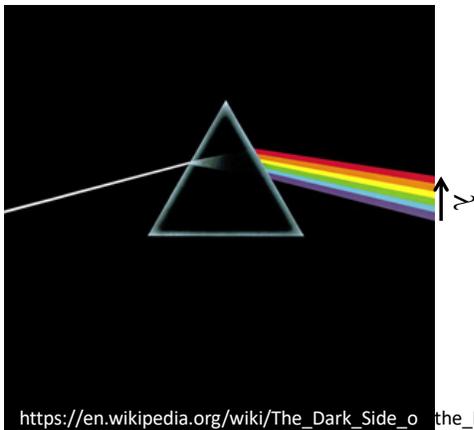


Espectroscopia

1

Espectroscopia: Objetivo

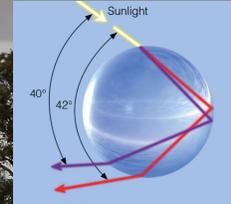
- El objetivo básico de la espectroscopia es descomponer la luz en sus “colores” componentes.
- El resultado es una imagen donde uno de los ejes es la longitud de onda, λ .



2

Espectroscopia: Objetivo

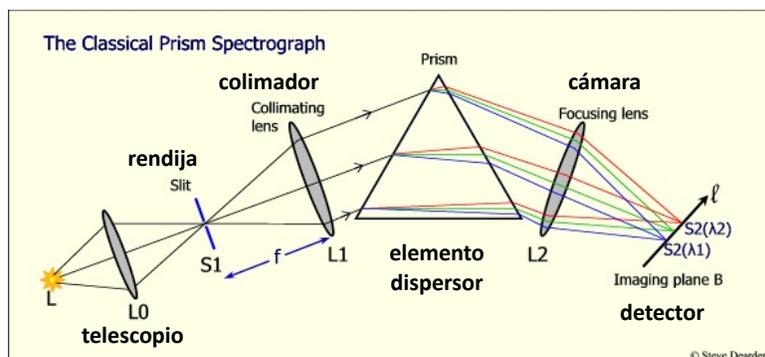
- Con espectroscopia, se estudia la forma del espectro de los objetos.
- Posiblemente, el ejemplo natural mejor conocido es el arco iris, pero también lo podemos observar cuando el Sol ilumina un bloque de vidrio oblicuamente.
- Se requiere algún elemento dispersor para separar las longitudes de onda.
- En el caso del arco iris, se tratan de gotas de agua que dispersan la luz del Sol (por el efecto de refracción total interna).
- El objetivo de esta sección es quitarle parte del misterio la espectroscopia.



http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/eb/Rainbow_over_cows.jpg

Los elementos de un espectrógrafo

- En general, un espectrógrafo se conforma de
 - una **rendija** (o no; selecciona el objeto a observar)
 - un **colimador** (lente o espejo, convierte el haz divergente del telescopio en un haz paralelo)
 - un **elemento dispersor** (usualmente una rejilla de difracción)
 - una **cámara** (enfoca el haz paralelo)
 - un detector (graba el espectro como imagen)



<https://www.astro.rug.nl/~ndouglas/teaching/ObservingTechniques/spectroscopy.html>

Meta: Dispersar la luz

- La **meta** de un **espectrógrafo** es **descomponer la luz** en sus colores componentes.
- Para cumplir esta meta se requiere algún “**elemento dispersor**” que logra este efecto.
- Rejillas de difracción, prismas o etalones F-P son aparatos ópticos que permiten descomponer la luz en sus colores componentes.
- El efecto físico por lo cual funcionan rejillas de difracción y etalones F-P es la **interferencia**.
- El efecto físico por lo cual funcionan los prismas es la **refracción**.
- Un espectrógrafo puede tener más que un elemento dispersor o más de un tipo de elemento dispersor.
- Típicamente, cuanto mayor es la dispersión de la luz, mayor es el tamaño del instrumento.

5

Refracción: prisma

- La refracción en vidrios depende de la longitud de onda, porque el índice de refracción es una función de la longitud de onda.
- La Ley de Snell relaciona la **velocidad de la luz en dos medios** con el índice de refracción en ambos medios o la velocidad de la luz en **UN** medio para luz de distintas longitudes de onda.
- Al pasar un haz de luz por un vidrio no paralelo, habrá separación de los colores componentes.
- Se puede utilizar este efecto para construir un espectrógrafo (recordar Newton).

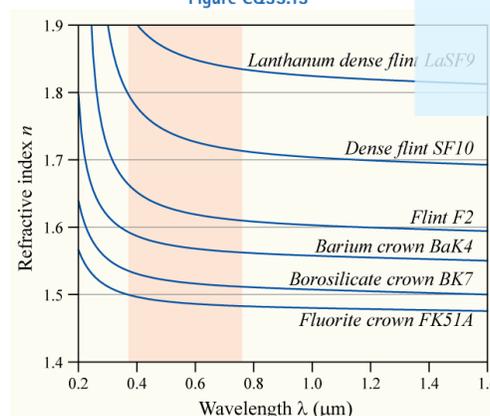
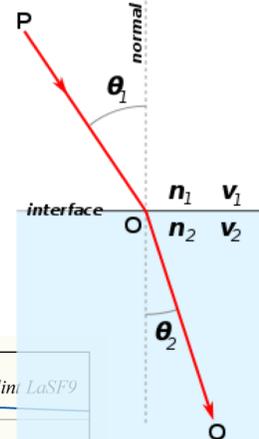
Wikipedia:
https://haygot.s3.amazonaws.com/questions/1856788_4f84e99d0a8e44b1b1c40ed630332143.png
http://en.wikipedia.org/wiki/Snell's_law
<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/20/Dispersion-curve.png>

Ley de Snell:

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



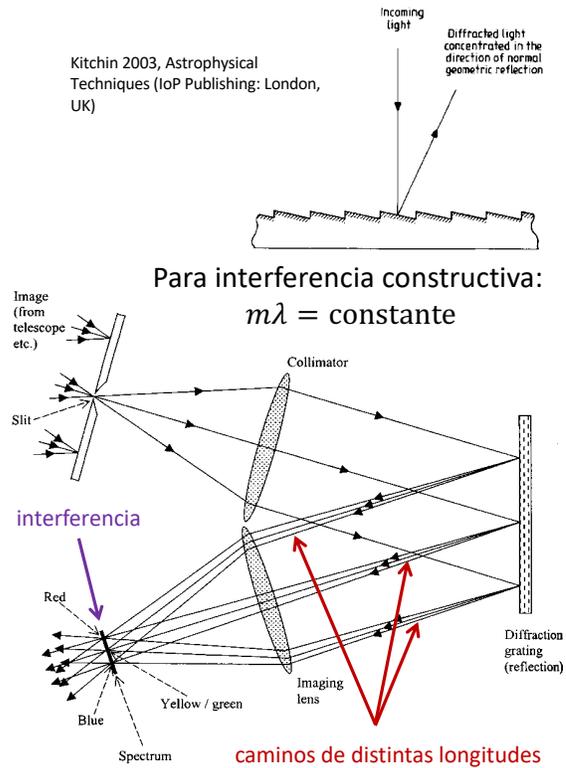
Figure CQ35.13



6

Dispersión: rejilla

- Una rejilla de difracción tiene una serie de caras escalonadas.
- Cada cara recorta una parte del haz, para producir un sub-haz independiente.
- Una rejilla de difracción produce interferencia debido a la interacción cuando se combina la luz de las distintas caras de la rejilla.
- La interferencia se debe a que la luz de cada cara llega al detector con una fase distinta porque la longitud de las trayectorias difiere para cada cara.
- Esencialmente, las caras de la rejilla dividen el haz en una serie de sub-aperturas, la luz de las cuales interfiere al llegar al detector.
- En cada posición en el detector, varía la longitud de onda para la luz que interfiere constructivamente.



La resolución espectral

- En la espectroscopia, caracterizamos la resolución o la pureza de la luz con la resolución espectral, R :

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

donde

- λ es la longitud de onda de la luz de interés
- $\delta\lambda$ es el elemento de resolución del espectrógrafo, define la extensión de la PSF en la dirección espectral.
- Cuanto mayor es R , más monocromática es la luz que permite medir el espectrógrafo.
 - Con mayor R , se pueden distinguir detalles espectrales más finos.
- Normalmente, tener una alta resolución espectral requiere comprometer otros aspectos de la observación:
 - cobertura espectral
 - cobertura espacial

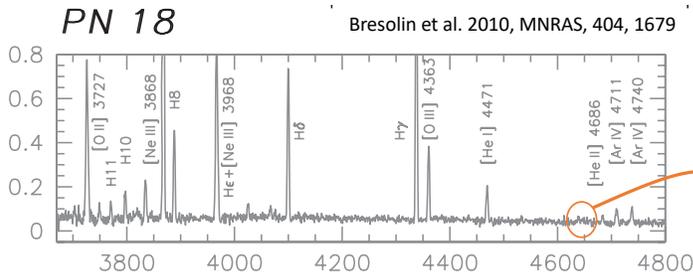
La resolución espectral

- **Baja** resolución espectral

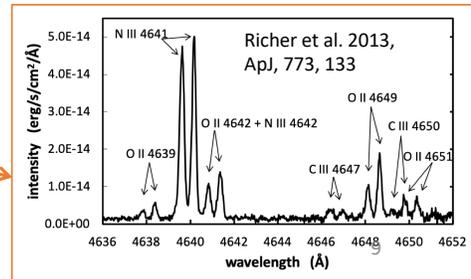
- Se observa un gran intervalo espectral.
- Usualmente, hay más información espacial.
- Todas las líneas tienen la misma forma (impuesta por el instrumento).

- **Alta** resolución espectral

- Se reduce el intervalo espectral o el espacial.
- Se observa la forma detallada de cada línea (característica de la estructura del objeto).
- Gran sensibilidad para detectar rasgos débiles.

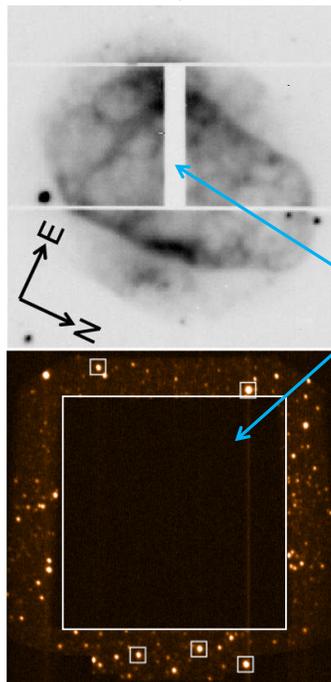


No es que cada línea es doble, sino que vemos ambos lados del objeto, una cáscara en expansión.



La rendija: ¿Qué vemos?

- Es la rendija del espectrógrafo el elemento que define cual parte del cielo observamos.
- Solamente la luz de esta región entra al instrumento.
- Hay muchísimos esquemas para alimentar a los espectrógrafos.
- Aquí vemos dos espectrógrafos que observan áreas contiguas del cielo.
- Los espectrógrafos "multi-objetos" (fibras ópticas o máscaras) que ven áreas discontinuas del cielo.



Imágenes del plano focal

Espectrógrafo de rendija:

La rendija permite observar una parte limitada del objeto.

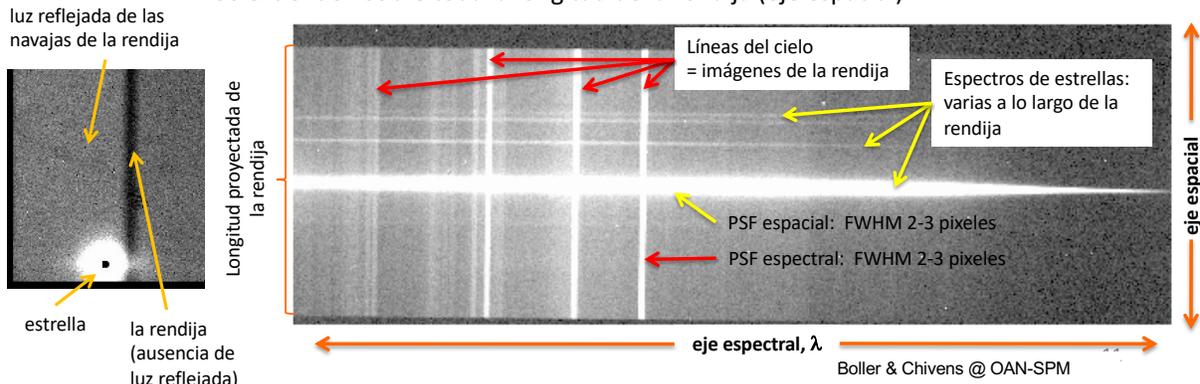
La parte "desaparecida" del objeto es lo que ve el espectrógrafo.

Espectrógrafo de campo integral:

Se observa todo el objeto.

Espectro de rendija larga

- Este es un espectro de baja resolución.
- En la imagen, se ven
 - espectros de varias estrellas:
 - Tienen emisión a todas longitudes de onda (todo el eje espectral).
 - Son compactos espacialmente.
 - líneas (y bandas de líneas) del cielo:
 - Se ven a ciertas longitudes de onda (espectro de línea de emisión).
 - Se extienden sobre toda la longitud de la rendija (eje espacial).

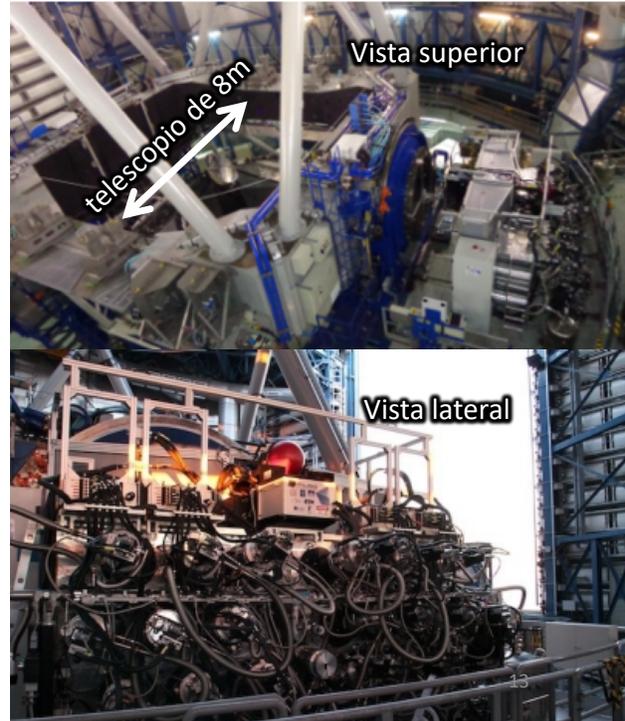


El caso MUSE @ ESO

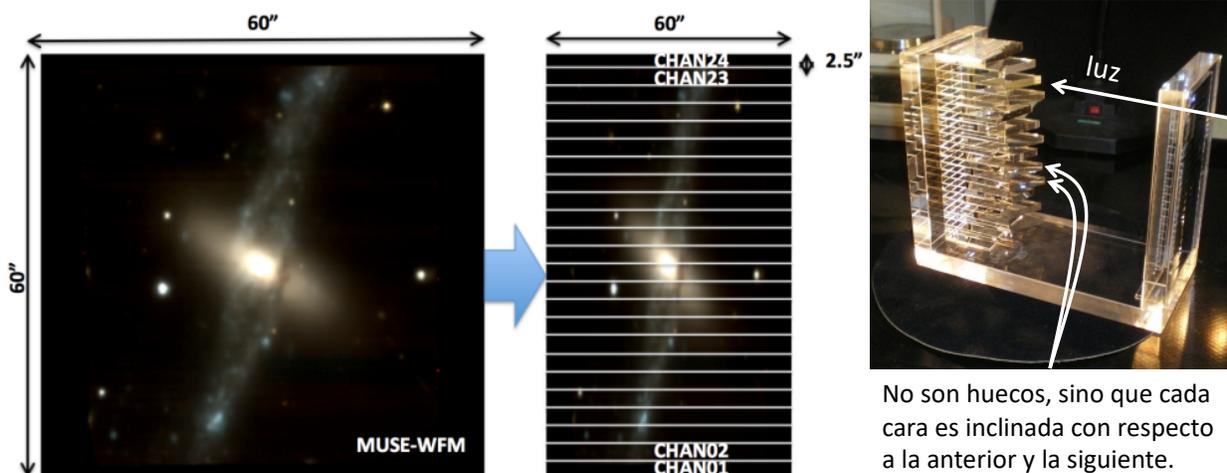
- Utilizarán datos del espectrógrafo MUSE del Observatorio Europeo Austral (ESO, siglas en inglés; MUSE = Multi-Unit Spectroscopic Explorer).
- MUSE es un espectrógrafo de campo integral que permite construir imágenes a cualquier longitud de onda en el intervalo 4650-9300Å.
- Su campo de visión es de 60"x60" en el cielo, lo cual es suficientemente grande para abarcar el tamaño completo de muchas nebulosas planetarias.
- Su resolución espectral es relativamente baja, $\delta\lambda \sim 2.6 \text{ \AA}$, por lo que la resolución varía sobre el intervalo espectral, $R = 1770 - 3590$.
- La combinación de su gran campo y su cobertura espectral permite estudios que antes eran imposibles.

El caso MUSE @ ESO

- Las fotos presentan dos vistas del espectrógrafo.
- En realidad es un conjunto de 24 espectrógrafos replicados, todos trabajando en paralelo.
- El tamaño del instrumento es similar al diámetro del telescopio (8m).
- El instrumento está instalado en la plataforma Nasmyth del telescopio Yepun/UT4 de la ESO en el Cerro Paranal en el norte de Chile.

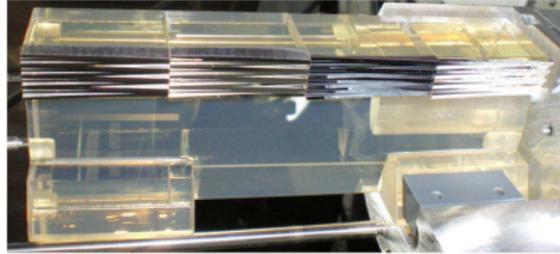
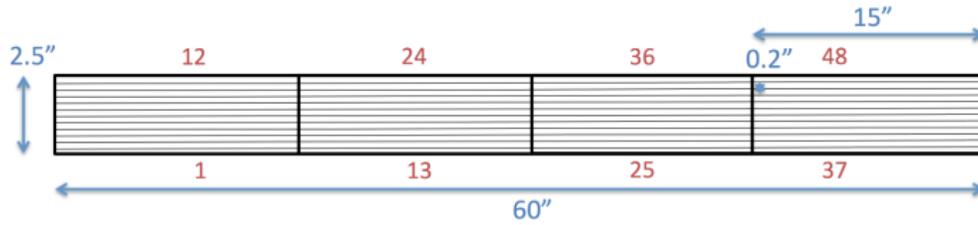


El caso MUSE @ ESO



- Lo primero que hace el espectrógrafo es rebanar el campo de visión en 24 canales (rebanadas horizontales).

El caso MUSE @ ESO

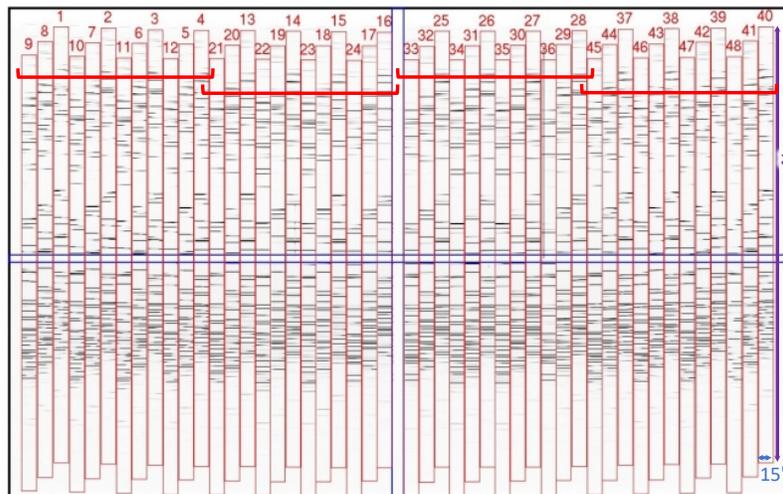


- Cada canal va a su propio espectrógrafo.
- Luego, cada canal es partida en 48 subsecciones.
- Estas 48 subsecciones son alineados como si fueran una sola rendija en la entrada del espectrógrafo.

15

El caso MUSE @ ESO

los cuatro bloques de espectros

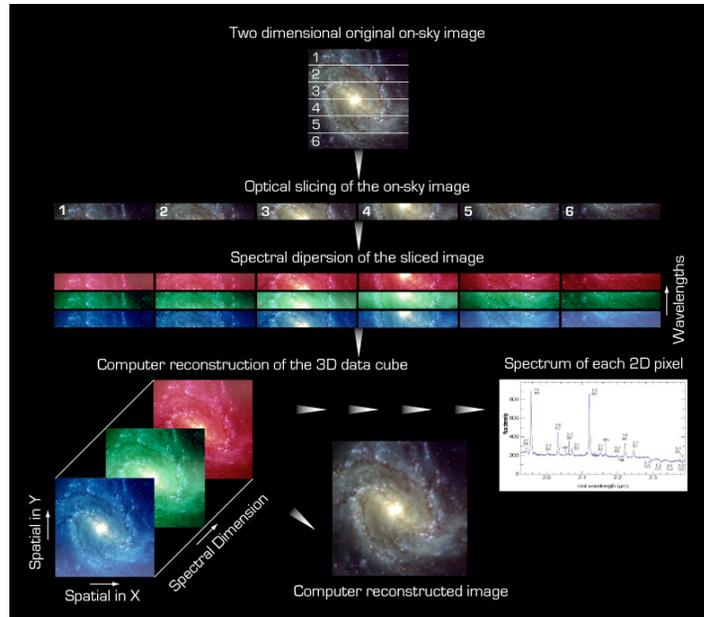


- Aquí vemos la imagen de los 48 espectros de cada subsección en el detector.
- En la reducción de datos, se regresa cada subsección de cada rebanada en su lugar para producir imágenes del objeto en cada longitud de onda.

16

El caso MUSE @ ESO

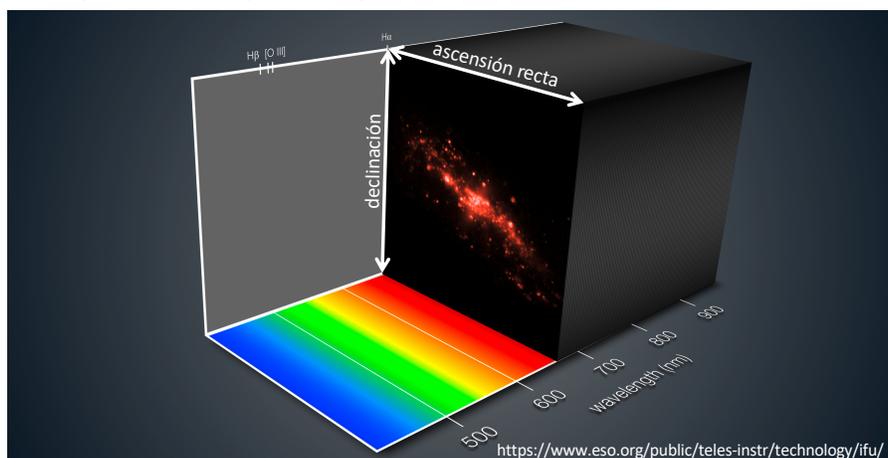
- En el proceso de reducción de los datos, se recompone la imagen del objeto en cada longitud de onda.
- Es un proceso de interpolación de los espectros:
 - De los espectros, se construyen los bloques de cada canal
 - Con cada canal, se construye una banda de la imagen
 - Juntando los canales, se construye la imagen.
 - Lo anterior sucede en cada longitud de onda.
- Se puede sumar todas las longitudes de onda para construir una imagen de color.
- En cada posición, se puede extraer un espectro.



<https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/ifu/>

El caso MUSE @ ESO

- El espectro final es un “cubo de datos”, una serie de imágenes monocromáticas.
- Se puede trabajar con las imágenes en las longitudes de onda que se requiere para llevar a cabo la ciencia.



<https://www.eso.org/public/teles-instr/technology/ifu/>

NGC 7009

- El campo de visión de MUSE incluye el objeto completo.
- Se presentan imágenes monocromáticas en distintas líneas de emisión (Fig. 3) y los “mapas” de la densidad basado en las líneas de [S II] y [Cl III] (Fig. 7).
- Las imágenes necesarias se extraen del cubo de datos.

Walsh et al. 2018, A&A, 620, A169

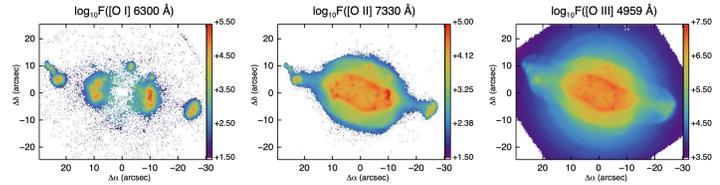


Fig. 2. Images of NGC 7009 in the O emission lines: O⁰ (from the [O III]6300.3 Å line, 120 s cube), O⁺ (from the [O III]7330.2 Å line, 120 s cube) and O⁺⁺ (from the [O III]4958.9 Å 10 s cube).

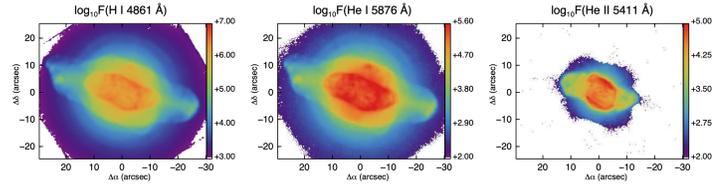


Fig. 3. Images of NGC 7009 in H and He emission line images: H⁺ as sampled by Balmer 4–2 H β 4861.3 Å from both the 10 s and 120 s cubes; He⁺ from the triplet (2P 3d – 3D 2s) He I 5875.6 Å line (120 s cube); and He⁺⁺ from He II 5411.5 Å 7–4 line (120 s cube).

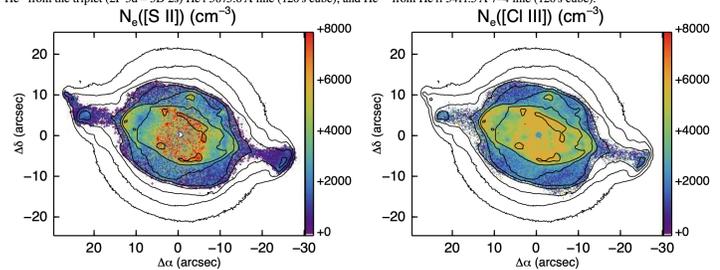


Fig. 7. Maps of N_e determined from [S II] (left panel) and [Cl III] (right panel). The contours correspond to the observed $\log F(\text{H}\beta)$ image shown in Fig. 3 (left panel), with contours set at $\log_{10} F(\text{H}\beta)$ surface brightness ($\text{ergs cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{arcsec}^{-2}$) from -15.0 to -11.8 in steps of $+0.4$. The electron densities for collisional de-excitation of the [S II] and [Cl III] $^2D_{3/2}$ levels for these diagnostics are 3.1×10^3 and $2.4 \times 10^3 \text{ cm}^{-3}$ at 10^4 K , respectively. The simple means on the signal-to-error value over the two N_e maps are 6 and 4, respectively.

NGC 3132

- Aquí vemos imágenes RGB construidas con las imágenes en líneas de emisión particulares.
- La elección de líneas de emisión de diferentes grados de ionización permite estudiar la estructura del objeto.

Monreal-Ibero & Walsh 2020, A&A, 634, A47

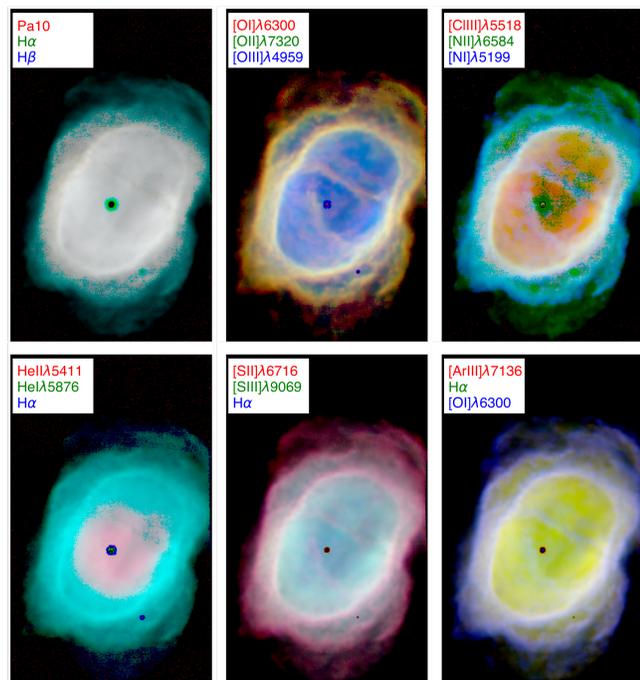


Fig. 2. Set of colour composite images using fluxes of three emission lines. The panels summarise in a synthetic manner the richness in ionisation structure. The emission lines used to create the individual images are listed in the upper left corner of each panel, coloured according to the corresponding RGB channel. North is up and east towards the left. See text for a detailed description of the images.