

Física del Plasma: Diagnósticos de Plasmas en Astrofísica y Fusión

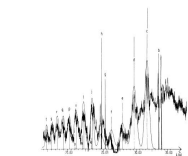
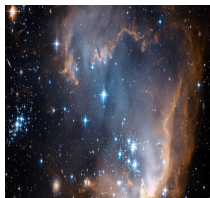
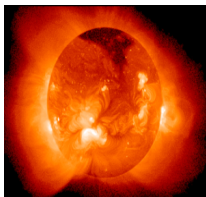


FIG. 1. Experimental spectrum of P_{10} in laser produced plasma (this work), compared with theoretical UTA. The intensity of each array was adjusted to obtain the best fit. $1s^2 \rightarrow 1s^1 2s^1$ transitions: $4s-3s$, $3s-2s$, $4s-3s$, $4s-2s$, $5s-4s$, $5s-3s$, $5s-2s$, $6s-5s$, $6s-4s$, $6s-3s$, $6s-2s$, $7s-6s$, $7s-5s$, $7s-4s$, $7s-3s$, $7s-2s$.



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

8. Diagnóstico de Plasmas

- ▶ Determinación de Temperatura y Densidad electrónica
- ▶ Medición de intensidades de líneas espectrales
- ▶ Ejemplos en plasmas astrofísicos
- ▶ Ejemplos en plasmas de Tokamaks
- ▶ Variaciones temporales

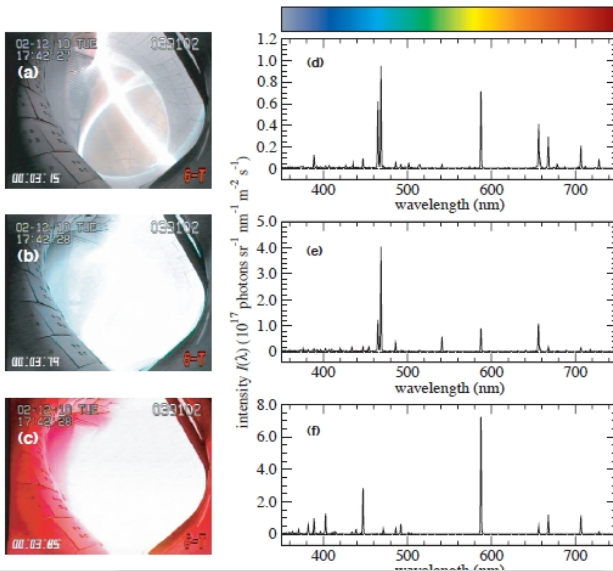
8. Diagnóstico de Plasmas

Análisis de radiación como herramienta de diagnóstico:

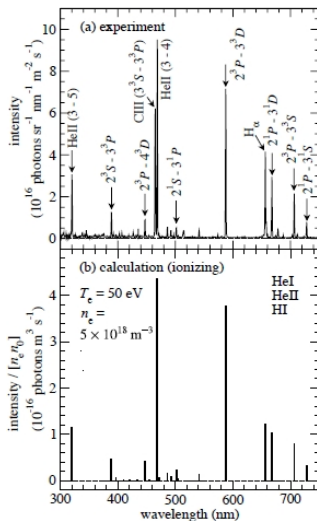
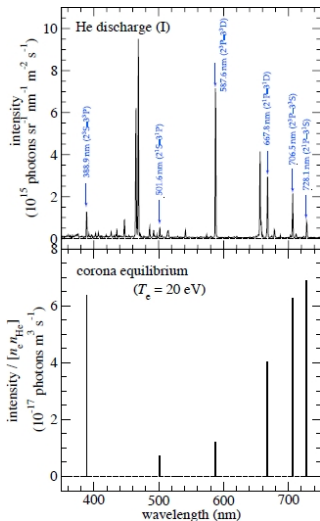
Permite obtener información de los parámetros del plasma **sin introducir ninguna perturbación o prueba** . Esto incluye, entre otros, información acerca de:

- ▶ Componentes del plasma
- ▶ Grado de ionización
- ▶ Densidades (electrónica n_e e iónica n_i)
- ▶ Temperaturas (T_e y T_i)

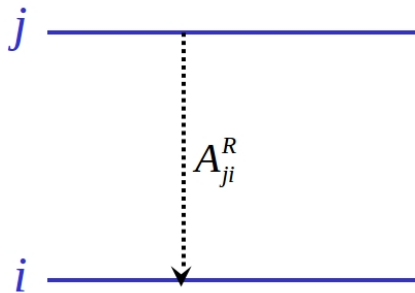
main discharge with helium gas



Ejemplos de diagnósticos en He



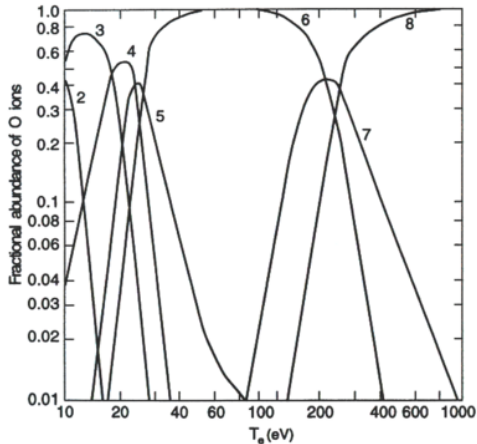
Intensidad de línea espectral



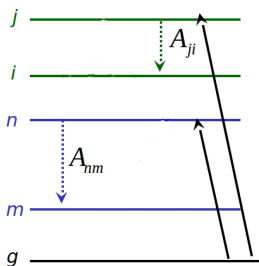
$$I_{j,i} = \frac{hc}{\lambda_{ji}} N_j A_{ji}$$

Determinación de Temperaturas

Por medio de las intensidades relativas de líneas espectrales de diferentes iones



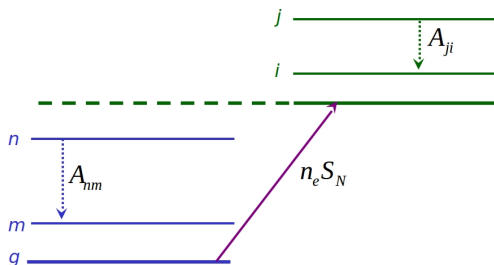
Intensidad de Líneas Espectrales: Plasmas LTE – Mismo Ión



$$\frac{I_{ji}}{I_{nm}} = \frac{\nu_{ij}}{\nu_{mn}} \frac{A_{ji}}{A_{nm}} \frac{g_j}{g_n} e^{-(\Delta E_{gj} - \Delta E_{gn})/kT_e}$$

Depende sólo de T_e

Intensidad de Líneas Espectrales: Plasmas LTE – Iones Consecutivos



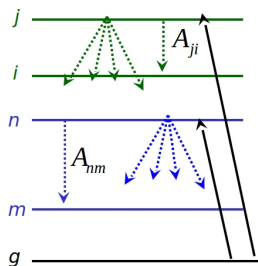
$$\frac{I_{ji}}{I_{nm}} = \frac{\nu_{ij}}{\nu_{mn}} \frac{A_{ji}}{A_{nm}} \frac{g_j}{g_n} \frac{2(2\pi m_e k T_e)^{3/2}}{h^3} \frac{1}{n_e} e^{-(I_N + \Delta E_{gj} - \Delta E_{g'n})/k T_e}$$

Depende de T_e y de n_e

Intensidad de Líneas Espectrales: Plasmas LTE

- ▶ Si las líneas son del mismo ión, $\Delta_{gj} - \Delta_{gn}$ debe ser grande comparado con kT_e .
- ▶ Este método se utilizó con líneas de Al^{+2} , Si^{+3} y Cl^{+6} (v.u.v.), para medir temperaturas en *vacuum sparks*.
- ▶ Permite validar las condiciones de LTE (si se obtiene el mismo valor de T_e en diferentes líneas).
- ▶ Si los iones son consecutivos, es útil si se conoce T_e (o si se conoce n_e).
- ▶ Si no se conoce n_e , se puede comparar la relación de intensidades de dos pares de líneas, de dos iones consecutivos.

Intensidad de Líneas Espectrales: Plasmas Coronales – Mismo Ión

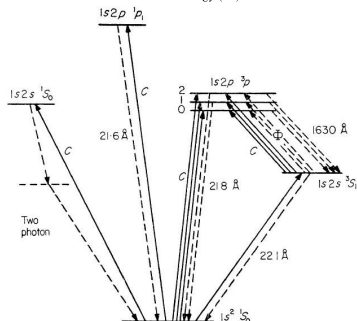
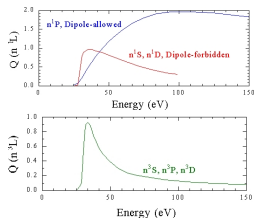


$$\frac{I_{ji}}{I_{nm}} = \frac{\nu_{ij}}{\nu_{mn}} \frac{A_{ji}}{A_{nm}} \frac{\sum_y A_{ny} Q_{gj}(T_e)}{\sum_x A_{jx} Q_{gn}(T_e)}$$

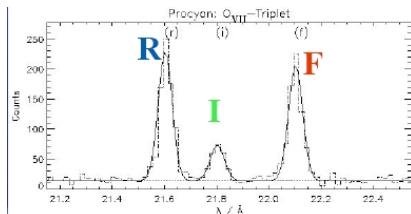
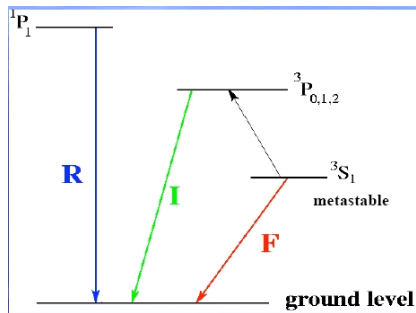
Depende **sólo** de T_e

Líneas de Intercombinación

- ▶ Las transiciones $1s - 2p$ son muy diferentes si se consideran los términos 1P o 3P .
- ▶ Las energías son muy similares
- ▶ $\sigma(1\ ^1S \rightarrow 2\ ^1P) \propto \frac{1}{u} \log(u)$
- ▶ $\sigma(1\ ^1S \rightarrow 2\ ^3P) \propto \frac{1}{u}$.
- ▶ La transición ($2\ ^3P \rightarrow 1\ ^1S$) es prohibida, y generalmente no se observa en iones He-like de baja Z .



Líneas de Intercombinación



R: Línea Resonante

I: Línea Intercombinación

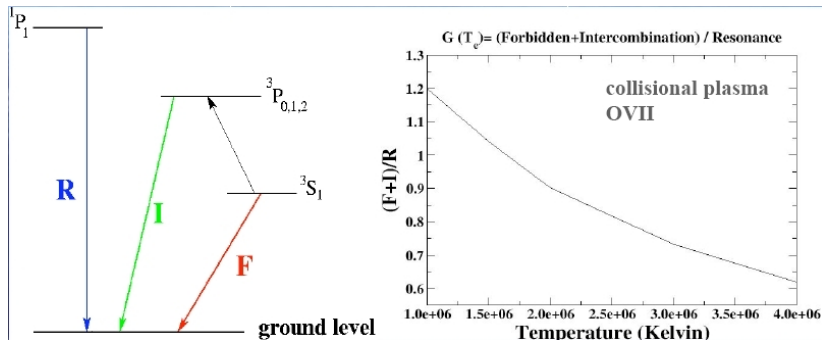
F: Línea Prohibida (Forbidden)

$$R(n_e) = \frac{\text{Forbidden}}{\text{Intercombination}}$$

$$G(T_e) = \frac{\text{Forbidden} + \text{Intercombination}}{\text{Resonance}}$$

Líneas de Intercombinación

$$G(T_e) = \frac{\text{Forbidden+Intercombination}}{\text{Resonance}}$$

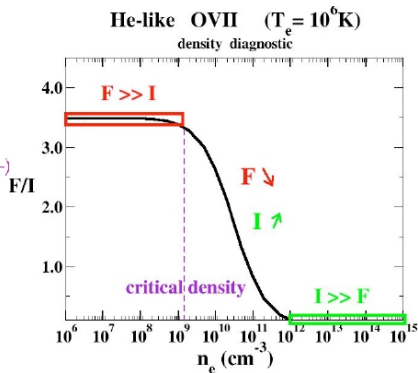
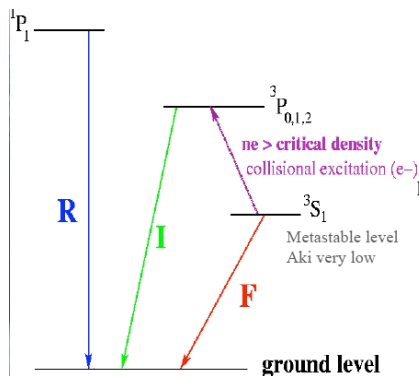


Plasma fotoionizado: $G \approx 4$

Plasma Colisional: $G \approx 1$

Líneas de Intercombinación

$$R(n_e) = \frac{\text{Forbidden}}{\text{Intercombination}}$$

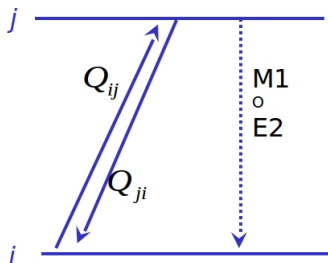


Densidad crítica que elimina la población del 3S_1

Líneas de Intercombinación: Ventajas

- ▶ Líneas cercanas: insensible a la calibración
- ▶ Mismo ión: No depende de la abundancia
- ▶ He-like iones son estables. Se producen en un largo rango de T_e
- ▶ En bajas Z son líneas completamente resueltas

Transiciones Prohibidas



$$N_{i \rightarrow j} = n_e n_i Q_{ij}$$

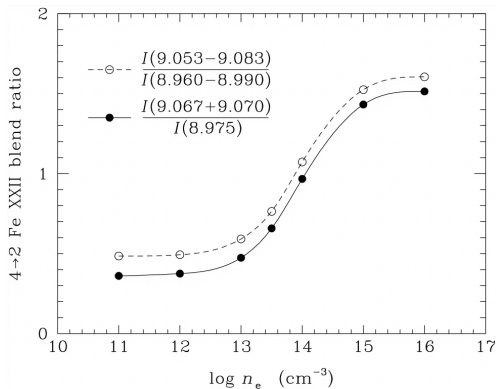
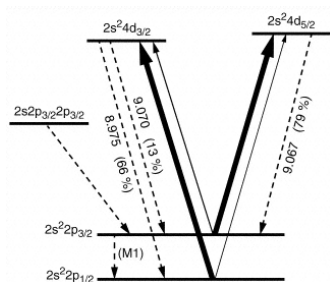
$$N_{j \rightarrow i} = n_j (A_{ji} + n_e Q_{ji})$$

A muy bajas densidades:

$$I_{ji} \approx n_e n_i Q_{ij}$$

$$I_{ji} = \frac{n_e n_i Q_{ij}}{A_{ji} + n_e Q_{ji}} A_{ji}$$

Ejemplos



Ejemplos

Para el diagnóstico de la estrella Capella, es útil conocer

$$\frac{1s2p \ ^3P_1 \rightarrow 1s^2 \ ^1S_0}{1s2p \ ^1P_1 \rightarrow 1s^2 \ ^1S_0} \equiv \frac{K\alpha_2}{K\alpha_1}$$

► $n_e = 10^8 \text{ cm}^{-3}$

► $n_e = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

