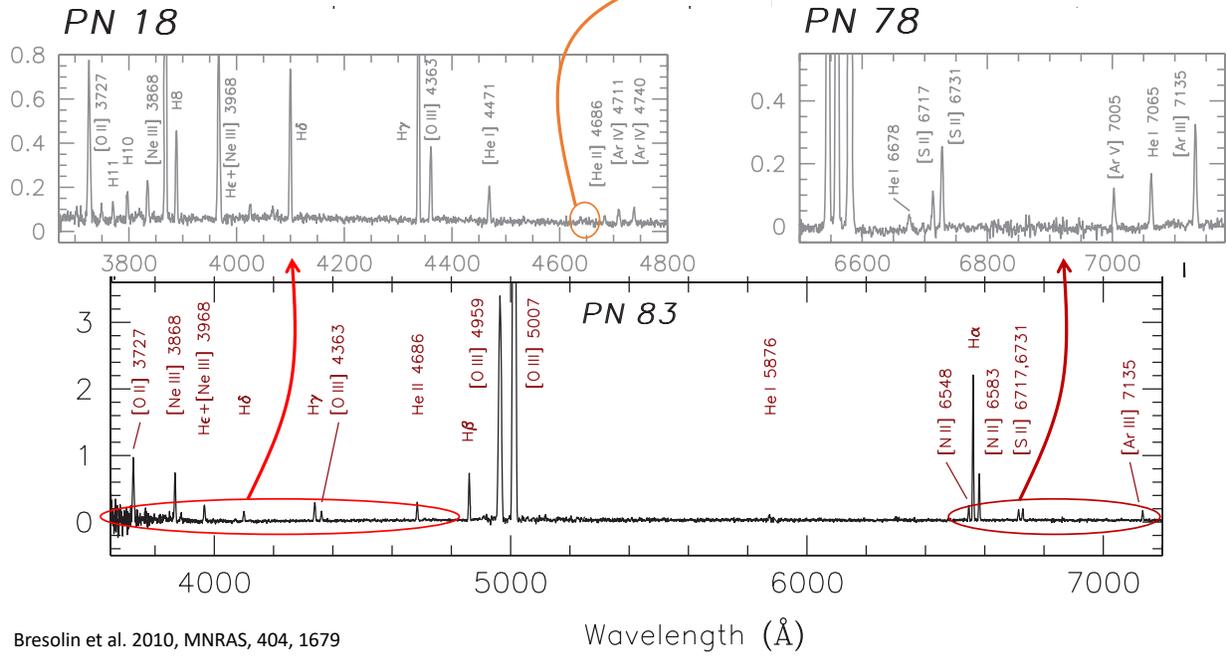
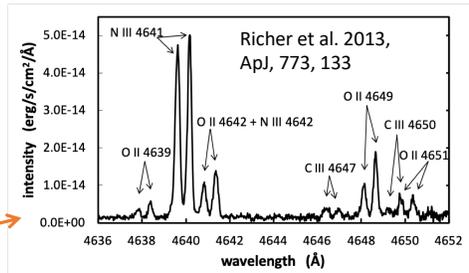


El análisis de espectros nebulares

El espectro de las nebulosas

- Las nebulosas son plasmas difusas, pero calientes.
- Según las leyes de Kirchoff, deben emitir un espectro de líneas de emisión.
- Cada línea de emisión es el resultado de una transición en algún átomo o ion.
- Cuando vemos las líneas de emisión, sabemos que un estado excitado fue ocupado por un electrón. No necesariamente conoceremos el proceso que llevó el electrón a ese estado excitado.
- Es muy común suponer que
 - transiciones permitidas son excitadas por recombinación.
 - transiciones prohibidas son excitadas por colisiones.
- Frecuentemente, la realidad es más complicada y una transición puede ser excitada por varios procesos físicos.
 - Por ejemplo, la recombinación también puede excitar transiciones prohibidas.

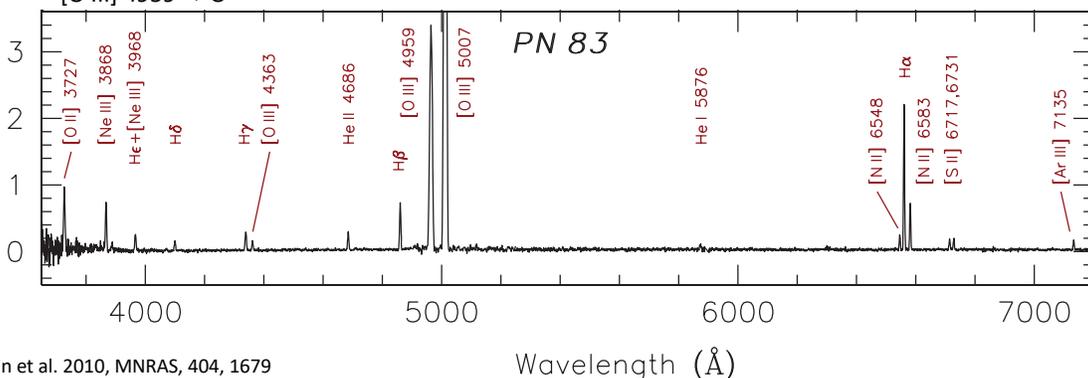
El espectro de una nebulosa planetaria



Bresolin et al. 2010, MNRAS, 404, 1679

Interpretando las etiquetas

- He I 5876: el espectro de He neutro, transición permitida a 5876Å
 - He II 4686: el espectro de He ionizado, transición permitida a 4686Å
 - [O III] 4959: el espectro de O dos veces ionizado, transición prohibida a 4959Å
 - H: equivalente a H I
 - He + [Ne III] 3968: las dos líneas son imposibles de distinguir por separado
 - Si una transición resulta de recombinación o intercambio de carga, se deberá a un ion de un estado de ionización mayor, e.g., He I \Rightarrow He⁺
 - Si una transición resulta de excitación colisional o fluorescencia, se deberá al mismo ion, e.g., [O III] 4959 \Rightarrow O²⁺
- } Indica el espectro y transición, pero no el proceso físico.



Bresolin et al. 2010, MNRAS, 404, 1679

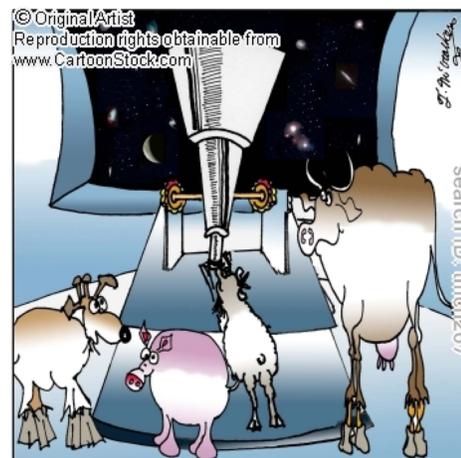
¿Qué queremos aprender del espectro?

- Usualmente nos interesarán:
 - las condiciones físicas del plasma (la temperatura y la densidad electrónica)
 - la composición química del plasma
 - la cinemática del plasma (expansión, turbulencia, etc.)
- Para determinar lo anterior, habrá que tomar en cuenta el efecto de lo siguiente sobre el espectro del objeto
 - el medio interestelar entre el objeto y la Tierra (extinción y enrojecimiento)
 - la atmósfera terrestre (extinción, contaminación por líneas de absorción y emisión)
 - el instrumento utilizado para la observación (deformará la información de diversas maneras)
- Los dos últimos puntos son parte del proceso de la “**reducción**” de los datos. (Obtener la señal que llegó a la Tierra.)
- Los puntos anteriores son parte del proceso del “**análisis**” de los datos. (Entender el objeto y el medio en que está.)

Las etapas de un proyecto

- Un proyecto típico pasa por las siguientes etapas
 - planteamiento correcto del problema
 - estudio de factibilidad
 - adquisición de los datos
 - reducción de los datos
 - análisis de los datos
 - publicación de los resultados
- El desarrollo de cada fase puede facilitar o limitar el desarrollo de las etapas subsecuentes.

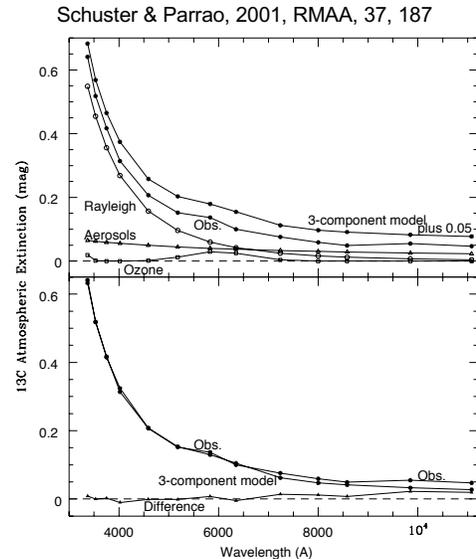
Saltaremos estas etapas por utilizar datos existentes.



"I wonder if there's life as we know it on other planets."

La atmósfera terrestre

- absorbe luz
- emite luz
- extingue la luz
- refracta la luz (primera parte; segunda con “óptica adaptativa”)
- refleja luz
- Lo que más afecta a la reducción de datos es el efecto de la extinción.
 - En el visible, la extinción se debe principalmente a la dispersión Rayleigh debido a las moléculas de O_2 y N_2 .
- Para el análisis, tendremos que preocuparnos por la absorción, lo cual afectará ciertas líneas en el rojo de 6000\AA .



El medio interestelar

- El gas interestelar tiene un alto contenido de polvo.
- Este polvo extingue la luz, con un efecto más pronunciado para la luz azul que la luz roja.
- Como consecuencia del paso de la luz por el medio interestelar, cambia la distribución de energía en el espectro que observamos en la Tierra.
- La mayor parte de la extinción se debe a la dispersión de la luz, pero el polvo también absorbe la luz.

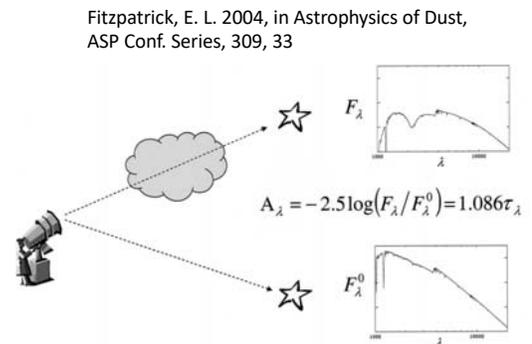


Figure 1. A schematic illustration of the “Pair Method,” the principal technique used to study Milky Way extinction.

El medio interestelar

- La mayor extinción de la luz azul produce un enrojecimiento del espectro, porque se pierde más luz azul.
- La extinción se caracteriza por una "ley" de extinción.
- Su forma en el visible es razonablemente constante, pero su normalización cambia según la línea de vista al objeto.
- La extinción (y enrojecimiento) depende de donde está el objeto, que tan lejano está.

The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, A. G. G. M. Tielens (Cambridge U. Press)

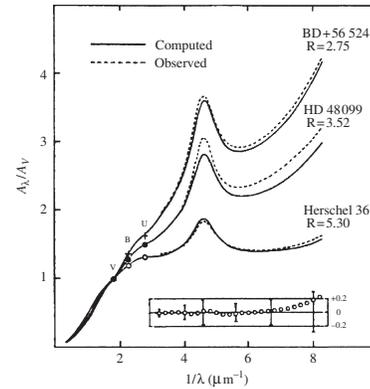


Figure 5.7 Three observed extinction curves are shown as a function of λ^{-1} . These curves show the range in wavelength behavior of the extinction laws in the interstellar medium. The solid lines show, for comparison, the computed parameterized extinction. The insert shows the deviations. Figure courtesy of J. S. Mathis; reprinted with permission from *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **28**, p. 37. ©1990 by *Ann. Rev.* (www.annualreviews.org).

El medio interestelar

- Podemos determinar el enrojecimiento comparando la emisión de H en dos longitudes de onda distintas.

$$\log \left(\frac{F(H\beta)}{F(H\alpha)} \right) = -X \log \left(\frac{I(H\beta)}{I(H\alpha)} \right)$$

donde $F(\lambda)$ e $I(\lambda)$ son las señales observada y conocida (teoría) y

$$X = 0.4E(B - V)(A_1(H\beta) - A_1(H\alpha))$$

con $E(B - V)$ siendo el enrojecimiento (normalización) y $A_1(\lambda)$ la ley de extinción (forma constante).

- La teoría permite calcular el cociente de las líneas de H para distintas temperaturas y densidades.
- Lo más común es utilizar las líneas de H α y H β para calcular el enrojecimiento, porque son las líneas más intensas de H I.

The Physics and Chemistry of the Interstellar Medium, A. G. G. M. Tielens (Cambridge U. Press)

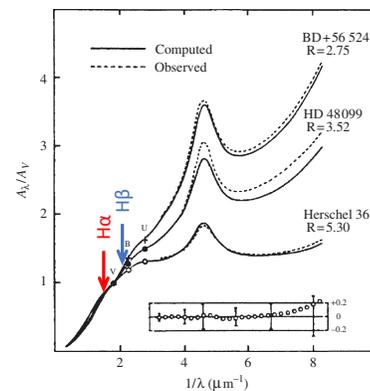


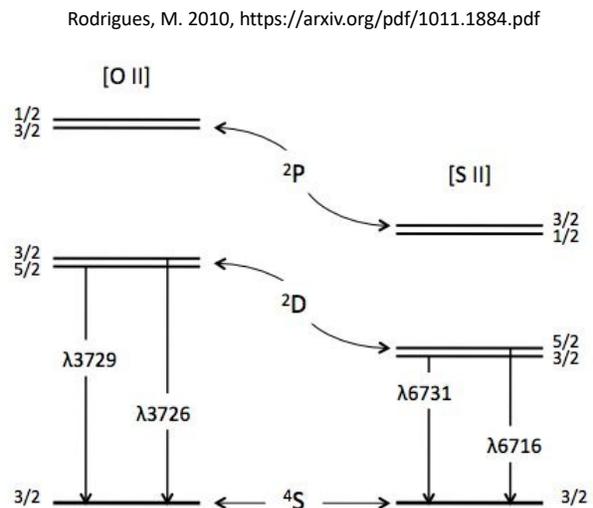
Figure 5.7 Three observed extinction curves are shown as a function of λ^{-1} . These curves show the range in wavelength behavior of the extinction laws in the interstellar medium. The solid lines show, for comparison, the computed parameterized extinction. The insert shows the deviations. Figure courtesy of J. S. Mathis; reprinted with permission from *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **28**, p. 37. ©1990 by *Ann. Rev.* (www.annualreviews.org).

Análisis: Física atómica aplicada

- El método para determinar el enrojecimiento es típico del análisis que hacemos del espectro.
- Usamos los resultados de la física atómica (mecánica cuántica) para interpretar la información contenida en el espectro del objeto.
- Comparamos un resultado teórico (cociente de intensidad de dos líneas) con un resultado observado para determinar el enrojecimiento.
- Para el enrojecimiento, usamos un cálculo de las intensidades relativas de las líneas de H.
 - En principio, podríamos usar otros cocientes bien separadas en longitud de onda (queremos comparar luz azul y roja) para cualquier ion/elemento.
 - Las ventajas de las líneas de H I son que están entre las más brillantes (simplifica la observación) y el átomo de H es el más sencillo (simplifica el cálculo teórico).
- Para determinar la temperatura y densidad del plasma, usaremos otros cocientes de líneas, aprovechando la física atómica.

La densidad electrónica del plasma

- Para determinar la densidad, utilizamos dos transiciones cercanas en longitud de onda y con energías de excitación similar.
- Así, los resultados son insensibles a la temperatura y el enrojecimiento.
- Los cocientes comúnmente utilizados son
 - [O II] $\lambda\lambda 3726, 3729$
 - [S II] $\lambda\lambda 6716, 6731$
 - [Cl III] $\lambda\lambda 5517, 5537$
 - [Ar IV] $\lambda\lambda 4711, 4740$



La densidad electrónica del plasma

- El cociente de intensidades intrínsecas depende de los coeficientes de desexcitación espontánea (los coeficientes A de Einstein).
- La transición que tarda más en desexcitarse sufre más desexcitación colisional, lo cual no produce emisión.
- Así, la intensidad observada refleja la densidad de los electrones en el plasma que emite las transiciones.
- Usando transiciones de varios iones, se puede medir la densidad en distintas partes del plasma.

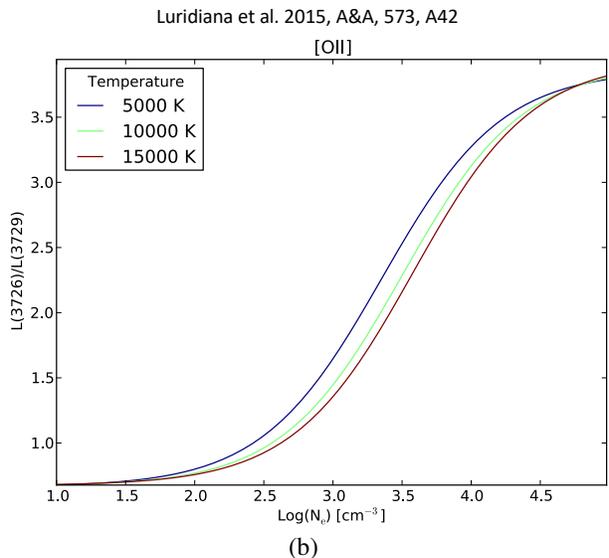
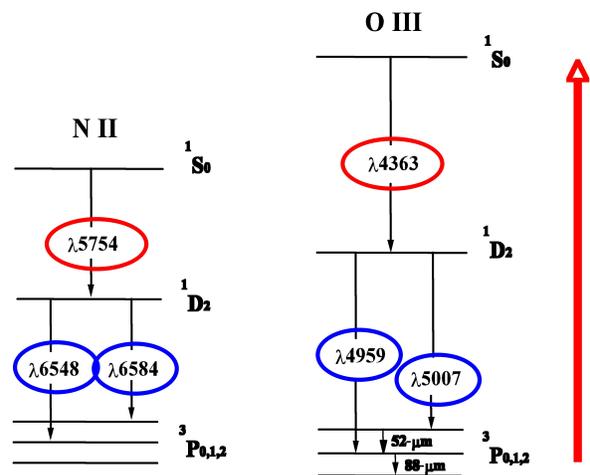


Fig. 10. Right: density diagnostic plot of the [O III] $\lambda 3726/\lambda 3729$ intensity ratio as a function of electron density and temperature, obtained with the PyNeb command plotLineRatio.

La temperatura electrónica del plasma

- Para determinar la temperatura del plasma, hay que comparar la intensidad de líneas cuya energía de excitación es muy distinta.
- Usualmente, tendrán longitudes de onda muy distintas, lo cual los hace sensible al enrojecimiento.
- Las transiciones más comúnmente utilizadas son:
 - [O III] $\lambda\lambda 4363/4959+5007$
 - [N II] $\lambda\lambda 5755/6548+6584$
 - [S III] $\lambda\lambda 6312/9069+9531$
 - [Ar III] $\lambda\lambda 5192/7135+7531$



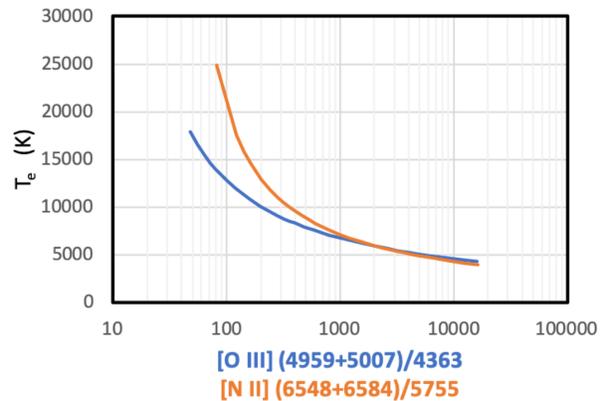
La temperatura electrónica del plasma

- El cociente de líneas depende de las fracciones de los electrones con las energías capaces de excitar las transiciones.
- Así, se mide la distribución de energías Maxwell-Boltzmann en dos energías, lo cual permite inferir la temperatura del plasma.

$$f(v) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \left(\frac{1}{kT_e}\right)^{3/2} v^2 e^{-mv^2/kT_e}$$

$$f(E) = \sqrt{\frac{E}{\pi}} \left(\frac{m}{kT_e}\right)^{3/2} e^{-E/kT_e}$$

- El cociente de intensidades cubre un rango muy grande (> 2 órdenes de magnitud), lo cual implica que es difícil medir la temperatura en plasmas fríos ($< 10,000$ K) porque la intensidad de la línea de mayor excitación es débil.



Se presenta la temperatura en función del cociente [O III] 4959+5007/4363 y [N II] 6548+6584/5755 basado en los datos de PyNeb.

Densidades y temperaturas de líneas permitidas.

- En lo anterior, solamente se han presentado métodos de determinar la temperatura y densidad basados en líneas prohibidas.
 - Han sido los más utilizados porque son líneas brillantes.
- Se puede también utilizar líneas permitidas:
 - H I: densidad (alto n) y temperatura (saltos de Balmer/Paschen)
 - He I: temperatura y densidad
 - O II y N II: temperatura y densidad
- Se requieren mediciones más precisas porque estas líneas son típicamente más débiles, sobretodo para los elementos pesados.
- Conviene tener múltiples indicadores de temperatura y densidad para medir estos parámetros en distintos volúmenes del plasma así como para confirmar mutuamente los resultados.

Abundancias químicas

- Ya hemos visto gran parte de lo que se requiere para calcular abundancias químicas.

- **Ojo: Aquí debemos suponer un proceso de excitación para las líneas.**

- Si se trata de una línea de recombinación del ion X , la intensidad será

$$I(\lambda) = N_e N_X \alpha(X(\lambda), T_e) E_\lambda \times V_{neb}$$

donde N_e y N_X son las densidades de electrones e iones, $\alpha(X(\lambda), T_e)$ es el coeficiente de recombinación, E_λ es la energía del fotón emitido y V_{neb} es el volumen de la nebulosa.

- Así, la intensidad relativa de dos transiciones de dos iones es

$$\frac{I(X_1, \lambda_1)}{I(X_2, \lambda_2)} = \frac{N_e N_{X_1} \alpha(X_1(\lambda_1), T_e) E_{\lambda_1} \times V_{neb}}{N_e N_{X_2} \alpha(X_2(\lambda_2), T_e) E_{\lambda_2} \times V_{neb}} = \frac{N_{X_1} \alpha(X_1(\lambda_1), T_e) E_{\lambda_1}}{N_{X_2} \alpha(X_2(\lambda_2), T_e) E_{\lambda_2}}$$

así que la abundancia relativa de las especies X_1 y X_2 es

$$\frac{N_{X_1}}{N_{X_2}} = \frac{I(X_1, \lambda_1) \alpha(X_2(\lambda_2), T_e) E_{\lambda_2}}{I(X_2, \lambda_2) \alpha(X_1(\lambda_1), T_e) E_{\lambda_1}},$$

donde las intensidades de líneas son observadas y los coeficientes de recombinación vienen de cálculos teóricos.

Abundancias químicas

- Si se trata de líneas excitadas por colisiones con electrones del ion X ,

$$I(\lambda) = N_e N_X q_{X,\lambda} E_\lambda V_{neb} = N_e N_X E_\lambda V_{neb} \sqrt{\frac{2\pi}{kT_e} \frac{\hbar^2}{m_e^{3/2}} \frac{\Omega(X, \lambda)}{\omega_{X,b}}} e^{-E_\lambda/kT_e}$$

donde $\Omega(X, \lambda)$ es la fuerza de colisión para excitar la transición, $\omega_{X,b}$ el peso estadístico del estado base (un valor constante) y los demás símbolos tienen sus significativos usuales o recién indicados.

- En este caso, el cociente de una línea excitada colisionalmente con respecto a una de recombinación es

$$\frac{I(X_1, \lambda_1)}{I(X_2, \lambda_2)} = \frac{N_{X_1} E_{\lambda_1} \sqrt{\frac{2\pi}{kT_e} \frac{\hbar^2}{m_e^{3/2}} \frac{\Omega(X, \lambda_1)}{\omega_{X,b}}} e^{-E_{\lambda_1}/kT_e}}{N_{X_2} \alpha(X_2(\lambda_2), T_e) E_{\lambda_2}}$$

que podemos invertir para obtener la abundancia relativa

$$\frac{N_{X_1}}{N_{X_2}} = \frac{I(X_1, \lambda_1) \alpha(X_2(\lambda_2), T_e) E_{\lambda_2}}{I(X_2, \lambda_2) \sqrt{\frac{2\pi}{kT_e} \frac{\hbar^2}{m_e^{3/2}} \frac{\Omega(X, \lambda_1)}{\omega_{X,b}}} e^{-E_{\lambda_1}/kT_e} E_{\lambda_1}}.$$

Abundancias químicas

- En lo anterior, se supone
 - el mismo V_{neb} para todo.
 - La justificación es que se calcularán abundancias relativas. Usualmente, todas las abundancias serán relativas al H y no es factible deducir directamente la fracción de la emisión de H asociada a la emisión de otro ion.
 - Esto es equivalente a suponer que existe solamente una componente de plasma en la nebulosa, lo cual no es necesariamente cierto. En caso de múltiples componentes, conviene restringir las abundancias a iones presentes en la misma componente de plasma...
 - la misma N_e para todo.
 - Esto es más arriesgado, aun para abundancias relativas, porque un ion puede estar presente en un volumen de la nebulosa donde la densidad no es típica. Si resultara problemático, se puede conservar las densidades electrónicas para cada ion.
 - que se conoce la temperatura adecuada para cada ion.
 - Frecuentemente, esto será una aproximación. Para líneas de recombinación, afectará poco, pero podría ser importante para líneas excitadas por colisiones. Afortunadamente, la temperatura aparece explícitamente donde se requiere.

Abundancias químicas

- Las abundancias basadas en líneas de recombinación y las excitadas por colisiones tienen dependencias muy distintas de la temperatura.
 - $\alpha(X(\lambda), T_e) \propto T_e^{-\alpha}$ con $\alpha \sim 0.5 - 1.2$ para la mayoría de las transiciones.
 - Por lo tanto, abundancias derivadas de cocientes de líneas de recombinación tienen una dependencia débil sobre la temperatura utilizada, lo cual les hace menos inciertas.
 - Si se involucra una línea excitada por colisiones, su intensidad depende de la temperatura como $e^{-E_\lambda/kT_e}/\sqrt{T_e}$. (Las fuerzas de colisión, $\Omega(X, \lambda)$, no dependen fuertemente de la temperatura.)
 - Un cociente con otra línea colisional elimina la dependencia con $\sqrt{T_e}$, pero deja una dependencia exponencial.
 - Un cociente con una línea de recombinación acentúa la dependencia complicada sobre la temperatura, $e^{-E_\lambda/kT_e}T_e^{-0.5-\alpha}$.

Abundancias químicas

- La suposición de un proceso de excitación de las líneas de emisión utilizadas es una limitación fundamental.
 - Líneas excitadas por fluorescencia son casi inútiles para determinar abundancias, porque la fluorescencia depende sensiblemente de los detalles (el proceso particular, la geometría, etc.).
 - Necesariamente, todas las líneas prohibidas serán excitada por recombinación, además de por colisiones. La pregunta es cual fracción de la emisión se debe a recombinación. Si es pequeña (frecuentemente lo es), se puede despreciar...
- Lo anterior también afecta a las temperaturas y densidades derivadas de las líneas prohibidas.
 - Estrictamente, las densidades serán correctas, pero pueda que la recombinación y la excitación colisional sucedan en plasmas distintos. En ese caso, ¿qué refleja la densidad?
 - Las temperaturas son más susceptibles a perturbaciones fuertes.
- No siempre será factible investigar lo anterior, porque requiere espectros muy profundos y sobre un gran intervalo espectral.