

# ***PLASMA :***

## ***El cuarto estado de la materia***



***Dra. Isabel Tanarro***

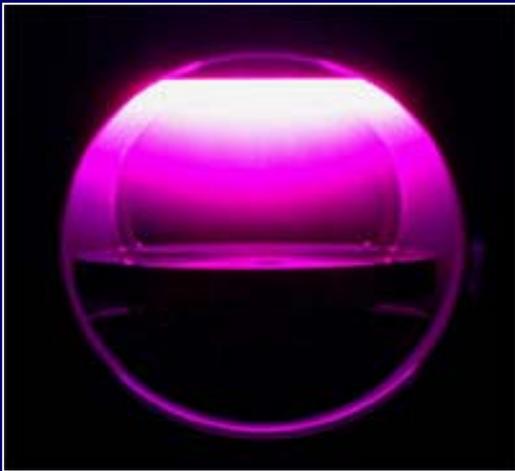
*Dept. Física Molecular  
Inst. Estructura de la Materia, CSIC*



*Semana de la Ciencia, CAM, 15 Noviembre 2018*

# Indice

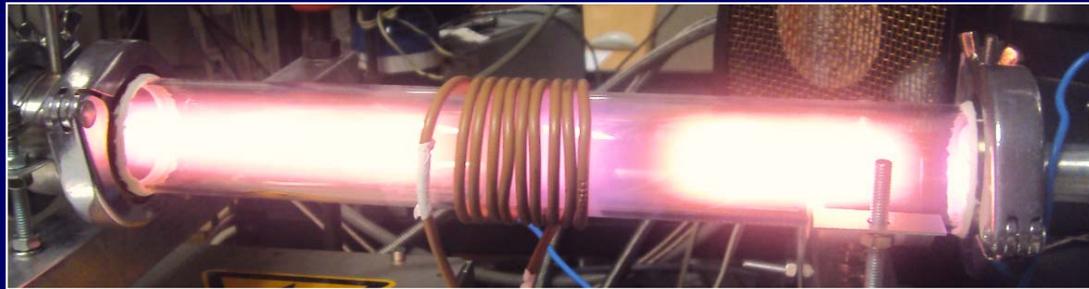
- 1. Introducción al plasma
- 2. Procesos elementales más importantes
- 3. Plasmas en la naturaleza
- 4. Aplicaciones tecnológicas



## DEFINICIÓN DE PLASMA

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

*Diccionario de la Real Academia  
de la Lengua Española*



*Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM-CSIC*

# ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Los cuatro elementos clásicos:

**Tierra, Agua, Aire, Fuego**

Empédocles (~ S. V a.c., Grecia) ↔ Renacimiento (S. XV-XVI)

También aparecían en el Budismo y el Hinduismo



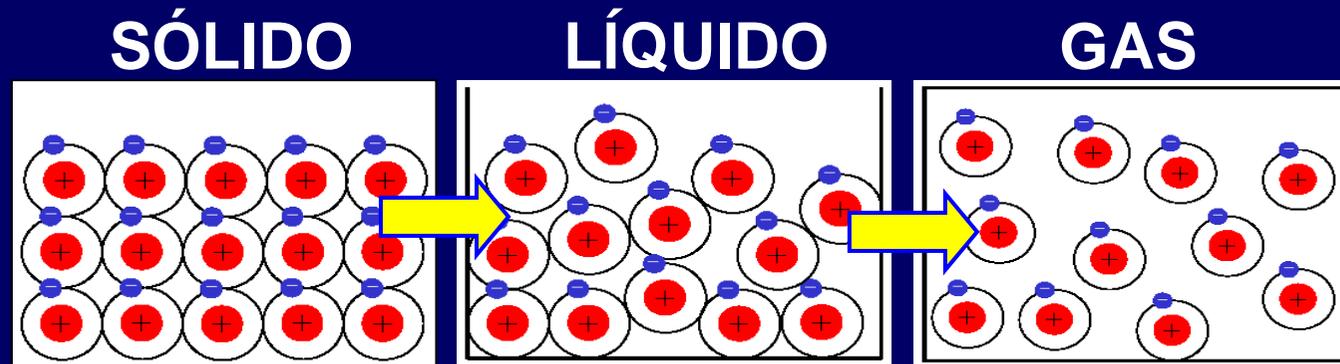
**Sólido**

**Líquido**

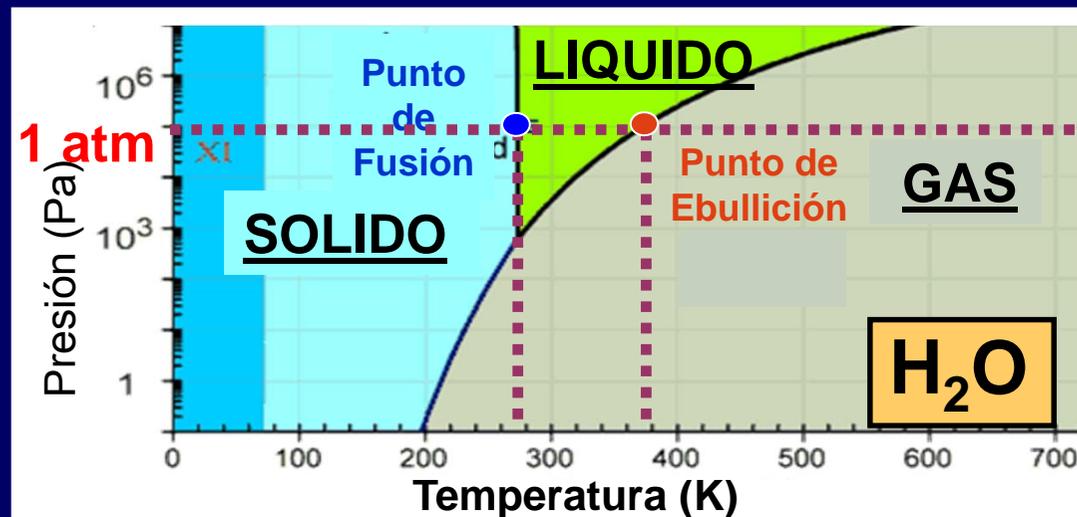
**Gas**

**Plasma**

# Ciencia Actual: ESTADOS de AGREGACIÓN de la MATERIA

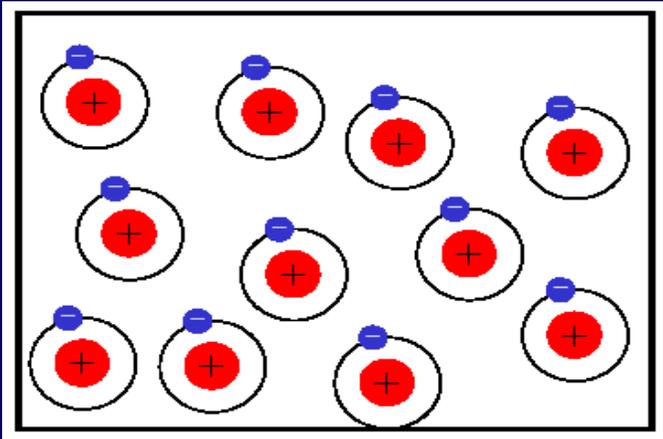


Cambios de estado por aporte de Energía Calorífica  
y aumento de Temperatura

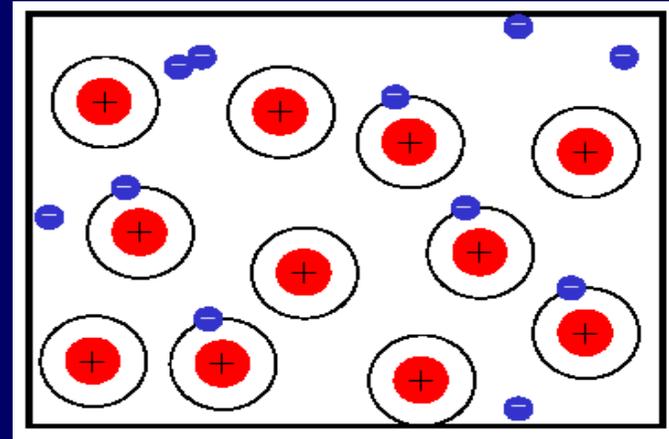


*Diagrama  
de fases  
del agua*

# GAS



# PLASMA



Otros tipos de Energía →

- Eléctrica
- Térmica
- Luminosa
- Química
- Nuclear...

$$N_g, T_g$$

Ionización

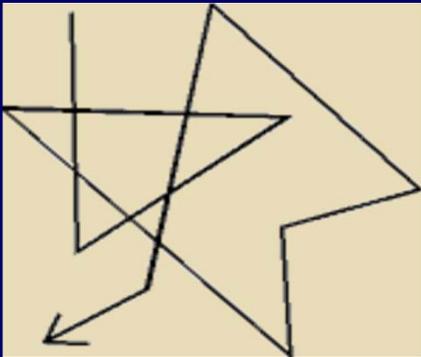


$$N_e, T_e$$

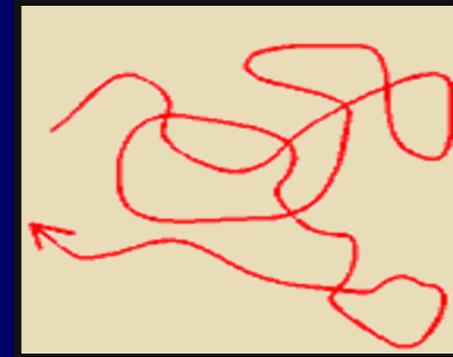
# DIFERENCIA ENTRE GAS Y PLASMA

## Gas

- Comportamiento independiente entre partículas
- Transferencia de energía por colisiones individuales
- **Buen aislante eléctrico, no emite luz**



*Movimiento de una partícula neutra (choques individuales)*

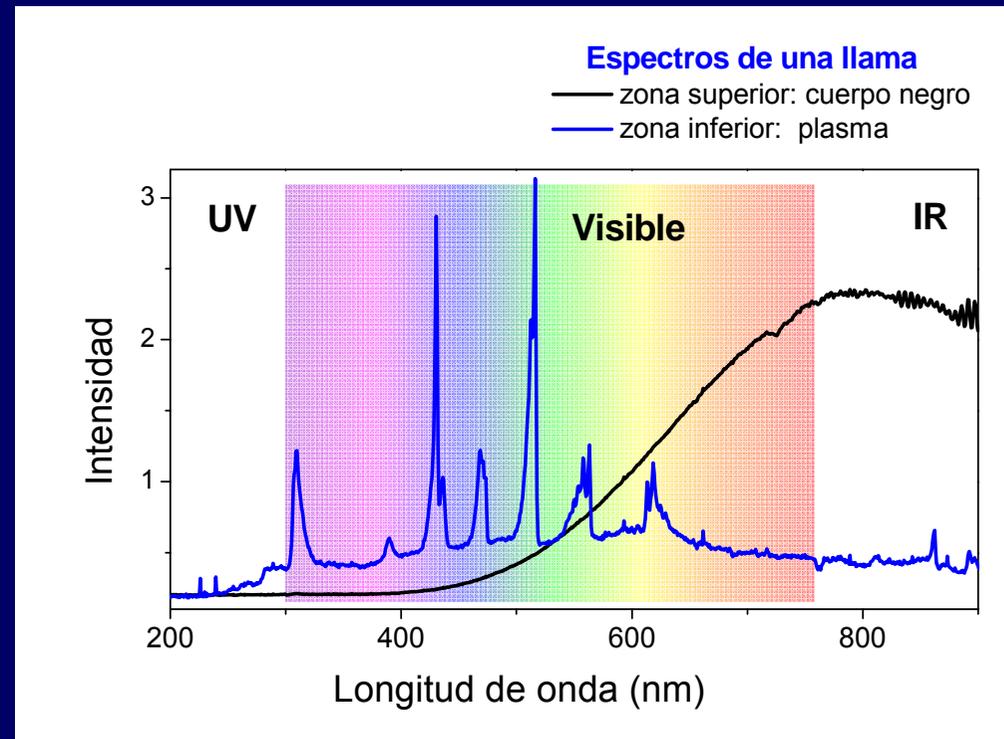


*Movimiento de una carga eléctrica (acción a distancia)*

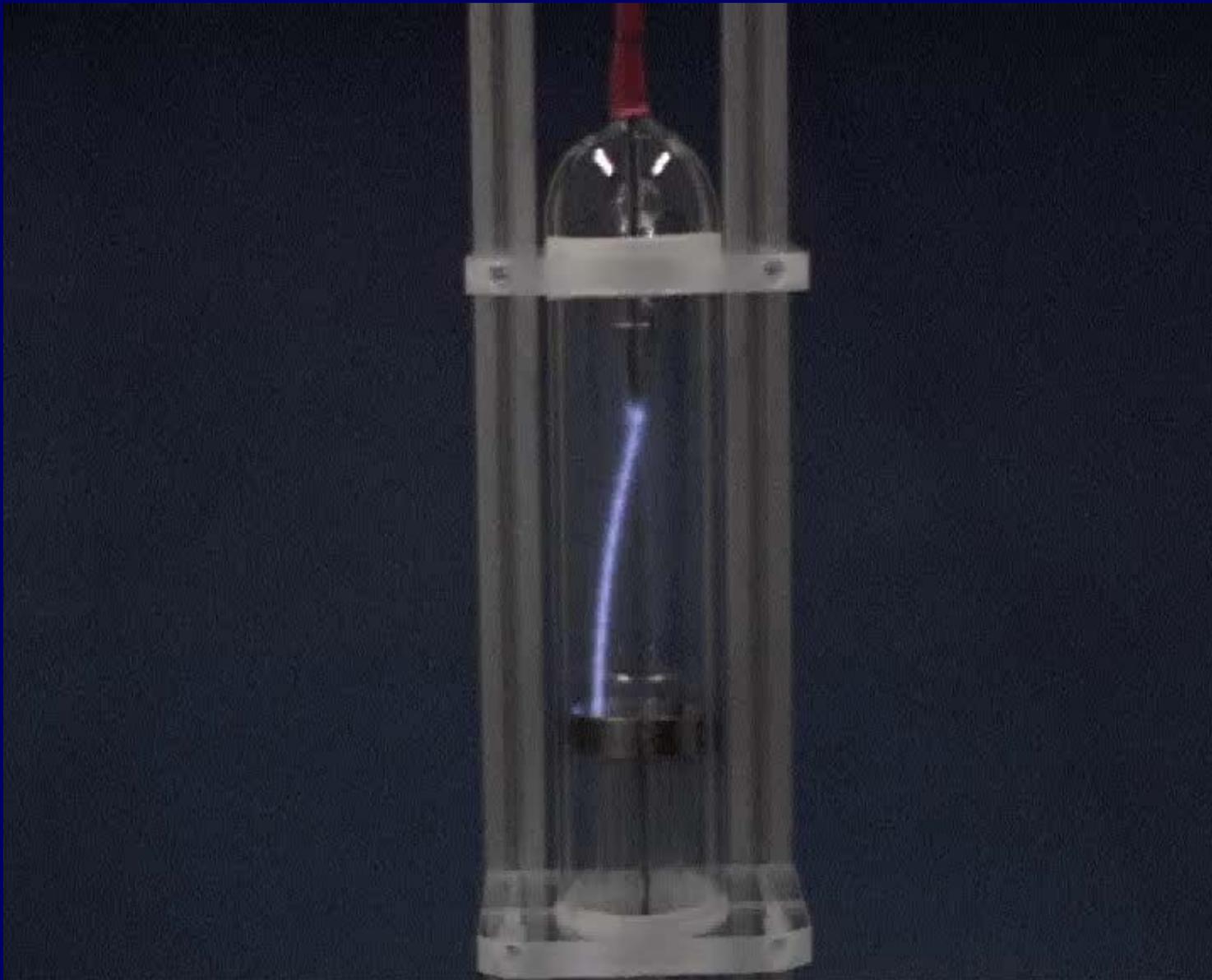
## Plasma

- Comportamiento colectivo de iones y electrones.
- Transferencia de energía por campos electro-magnet.
- **¡Conduce la electricidad y emite luz!**

# Conductividad y Emisión de una Llama. Predominio de Reacciones Químicas por Combustión.



*El espectro óptico depende de la sustancia que arde.  
Estudios analíticos.*



Plasma controlado por un campo magnético.

*Prof. H. Kersten (Germany)*

Los Plasmas en la Tierra son *“afortunadamente”* mucho más escasos y efímeros que Sólidos, Líquidos y Gases.



S. XVIII - Primeros estudios sobre rayos (B. Franklin)

S. XIX – Espectroscopía en llama (R. W. Bunsen, G. R. Kirchhoff)

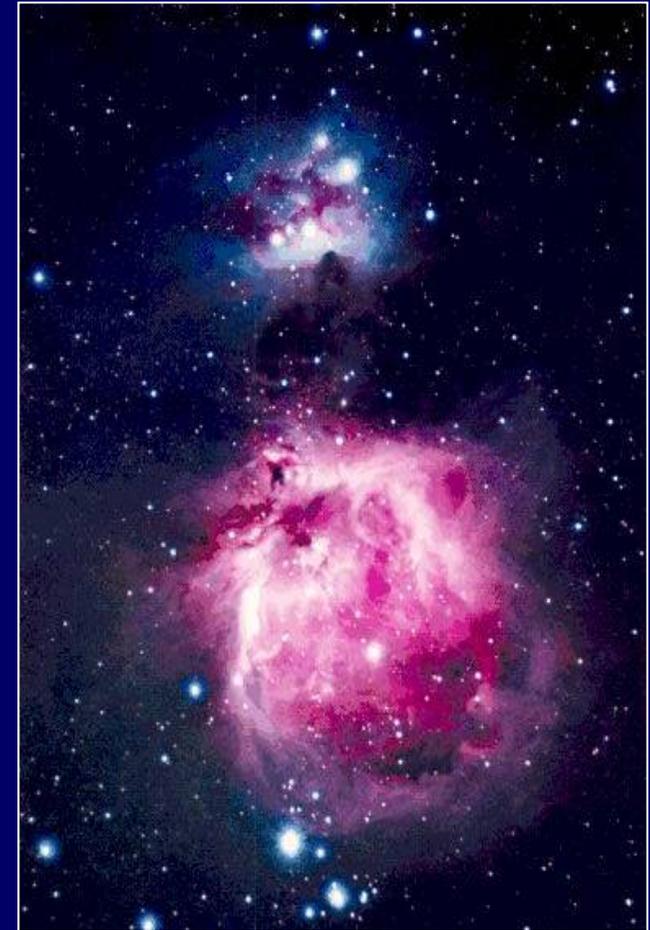
S. XIX - Descargas eléctricas (M. Faraday, W. Crookes)

**“CUARTO ESTADO DE LA MATERIA”**

Pero son la materia conocida más abundante del Universo (> 99%) : Sol, Estrellas, Nebulosas...



Se detectan fácilmente a distancia por la luz que emiten



Después del fuego,  
¿cómo se logró generar los primeros plasmas?

Descargas eléctricas en gases a baja presión



Célula con electrodos y Alto Voltaje + Bomba de Vacío (1880)

1000 V , 1 mbar

Actualmente:

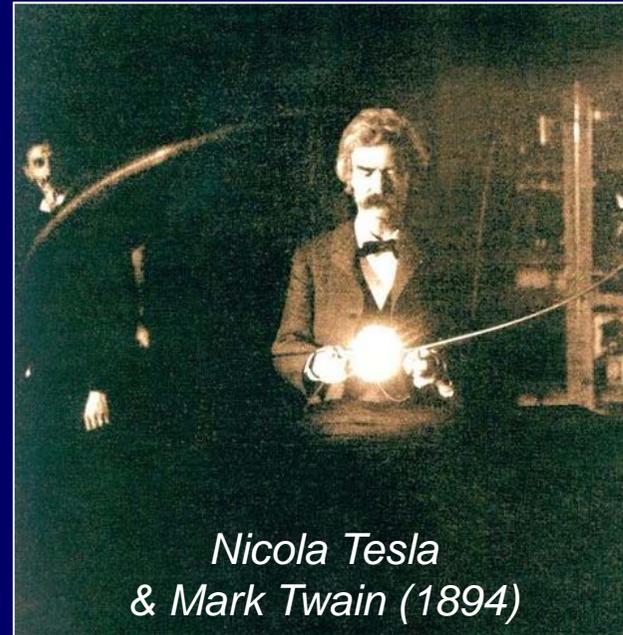
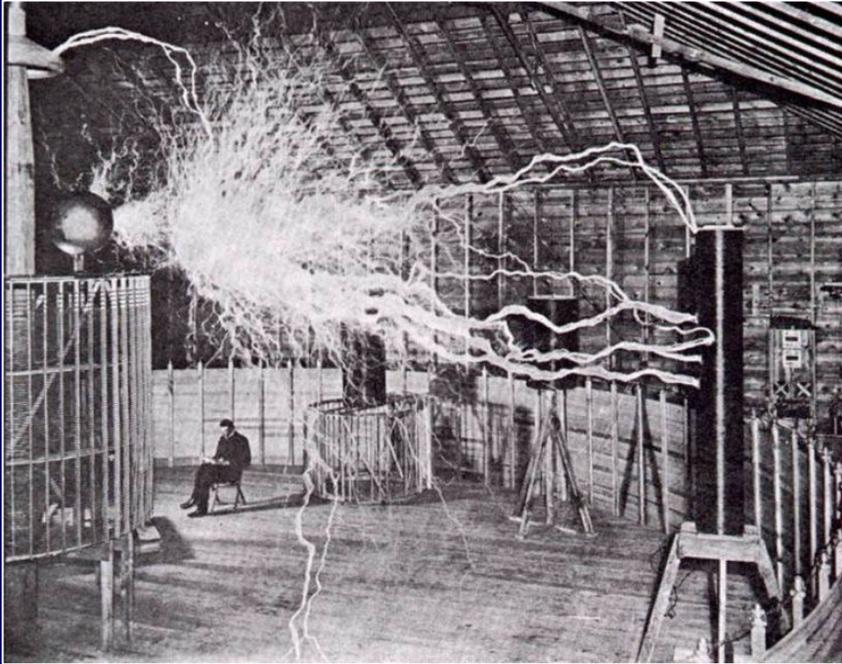
Grados de vacío mucho mejores.

No es imprescindible el uso de electrodos,  
basta la presencia de campos electromagnéticos intensos  
como en un simple horno de microondas



Plasma de Kriptón con descarga de microondas  
*Laboratorio de Astrofísica Molecular, Observatorio Astronómico de Yebes*

# Bolas de Plasma



*Nicola Tesla  
& Mark Twain (1894)*

*Nicola Tesla (1856-1943)*

*Alimentación eléctrica por corriente alterna*

*Transmisión inalámbrica de señales*

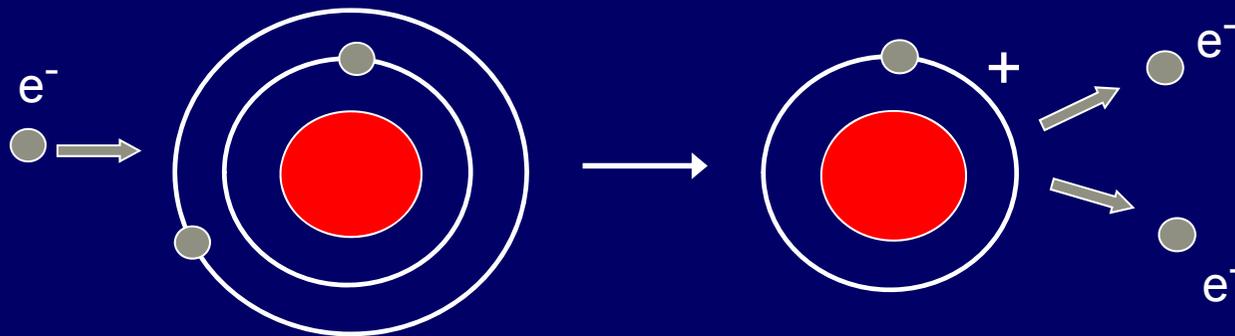
Bola de Plasma  
Interacción a distancia  
con tubo fluorescente

## 2ª Parte

Procesos más importantes en un plasma

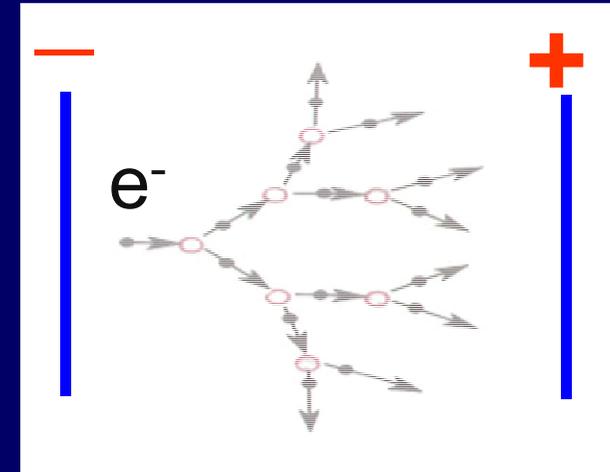
# 1. IONIZACIÓN INICIAL

Fenómeno desencadenante del plasma



## 2. ESTABLECIMIENTO DEL PLASMA

- Los electrones son acelerados por los campos electro-magnéticos aplicados y ganan energía.
- Los electrones así acelerados, chocan con átomos y especies neutras, y producen ionización en cadena.
- Diferentes grados de ionización en distintos plasmas  $\approx 1$  a  $10^{-6}$ .
- Interrupción de energía  $\Rightarrow$  Finalización muy abrupta  $\approx 10^{-6}$  s.



### 3. EXCITACIÓN ATÓMICA

*Causada por impacto electrónico con electrones de energías concretas*

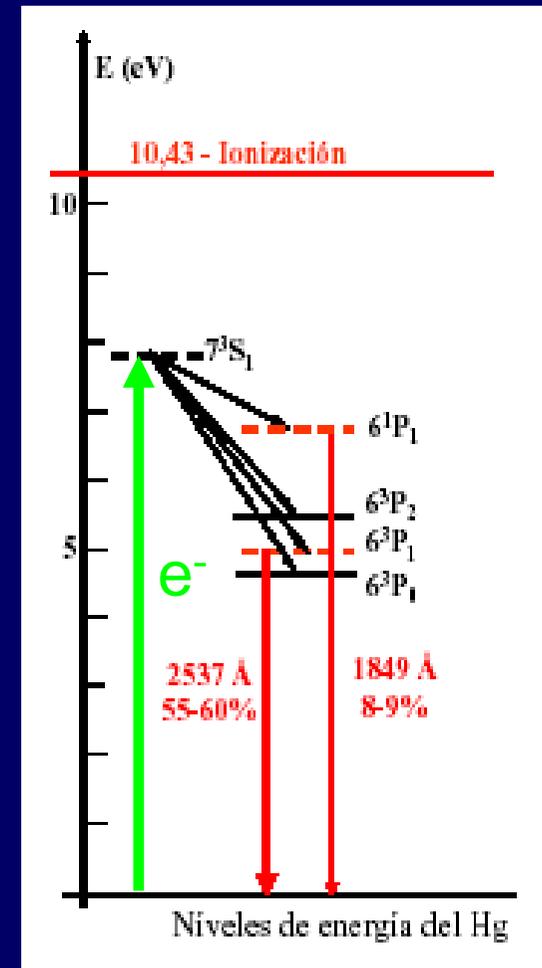
### 4. DESEXCITACIÓN Y EMISIÓN DE LUZ

*Mediante fotones de energías discretas muy determinadas*



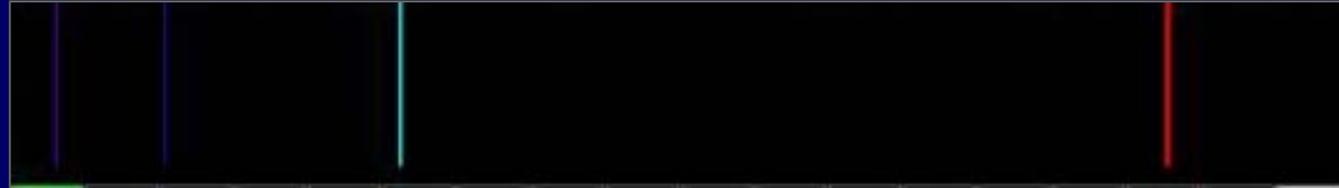
*Tubos Geissler, S. XIX*

¡La luz emitida permite descubrir las especies que contiene el plasma!



# Espectros de Emisión Atómica

H



Au

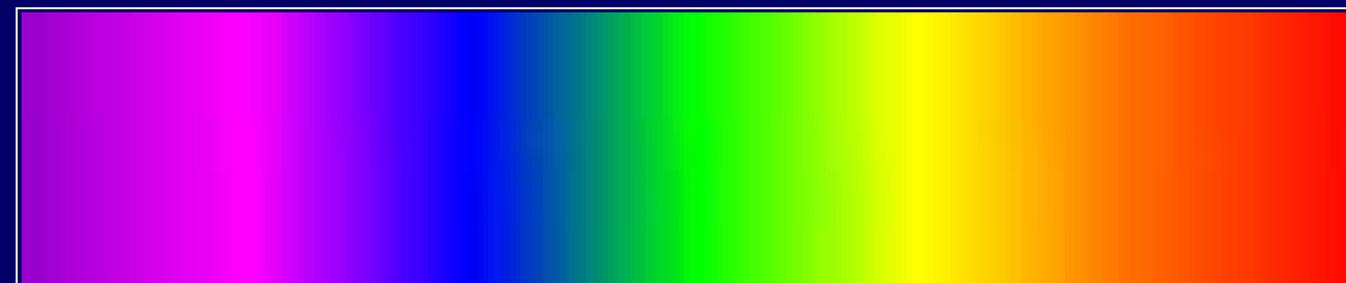


Fe

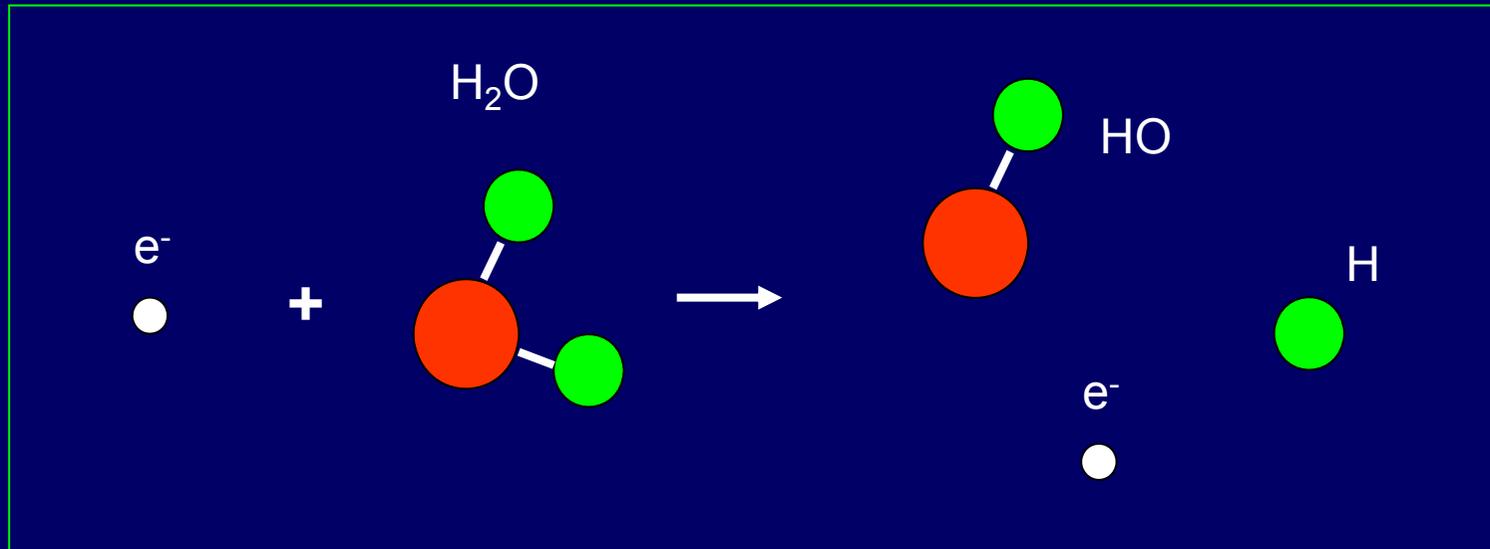


*Espectros característicos de energías discretas:  
Fundamento de la Física Cuántica*

*Espectro  
continuo  
"Luz blanca"*



## 5. DISOCIACIÓN MOLECULAR



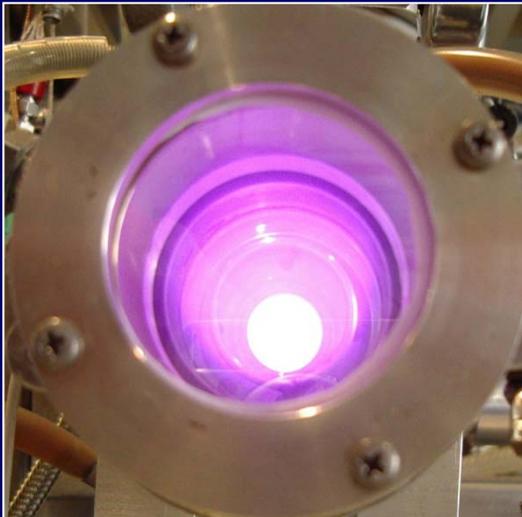
*Las moléculas se fragmentan en átomos y radicales que reaccionan y forman nuevos compuestos químicos.*

*Así en vapor de agua se forman  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$*

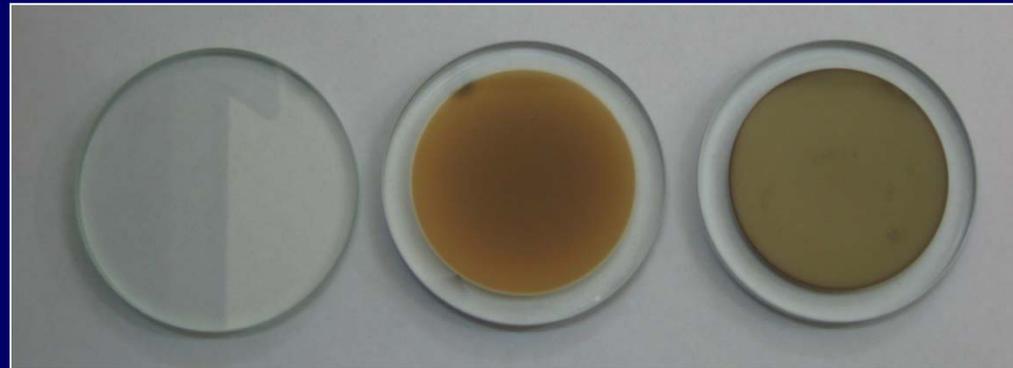
**Plasma: ¡ MEDIO EXTRAORDINARIAMENTE REACTIVO !**

## 7. REACCIONES CON LAS SUPERFICIES

*El plasma arranca material de las superficies circundantes o reacciona con ellas.*



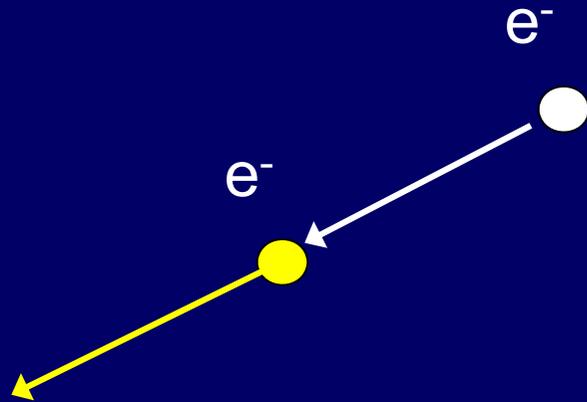
Reactor de plasma



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

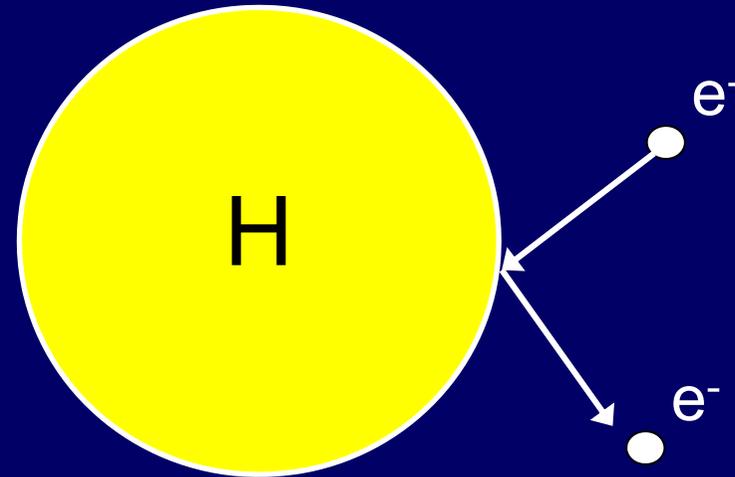
*Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM- CSIC*

## 6. COLISIONES ELÁSTICAS ENTRE ELECTRONES Y ÁTOMOS O MOLÉCULAS



Choque  $e^- + e^-$

Igual masa: Intercambio de energía máximo



Choque  $e^- + H$

$m_e \sim M_H / 1800$

Apenas se transfiere energía

Fuerte desequilibrio térmico entre electrones y partículas pesadas en plasmas con bajo grado de ionización  $< 10^{-3}$

## *“PLASMAS FRÍOS”*

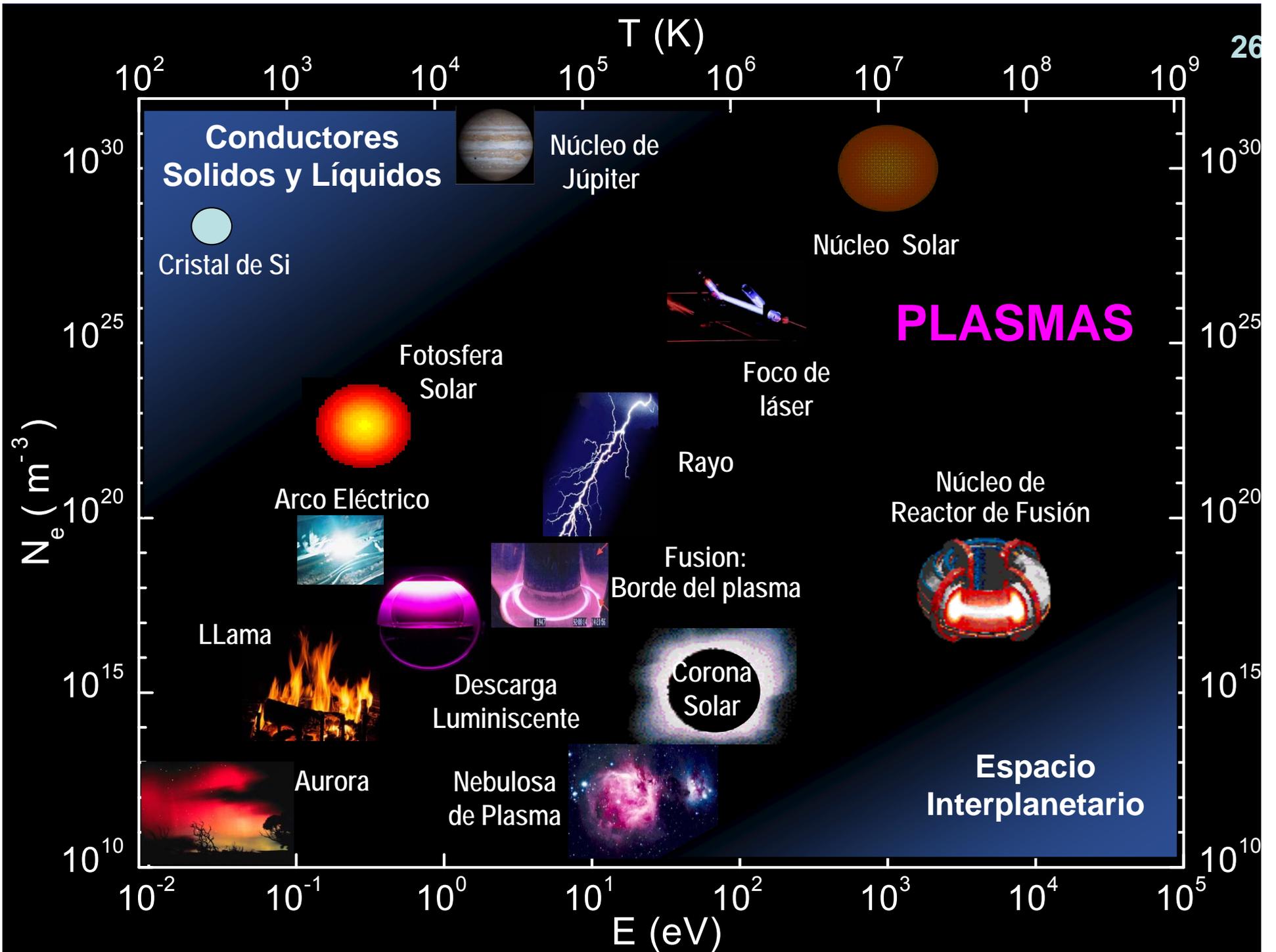
$$T_{\text{elect.}} \approx 30.000 \text{ } ^\circ\text{C} , T_{\text{gas}} \approx 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

*Muy importantes para multitud de aplicaciones*

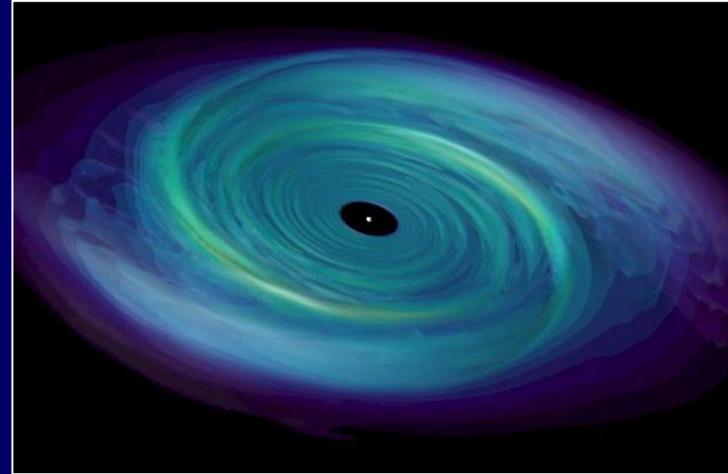


## *“PLASMAS TERMICOS o CALIENTES”*

$$T_{\text{elect.}} \approx T_{\text{gas}} > 3000 \text{ } ^\circ\text{C}$$



## 3ª Parte : PLASMAS en la NATURALEZA



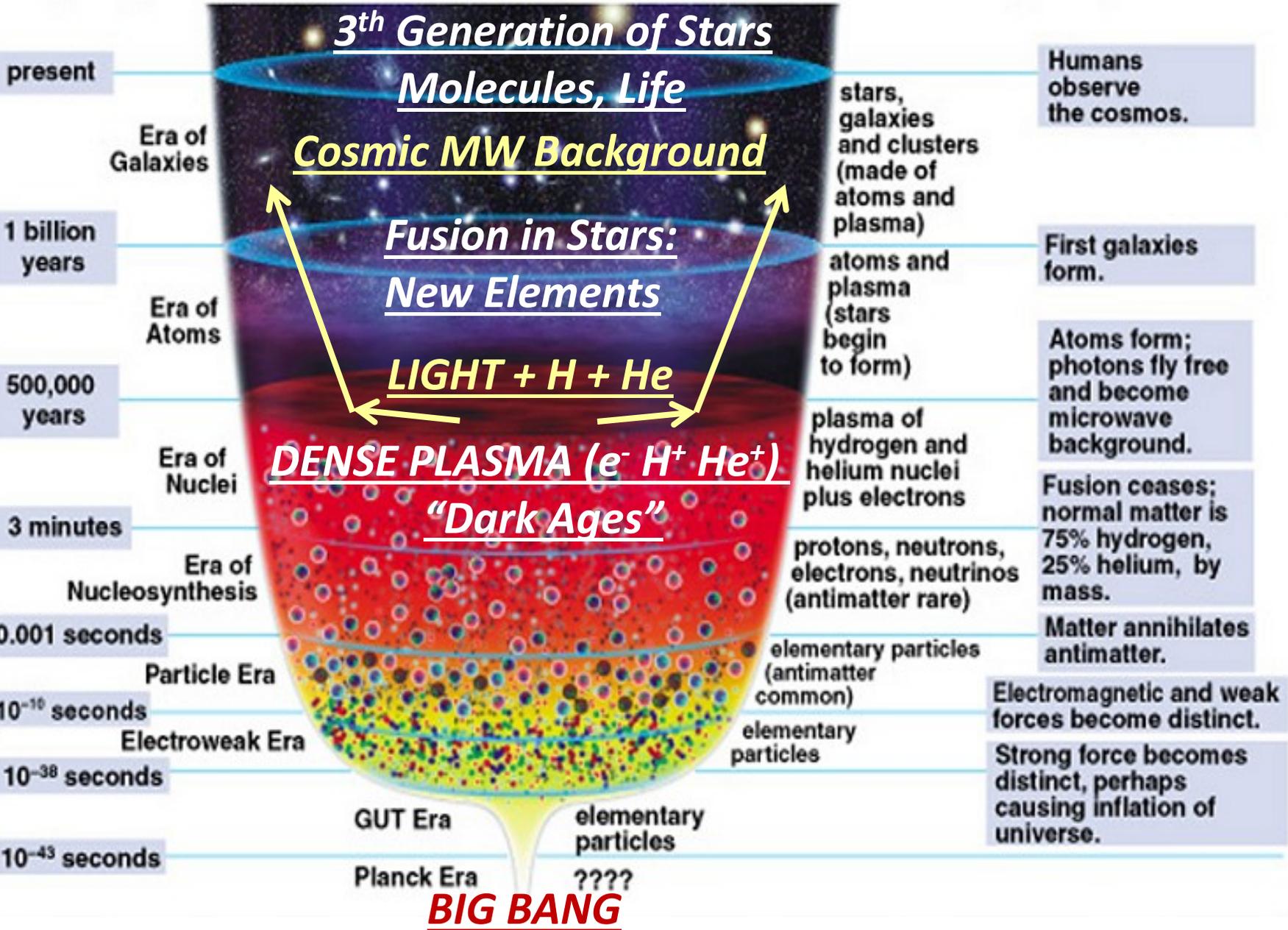
13.7 billions years

T (K)

Time Since Big Bang

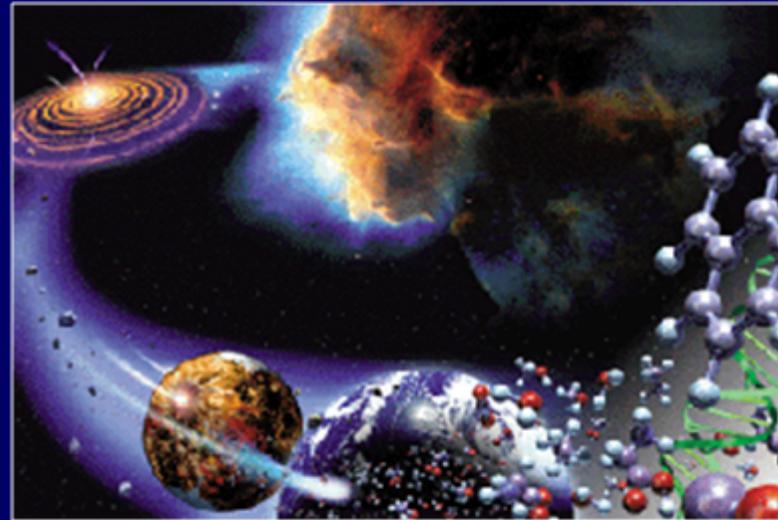
Major Events Since Big Bang

2.7  
↑  
15  
↑  
3000  
↑  
 $10^9$   
↑  
 $10^{16}$   
↑  
 $10^{28}$   
↑  
 $10^{32}$



# 1. Nebulosas

*Regiones de enorme masa muy dispersa (átomos y moléculas neutras, iones, polvo), que se aproximan por gravedad y se calientan hasta formar nuevas estrellas.*



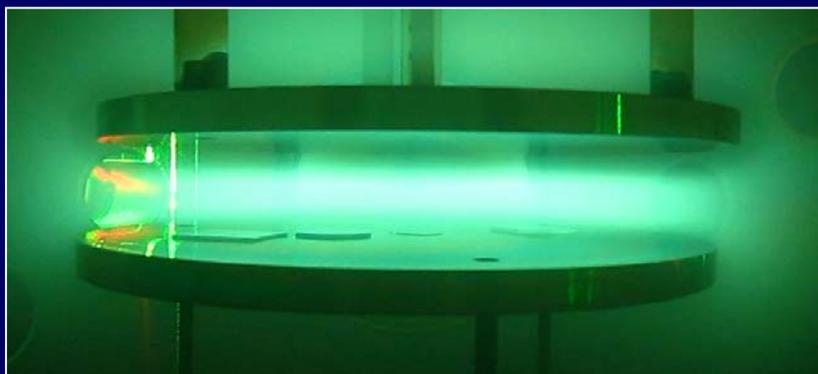
**Masa total ~ 14 × Masa de Estrellas**  
**Temperaturas de 4 K a 10<sup>8</sup> K**

Estudios de interés astrofísico en el Dpto. Física Molecular, IEM-CSIC:

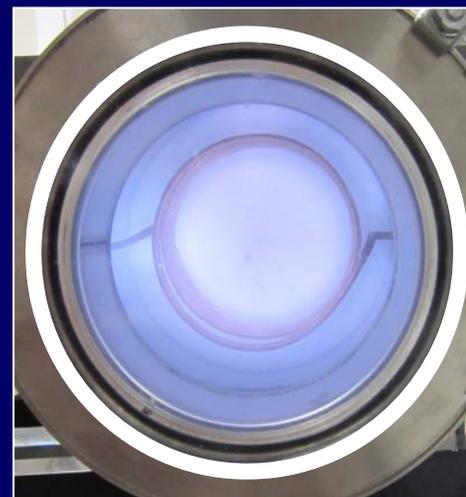
*200 especies moleculares detectadas en el espacio desde 1940  
(CH, CN) hasta hoy en día ( $C_{60}$ ,  $C_{70}$ )*

*Sinergia entre observaciones astrofísicas (visible, infrarojo, radio...),  
experimentos de laboratorio y predicciones teóricas.*

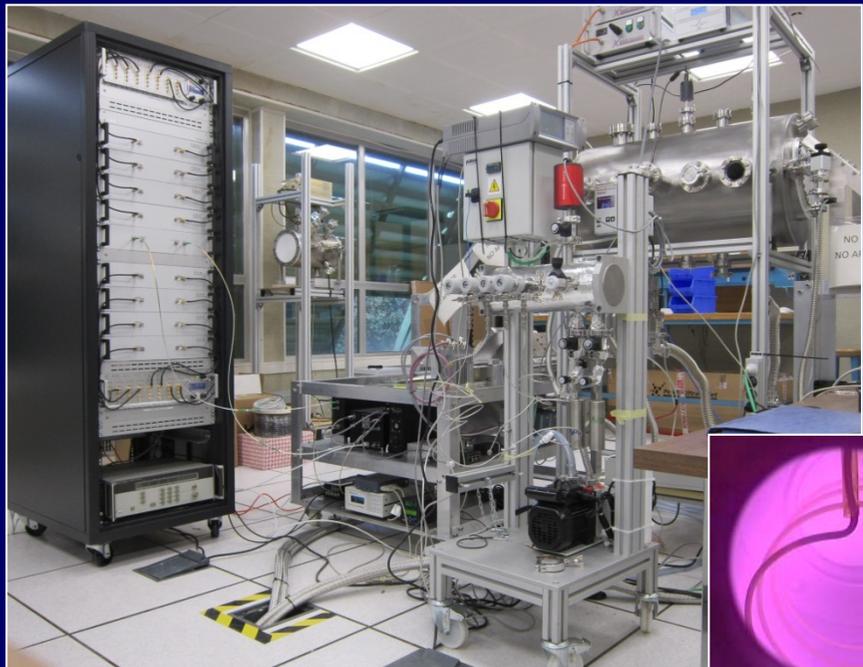
*Varias de las especies detectadas (iones, radicales) son muy reactivas y  
no existen en Tierra, pero pueden producirse en plasmas de laboratorio.*



*Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM- CSIC*

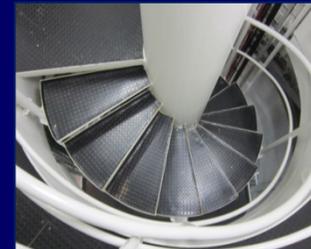


*IEM & IFF (CSIC) - Observatorio Astronómico de Yebes (Guadalajara)  
Proyecto Europeo Nanocosmos (2014-2020)*



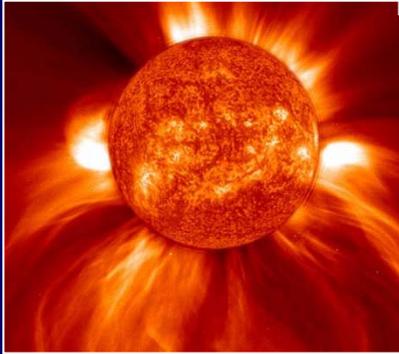
*Espectroscopía de ondas de radio (mm)*

*Anteriores campañas (2015-2017)  
Radiotelescopio de Yebes de 40 m*



100 escalones

## 2. 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!)

*Masa:  $3 \times 10^{24} \text{ kg}$ . Edad :  $4,5 \times 10^9$  años. Hasta 1938, edad estimada  $\sim 10^6$  años y calentamiento por compresión gravitatoria (W. Thompson, 1824-1907)*

*Controversia con C. Darwin (1809-1892): La Tierra, demasiado joven para dar lugar a la Evolución de las Especies.*

*1938 : Nucleosíntesis Estelar (H. Bethe, 1906-2005, Nobel 1.968)*

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

*Sobre la Tierra inciden  $\sim 500 \text{ W / m}^2$  (UV-visible-IR)*

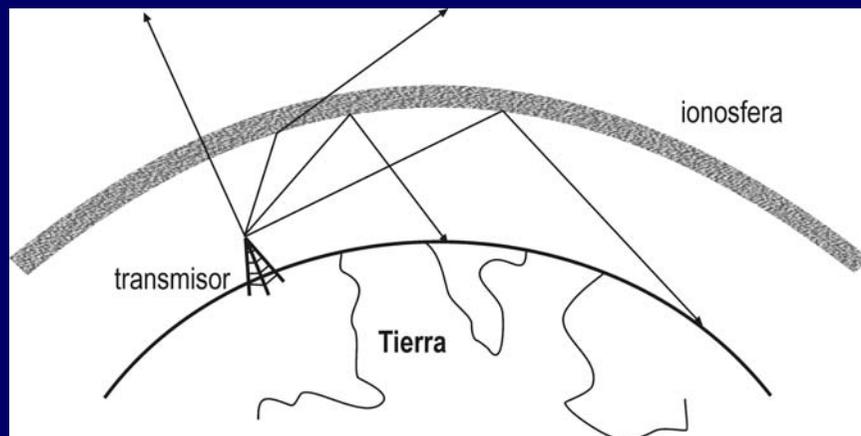
*Persisten importantes incógnitas (magnetismo, sismología solar...)*

*Inst. de Astrofísica de Canarias*

## 3. Ionosfera Terrestre

*Producida por la radiación solar de alta energía (rayos X y UV)  
Baja Ionización  $\lt 10^{-3}$  , Altitud  $\sim 60 - 1000$  km*

**Descubierta por Marconi en 1901 :  
Reflexión y Transmisión de Ondas de Radio de Largo Alcance**



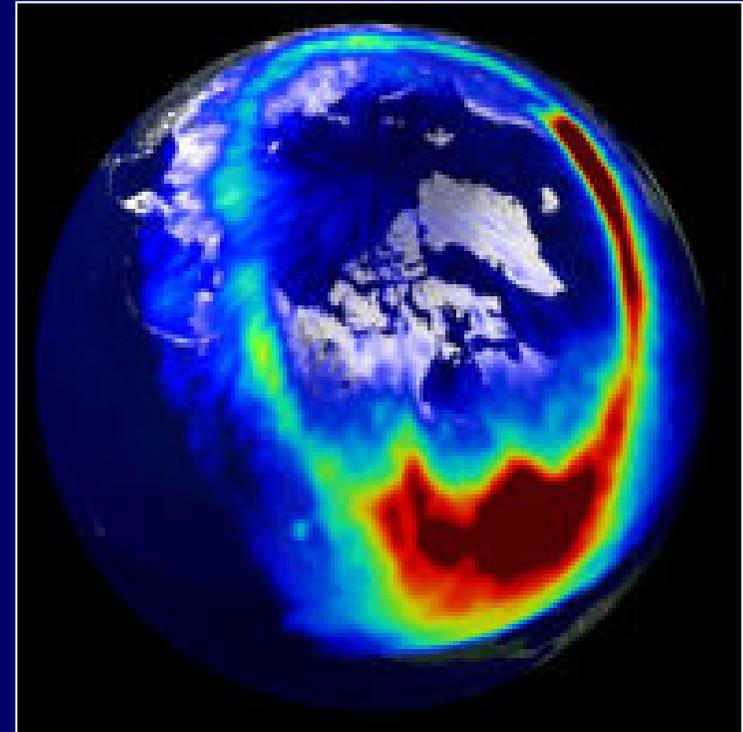
*Los plasmas, como los metales, reflejan  
la radiación electromagnética*

## Auroras Boreales y Australes

*Altitud > 100 km ( Ionosfera )*

*Latitudes (norte, sur) > 60°*

*Mas intensas cada 11 años : ciclo solar*



## 4. Rayos

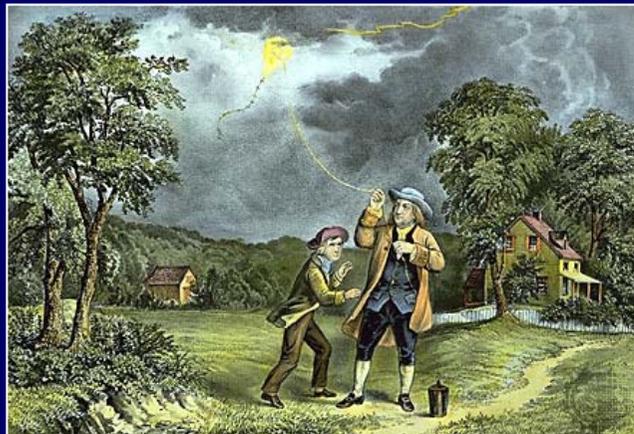


*Entre nube, cargada por rozamiento de partículas de hielo, y tierra (conductora), o entre nube y nube.*

*Plasma Ionizado al 100% ,  $T \sim 30.000\text{ K}$*

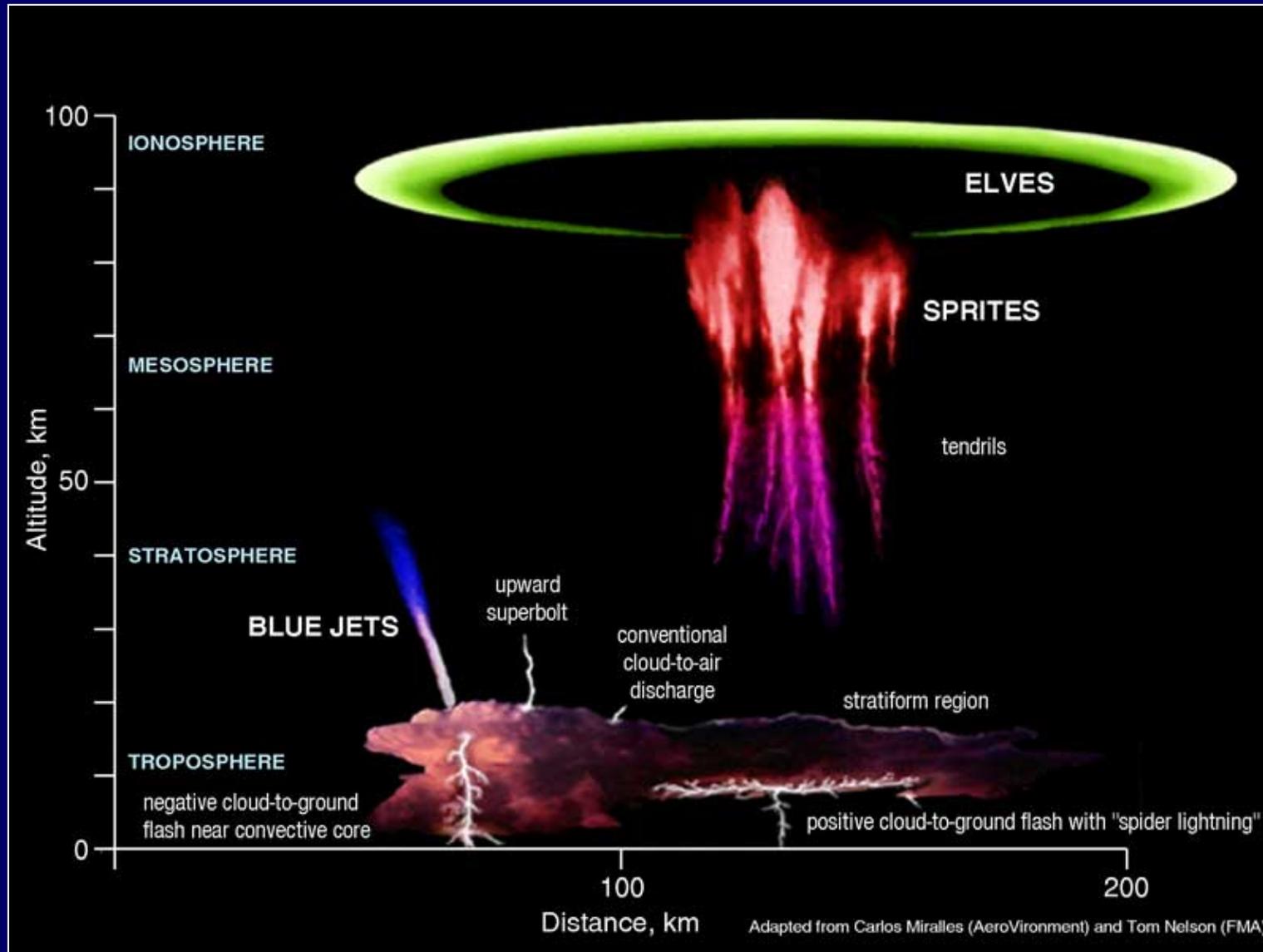
*Voltaje       $\sim 1.000\text{ MV}$  }  **$P > 10^{12}\text{ W!}$**   
*Corriente     $\sim 10.000\text{ A}$  }  
*Duración     $\sim 10\ \mu\text{s} - 100\text{ ms}$***

*...de B. Franklin (1752), inventor del pararrayos,... a N. Tesla (~1900)  
Interés posterior originado por daños causados en tendido eléctrico*



# Efectos luminosos transitorios (TLE) en la Mesosfera Terrestre

*Entre nube y ionosfera conductora*  
*Observados por primera vez en 1990 (NASA Space Shuttle).*

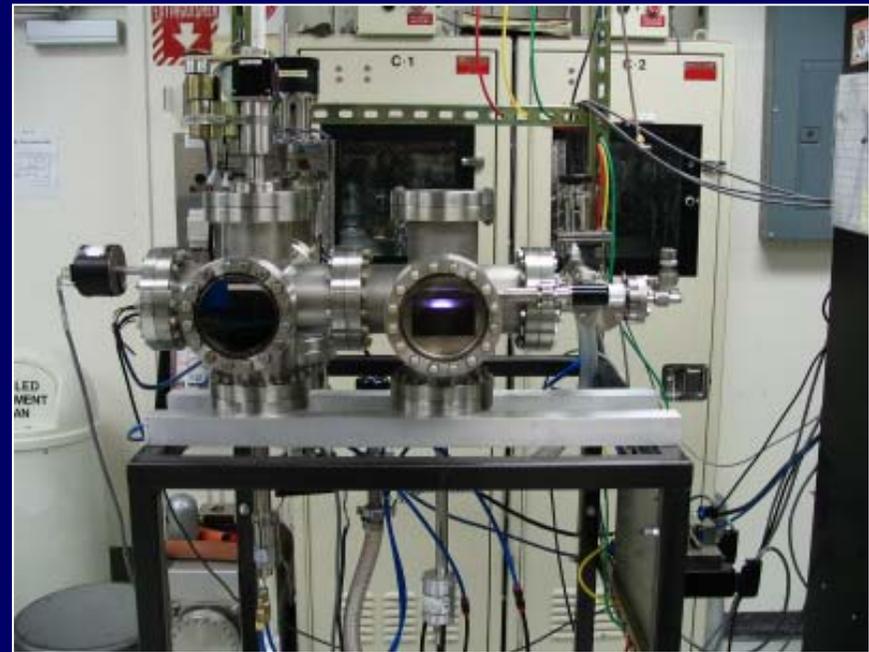




Videos de Sprites (“duendes”). Cámara normal y cámara -rápida

## 4ª Parte

# APLICACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS



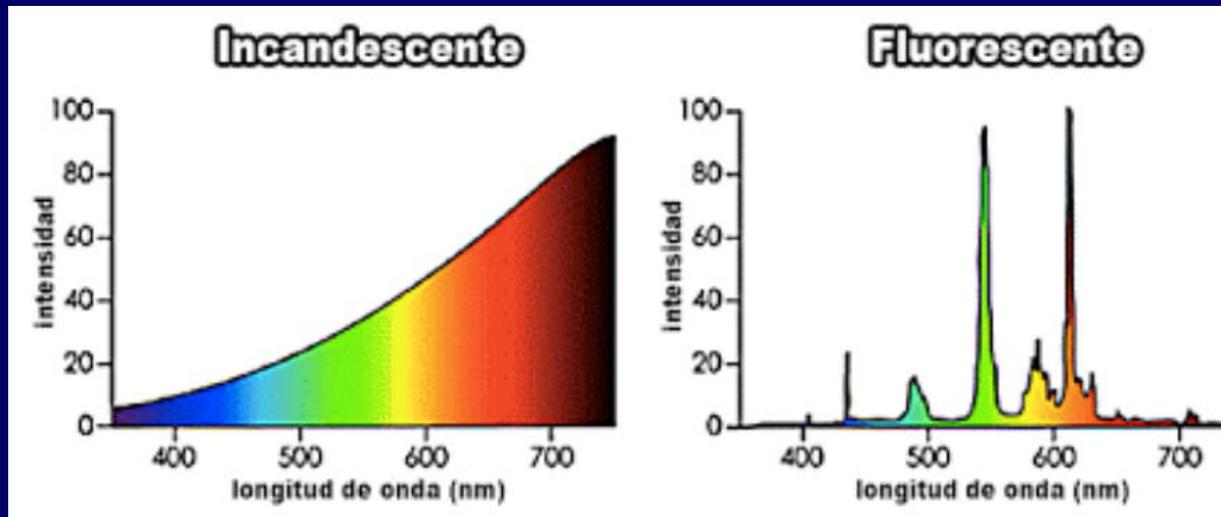
# PLASMAS FRÍOS



*Laboratorio de Plasmas Fríos, IEM- CSIC*

# Iluminación por Plasma

*Lámparas fluorescentes de bajo consumo.*



# Esterilización por plasma

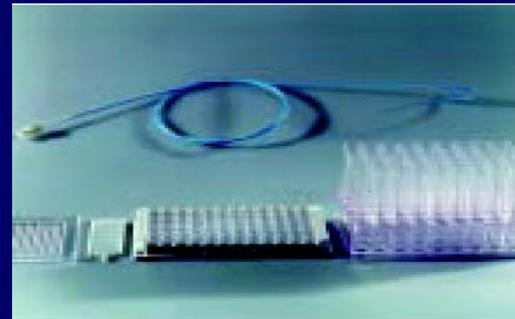
Doble acción bactericida:

- Radiación ultravioleta.
- Radicales fuertemente oxidantes.



*Esterilización de materiales  
que no soportan altas temperaturas.*

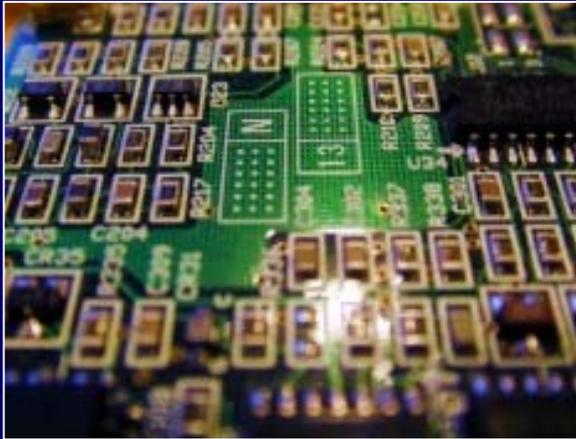
*Material médico y quirúrgico,  
envases de alimentos...*



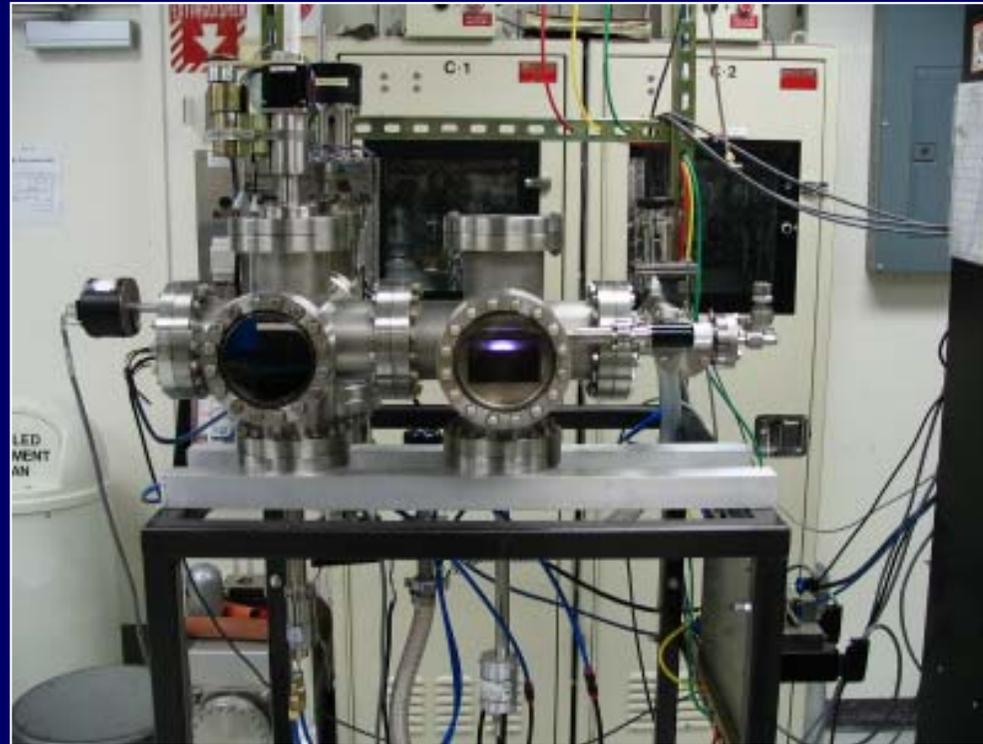
## Tratamientos médicos y biológicos

En fase de experimentación (cicatrización de heridas, tratamiento de tumores cutáneos, desinfección alimentaria, aplicaciones germicidas (*U. Córdoba*))

# Microelectrónica



Magnetron



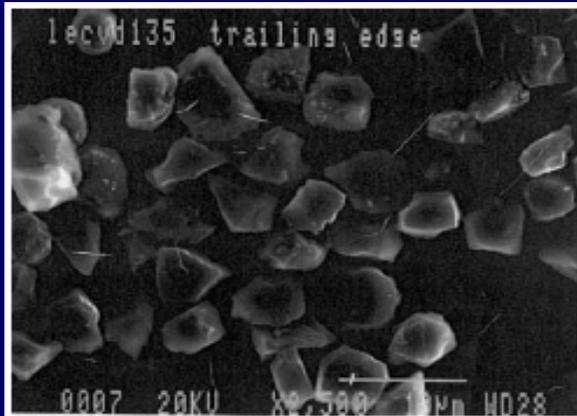
Fabricación de circuitos

*3 institutos del CSIC de Microelectrónica: Madrid, Sevilla, Barcelona  
ISOM (ETSIT, UPM)*

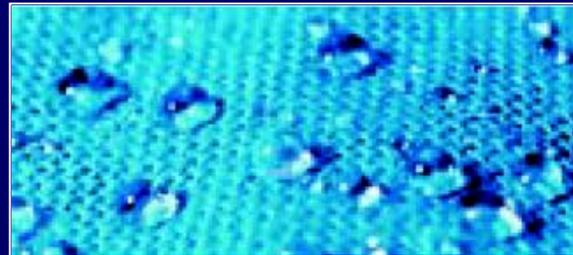
# Ingeniería de superficies

Cambio drástico en propiedades superficiales de materiales.

*Dureza, resistencia al rozamiento o al ataque químico, impermeabilidad, propiedades ópticas, biocompatibilidad...*



Microcristales de diamante producidos por plasma para recubrir herramientas de corte



Tejidos tratados con plasma, que repelen la humedad y las grasas



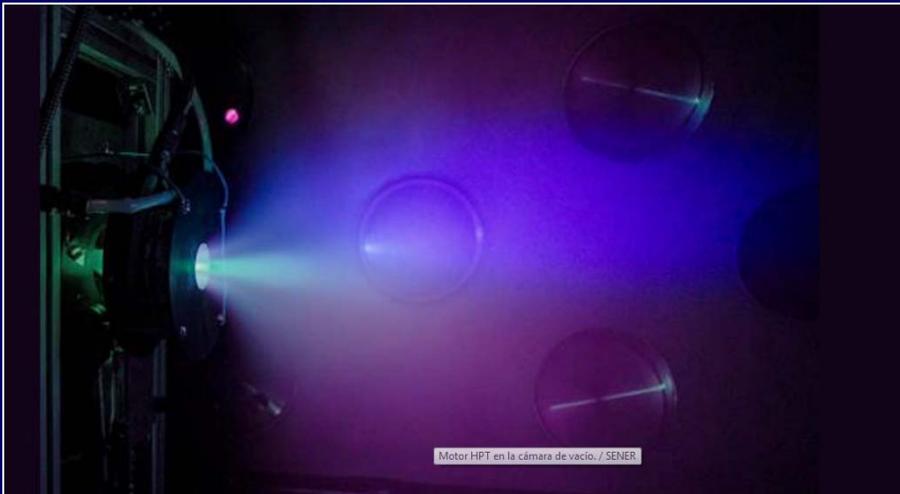
Prótesis metálica de rodilla cubierta de material biocompatible

*4 Institutos del CSIC de Ciencia de Materiales:  
Madrid, Sevilla, Zaragoza, Barcelona*

# Motores Iónicos para Propulsión Espacial

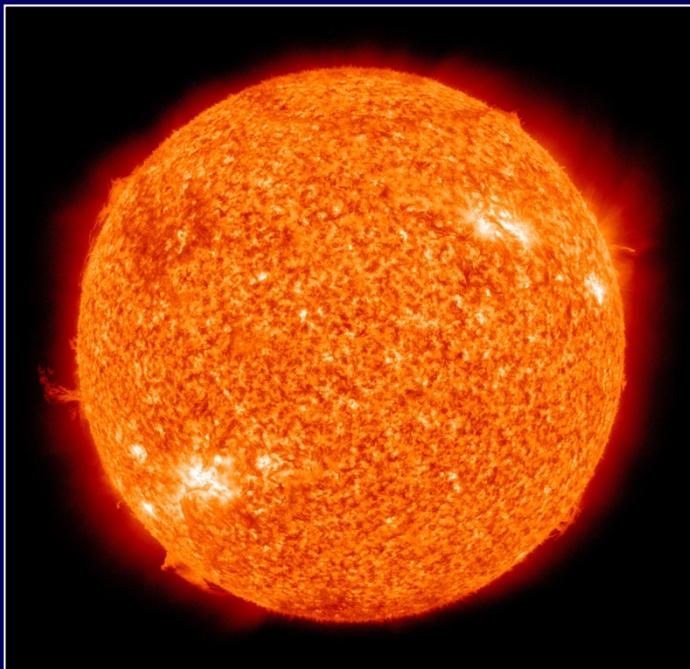


Sonda Lunar “Smart-1”  
de la Agencia Espacial Europea (ESA).  
Lanzada en Agosto de 2006  
Mucho menos combustible que un  
motor químico.



Desarrollo de último modelo  
(Plasma Helicon, 2018).  
Acuerdo ESA - SENER -  
Universidad Carlos III de Madrid.

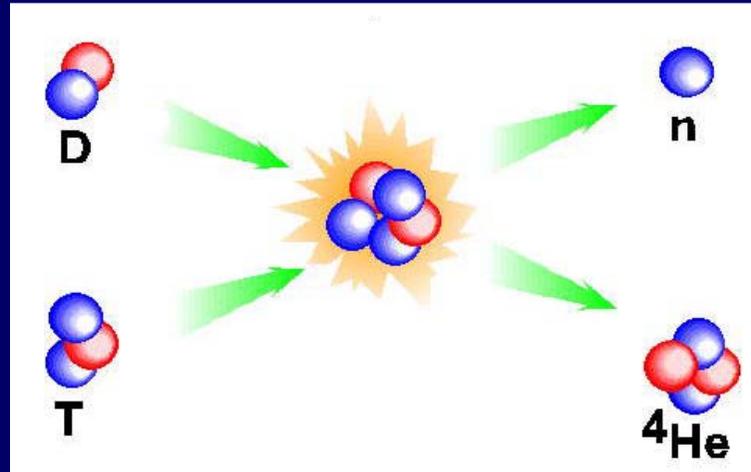
# PLASMAS CALIENTES



*Llamarada solar*

## Reactores de Fusión Termonuclear

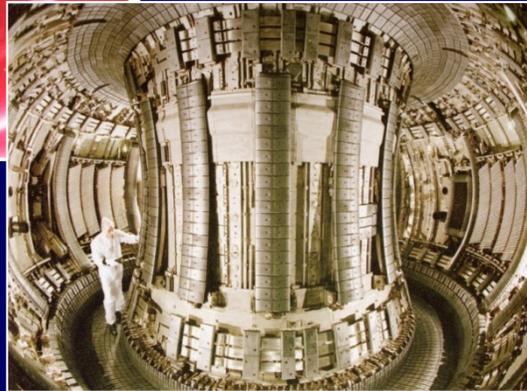
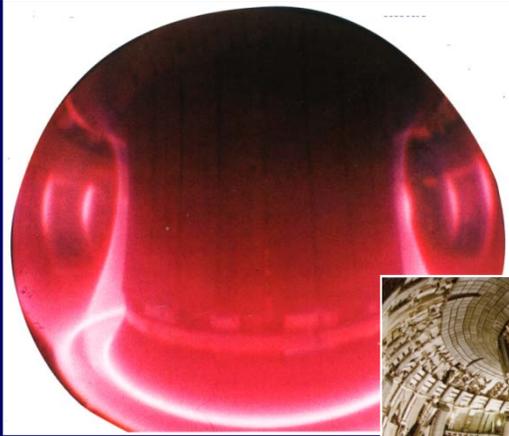
$T = 10^8$  K ¡Mayor que en el núcleo solar!  
Baja presión  $\approx 10^{-2}$  mbar



*Consumo de combustible para una persona  
en un país industrializado durante toda su vida:*

*10 g Deuterio ( en  $0,5 \text{ m}^3 \text{ H}_2\text{O}$  )  
+ 30 g Li necesario para producir Tritio*

# Fusión por Confinamiento Magnético "Tokamak"



"Joint European Torus"  
(JET, Inglaterra, desde 1965)

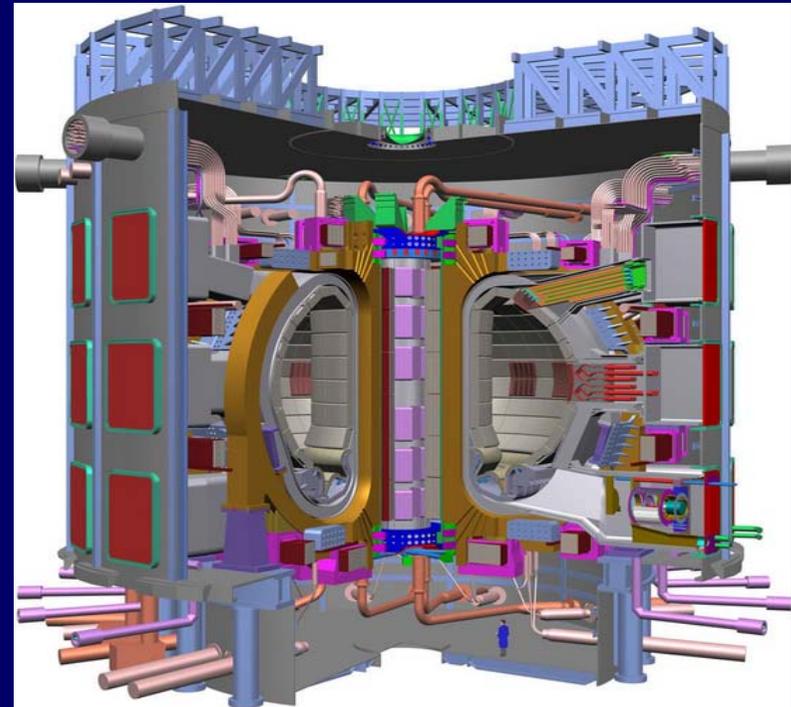
*28 países europeos*

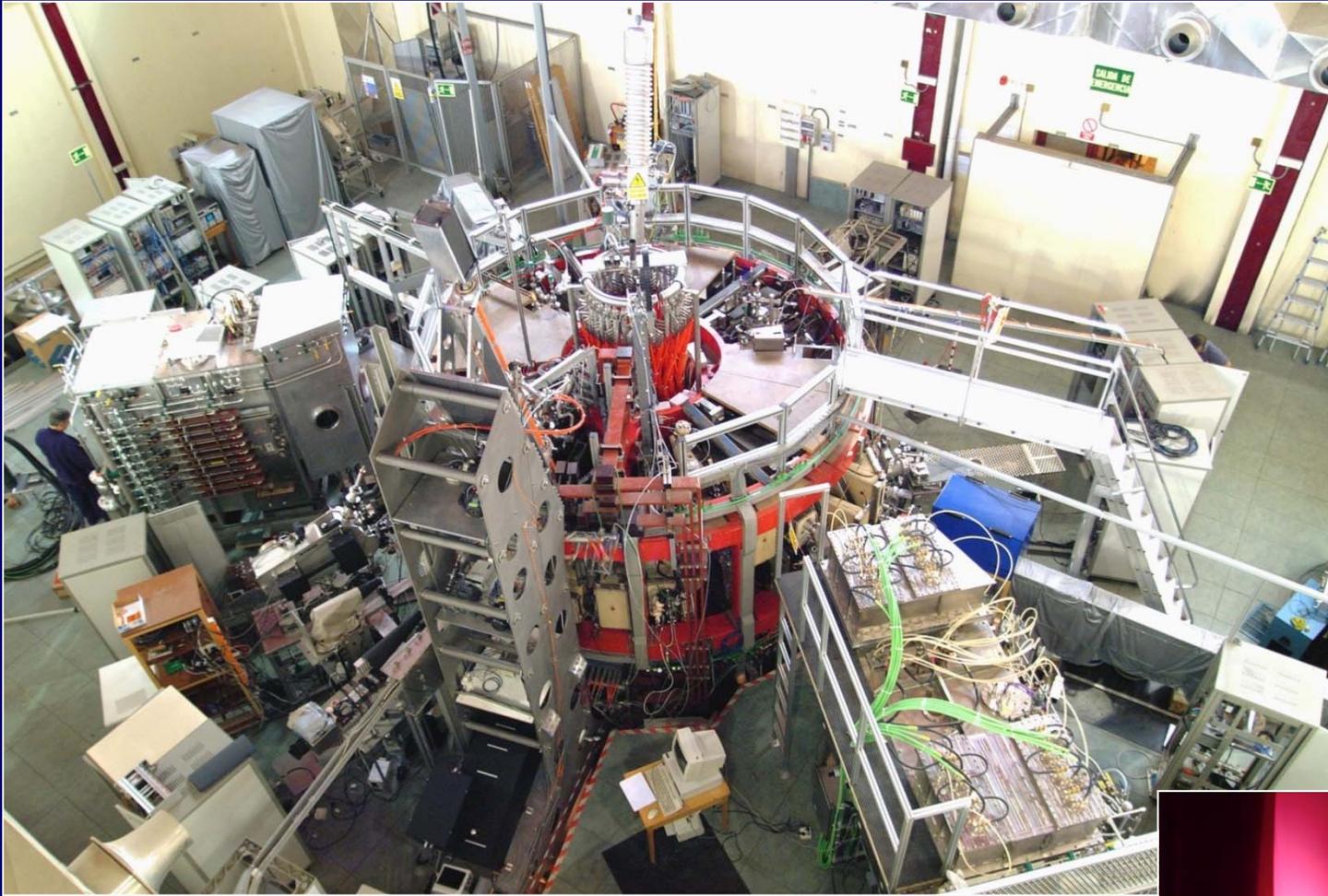
"International Thermonuclear  
Experimental Reactor" (ITER, Francia)

*Unión Europea, USA,  
China, India, Japan, Korea, Russia*

Previsible final de construcción, 2024.

*Alta participación española*





Reactor experimental TJ-II  
Laboratorio Nacional de Fusión, CIEMAT, Madrid



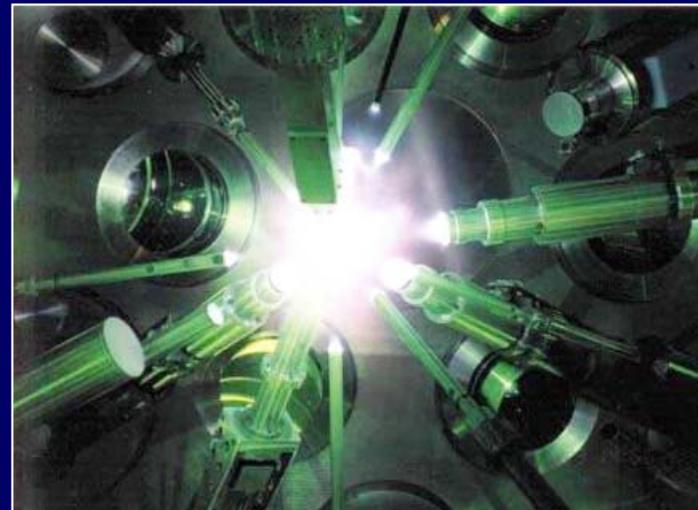
# Fusión por Confinamiento Inercial

## *“Fusión por Láser”*



National Ignition Facility  
(Livermore, USA)

*Combustible*

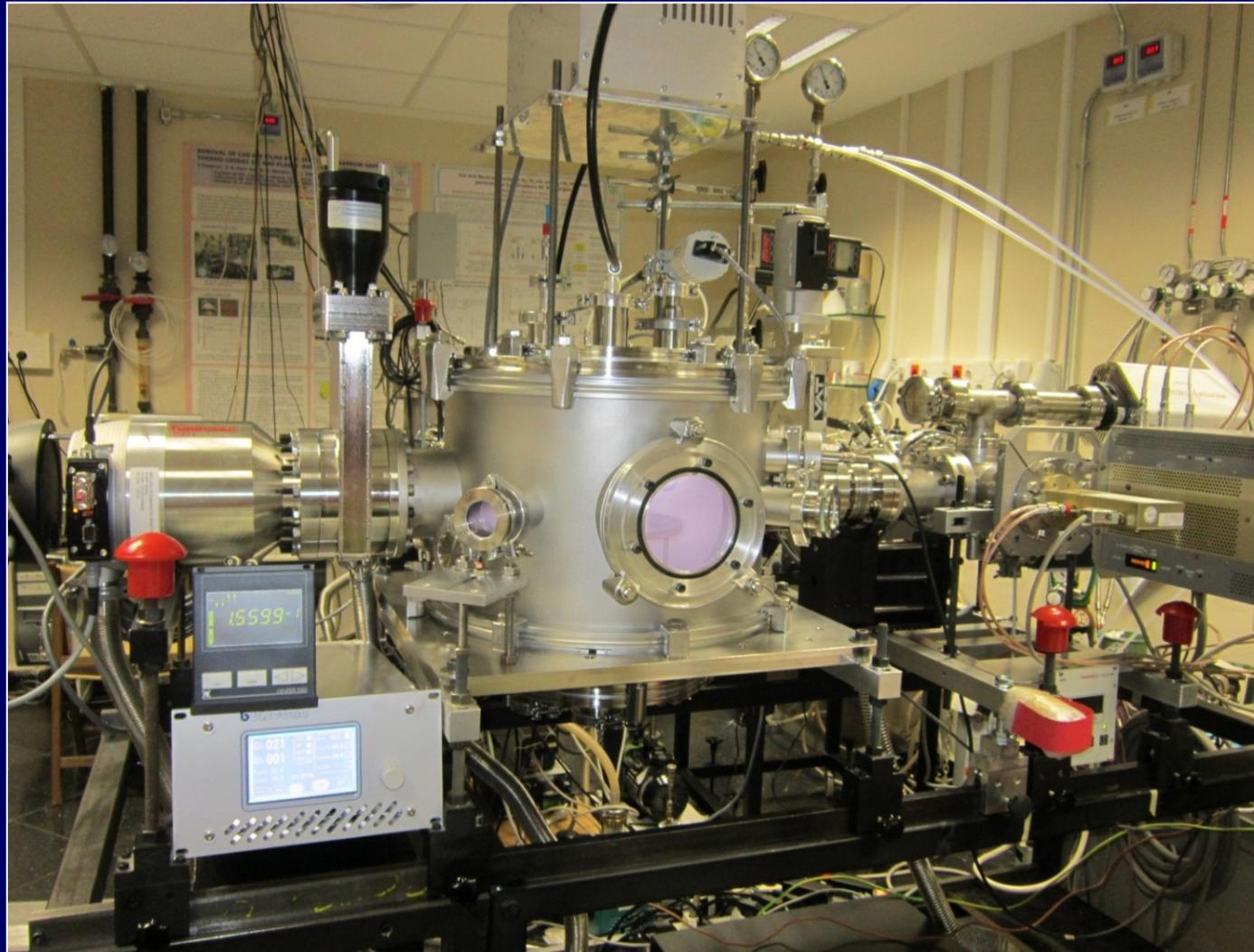


## Resumen y conclusiones

- Naturaleza del plasma frente a los otros estados de agregación.
- Existencia de cargas libres ( $\pm$ ), globalmente neutro .
- Mecanismos microscópicos.
- Propiedades: emisión de luz, conductividad, interacción con campos electromagnéticos, enorme reactividad química.
- Plasmas en la naturaleza (más del 99% de la materia conocida)
- Aplicaciones científicas y tecnológicas(plasmas fríos / plasmas calientes), desde la llama al reactor de fusión termonuclear.

Los plasmas constituyen la mayor parte de la materia conocida del universo, son muy fascinantes y llamativos, y por sus aplicaciones representan un papel cada vez más importante en nuestras vidas.

¡ Muchas gracias !



Laboratorio de Plasmas Fríos. IEM (CSIC)