

PLASMA , El Cuarto Estado de la Materia

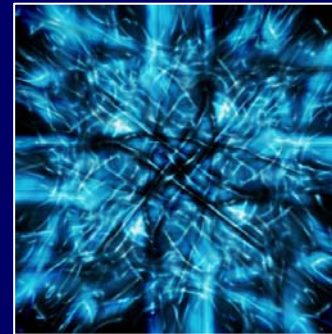
Isabel Tanarro

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



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.*



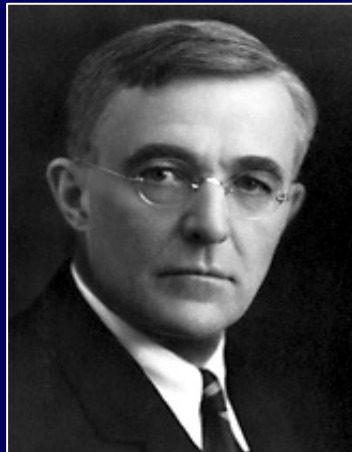
“CUARTO ESTADO DE LA MATERIA”

¿QUÉ ES EL PLASMA?

Diccionario de la RAE

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

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



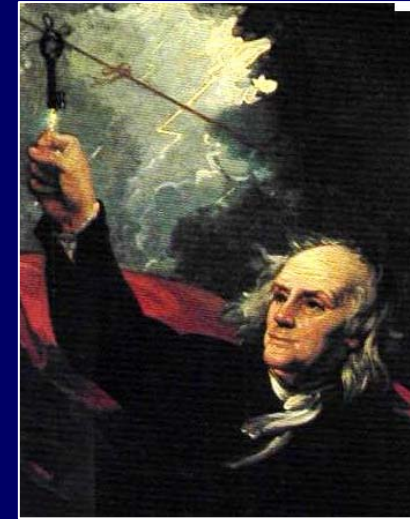
*Denominado Plasma por 1ª vez en 1920
por Irving Langmuir, Nobel de Química (1932).*

PRIMEROS ESTUDIOS DE PLASMAS

Benjamin Franklin (1752) :

Experimento del rayo y la cometa

⇒ origen eléctrico del rayo.

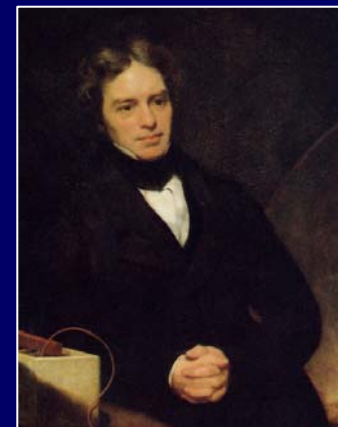


B. Franklin

Michael Faraday (1820):

Descargas en arco: al bajar la presión

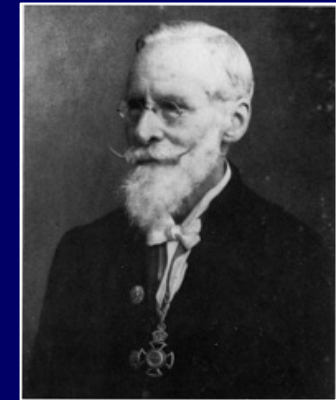
pasaban a emitir una luz difusa.



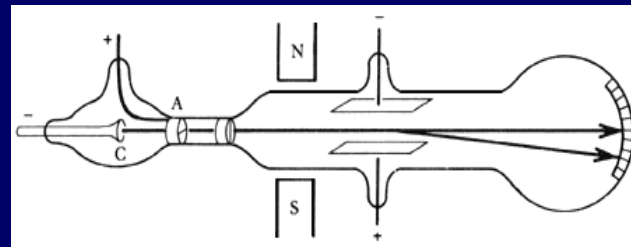
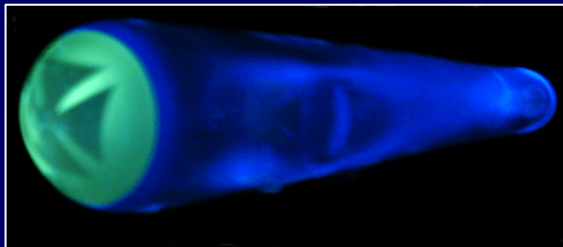
M. Faraday

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).*

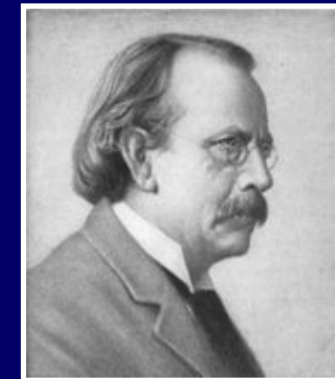


W. Crookes



Joseph J. Thomson (~ 1897):

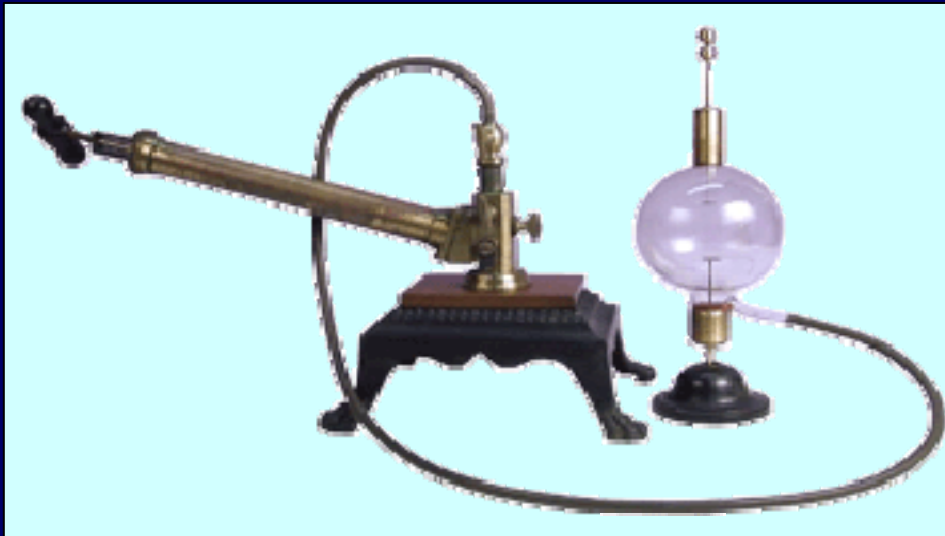
*Desviación de rayos catódicos con campos
electromagnéticos (origen del televisor) ⇒
Carga del electrón y su procedencia del interior
del átomo. Primer modelo atómico.*



J. J. Thomson
(P. Nobel Física 1906)

¿Cómo generar un Plasma?

Descargas eléctricas en gases a baja presión

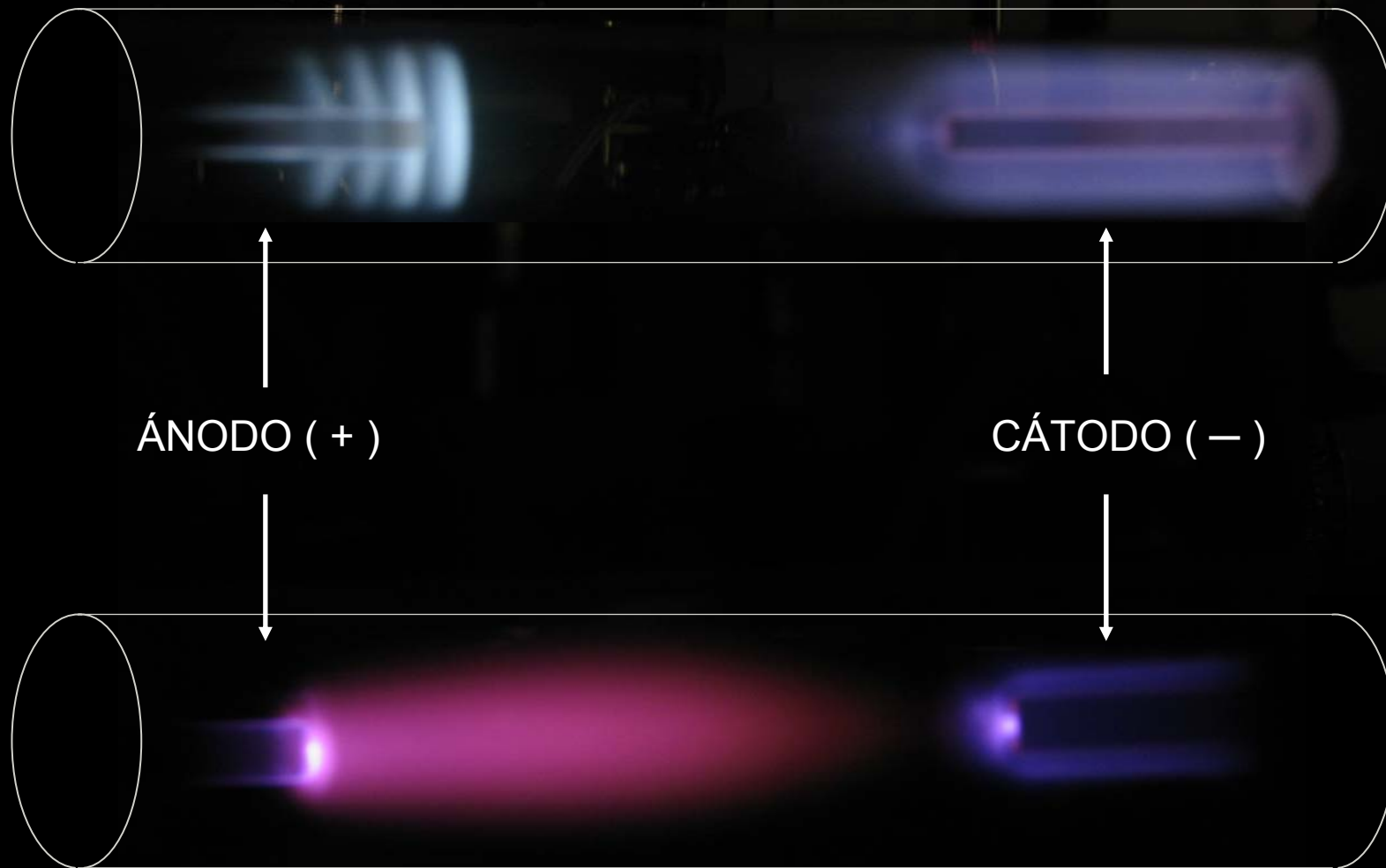


Célula de Descarga
y Bomba de Vacío
(1880)

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.



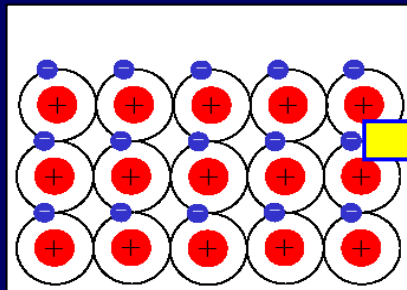
*También aparece en otras culturas,
como el Budismo o el Hinduismo*

Actualmente ...

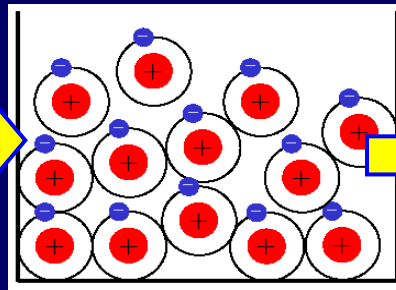
ESTADOS de AGREGACIÓN



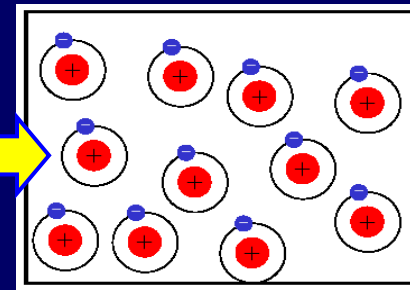
SÓLIDO



LÍQUIDO

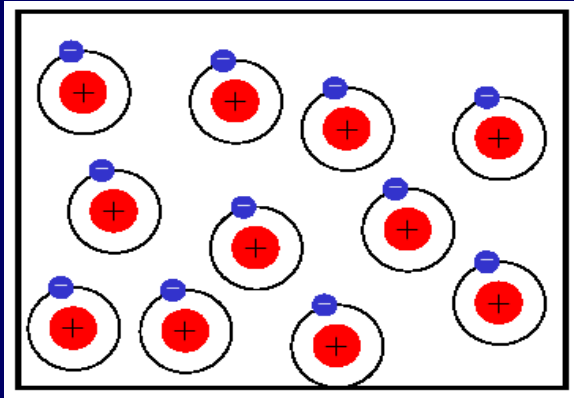


GAS

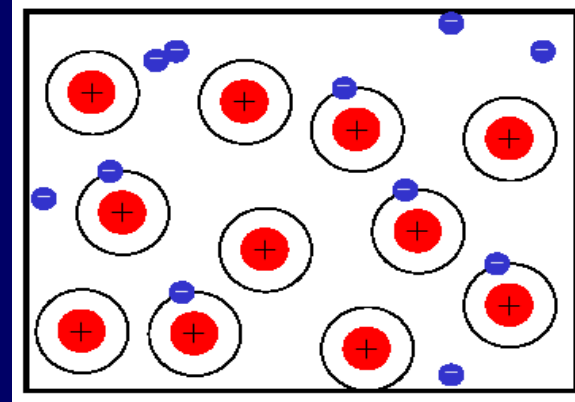


*Aporte de Energía Calorífica ⇒
Aumento de Temperatura*

GAS



PLASMA



Más Energía



Ionización



*Eléctrica
Térmica
Luminosa
Química
Nuclear*

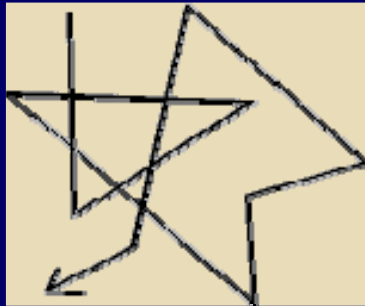
Cargas Libres ⇒

*¡ 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)*

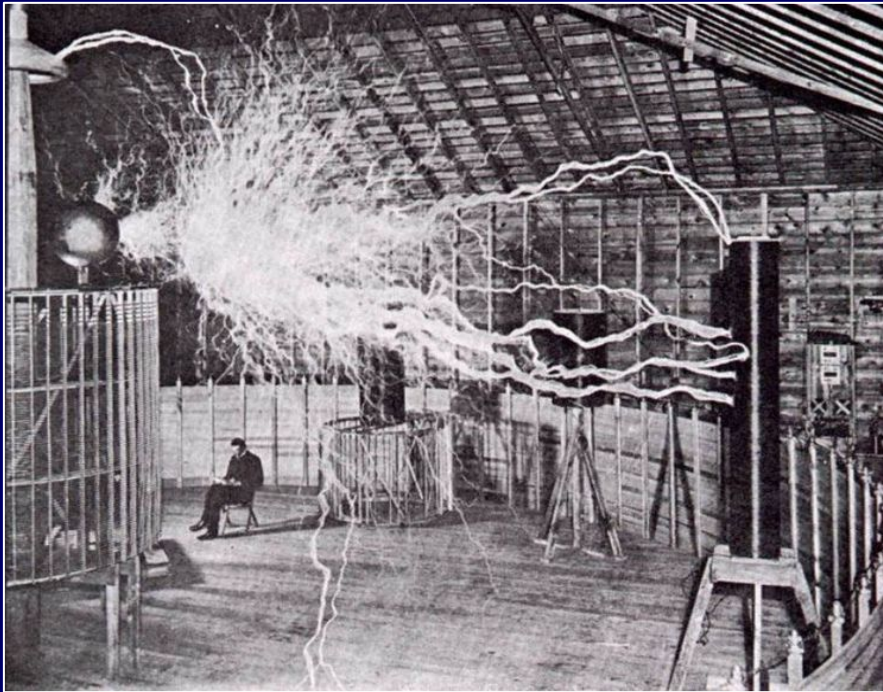


*Carga eléctrica
(acción a distancia)*

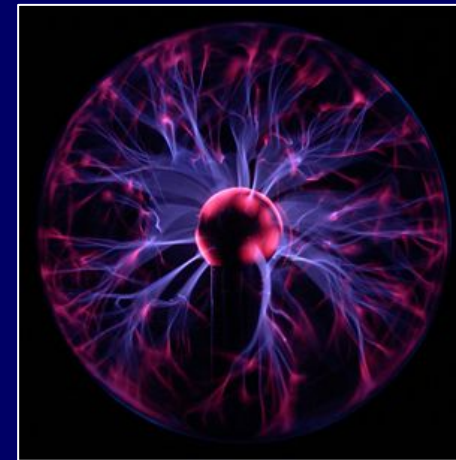
PLASMAS

- *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)



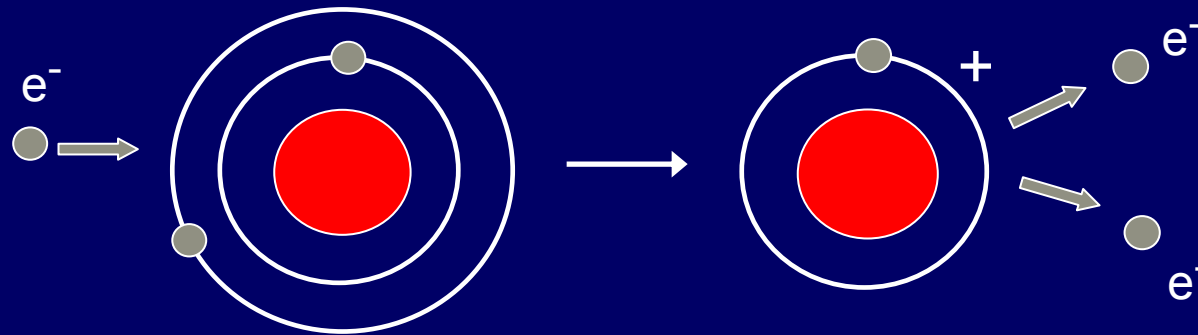
*B. Parker, MIT
(1990)*

2ª Parte

PROCESOS MÁS IMPORTANTES EN UN PLASMA

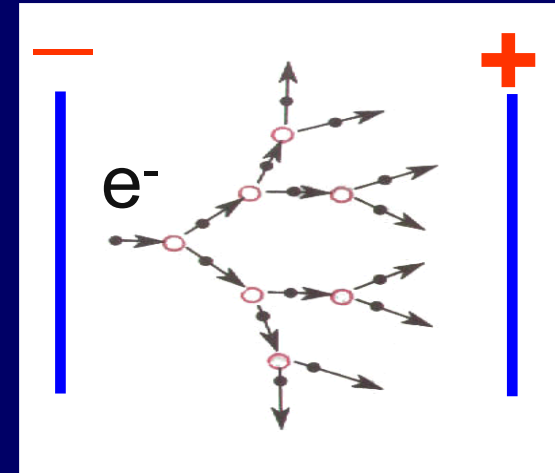
1. Ionización

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.

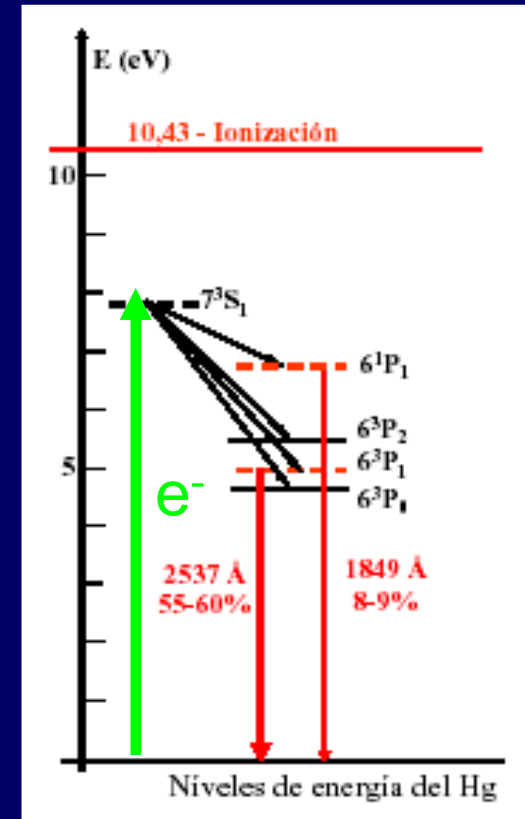


3. Otros procesos

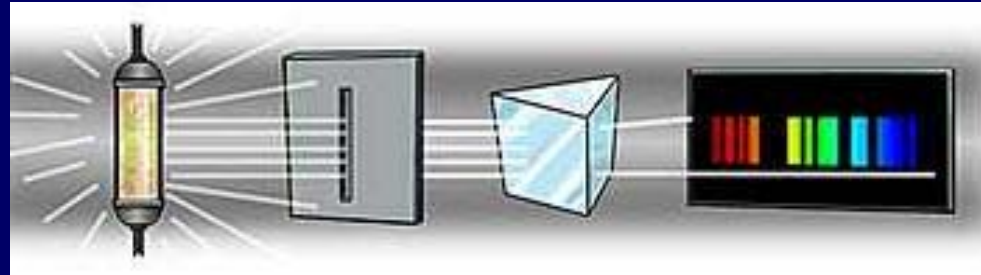
- Excitación atómica interna por impacto electrónico

¡ 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

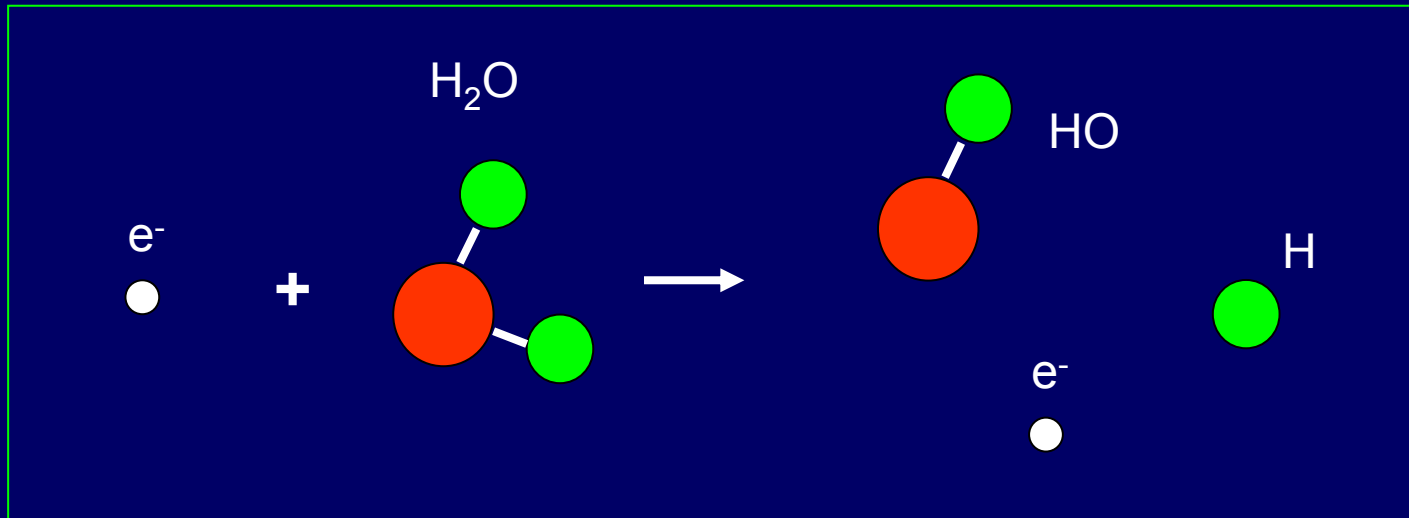


Fe



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*

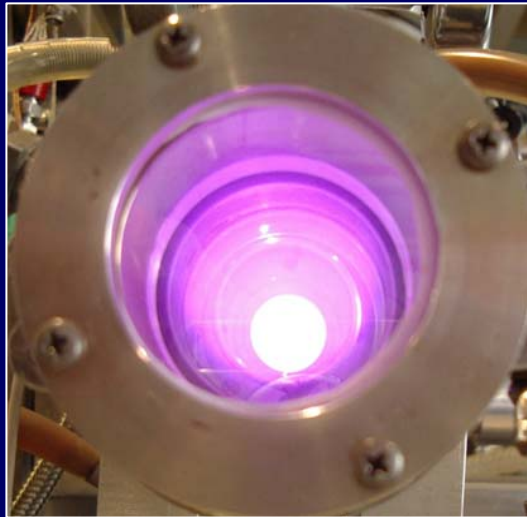
En vapor de H_2O se forman H_2 , O_2 , H_2O_2

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.



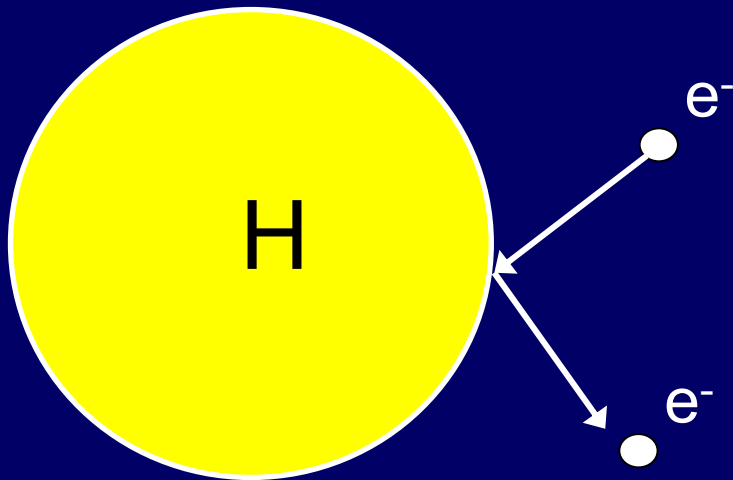
Reactor de plasma



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

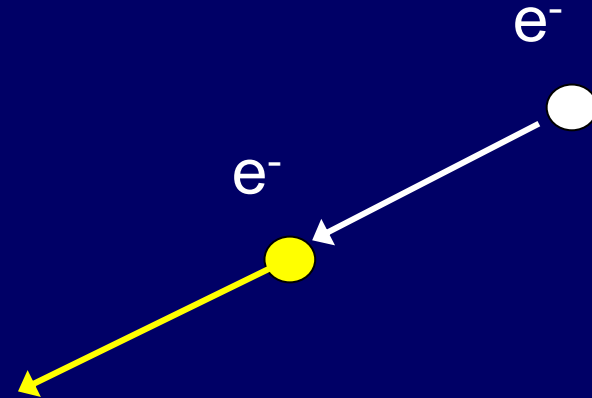
Laboratorio de Plasmas Fríos, CSIC

¡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⁻ + 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 (temperatura) puede ser mucho mayor que la de las especies más pesadas

“PLASMAS FRÍOS”
importantes en multitud de aplicaciones



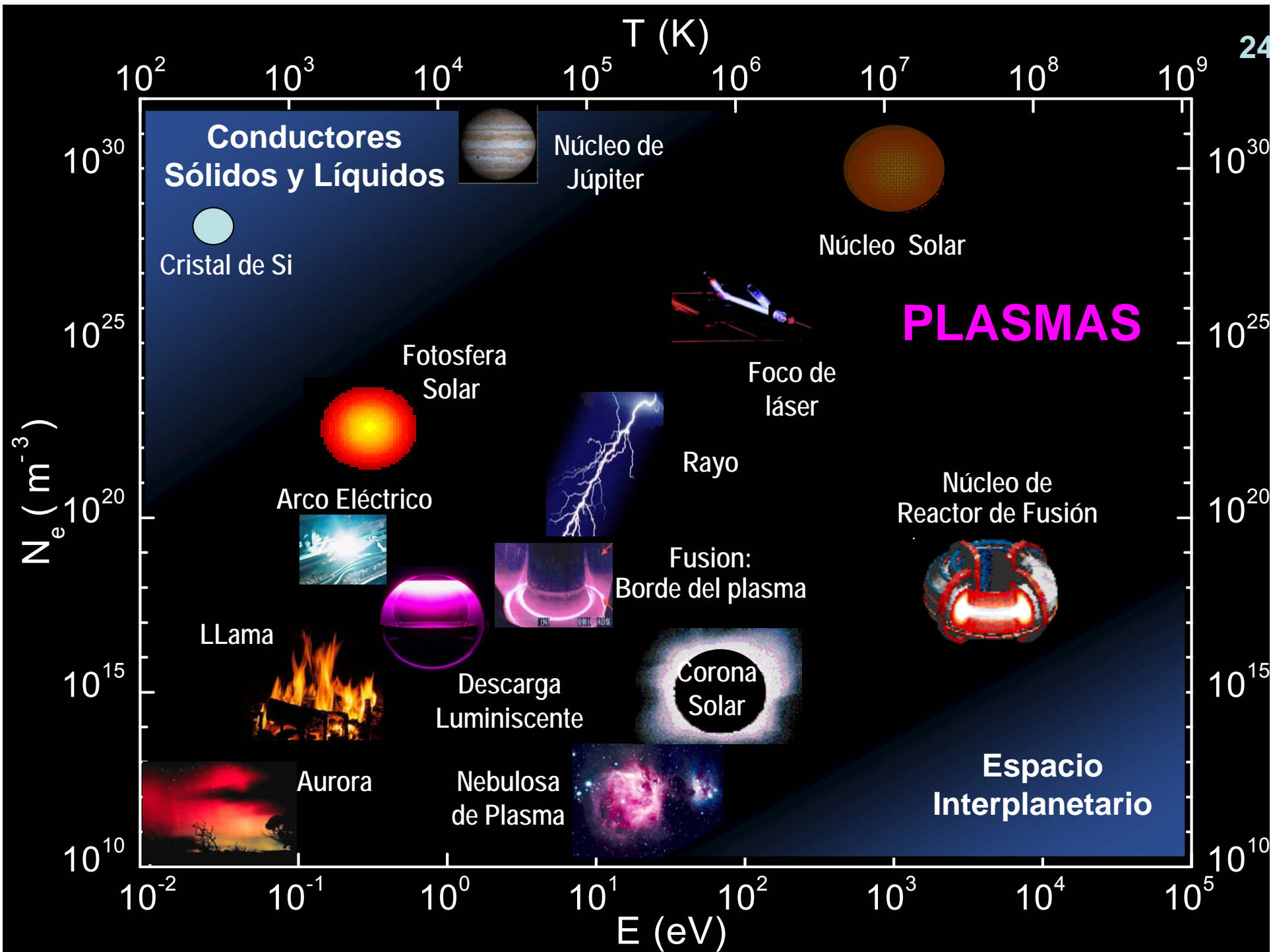
$$T_e = 30.000 \text{ K}, T_{\text{gas}} = 300 \text{ K}$$

¡ bajo grado de ionización !

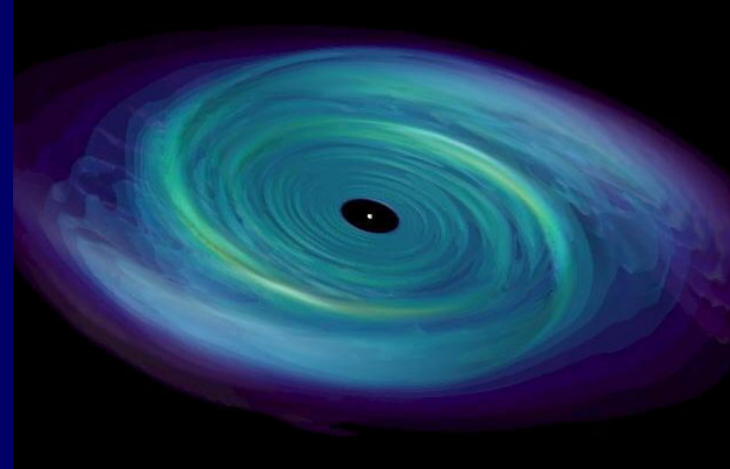
*Al aumentar el grado de ionización,
la temperatura electrónica y del gas se igualan.
(Fluorescentes vs. Descargas en Arco)*

Magnitudes más importantes del Plasma

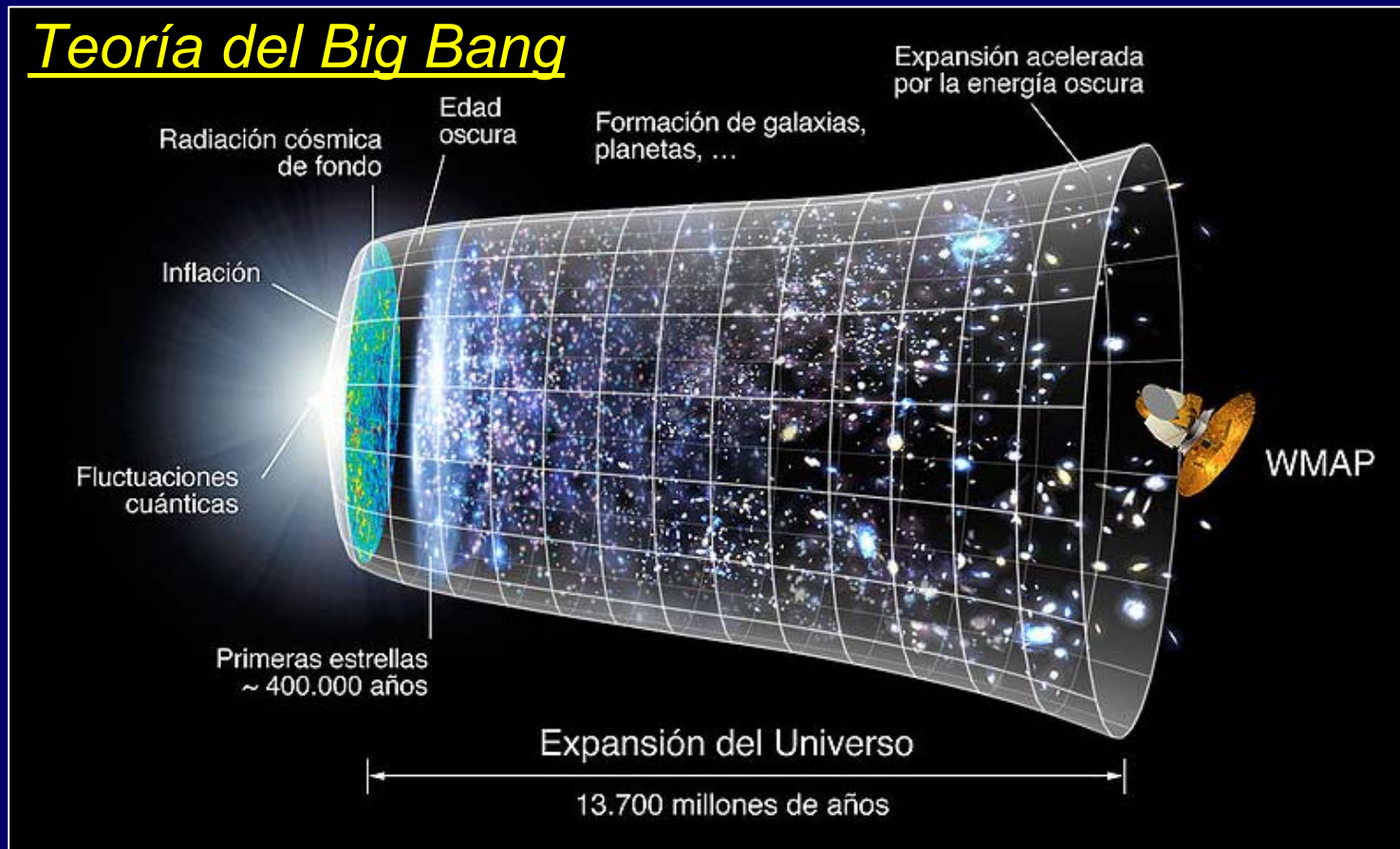
- **Densidad de carga eléctrica libre**
- **Temperatura electrónica**



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)



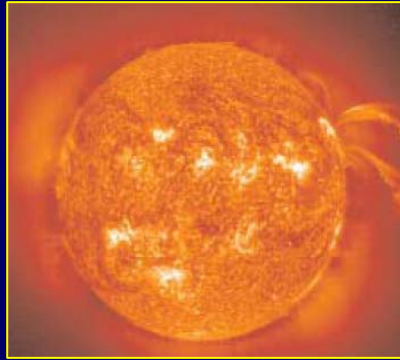
Nebulosa de Orión



*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

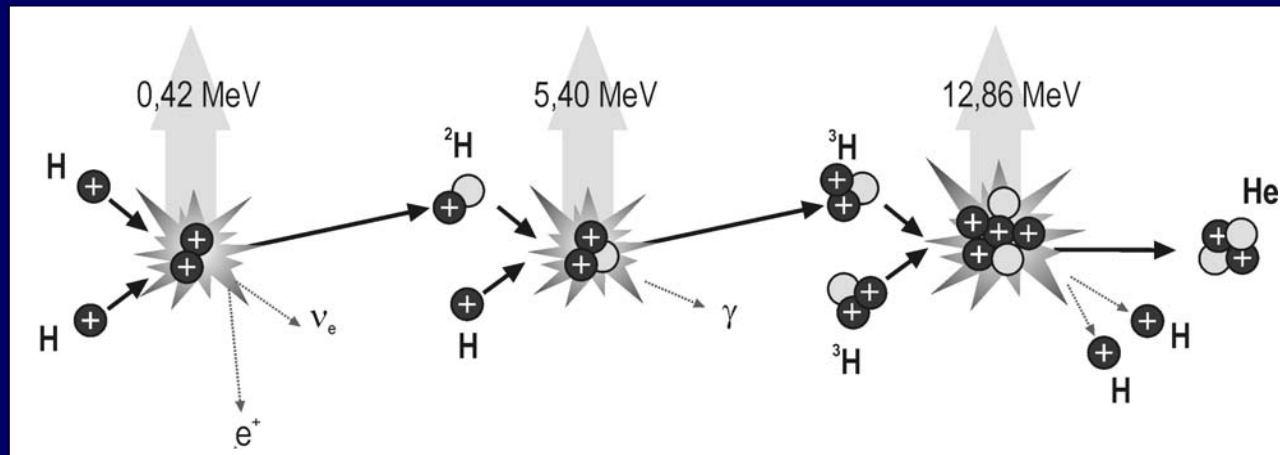


$T = 6.000 \text{ K}$ en la corteza \Rightarrow luz blanca

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

Densidad ≈ 10 veces la del Pb (160 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 TM / W!

Ionosfera Terrestre

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

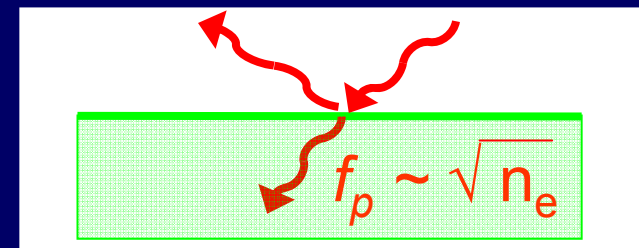
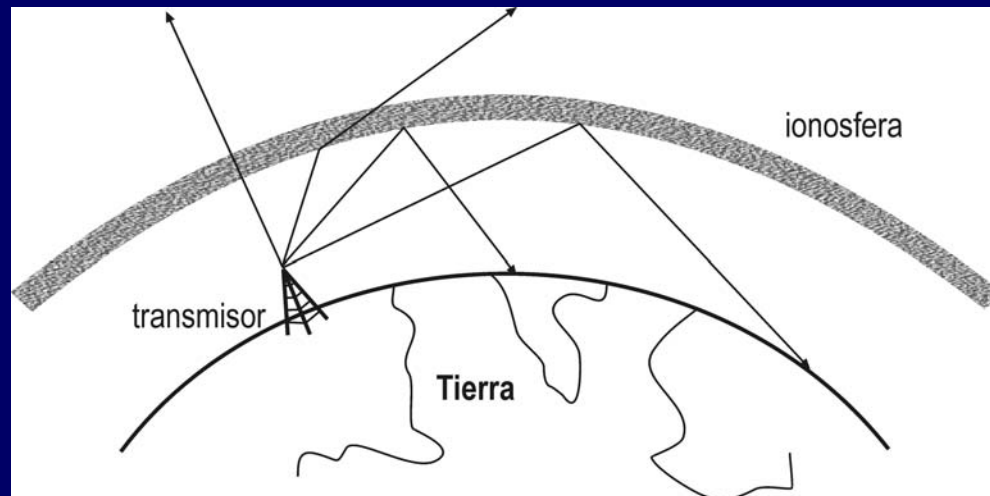
Baja Ionización $\lt 1/1000$

Altitud $\sim 60 - 1000$ km

Descubierta por Marconi en 1.901 :

Reflexión de Ondas de Radio y Transmisión de Largo Alcance

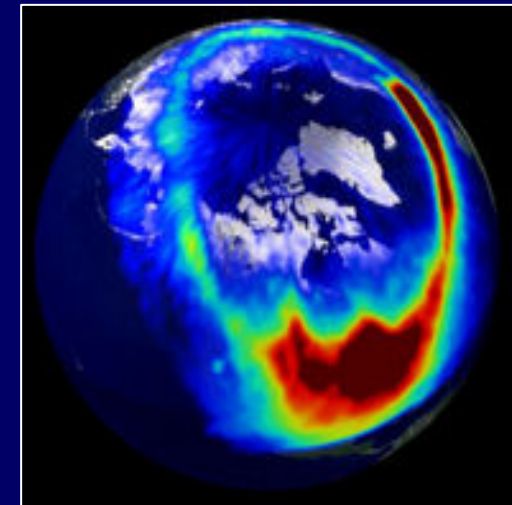
*Como los metales, los plasmas, conductores,
reflejan radiaciones de ciertas frecuencias*



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)

Voltajes $\sim 1.000 \text{ MV}$
Corrientes $\sim 10.000 \text{ A}$ } $i P > 10^{12} \text{ W!}$
Duración $\sim 10 \mu\text{s} - 100 \text{ ms}$

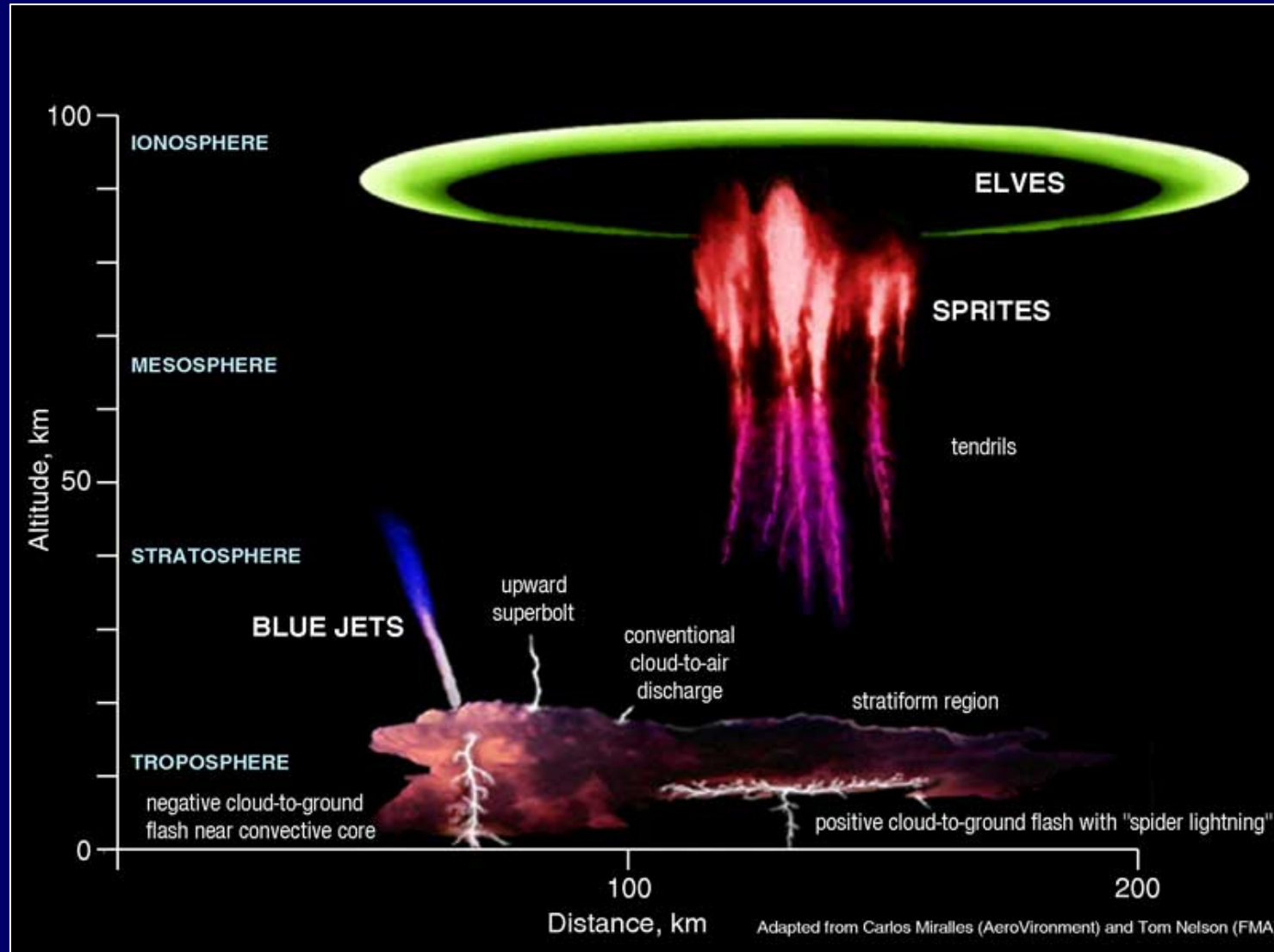
Muy alta ionización (~100%)

Temperatura $\sim 30.000 \text{ K}$



“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: CO , CO_2 , NO , NO_2 ...

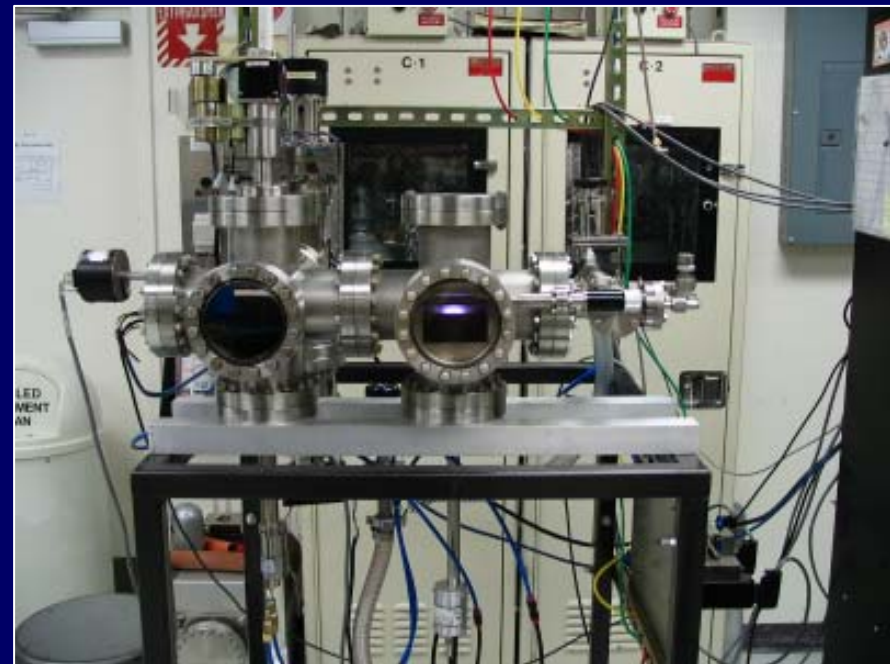
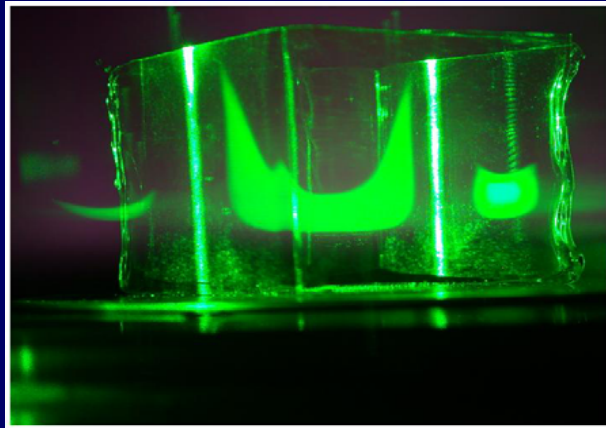


Conducen la Electricidad

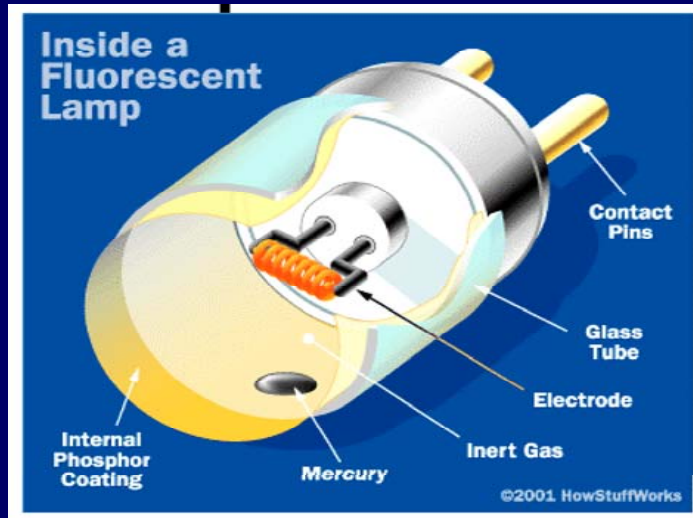
1ª referencia: Academia de Ciencias de Florencia (1667)

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.*

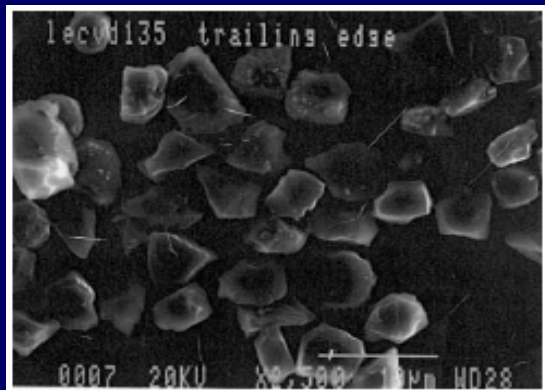


Catéteres para diálisis
y tubos de ensayo
de materiales plásticos

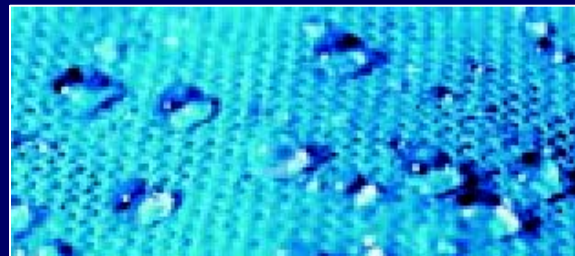
Cambios superficiales de materiales

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



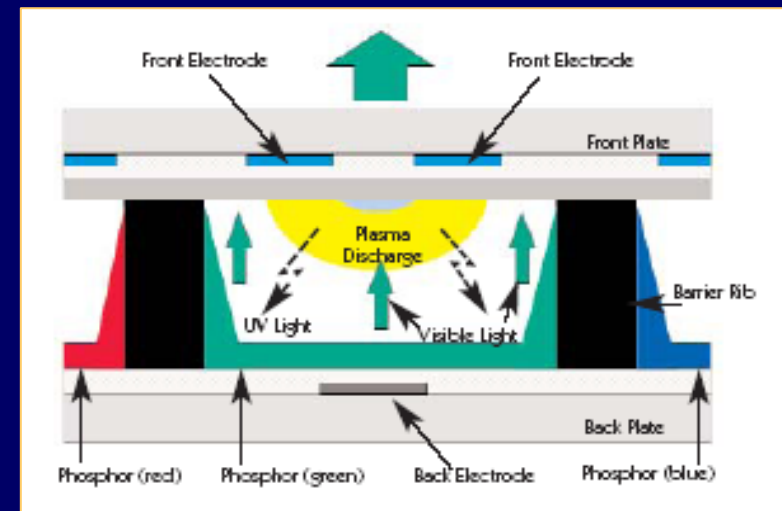
Tejidos tratados con plasma,
repelen la humedad
y las grasas



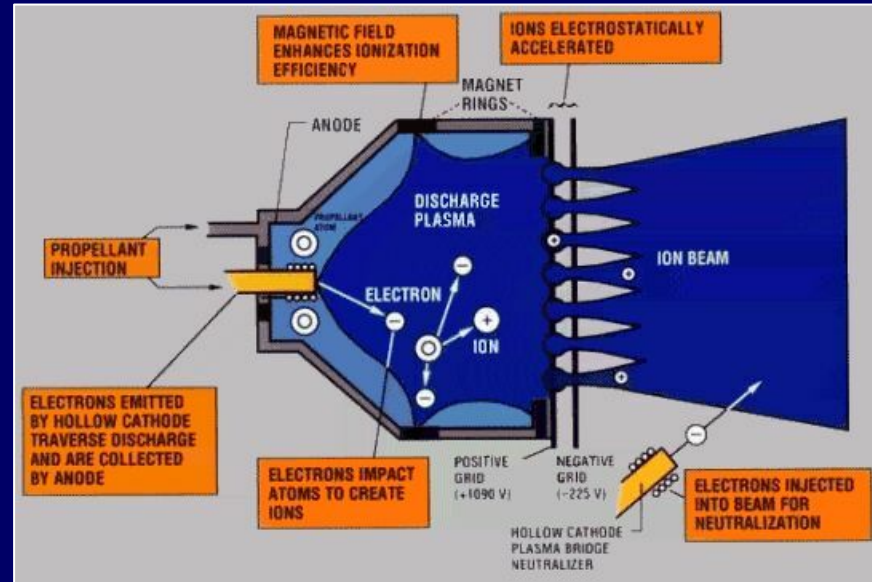
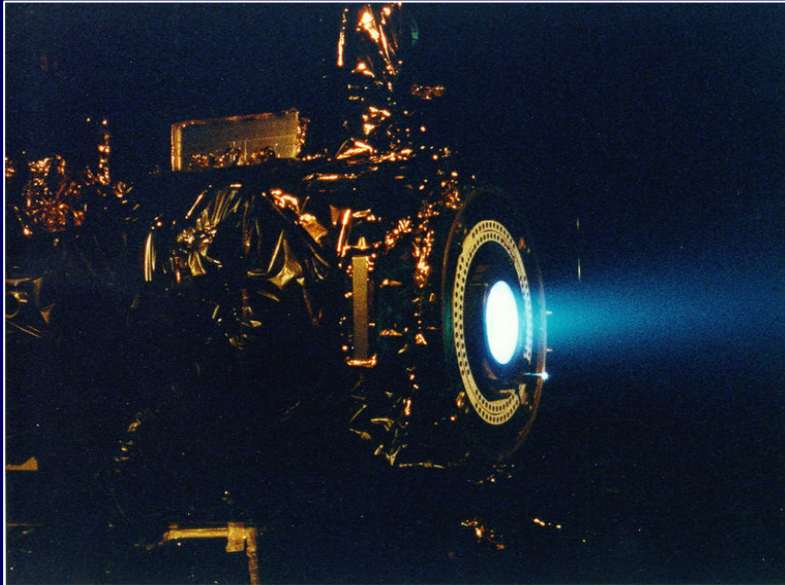
Prótesis metálica de
rodilla cubierta de
material biocompatible



Pantallas de Plasma



Motores Iónicos para Propulsión Espacial

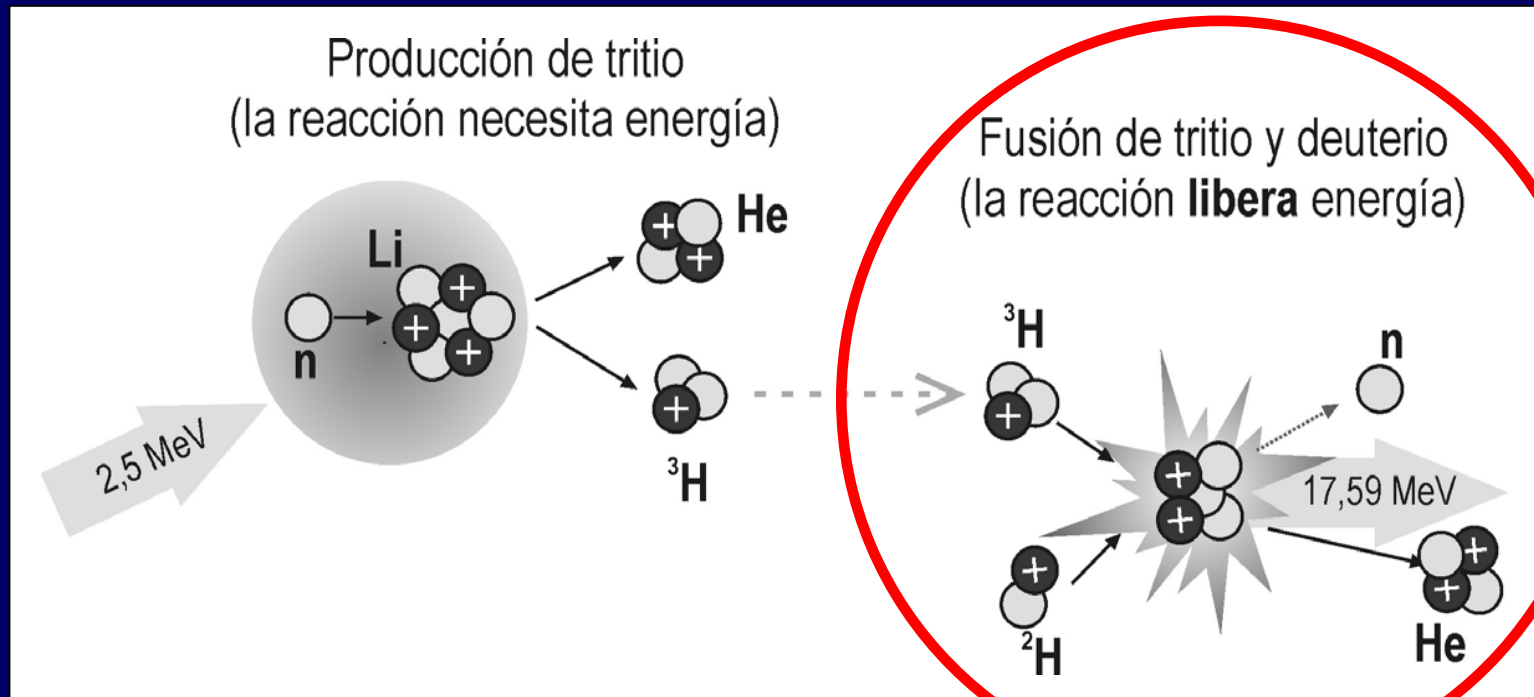


Se genera un plasma (Xe), los iones se aceleran en un campo eléctrico y se recombinan a la salida.

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

Reactores de Fusión Termonuclear

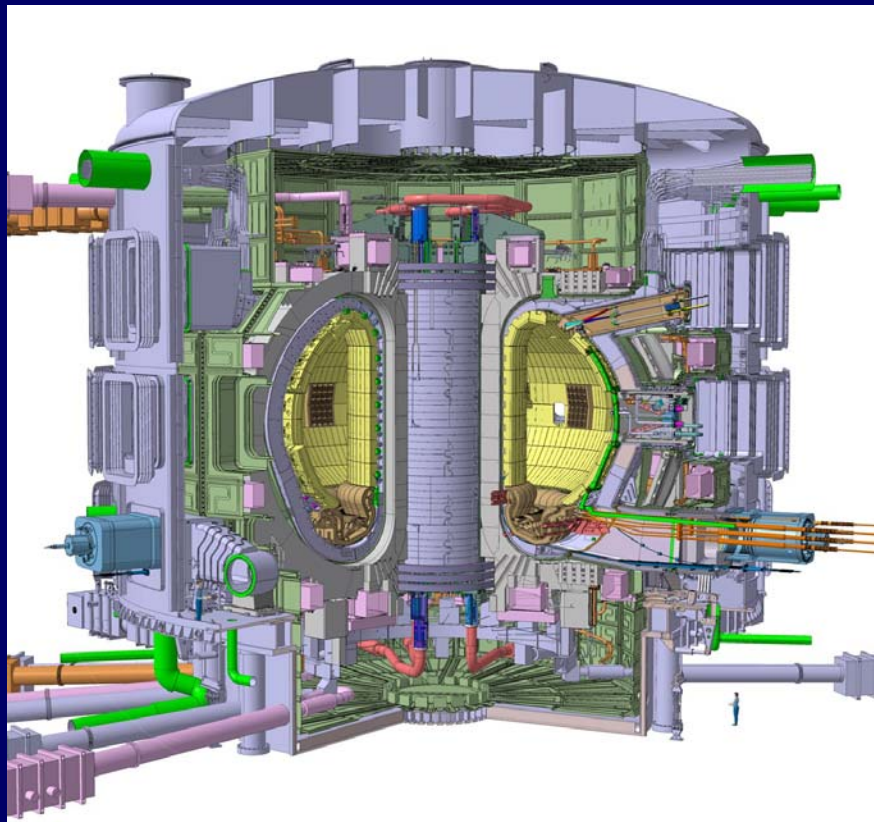
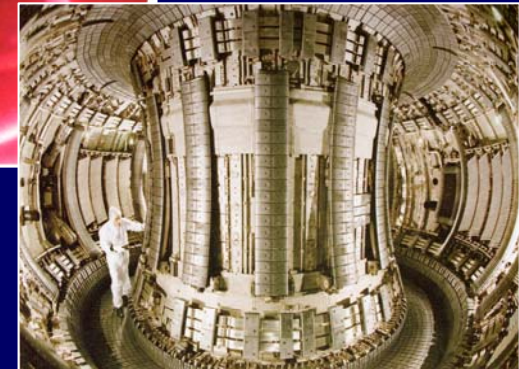
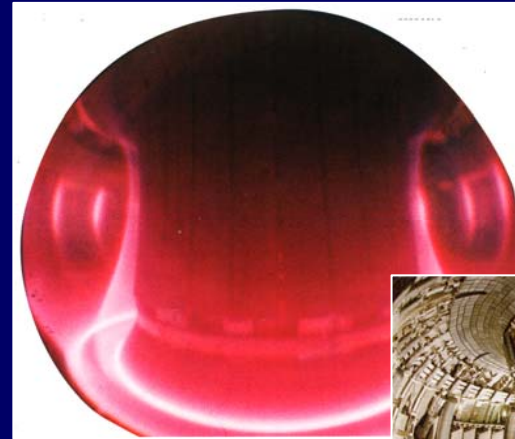
$T = 10^8 \text{ K}$ ¡Mayor que en el núcleo solar!
 $P = 10^{-5} \text{ Atm}$ ¡Muy baja presión!



*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

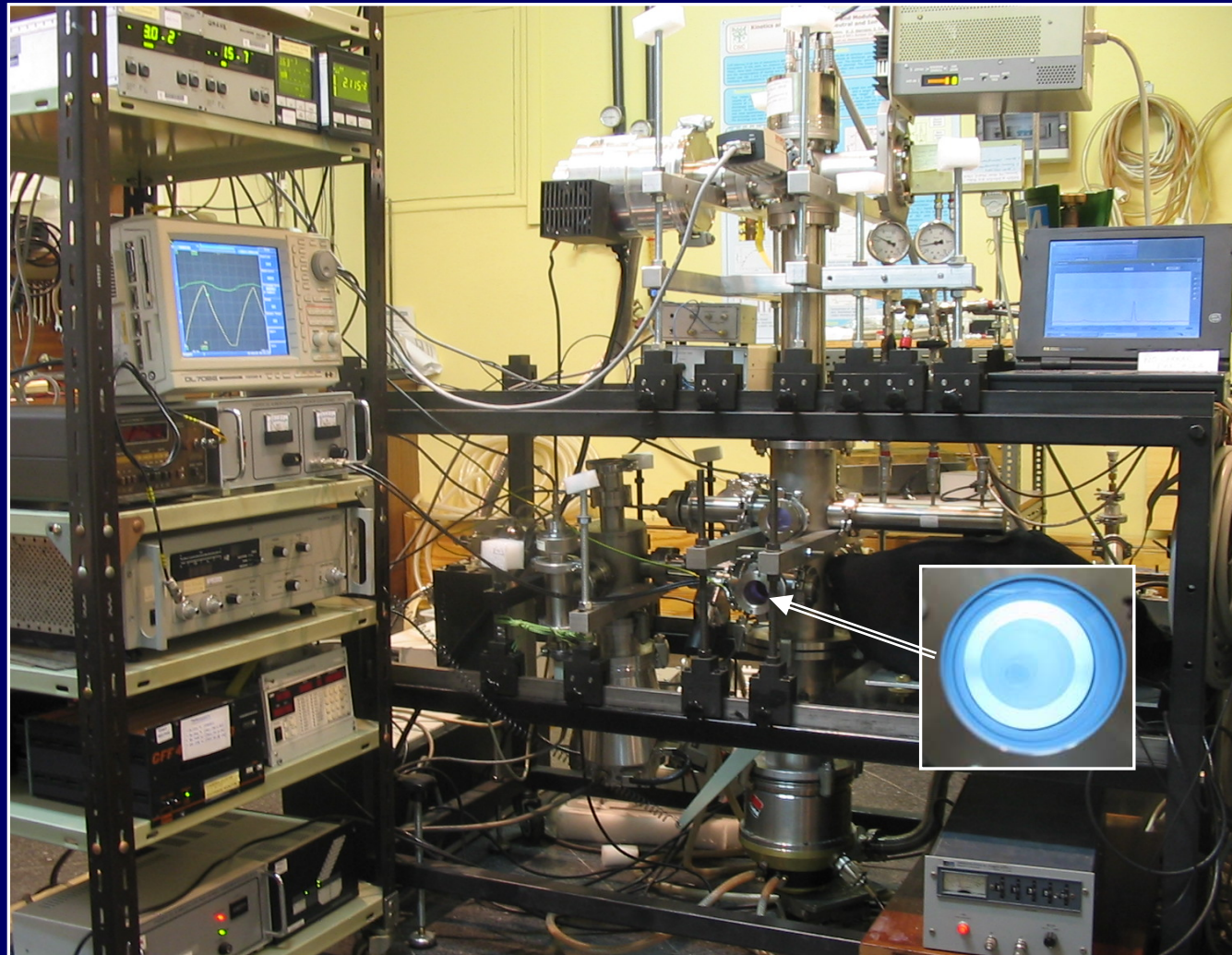
Ganancia en P = 10 (~2019)

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