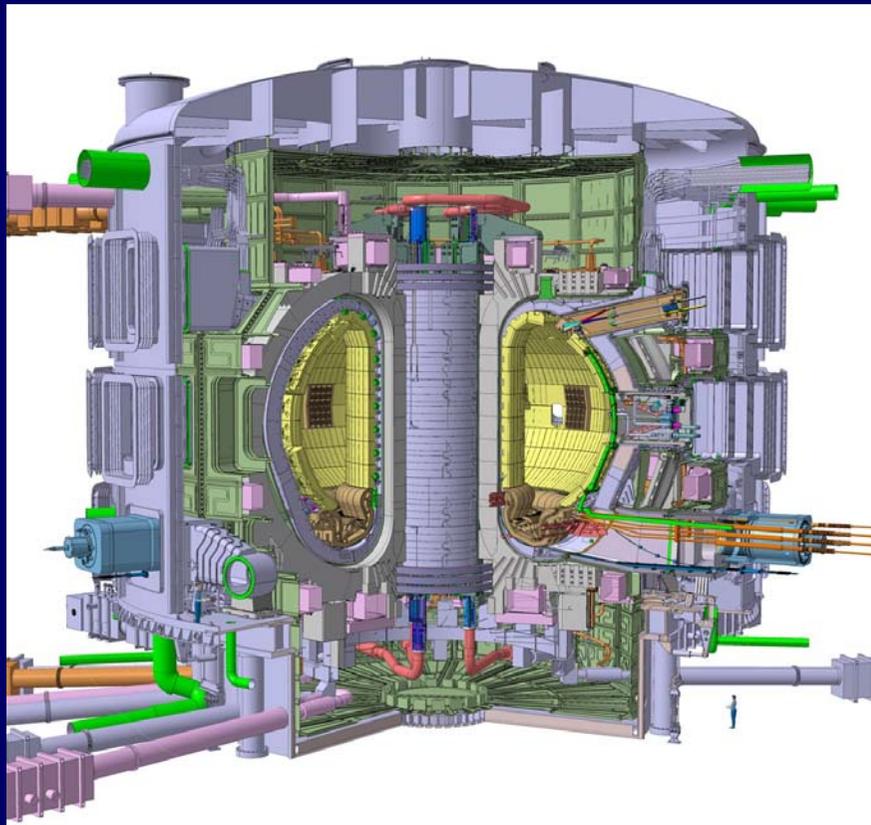
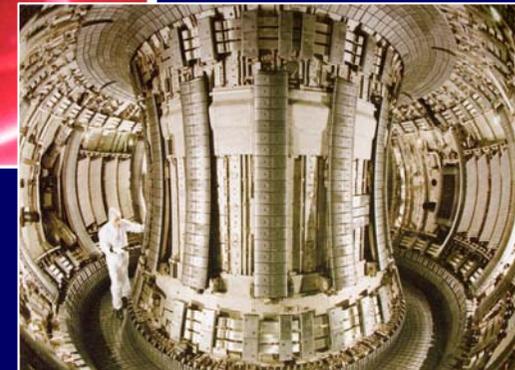
$T = 10^8 \text{ K}$  ¡Mayor que en el núcleo solar!  
 $P = 10^{-5} \text{ Atm}$  ¡Muy baja presión!



*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*

# Fusión por Confinamiento Magnético

Reactor tipo Tokamak  
“Joint European Torus”  
(J.E.T) ⇒



ITER

500 MW

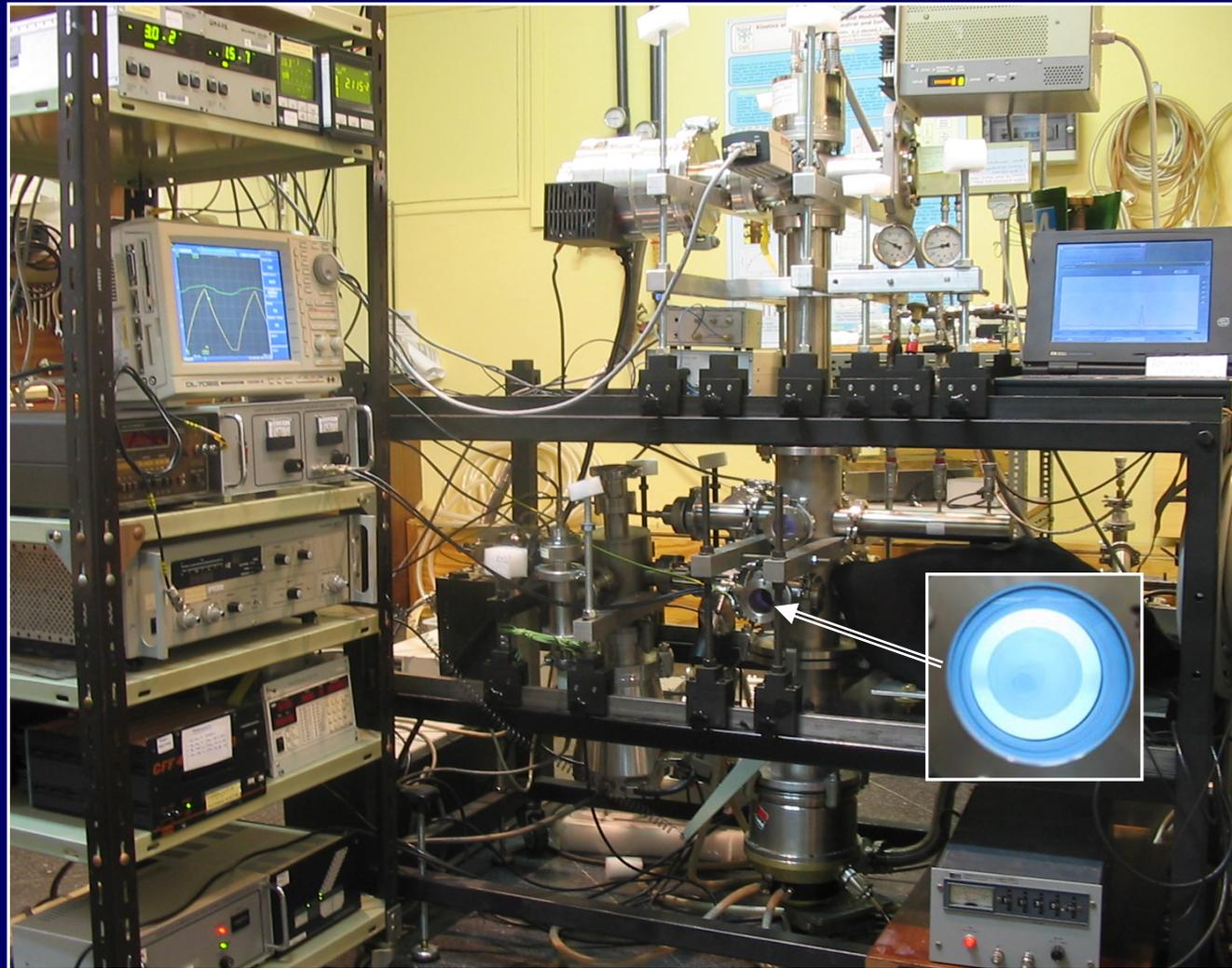
Ganancia en P = 10 (~2019)

## Consideraciones Finales

*Los plasmas constituyen la mayor parte de la materia conocida del Universo ( > 99% ), con formas extraordinariamente variadas, interesantes y bellas.*

*Con el desarrollo científico y tecnológico actual, los plasmas representan un papel cada vez más importante en nuestras vidas.*

¡Muchas gracias!



Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM, CSIC

<http://hdl.handle.net/10261/42203>