

Física del Plasma: Diagnósticos de Plasmas en Astrofísica y Fusión

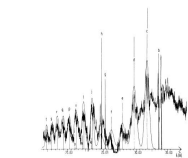
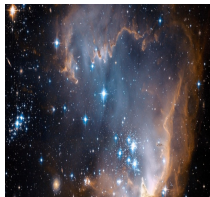
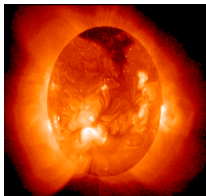


FIG. 1. Experimental spectrum of Fe in laser-produced plasma (this work), compared with theoretical data. The intensity of each array was adjusted to obtain the best fit. $3d^5 4s^1 4p$ transitions: $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$, $4.3 \rightarrow 4d^5 4s^1 4p$.



Darío Mitnik

Instituto de Astronomía
y Física del Espacio

Departamento de Física
Universidad de
Buenos Aires

Argentina

Basado en el curso dictado por Prof. J.L. Schwob
The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

Programa del Curso

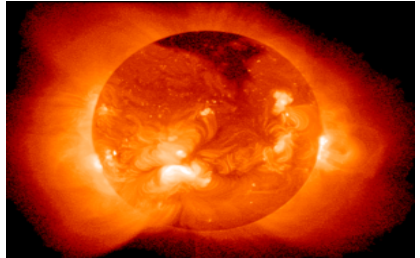
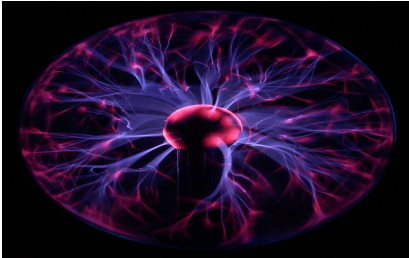
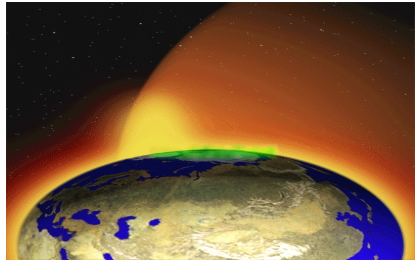
- 1. Física de Plasmas: Conceptos Generales**
2. Fusión Termonuclear Controlada
3. Equilibrio Termodinámico
4. Procesos fundamentales en Física Atómica
5. Plasmas fuera del equilibrio termodinámico
6. Modelo Coronal
7. Modelo Colisional–Radiativo
8. Diagnóstico de Plasmas

Programa del Curso





1. Consideraciones Generales sobre la Física de Plasmas

- ▶ ¿Qué es el Plasma?
- ▶ Características generales de plasmas
- ▶ Ecuaciones fundamentales
- ▶ Espectroscopía y Diagnóstico de Plasmas

1. Plasma: Conceptos generales



¿Qué es el Plasma?

Solid	Liquid	Gas	Plasma
Example Ice H_2O	Example Water H_2O	Example Steam H_2O	Example Ionized Gas $H_2 \rightarrow H^+ + H^+ + 2e^-$
Cold $T < 0^\circ C$	Warm $0 < T < 100^\circ C$	Hot $T > 100^\circ C$	Hotter $T > 100,000^\circ C$ 1 > 10 electron Volts
			
Molecules Fixed in Lattice	Molecules Free to Move	Molecules Free to Move, Large Spacing	Ions and Electrons Move Independently, Large Spacing

1. $\pi\lambda\acute{\alpha}\sigma\mu\alpha$: Gas total o parcialmente ionizado
2. Es el 4^{to} estado de la materia
3. 99 % del universo
4. En escala macroscópica es eléctricamente neutro
5. Conductor eléctrico. Responde a Campos Magnéticos

Caracterización de Plasmas

Densidad de partículas

$$n_i = \frac{\text{número de partículas } i}{\text{cm}^3}$$

Plasmas Terrestres

10^7 m^{-3}

10^{30} m^{-3} (Fusión Inercial)

Plasmas Cósmicos

1 m^{-3} (medio intergaláctico)

10^{30} m^{-3} (centros estrellas)

Para comparar:

agua: $3.3 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$

gas ideal: $2.7 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$

diamante: $1.8 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$

Caracterización de Plasmas

Temperatura de partículas

$$1 \text{ eV} = 1.1605 \times 10^4 \text{ Kelvin}$$

Plasmas Terrestres

0 K (Plasmas cristalinos)

10^8 K (Fusión Magnética)

Plasmas Cósmicos

10^2 K (aurora)

10^7 K (centros Sol)

Para comparar:

$$k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Ionización Hidrógeno: 13.6 eV

$$\text{Temperatura ambiente: } 0.026 \text{ eV} = 26 \text{ meV} = \frac{1}{40} \text{ eV}$$

Caracterización de Plasmas

Tiempo de confinamiento

$$\tau = \frac{\text{Energía del Plasma}}{\text{Potencia de Pérdidas}}$$

Plasmas Terrestres

10^{-12} s (Plasmas de laser)

10^7 s (Tubos fluorescentes)

Para comparar:

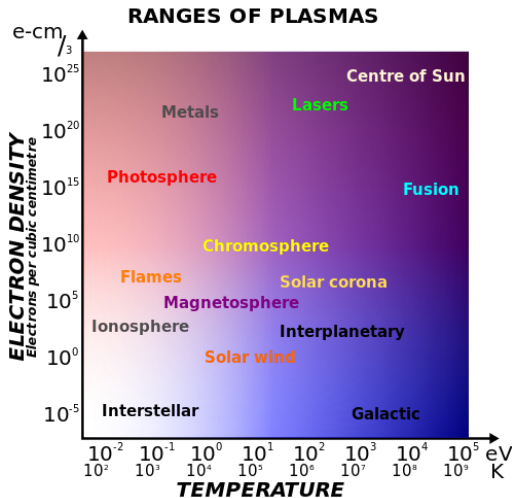
Radiación atómica: 10^{-8} s

Plasmas Cósmicos

10^1 s (Fulguraciones solares)

10^{17} s (Plasmas intergalácticos)

Caracterización de Plasmas



Caracterización de Plasmas

- ▶ Grado de ionización
- ▶ Termal vs. No-Termal
- ▶ Radio de Debye
- ▶ Frecuencia del Plasma

Propiedades de Plasmas

- ▶ Las partículas no están ligadas, **pero tampoco son libres**
- ▶ Efectos colectivos
- ▶ Generalmente, los electrones están en equilibrio (T_e bien definida)
- ▶ $T_i < T_e$

Caracterización de Plasmas

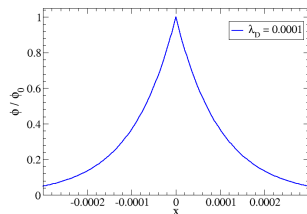
Radio de Debye

$$\lambda_D \equiv \left(\frac{\epsilon_0 k T_e}{n e^2} \right)^{1/2}$$

Relaciones útiles:

$$\lambda_D = 69 \sqrt{\frac{T}{n}} \text{ m} \quad (T \text{ en K})$$

$$\lambda_D = 7430 \sqrt{\frac{kT}{n}} \text{ m} \quad (kT \text{ en eV})$$



La ecuación de Poisson

$$\nabla^2 \phi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e)$$

Tiene como solución

$$\phi = \phi_0 \exp\left(-\frac{|x|}{\lambda_D}\right)$$

Caracterización de Plasmas

Radio de Debye

Valores típicos:

Plasma	Densidad (m^{-3})	Temperatura (K)	Radio Debye (m)
Núcleo Solar	10^{32}	10^7	10^{-11}
Tokamak	10^{20}	10^8	10^{-4}
Descarga de gas	10^{16}	10^4	10^{-4}
Ionosfera	10^{12}	10^3	10^{-3}
Viento solar	10^6	10^5	10
Medio interestelar	10^5	10^4	10
Medio intergaláctico	1	10^6	10^5

Caracterización de Plasmas

Número de Debye

$$N_D \equiv n \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \approx 1.38 \times 10^6 \sqrt{\frac{T^3}{n}}$$

Parámetro del Plasma

$$\Gamma \equiv n 4\pi \lambda_D^3$$

Efectos colectivos:

$\lambda_D \ll L$ y $\Gamma \gg 1$: “*Plasma Approximation*”

$\nabla^2 \phi \simeq 0$, por lo tanto $n_i \simeq n_e \simeq n$ “*Quasineutral*”

Caracterización de Plasmas

Otra Forma de ver al Parámetro del Plasma

$$R \equiv \frac{E_p}{E_k} \propto \frac{e^2/L}{T} = \frac{e^2 n^{1/3}}{T}$$

Para que un plasma pueda apantallar los potenciales que se le aplican, R debe ser chico, y por lo tanto $\frac{T}{n^{1/3}}$ grande.

Esto explica por qué $\Gamma \propto \sqrt{\frac{T^3}{n}}$ debe ser grande.

Caracterización de Plasmas

Frecuencia del Plasma

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n e^2}{\epsilon_0 m}} \Rightarrow f_p \approx 9\sqrt{n}$$

Para comparar:

$$n = 10^{18} \text{ m}^{-3}$$

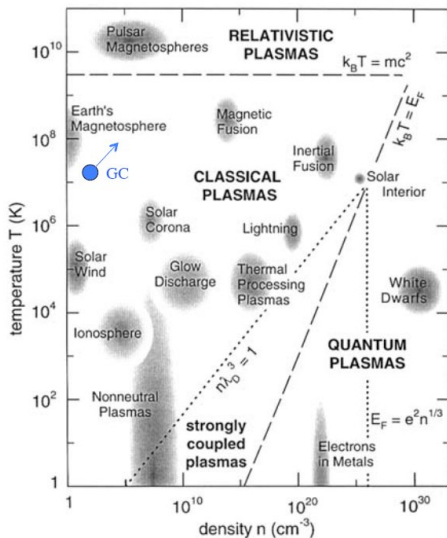
$$f_p \approx 9(10^{18})^{1/2} = 9 \times 10^9 \text{ s}^{-1} = 9 \text{ GHz}$$

Caracterización de Plasmas

Validez de la Aproximación de Plasma

1. $\lambda_D \ll L$
2. $\Gamma \gg 1$
3. $\omega_p \tau > 1$

Zoología de Plasmas

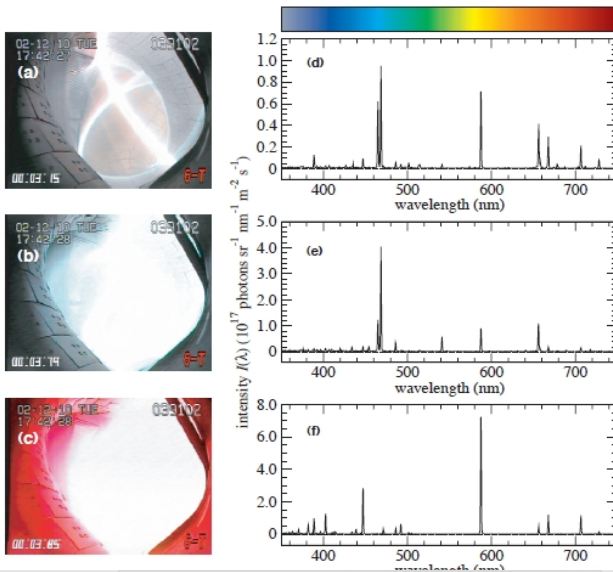


- ▶ Muy Acoplados: $n \lambda_D^3 < 1$
- ▶ Relativísticos: $kT > mc^2$
- ▶ Cuánticos: $E_F > kT$
- ▶ Cuántico Ideales: $E_F > e^2 n^{1/3}$

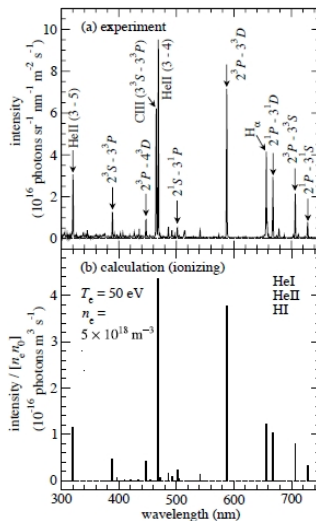
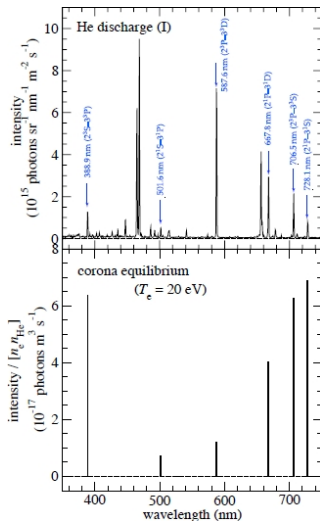
Espectroscopía y Diagnóstico de Plasmas

- ▶ **Análisis de radiación como herramienta de diagnóstico:** Permite obtener información de los parámetros del plasma sin introducir ninguna perturbación o prueba. Esto incluye, entre otros, información acerca de:
 - ▶ Componentes del plasma
 - ▶ Grado de ionización
 - ▶ Densidades (electrónica n_e e iónica n_i)
 - ▶ Temperaturas (T_e y T_i)
- ▶ **Interés en diversas áreas de física:** Permite entender y afianzar los modelos y cálculos de los diferentes procesos colisionales que producen los espectros. Aplicaciones directas en astrofísica.
- ▶ Rango espectroscópico de interés:
VUV: 2000 – 50 Å
rayos-X: 100 – 1 Å

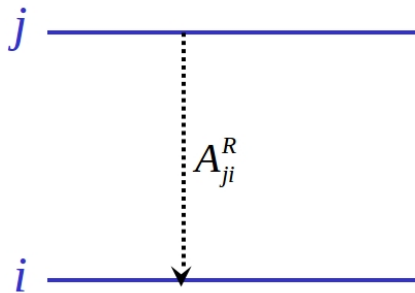
main discharge with helium gas



Ejemplos de diagnósticos en He



Intensidad de línea espectral



$$I_{j,i} = \frac{hc}{\lambda_{ji}} N_j A_{ji}$$