

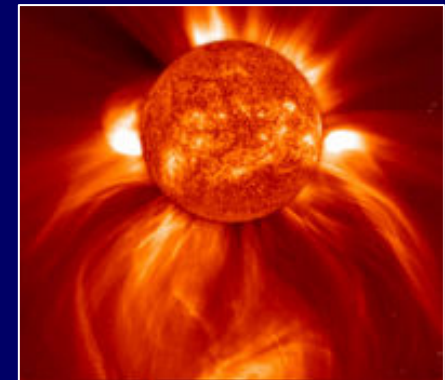


## ***LOS PLASMAS :***

*de la Aurora Boreal al Interior de una Estrella,  
del Tubo Fluorescente al Reactor de Fusión*

***Isabel Tanarro***

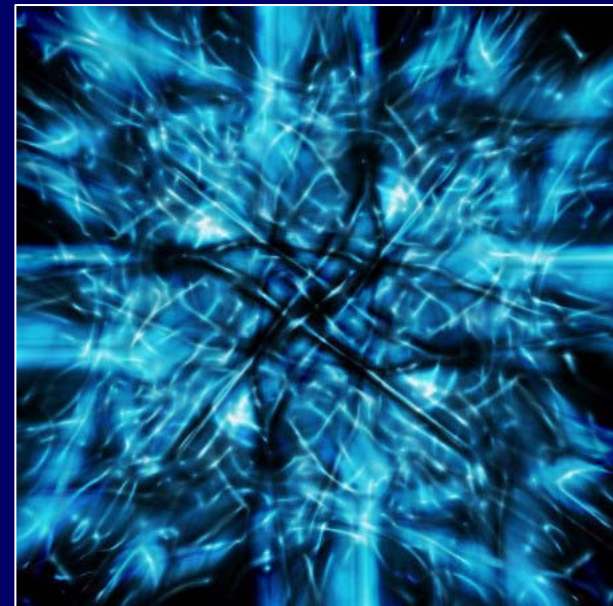
*Dpto. de Física Molecular  
IEM, CSIC*



<http://www.iem.cfmac.csic.es/departamentos/fismol/fmap/plasmas.htm>

## Esquema de la presentación

- Características de los plasmas
- Tipos de plasmas en la naturaleza
- Aplicaciones tecnológicas



Los PLASMAS en la TIERRA son bastante escasos y poco conocidos.



**“CUARTO ESTADO DE LA MATERIA”**

Pero son la materia más abundante del Universo  
(99,99%) en el Sol, Estrellas, Nebulosas...



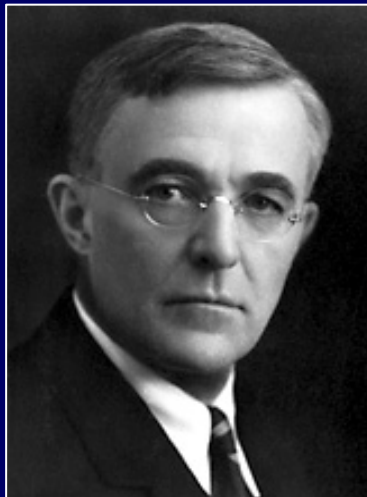
¡Todos los plasmas emiten luz!

( y casi todo lo que emite luz es un plasma )



## ¿QUÉ ES UN PLASMA?

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



*Diccionario de la Real Academia  
de la Lengua Española*

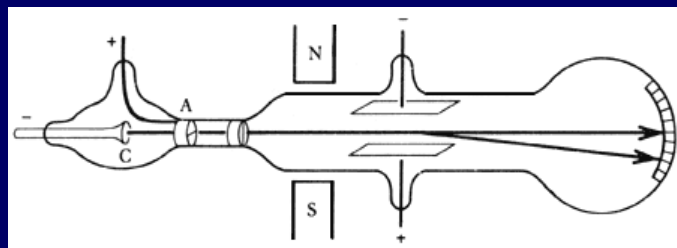
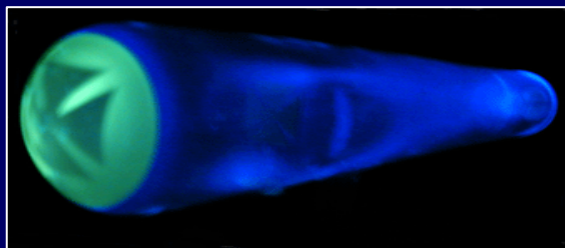
*Denominado Plasma por 1ª vez  
por Irving Langmuir (1920).*

*Irving Langmuir (1881-1957)  
General Electric, New York  
P. Nobel, 1932*

# PRIMEROS ESTUDIOS DE PLASMAS

*Predicho por M. Faraday (1820)*

*Estudiado por William Crookes (~1880).  
Fosforescencia. Trayectorias rectilíneas de los rayos  
catódicos, que identificó como partículas.*

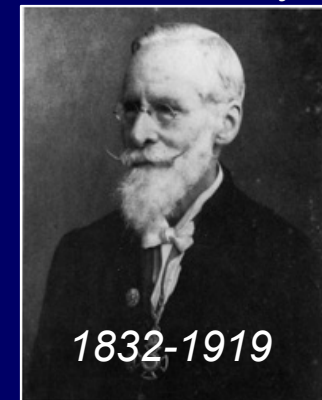


*J. J. Thomson: Desviación de rayos catódicos  
(electrones) con campos electromagnéticos.  
Origen del televisor.*



1791-1867

M. Faraday



1832-1919

W. Crookes



1856-1940

J. J. Thomson  
(P. Nobel 1906)

## ¿Cómo generar un Plasma?:

Descargas eléctricas en gases a baja presión

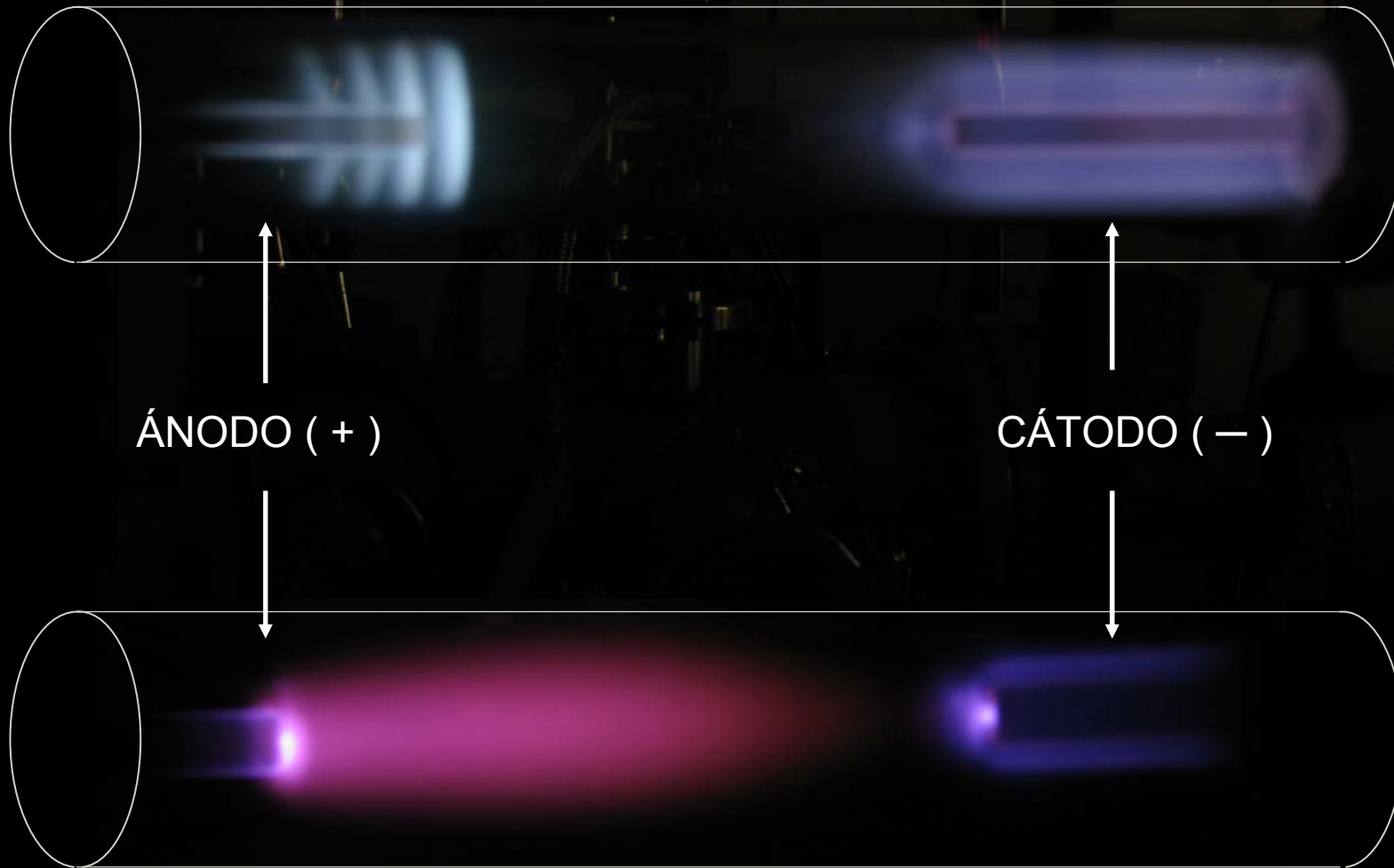


Célula de Descarga y Bomba de Vacío (1880)

Alto Voltaje ~ 1000 V

$P = 0.001$  atmósferas (1 mbar)  
(25.000.000.000.000.000 moléculas/cm<sup>3</sup>)

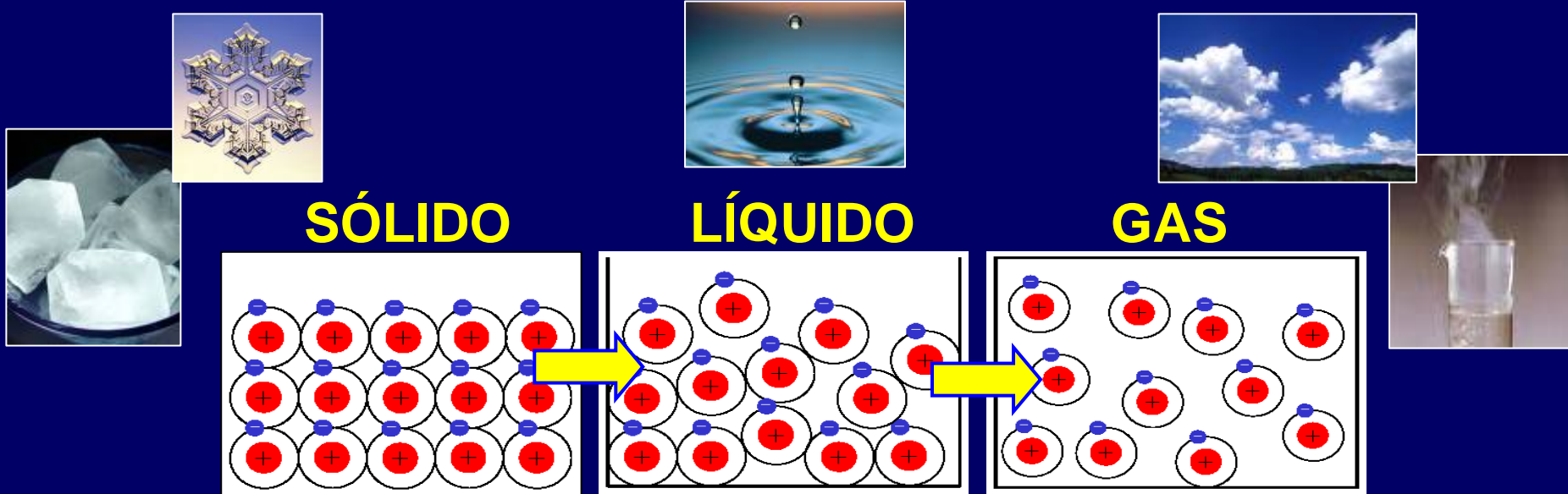
Dos aspectos de un plasma de aire a  $\sim 1$  mbar  
en un tubo de descarga a distintas corrientes



(Lab. de Plasmas Fríos, IEM, CSIC)



# ESTADOS de AGREGACIÓN de la MATERIA



Aporte de Energía Calorífica y Aumento de Temperatura

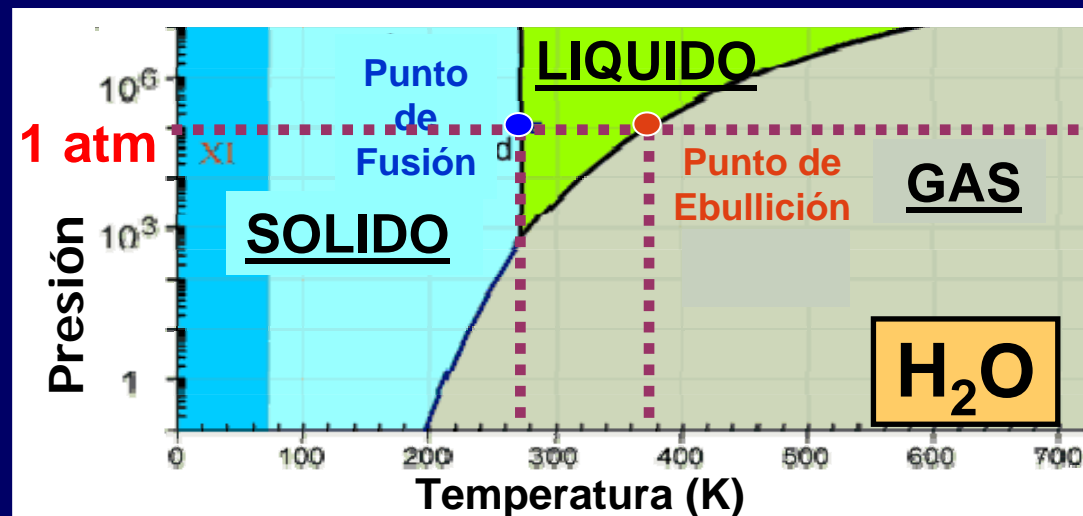
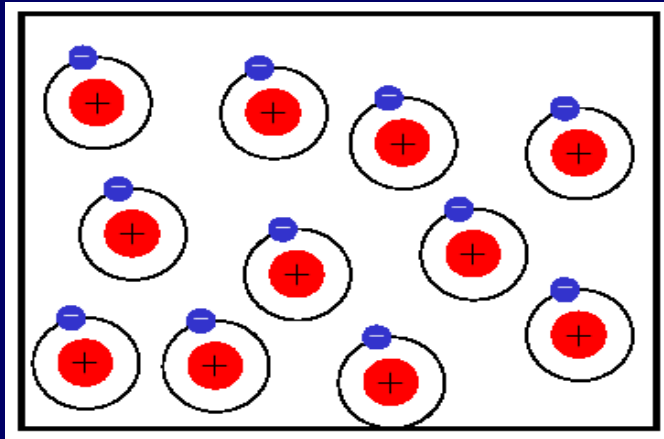
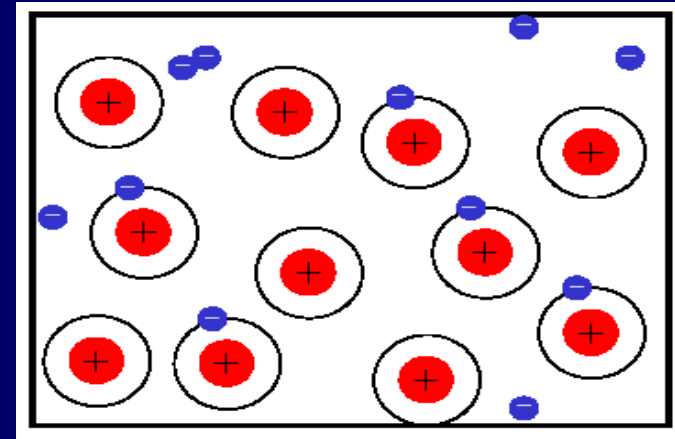


Diagrama de fases del agua

**GAS****PLASMA****Más Energía****Ionización**

**Eléctrica**  
**Térmica**  
**Luminosa**  
**Química**  
**Nuclear**

- ELÉCTRICAMENTE NEUTRO
- BUEN CONDUCTOR ELÉCTRICO

**Magnitudes fundamentales:  $N_e$ ,  $T_e$**

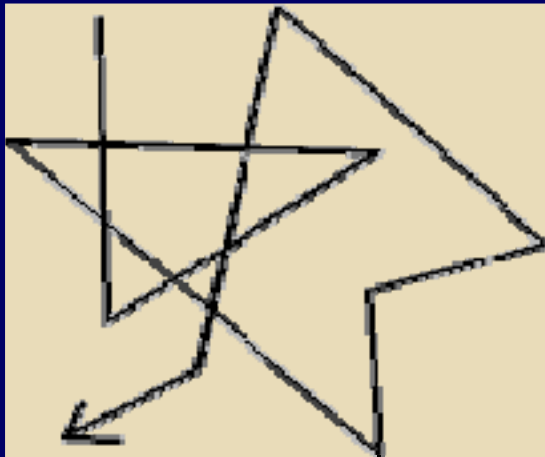
$$\text{Grado de Ionización} = \frac{\text{N}^\circ \text{ electrones}}{\text{N}^\circ \text{ partículas neutras}}$$

## Diferencia entre Gases y Plasmas

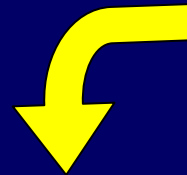
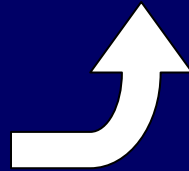
11

### Gases

- Partículas Libres e Independientes
- Transferencia de Energía por Colisiones Individuales



*Movimiento de una  
partícula neutra*



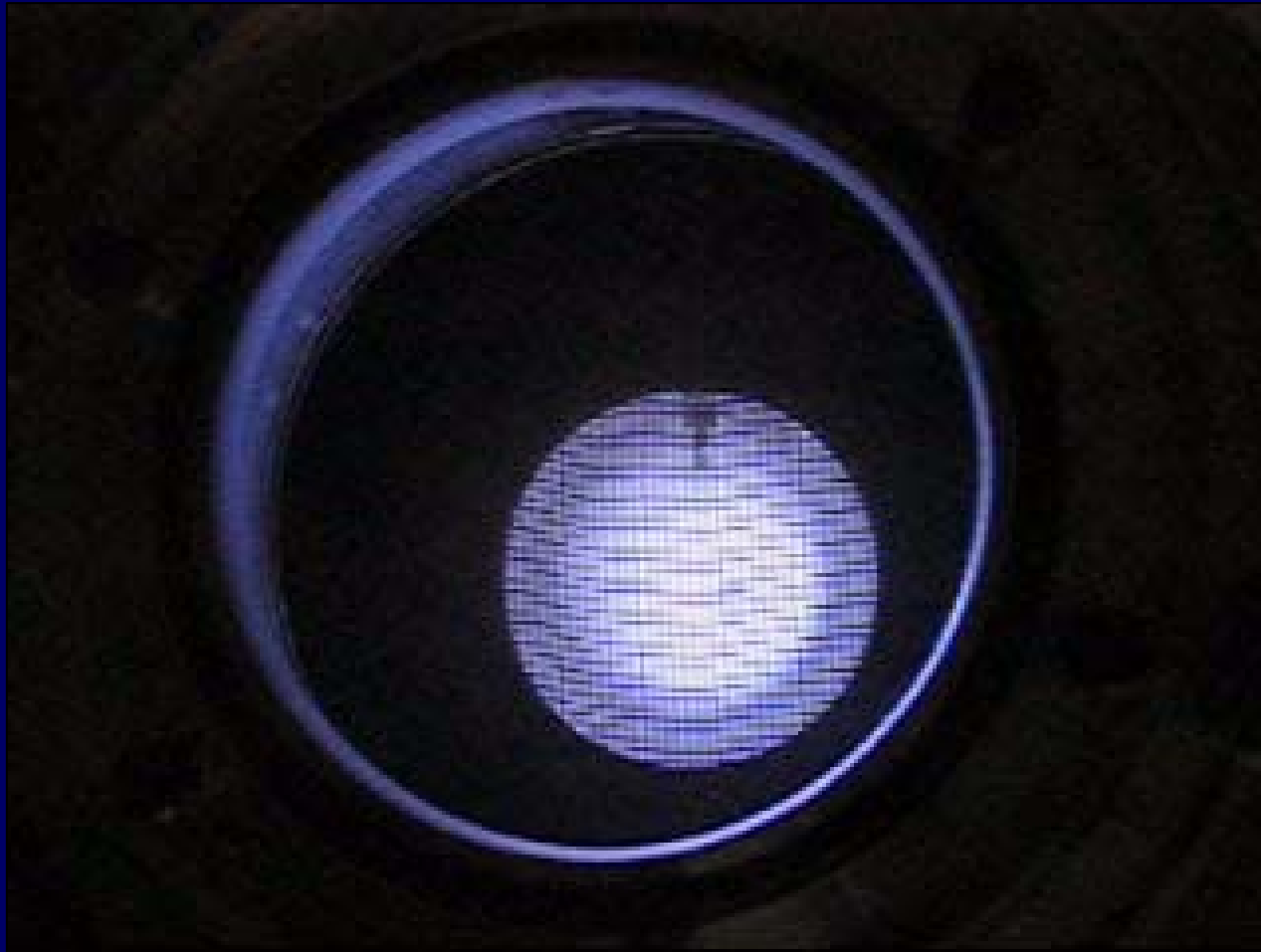
*Movimiento de una  
carga eléctrica*

### Plasmas

- Comportamiento Colectivo de Iones y Electrones:
- Fuerzas Electro-Magnéticas  $\gg$  Mecánicas
- Se pueden confinar (apartarlos de las paredes)

11

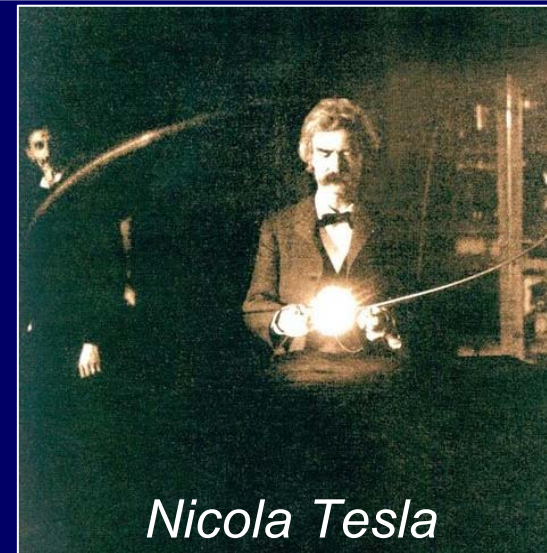
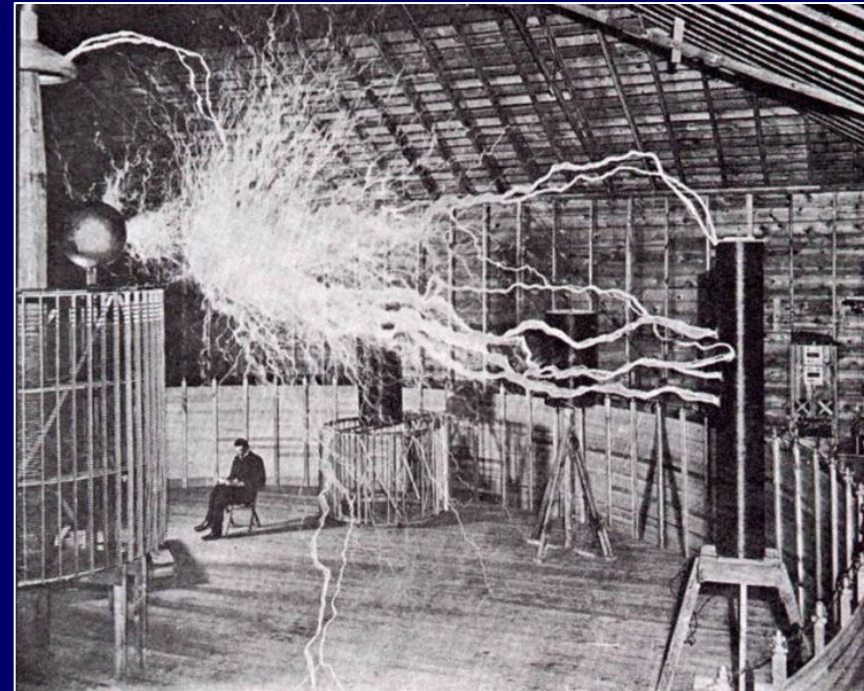
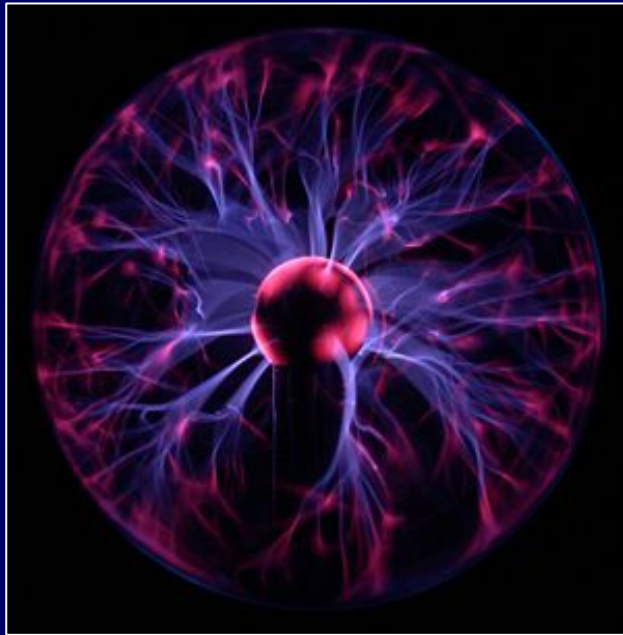
Fenómenos que no sucederían con un Gas pero ocurren en un Plasma:



El plasma “escapa”  
por un pequeño orificio lateral

*Lab. de Plasmas Fríos, IEM, CSIC*

# Bolas de Plasma



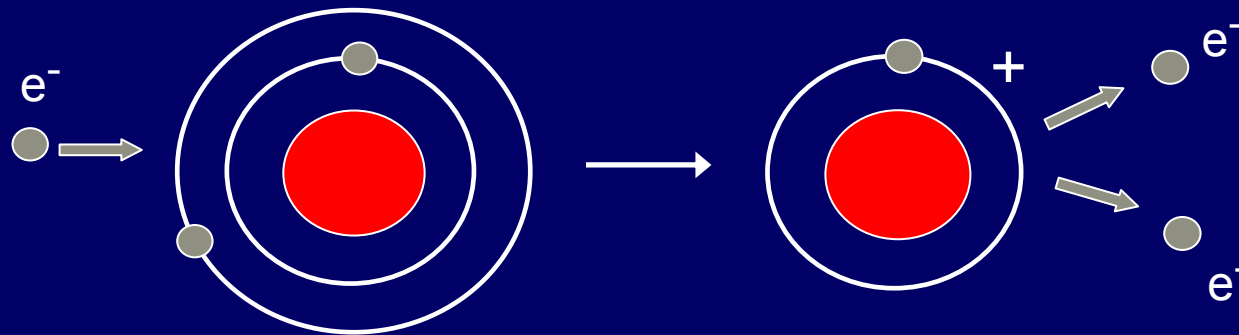
*Inventada por Nicola Tesla (1856-1943)*  
*1<sup>er</sup> Motor de Corriente Alterna (1887)*  
*1<sup>a</sup> Central Hidroeléctrica (Niagara Falls 1893)*

*Nicola Tesla*  
*& Mark Twain (1894)*

¿Que fenómenos ocurren  
en un plasma a nivel  
Microscópico?

# IONIZACIÓN INICIAL

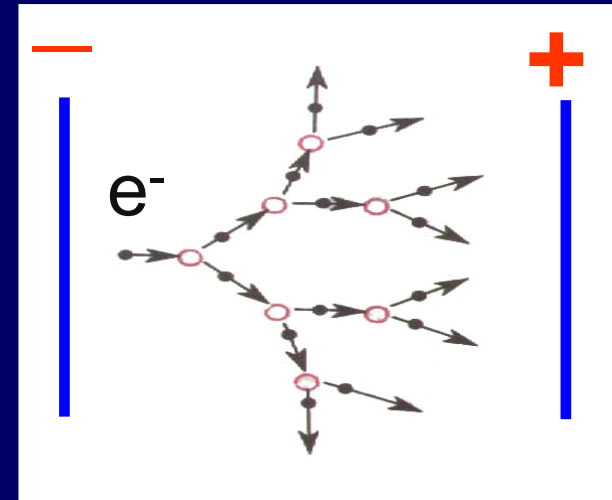
Fenómeno desencadenante del plasma.



Arco  
Eléctrico

## A continuación ...

- Los electrones son acelerados por el campo eléctrico y ganan energía
- Ionización en cadena.  
Se establece una corriente eléctrica y un grado de ionización que puede variar desde valores muy pequeños hasta la ionización total (100%).
- El plasma desaparecería rápidamente ( por recombinación ) si cesara el aporte de energía.





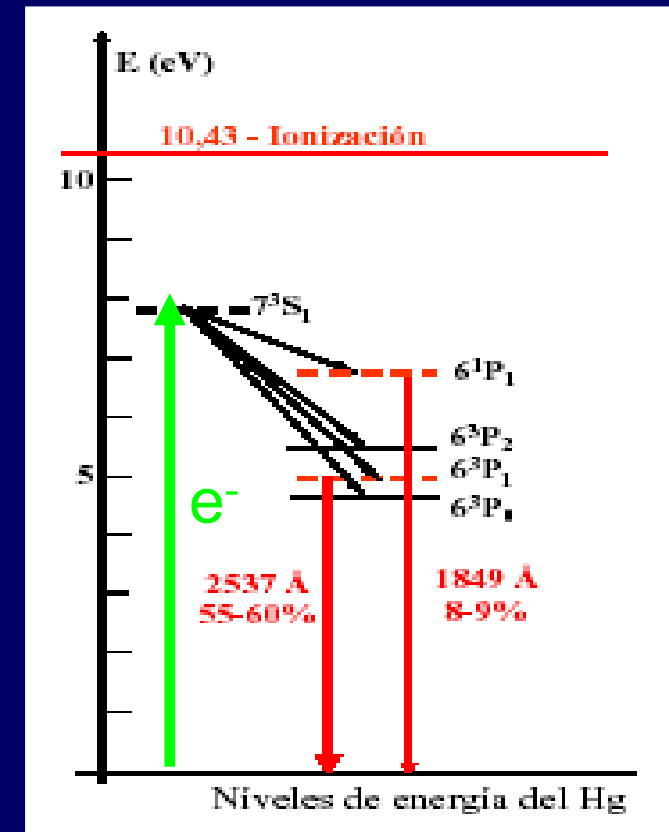
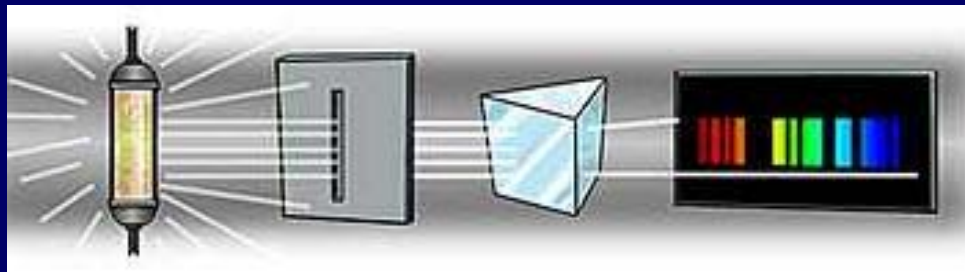
## OTROS PROCESOS

### 1 - Excitación interna por impacto electrónico

*Hacen falta valores exactos de energía electrónica*

### 2 – Desexcitación con emisión de radiación (fotones) de diferentes energías :

*Análisis Espectral de la Radiación.  
Iniciado por Newton ~ 1660:  
descomposición de la luz solar*



¡La luz del plasma permite descubrir las especies que contiene!

### 3 - Espectros de Emisión Atómica en un plasma

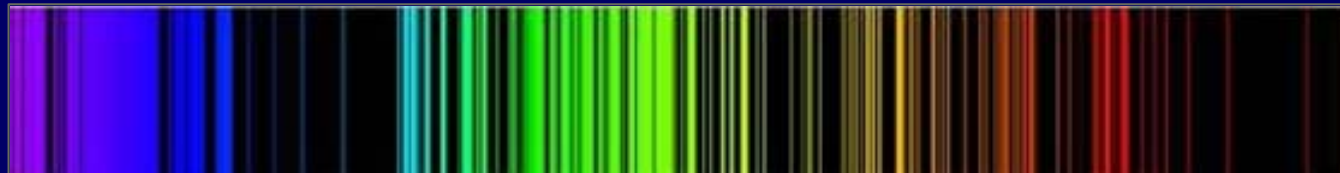
H



Au



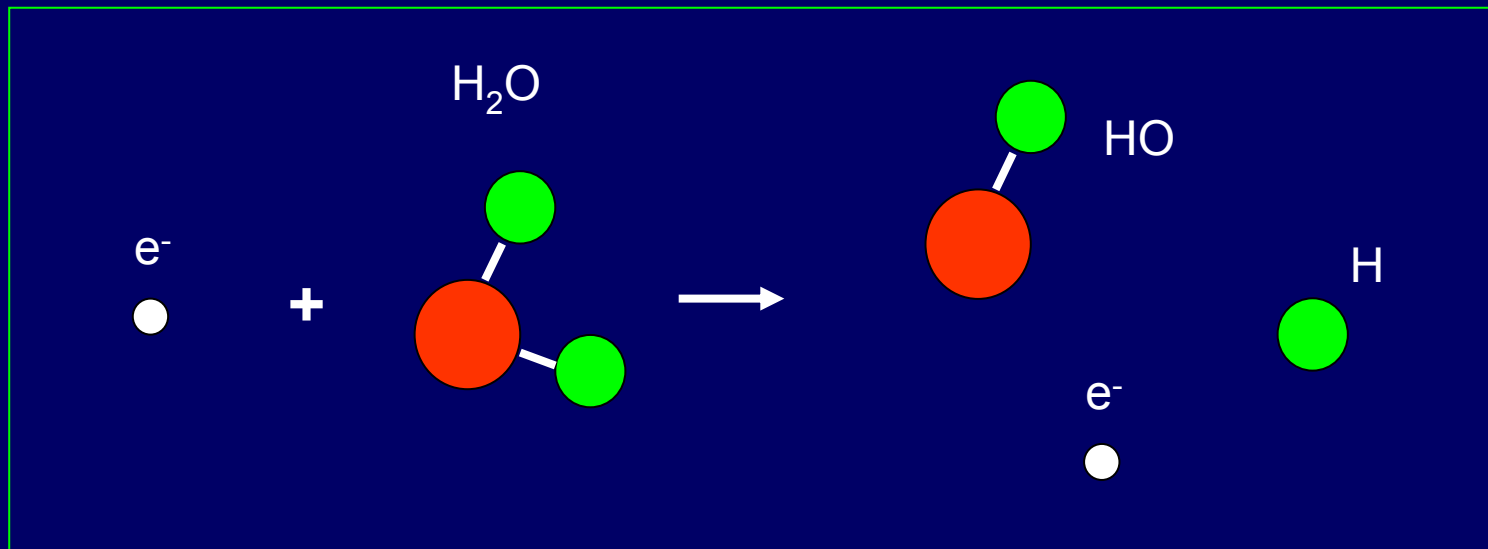
Fe



*Cada especie tiene su espectro característico*  
*Fundamento de la Física Cuántica*

*Actualmente se usan*  
*Monocromadores con Red de*  
*Difracción + CCD + Fibra óptica*

## 4.- Disociación molecular

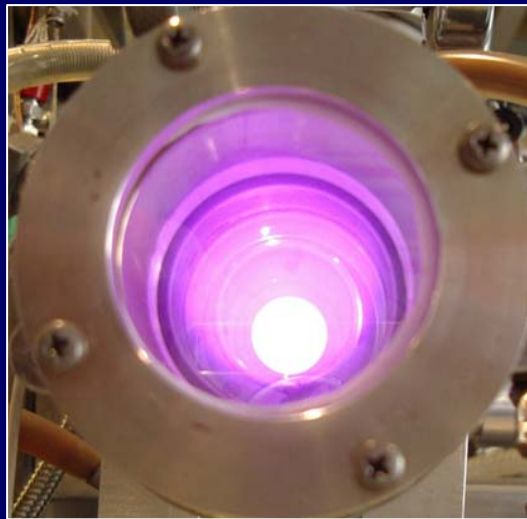


*Las moléculas se fragmentan  
y liberan átomos y radicales (trozos de moléculas)  
que a su vez reaccionan químicamente  
y dan lugar a nuevas especies  
(en vapor de agua:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ )*

**Plasma: MEDIO MUY REACTIVO  
incluso a baja temperatura**

## 5.- Reacciones con las paredes del reactor y otras superficies en el interior del plasma

*Se arrancan partículas del material de las paredes y se incorporan al plasma o se depositan en otros puntos del reactor.*



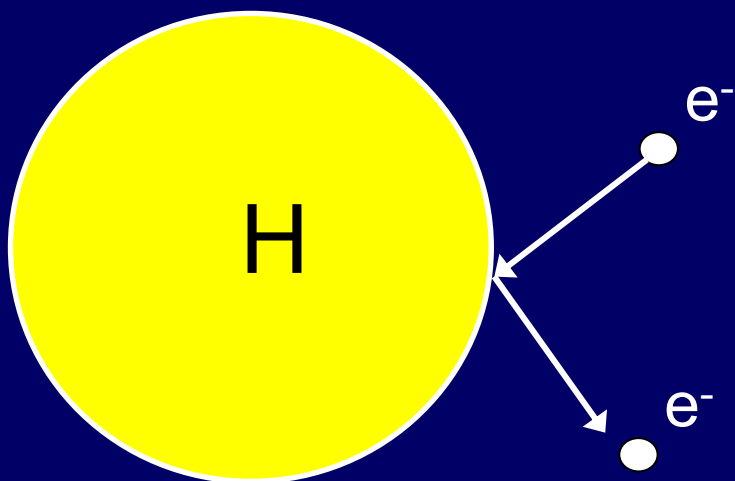
Plasma



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

*Lab. de Plasmas Fríos, IEM, CSIC*

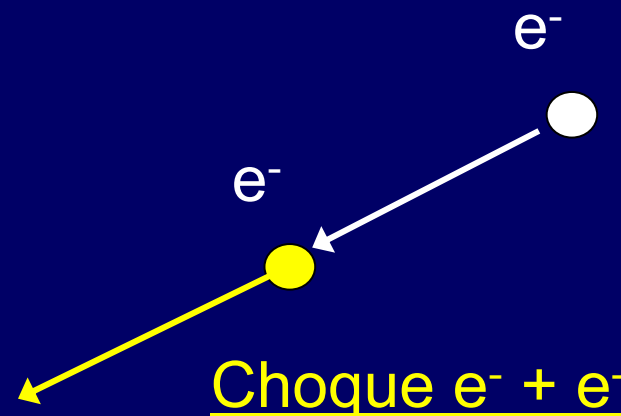
6.- ¡ Pero en las Colisiones Elásticas entre los electrones  
y otras especies, mucho más pesadas,  
casi NO hay cesión de la Energía Cinética  
que ganan los electrones, al ser acelerados por el campo eléctrico !



Choque  $e^- + H$

$$m_e \sim M_H / 1800 \Rightarrow$$

$$E_{\text{Max Tr.}} = 0.002 E_0$$



Choque  $e^- + e^-$

masas iguales  $\Rightarrow$   
el intercambio de  
energía es máximo

$$E_{\text{Max Tr.}} = E_0$$

$$E_{\text{Max Trans.}} = \frac{4m_e M}{(m_e + M)^2} E_0$$

La energía cinética media de los electrones (o su temperatura) <sup>22</sup>  
puede ser mucho mayor que la de las especies más pesadas

*Existen “PLASMAS FRÍOS” (fuera del equilibrio térmico).  
Muy importante para multitud de aplicaciones.*

<http://www.phys.tue.nl/EPG/stoffels/home.html>



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

*“Plasmas Calientes” (en equilibrio térmico):  
tienen alto grado de ionización*

## Resumen de las Principales Características de los Plasmas

- Necesitan **ENERGÍA** para generarlos y mantenerlos.
- Emiten **LUZ** .
- Son buenos **CONDUCTORES** (al tener cargas libres).
- Son eléctricamente **NEUTROS**.
- Responden a **CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS** .
- Son **MUY REACTIVOS** químicamente.
- Pueden estar **LEJOS DEL EQUILIBRIO** térmico.

Con tales Características  
los Plasmas presentan muy diversas  
Manifestaciones Naturales  
y Aplicaciones Tecnológicas

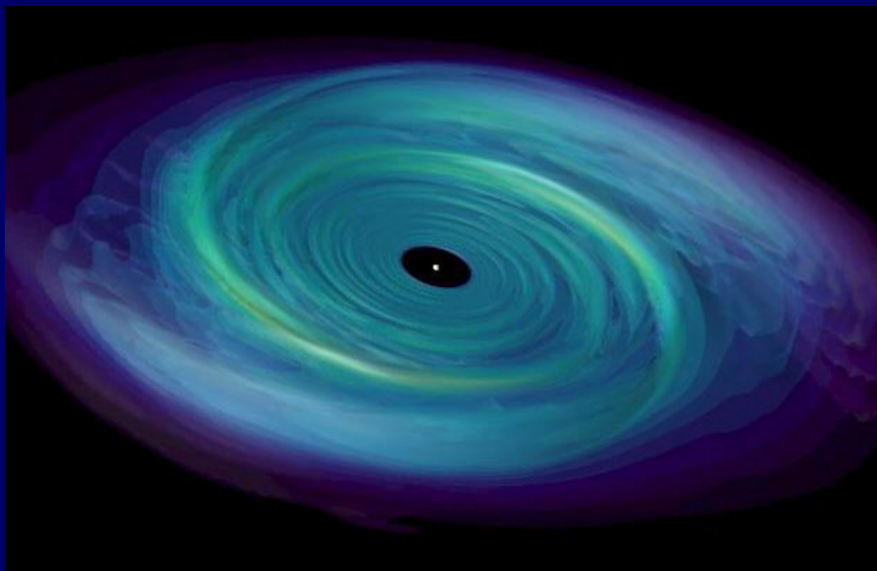


## Ejemplo de plasma sin electrodos

Excitación por Microondas en  
célula de Gas a Baja Presión ( $\sim 1$  mbar)



PLASMAS  
en la  
NATURALEZA



## Nebulosas

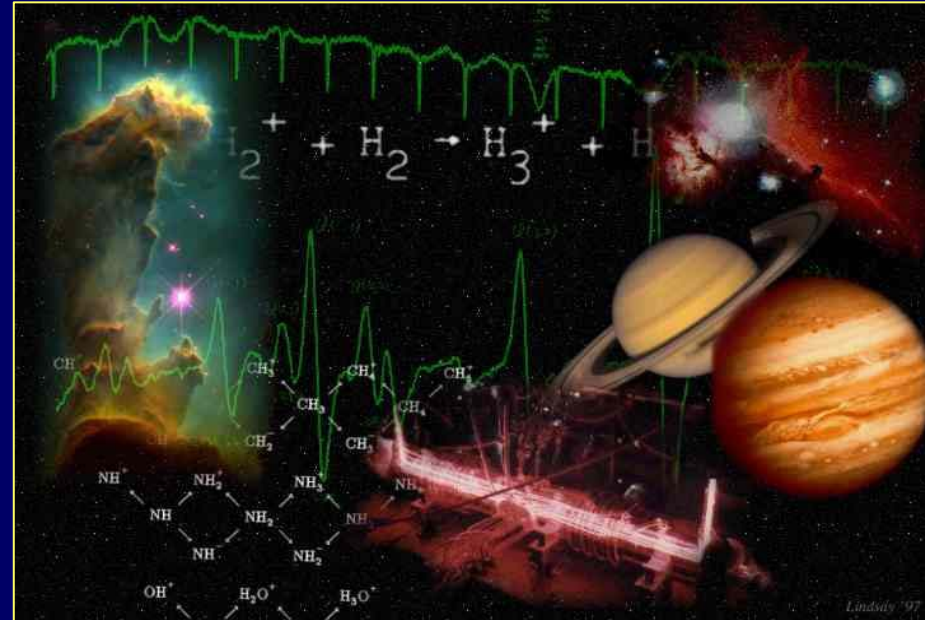
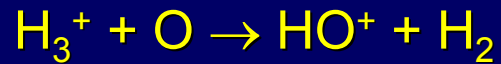
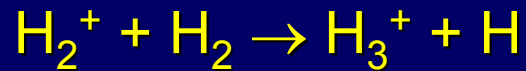
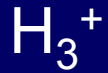
- Parte de su enorme masa, muy dispersa, se va aproximando por gravedad y calentando hasta formar nuevas estrellas.
- Se han descubierto moléculas exóticas e inestables hasta de más de 200 átomos, muchas no identificadas aún, que juegan un papel muy importante en la formación estelar.

*Nebulosa de Orión*

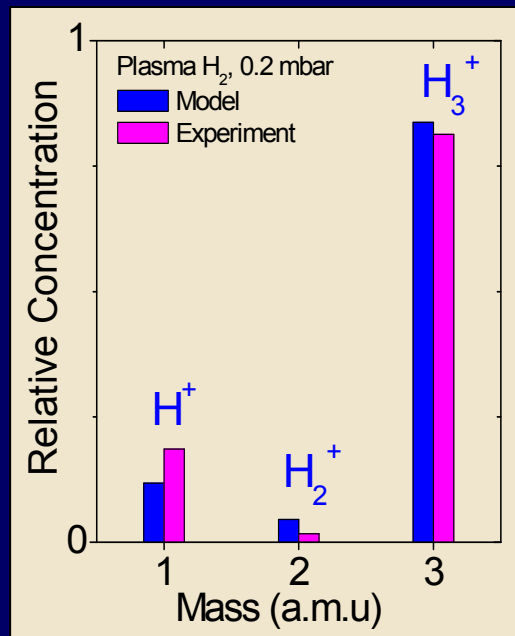


*Zona de formación de estrellas  
en la Nebulosa del Águila*





La formaci\u00f3n del  $\text{H}_3^+$  en el espacio interestelar, dura cientos o miles de a\u00f1os ( $P < 10^{-15}$  atm ,  $T < 4$  K )



En descargas de  $\text{H}_2$  a baja presi\u00f3n este proceso es casi instant\u00e1neo ( $\sim \mu\text{s}$ ) ( $P < 10^{-6}$  atm, 300 K)

*Lab. Plasmas Fr\u00edos. IEM. CSIC*

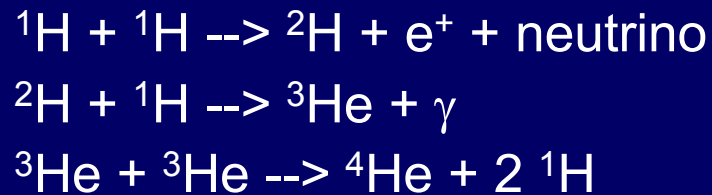
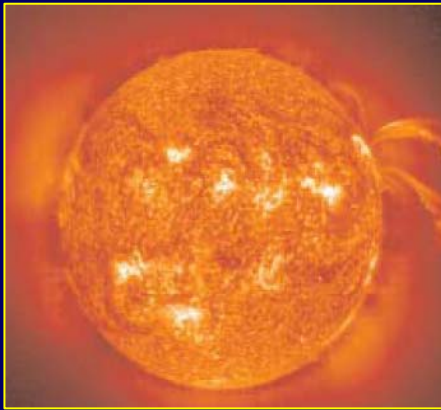


# El Sol

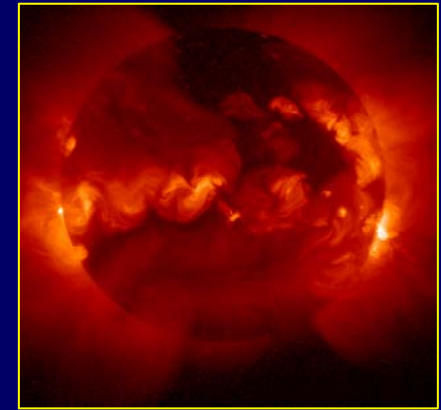
Plasma Caliente: 6.000 K en la corteza, 15 MK en el núcleo.  
Núcleo de Gas!: Densidad = 160 g/cm<sup>3</sup> (10 veces la del Pb)

Edad ~ 4.500 M años

Hasta el S. XX se le atribuía una edad mucho menor,  
por conocer solo los combustibles químicos (en el Sol y las estrellas).  
Desde ~ 1.930 se sabe el origen de su energía: la Fusión Nuclear



¡REACCIONES NUCLEARES!



Cada segundo, el Sol transforma  
600 MTm de H en 596 MTm de He.

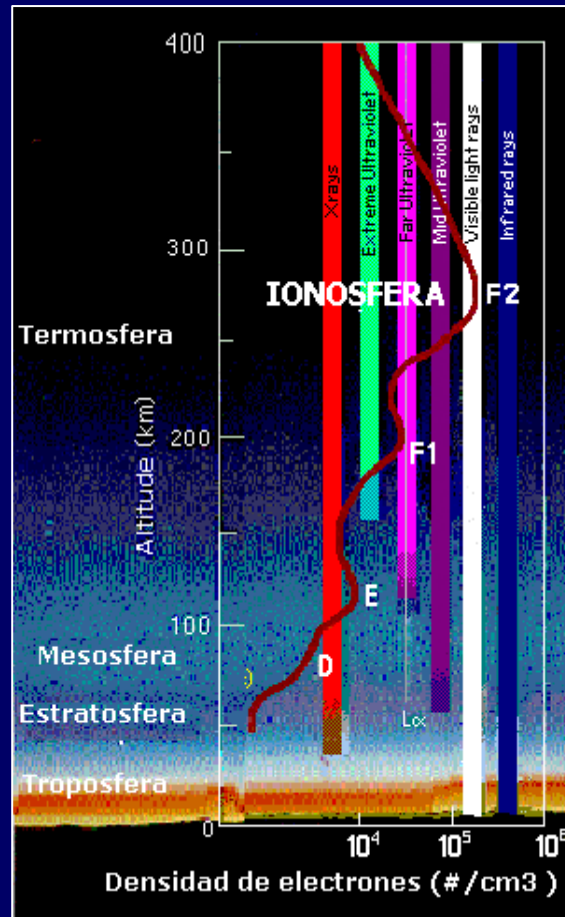
El resto, 4 MTm, se transforman en Energía :  $E = mc^2 \rightarrow 4 \times 10^{20}$  MW

Potencia incidente sobre la Tierra : 500 W/m<sup>2</sup>

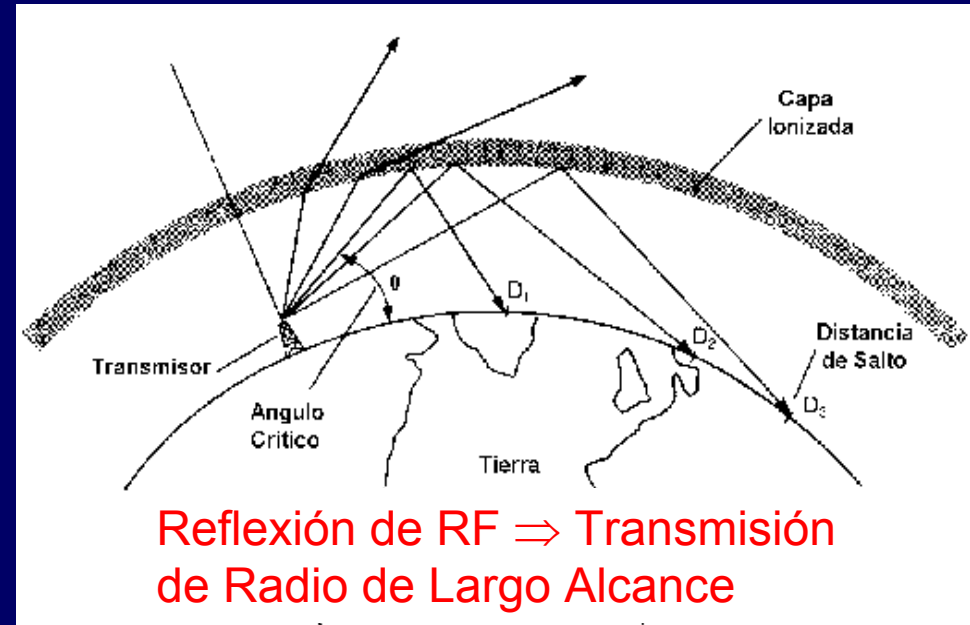
# Ionosfera Terrestre

Altitud entre ~ 60 - 1000 km

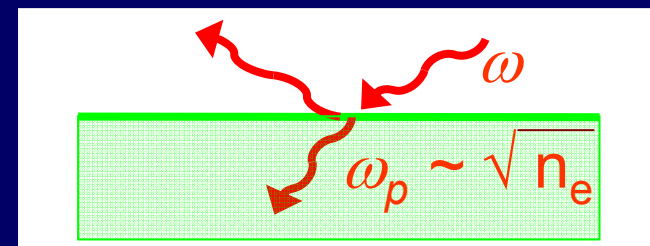
Descubierta por Marconi en 1.901



Atenúa la radiación UV exterior de alta energía, produciéndose la ionización.



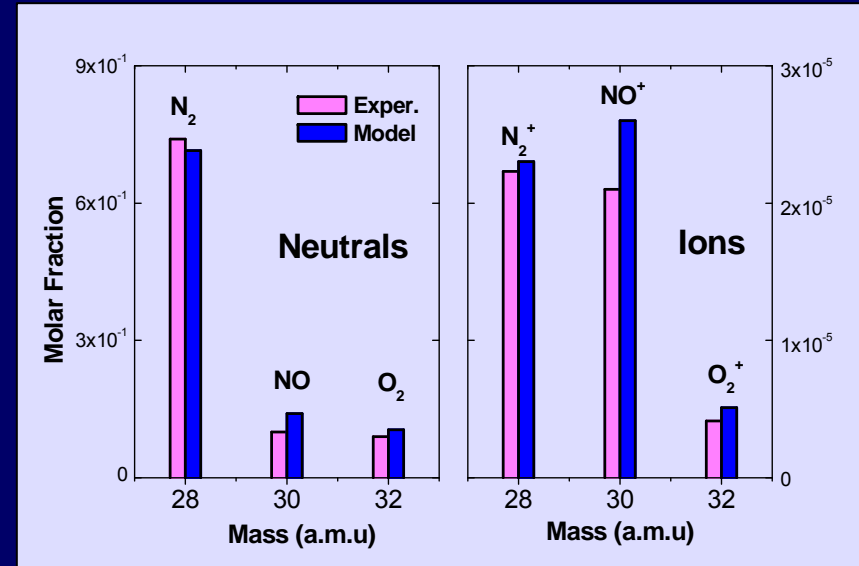
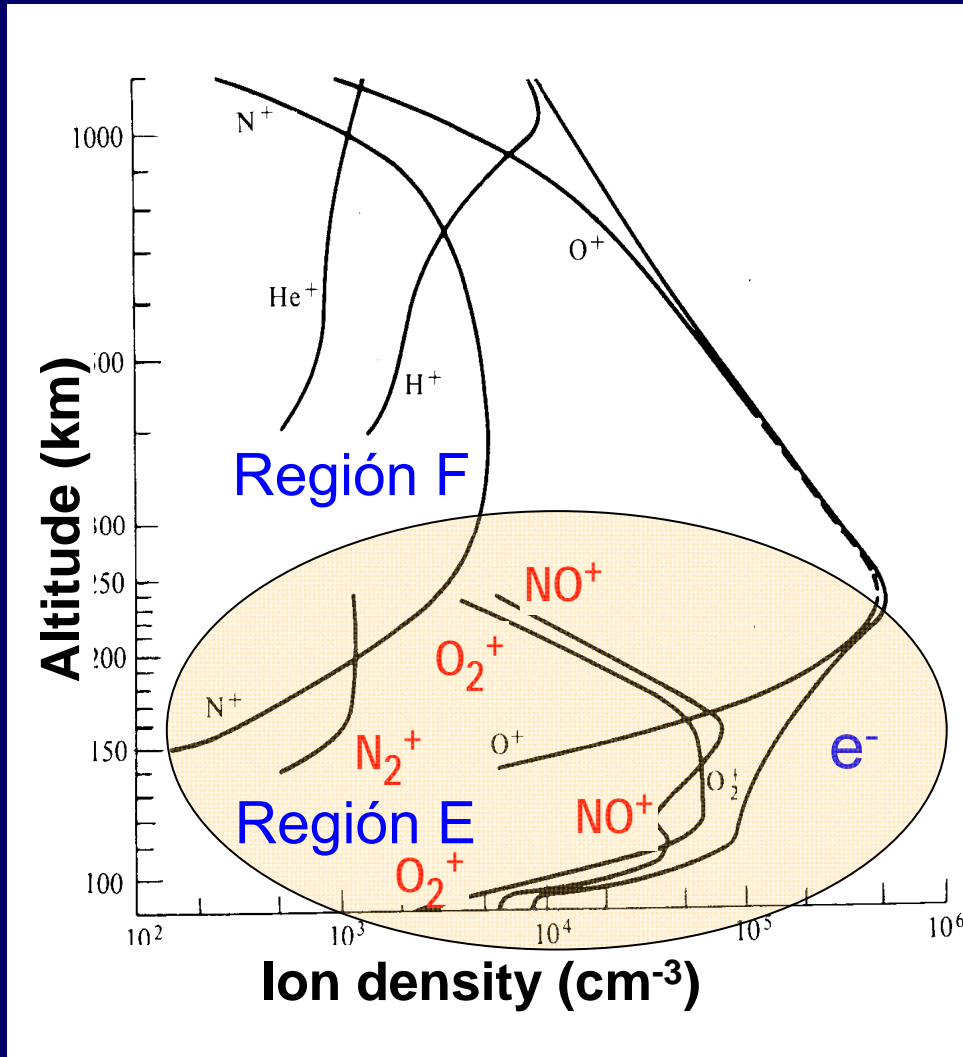
Reflexión de RF  $\Rightarrow$  Transmisión de Radio de Largo Alcance



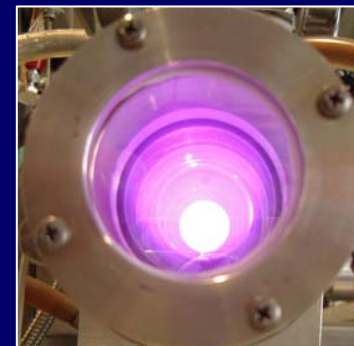
*Como los metales,  
los plasmas reflejan ciertas radiaciones*

# Ionosfera Terrestre:

Distribución de iones  
en función de la altitud



Descarga de aire a baja presión.  
*Lab. Plasmas Fríos. IEM.*



## Auroras Boreales y Australes

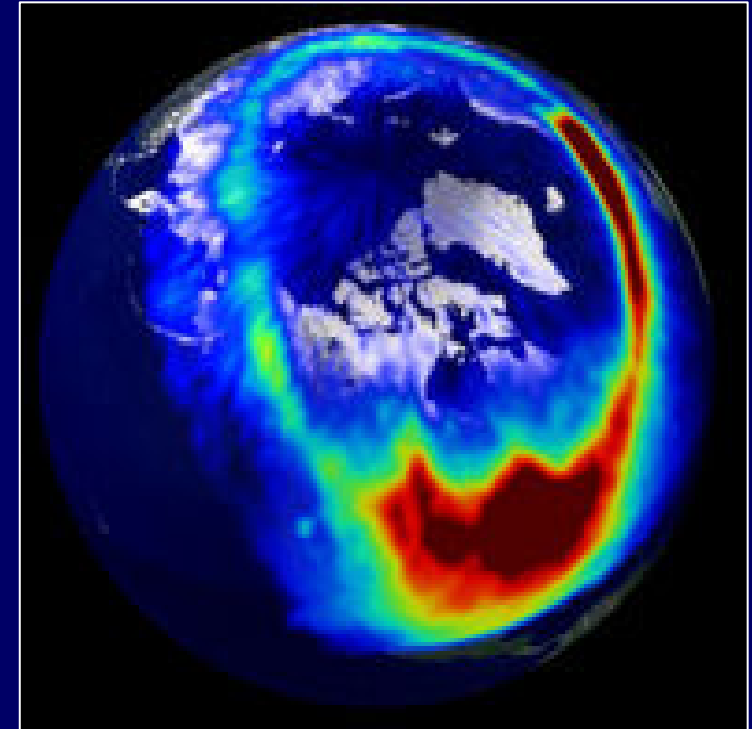
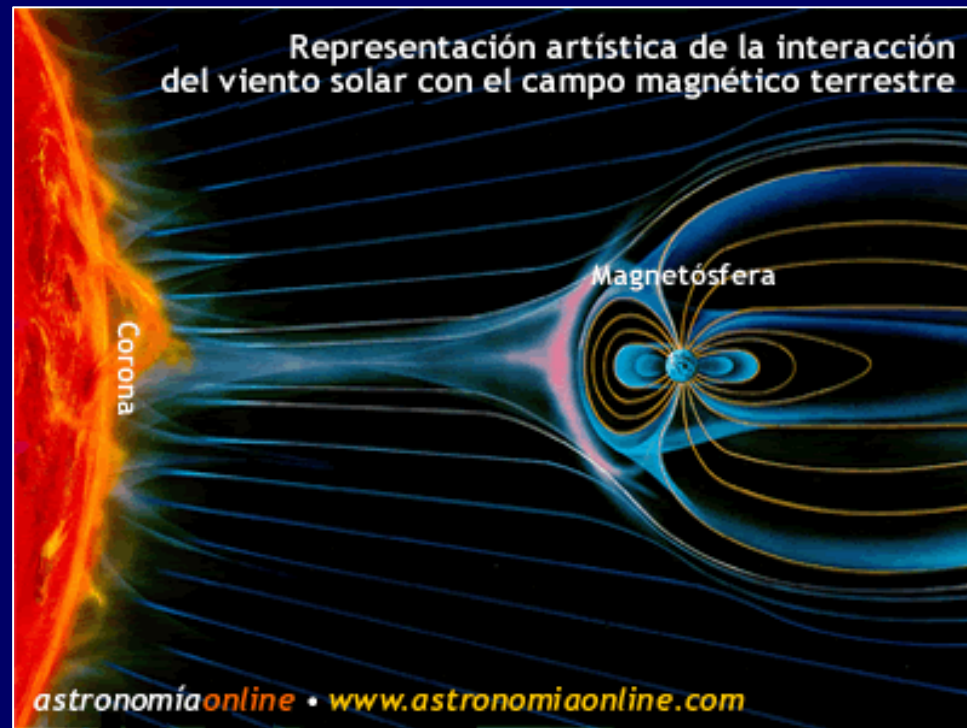
Ocurren en la IONOSFERA

Altitud > 100 km

Latitud > 60°

Fluctuaciones rápidas

Más intensas cada 11 años : ciclo solar





# Rayos

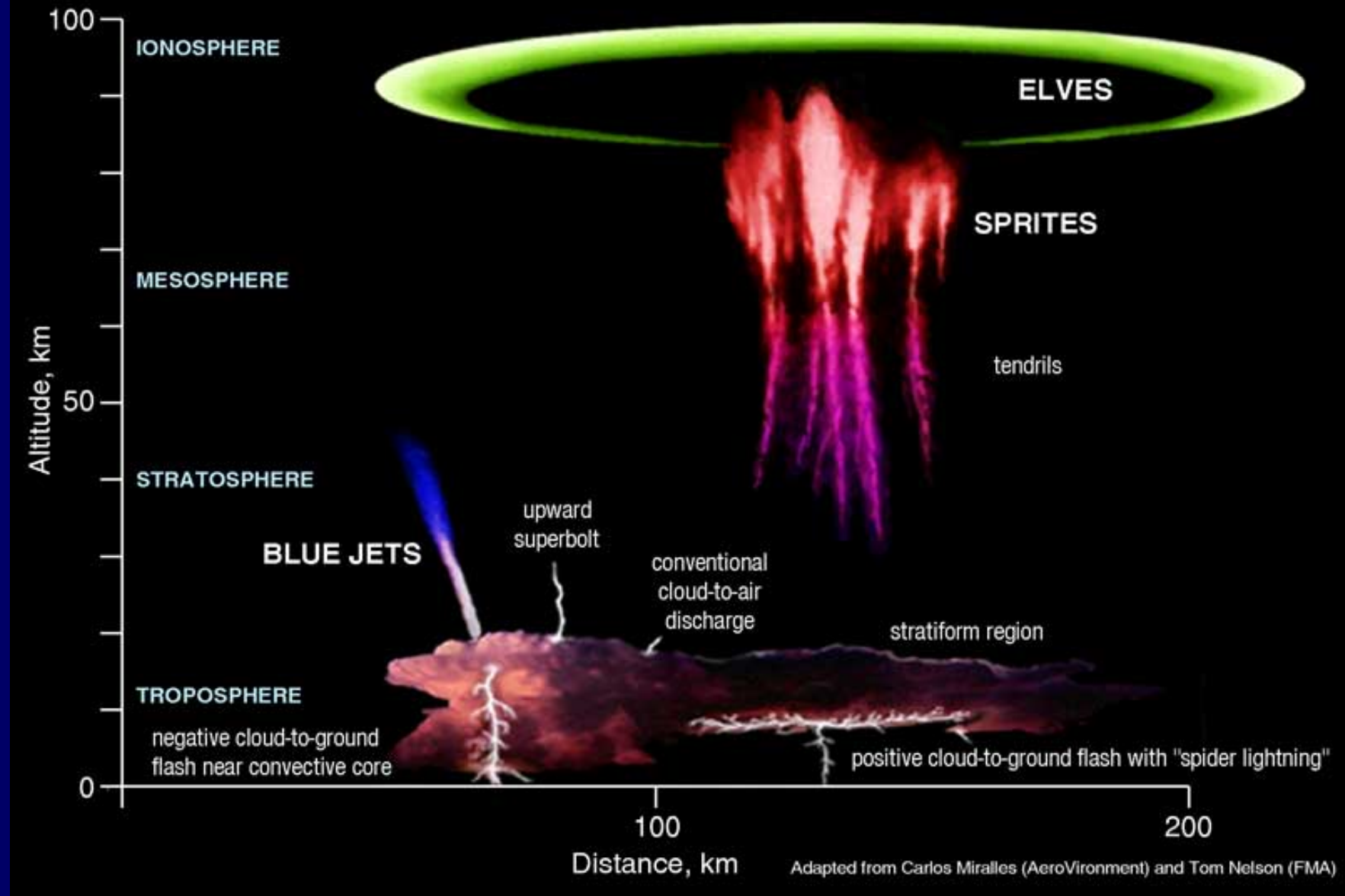
Voltaje	1.000 MV
Corriente	10.000 A
Duración	10 $\mu$ s - 100 ms
Longitud	5 Km
Ionización	Muy alta
Temperatura	30.000 K



Especies producidas:  
 $O_3$ ,  $N_xO_y$

# "Lightning Sprites & Elves" ("Hadas y Elfos" en la Mesosfera Terrestre)

Observados por primera vez en 1990 (NASA Space Shuttle).



# Llamas

Predominio de Reacciones Químicas (Combustión)

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



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

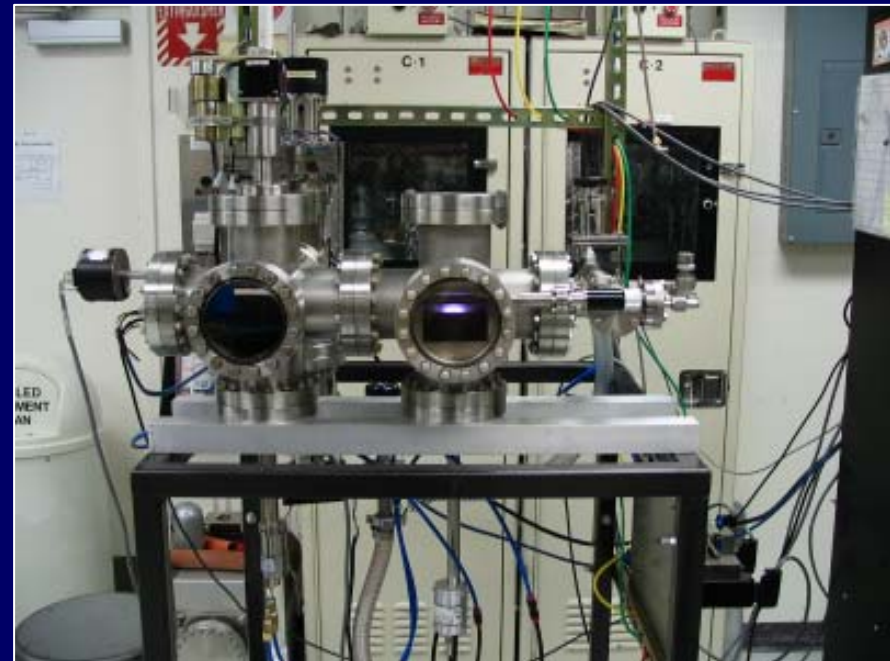
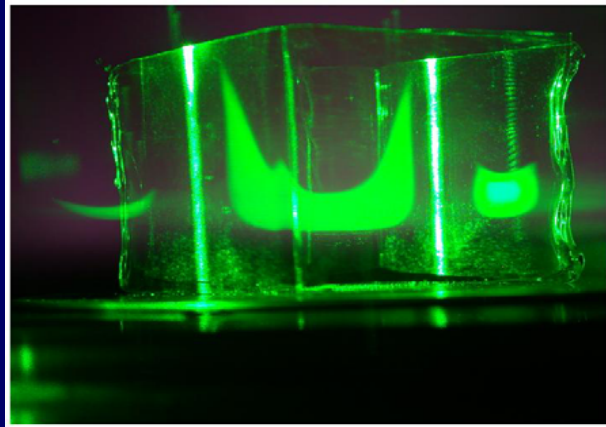
*Conducen la Electricidad: Resistencia eléctrica de varios  $M\Omega$   
1ª referencia: Academia de Ciencias de Florencia (1667)*



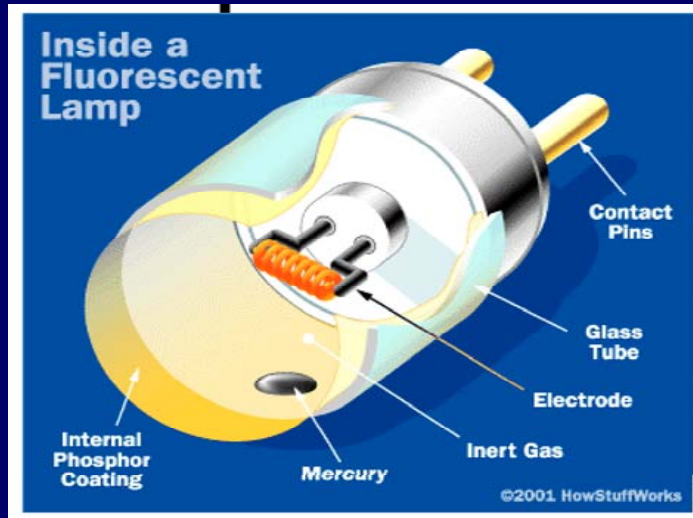
## Fuegos Artificiales

Los distintos colores corresponden a aditivos de distintas sustancias  
Na (amarillo), Sr (rojo), Ba (verde)...

# APLICACIONES TECNOLÓGICAS



# Iluminación por Plasma



## *Lámparas fluorescentes y de bajo consumo*

Ar (2-3 mbar)

Hg (0.005 mbar) → UV

Cubierta Fosforescente

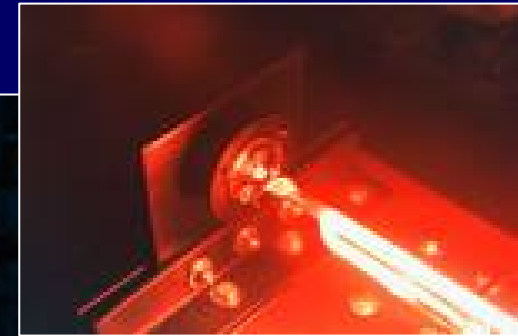
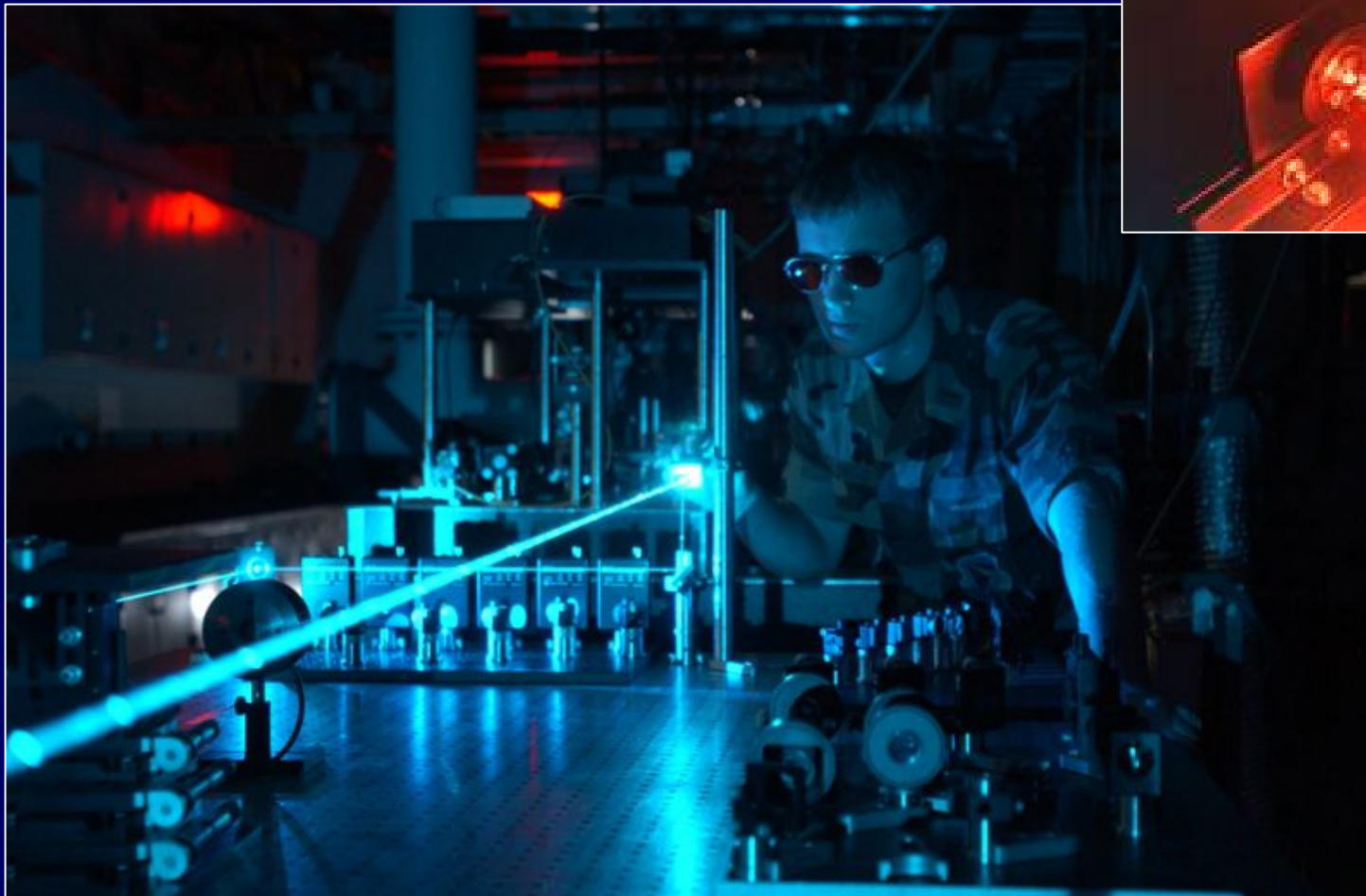
## *Lámparas de Arco de Alta Intensidad*



# Tubos de Láseres de Gas

(He-Ne, Ar, N<sub>2</sub>...)

Luz altamente colimada y monocromática

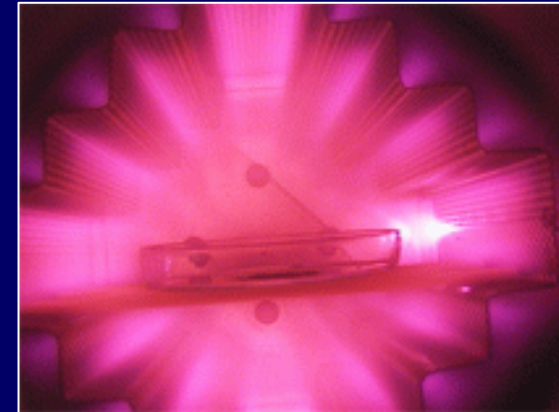


## Esterilización por plasma

Aplicaciones médicas y de consumo alimentario, en materiales que no soportan altas temperaturas.

Doble acción bactericida:

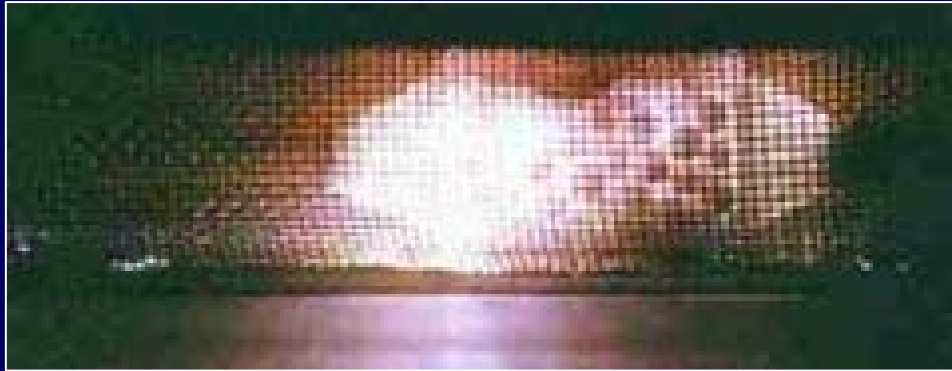
- Radiación ultravioleta.
- Radicales fuertemente oxidantes.



Catéteres para diálisis y tubos de ensayo de materiales plásticos

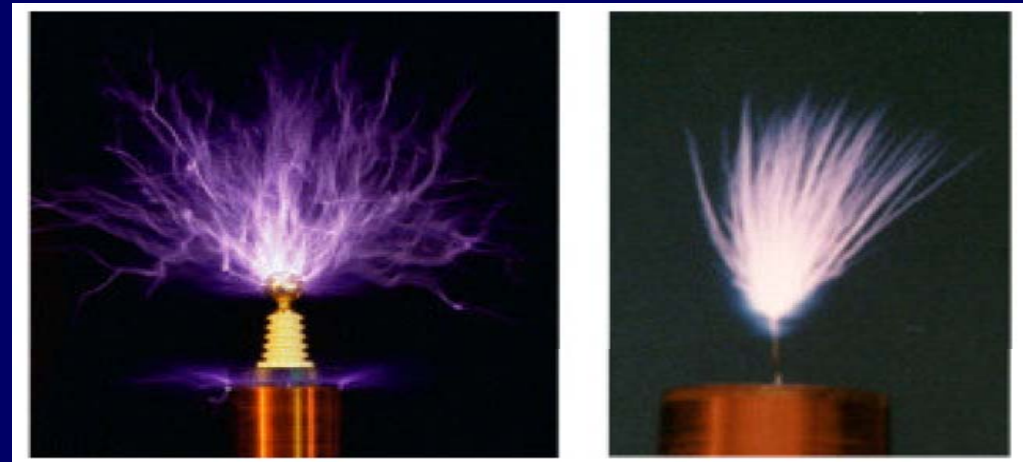


## Destrucción de Contaminantes Atmosféricos



Plasma sobre catalizador  
para eliminar CO y NO tóxicos  
de los tubos de escape

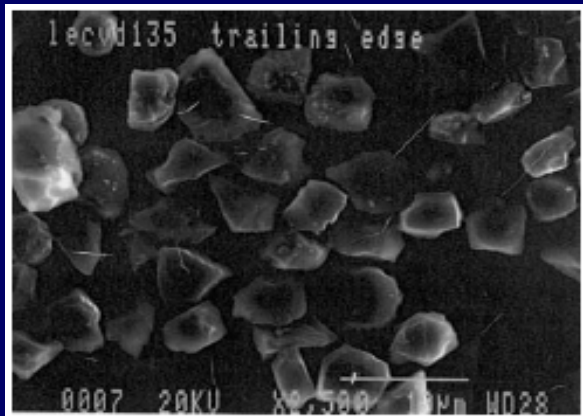
Descargas en corona  
a presión atmosférica



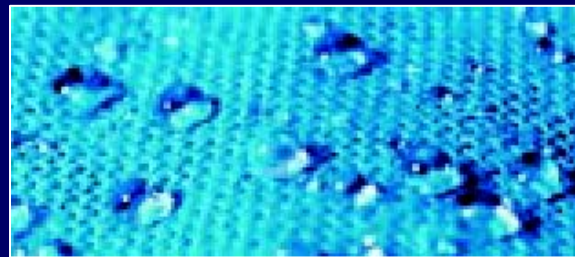
## Cambios superficiales de materiales

Dureza, resistencia al rozamiento o al ataque químico, impermeabilidad, conductividad, propiedades ópticas, biocompatibilidad de implantes...

**Notable mejora de las propiedades de muy diversos productos**



**Cristales de diamante producidos por un plasma de CO-CH<sub>4</sub> para recubrir herramientas de corte**



**Tejidos tratados con plasma, Para repeler la humedad y las grasas**

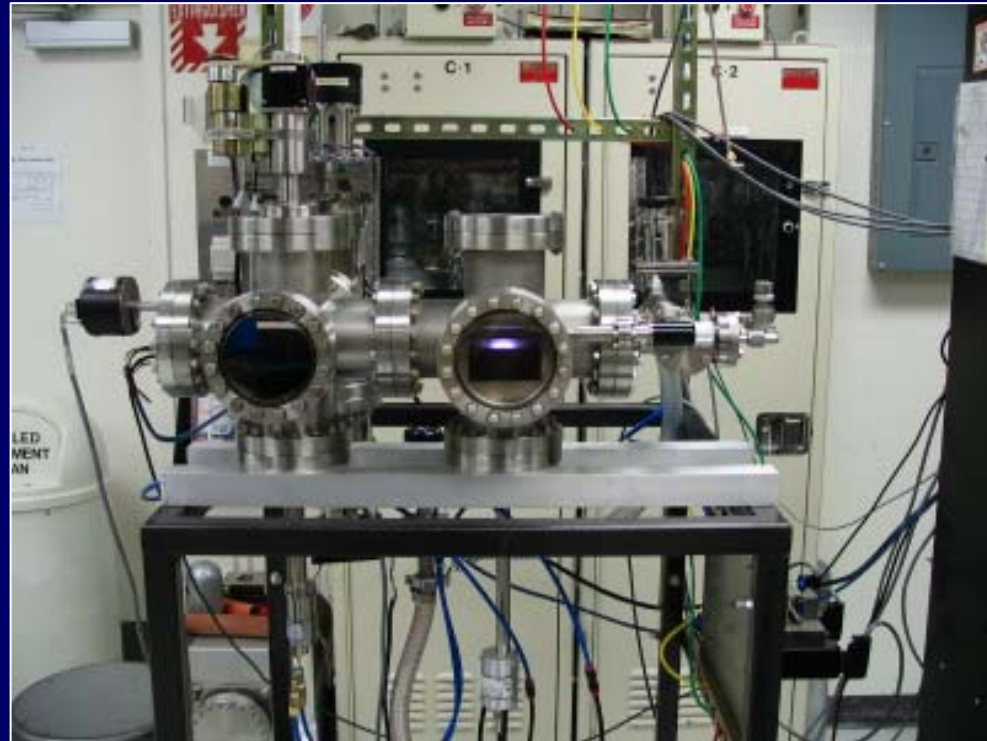


**Prótesis metálica de rodilla cubierta de material biocompatible**

# Microelectrónica



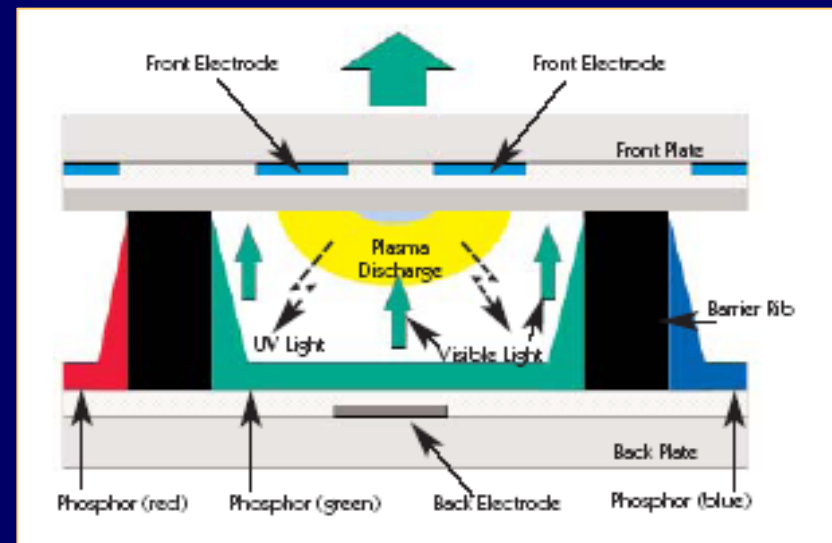
*Colaboración ISOM (UPM)  
Lab. Plasmas Fríos (CSIC)*



Fabricación de microcircuitos  
mediante “sputtering”, “etching”...  
con tratamientos multicapa



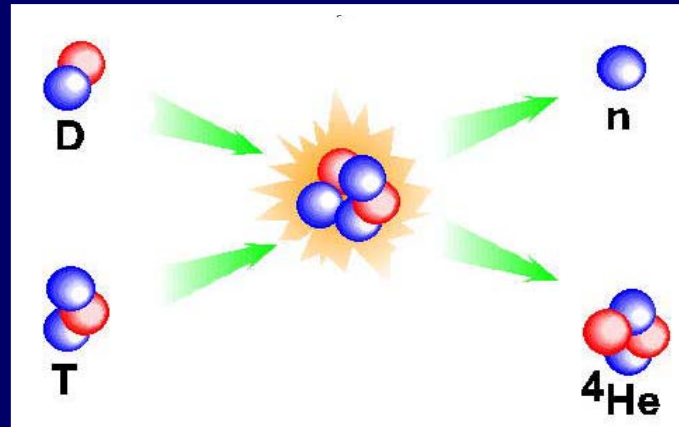
## Pantallas de Plasma



## Reactores de Fusión Termonuclear

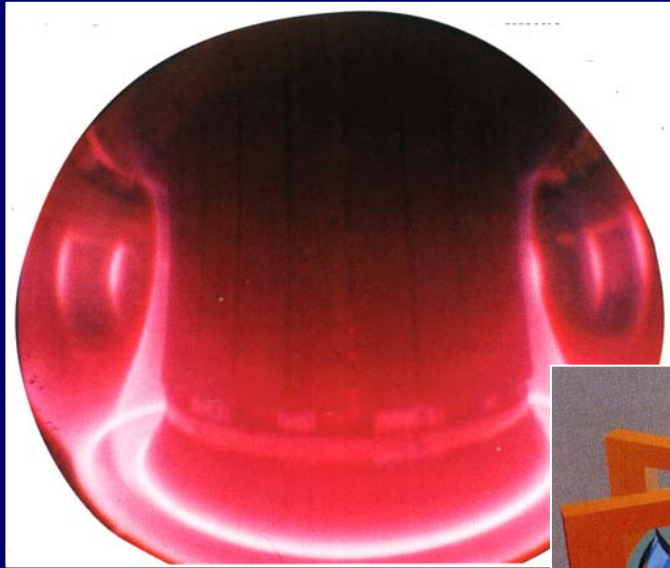
Plasma caliente:  $T = 10^8$  K

¡T mayor que en el núcleo solar!, a baja presión

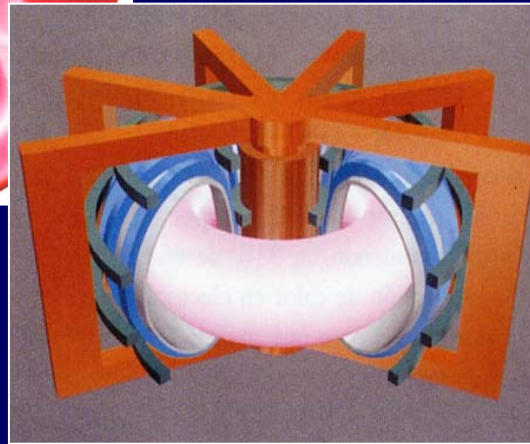


*Consumo energético por persona  
en un país industrializado durante toda la vida:*

- 10 g D : 0,5 m<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O
- 30 g Li



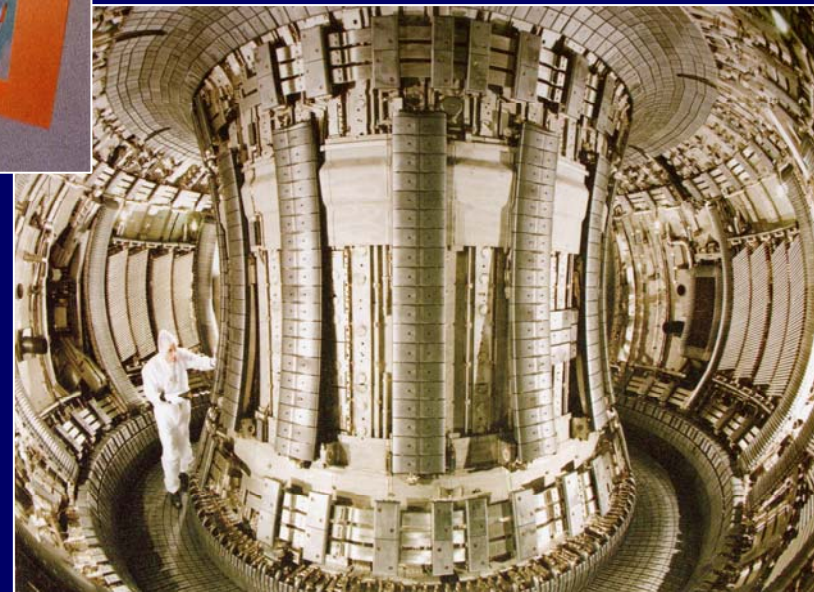
Plasma de Fusión en el interior de un reactor de tipo Tokamak



Confinamiento del plasma, lejos de las paredes del reactor, por un potente campo magnético.

Actualmente:  
Intensa investigación  
en interacción Plasma-Pared

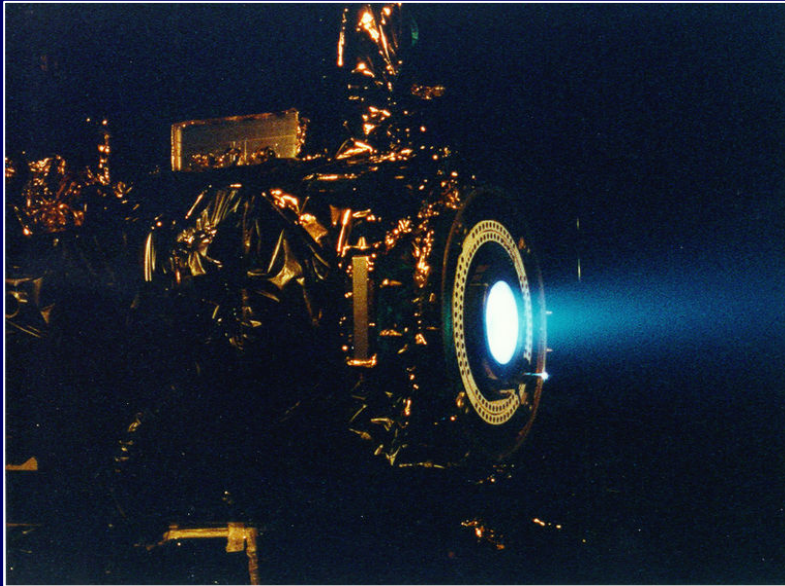
*Colaboración CIEMAT  
Lab. Plasmas Fríos (CSIC)*



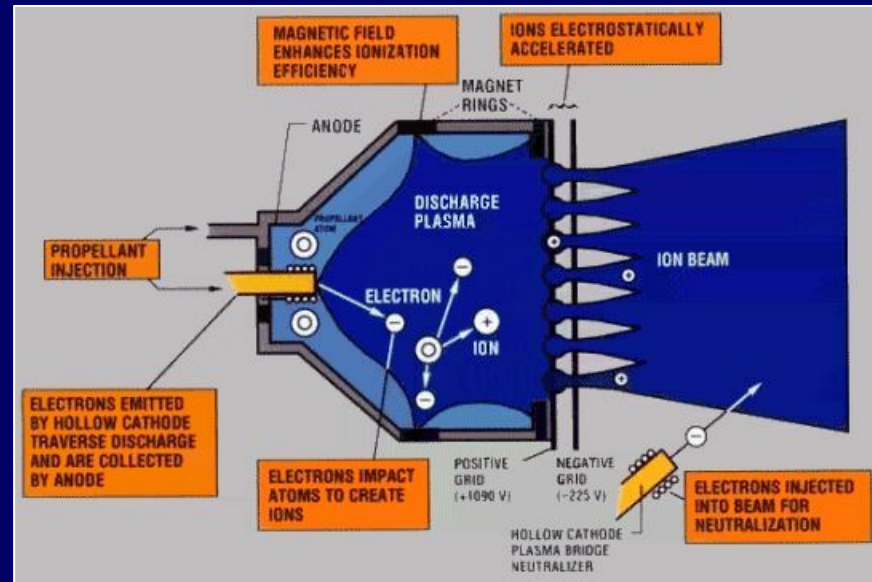
40  
Joint European Torus (J.E.T, U.K.)

# Motores Iónicos

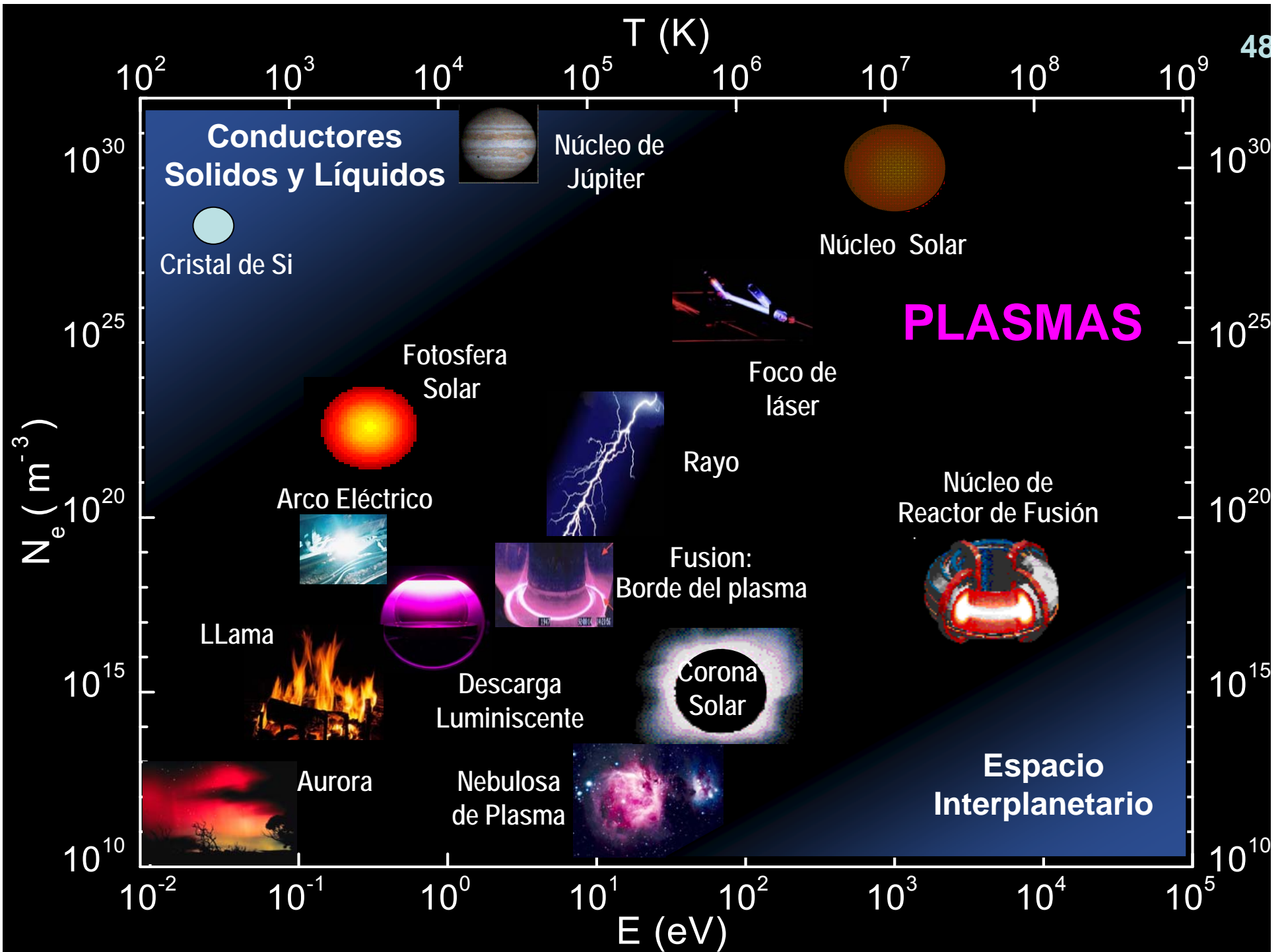
*Pueden ser el medio de propulsión espacial del futuro*



Sonda Lunar “Smart-1”  
de la Agencia Espacial Europea.  
Lanzada en Agosto de 2006



Tras generar el plasma (Xe),  
los iones se aceleran  
en un campo eléctrico  
y se recombinan a la salida.



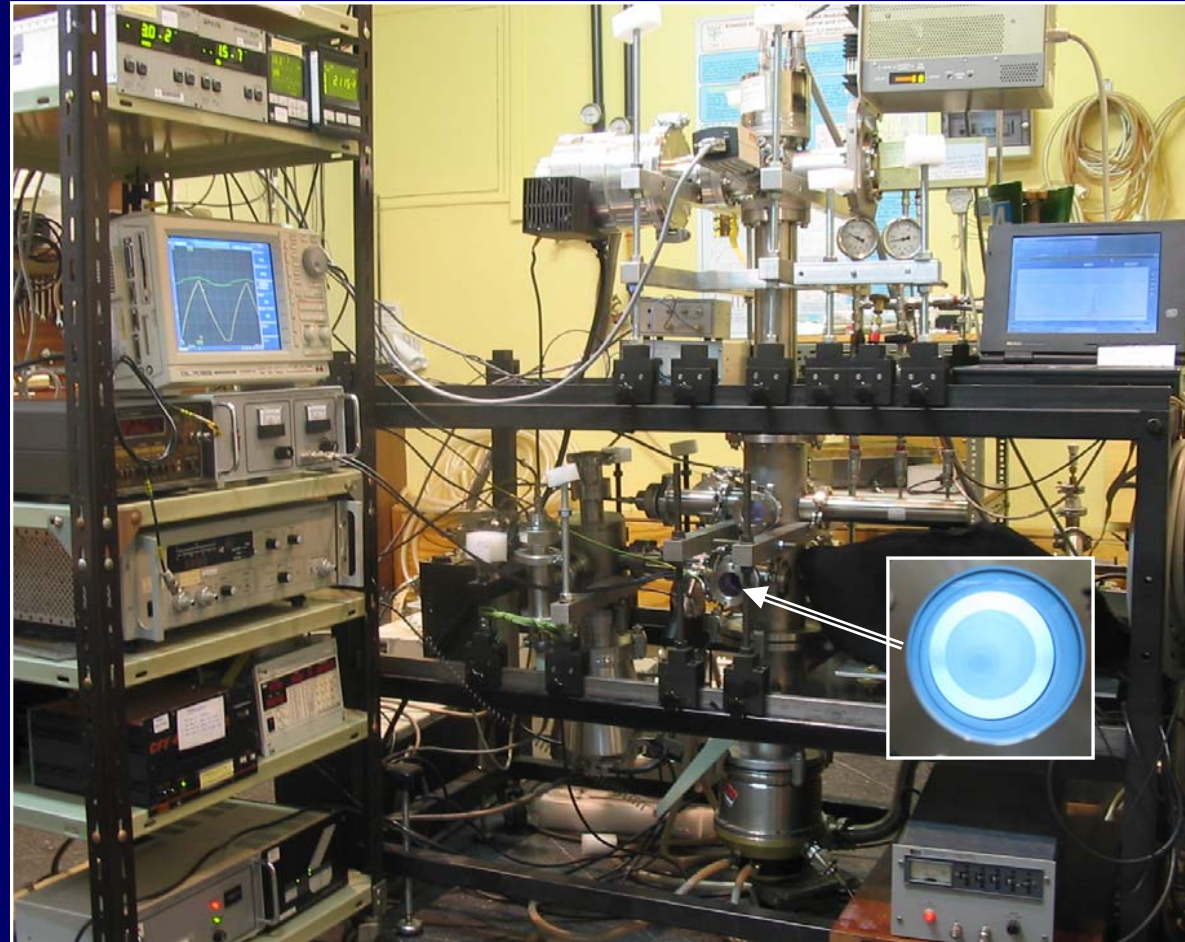


## Resumen

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

Los plasmas representan un papel cada vez más importante en nuestras vidas, a través del desarrollo científico y tecnológico actual.

# ¡Muchas gracias!



Laboratorio de Plasmas Fríos. Instituto de Estructura de la Materia. CSIC  
<http://www.iem.cfmac.csic.es/departamentos/fismol/fmap/plasmas.htm>