

# Proyecto de investigación: La discrepancia de abundancias

## **Objetivo específico:**

¿Son las distribuciones espaciales de la emisión en la línea de [O III] y las líneas de C II, N II y O II compatibles con su origen en una sola componente de plasma que es químicamente homogénea?

## Contexto: La discrepancia de abundancias

- Wyse (1942, ApJ, 95, 356) fue el primero quien determinó abundancias de O<sup>++</sup> a partir de las líneas de O II, encontrando un valor mucho mayor al encontrado de las líneas de [O III].
- A lo largo de las décadas que siguen, el resultado se repite, casi sin excepción.
- Desde la década de los 1990, se reconoce que hay una diferencia sistemática entre las abundancias calculadas de las líneas O II y [O III], con la primera siendo la mayor.
- Esta diferencia se conoce como la “discrepancia de abundancias”. Hoy en día es conocida para C, N, O y Ne.
- Típicamente, las líneas de O II indican una abundancia 2 – 3 veces mayor a la indicada por las líneas de [O III], pero en ~20% de las nebulosas planetarias la diferencia es > 5 y el record (A46) ¡rebasa un factor de 100!
- El factor de diferencia entre las abundancias calculadas con ambas clases de línea se conoce como el “factor de discrepancia de abundancias” (ADF por sus siglas en inglés).
- La discrepancia de abundancias se conoce también en regiones H II, donde casi siempre el factor de discrepancia es de 2 – 3.
- Referencias generales del tema:
  - Peimbert & Peimbert 2006, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2006IAUS..234..227P>
  - Bohigas 2009, [http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAA..45-1/PDF/RMxAA..45-1\\_jbohigas.pdf](http://www.astroscu.unam.mx/rmaa/RMxAA..45-1/PDF/RMxAA..45-1_jbohigas.pdf)
  - Liu 2010, <https://arxiv.org/pdf/1001.3715.pdf>

# Contexto: Tendencias

- Desde los años 1980-1990, se reconoce que la emisión en las líneas permitidas es menos extendida espacialmente que la emisión en las líneas prohibidas.
  - Barker 1982, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1982ApJ...253..167B>
  - Barker 1991, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1991ApJ...371..217B>
  - Garnett & Dinerstein 2001, <https://iopscience.iop.org/article/10.1086/322452/pdf>
  - Tsamis et al. 2008, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2008MNRAS.386...22T>
  - García Rojas et al. 2016, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8205/824/2/L27/pdf>

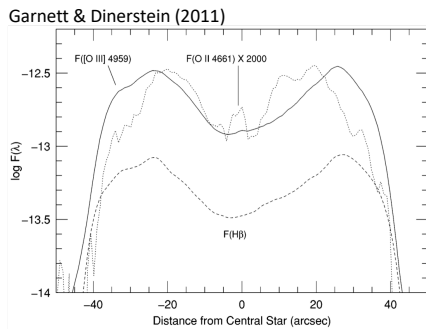


FIG. 5.—The [O III] ( $\lambda\lambda 4959 + 5007$ ) intensity profile along the slit (solid line) compared with O II  $\lambda 4661$  (dotted line) and H $\beta$  (dashed line) in NGC 6720. Note that the O II emission peaks interior to [O III] and H $\beta$ .

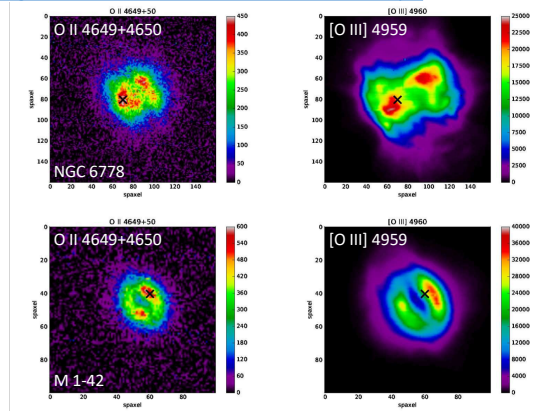
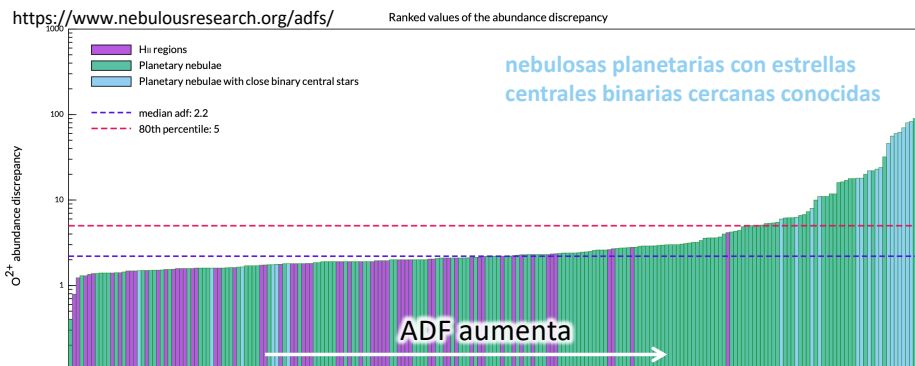


Figure 2. Preliminary maps of the O II  $\lambda\lambda 4649 + 50$  ORL (left panels) and [O III]  $\lambda 4959$  CEL emissions from two PNe of our sample: NGC 6778 (ADF $\sim 20$ , top panels), and M 1-42 (ADF $\sim 20$ , bottom panels). It is worth re-emphasising that the O II and [O III] emissions come from the same ion: O $^{2+}$ . The “x” marks a reference spaxel. García Rojas et al. (2016)

# Contexto: Tendencias

- Desde la década de los 2000, se reconoce que el ADF para los elementos C, N, O y Ne es similar.
  - Esto es una de las restricciones más importantes sobre el enriquecimiento que puede dar origen al ADF.
  - Liu et al. 2000, <https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/2000MNRAS.312..585L>
- Recientemente, se ha notado una correlación entre la binariedad de las estrellas centrales y un ADF alto.
  - Jones & Boffin 2017, <https://www.nature.com/articles/s41550-017-0117>
  - Wesson et al. 2018, <https://academic.oup.com/mnras/article/480/4/4589/5055627>
  - Lo anterior es cualitativa. Más recientemente, Bautista & Ahmed (2018) ofrecieron una explicación cuantitativa de ADFs altos cuando no hay equilibrio de ionización a raíz de la variación temporal de la radiación ionizante debido a eclipses entre estrellas binarias cercanas. Bautista & Ahmed 2018, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aad95a/pdf>



# Contexto: Tendencias

- Se acumula evidencia de que la cinemática de las líneas permitidas no es la esperada.

- Richer et al. 2013, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0004-637X/773/2/133/pdf>
- Richer et al. 2017, <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-3881/aa5f53/pdf>
- Peña et al. 2017, <https://academic.oup.com/mnras/article/472/1/1182/4110288>

- La cinemática debería reflejar la estructura espacial de los objetos porque existe una relación estrecha entre la estructura de ionización y la estructura espacial.

Wilson 1950,  
<https://articles.adsabs.harvard.edu/pdf/1950ApJ...111..279W>

- El plasma interno no puede correr sobre el plasma más externo. (El plasma se comporta como líquido.)

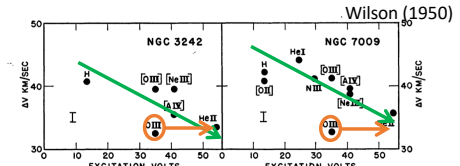
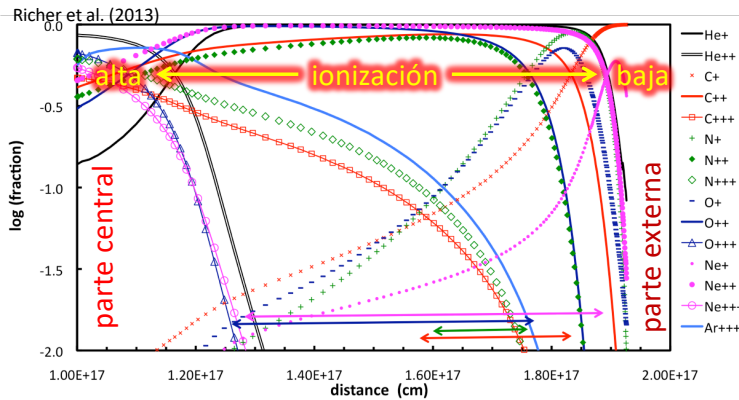


FIG. 3.—Separations of components of nebular lines as a function of excitation for NGC 3242 and NGC 7009. In this and the next three figures the short vertical lines indicate the mean mean deviation

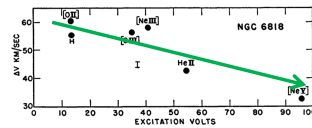


FIG. 4.—Separations of components of nebular lines as a function of excitation for NGC 6818

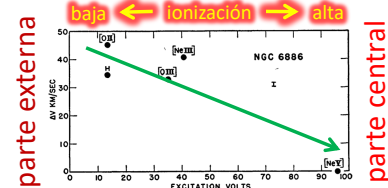
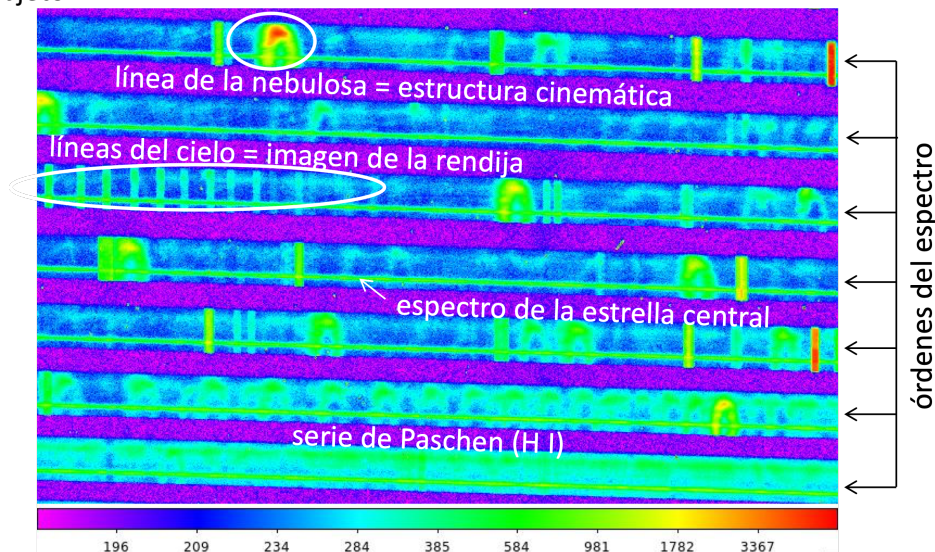


FIG. 5.—Separations of components of nebular lines as a function of excitation for NGC 6886

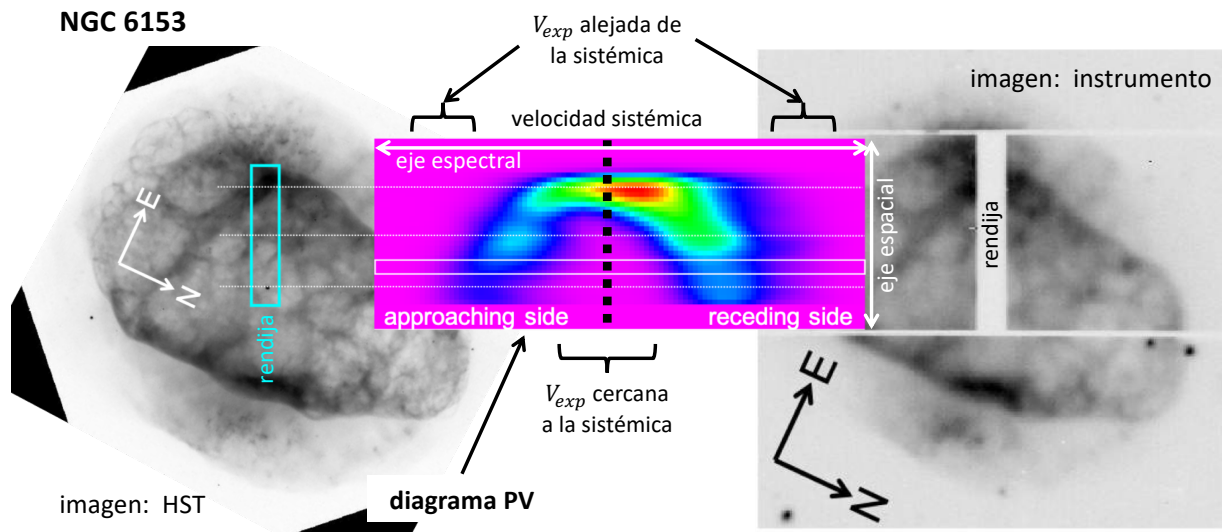
# Contexto: espectroscopia de alta resolución

- Nuestros estudios anteriores utilizan espectroscopia de alta resolución para investigar la distribución espectral a lo largo de la línea de vista.
- Los resultados son muy detallados, pero se refieren a una pequeña parte del objeto.



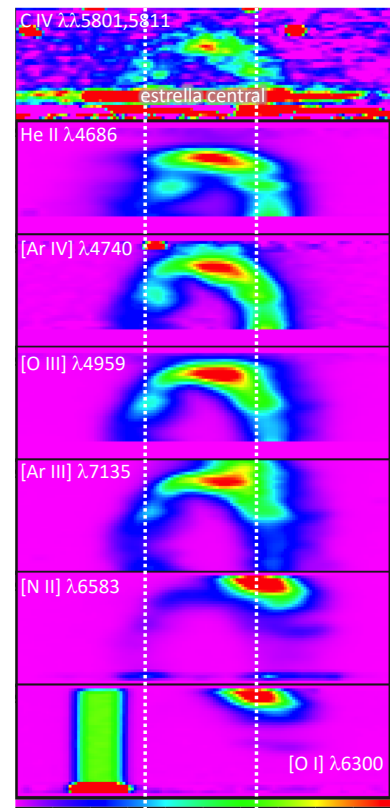
# Contexto: distribución espectral

- Espectroscopia de alta resolución distingue los movimientos internos de la nebulosa, debido al efecto Doppler. Construimos diagramas posición-velocidad (diagramas PV).
- Vemos las caras de en frente y atrás individualmente.
- Tienen la misma velocidad en el borde, donde el movimiento es perpendicular a la línea de vista.

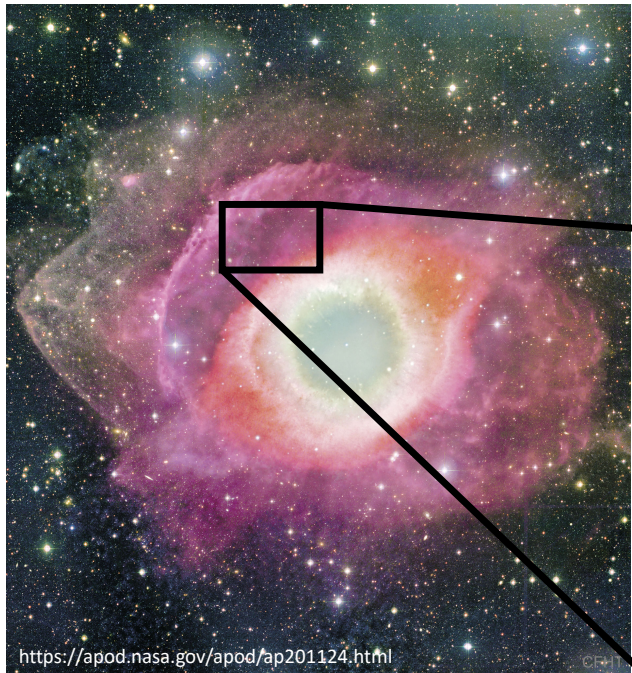


# Contexto: distribución espectral

- Se presentan diagramas PV en varias líneas, de alto a bajo grado de ionización.
- Las líneas punteadas indican la velocidad media de las dos “patas” en el primer cuadro.
- Los perfiles se abren conforme baja el grado de ionización (las “patas” se separan). A la par, se extienden a mayor altura (distancia desde la estrella central, que se ve en el primer cuadro).
- La materia de menor grado de ionización expande más rápidamente y se encuentra más lejos de la estrella central.
- Se trata de la materia vista por la rendija, resuelto en velocidad a lo largo de la línea de vista. Estos espectros permiten ver la estructura en la “tercera dimensión”, perpendicular al plano del cielo.
- En las imágenes, no vemos la estructura a lo largo de la línea de vista (perpendicular al plano del cielo), porque el objeto es transparente. (Es como ver una imagen de rayos X.)



# Por si dudaban de que las nebulosas son transparentes...

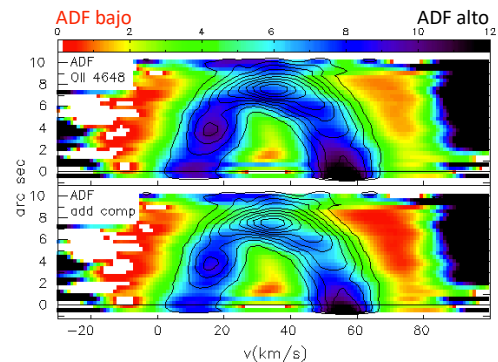


- Aquí vemos galaxias atrás (a través) de la nebulosa planetaria de la Helice (NGC 7293).



## Contexto: distribución espectral

- En nuestros estudios anteriores, investigamos el exceso de emisión en O II con respecto a [O III].
- Se presenta en términos del ADF de O<sup>++</sup> calculada de dos maneras.
- El exceso de emisión ocurre en velocidades cercanas a la velocidad sistémica y posiciones cercanas a la estrella central, que corresponde a la parte interna de la cáscara nebulosa.
- Calculamos que el exceso es equivalente a más o menos la mitad de la masa en O<sup>++</sup>. Es un efecto MUY importante.
- No obstante, estrictamente, este resultado se limita a una pequeña parte del objeto, la parte vista por la rendija (ver la lámina 7).

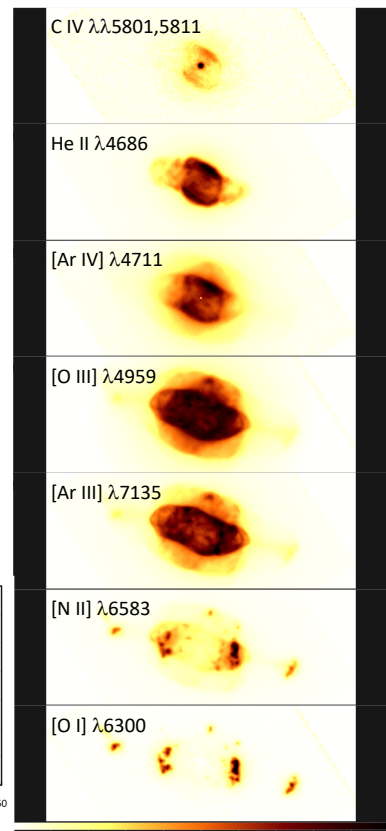
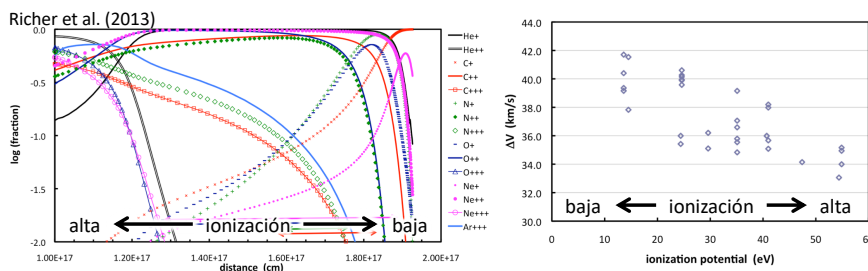


# Su experimento

- Propongo que ustedes investigan el exceso de emisión en C II, N II y O II con respecto a [O III] en la totalidad de NGC 7009.
- **Objetivo específico:**  
**¿Son las distribuciones espaciales de la emisión en la línea de [O III] y las líneas de C II, N II y O II compatibles con su origen en una sola componente de plasma que es químicamente homogénea?**
- Usarán espectroscopia de campo integral de baja resolución obtenida con el espectrógrafo MUSE en el telescopio VLT de la ESO.

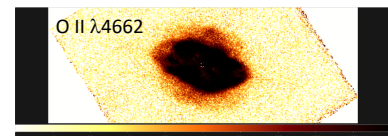
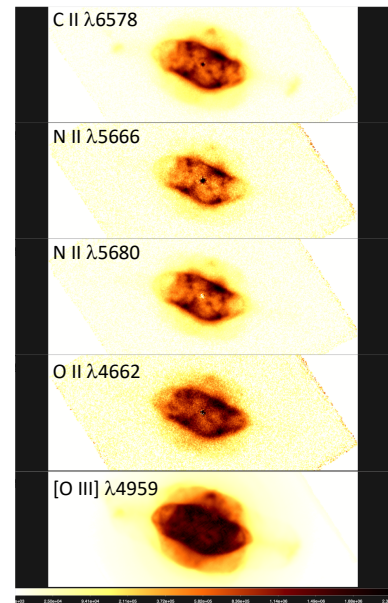
# Su experimento

- Se presentan imágenes de NGC 7009 en varias líneas, de alto a bajo grado de ionización. (Son las mismas líneas que en la lámina 8.)
- Cambia la estructura conforme cambia el grado de ionización.
- El material más altamente ionizado ocupa el volumen más interno.
- El material menos ionizado se encuentra en los volúmenes más aislados. Realmente, están mayormente en estructuras externas a la estructura principal de la cáscara nebulosa.
- Aquí, no sabemos nada de lo que es más cercano o más alejado, pero vemos la estructura completa de la nebulosa proyectada en el cielo.



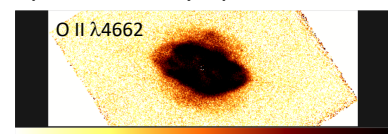
# Su experimento

- Aquí tenemos las imágenes en las líneas permitidas más brillantes de C II, N II y O II así como la línea prohibida de [O III]  $\lambda$ 4959.
- (El ion que da origen a tanto las líneas de recombinación de O II como a las de [O III] es el  $O^{++}$ .)
- Es notoria la similitud de la estructura de las imágenes en las líneas de C II, N II y O II.
- La estructura en [O III] es distinta: El contraste entre la cáscara principal y la emisión exterior es menor.
  - Esto implica que hay un exceso de emisión en O II en la parte interna de la cáscara nebulosa.
  - Dada la estructura tan similar en las líneas de C II, N II y O II, pareciera ser una característica general de estas líneas.



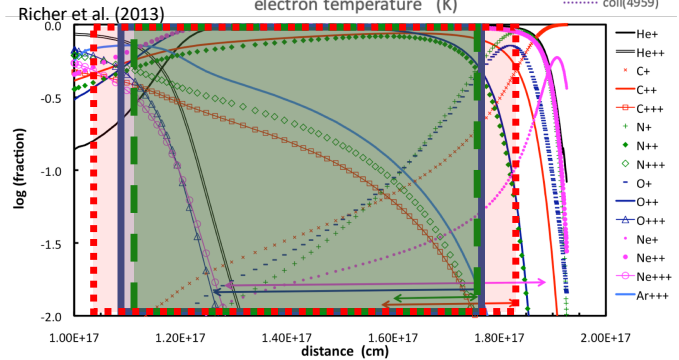
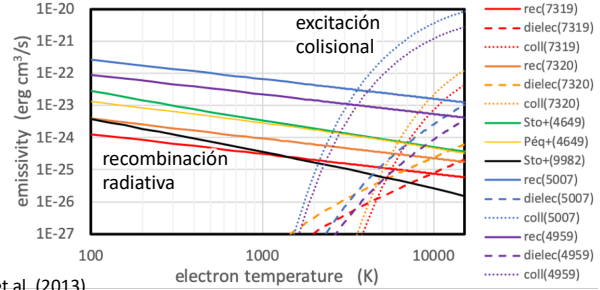
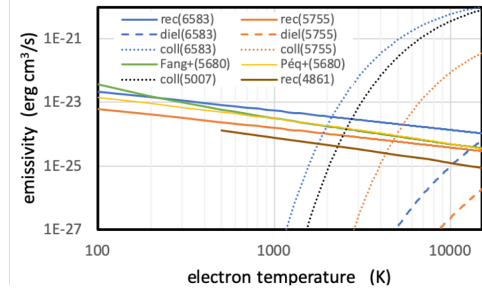
# Su experimento

- La idea básica es usar la imagen de [O III]  $\lambda$ 4959 como patrón de la emisión que emite el plasma que lo emite.
- Ese mismo plasma también emitirá en las líneas de O II  $\lambda$ 4662, estas líneas se emiten como parte del equilibrio de ionización (un poco de [O III]  $\lambda$ 4959 también).
- Con los coeficientes de emisión de [O III]  $\lambda$ 4959 y O II  $\lambda$ 4662 (siguiente lámina), se puede convertir el patrón de [O III]  $\lambda$ 4959 en el patrón esperado para O II  $\lambda$ 4662. Esto requiere adoptar una temperatura (ver apuntes anteriores).
- Así, se obtiene la emisión en O II  $\lambda$ 4662 predicha para el plasma que emite en [O III]  $\lambda$ 4959.
- Se puede sustraer este patrón de la imagen observada en O II  $\lambda$ 4662 para ver si es factible que el plasma que emite [O III]  $\lambda$ 4959 es responsable por toda la emisión que se observa en O II  $\lambda$ 4662.
- En caso contrario, ¿pueden cambios en la temperatura (o densidad) explicar la diferencia? Si no, debe existir otra componente de plasma que contribuye parte de la emisión en O II  $\lambda$ 4662.
  - ¿Cuál fracción de la emisión contribuye?
  - ¿Cuál fracción de la masa de  $O^{++}$  puede representar?



# Su experimento

- Estas gráficas presentan los coeficientes de emisión de distintas líneas de N II, O II, O III, [O III] y H I.
- El cociente de estos coeficientes es el factor de conversión para predecir la emisión en estas líneas usando otra línea como patrón.
- Para líneas que se originan de un ion, O<sup>++</sup> digamos, se requiere solamente el cociente de los coeficientes de emisión.
- Para líneas que se originan de distintos iones, O<sup>++</sup> y N<sup>++</sup>, por ejemplo, se requiere también el cociente de las abundancias, N<sup>++</sup>/O<sup>++</sup> en este caso, lo cual adoptaremos de la literatura.
- Podemos hacer lo anterior cuando se tratan de iones que ocupan volúmenes muy similares, como es el caso para C<sup>++</sup>, N<sup>++</sup> y O<sup>++</sup>.



# Su experimento

- Cosas “extras”:
- Aquí, se presentan las imágenes en más líneas que podrían estar asociadas a la misma componente de plasma que emite en O II  $\lambda$ 4662 (salvo [O III]  $\lambda$ 4959).
- A primera vista, solamente la imagen en las líneas de O I  $\lambda\lambda$ 7771,7774,7775 parece tener la misma forma como la imagen de O II  $\lambda$ 4662.
- Cada caso representa un rompecabezas para determinar cual(es) componente(s) de plasma contribuyen a su emisión.
- Esto tendrá que resolverse cuantitativamente en base a cálculos de la emisión esperada usando datos atómicos.

