

Física del Plasma: Diagnósticos de Plasmas en Astrofísica y Fusión

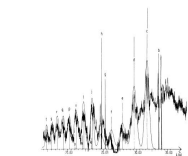
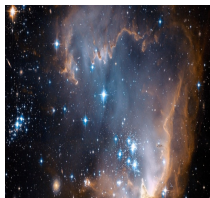
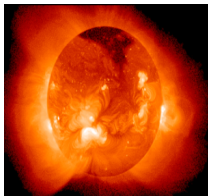


FIG. 1. Experimental spectrum of Fe in laser-produced plasma (this work), compared with theoretical data. The intensity of each array was adjusted to obtain the best fit. $1s^2 \rightarrow 1s^2 3p$ transitions: $4s-4p$ (1), $3d-4s$ (2), $3d-4p$ (3), $3d-4s$ (4), $3d-4p$ (5), $3d-4s$ (6), $3d-4p$ (7),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

6. Modelo Coronal

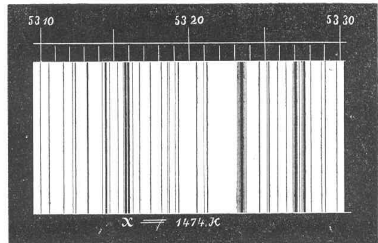
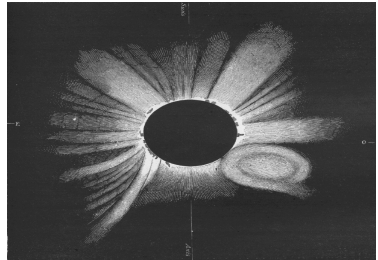
- ▶ Procesos relevantes
- ▶ Ecuación de ionización
- ▶ Abundancia Fraccional
- ▶ Ecuación de excitación
- ▶ Dominio de validez del modelo coronal

6. Modelo Coronal

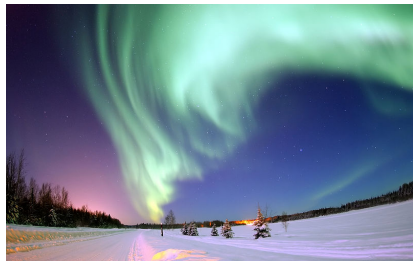
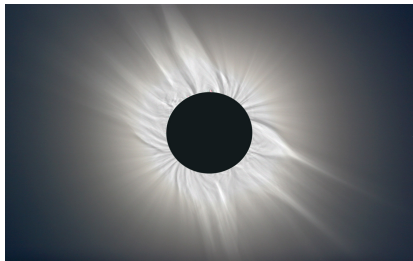
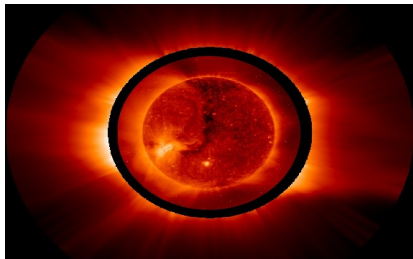
- ▶ Es uno de los modelos más simples y más importantes
- ▶ **Bajas densidades**
- ▶ **Altas temperaturas**
- ▶ **La radiación escapa libremente del plasma**
- ▶ Describe el plasma de la Corona Solar: $n_e \approx 10^8$ electron/cm³ y $kT_e \geq 100$ eV.

(En condiciones normales, un gas tiene densidad $n_e = 3 \times 10^{19}$ cm⁻³. La temperatura ambiente es $\frac{1}{40}$ eV).

Corona Solar



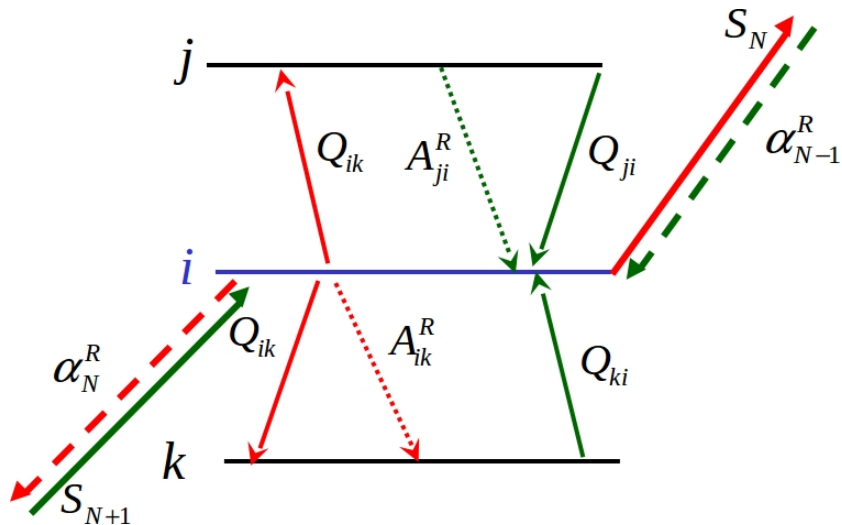
Corona Solar



Otras Consideraciones

- ▶ Se asume que la distribución de velocidades electrónicas es Maxwelliana.
- ▶ Esto permite calcular las tasas de reacciones.
- ▶ Se pueden distinguir dos casos:
 1. Estado Estacionario: $\frac{dn_{r,j}}{dt} = 0$ para todos los niveles.
 2. Régimen Transiente: $\frac{dn_{r,j}}{dt} \neq 0$. Si el plasma está aislado y no se lo perturba, tiende al estado estacionario.
- ▶ El plasma de la Corona Solar es estacionario.
- ▶ **Estacionario no quiere decir Equilibrio!**

Comparación de procesos paralelos



Comparación de procesos paralelos

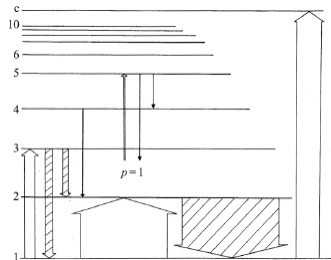
- ▶ De-Excitación colisional ($\propto n_e$) despreciable frente a transiciones radiativas.
- ▶ Recombinación colisional ($\propto n_e^2$) despreciable frente a Recombinación radiativa ($\propto n_e$).
- ▶ Si la n_e es suficientemente baja (o las dimensiones del plasma son suficientemente pequeñas) se desprecian las absorciones de fotones (*optically thin*).
- ▶ Fotoexcitación es despreciable respecto a excitación colisional
- ▶ Fotoionización es despreciable respecto a ionización colisional

Despoblamiento de niveles

- ▶ El mecanismo dominante es **Decaimiento Radiativo**.
- ▶ Pero estos decaimientos suceden antes que otros procesos puedan tener una probabilidad significativa de ocurrir.
- ▶ **Sólo el estado fundamental está poblado**.
- ▶ La ionización y excitaciones son esencialmente producidas por el estado fundamental.

Poblamiento de niveles

- ▶ El mecanismo dominante es **Excitación colisional desde el estado fundamental** .
- ▶ Las contribuciones colisionales desde otros estados es despreciable, ya que estos no están poblados



Estado Estacionario

- ▶ Para estados excitados: $\frac{dn_{r,j}}{dt} = 0$
- ▶ Población: $n_e n_{r,f} Q_{fj}$
- ▶ Des-Población: $n_{r,f} \sum_i A_{ji}$

$$\frac{n_{r,j}}{n_{r,f}} = \frac{n_e Q_{fj}}{\sum_i A_{ji}}$$

Coronal vs. LTE

$$\frac{n_{r,j}}{n_{r,f}} = \frac{n_e Q_{fj}}{\sum_i A_{ji}}$$

- ▶ Las poblaciones relativas dependen de T_e pero también de n_e .
- ▶ Requiere conocimiento de las cantidades atómicas σ_{fj} y A_{ji} .
- ▶ A la misma temperatura T_e

$$\left(\frac{n_{r,j}}{n_{r,f}} \right)_{cor} < \left(\frac{n_{r,j}}{n_{r,f}} \right)_{LTE}$$

Ecuación de Ionización

- ▶ Da la distribución relativa de las poblaciones de todos los iones, en distintos grados de ionización.
- ▶ En modelo coronal, la densidad total de los iones con carga r es aproximadamente $n_{r,f}$ (la del estado fundamental).
- ▶ La condición de estado estacionario es entonces:

$$\frac{dn_{r,f}}{dt} = 0$$

- ▶ Notación: $n_r \approx n_{r,f}$

$$S_r \equiv S_{r,f \rightarrow r+1, f'}$$

$$\alpha_r \equiv \sum_i \alpha_{r,f \rightarrow r-1, i}$$

Ecuación de Ionización

- ▶ Ecuación de Ionización: $\frac{dn_{r,f}}{dt} = 0$
- ▶ Población:
 1. Ionización desde $r - 1$: $n_{r-1} S_{r-1}$
 2. Recombinación desde $r + 1$: $n_{r+1} \alpha_{r+1}$
- ▶ Des-Población:
 1. Ionización hacia $r + 1$: $n_r S_r$
 2. Recombinación hacia $r - 1$: $n_r \alpha_r$

$$n_{r-1} S_{r-1} + n_{r+1} \alpha_{r+1} - n_r S_r - n_r \alpha_r = 0$$

Ecuación de Ionización

Ecuación general para ión de grado de ionización r :

$$n_{r-1} S_{r-1} + n_{r+1} \alpha_{r+1} - n_r S_r - n_r \alpha_r = 0$$

Para el átomo neutral ($r = 0$):

$$n_1 \alpha_1 - n_0 S_0 = 0$$

Por lo que se puede escribir

$$n_0 S_0 = n_1 \alpha_1$$

Ecuación de Ionización

Ecuación general para ión de grado de ionización r :

$$n_{r-1} S_{r-1} + n_{r+1} \alpha_{r+1} - n_r S_r - n_r \alpha_r = 0$$

Para el ión ionizado una vez ($r = 1$):

$$n_0 S_0 + n_2 \alpha_2 - n_1 S_1 - n_1 \alpha_1 = 0$$

Pero, teniendo en cuenta que $n_0 S_0 = n_1 \alpha_1$

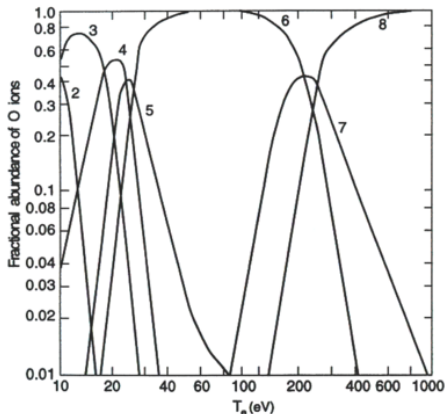
$$n_2 \alpha_2 - n_1 S_1 = 0$$

Por recurrencia se obtiene:

$$\frac{n_{r+1}}{n_r} = \frac{S_r(T_e)}{\alpha_{r+1}(T_e)}$$

Abundancia Fraccional

$$\frac{n_{r+1}}{n_r} = \frac{S_r(T_e)}{\alpha_{r+1}(T_e)}$$

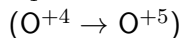


Abundancia Fraccional

► n_5 :

$$T_e^{\max} = 25 \text{ eV}$$

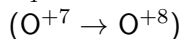
$$E_I = 113.9 \text{ eV}$$



► n_8 :

Ionizado en un 90% a 400 eV

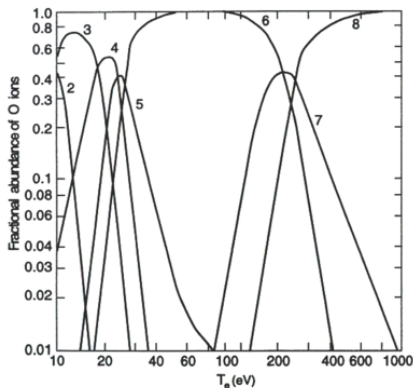
$$E_I = 871 \text{ eV}$$



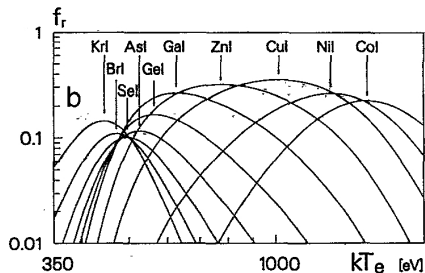
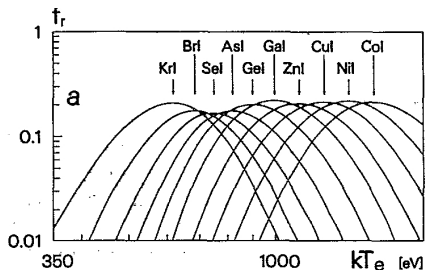
► n_6 :

Isoelectrónico al He

Capa cerrada

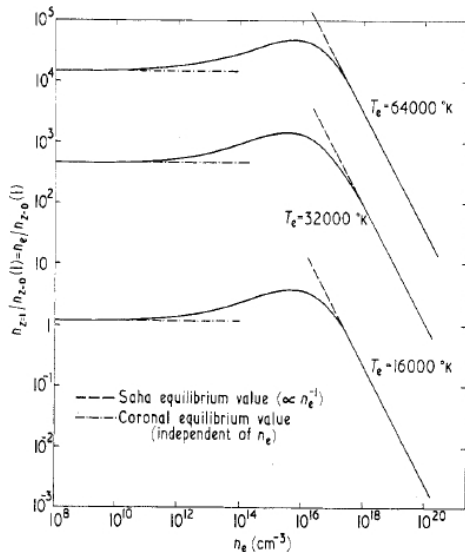


Efecto de Excitación–Autoionización



Modelo Coronal vs. LTE

- ▶ Coronal: $\frac{n_{r+1}}{n_r}$ es función de T_e únicamente
- ▶ LTE: $\frac{n_{r+1}}{n_r}$ depende de T_e y n_e (Saha)
- ▶ $\frac{n_{r+1}}{n_r}$ en LTE es mucho mayor que en Coronal. En el balance entre ionización y recombinación colisional, se agrega recombinación radiativa.
- ▶ Requiere conocimiento de datos atómicos.



Régimen Transiente

Si el tiempo de confinamiento del plasma es menor al de Estabilización, entonces las densidades de población varían en el tiempo. Dentro del modelo coronal, tenemos

$$\begin{aligned}
 \frac{dn_0}{dt} &= n_e(n_1\alpha_1 - n_0S_0) \\
 \frac{dn_1}{dt} &= n_e(n_2\alpha_2 + n_0S_0 - n_1S_1 - n_1\alpha_1) \\
 \dots &= \dots \\
 \frac{dn_r}{dt} &= n_e(n_{r+1}\alpha_{r+1} + n_{r-1}S_{r-1} - n_rS_r - n_r\alpha_r) \\
 \dots &= \dots \\
 \frac{dn_s}{dt} &= n_e(n_{s-1}S_{s-1} - n_s\alpha_s)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Tiempo de Estabilización

- ▶ Cuando el plasma llega al último estado de ionización s , sólo son relevantes los últimos iones, de modo que $n_s + n_{s-1} = n$

$$\frac{dn_s}{dt} = n_e(n_{s-1}S_{s-1} - n_s\alpha_s)$$

- ▶ La solución de esta ecuación es

$$n_s = \frac{n S_{s-1}}{S_{s-1} + \alpha_s} [1 - \exp(-n_e(S_{s-1} + \alpha_s)t)]$$

- ▶ Esto define un tiempo característico

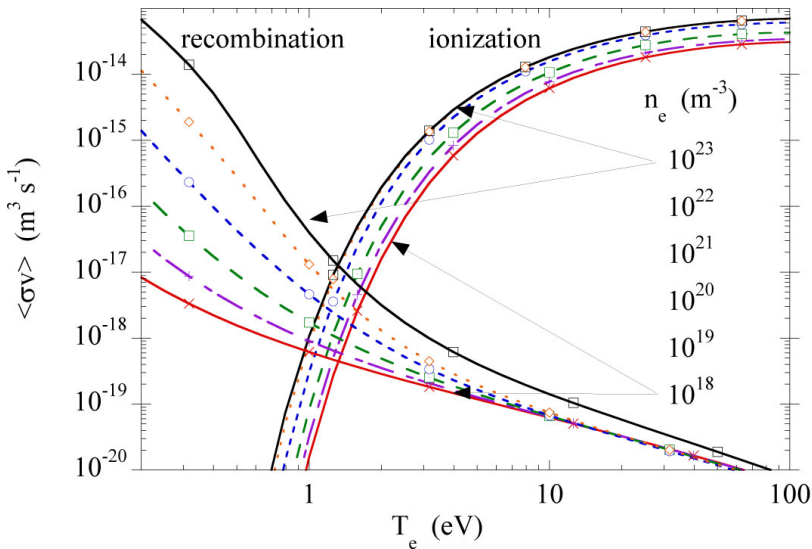
$$\tau_{s-1} = \frac{1}{n_e(S_{s-1} + \alpha_s)}$$

- ▶ Durante el tiempo de calentamiento, α_{r+1} es despreciable frente a S_r , por lo que

$$\tau_r = \frac{1}{n_e S_r}$$

$$\tau[\text{sec}] \approx \frac{10^{12}}{n_e[\text{cm}^3]} \quad (\text{Práctica})$$

Plasmas Ionizantes o Recombinantes



Ecuación de Excitación

Ecuación general para las densidades de población de los niveles de un ión de grado de ionización r

- ▶ El tiempo de vida de un nivel j está dado por

$$\tau_{r,j} = \frac{1}{\sum_i A_{ji}}$$

- ▶ Este tiempo es, en general $\tau_{r,j} \approx 10^{-8}$ s
- ▶ En general, también se da que $\sum_i A_{ji} \gg n_e S_r$
- ▶ Eso implica que se puede considerar como único estado poblado al estado fundamental

$$\frac{n_{r,j}}{n_{r,f}} = \frac{n_e Q_{fj}(T_e)}{\sum_i A_{ji}}$$

Dominio de Validez (Ionización)

- ▶ El tiempo de relajación de colisiones debe ser suficientemente corto como para que se cumpla Maxwell.
- ▶ Los procesos de recombinación colisionales deben despreciarse respecto a los radiativos. Esto implica que $n_e \ll \frac{\alpha_{r+1}(T_e)}{\beta_{r+1}(T_e)}$
- ▶ La ionización se debe producir por colisiones desde el estado fundamental (y no por pasos desde niveles superiores). Las transiciones hacia niveles inferiores deben dominar a las transiciones hacia niveles superiores.
- ▶ A medida que vamos subiendo de nivel j , A_{ji} decrece, y tanto S_j como $Q_{j,k>j}$ aumentan. Por lo tanto existe un nivel crítico.
- ▶ Wilson define un criterio de validez:

$$n_e \leq 1.5 \times 10^{10} (\chi_r)^{-1/2} (kT_e)^4$$

Dominio de Validez (Excitación)

- ▶ Las radiaciones espontáneas deben ser dominantes respecto a los colisionales.
- ▶ Esto implica que $n_e \ll \frac{\sum_i A_{ji}}{\sum_k Q_{jk}(T_e)}$
- ▶ Esta condición es mas severa que el criterio de Wilson.
- ▶ Aún en condiciones coronales, siempre existirá un nivel en el cual esta condición no se cumpla, ya que A decrece mientras Q aumenta.

Dominio de Validez (otras consideraciones)

- ▶ En la hipótesis coronal, la población de los estados excitados por recombinación.
- ▶ También es despreciable la población de los niveles por cascadas de radiaciones desde niveles superiores.
- ▶ Esto no ocurre para plasma en fase de recombinación (enfriamiento).
- ▶ Otros casos a tener en cuenta es el de niveles metaestables. Sobre todo hay que tener en cuenta que incluir data errónea, muchas veces es preferible a no incluir nada (Práctica).