

# Física del Plasma: Diagnósticos de Plasmas en Astrofísica y Fusión

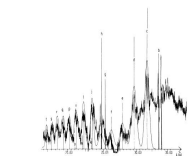
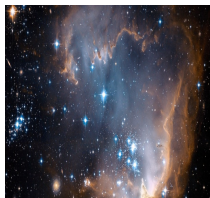
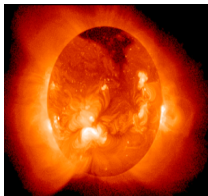


FIG. 1. Experimental spectrum of  $P_{10}$  in laser produced plasma (this work), compared with theoretical UTA. The intensity of each array was adjusted to obtain the best fit.  $1s^2 \rightarrow 1s^1 2p^1$  transitions:  $4s-3p$  (1),  $4s-3p$  (2),  $4s-3p$  (3),  $4s-3p$  (4),  $4s-3p$  (5),  $4s-3p$  (6),  $4s-3p$  (7),  $4s-3p$  (8),  $4s-3p$  (9),  $4s-3p$  (10),  $4s-3p$  (11),  $4s-3p$  (12),  $4s-3p$  (13),  $4s-3p$  (14),  $4s-3p$  (15),  $4s-3p$  (16),  $4s-3p$  (17),  $4s-3p$  (18),  $4s-3p$  (19),  $4s-3p$  (20),  $4s-3p$  (21),  $4s-3p$  (22),  $4s-3p$  (23),  $4s-3p$  (24),  $4s-3p$  (25),  $4s-3p$  (26),  $4s-3p$  (27),  $4s-3p$  (28),  $4s-3p$  (29),  $4s-3p$  (30),  $4s-3p$  (31),  $4s-3p$  (32),  $4s-3p$  (33),  $4s-3p$  (34),  $4s-3p$  (35),  $4s-3p$  (36),  $4s-3p$  (37),  $4s-3p$  (38),  $4s-3p$  (39),  $4s-3p$  (40),  $4s-3p$  (41),  $4s-3p$  (42),  $4s-3p$  (43),  $4s-3p$  (44),  $4s-3p$  (45),  $4s-3p$  (46),  $4s-3p$  (47),  $4s-3p$  (48),  $4s-3p$  (49),  $4s-3p$  (50),  $4s-3p$  (51),  $4s-3p$  (52),  $4s-3p$  (53),  $4s-3p$  (54),  $4s-3p$  (55),  $4s-3p$  (56),  $4s-3p$  (57),  $4s-3p$  (58),  $4s-3p$  (59),  $4s-3p$  (60),  $4s-3p$  (61),  $4s-3p$  (62),  $4s-3p$  (63),  $4s-3p$  (64),  $4s-3p$  (65),  $4s-3p$  (66),  $4s-3p$  (67),  $4s-3p$  (68),  $4s-3p$  (69),  $4s-3p$  (70),  $4s-3p$  (71),  $4s-3p$  (72),  $4s-3p$  (73),  $4s-3p$  (74),  $4s-3p$  (75),  $4s-3p$  (76),  $4s-3p$  (77),  $4s-3p$  (78),  $4s-3p$  (79),  $4s-3p$  (80),  $4s-3p$  (81),  $4s-3p$  (82),  $4s-3p$  (83),  $4s-3p$  (84),  $4s-3p$  (85),  $4s-3p$  (86),  $4s-3p$  (87),  $4s-3p$  (88),  $4s-3p$  (89),  $4s-3p$  (90),  $4s-3p$  (91),  $4s-3p$  (92),  $4s-3p$  (93),  $4s-3p$  (94),  $4s-3p$  (95),  $4s-3p$  (96),  $4s-3p$  (97),  $4s-3p$  (98),  $4s-3p$  (99),  $4s-3p$  (100).



**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

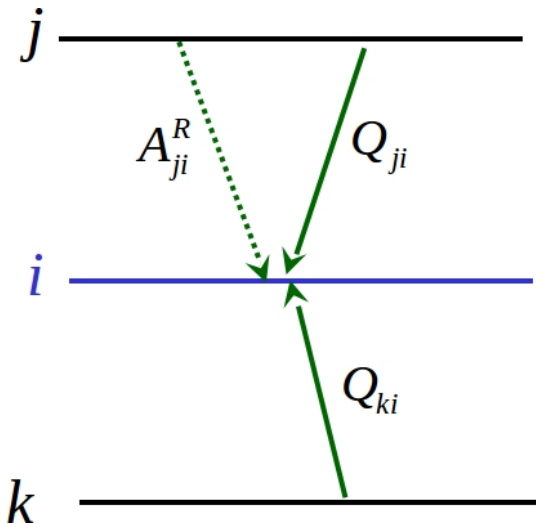
5. Plasmas fuera del equilibrio termodinámico
  - ▶ Procesos colisionales y radiativos
  - ▶ Ecuaciones generales de plasmas fuera del LTE
  - ▶ Modelos de soluciones aproximadas

## 5. Plasmas fuera del L.T.E.

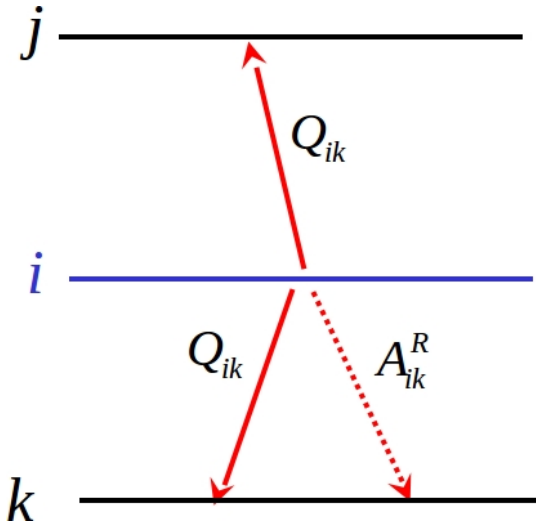
En Equilibrio Termodinámico Local (LTE)

- ▶ La población de los niveles está determinada por procesos colisionales
- ▶ Descripción mediante Boltzmann y Saha
- ▶  $n_e > 10^{24} T_e^{1/2} E_i^3$  (depende del ión)
- ▶  $n_e > 10^{24} \text{ cm}^{-3}$

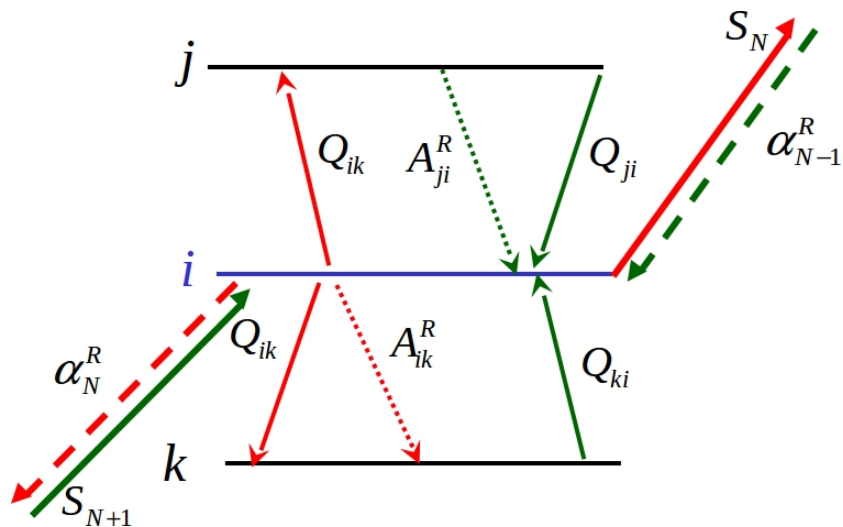
# Población de un nivel



# Despoblación de un nivel



# Población de un ión





# Ecuaciones generales

$$\frac{\partial N_j}{\partial t} = \sum_{k \neq j} N_k n_e Q_{k \rightarrow j} + \sum_{k > j} N_k A_{k \rightarrow j}^r - \sum_{k \neq j} N_j n_e Q_{j \rightarrow k} - \sum_{i < j} N_j A_{j \rightarrow i}^r$$

Population by  
excitation  $k \rightarrow j$

Population by  
radiation  $k \rightarrow j$

Depopulation by  
excitation  $k \rightarrow j$

Depopulation by  
radiation  $k \rightarrow j$

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = \sum_{k \neq i} N_k n_e Q_{k \rightarrow i} + \sum_{k > i} N_k A_{k \rightarrow i}^r - \sum_{k \neq i} N_i n_e Q_{i \rightarrow k} - \sum_{l < i} N_i A_{i \rightarrow l}^r$$

$$\frac{\partial N_l}{\partial t} = \dots$$

# Ecuaciones generales

- ▶ Las colisiones ión–ión se desprecian. Si  $T_e$  y  $T_i$  son del mismo orden, las velocidades de los iones serán mucho menores.
- ▶ Si bien no es necesario, suponemos distribución Maxwelliana. (en el Storage Ring, por ejemplo, existen dos temperaturas  $T_{\perp}$  y  $T_{\parallel}$ ).
- ▶ Las ecuaciones a resolver dependen no sólo de la población del nivel  $n_{r,j}$  considerado, sino también de todos los otros niveles del ión  $r$ , y de los iones  $r + 1$  y  $r - 1$ .
- ▶ Los procesos radiativos dependen de la intensidad de radiación, que es independiente de los parámetros del plasma en un punto determinado a considerar, pero es función de estos parámetros en todo el camino óptico hacia este punto.

# Ecuaciones generales

- ▶ Dado que la radiación puede variar en diferentes puntos del plasma, es posible tener diferentes sistemas de ecuaciones a resolver en distintas regiones del mismo.
- ▶ Las temperaturas y densidades electrónicas pueden variar en el tiempo.
- ▶ Los errores en los datos atómicos (los coeficientes) se propagan enormemente en los resultados de población.
- ▶ Las configuraciones pueden tener decenas o centenas de niveles. Esto implica resolver sistemas de miles de ecuaciones.
- ▶ Generalmente, aún conociendo los coeficientes, es necesario apelar a modelos para poder resolver estos problemas.

# Ecuaciones generales: Ejemplo

► **Configuración** :

$$1s^2 2p^2$$

► **Términos** :

$${}^3S, {}^1S$$

$${}^3P, {}^1P$$

$${}^3D, {}^1D$$

► **Niveles** :

$${}^3S_1, {}^1S_0$$

$${}^3P_{0,1,2}, {}^1P_1$$

$${}^3D_{1,2,3}, {}^1D_2$$

## Ni<sup>+</sup> (Ni Co-like)

$$[Ar]3d^7 4s^2: 19 \text{ niveles}$$

$$[Ar]3d^7 4s 4d: 326 \text{ niveles}$$