

# Análisis del espectro en rayos X de un AGN

Cedric Prieels

Marzo 2017

## Resumen

En esta práctica, se analiza el espectro en rayos X de un AGN (objeto NGC4138) obtenido por el detector de rayos X XMM-Newton, usando la herramienta XSpec. El objetivo principal consiste en modelizar el espectro medido, usando en el mismo tiempo un espectro de fondo y información sobre la respuesta de este detector. Esta modelización se hace considerando diferentes modelos teóricos, y se comparan cada ajuste así obtenido con los datos y los otros ajustes usando diferentes métodos estadísticos (valores de  $\chi^2$  y de  $\chi^2$  reducido, número de grados de libertad, valor de probabilidad de la hipótesis nula, F-test).

## 1. Desarrollo experimental

### 1.1. Objeto de interés

Vamos a estudiar en esta práctica el espectro en rayos X del objeto NGC4138, y por lo tanto, tenemos primero que buscar algunos datos sobre este objeto usando la base de datos NED (*NASA Extragalactic Database*). Si introducimos el nombre de este objeto en esta base de datos que se puede encontrar en internet, podemos por ejemplo determinar su posición, su velocidad de alejamiento (888 km/s) y su redshift (0.002962). Para la práctica y para modelizar el espectro que tenemos, necesitamos también saber cuanto absorbe nuestra galaxia, que está entre nosotros y este objeto de interés. Hemos podido determinar esta información gracias a la herramienta HEASARC de la NASA (<http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/w3nh/w3nh.pl>), en la cuál podemos introducir el objeto que estudiamos para sacar que hay en promedio unos  $1,25 \cdot 10^{20}$  átomos de hidrogeno de nuestra galaxia, per centímetro cuadrado, entre nosotros y la fuente.

### 1.2. Preparación del espectro

Para poder hacer un estudio estadístico de nuestro espectro, tenemos que tener bastante estadística en cada bin. Por lo tanto, lo primero que queremos hacer es cambiar el *binning* del espectro para tener unos 15-20 cuentas en cada bin. Esto se hace muy fácilmente con la herramienta *grppha*, que nos permite leer el espectro y guardarlo con otro binning en un otro fichero que vamos a leer después.

### 1.3. Análisis del espectro

Con estos datos, ya podemos empezar a estudiar nuestro espectro usando la herramienta XSpec, que nos va a permitir intentar a ajustar diferentes modelos y diferentes curvas a nuestros datos, para hacer un pequeño estudio estadístico. Vamos a ir probando diferentes modelos, a ver cuál es el que parece

el mejor a los datos (haciendo pruebas estadísticas de tipo F-test, mirando el valor de  $\chi^2$  obtenido en cada caso y teniendo en cuenta también otros parámetros como el número de grados de libertad).

## 2. Resultados obtenidos

Lo primero que podemos hacer consiste en abrir XSpec en una ventana de la terminal, y cargar el espectro, el espectro del fondo, y los ficheros que nos dan pistas sobre la respuesta del detector al estudiar la luz del AGN (ficheros *.arf* y *.rmf*). Podemos después abrir una ventana donde se va a pintar el espectro, y pedir al programa que ignore las zonas donde la calibración es la peor (a menos de 0.2 keV y más de 15 keV) y que pinte el espectro con la energía en el eje X.

### 2.1. Primer modelo

El primer modelo es muy sencillo, pero aún así debería modelizar bastante bien la realidad. Este modelo consiste en considerar una ley de potencia del tipo *wabs*\**po* entre 3.0 y 10.0 keV. Ponemos por lo tanto en la terminal los valores de  $n_H$  encontrado antes para este AGN (siendo en unidades de  $10^{-22}$  átomos/cm<sup>2</sup>, tenemos que poner 0,0125). Como primer intento, consideramos un valor de *PhoIndex* (el valor que entra en la exponencial) de 2, porque sabemos que el valor real está cerca de este valor, y ponemos la normalización a 0. Fijamos después el valor de  $n_H$ , porque conocemos su valor y no queremos que el programa cambie este valor al hacer el fit, y calculamos la mejor normalización posible con este modelo. Después, hacemos el fit a nuestros datos.

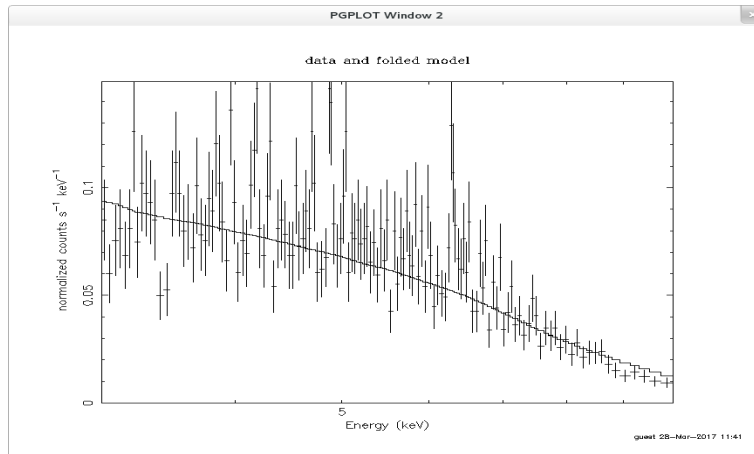


Figura 1: Espectro y primer ajuste en el rango 3-10 keV

Al hacer el fit, podemos ver que el programa nos ha devuelto un valor de *PhoIndex* entorno a 0.72 y una normalización de  $2,89 \cdot 10^{-4}$ . Este ajuste nos da un valor de  $\chi^2$  de 185,66 con un número de grados de libertad igual a 139, y un valor de hipótesis nula de  $5,02 \cdot 10^{-3}$  (este número corresponde a la probabilidad de tener un  $\chi^2$  superior al valor obtenido si los datos provienen del modelo teórico).

Hemos ajustado el modelo teórico en el rango 3.0-10.0 keV y parece que le modelo se ajusta bastante bien a los datos en este rango, pero tenemos ahora que volver a considerar todo nuestro rango de datos, entre 0,2 y 15 keV. Cuando volvemos a considerar todo, vemos directamente que el ajuste hecho se comporta muy mal a valores de energía pequeñas. Tenemos por lo tanto que añadir más información a este ajuste sencillo para que quede bien también a energías pequeñas.

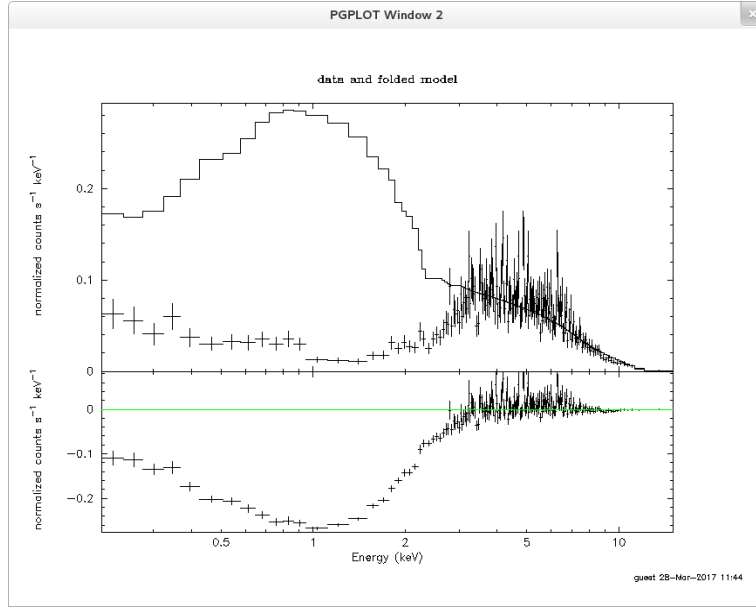


Figura 2: Espectro y primer ajuste en todo el rango

## 2.2. Segundo modelo

Ahora, vamos a intentar poner una absorción más grande a energías pequeñas para intentar mejorar el ajuste a los datos, porque hasta ahora hemos considerado solamente la absorción extragaláctica y parece que hay que añadir ingredientes a este modelo sencillo. Consideramos por lo tanto es esta sección un ajuste del tipo  $wabs * zwabs * po$ , siendo  $zwabs$  la absorción a  $z$  de la fuente (absorción intrínseca). Volvemos a poner los mismos parámetros que los que acabamos de obtener con el primer ajuste, añadimos el valor del redshift encontrado gracias a la base de datos NED (y por supuesto, siendo una constante, fijamos este valor) y ponemos primero el  $n_H$  del nuevo modelo a 0.0.

Después de aplicar este ajuste a los datos, vemos que obtenemos un valor de  $\chi^2$  de 399,95 y un número de grados de libertad igual a 181. El valor de probabilidad de la hipótesis nula vale en este caso  $1,41 \cdot 10^{-18}$ . Podemos también observar que con este ajuste, el valor de PhoIndex vale 1,31 lo que está más cerca del valor esperado de 2 que antes. Si pintamos este ajuste (figura 3), vemos que nos hemos pasado un poco : ahora, el ajuste toma valores mucho más pequeños que los datos a energías pequeñas. Parece que nos falta considerar emisión en este rango de energías. De todas maneras, podemos concluir que este modelo es mucho mejor que el primer modelo que hemos considerado porque un simple F-test, considerando los valores de  $\chi^2$  y los números de grado de libertad obtenidos en cada caso, nos devuelve un valor de probabilidad igual a  $1,54 \cdot 10^{-9}$ .

## 2.3. Tercero modelo

Podemos considerar también, además de todo el resto que hemos considerado hasta ahora, una segunda ley de potencia que tenga el mismo PhoIndex que la primera y que corresponde a la componente de scattering, porque el gas alrededor del AGN cambia la cantidad de luz que podemos detectar (podemos observar algunos fotones emitidos hacia otras direcciones y que no deberían llegar a la Tierra sin este fenómeno de scattering). El ajuste que consideramos en este apartado es por lo tanto del tipo  $wabs * (zwabs * po + po)$  y vamos poniendo como parámetros de este ajuste los resultados del ajuste precedente. Ponemos como siempre la normalización de la nueva componente a 0 para verificar primero que volvemos a obtener los resultados precedentes, y imponemos después que los valores de los PhoIndex de las dos leyes de potencia estén iguales.

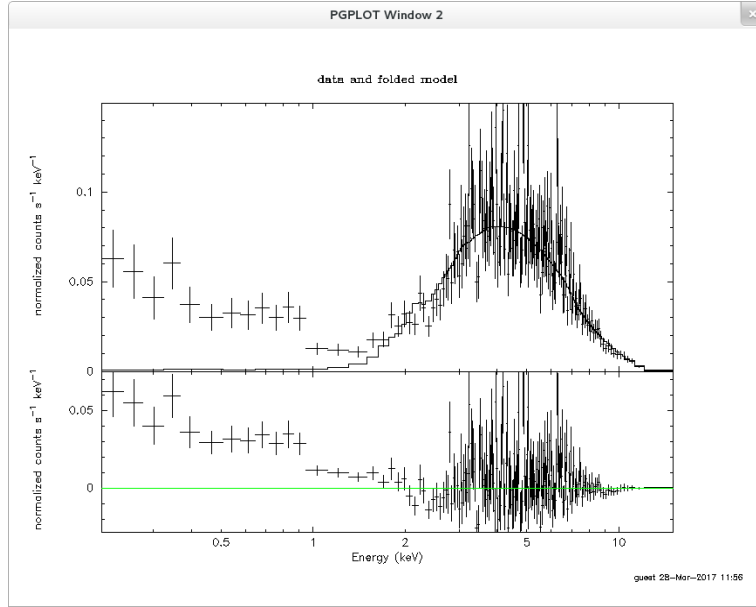


Figura 3: Espectro y segundo ajuste

Este ajuste nos devuelve un valor de  $\chi^2$  de 205,66 para 180 grados de libertad, y un valor de hipótesis nula de  $9,21 \cdot 10^{-2}$ . El valor de PhoIndex obtenido en este caso (1.64) es todavía más cerca del esperado (2) y si pintamos este ajuste, vemos que queda mucho mejor en todo el rango de energías. El resultado del F-test con el modelo precedente es sin equivoco : la probabilidad de no haber mejorado el modelo es de  $8,53 \cdot 10^{-28}$ . Este modelo es por lo tanto mucho mejor, porque el valor de  $\chi^2$  ha bajado mucho mientras que hemos perdido solamente un grado de libertad.

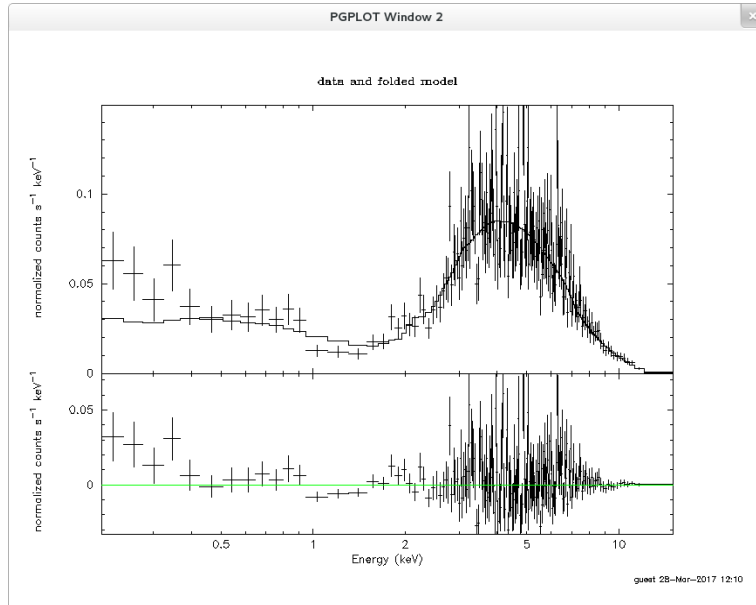


Figura 4: Espectro y tercer ajuste

## 2.4. Cuarto modelo

Para intentar seguir mejorando el modelo, añadimos al modelo precedente un modelo de tipo *mekal* (exceso térmico). Este modelo necesita un valor de  $kT$ , que ponemos a 0,5 al principio, un valor de  $n_H$  que ponemos a 1 y un valor de abundancia que ponemos a 1 también (como en la Tierra). Volvemos a poner el mismo valor de redshift que antes, y ponemos el switch a 1 porque queremos hacer una interpolación.

Este modelo cuadra con los datos con un  $\chi^2$  de 187,28 (178 grados de libertad), y tenemos un valor de hipótesis nula de  $3,01 \cdot 10^{-1}$ . Vemos a simple vista que este modelo parece mejorar el ajuste, por lo menos a bajas energías. Hemos perdido con este último modelo 2 grados de libertad, y ganado unas 18 unidades de  $\chi^2$  y nos podemos volver a preguntar si este último modelo es mejor que el tercer modelo, o no, gracias al F-test. Aplicar el F-test a estos datos nos dice que la probabilidad de haber mejorado el modelo precedente es de 0,9998 (equivalente a más o menos 4 sigmas). Podemos por lo tanto considerar que este último modelo es bastante mejor que el tercer modelo, y lo guardamos.

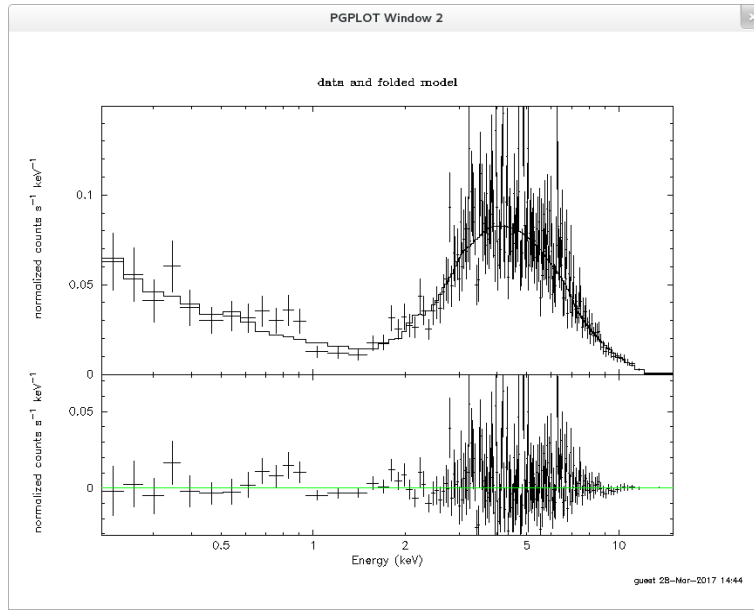


Figura 5: Espectro y cuarto ajuste

## 2.5. Quinto modelo

El quinto modelo consiste en añadir al modelo anterior información sobre la línea Fe  $K\alpha$  que está en 6,4 keV. El modelo completo considerado se puede escribir como  $wabs * (zwabs * po + po + mekal + zgau)$ . Ponemos como parámetros iniciales para este ajuste los parámetros obtenidos con el cuarto modelo, imponemos que la línea esté en 6,4 keV y fijamos el valor de sigma a 0.

Añadir información sobre esta línea en el ajuste nos da un  $\chi^2$  de 178,36 para 177 grados de libertad, y un valor de hipótesis nula de  $4,47 \cdot 10^{-1}$ . El  $\chi^2$  ha bajado bastante, pero hemos perdido 1 grado de libertad en el proceso. Aplicar un F-test a este modelo para compararlo con el precedente nos devuelve una probabilidad de haber mejorado el modelo igual a 0,995, lo que corresponde a menos de 3 sigmas y no guardamos por lo tanto este modelo como referencia. Si dejamos libre el valor de sigma en este modelo, obtenemos un valor de  $\chi^2$  de 178,39 pero hemos perdido un grado de libertad en el proceso, lo que no parece muy interesante tampoco.

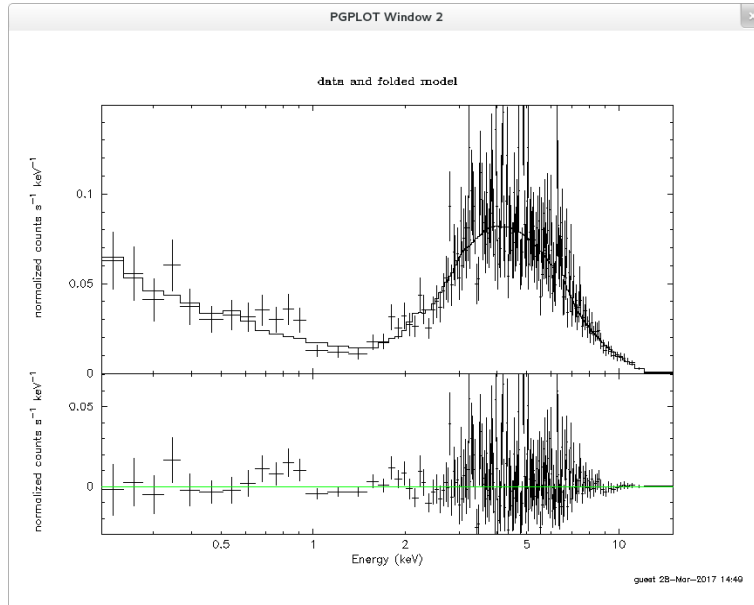


Figura 6: Espectro y quinto ajuste

## 2.6. Sexto modelo

Por fin, vamos a intentar añadir al cuarto modelo información sobre una otra línea del espectro, la Fe K $\beta$  a 7,06 keV, que tiene una intensidad igual a 13,5 % la intensidad de la línea precedente Fe K $\alpha$ .

Si añadimos esta línea en nuestra modelo precedente, obtenemos un  $\chi^2$  igual a 185,34 para 177 grados de libertad. Este componente del modelo es claramente no útil para representar nuestros datos, porque obtenemos un valor de  $\chi^2$  mayor que el obtenido con el modelo precedente.

## 3. Cuestiones

**Are the optical classification for this source from the literature, and the X-ray spectral properties you have deduced in this exercise in agreement? Why?**

Hemos podido comprobar a lo largo de la práctica que el espectro que tenemos se puede ajustar bastante bien a diferentes modelos típicos de la emisión en rayos X. En particular, se puede ver en la literature que este objeto NGC4138 es una galaxia que tiene el tipo Seyfert 1.9, caracterizado por líneas de emisión de gas muy ionizado y es lo que podemos observar en el espectro de la práctica. Además, los diferentes parámetros del mejor modelo obtenido acuerdan bastante bien con lo que esperamos : por ejemplo, hemos determinado que el parámetro  $\gamma_{\text{powerlaw}}$  vale  $1,486^{+0,138}_{-0,134}$ , lo que cuadra relativamente bien con el valor esperado de 2, aunque sigue siendo un poco bajo porque los errores de este parámetro son los errores al 90 %.

**What is the best-fit model? Give the  $\chi^2$  value and the reduced  $\chi^2$ . Given those statistics and the residuals: is it a good fit to the data?**

El mejor ajuste parece ser el ajuste obtenido con el modelo número 4. Tiene 178 grados de libertad, un valor de  $\chi^2$  de 187,28 y un valor de  $\chi^2$  reducido de 1,0521. Este modelo tiene en cuenta la respuesta del detector, la absorción de nuestra galaxia, la absorción intrínseca, la componente de scattering y una componente debida a un exceso térmico.

Este modelo es bueno para ajustar los datos porque tiene un valor de  $\chi^2$  reducido cerca a la unidad, y porque obtenemos en este caso un valor de probabilidad de hipótesis nula de  $3,01 \cdot 10^{-1}$ . Esto significa que hay solamente una probabilidad de 0,3 de tener un  $\chi^2$  mayor que el  $\chi^2$  obtenido si los datos provienen del modelo estudiado. Por lo tanto, cuanto mayor es esta probabilidad, mejor se ajusta el modelo a los datos, y en este ejercicio, este modelo número 4 tiene un valor de probabilidad de hipótesis nula bastante grande.

Como explicado antes, hay que estar cuidado porque este modelo no es el que tiene el menor  $\chi^2$  : el modelo 5 parece mejor, pero lo que pasa es que este último modelo tiene un grado de libertad menos, lo que no nos interesa. Hacer un F-test entre los modelos 4 y 5 nos devuelve un valor de probabilidad de 0,00437 : y esta significancia no es bastante pequeña para poder decir con una certeza absoluta que el modelo 5 mejore el 4, por eso guardamos el cuarto modelo como referencia.

### Calculate the uncertainties in the model parameters for this best fit.

Las incertidumbres se pueden calcular fácilmente con el comando *uncertain* de XSpec. Solo tenemos que dar como argumentos el parámetro que queremos estudiar, y el número de sigma(s) al cuadrado que nos interesa y el programa nos devuelve la incertidumbre. Como en rayos X se suele usar las incertidumbres al 90 %, usamos además el número de sigma que viene por defecto (2.706) y solo tenemos que pasarle el número del parámetro que nos interesa.

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{H,zwabs} = 8,290^{+0,786}_{-0,730} \\ \gamma_{powerlaw} = 1,486^{+0,138}_{-0,134} \\ norm_{powerlaw_1} = (1,470 \cdot 10^{-3})^{+4,47 \cdot 10^{-4}}_{-3,35 \cdot 10^{-4}} \\ norm_{powerlaw_2} = (1,689 \cdot 10^{-5})^{+2,88 \cdot 10^{-6}}_{-2,91 \cdot 10^{-6}} \\ kT = (8,998 \cdot 10^{-2})^{+3,84 \cdot 10^{-2}}_{-8,99 \cdot 10^{-2}} \\ norm_{mekal} = (2,769 \cdot 10^{-5})^{+2,16 \cdot 10^{-5}}_{-1,81 \cdot 10^{-5}} \end{array} \right.$$

### Estimate the equivalent width of the lower energy line.

La anchura equivalente corresponde al continuo que hay que integrar para tener la misma area que el trozo de señal considerado. El comando *eqwidth* nos ayuda en este caso, porque nos calcula esta anchura equivalente directamente. Para calcular esta anchura equivalente, tenemos que considerar el modelo 5 que tiene en cuenta el impacto de la línea de Fe K $\alpha$  a 6,4keV sobre el espectro obtenido. En este caso, considerando este modelo y esta línea, obtenemos un valor de anchura equivalente de 0,0899 keV para la componente *zgau*.

### Estimate the Galaxy-corrected fluxes in the 0.5-2 and 2-10keV ranges.

El flujo se puede calcular fácilmente con XSpec, pero hay que estar cuidado. Queremos en este caso primero quitar la componente  $n_H$  de nuestra galaxia, porque no tiene sentido hablar de flujo después de haber atravesado polvo, porque esto significaría que el valor del flujo dependería de la posición del observador. Por lo tanto, antes de calcular este flujo, ponemos el valor de  $n_H$  de nuestra galaxia a 0. Con este modelo, obtenemos que el flujo en la zona 0,5 - 2,0 keV vale  $8,63 \cdot 10^{-14}$  erg/cm<sup>2</sup>s y que el flujo en la zona 2,0-10,0 keV vale  $4,76 \cdot 10^{-12}$  erg/cm<sup>2</sup>s.

**Estimate the intrinsic luminosity of this source in the 0.5-2 and 2-10keV ranges. Is it a quasar?**

En este caso, además de guardar el  $n_H$  de nuestra galaxia a 0, queremos también poner a 0 el segundo  $n_H$ , el que corresponde a la segunda absorción intrínseca. También hay que quitar la parte de scattering aunque esta parte es mucho menor, y no influye tanto en el resultado final. En este caso, ejecutar el comando *lumin* nos devuelve una luminosidad de  $1,75 \cdot 10^{39} \text{erg s}^{-1}$  en el rango 0,5-2 keV y  $9,24 \cdot 10^{40} \text{erg s}^{-1}$  en el rango 2-10 keV. Es una luminosidad muy grande, y por lo tanto el objeto observado es un AGN como lo pensábamos pero esta luminosidad es mucho menor que la luminosidad típica de un cuásar, del orden de  $10^{44} \text{erg s}^{-1}$  en el rango 2-10 keV. Como dicho antes, este objeto no es un cuásar sino una galaxia de tipo Seyfert.

## 4. Conclusión

Hemos intentado ajustar una serie de modelos al espectro en rayos X del objeto NGC4138 obtenido por el detector XMM-Newton, para ver qué tipo de modelo es capaz de modelizar lo mejor los datos, usando una serie de herramientas estadísticas ( $\chi^2$ , número de grados de libertad, F-test para comparar diferentes modelos). Los resultados así obtenidos para cada modelo se pueden resumir en una tabla.

	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5	Modelo 6
$\chi^2$	399,95	205,66	187,28	178,86	185,34
Grados de libertad	181	180	178	177	177
Hipotesis nula	$1,41 \cdot 10^{-18}$	$9,21 \cdot 10^{-2}$	$3,01 \cdot 10^{-1}$	$4,47 \cdot 10^{-1}$	$3,18 \cdot 10^{-1}$

A la vista de estos resultados y de algunas pruebas de tipo F-test que hicimos, podemos concluir que el mejor modelo para representar nuestros datos es el cuarto modelo, que consiste en considerar dos leyes de potencia (una para la absorción debido al gas de nuestra galaxia y otra para la componente de scattering), además de una componente de absorción intrínseca de tipo *zwabs* y de una componente de exceso térmico. Este modelo es el que tiene el valor de hipótesis nula la más alta, y esto es lo que buscamos porque esta probabilidad corresponde a la probabilidad de tener un valor de  $\chi^2$  mayor o igual al valor obtenido si los datos provienen de verdad del modelo teórico considerado. Además, este modelo tiene como valor de  $\chi^2$  reducido 1,0521 y está por lo tanto muy cerca de la unidad, lo que nos da todavía más confianza en el modelo usado y es el modelo que tiene el valor de probabilidad de hipótesis nula mayor (justamente lo que buscamos, porque este valor de probabilidad nos da una idea de la probabilidad de que los datos provengan de verdad del modelo que consideramos).