

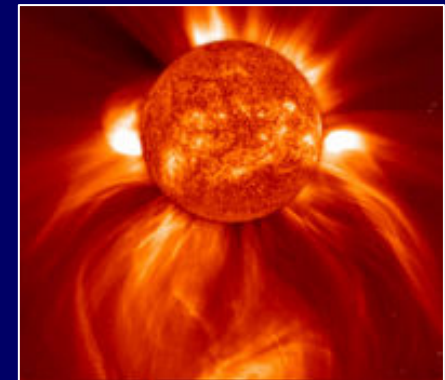
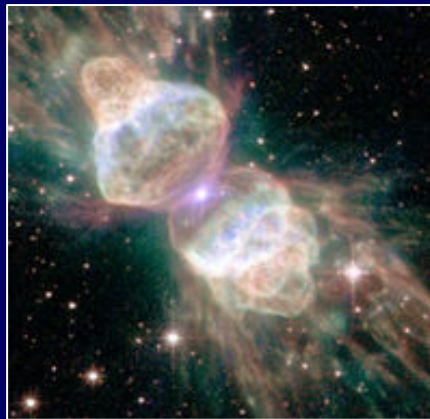


LOS PLASMAS :

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

Isabel Tanarro

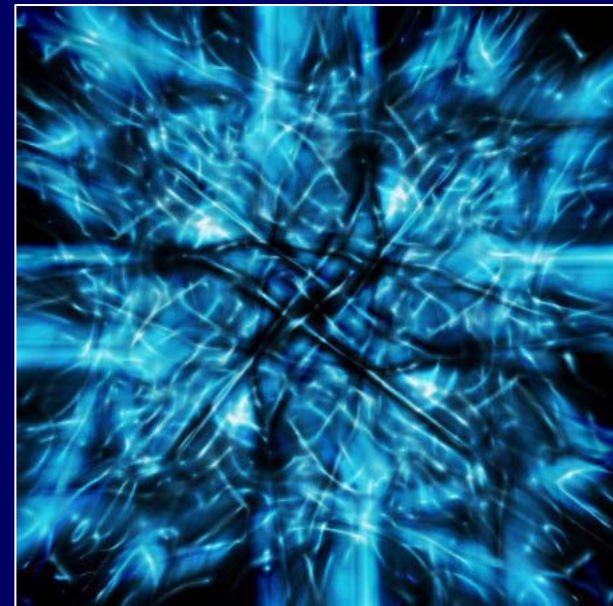
*Dpto. de Física Molecular
IEM, CSIC*



<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...



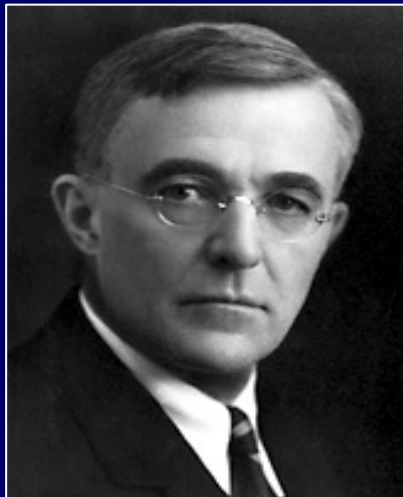
¡Todos los plasmas emiten luz!

(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).*

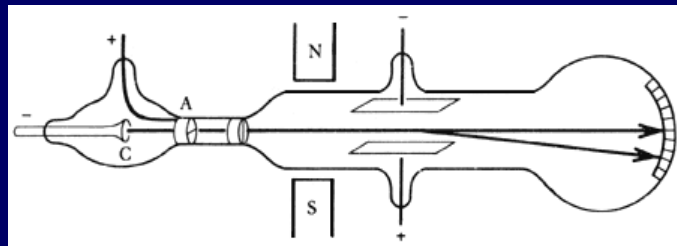
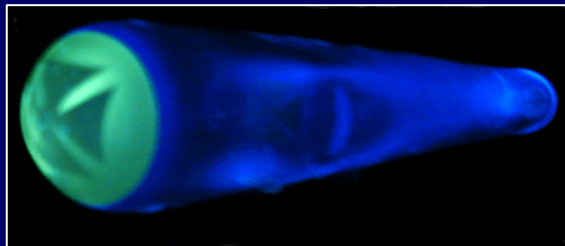
*Irving Langmuir (1881-1957)
General Electric, New York
P. Nobel, 1932*

PRIMEROS ESTUDIOS DE PLASMAS

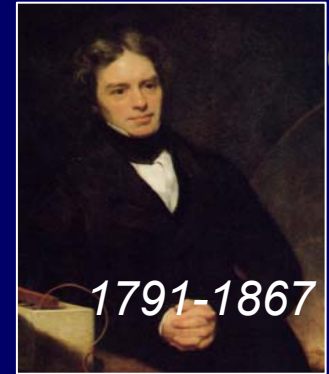
Predicho por M. Faraday (1820)



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

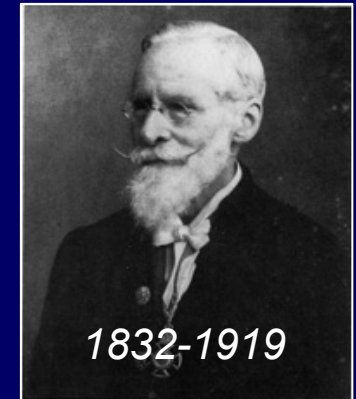


*J. J. Thomson: Desviación de rayos catódicos
(electrones) con campos electromagnéticos.
Origen del televisor.*



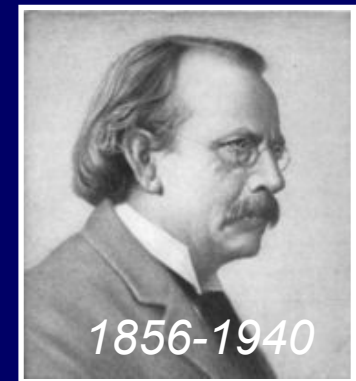
1791-1867

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

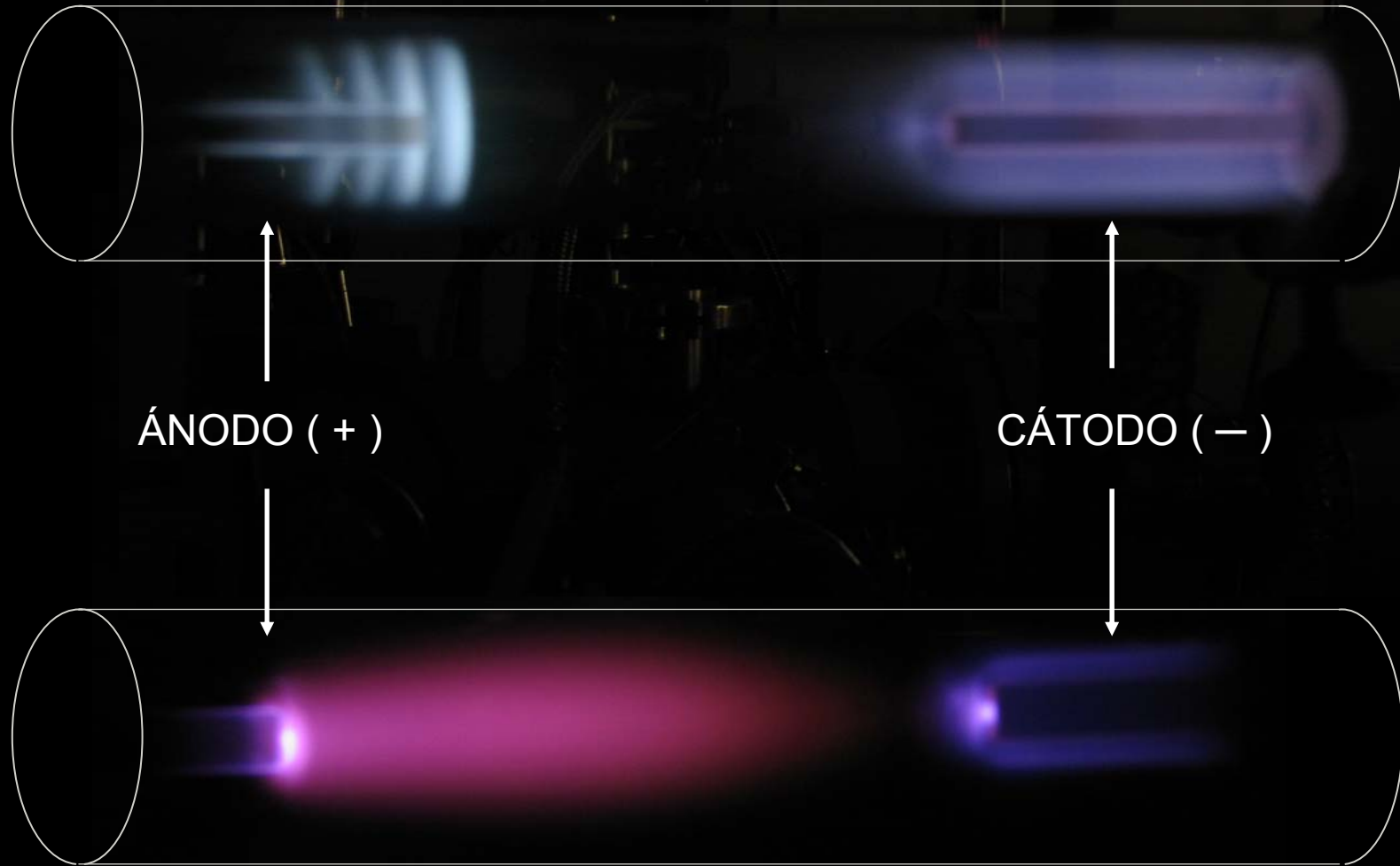


Célula de Descarga y Bomba de Vacío (1880)

Alto Voltaje ~ 1000 V

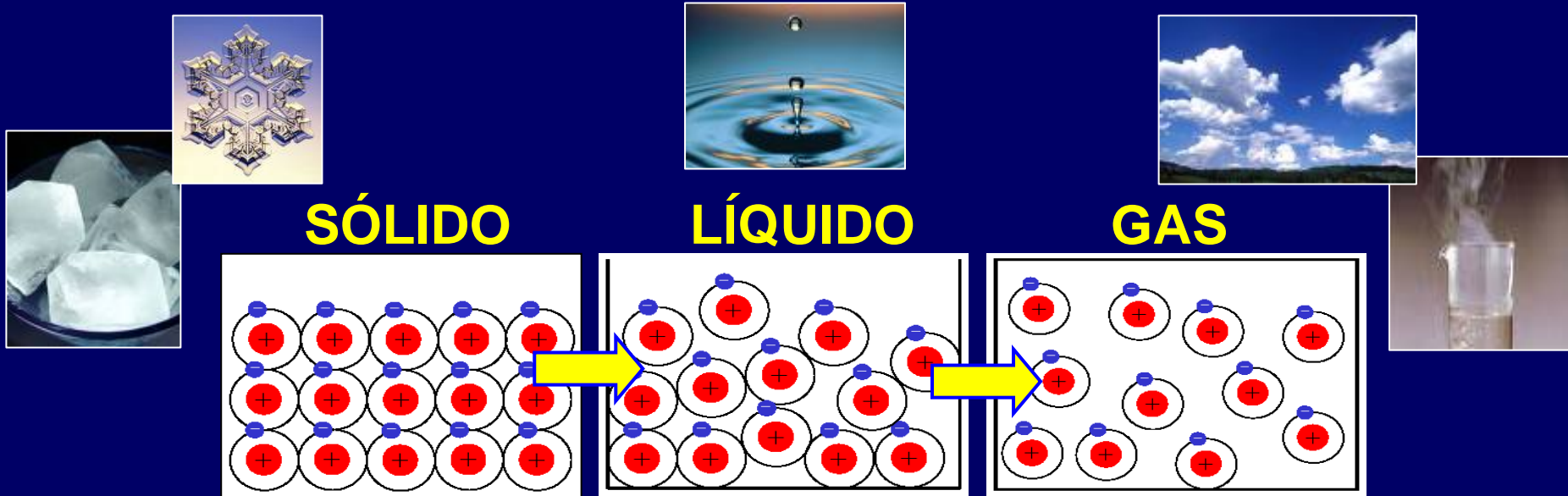
$P = 0.001$ atmósferas (1 mbar)
(25.000.000.000.000.000 moléculas/cm³)

Dos aspectos de un plasma de aire a ~ 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

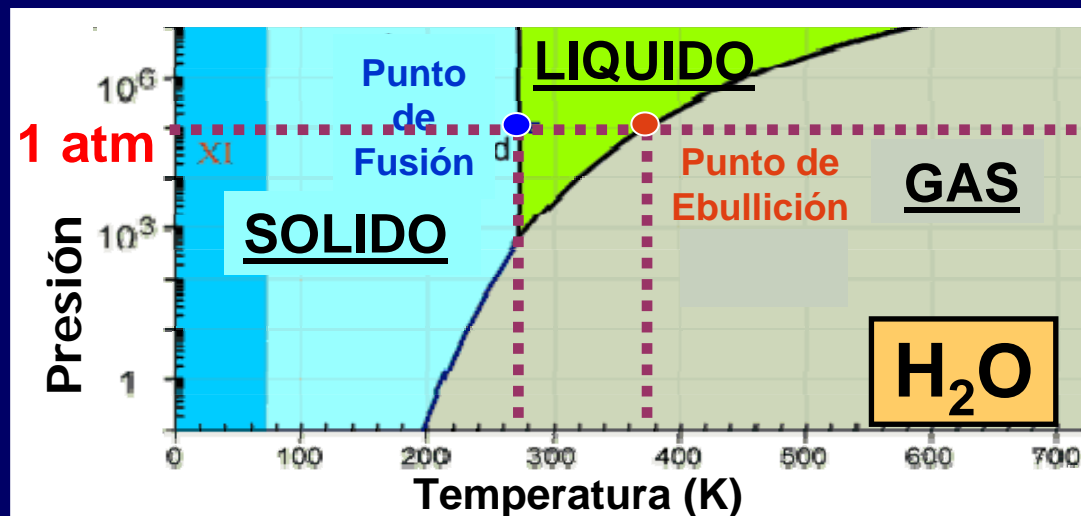
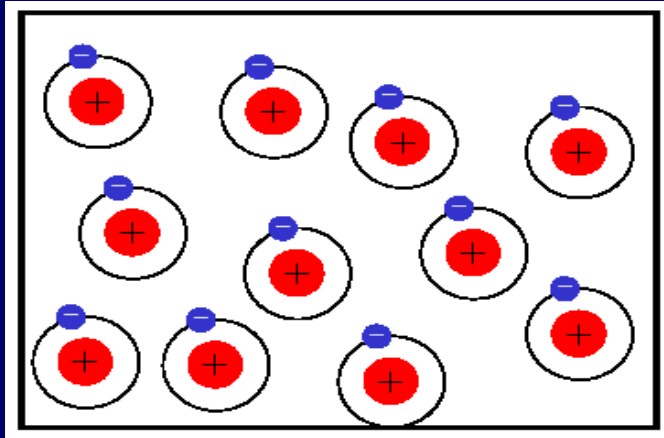
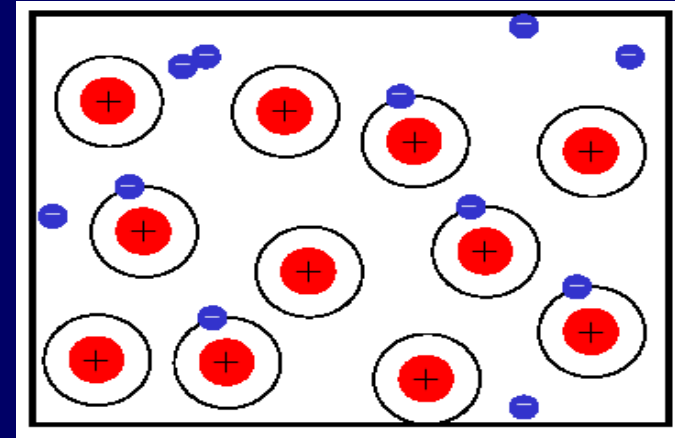


Diagrama de fases del agua

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

Eléctrica
Térmica
Luminosa
Química
Nuclear

- ELÉCTRICAMENTE NEUTRO
- BUEN CONDUCTOR ELÉCTRICO

Magnitudes fundamentales: N_e , T_e

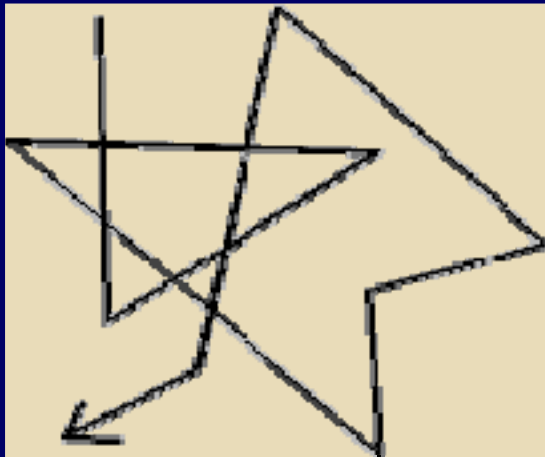
$$\text{Grado de Ionización} = \frac{\text{N}^\circ \text{ electrones}}{\text{N}^\circ \text{ partículas neutras}}$$

Diferencia entre Gases y Plasmas

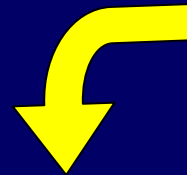
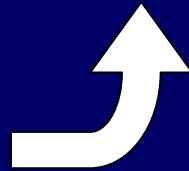
11

Gases

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



*Movimiento de una
partícula neutra*



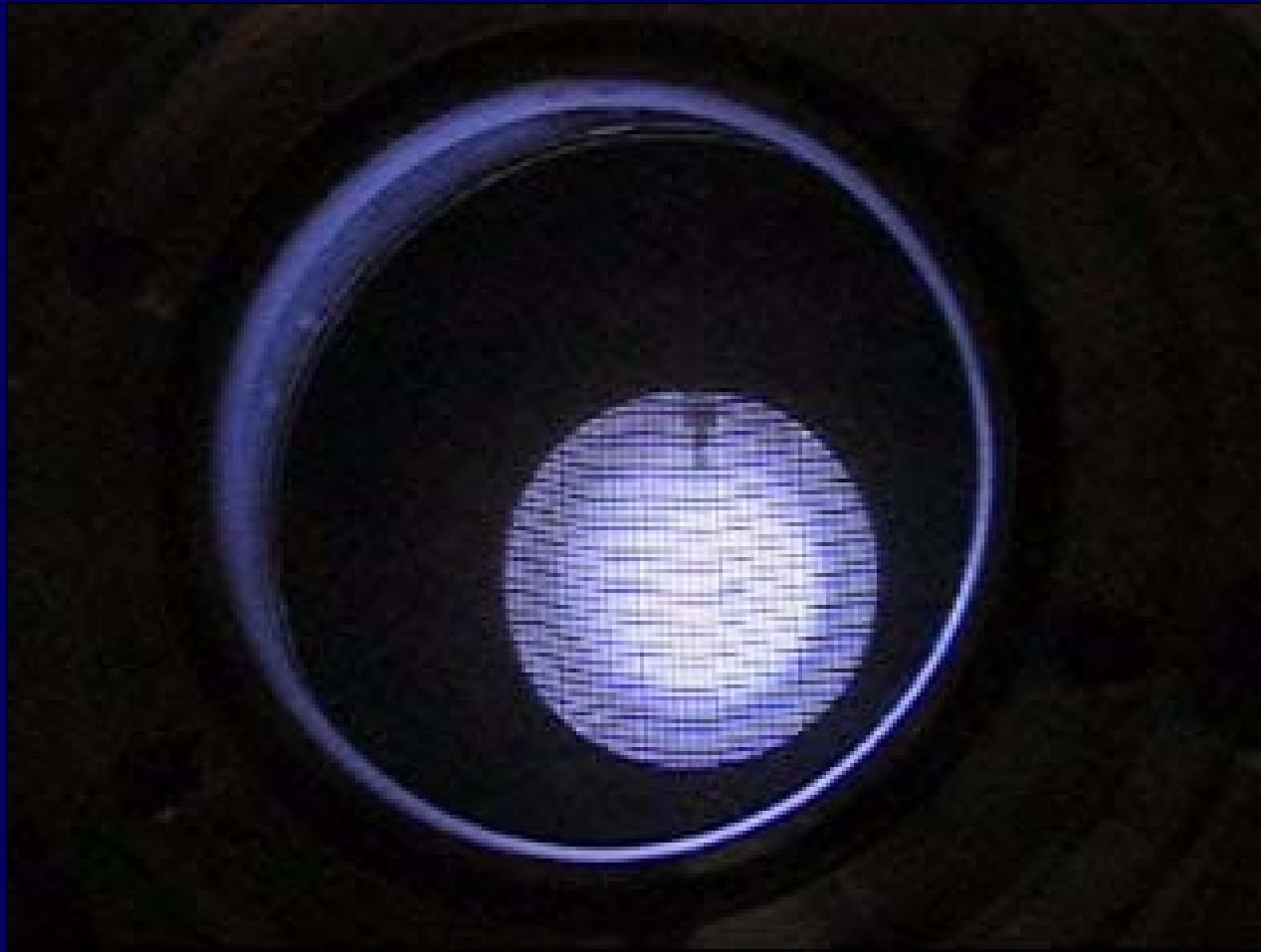
*Movimiento de una
carga eléctrica*

Plasmas

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

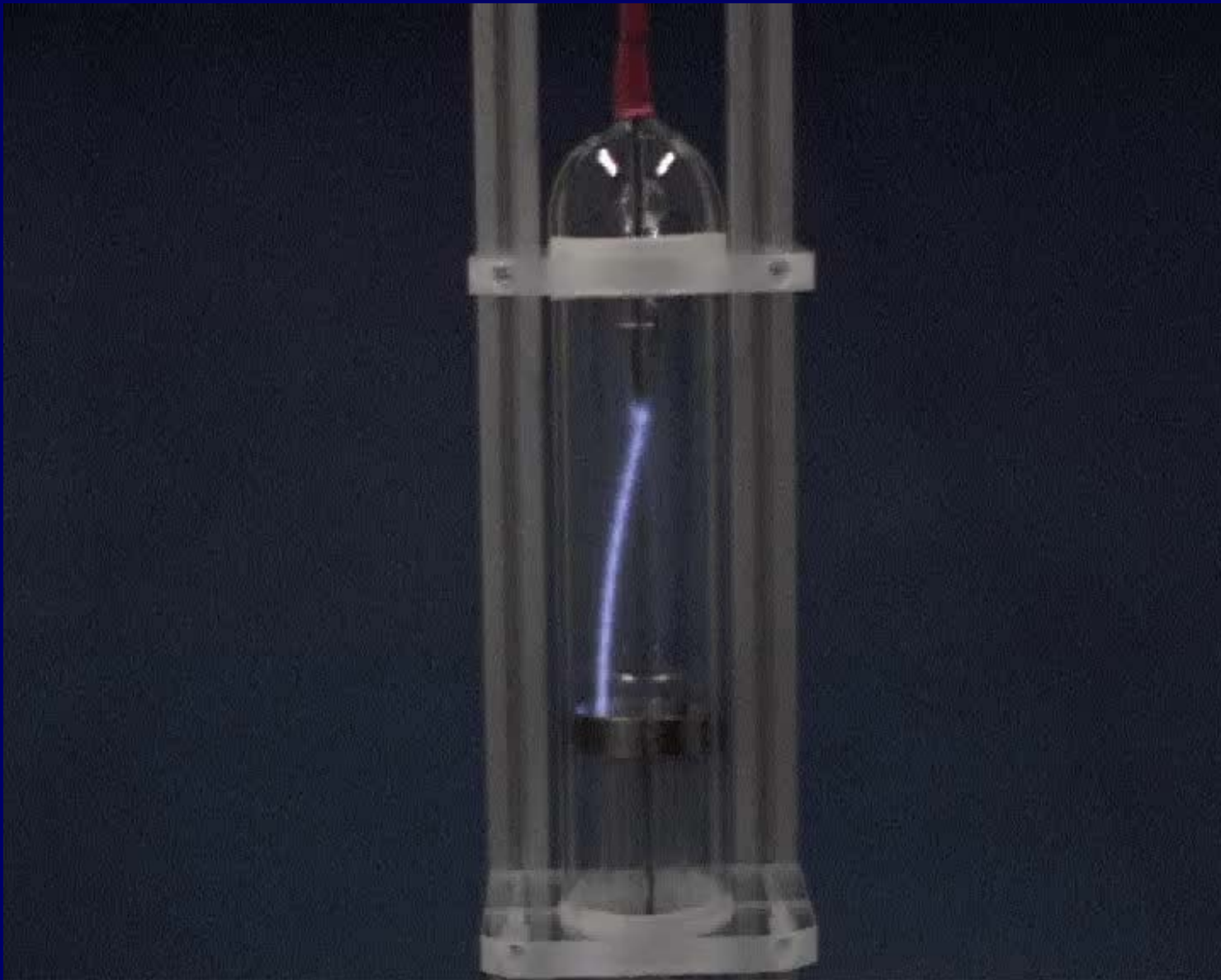
11

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



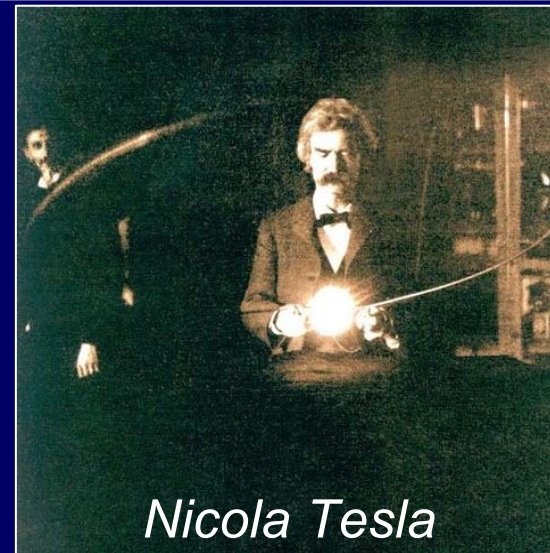
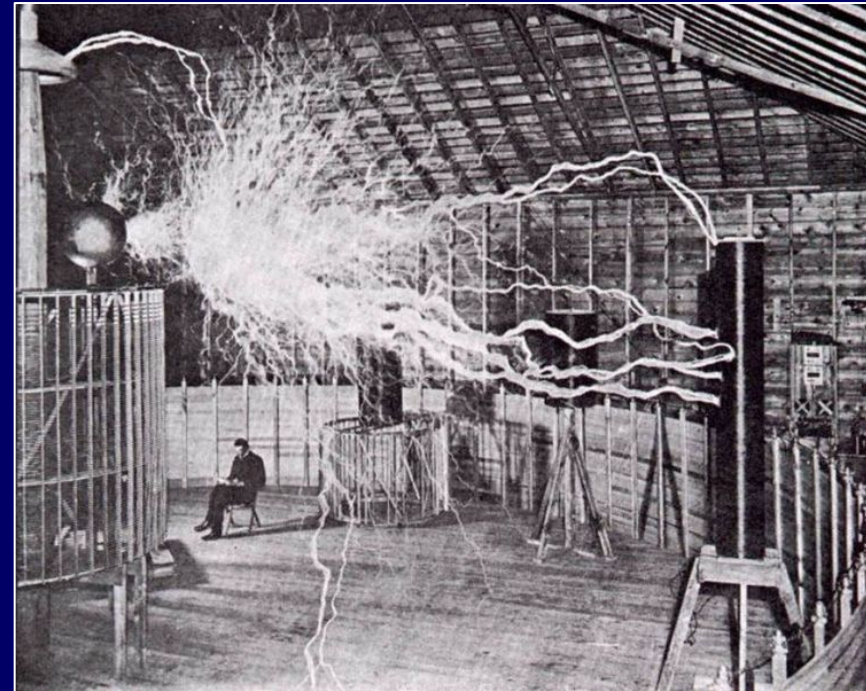
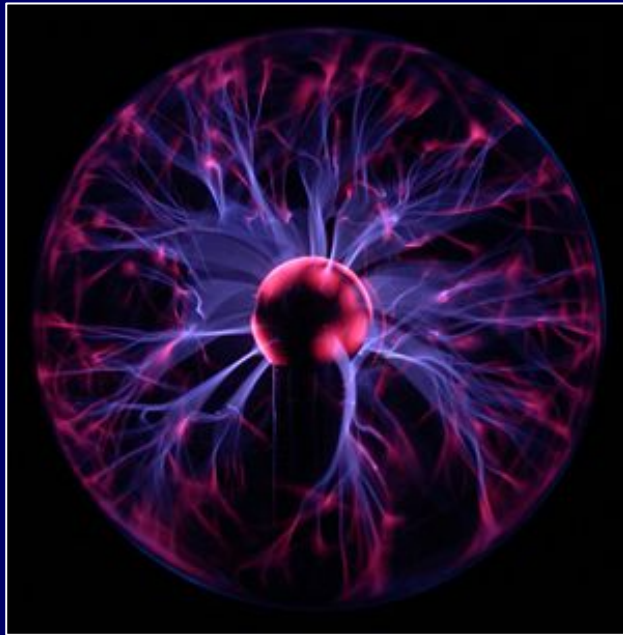
El plasma “escapa”
por un pequeño orificio lateral

Lab. de Plasmas Fríos, IEM, CSIC



Efecto de un imán sobre el plasma.
Prof. H. Kersten (Germany)

Bolas de Plasma



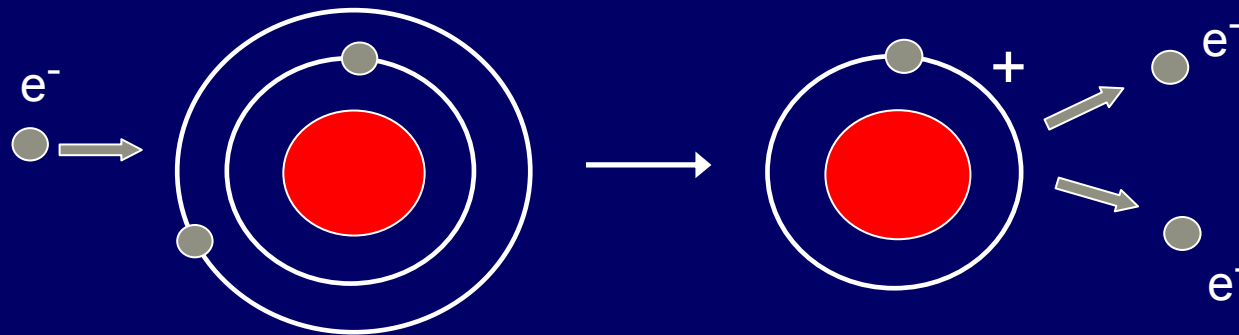
*Inventada por Nicola Tesla (1856-1943)
1^{er} Motor de Corriente Alterna (1887)
1^a Central Hidroeléctrica (Niagara Falls 1893)*

*Nicola Tesla
& Mark Twain (1894)*

¿Que fenómenos ocurren
en un plasma a nivel
Microscópico?

IONIZACIÓN INICIAL

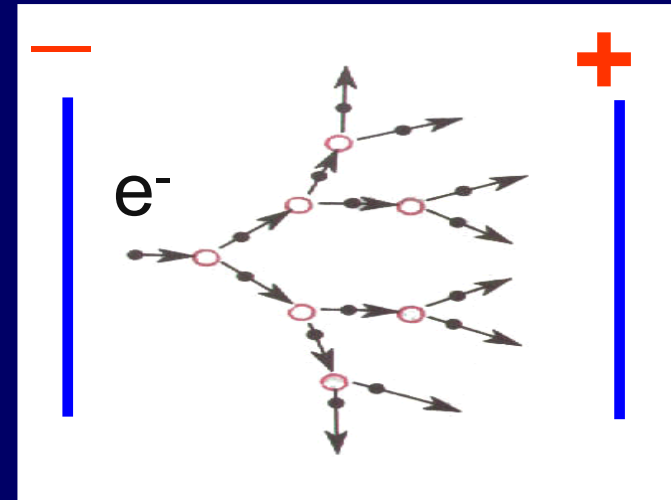
Fenómeno desencadenante del plasma.



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.



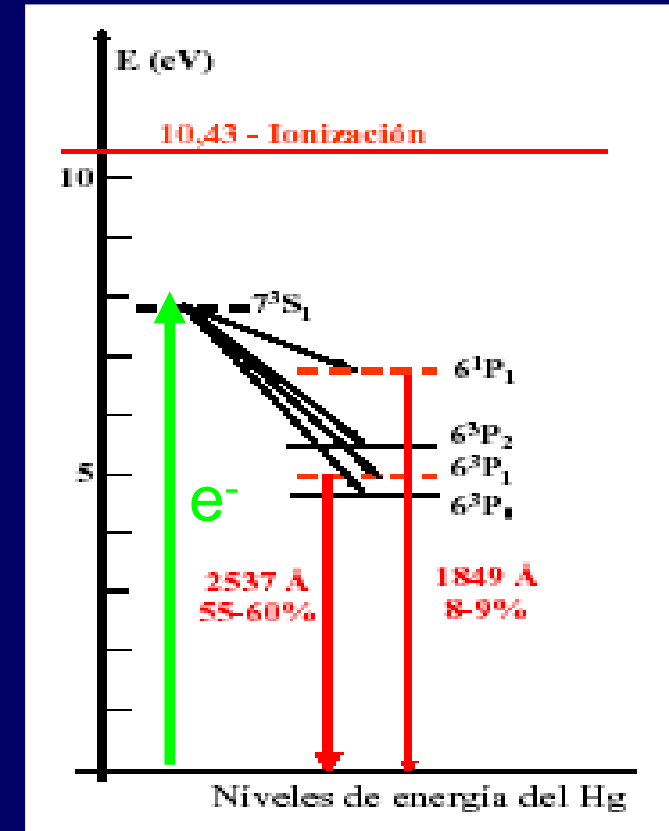
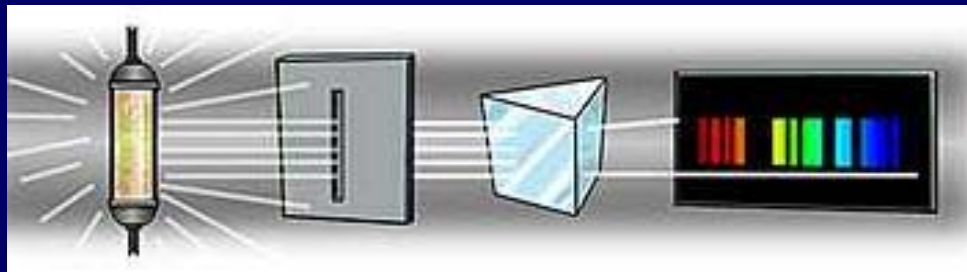
OTROS PROCESOS

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

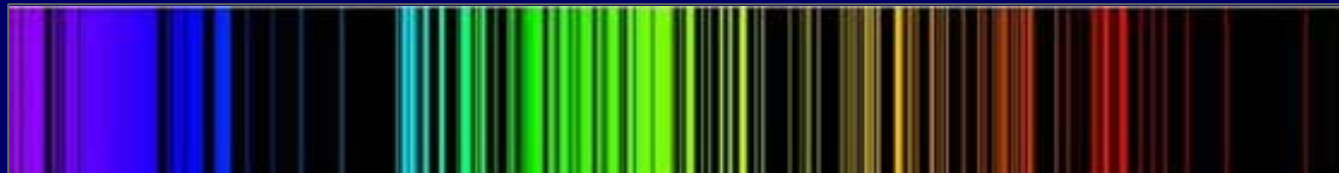
H



Au



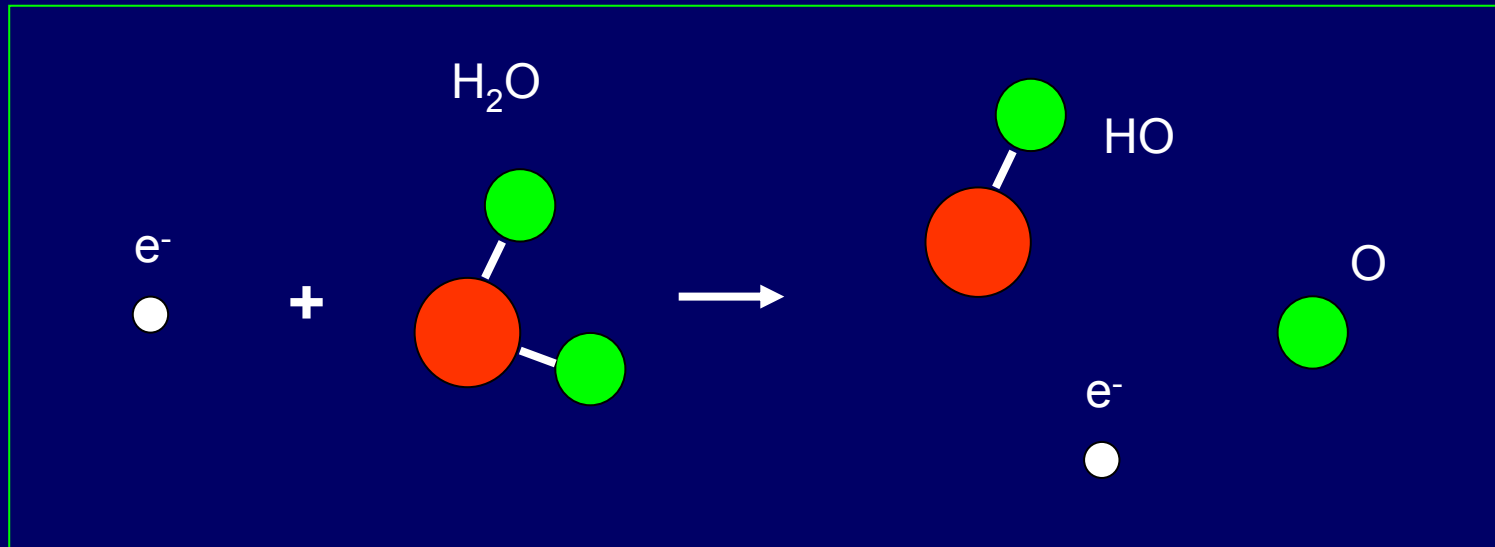
Fe



*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

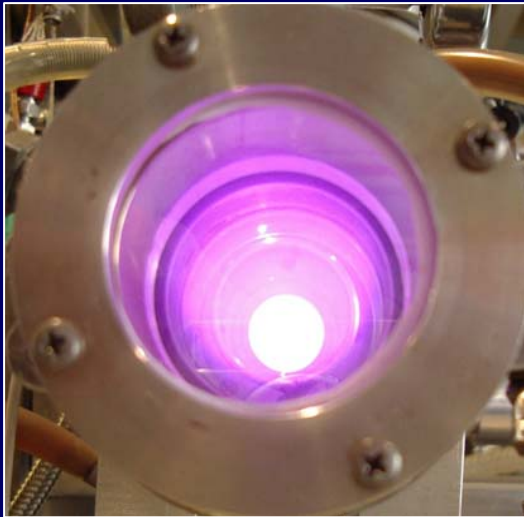


*Las moléculas se fragmentan
y liberan átomos y radicales (trozos de moléculas)
que a su vez reaccionan químicamente
y dan lugar a nuevas especies
(en vapor de agua: H_2 , O_2 , H_2O_2)*

**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.



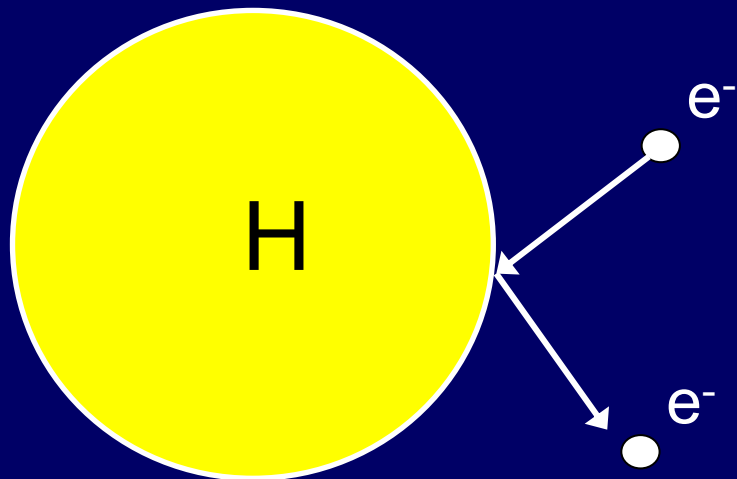
Plasma



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

Lab. de Plasmas Fríos, IEM, CSIC

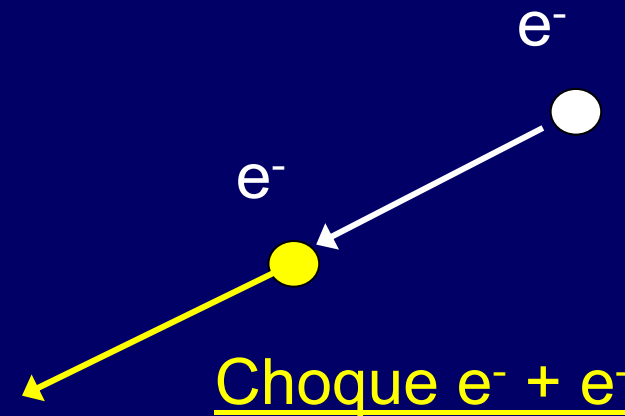
6.- ¡ Pero en las Colisiones Elásticas entre los electrones y otras especies, mucho más pesadas, casi NO hay cesión de la Energía Cinética que ganan los electrones, al ser acelerados por el campo eléctrico !



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) ²³
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.

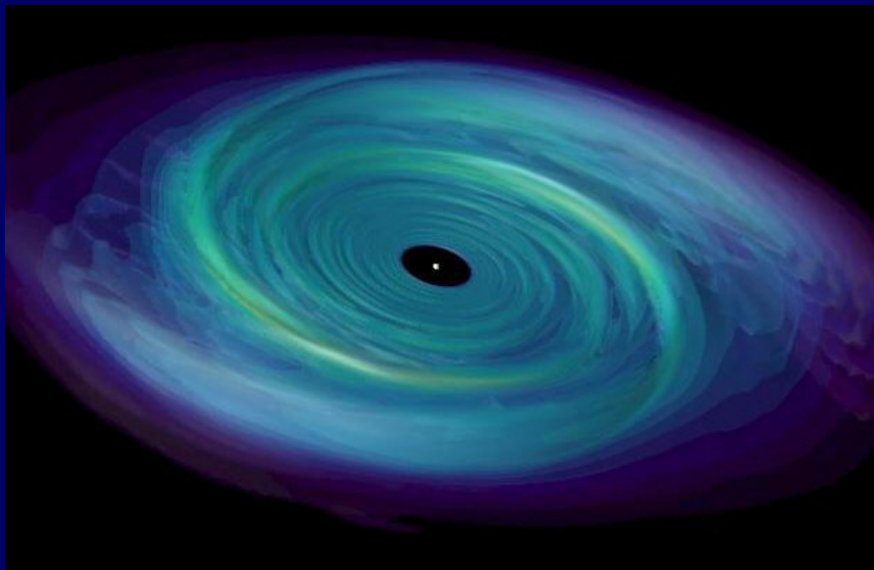
Con tales Características
los Plasmas presentan muy diversas
Manifestaciones Naturales
y Aplicaciones Tecnológicas

Ejemplo de plasma sin electrodos

Excitación por Microondas en
célula de Gas a Baja Presión (~ 1 mbar)



PLASMAS
en la
NATURALEZA



Nebulosas

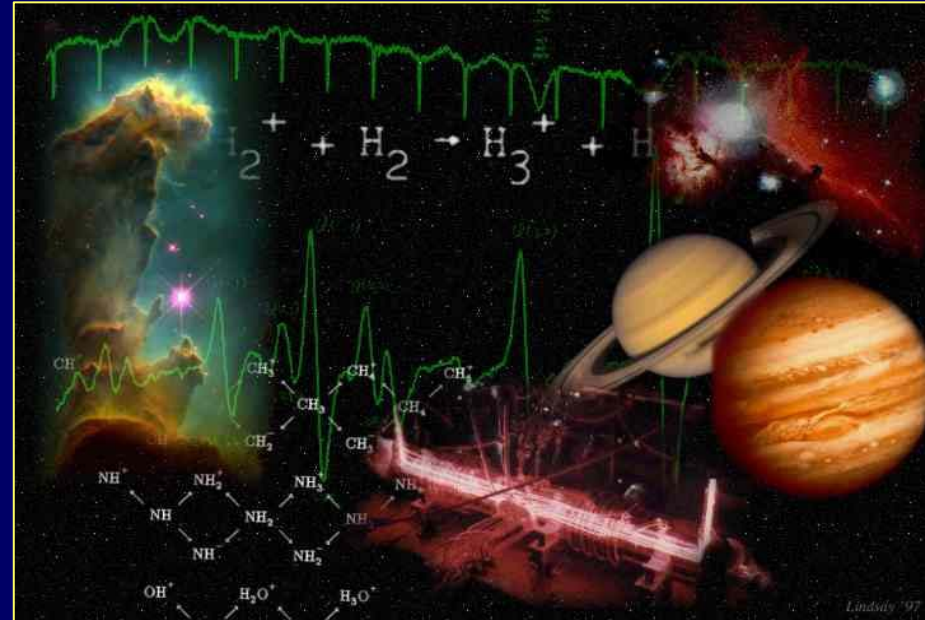
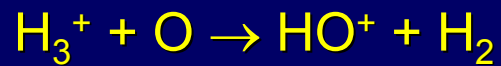
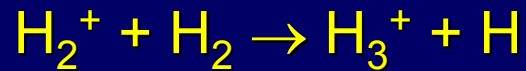
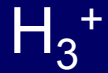
- Parte de su enorme masa, muy dispersa, se va aproximando por gravedad y calentando hasta formar nuevas estrellas.
- Se han descubierto moléculas exóticas e inestables hasta de más de 200 átomos, muchas no identificadas aún, que juegan un papel muy importante en la formación estelar.

Nebulosa de Orión

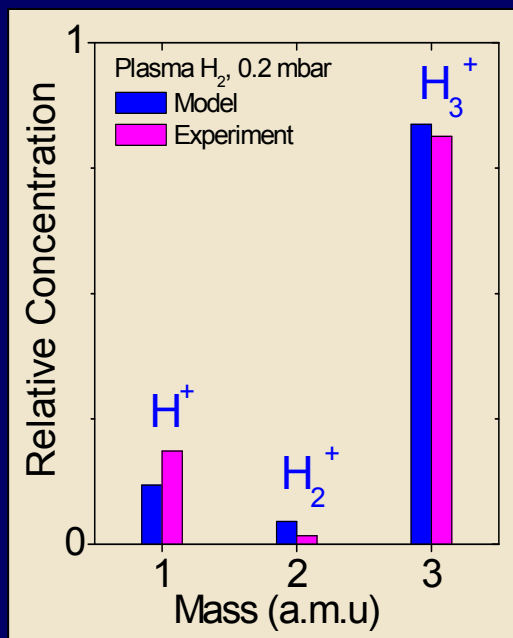


*Zona de formación de estrellas
en la Nebulosa del Águila*





La formaci\u00f3n del H_3^+ en el espacio interestelar, dura cientos o miles de a\u00f1os ($P < 10^{-15}$ atm , $T < 4$ K)



En descargas de 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

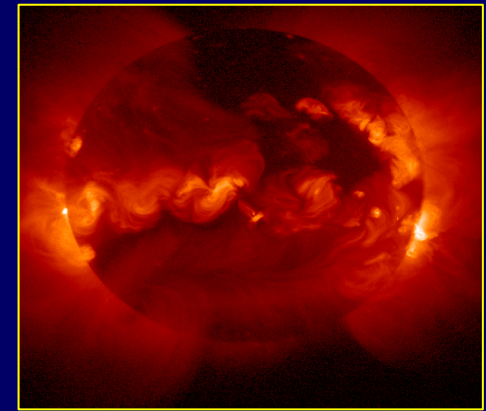
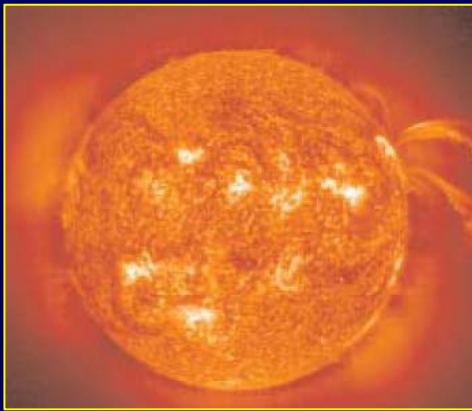
El Sol

Plasma Caliente: 6.000 K en la corteza, 15 MK en el núcleo.

Núcleo de Gas!: Densidad = 160 g/cm³ (10 veces la del Pb)

Edad ~ 4.500 M años

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



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

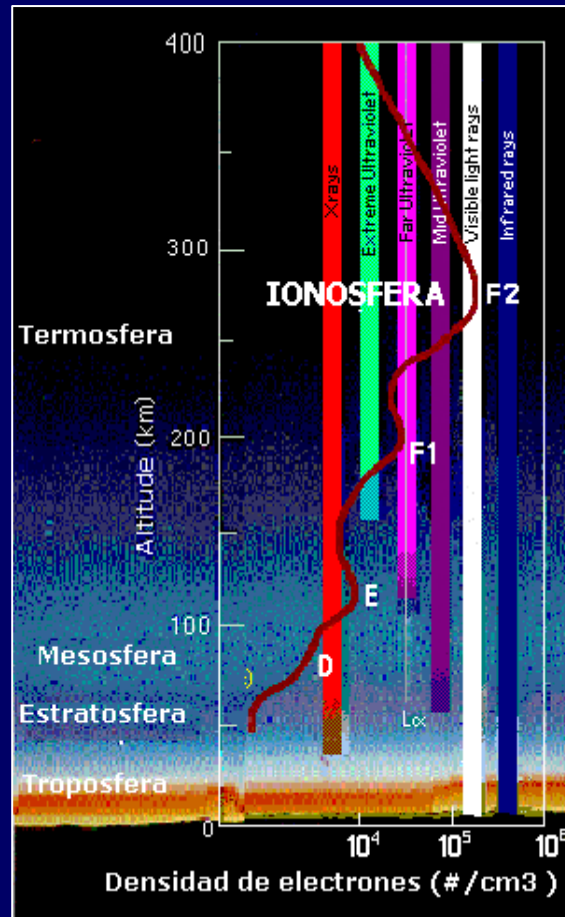
El resto, 4 MTm, se transforman en Energía : $E = mc^2 \rightarrow 4 \times 10^{20}$ MW

Potencia incidente sobre la Tierra : 500 W/m²

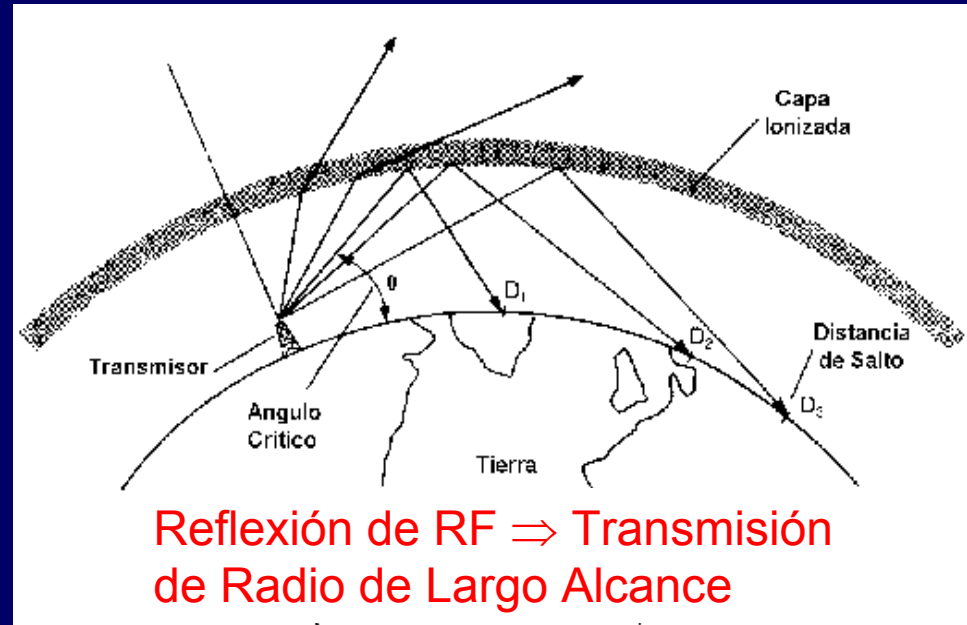
Ionosfera Terrestre

Altitud entre ~ 60 - 1000 km

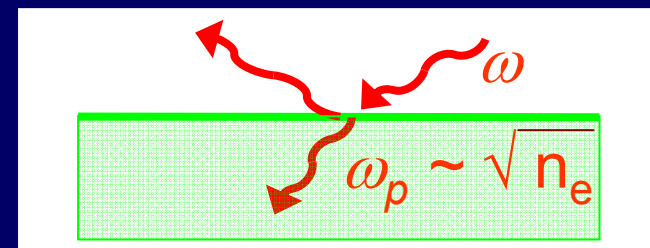
Descubierta por Marconi en 1.901



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



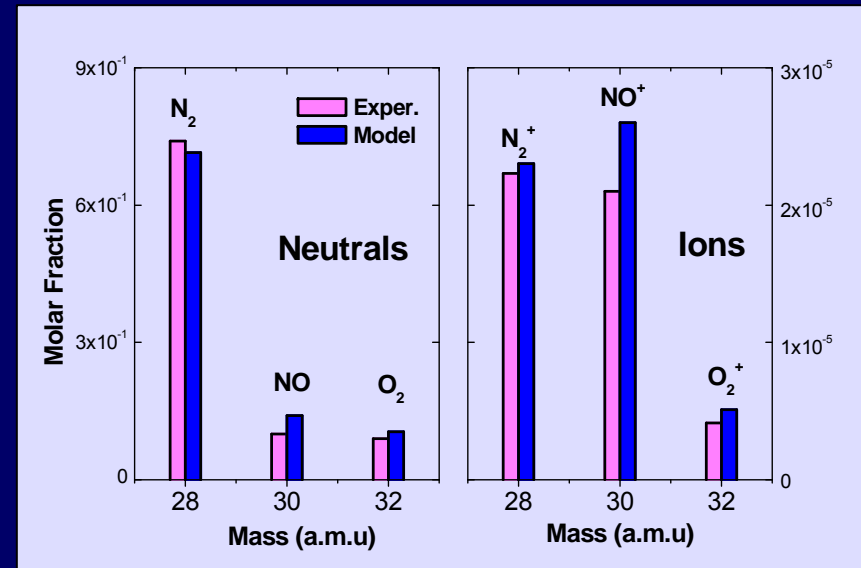
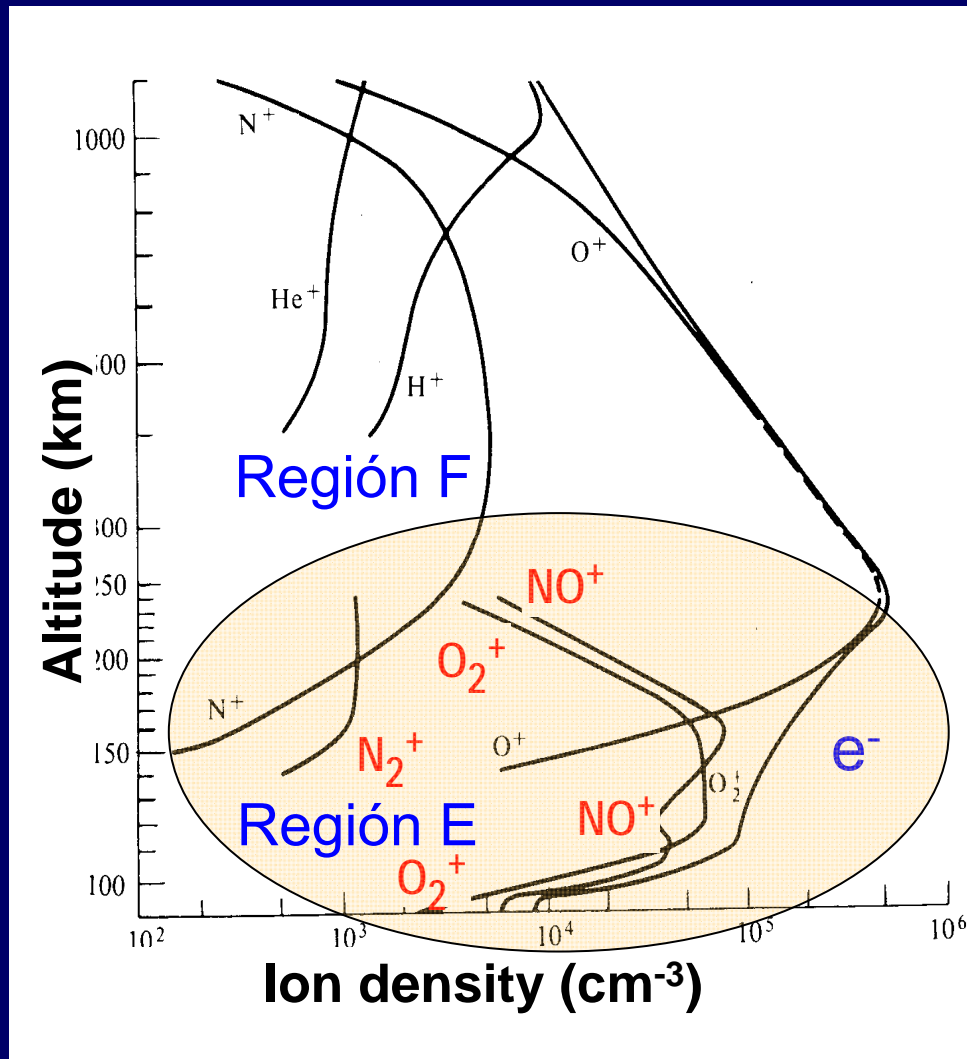
Reflexión de RF \Rightarrow Transmisión de Radio de Largo Alcance



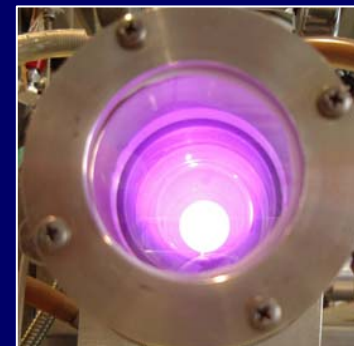
Como los metales y otros conductores, los plasmas reflejan ciertas radiaciones

Ionosfera Terrestre:

Distribución de iones
en función de la altitud



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



Auroras Boreales y Australes

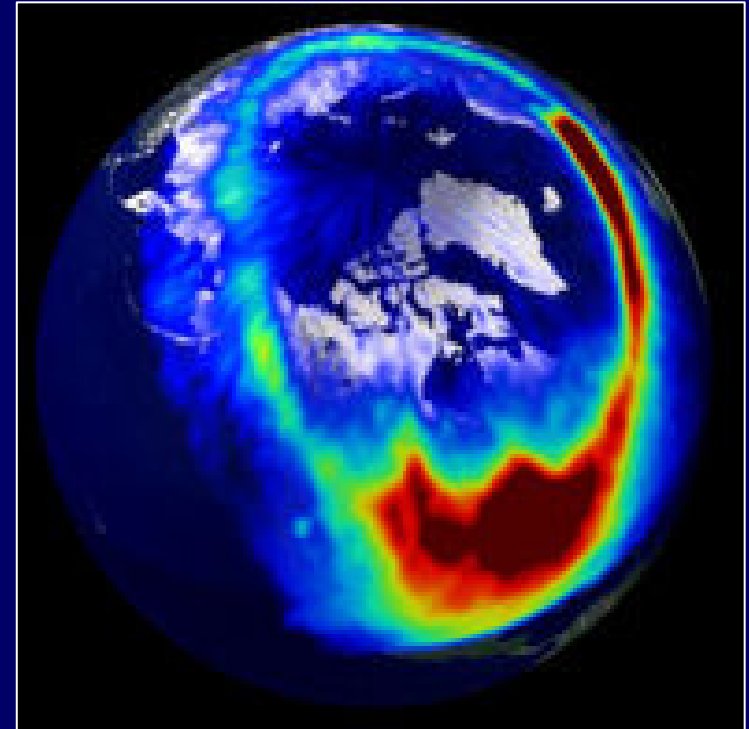
Ocurren en la IONOSFERA

Altitud > 100 km

Latitud > 60°

Fluctuaciones rápidas

Más intensas cada 11 años : ciclo solar





Rayos

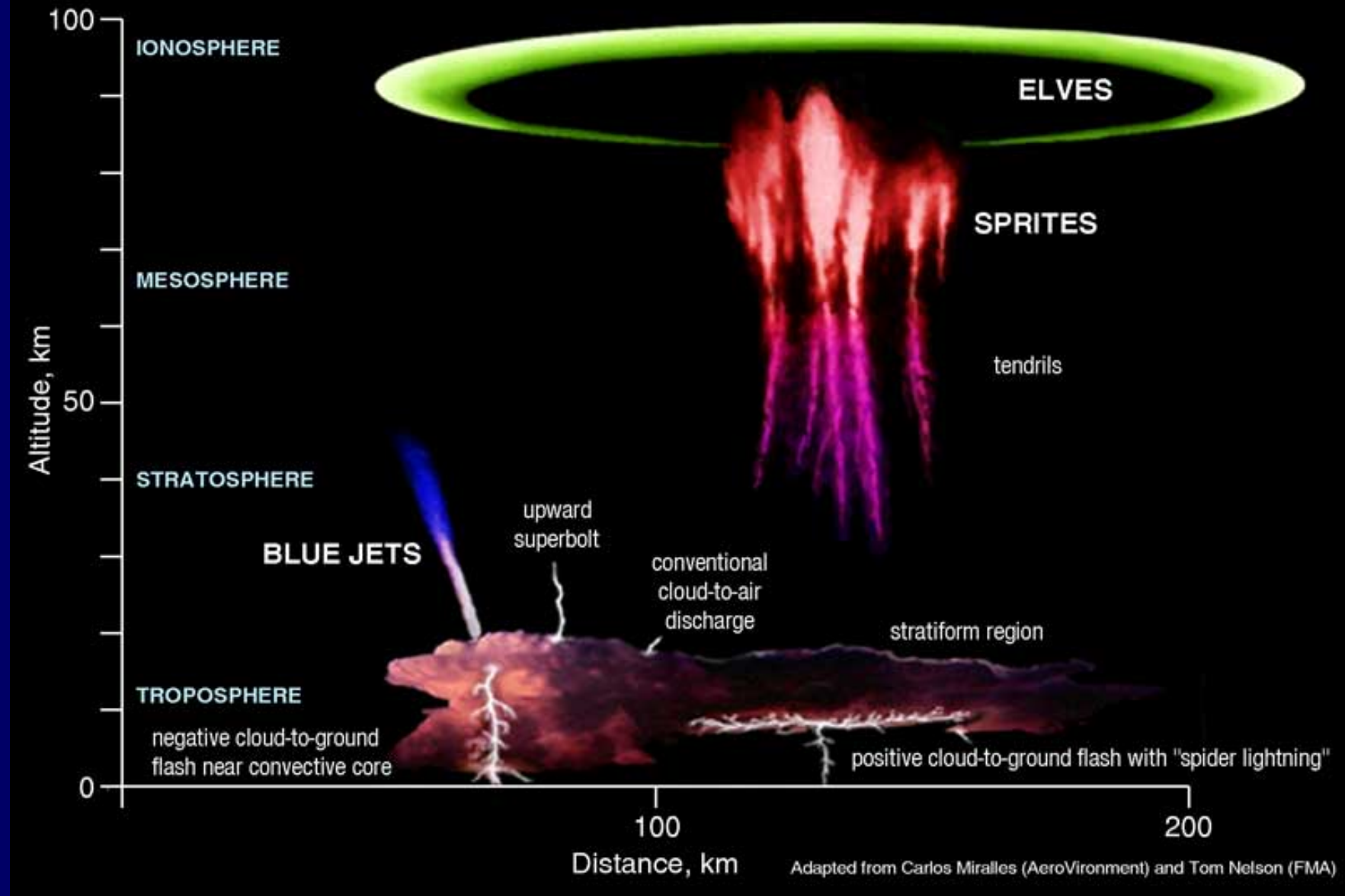
Voltaje	1.000 MV
Corriente	10.000 A
Duración	10 μ s - 100 ms
Longitud	5 Km
Ionización	Muy alta
Temperatura	30.000 K



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).





1999_05-04-50 UT
Spr of Alaska 01

1000 fps HSI
Meyering Infrared Obs.



1999_05-04-50 UT
Spr of Alaska 01

1000 fps HSI
Meyering Infrared Obs.



Videos de Sprites. Cámara normal y cámara rápida

Llamas

Predominio de Reacciones Químicas (Combustión)

Especies producidas: CO, CO₂, NO, NO₂ ...



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

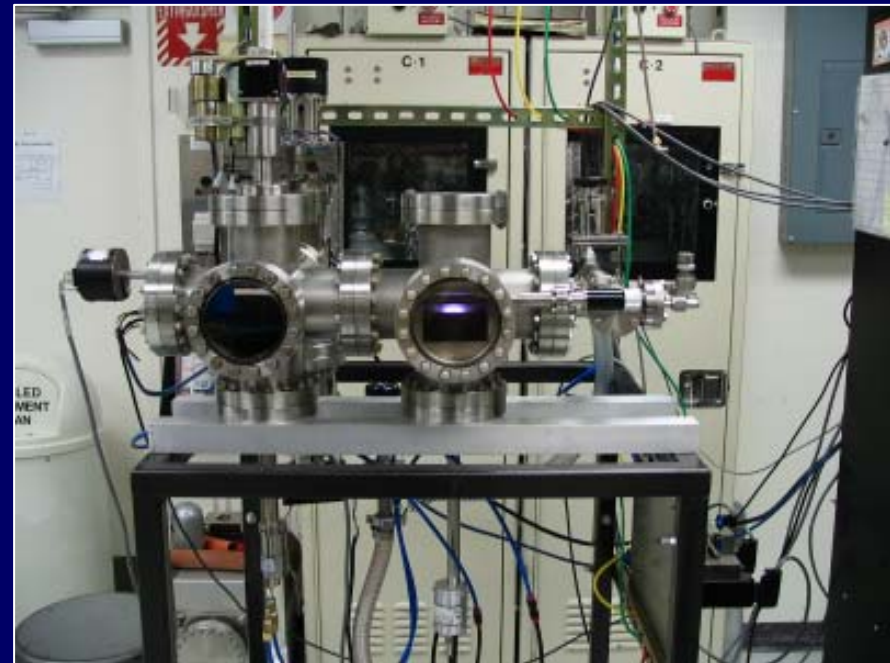
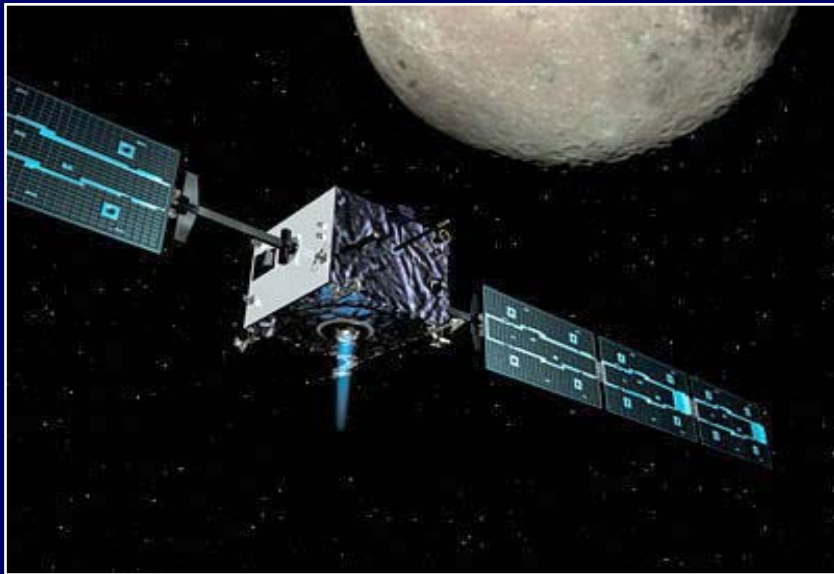
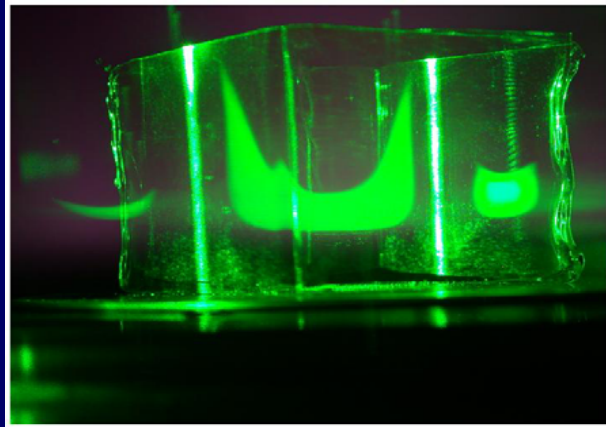
*Conducen la Electricidad: Resistencia eléctrica de varios $M\Omega$
1ª referencia: Academia de Ciencias de Florencia (1667)*



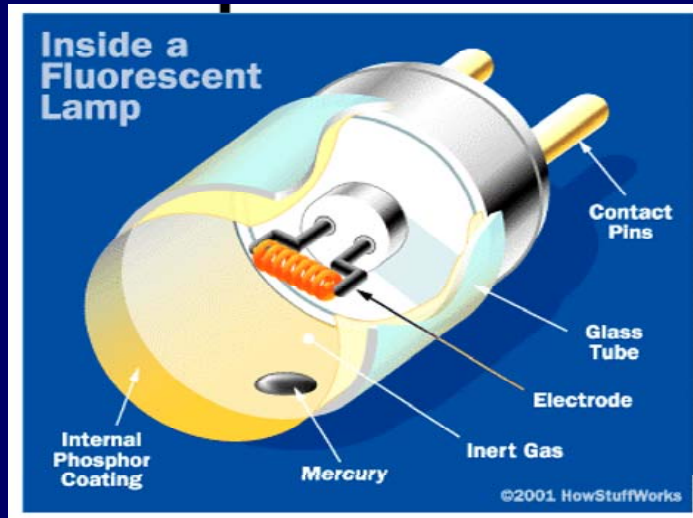
Fuegos Artificiales

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

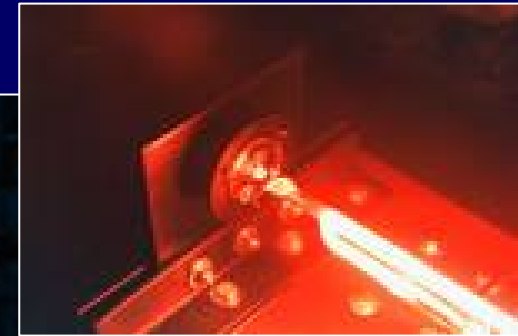
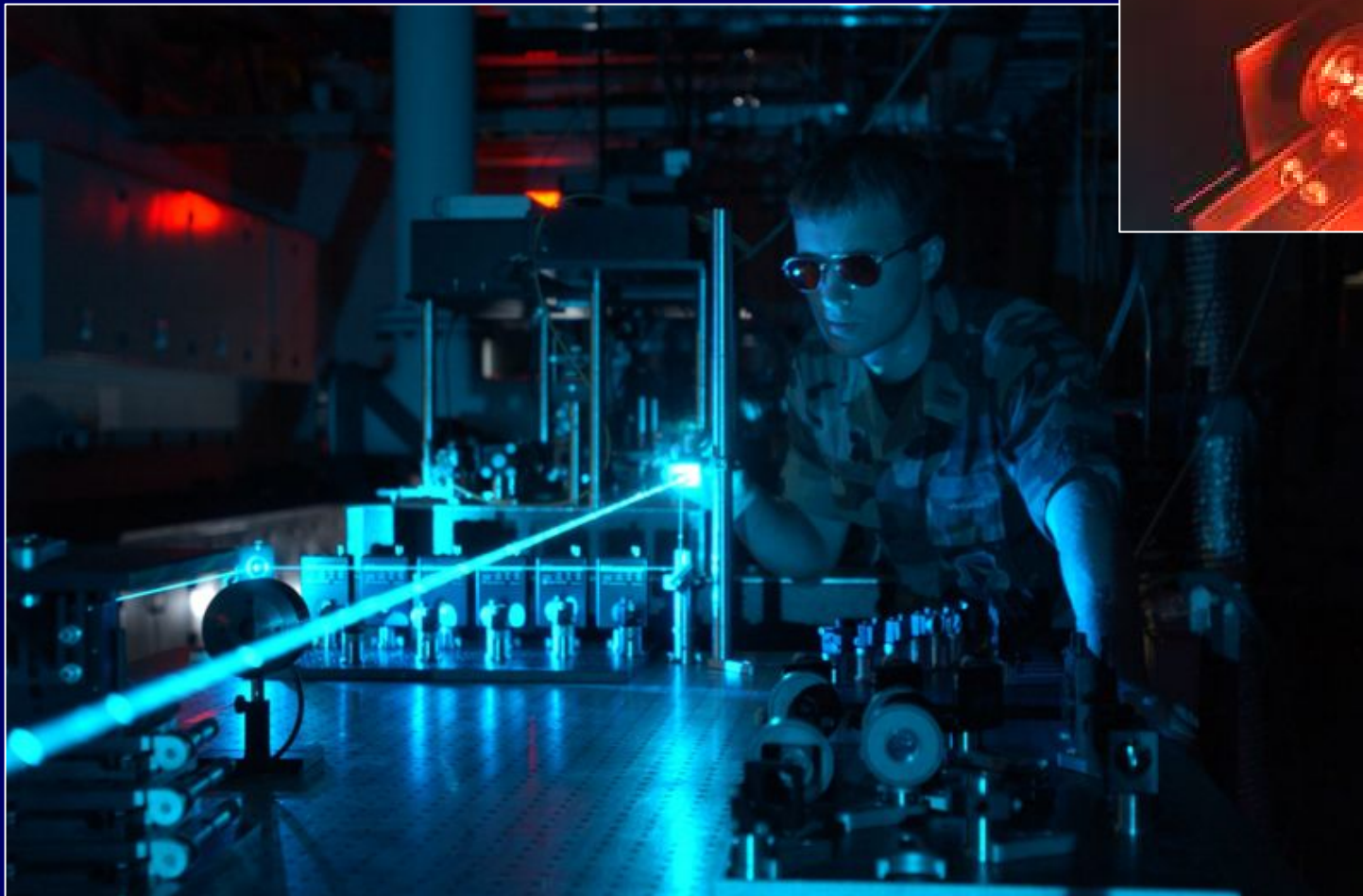
Lámparas de Arco de Alta Intensidad



Tubos de Láseres de Gas

(He-Ne, Ar, N₂...)

Luz altamente colimada y monocromática

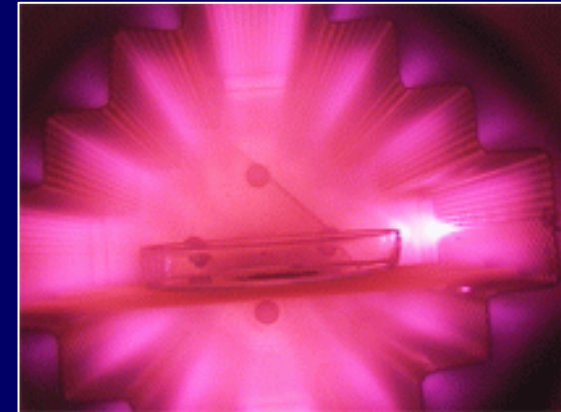


Esterilización por plasma

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

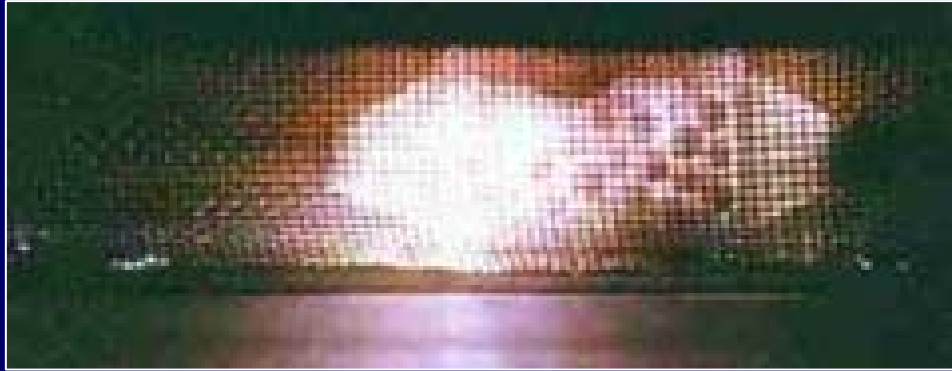
Doble acción bactericida:

- Radiación ultravioleta.
- Radicales fuertemente oxidantes.



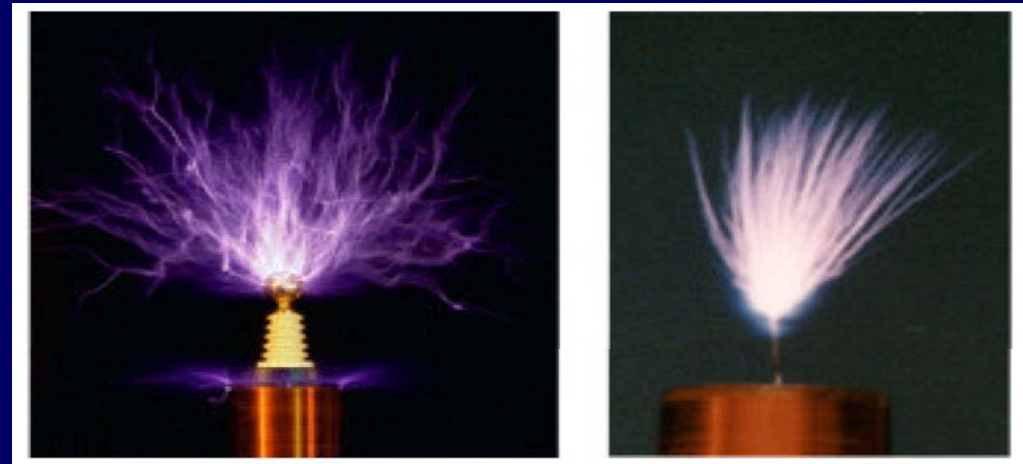
Catéteres para diálisis y tubos de ensayo de materiales plásticos

Destrucción de Contaminantes Atmosféricos



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

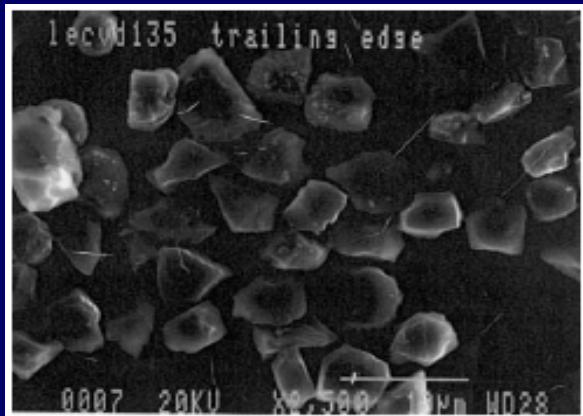
Descargas en corona
a presión atmosférica



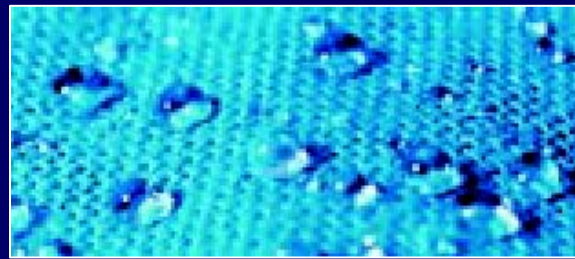
Cambios superficiales de materiales

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_4 para recubrir herramientas de corte

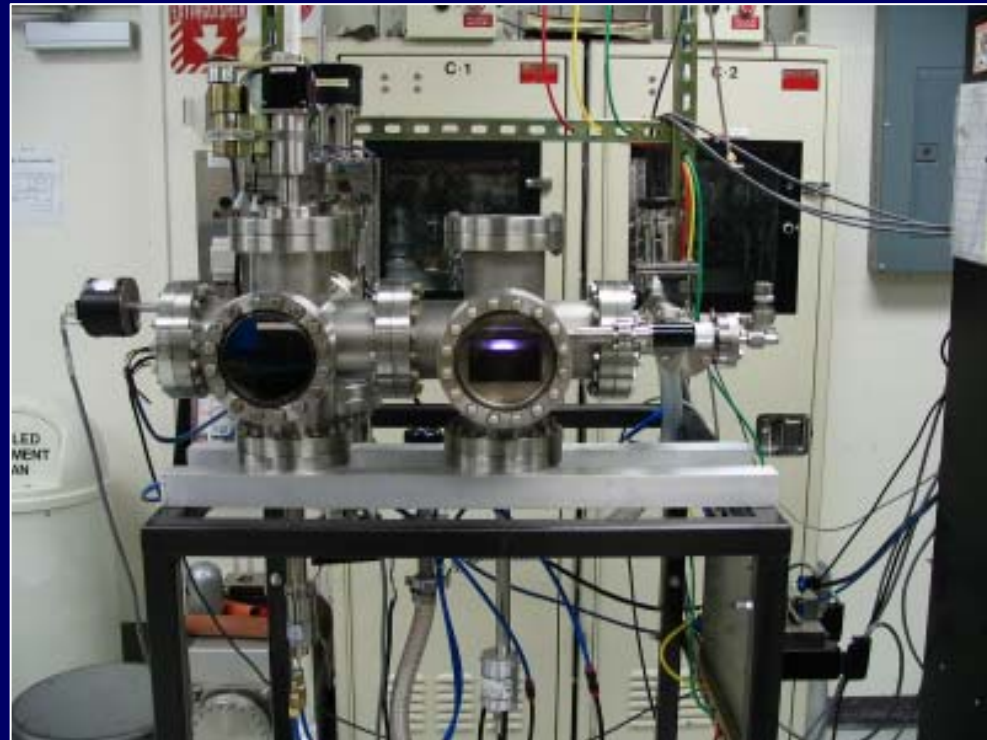
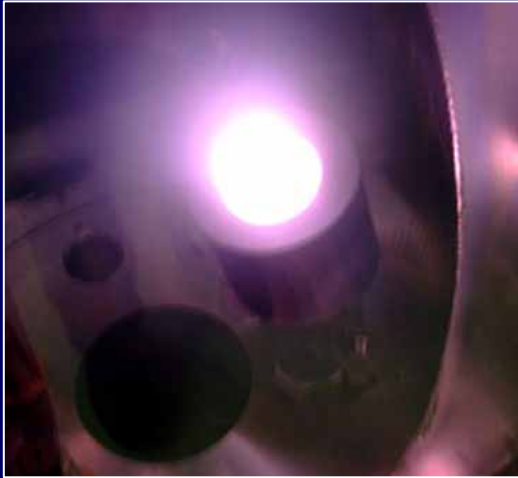


Tejidos tratados con plasma, Para repeler la humedad y las grasas



Prótesis metálica de rodilla cubierta de material biocompatible

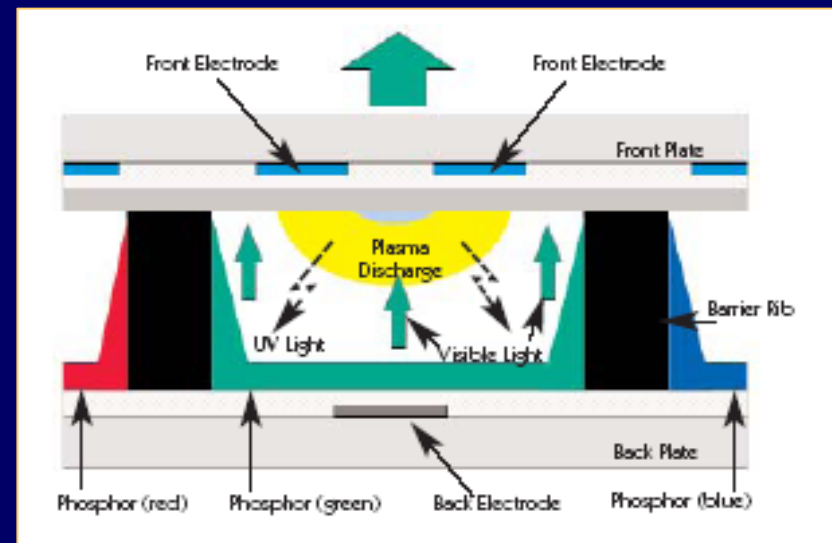
Microelectrónica



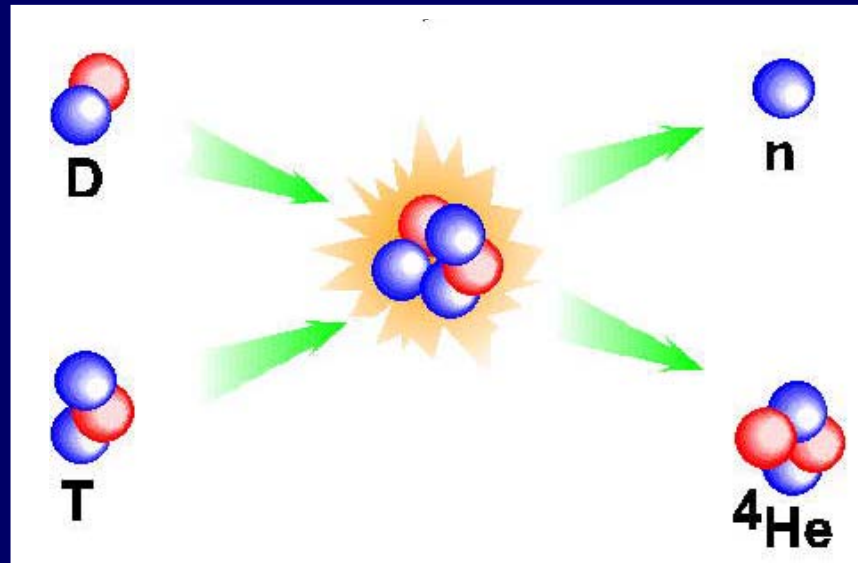
Fabricación de microcircuitos mediante “sputtering”, “etching”... con tratamientos multicapa



Pantallas de Plasma



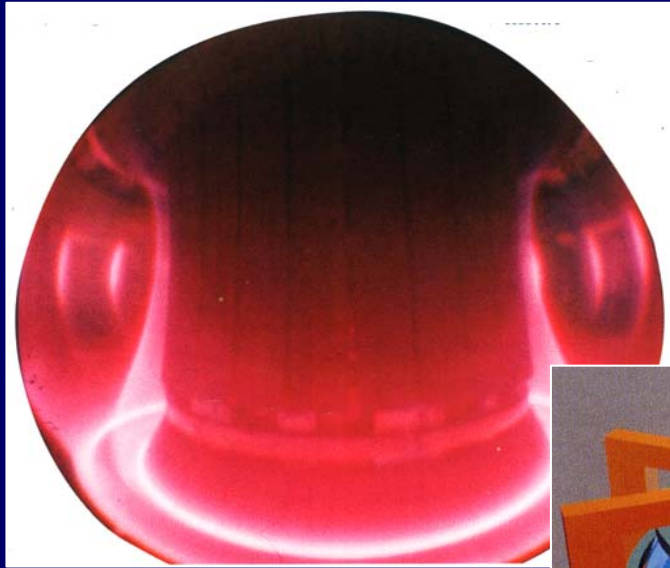
Reactores de Fusión Termonuclear



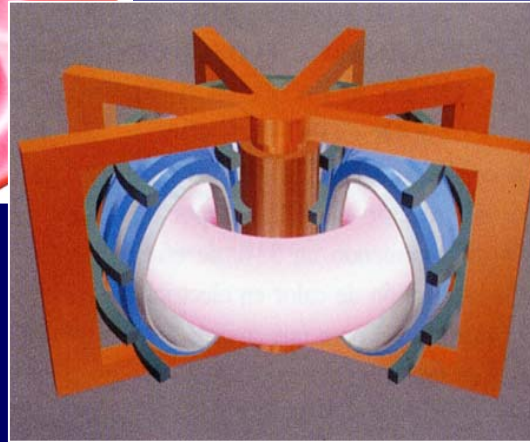
Plasma caliente: $T = 10^8$ K
¡T mayor que en el núcleo solar!

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

- 10 g D : 0,5 m³ H₂O
- 30 g Li

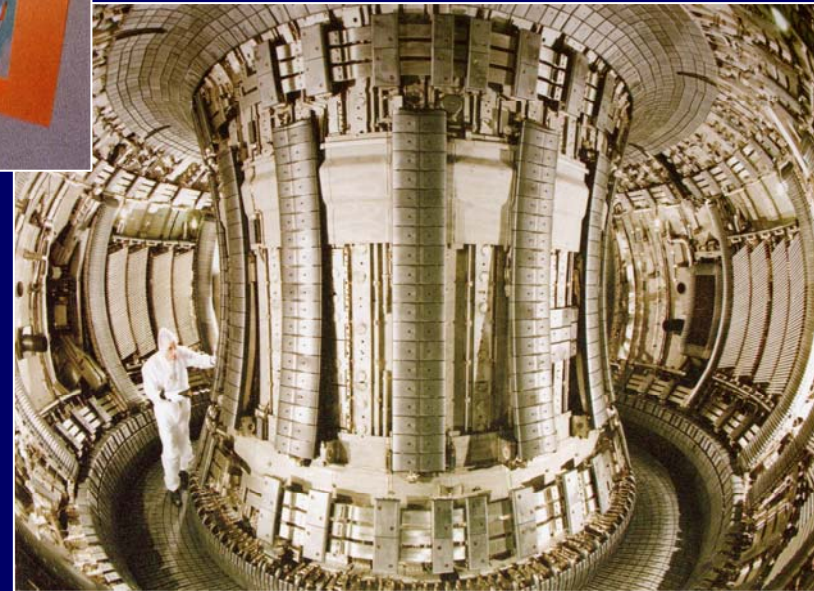


Plasma de Fusión en el interior de un reactor de tipo Tokamak



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

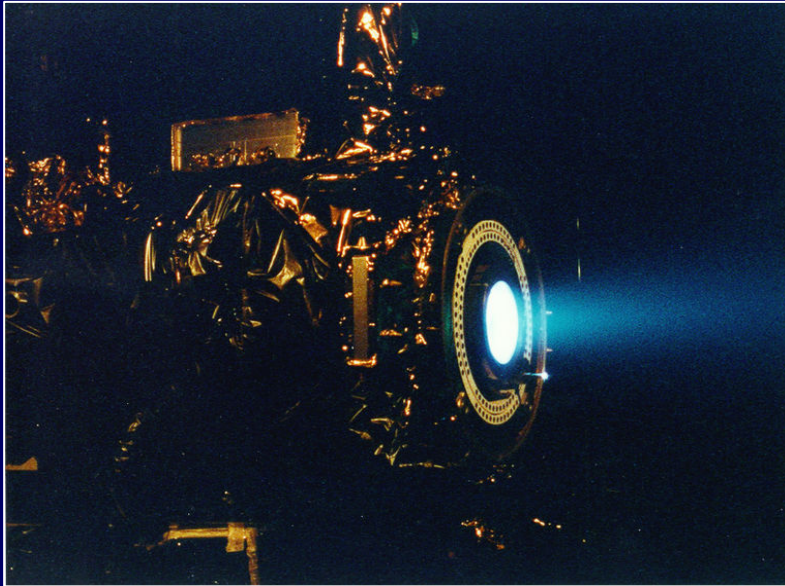
Actualmente:
Intensa Investigación
en Interacción Plasma-Pared



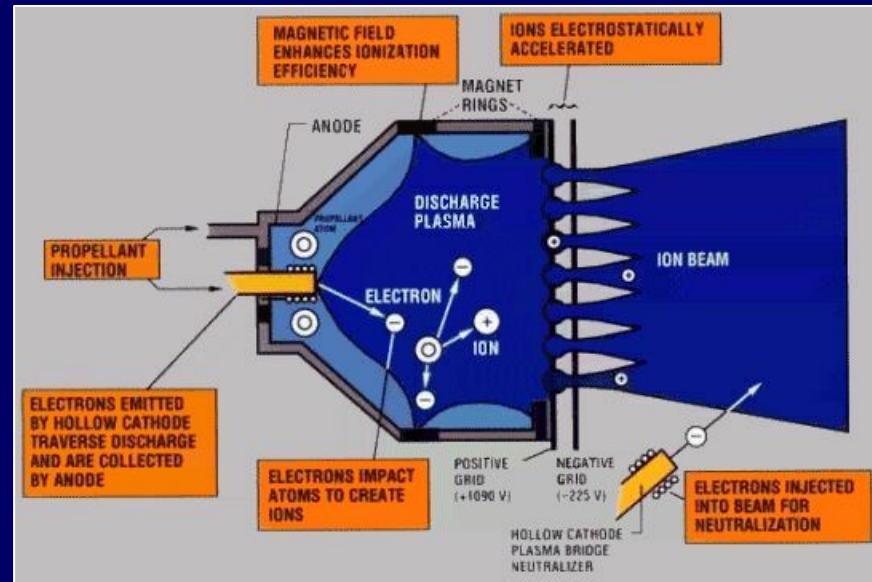
49
Joint European Torus (J.E.T, U.K.)

Motores Iónicos

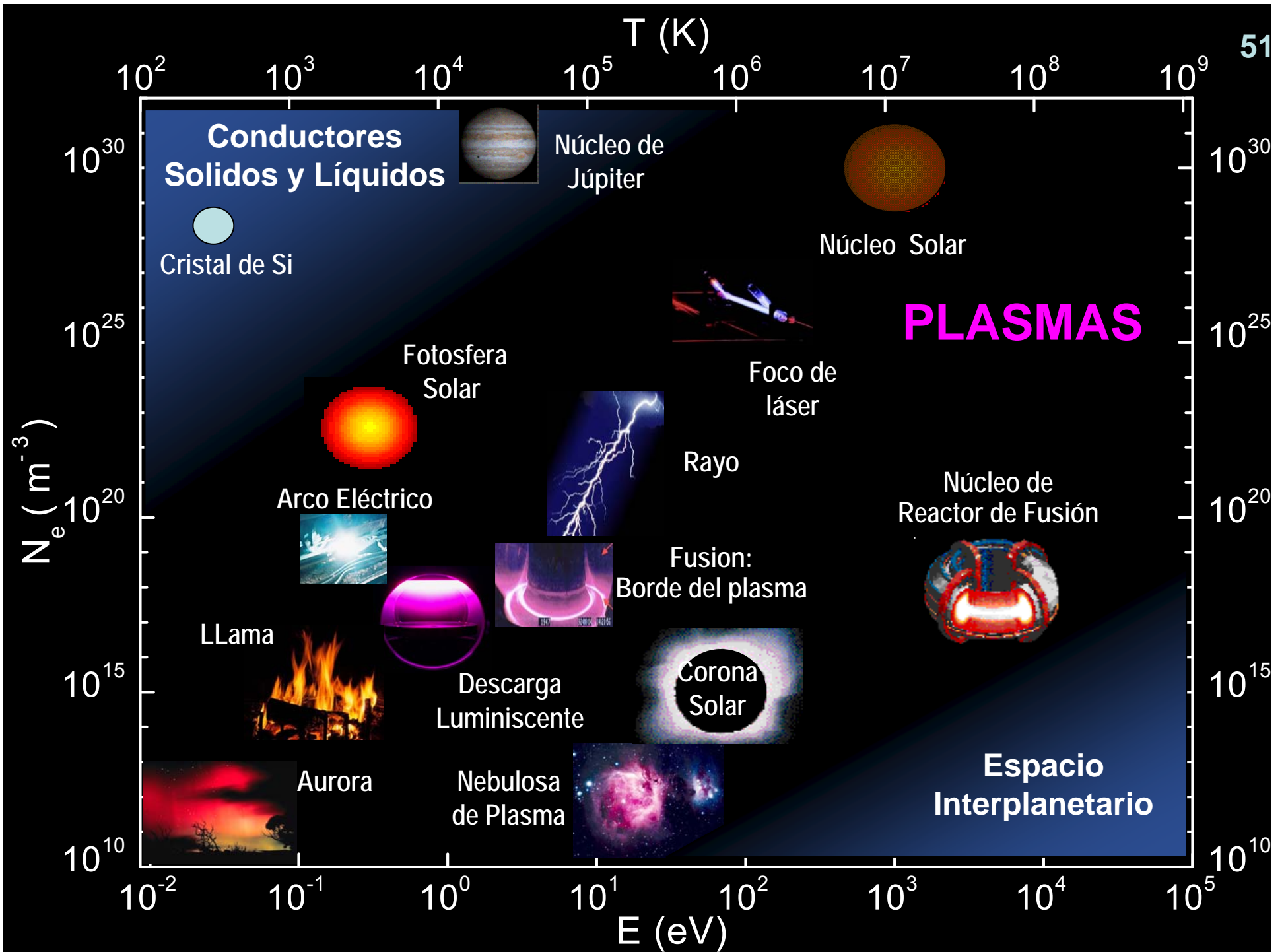
Pueden ser el medio de propulsión espacial del futuro



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.

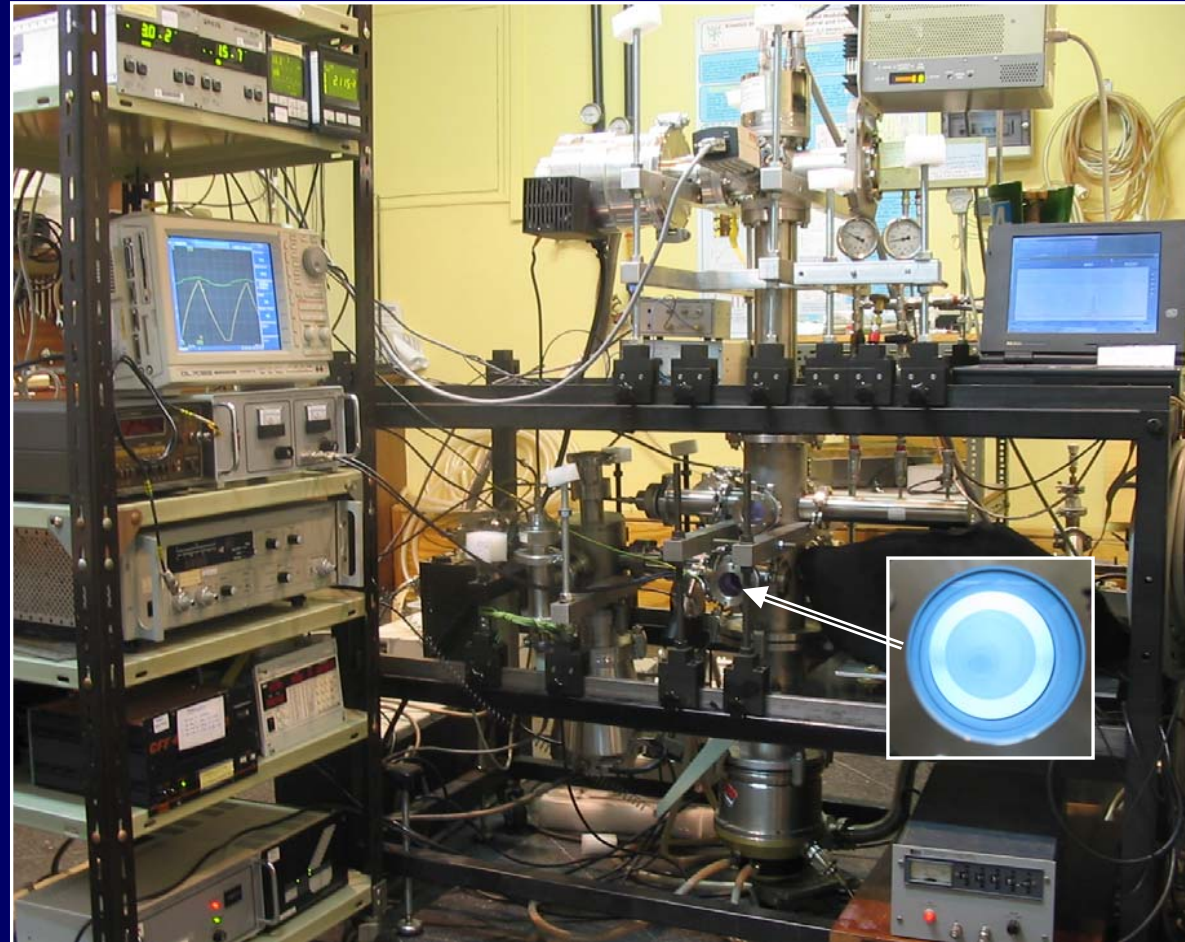


Resumen

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>