

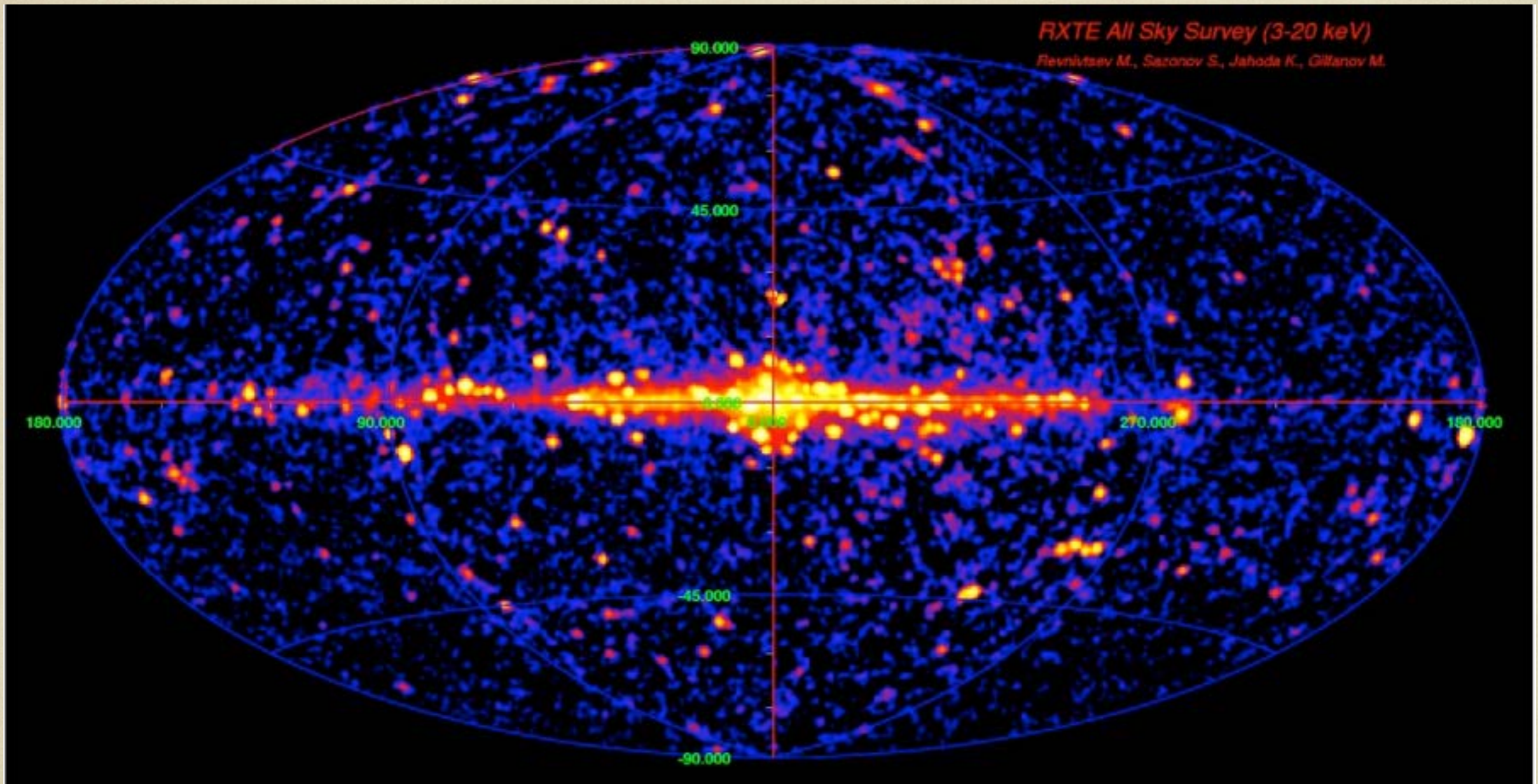
Introducción a los Rayos X en Astrofísica

Elena Jiménez Bailón

Resumen

- **Qué estudia la ciencia de los Rayos X?** Objetos que emiten en rayos X y objetos interesantes
- **Tecnología:** Cómo son detectados los Rayos X
- **Análisis de datos:** Problemas especiales de los rayos X

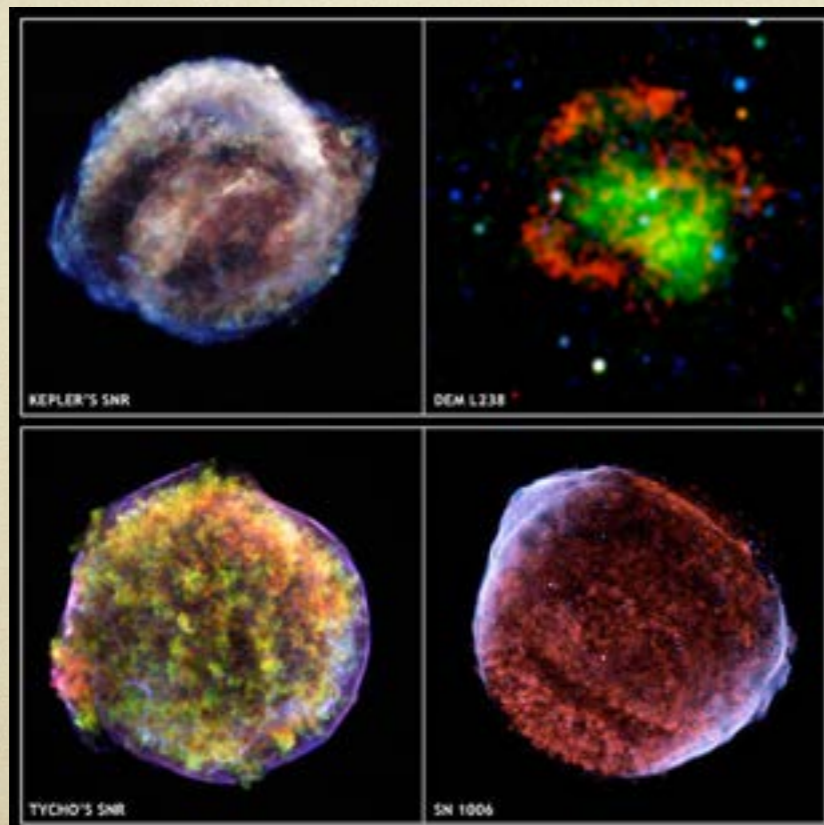
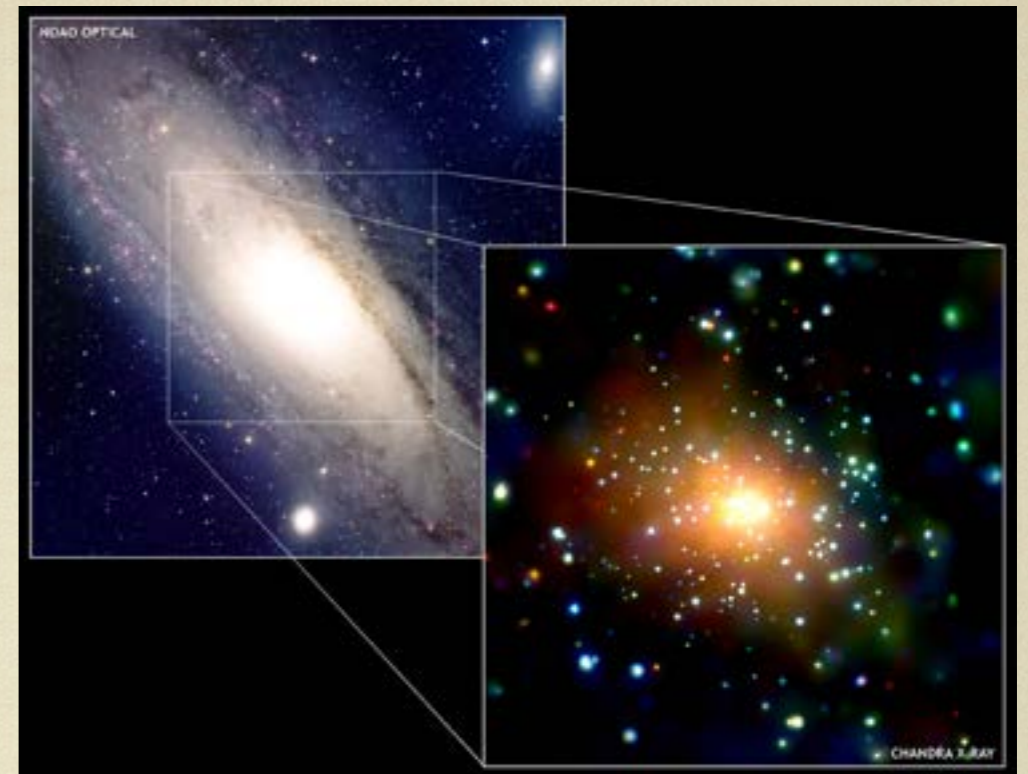
LOS RAYOS X



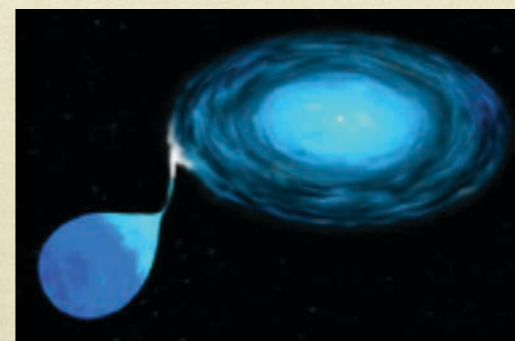
LOS RAYOS X : observando lo violento

- Estadios finales de la evolución estelar
 - Supernovas
 - Remanentes de supernovas
- Enanas blancas (variables cataclísmicas)
- Estrellas de neutrones (pulsares)
- Agujeros Negros estelares (Binarias de rayos X)
- **Galaxias con Formación Estelar**
- **Galaxias Activas**
- **Cúmulos de Galaxias**

M31



REMANENTES
DE
SUPERNOVA



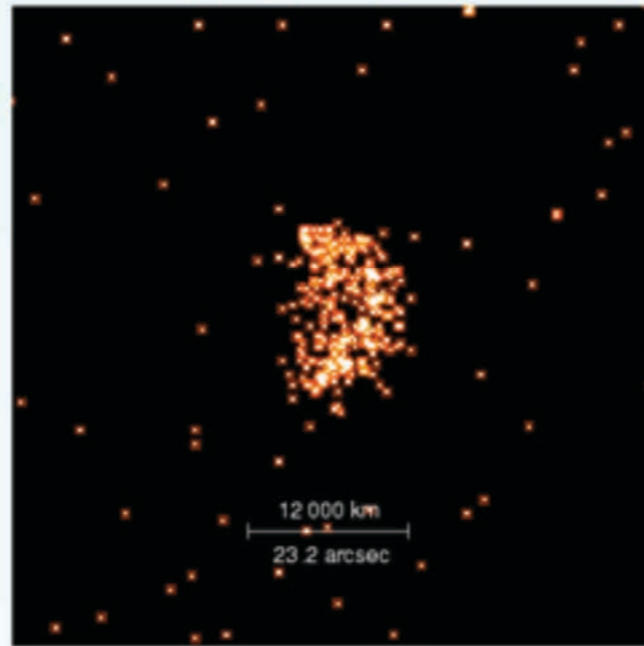
EL "GORDO"



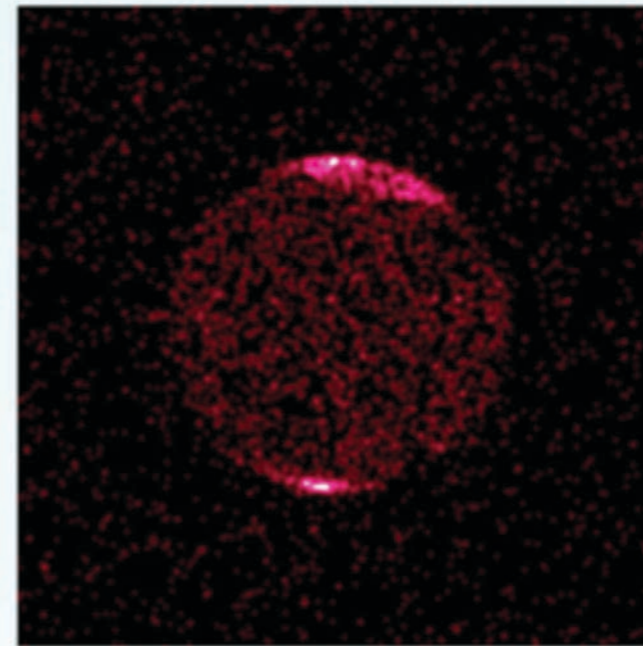
LOS RAYOS X

Solar system in X-rays

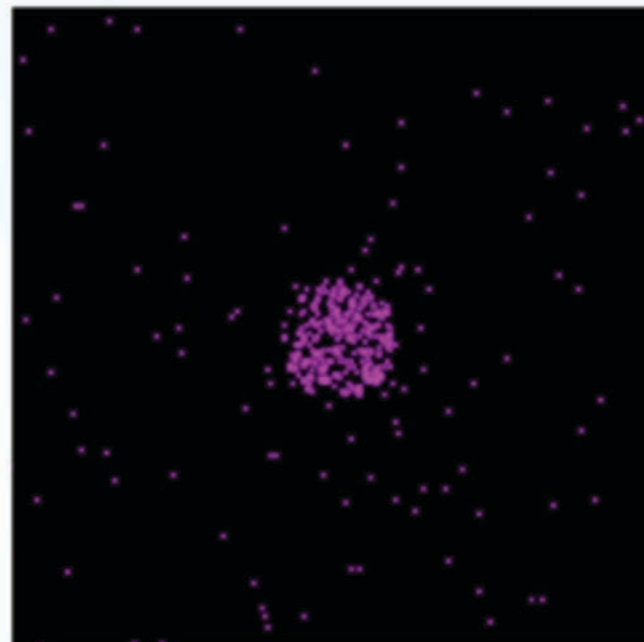
Venus



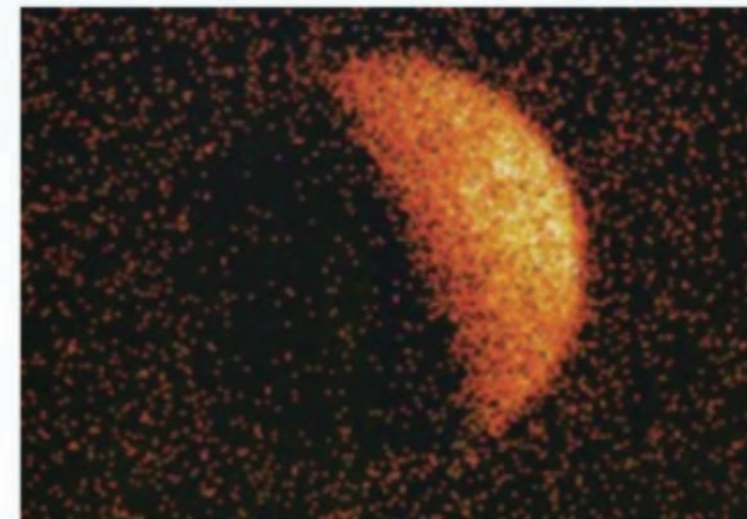
Jupiter



Mars



Moon



LOS RAYOS X

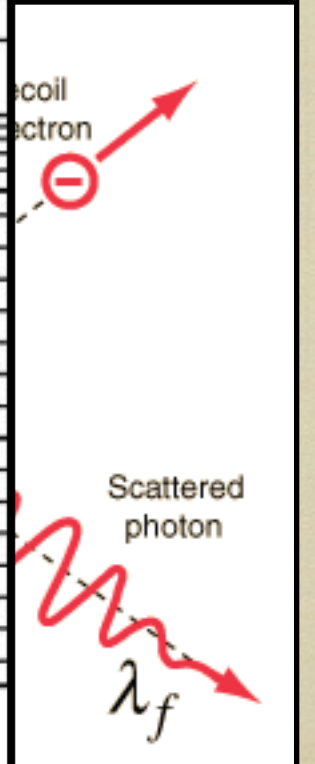
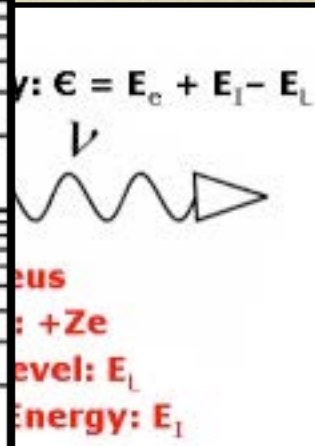
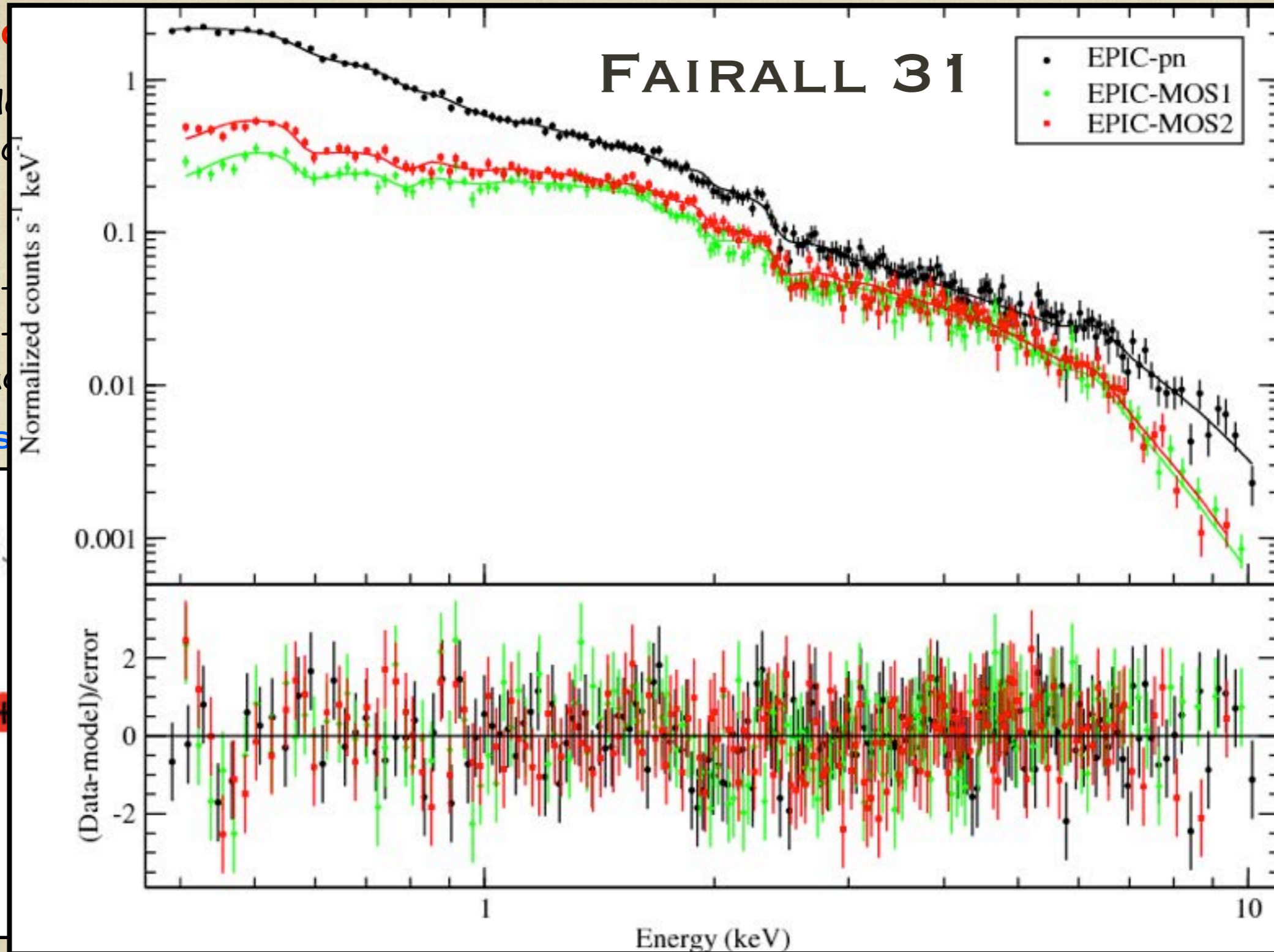
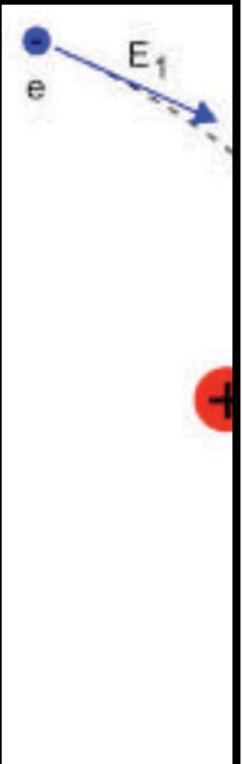
EMISIÓN

Emisión de
Material

Procesos

- Libre
- Libre
- Radiac

BREMSS

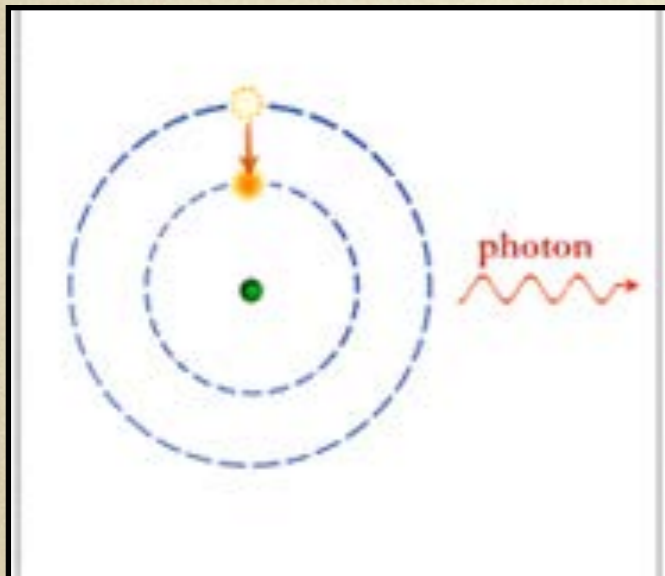


LOS RAYOS X

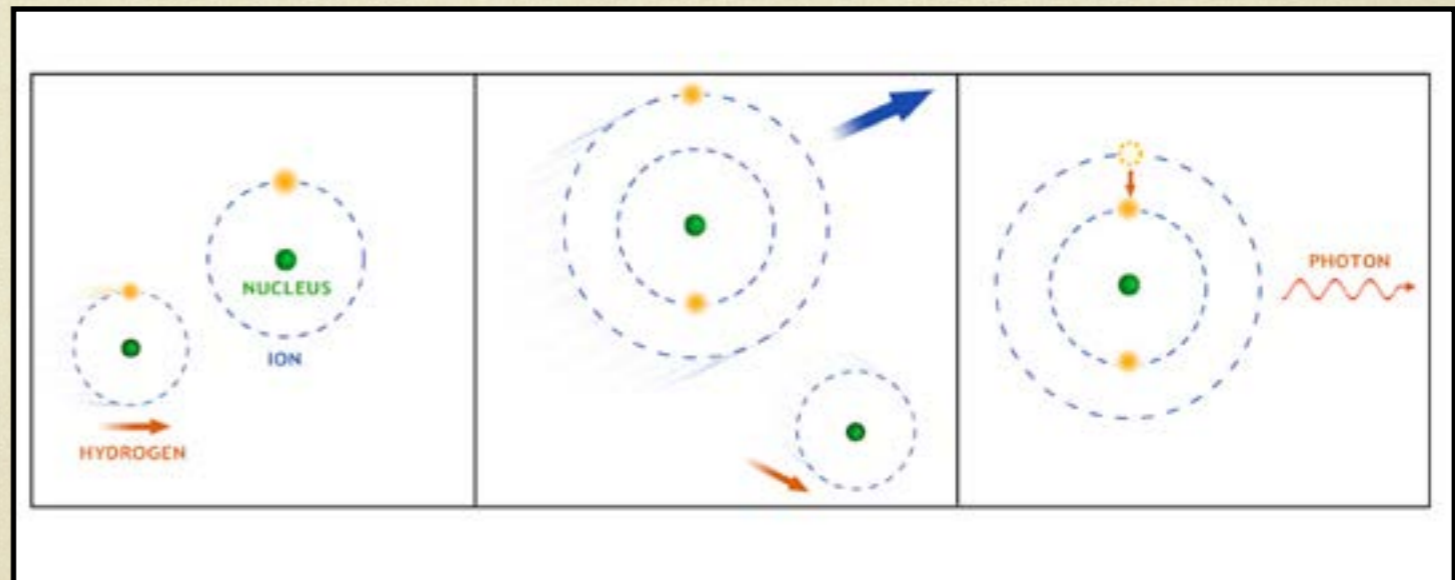
LÍNEAS DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN

- Radiación ligado-ligado: e^- cambia de un nivel atómico de mayor energía a otro de menor energía
- Radiación de fluorescencia: fotón excita un átomo
- Intercambio de carga: ión interacciona con un átomo neutro y cambian los electrones
- Absorción ligado: átomo absorbe un fotón de una energía bien definida

RADIACIÓN LIGADO-LIGADO

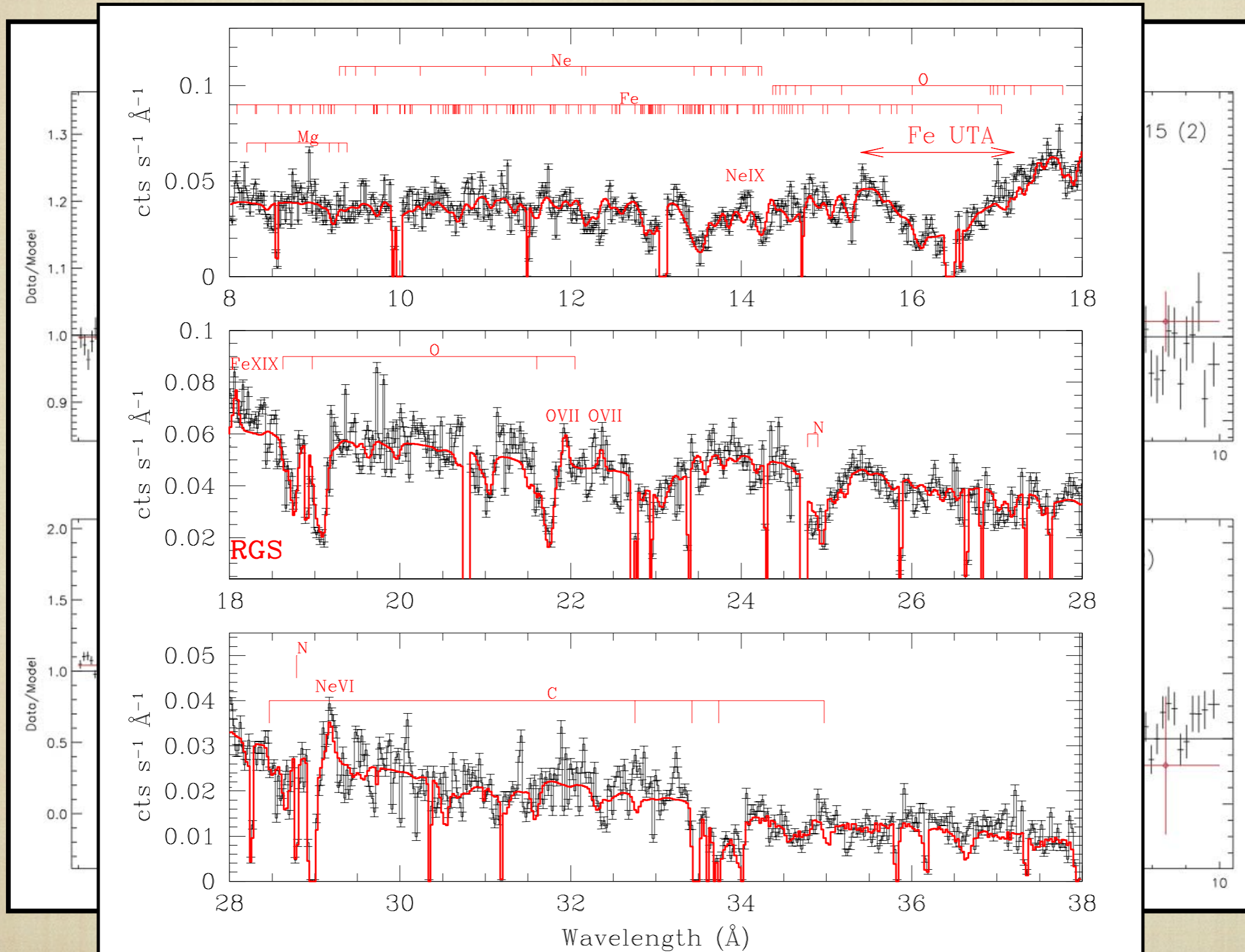


INTERCAMBIO DE CARGA



LOS RAYOS X

LÍNEAS DE EMISIÓN Y ABSORCIÓN



Atmospheric absorption

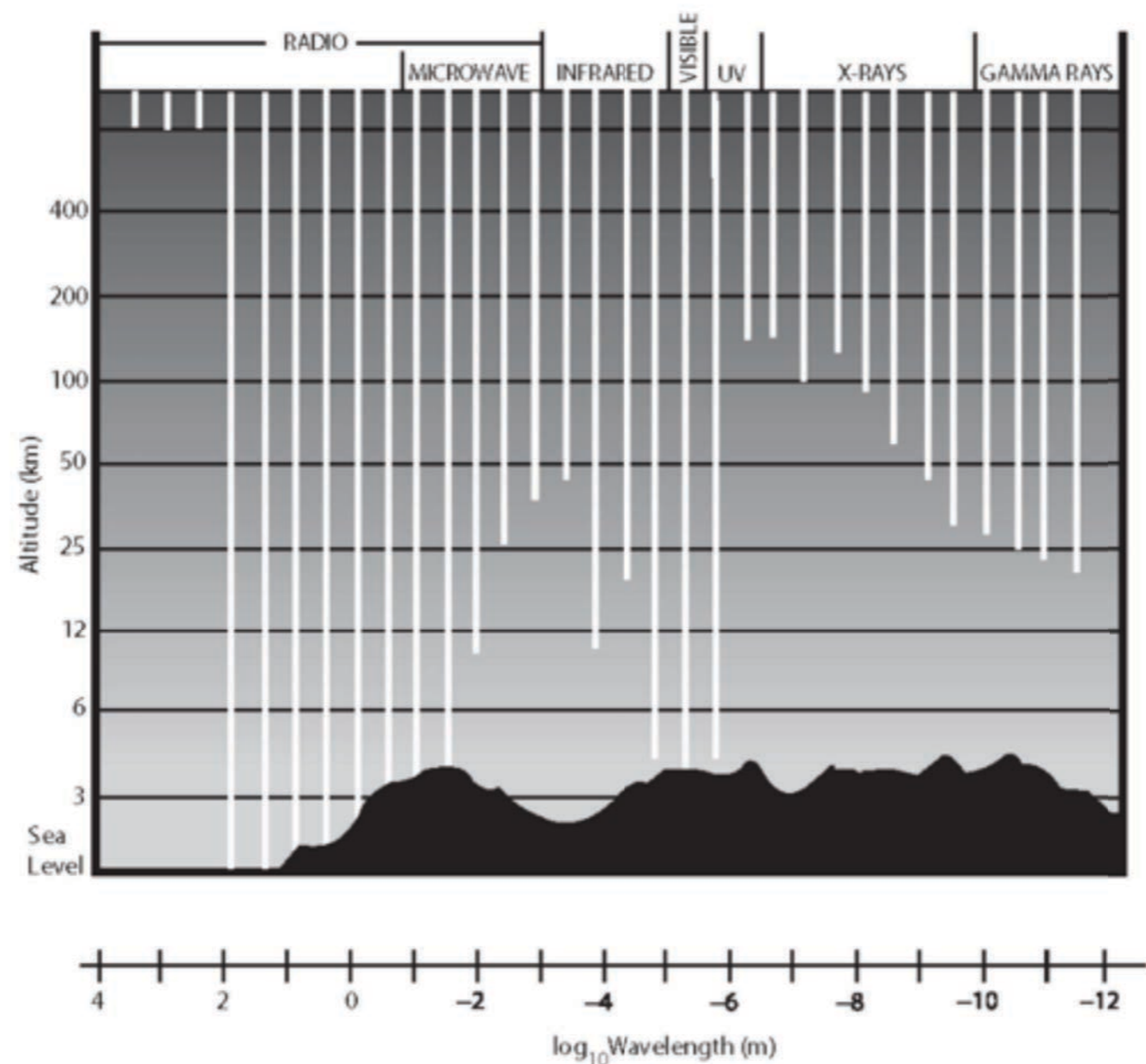


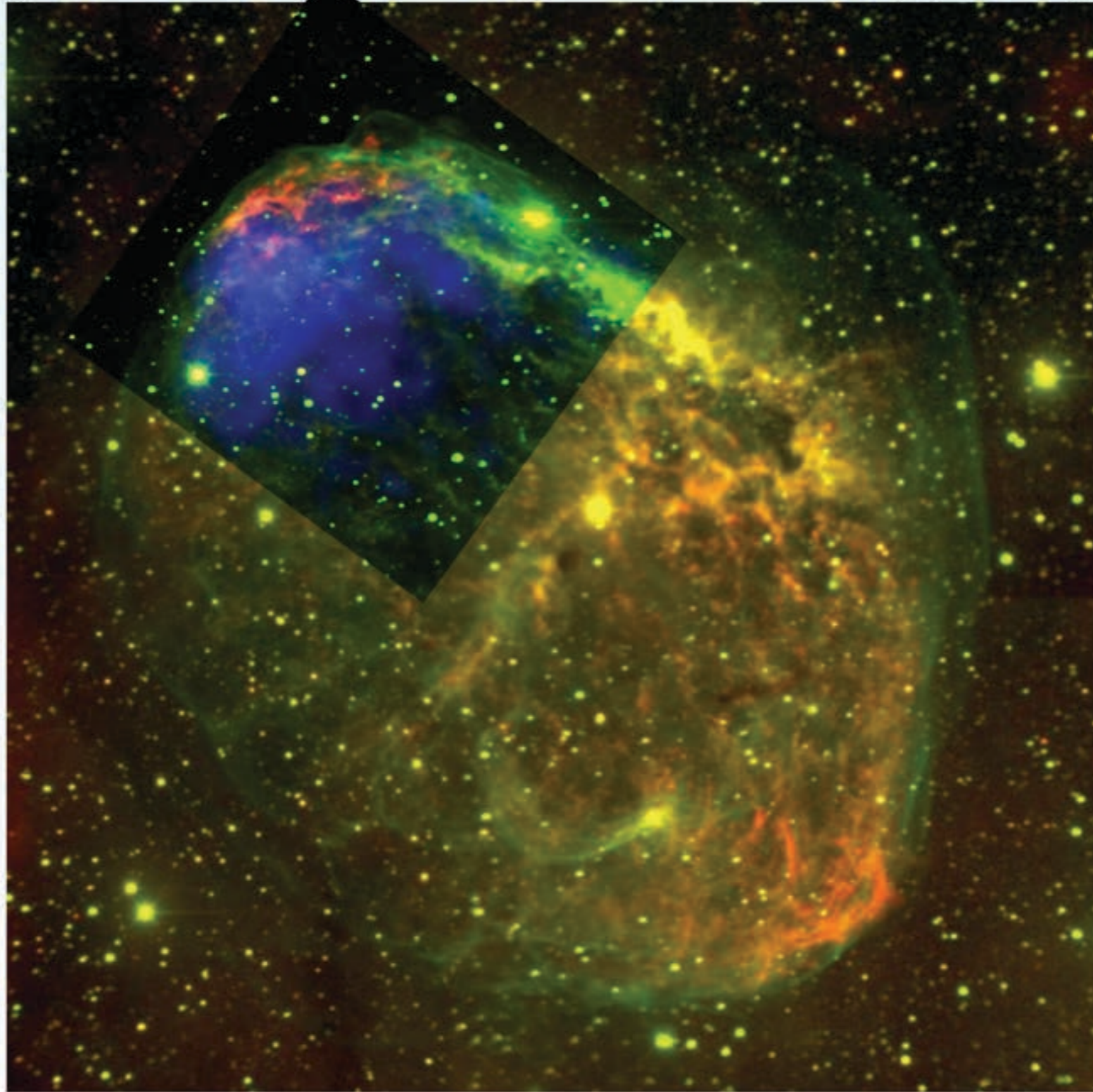
Figure 1.4 Transparency of Earth's atmosphere as a function of wavelength, showing the depth (in km) to which photons of a given energy will penetrate before being absorbed or scattered. The surface of the Earth is completely shielded from that portion of the spectrum (beyond the UV) of particular relevance to high-energy astrophysics. (Image courtesy of Jerry Woodfill and NASA)

LOS INSTRUMENTOS

XMM-NEWTON
CHANDRA
SUZAKU



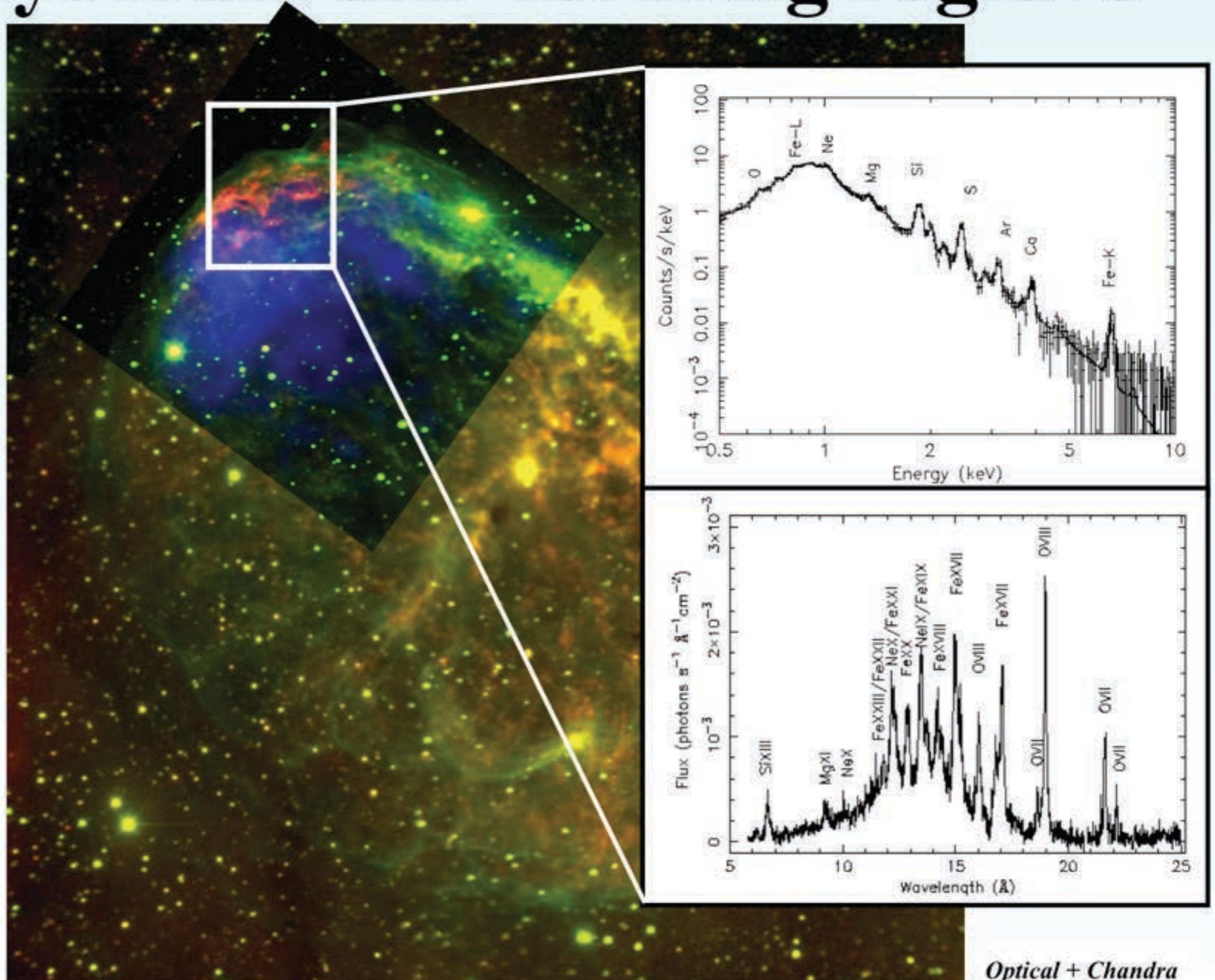
X-rays from star-forming regions



NGC 6888

Optical + Chandra

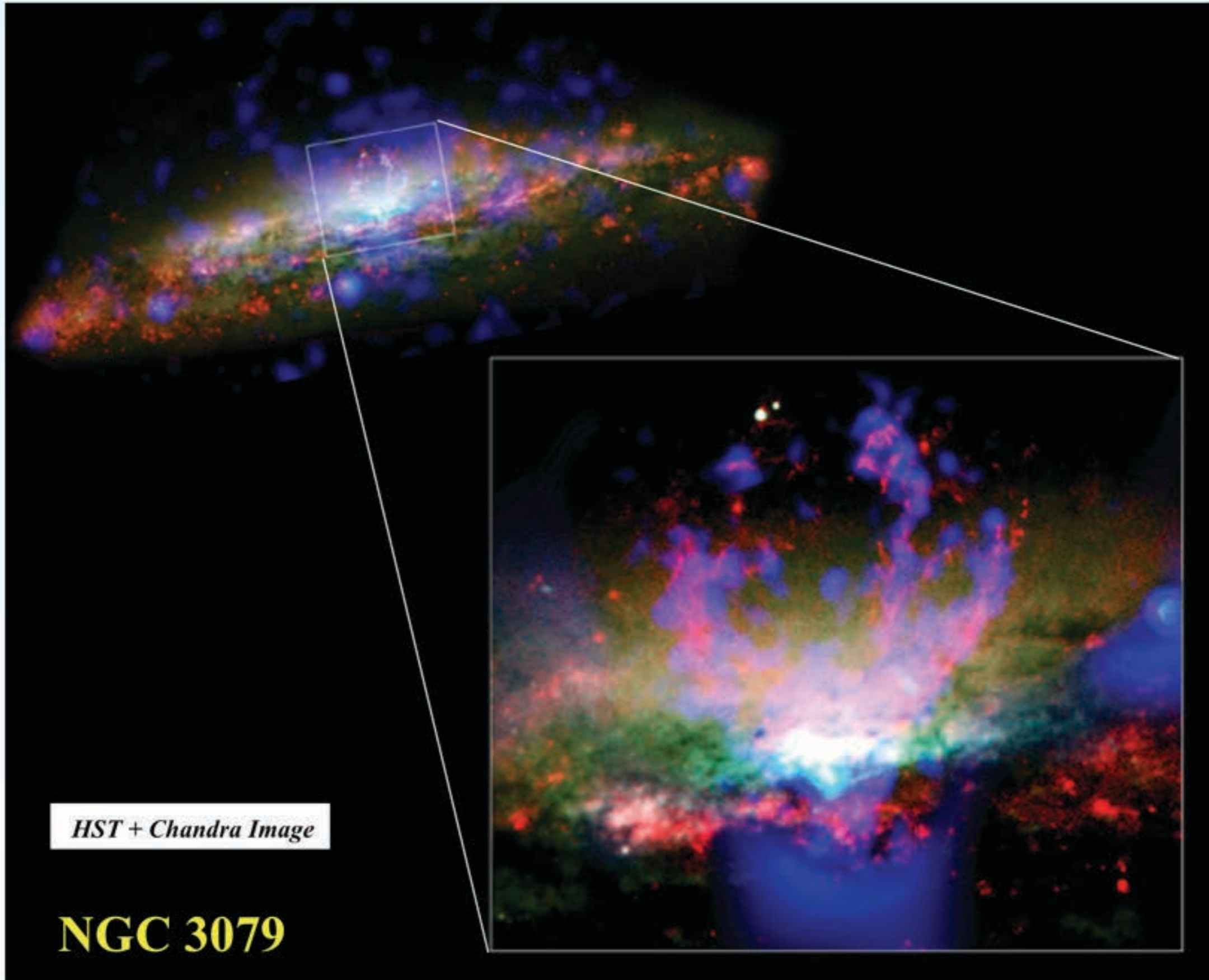
X-rays from star-forming regions



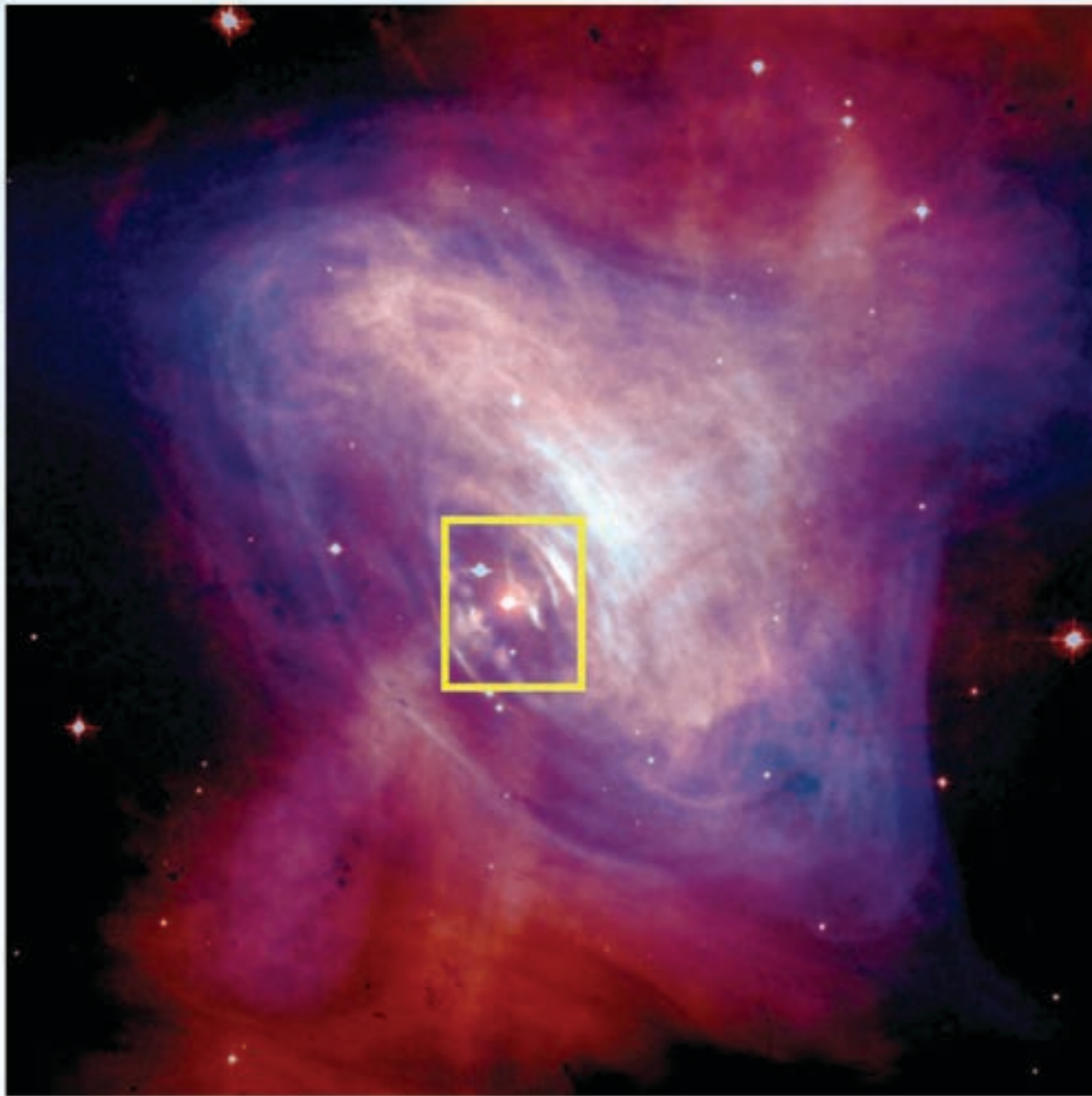
NGC 6888

Optical + Chandra

Slow outflows from galaxies



Supernova Remnant: Crab

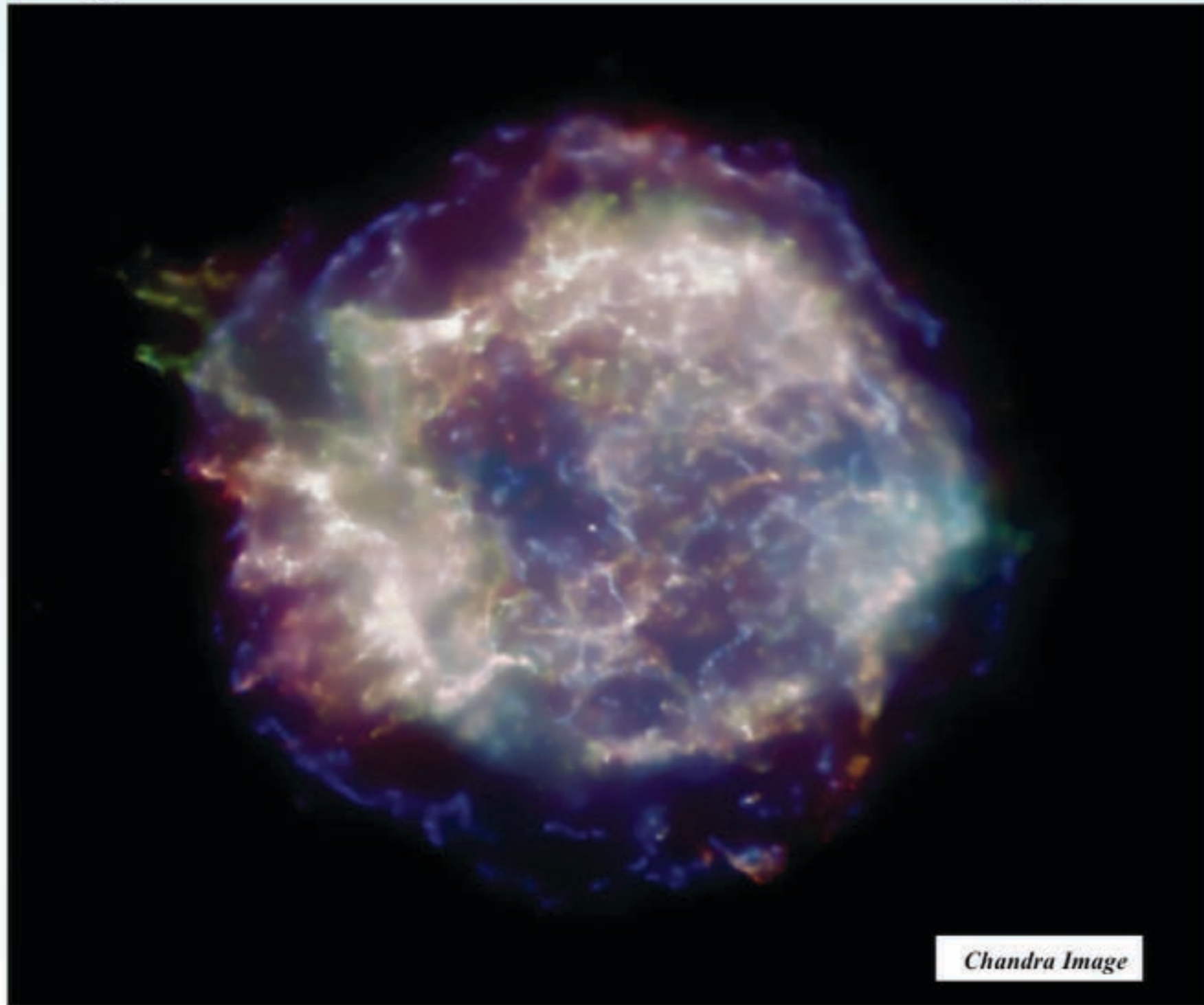


The Crab Nebula:

In 1054 AD, Chinese astronomers and others around the world noticed a new bright object in the sky. This “new star” was, in fact, the supernova explosion that created what is now called the Crab Nebula. At the center of the Crab Nebula is **an extremely dense, rapidly rotating neutron star** left behind by the explosion. The neutron star, also known as a pulsar, is spewing out a blizzard of **high-energy particles, producing the expanding X-ray nebula** seen by Chandra. In this new image, lower-energy X-rays from Chandra are red, medium energy X-rays are green, and the highest-energy X-rays are blue

Chandra Image

Supernova Remnant: Cassiopea A



Cassiopea A

At the center of the image is a neutron star, an ultra-dense star created by the supernova. Ten years of observations with Chandra have revealed a 4% decline in the temperature of this neutron star, an unexpectedly rapid cooling. Two papers by independent research teams show that this cooling is likely caused by **a neutron superfluid forming in its central regions**, the first direct evidence for this bizarre state of matter in the core of a neutron star.

Galaxias Normales

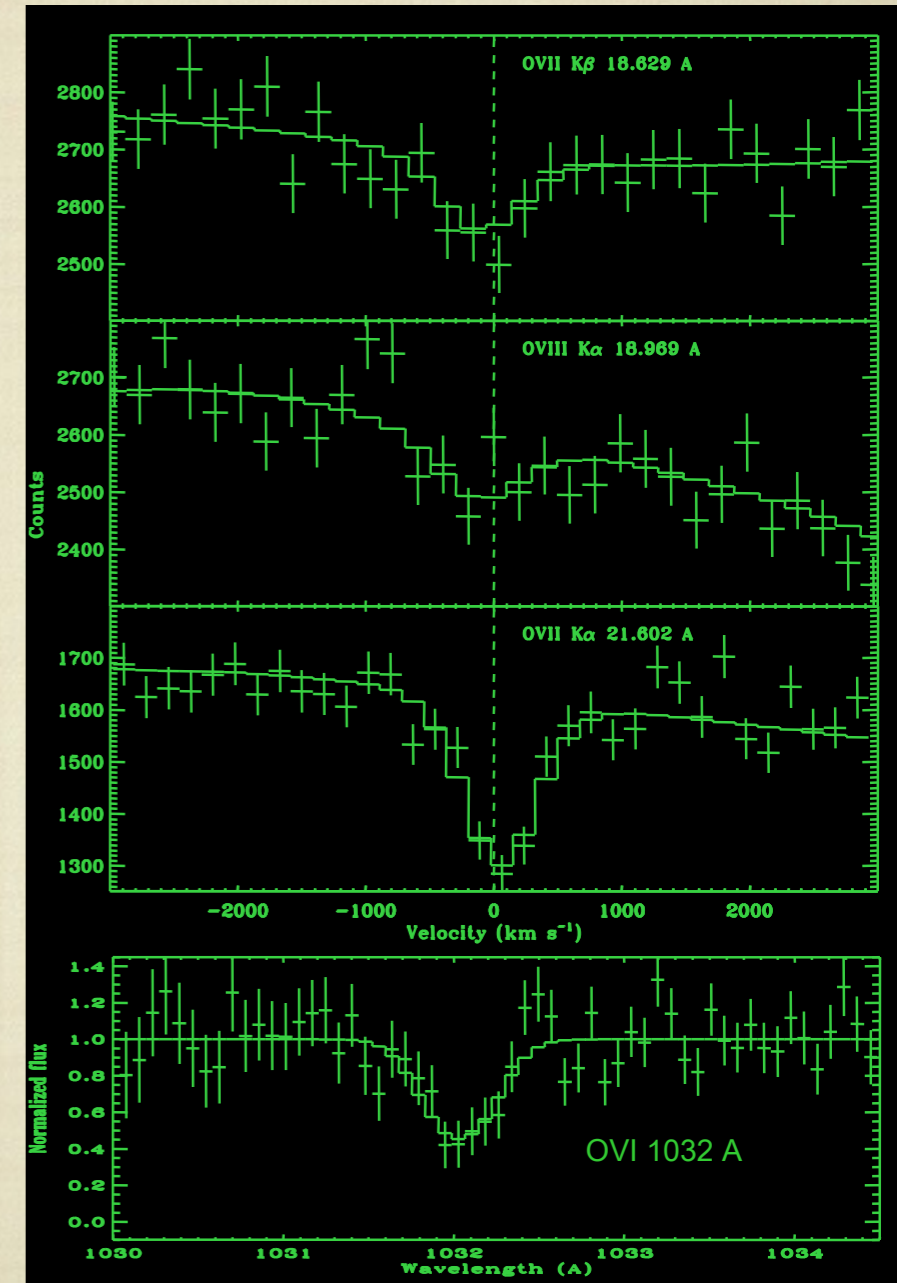
Componentes fundamentales de la emisión en rayos X de las galaxias

- + Binarias de rayos X y variables cataclísmicas
- + Remantes de Supernovas
- + Estrellas normales
- + Gas caliente

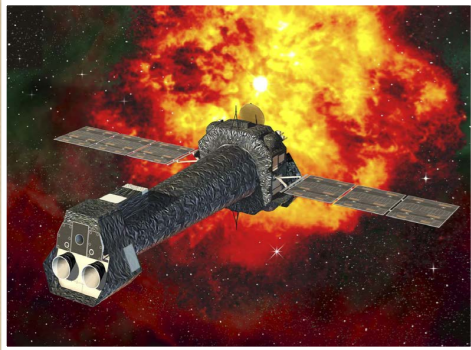
Los espectrógrafos de alta resolución permiten estudiar las líneas de absorción en bandas K y L de varios elementos, los más abundantes: Oxígeno y Neón.

Con ellos es posible hacer diagnóstico del gas del medio interestelar: abundancia, temperatura, velocidad y la absorción.

LMC-X3 --> Wang et al. 2005; Yao et al 2008,2009



Galaxias Normales



Componentes fundamentales de la emisión en rayos X de las galaxias



NGC 4594:

$T \sim 6 \times 10^6$ K

$L_x \sim 4 \times 10^{39}$ erg/s

Li et al. 2007

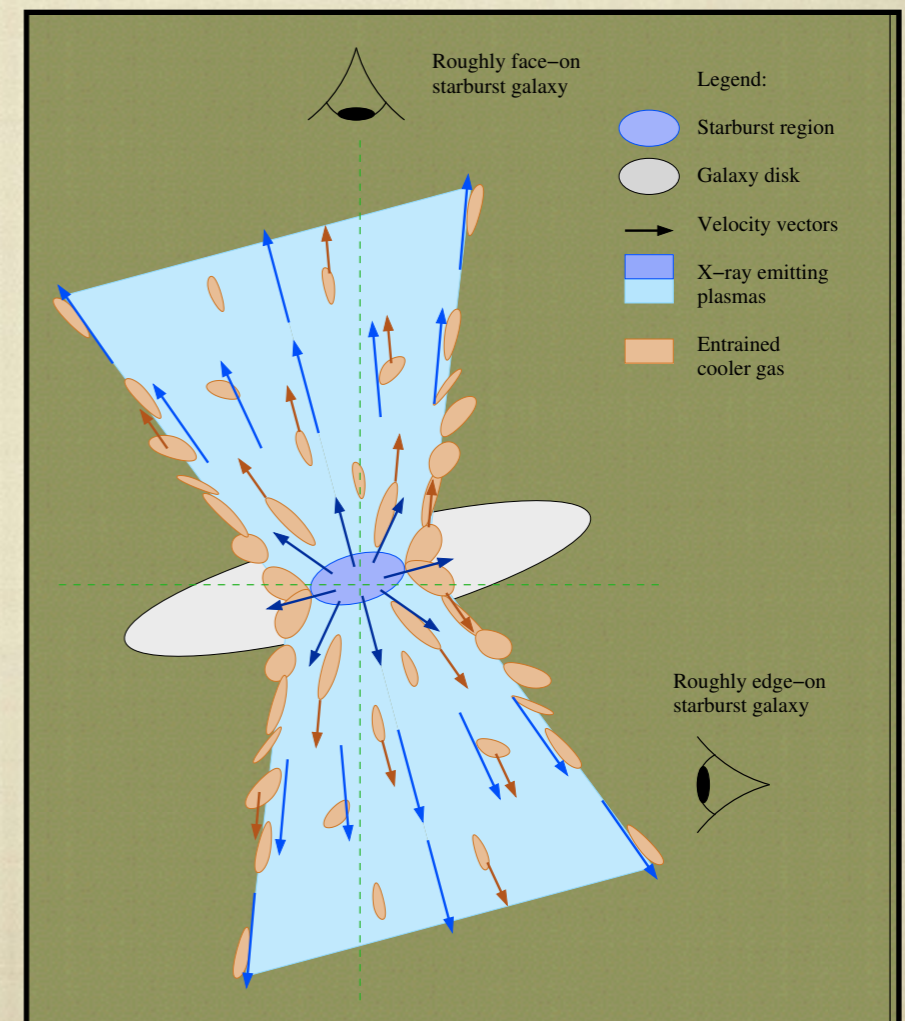
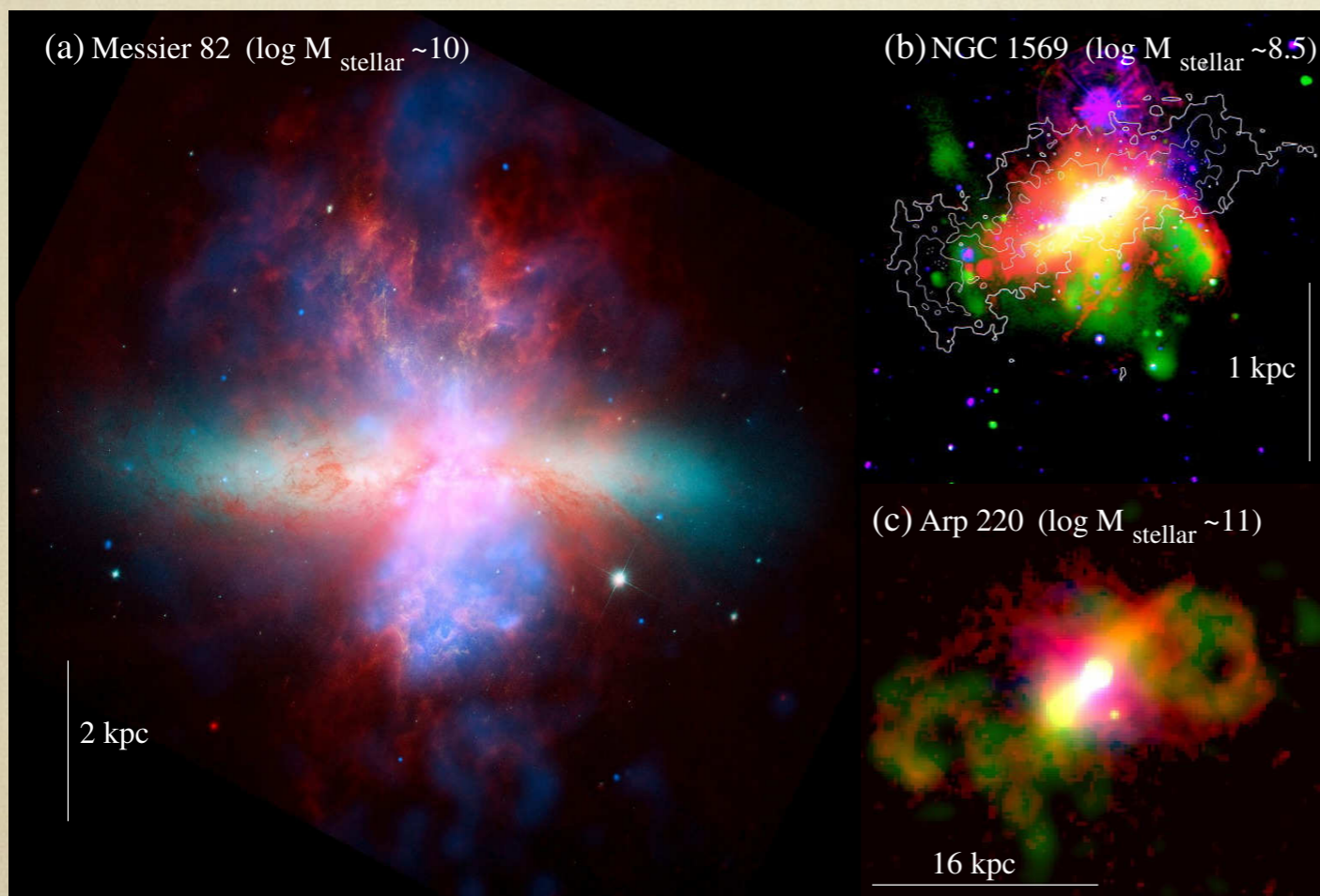
- + Las galaxias normales viven en una gran burbuja de gas caliente que emite en rayos X
- + El gas se extiende unos pocos Kpc (aunque para SB puede ser mayor)
- + Dos componentes del gas difuso caliente: 1) El disco dominado por estrellas masivas 2) el bulbo dominado por variables cataclísmicas y estrellas activas
- + La temperatura típica del gas caliente es de 10^6 K pero hay evidencias de gas a 10^7 K

Galaxias Normales

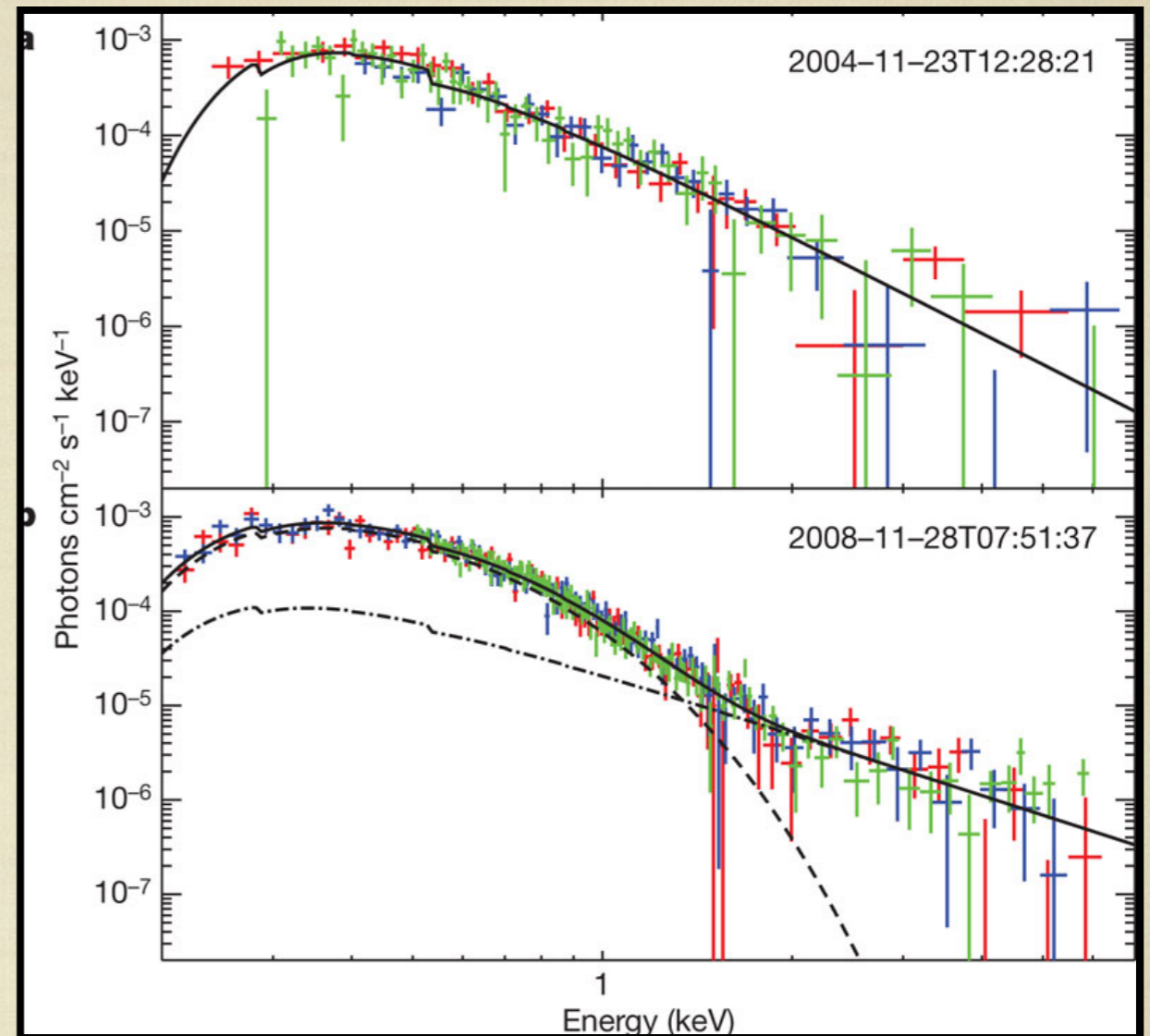
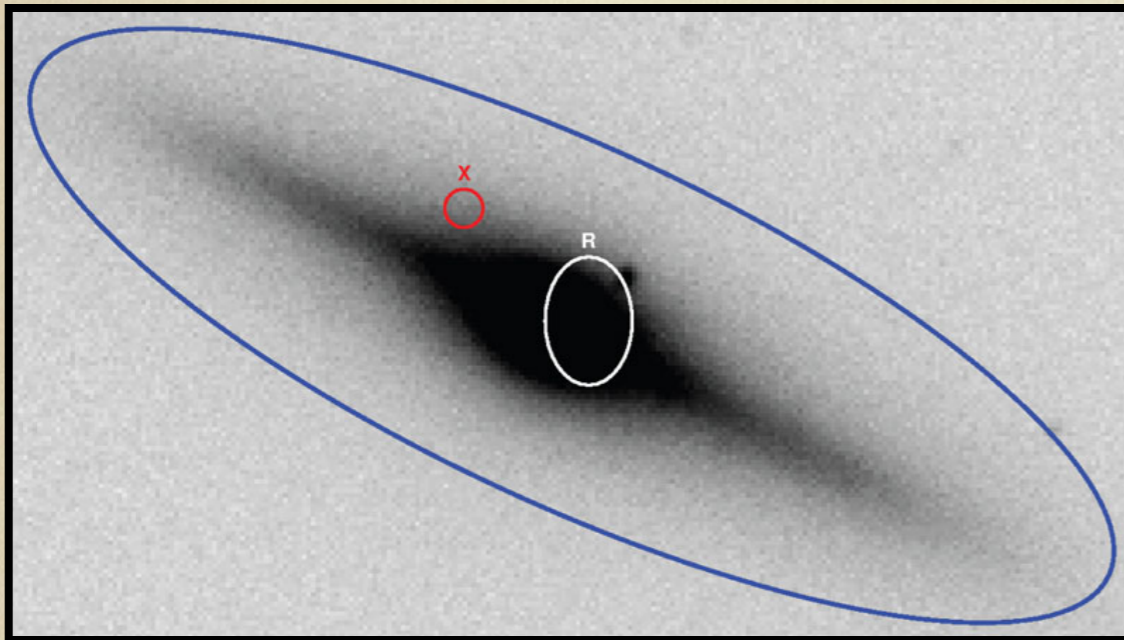
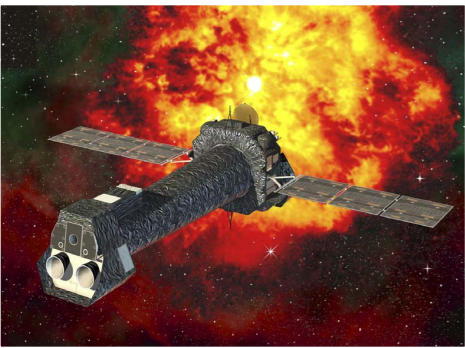
Componentes fundamentales de la emisión en rayos X de las galaxias

Los supervientos galácticos juegan un papel fundamental en la retroalimentación: los vientos estelares y las supernovas son responsables de crear la fase caliente y muy enriquecida del gas interestelar a $T \sim 10^{6-7}$ K que emiten en rayos X.

Mass rate = $2 M_{\text{sol}}/\text{año}$ **Strickland et al 2009**



Agujeros Negros Intermedios

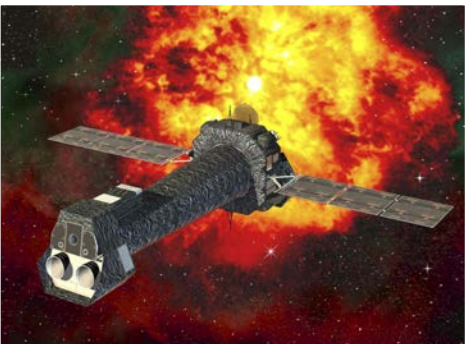


2XMM J011028.1-460421

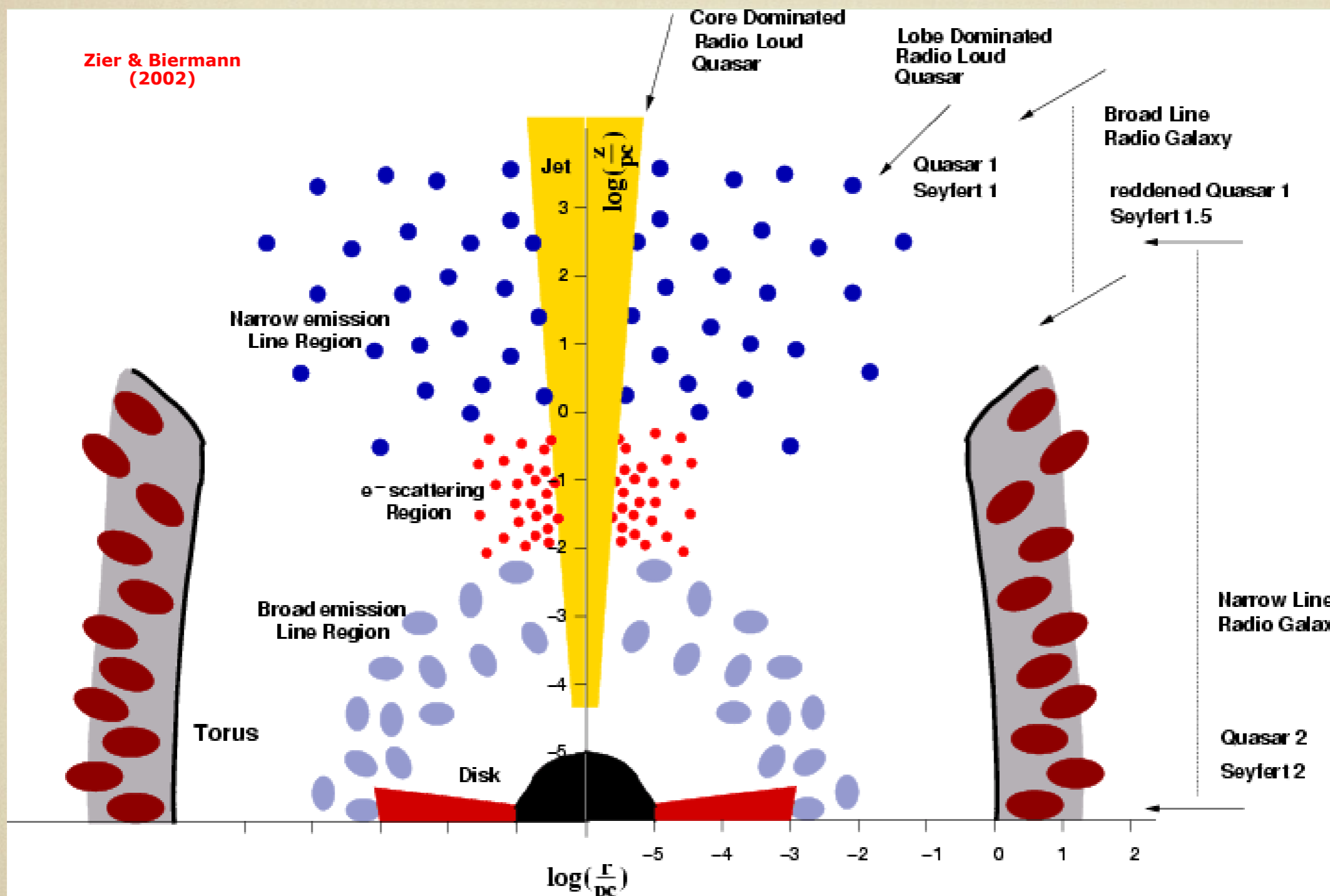
- + Identificado en el 2XMM Serendipitous Source Catalogue
- + Cerca de ESO 243-49
- + Estudios de variabilidad indican que se trata de una sola fuente
- + $L=1.1 \times 10^{42}$ erg/s y $M > 500 M_{\text{sol}}$

Farrell, et al., 2009, Nature

Núcleos Galácticos Activos



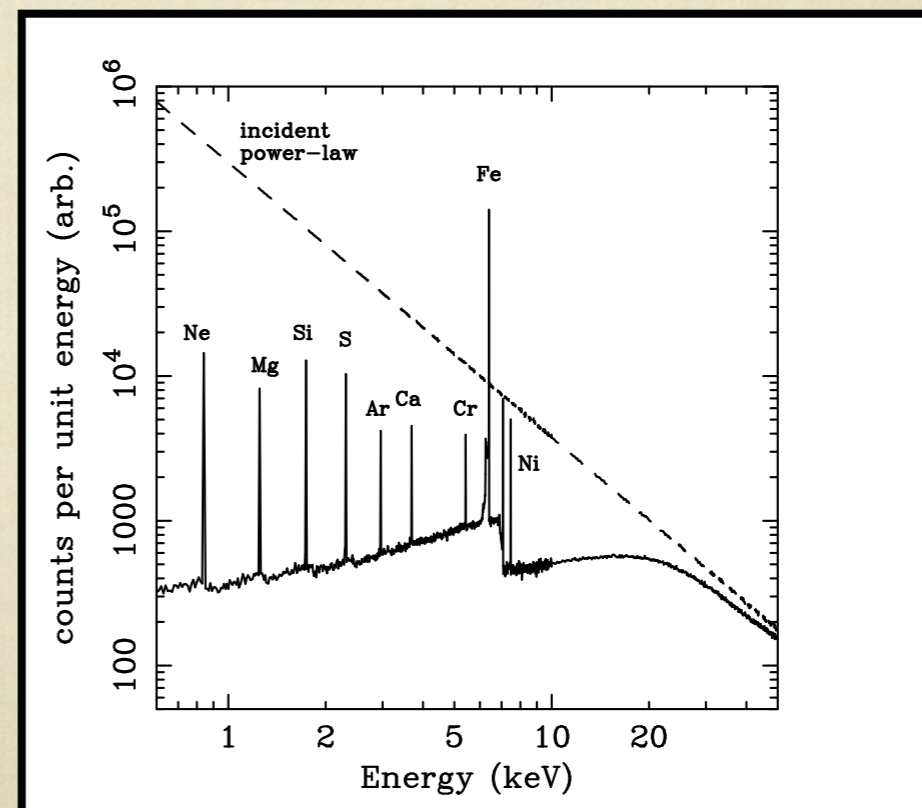
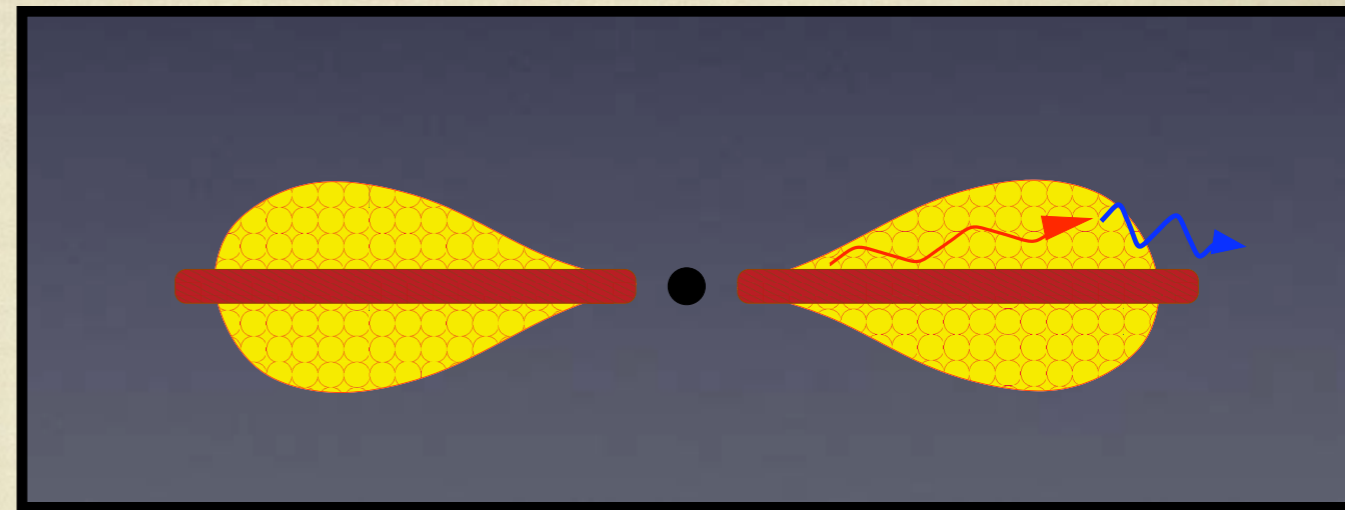
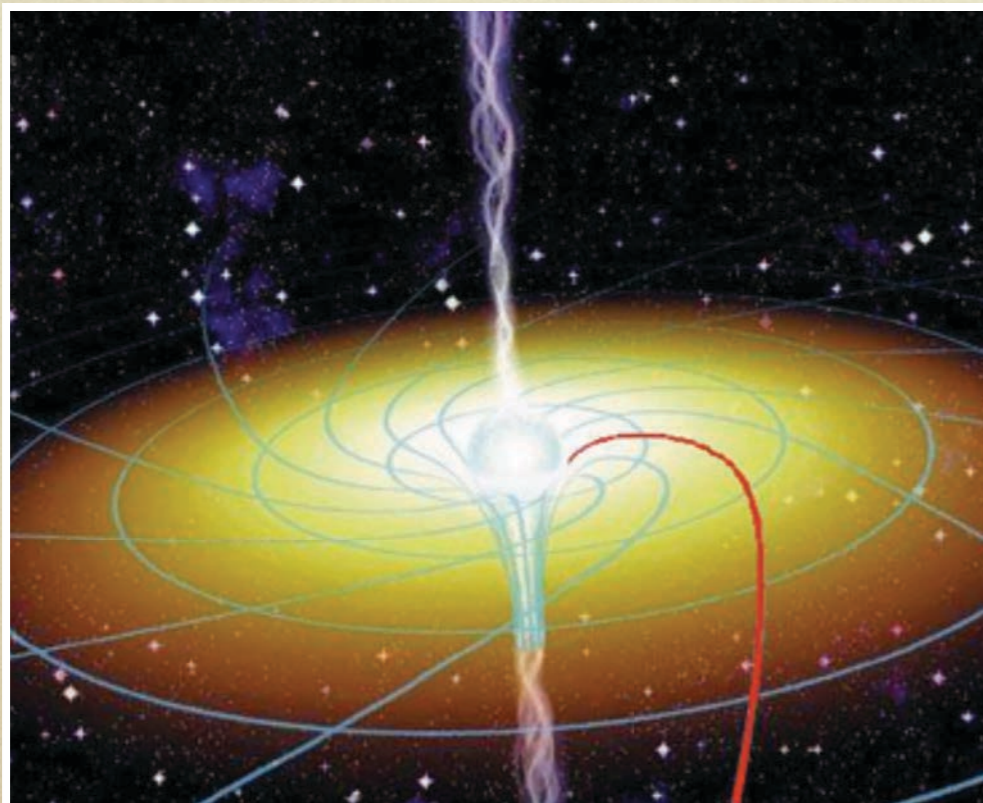
Zier & Biermann
(2002)



Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

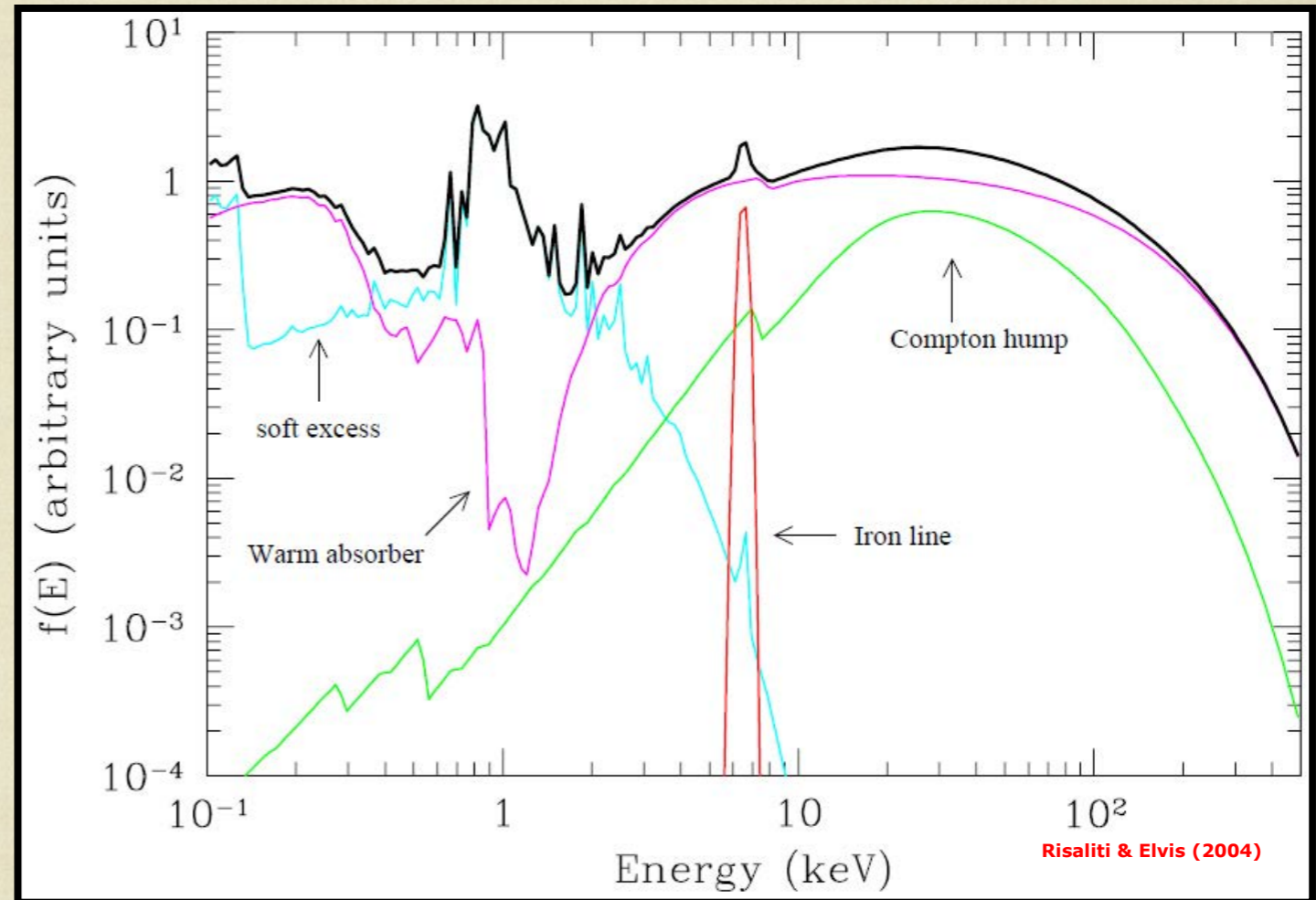
- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con los e^- de la corona
- + Espectro de reflexión



Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

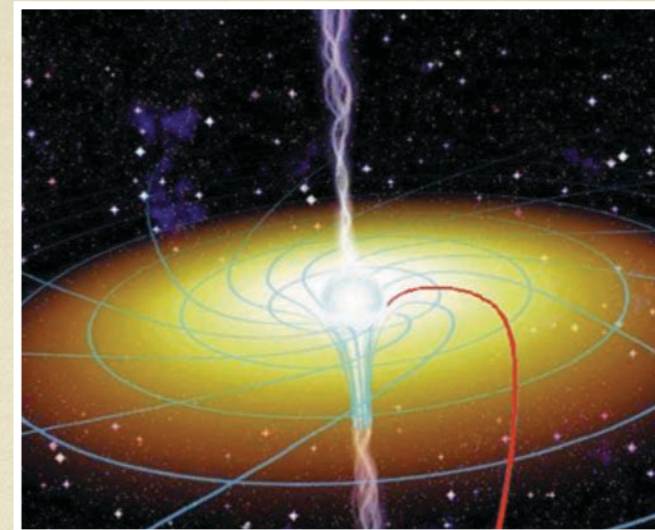
- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con la corona -> ley de potencias
- + Espectro de reflexión
- + **Línea de emisión de Fe**
- + El "Soft Excess"
- + La absorción fría
- + La absorción tibia



Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

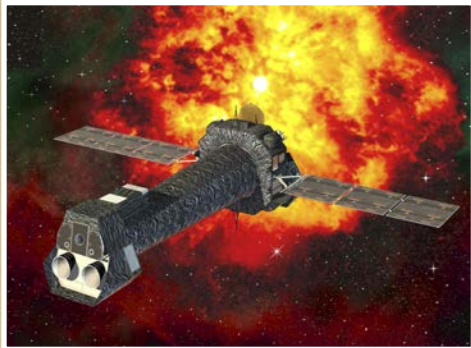
- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con los e^- de la corona
- + Espectro de reflexión
- + **Línea de emisión de Fe a 6.4 keV**
- + El "Soft Excess"
- + La absorción fría
- + La absorción tibia



La línea de fluorescencia FeK_{α} es la más prominente de todas las líneas del espectro en rayos X. Esto es debido al campo de fluorescencia y a la gran abundancia de este elemento.

Existen dos tipos de líneas de Fe:

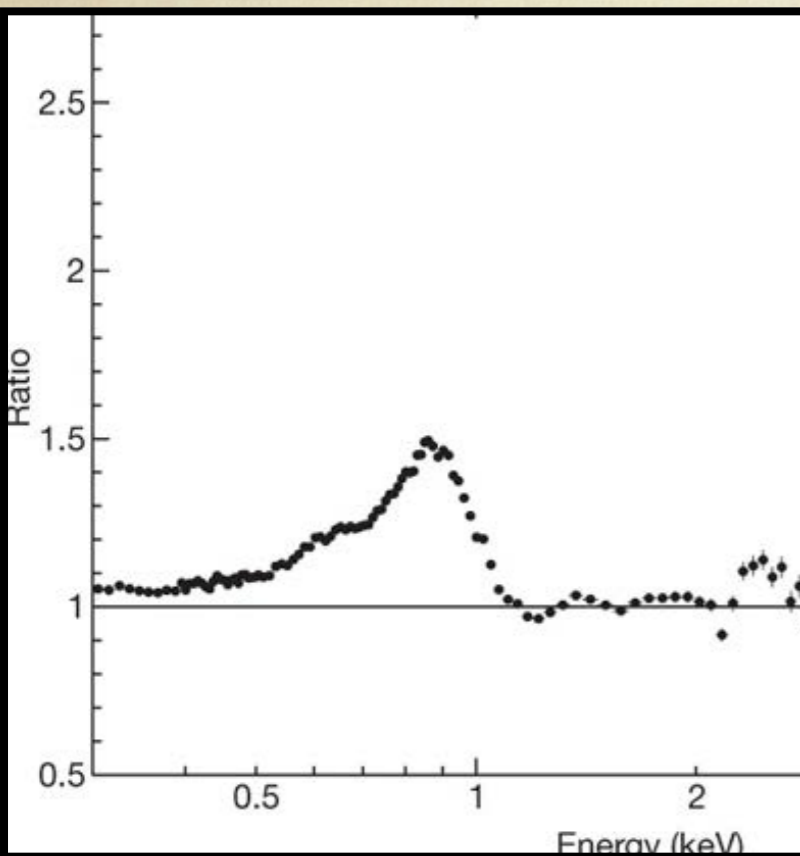
- 1) La línea estrecha de Fe se genera en material neutro o muy poco ionizado, su anchura equivalente es del orden de 200 eV. El lugar donde se genera aún no se conoce con certeza, podría ser el toro, la NLR o la BLR.
- 2) Cuando la línea se genera en las regiones interiores del disco de acrecimiento, los efectos gravitatorios se hacen importantes y hacen que la línea se ensanche y se corra al rojo.



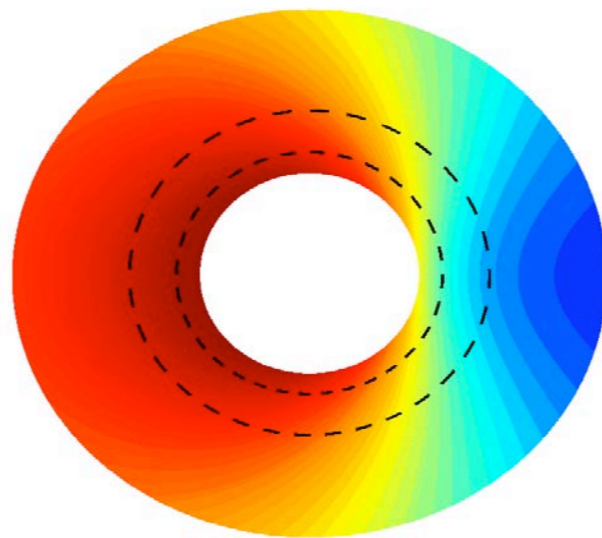
Núcl

La línea de Fe relativista

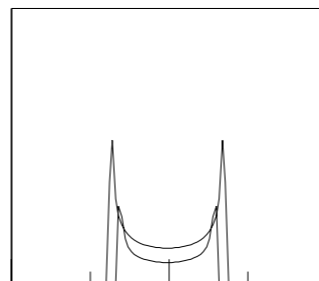
Dependencia con diferentes
Estudios sistemáticos: FE
2005, Nandra et al 2007;



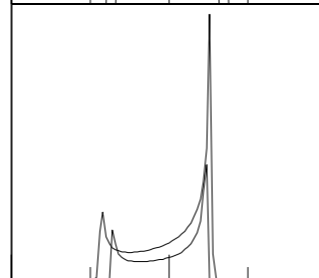
1H 0707-495



Newtonian

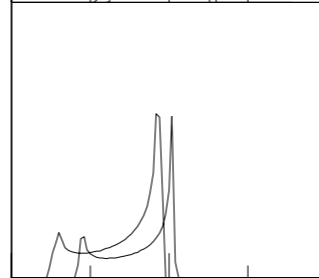


Special relativity



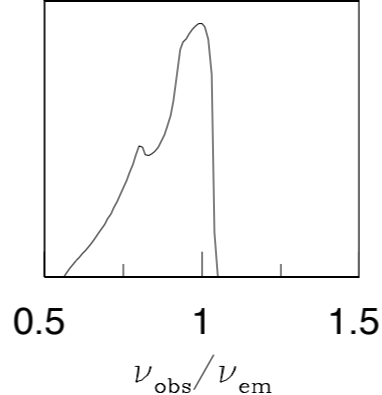
Transverse Doppler shift
Beaming

General relativity

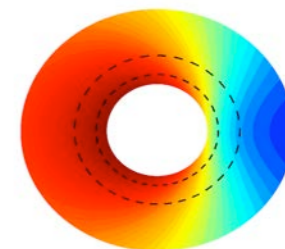
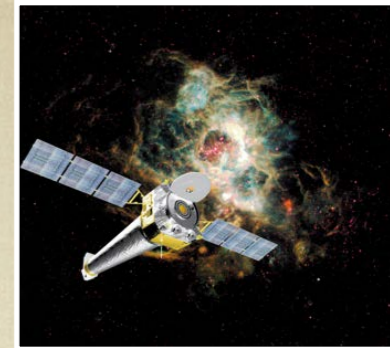


Gravitational redshift

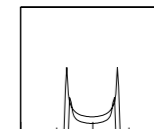
Line profile



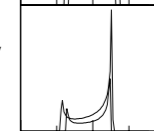
OS



Newtonian

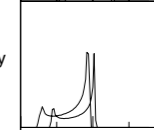


Special relativity



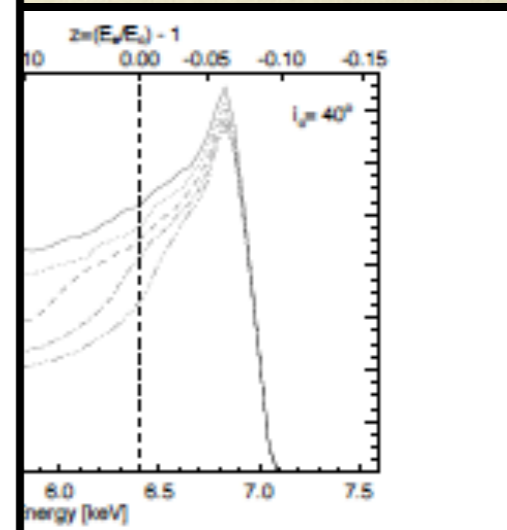
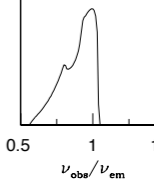
Transverse Doppler shift
Beaming

General relativity

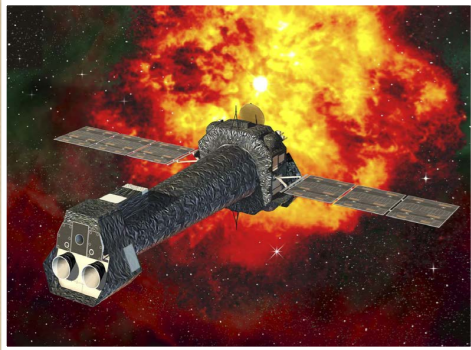


Gravitational redshift

Line profile



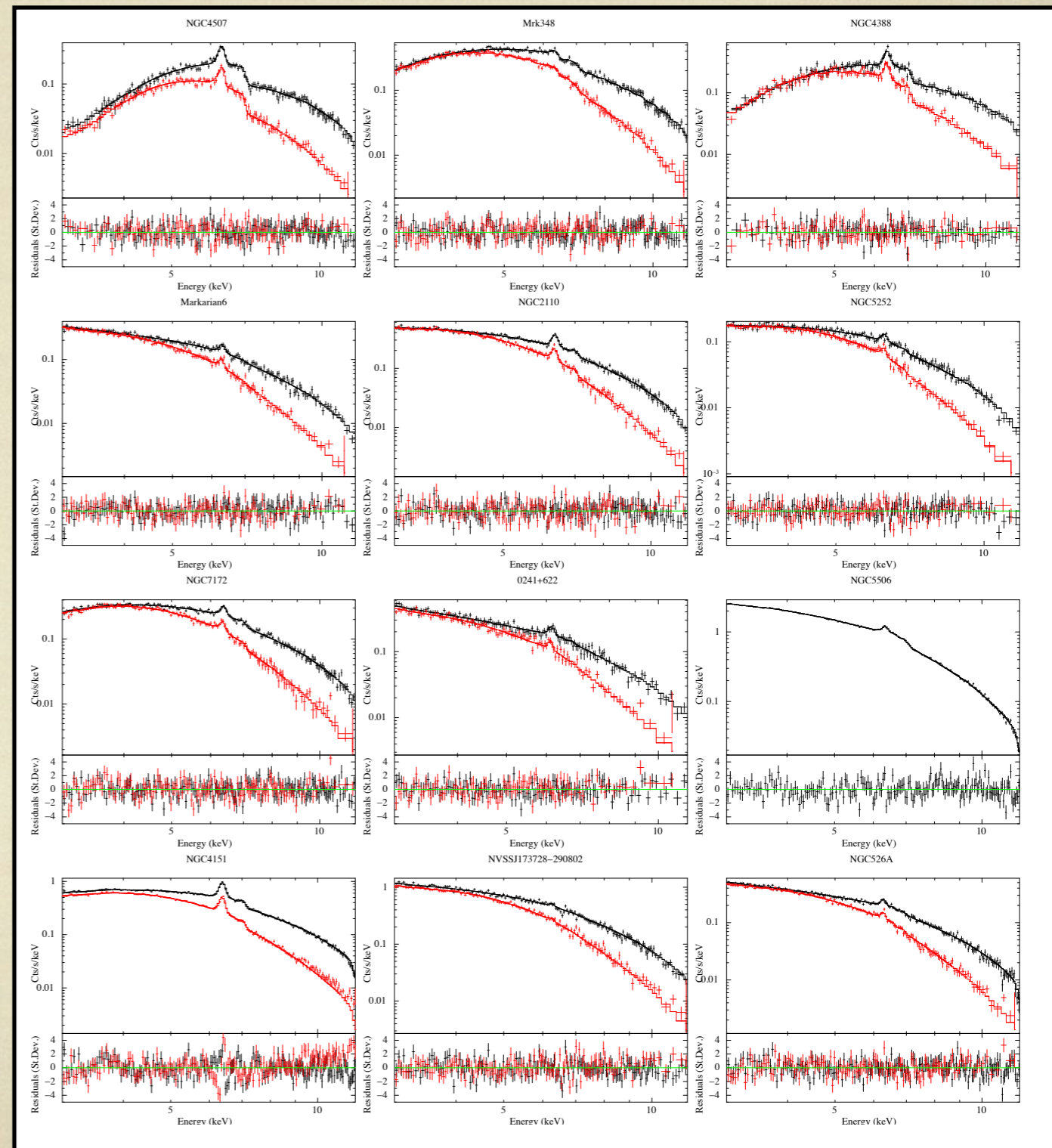
Núcleos Galácticos Activos



La línea de Fe relativista

Resultados

- + 10% de las fuentes presentan la línea de Fe ancha
- + En la muestra limitada en flujo, el 36% presentan línea de Fe ancha
- + Todas las detecciones se producen para $L < 10^{44}$ erg/s
- + Igualando el número de fuentes tipo QSO y Seyfert no se encuentra ninguna diferencia.
- + El valor medio de la inclinación es de 28 ± 5 deg
- + El spin no puede ser determinado con precisión

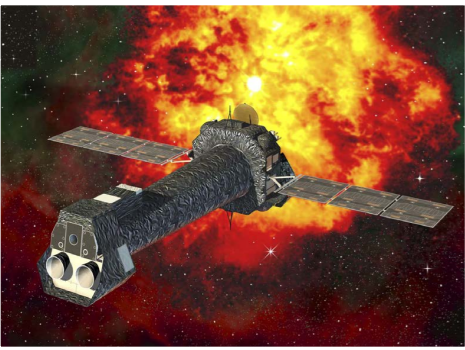
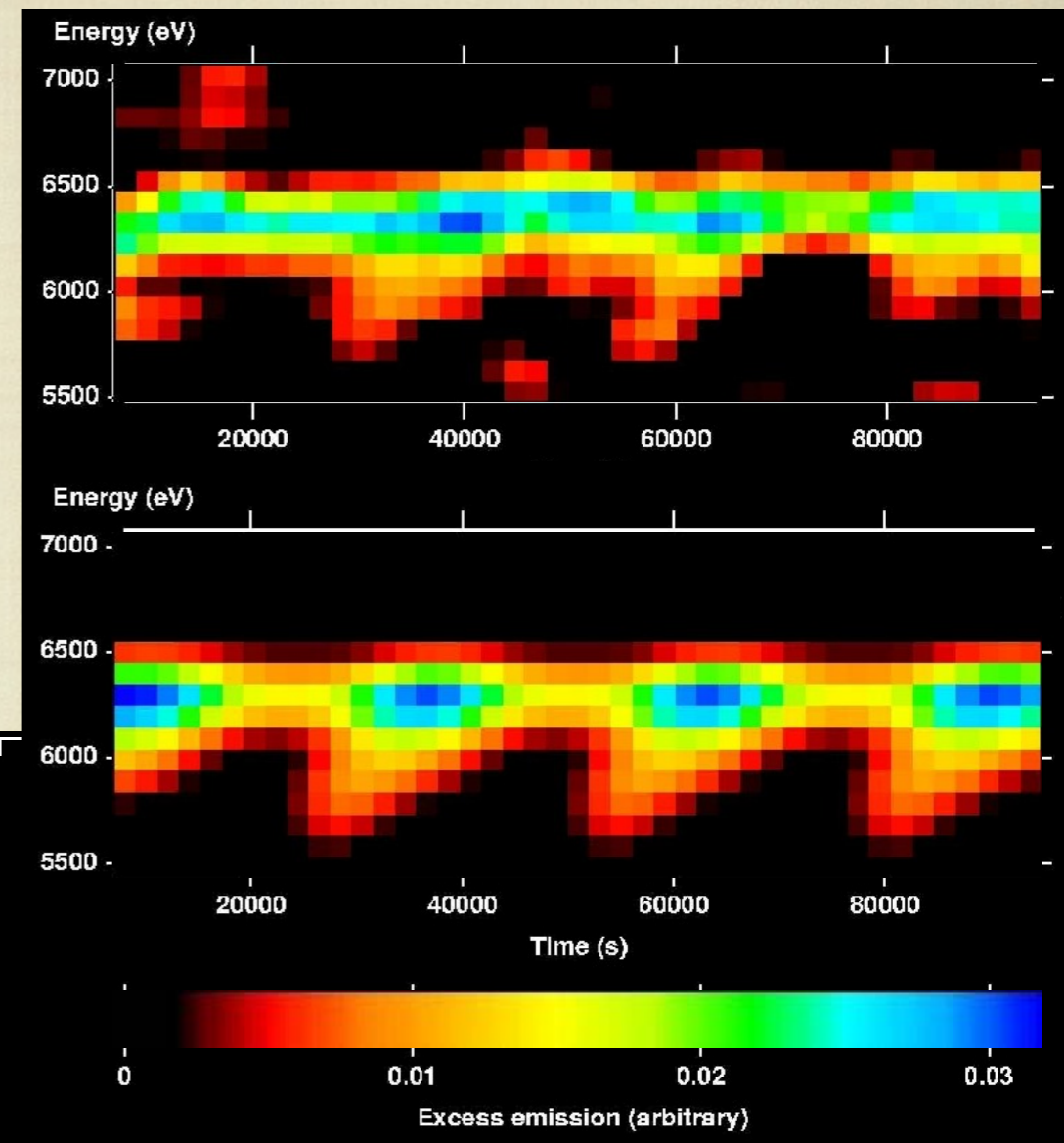
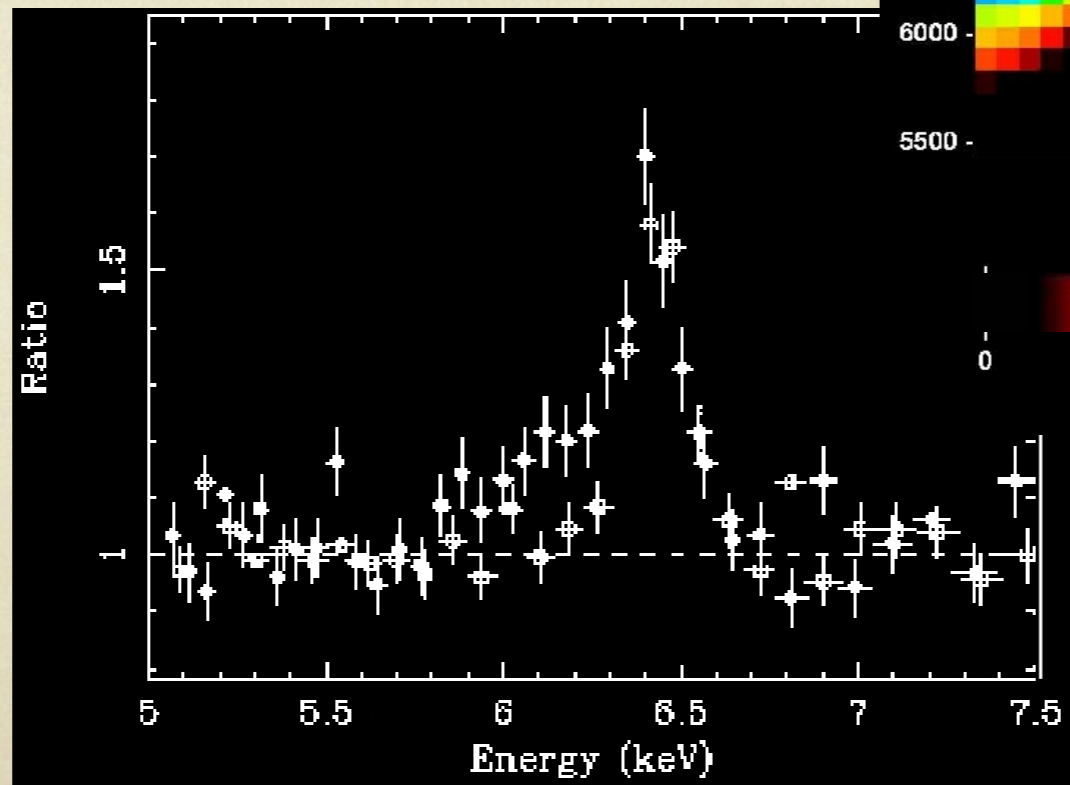


Núcleos Galácticos Activos

La línea de Fe "elusiva"

NGC3516: Además de la línea de hierro a 6.4 keV, se detecta una línea a 6.1 keV que varía su energía dentro de la observación desde 5.7 a 6.5 keV que se explica mediante un "hot spot" que co-rota en el disco a una distancia entre 3.5 y 8 r_g

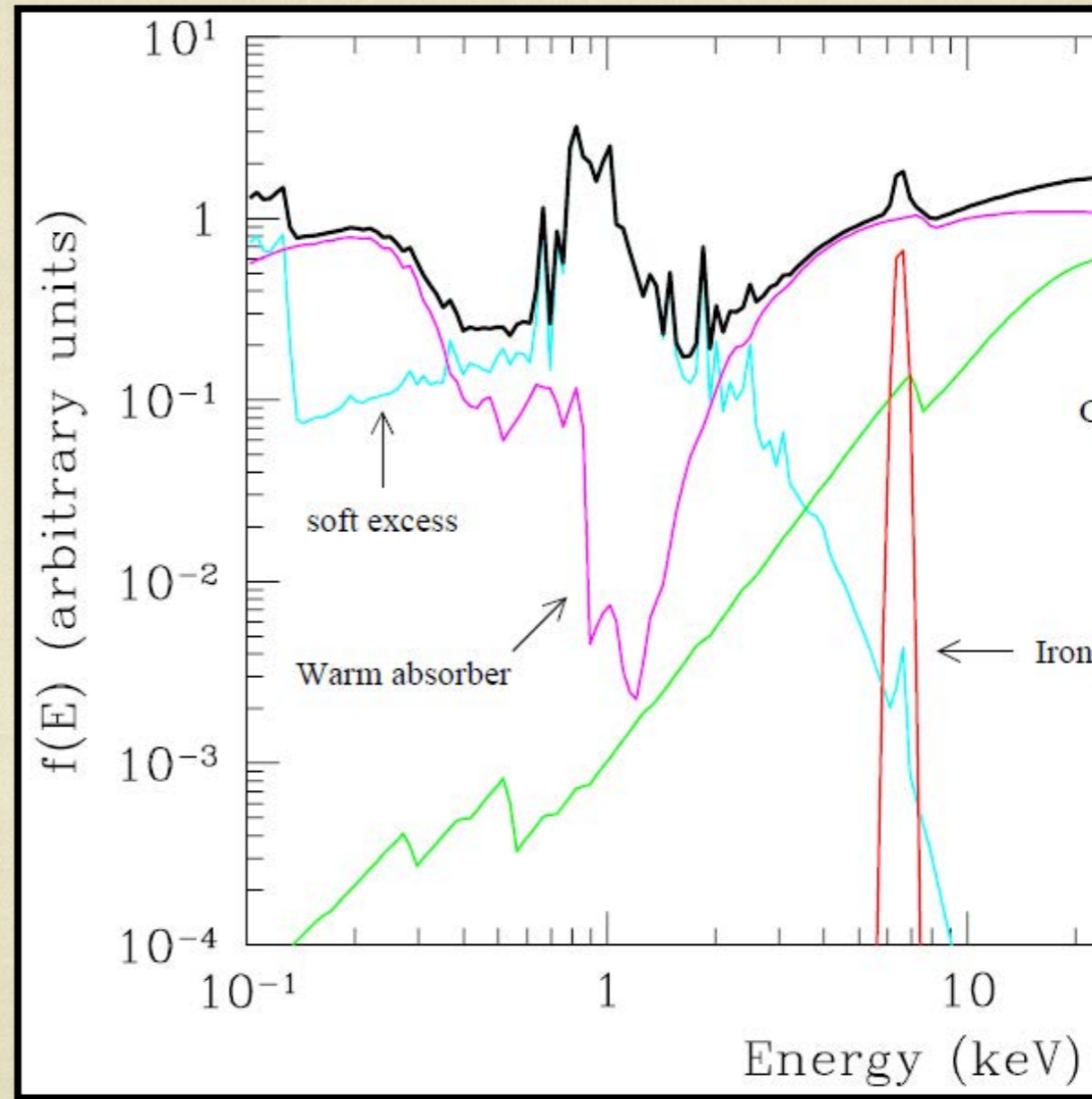
Iwasawa et al. 2005



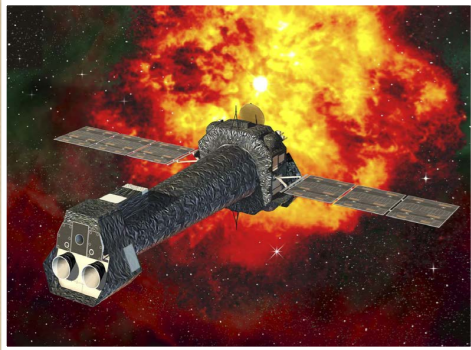
Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con la corona -> ley de potencias
- + Espectro de reflexión
- + Línea de emisión de Fe
- + **El "Soft Excess"**
- + La absorción fría
- + La absorción tibia



Núcleos Galácticos Activos



El "Soft Excess"

DEFINICIÓN: Exceso de la emisión por encima de 1 keV

FRECUENCIA: 50-60% of ASCA AGN *George et al.1998,*
Reeves & Turner 2000

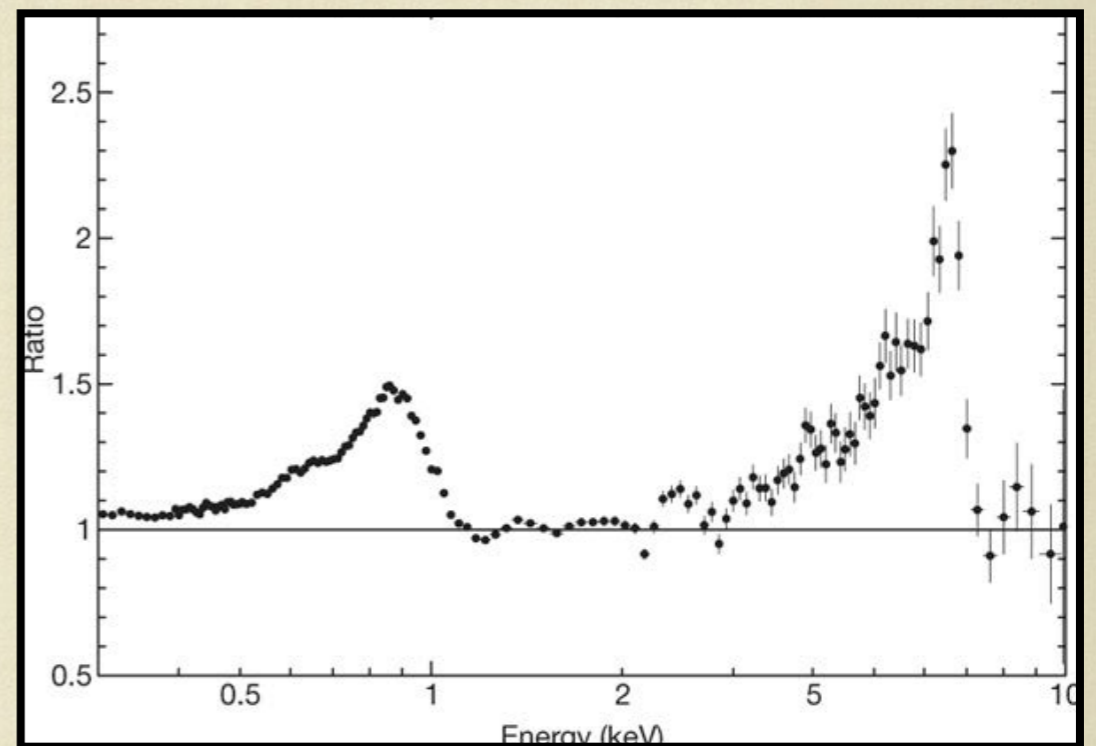
80% de PG-QSO *Piconcelli & Jiménez Bailón 2005*

70% de XAWS AGN *Scott et al. 2011*

ORIGEN: + Un origen térmico está descartado porque se encuentra a temperatura constante *Jimenez-Bailón et al. 2005; Mateos 2010*

+ Un origen atómico requiere embarramiento relativista muy importante en el espectro de reflexión

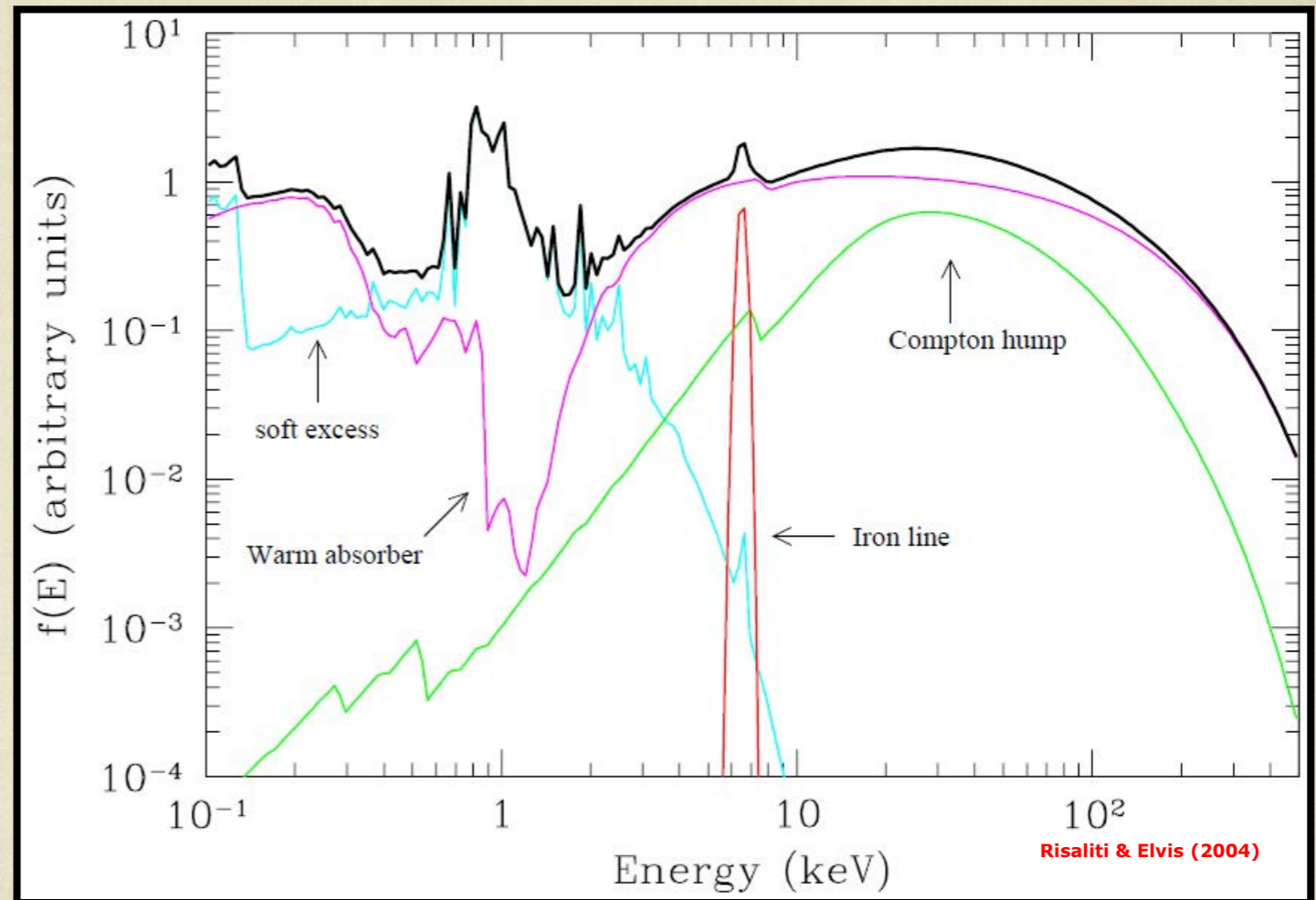
¡ORIGEN DESCONOCIDO!



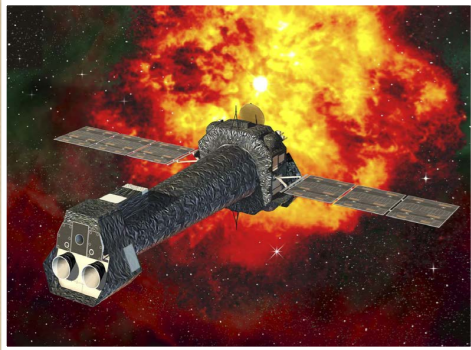
Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

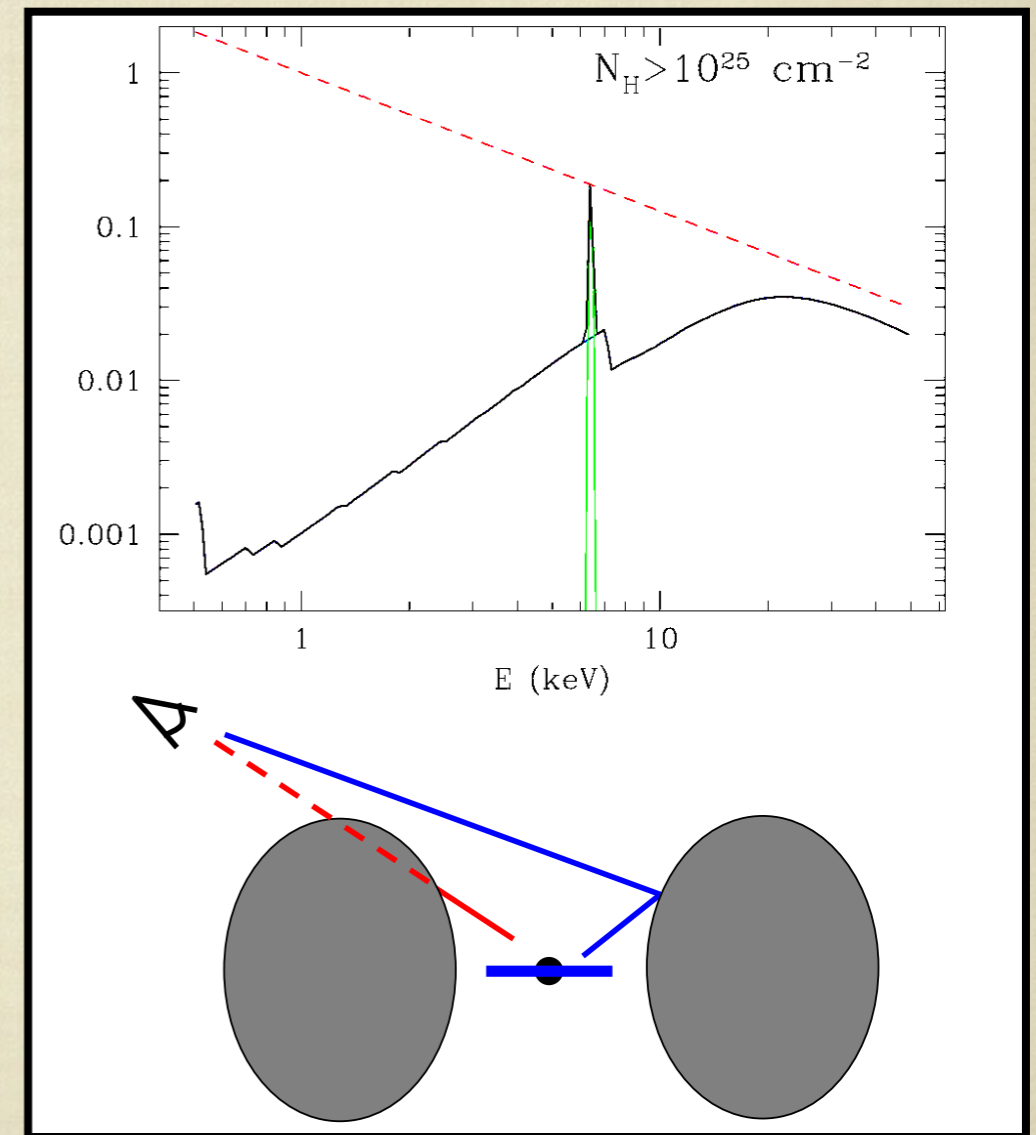
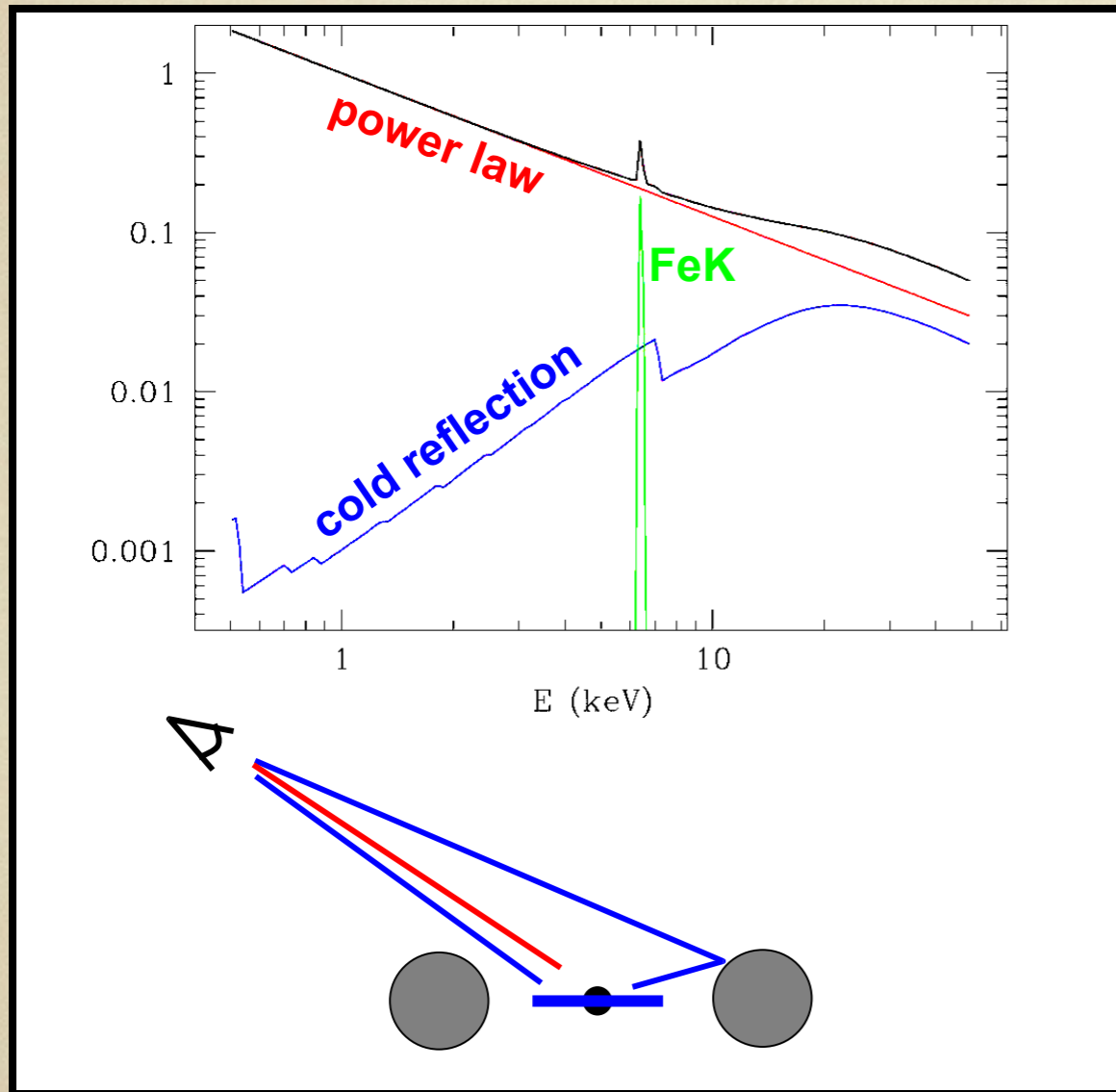
- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con la corona -> ley de potencias
- + Espectro de reflexión
- + Línea de emisión de Fe
- + El "Soft Excess"
- + La absorción fría
- + La absorción tibia



Núcleos Galácticos Activos



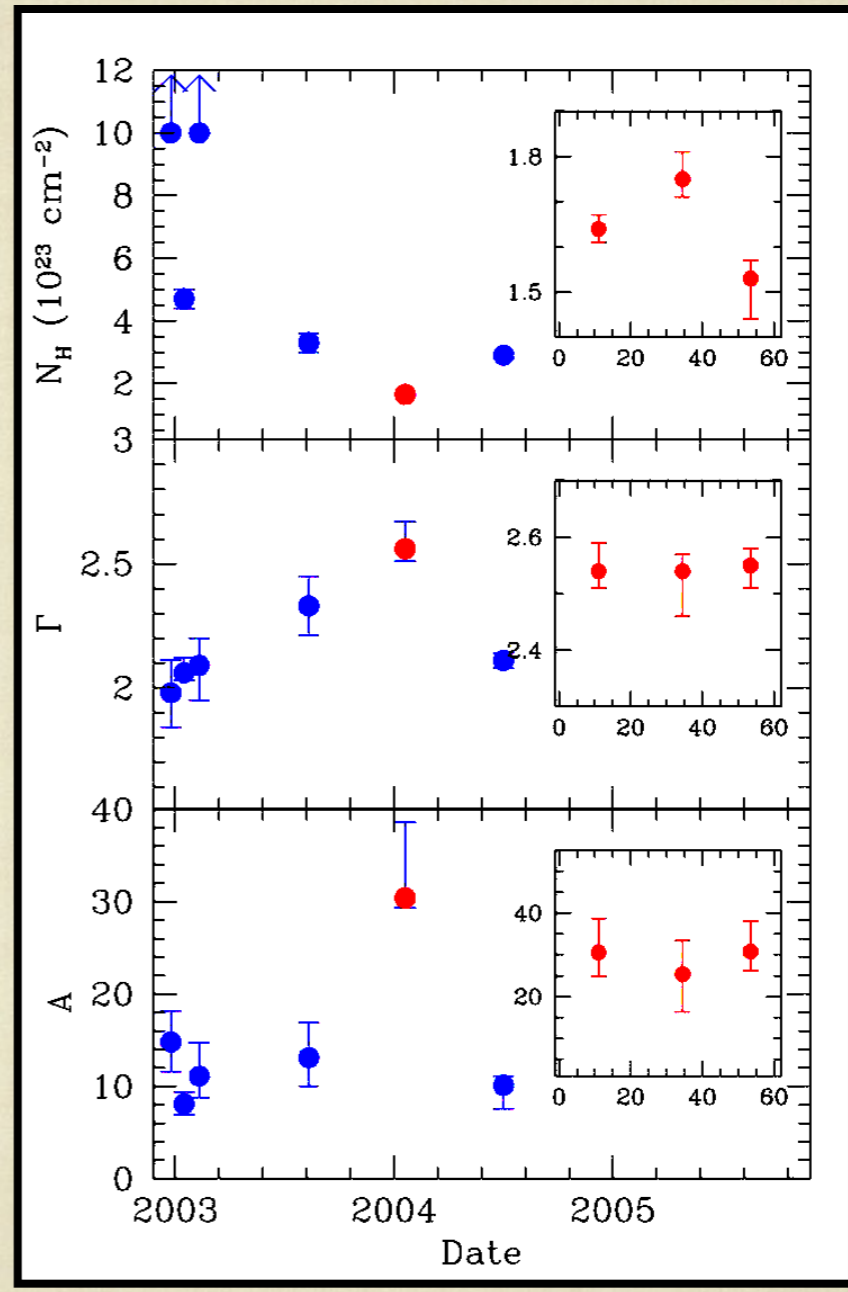
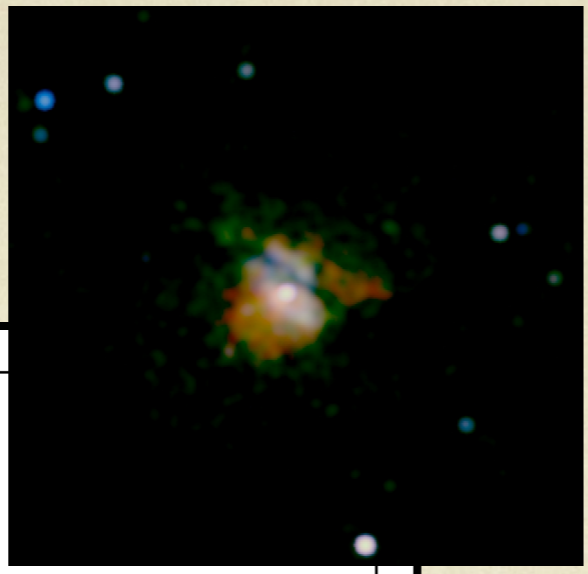
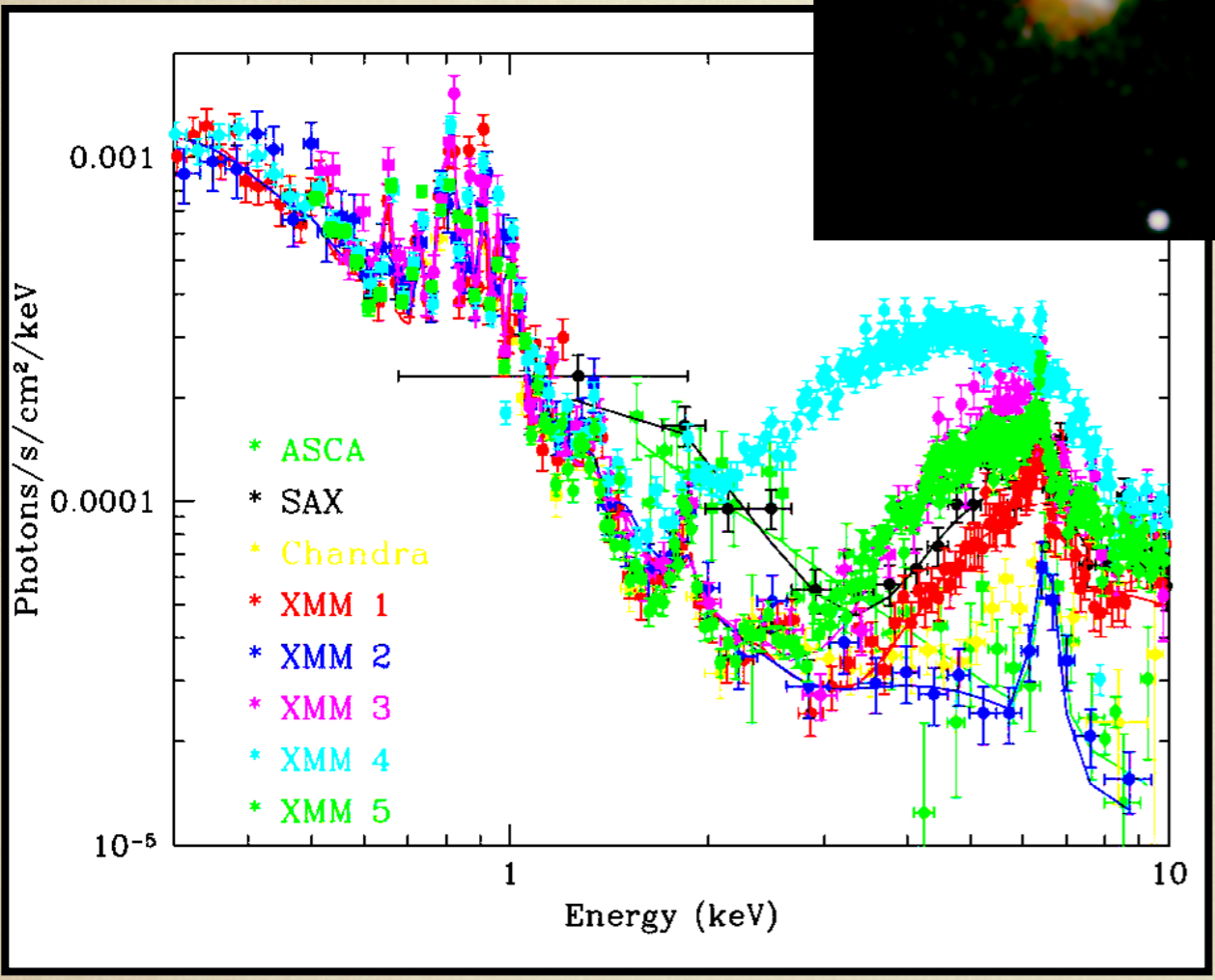
Absorción fría



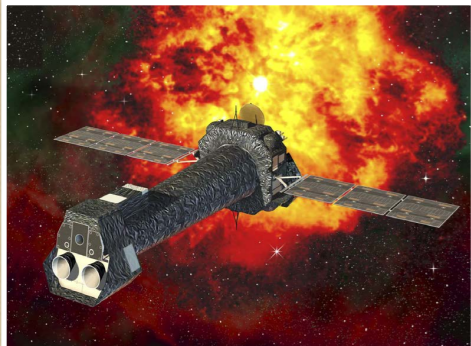
Núcleos Galácticos Activos

Absorción fría

NGC 1365



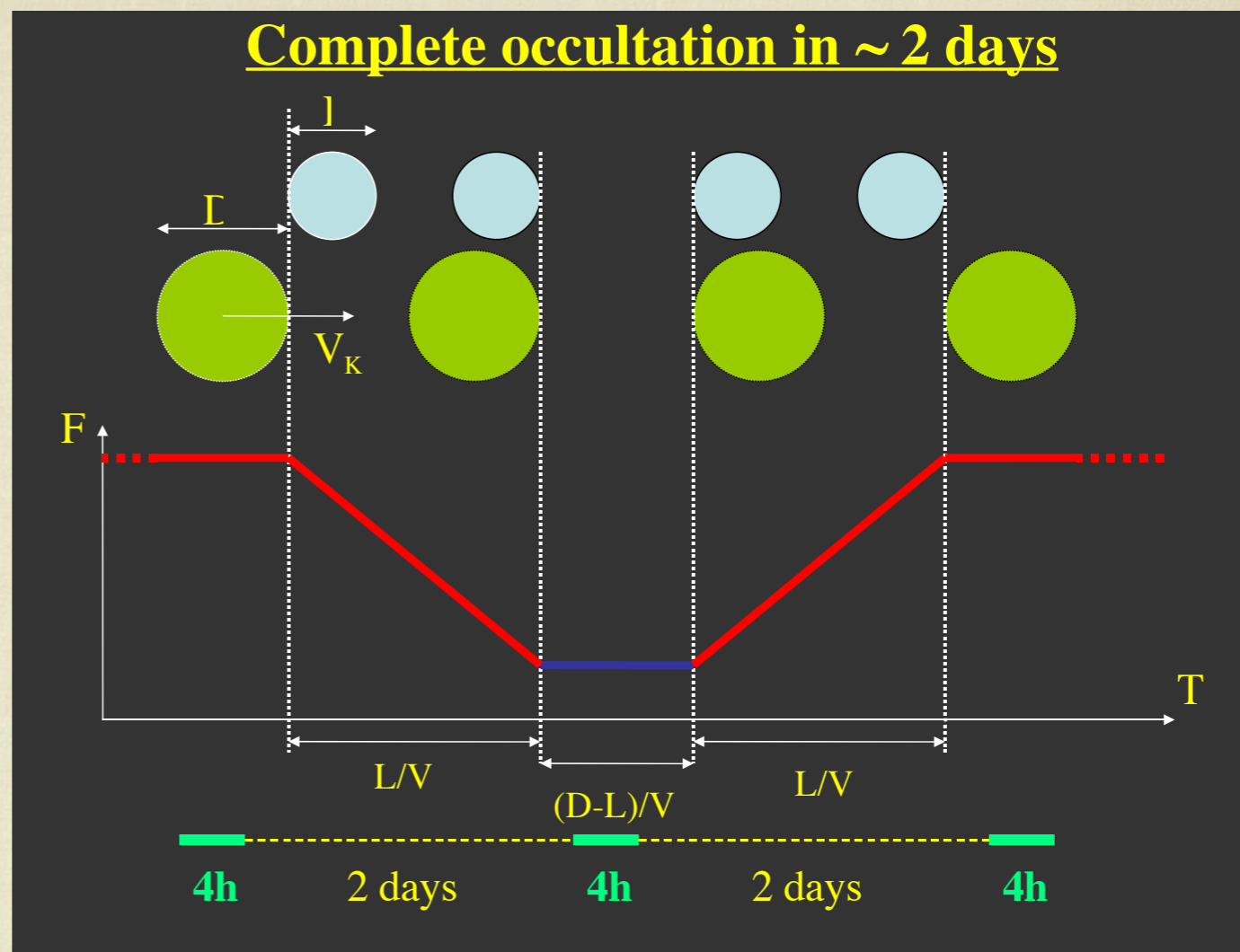
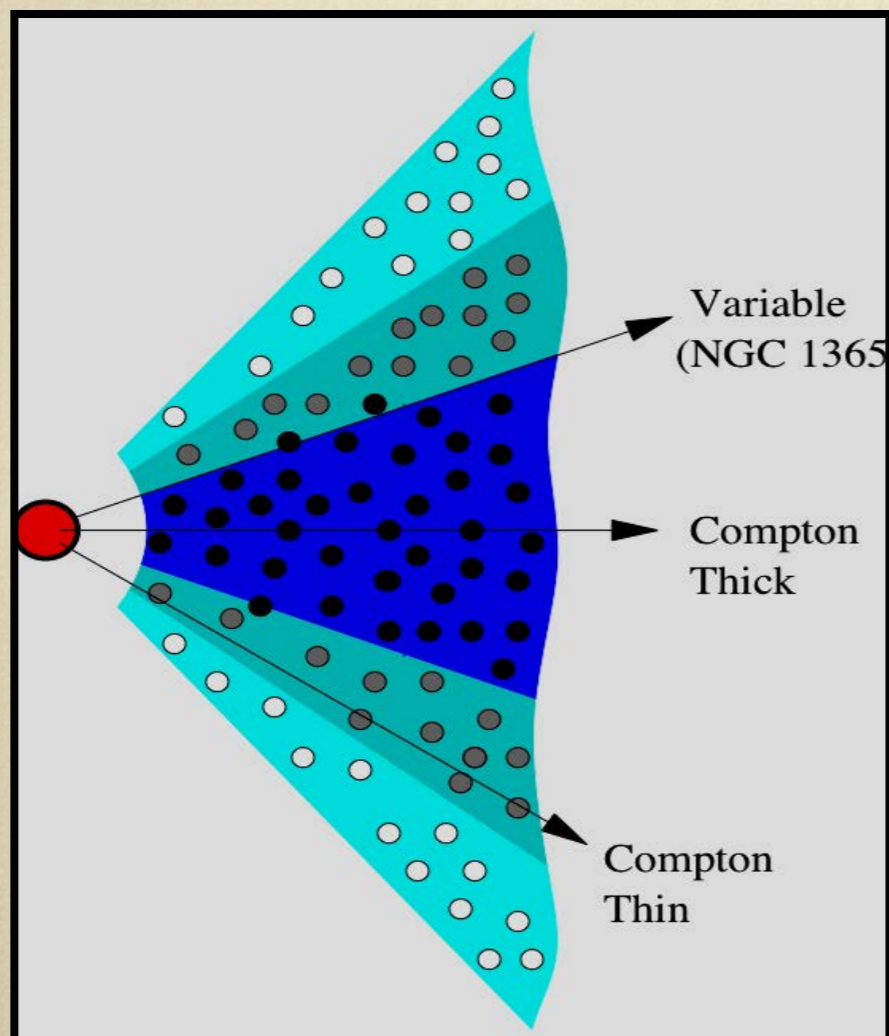
Núcleos Galácticos Activos



Absorción fría

NGC 1365

- + Suponiendo $V=10,000$ km/s
- + Tamaño de 4×10^{13} cm
- > Distancia Tierra-Sol
- + Localizada a 10 rg
- + $M=10^{7.5} M_{\text{sol}}$



¡MUCHOS EJEMPLOS MÁS!

UGC4203

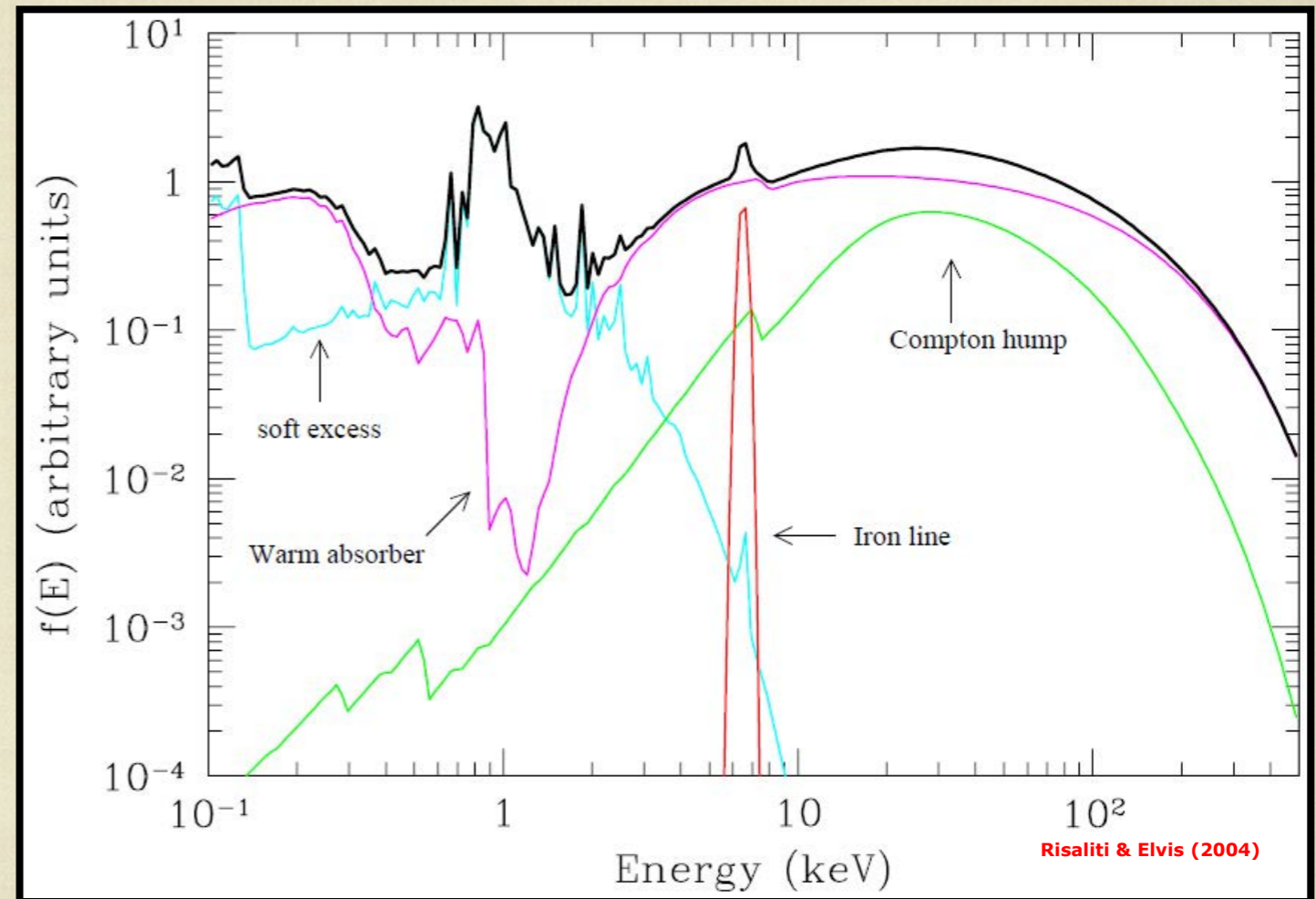
NGC 4388

NGC 4151

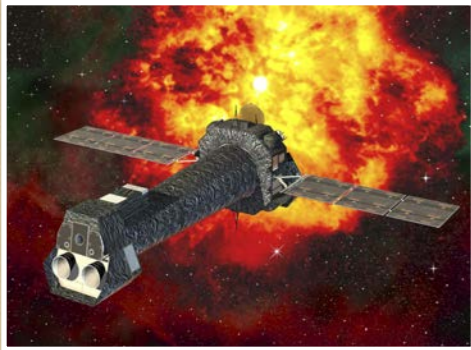
Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con la corona -> ley de potencias
- + Espectro de reflexión
- + Línea de emisión de Fe
- + El "Soft Excess"
- + La absorción fría
- + **La absorción tibia**



Núcleos Galácticos Activos



Absorción tibia

DETECCIÓN: 40-60% de los QSO
80% de las galaxias Seyfert seleccionadas en rayos X duros

PROPIEDADES:

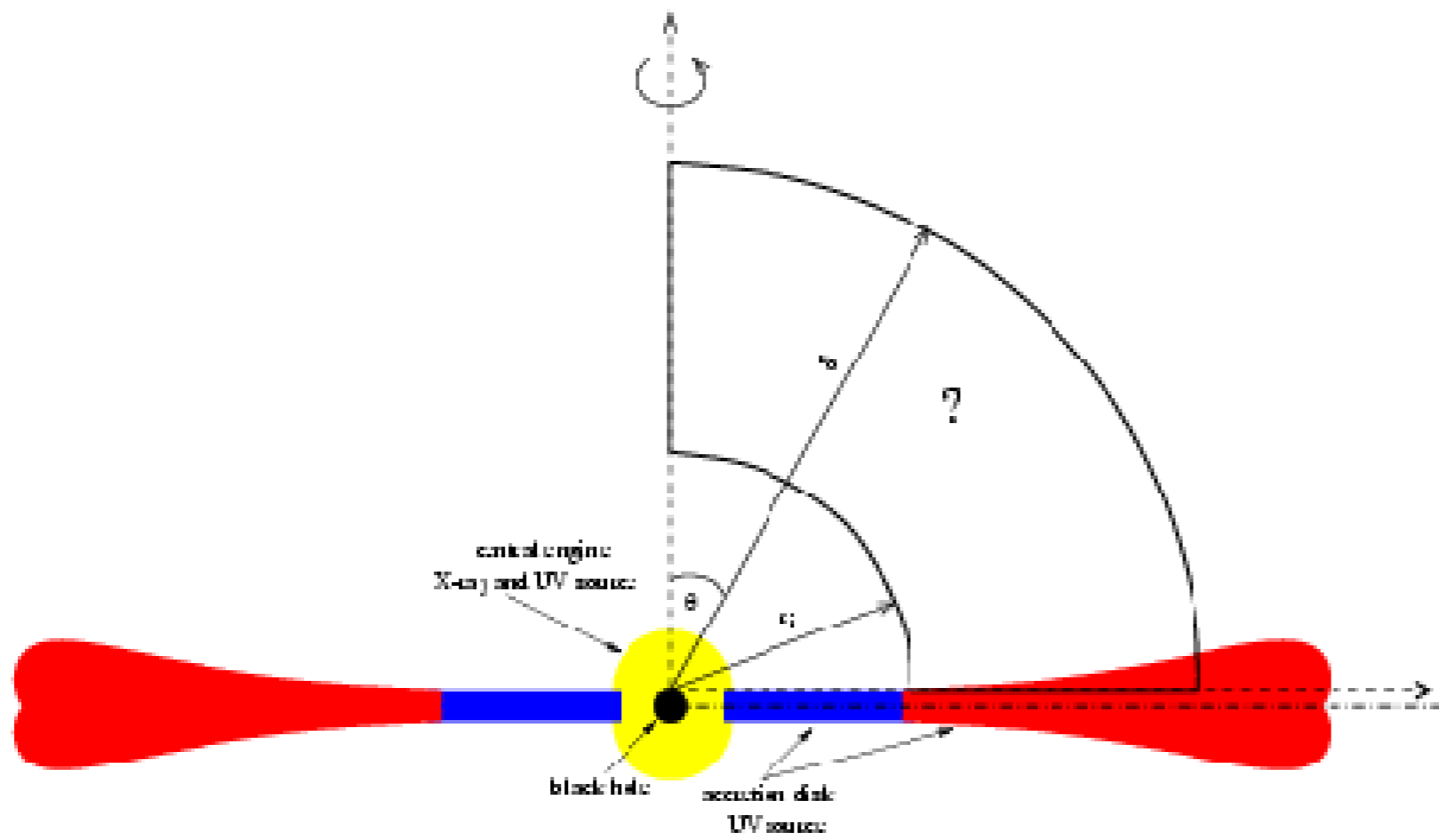
Espectros de alta resolución: "SOLO UNOS POQUITOS", del orden de 20.

Diagnóstico de las condiciones físicas del gas, densidad, velocidad de outflow, turbulencia, abundancia, ionización y localización

DISTANCIA DEL WA:

+ 0.1-100 pc

+ pero con estudios de variabilidad se han encontrado distancias de 10^{-4} - 10^{-6} pc con variabilidad

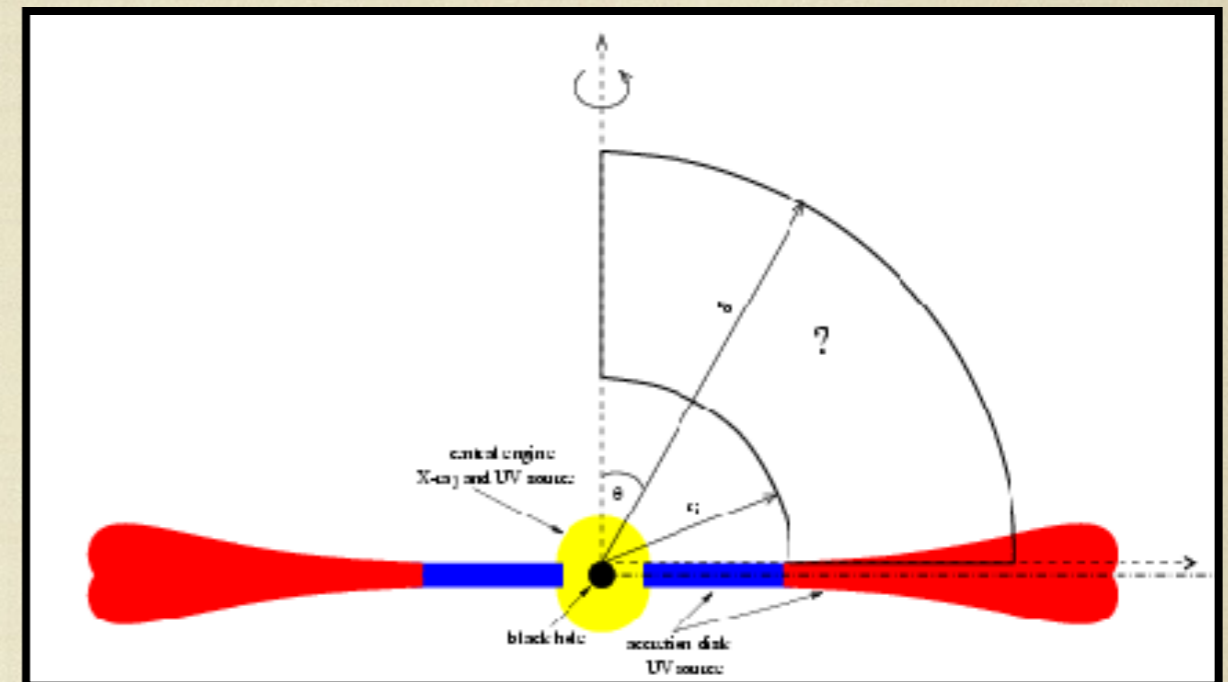


Núcleos Galácticos Activos

Absorción tibia

IMPLICACIONES:

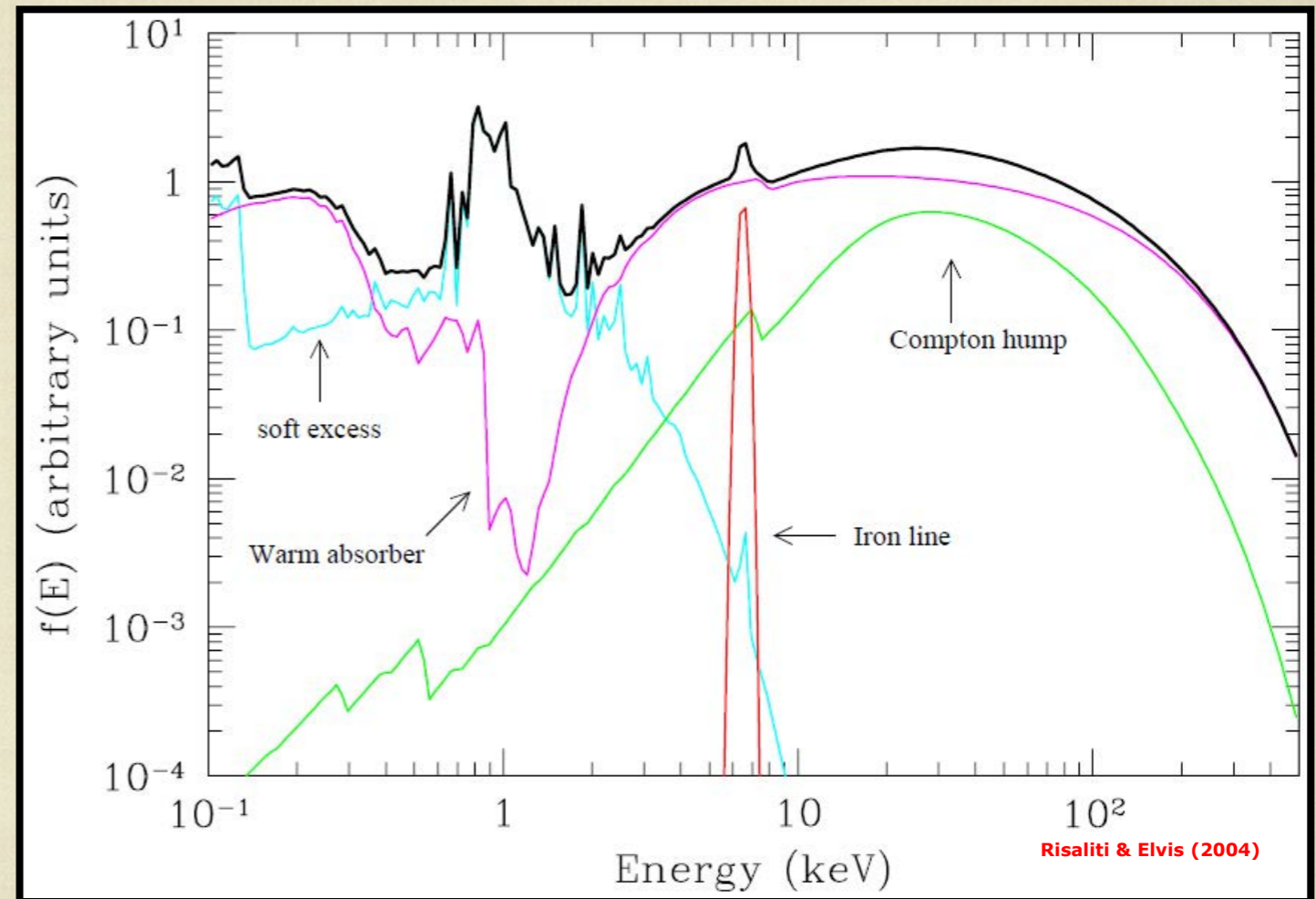
- + Las galaxias Seyfert estándar (10^{43} erg/s) pueden inyectar gas al ISM hasta de $10^8 M_{\text{sol}}$ en toda su vida y elevar su temperatura a 10^7 K
- + Los QSO más potentes pueden incluso elevar la masa de gas inyectado hasta ser capaces de desligar una galaxia de $10^{11} M_{\text{sol}}$ y $\sigma=300$ km/s y enriquecer el medio intergaláctico
- + UFOs $v > 10,000$ km/s presentes en el 35% RQQ



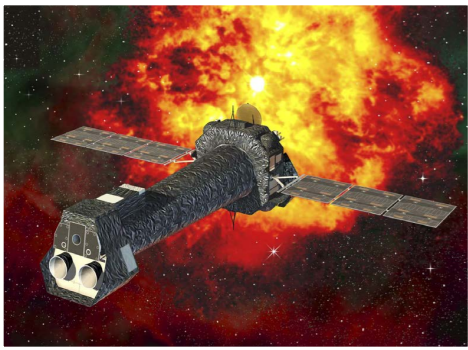
Núcleos Galácticos Activos

Emisión en Rayos X de los AGN

- + Emisión del disco de acreción
- + Efecto Compton Inverso con la corona -> ley de potencias
- + Espectro de reflexión
- + Línea de emisión de Fe
- + El "Soft Excess"
- + La absorción fría
- + La absorción tibia
- + **Los jets**
- +



Cúmulos de Galaxias



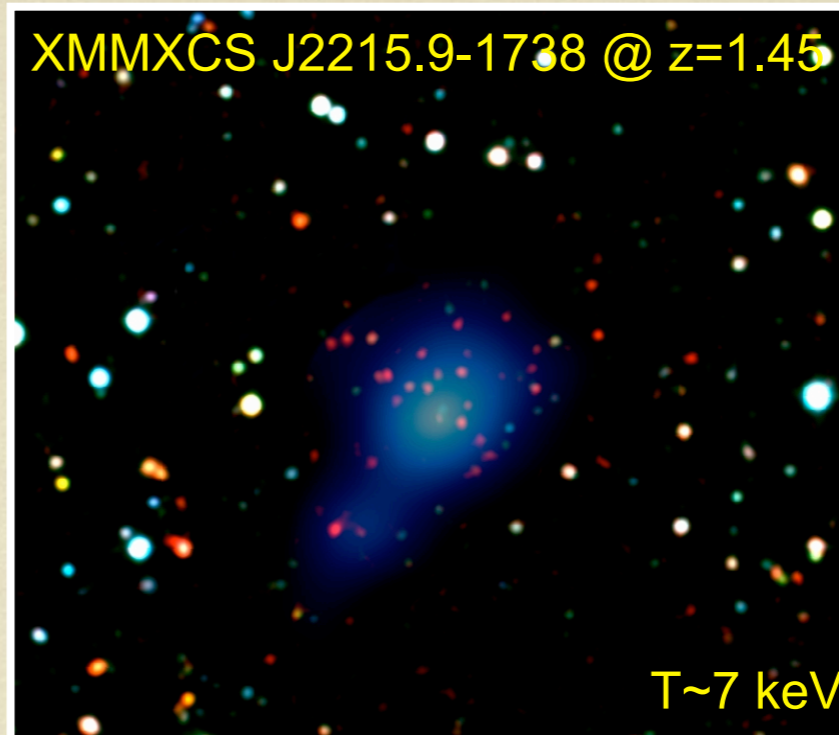
Estructura a Gran Escala

+ El cúmulo más distante encontrado con rayos X $T \sim 8 \times 10^6$ k

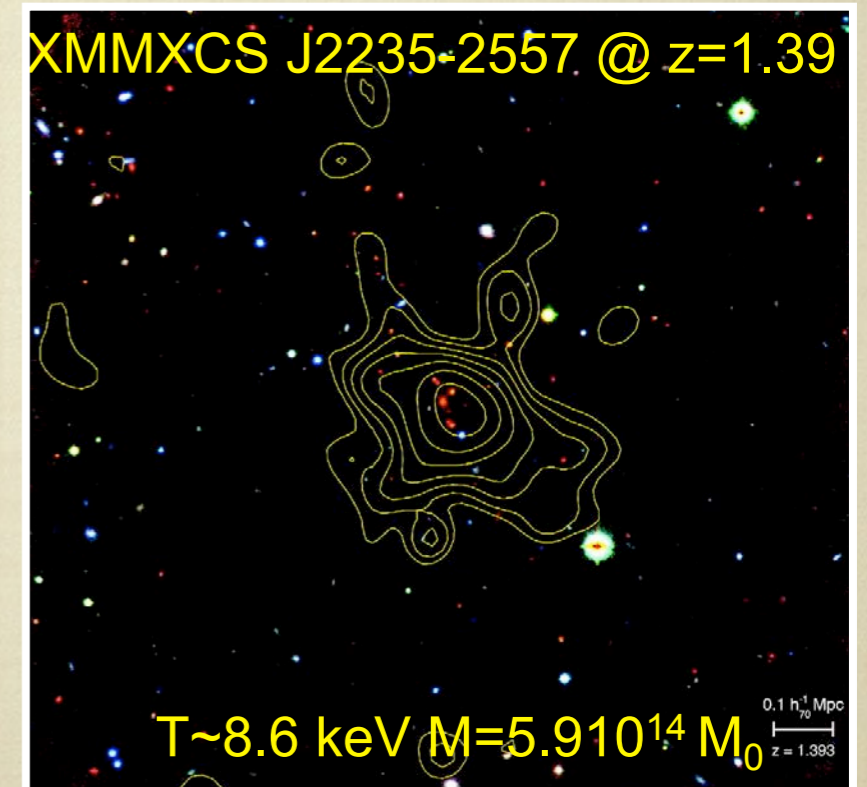
+ El cúmulo más masivo encontrado a $z > 1$ **Rosati et al. 2009**

* hay muchos más en XCF pero están aún sin confirmación

XMMXCS J2215.9-1738 @ $z=1.45$



XMMXCS J2235-2557 @ $z=1.39$

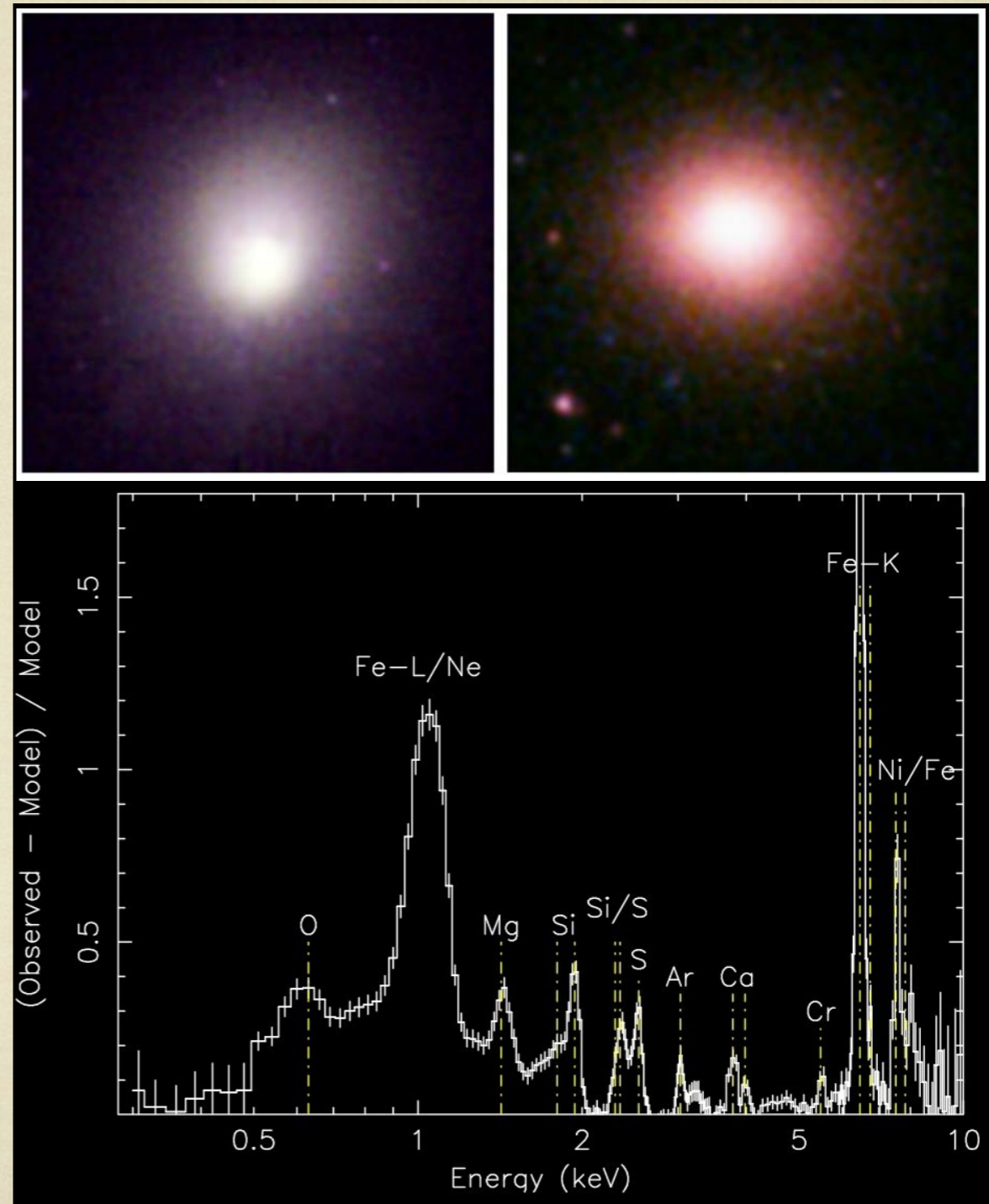


Cúmulos de Galaxias

Estructura a Gran Escala

- + La química de los cúmulos de galaxias
- + El 30% de sus estrellas terminaron como enanas blancas: SN Ia
- + El 70% como estrellas colapsadas al final de sus vidas

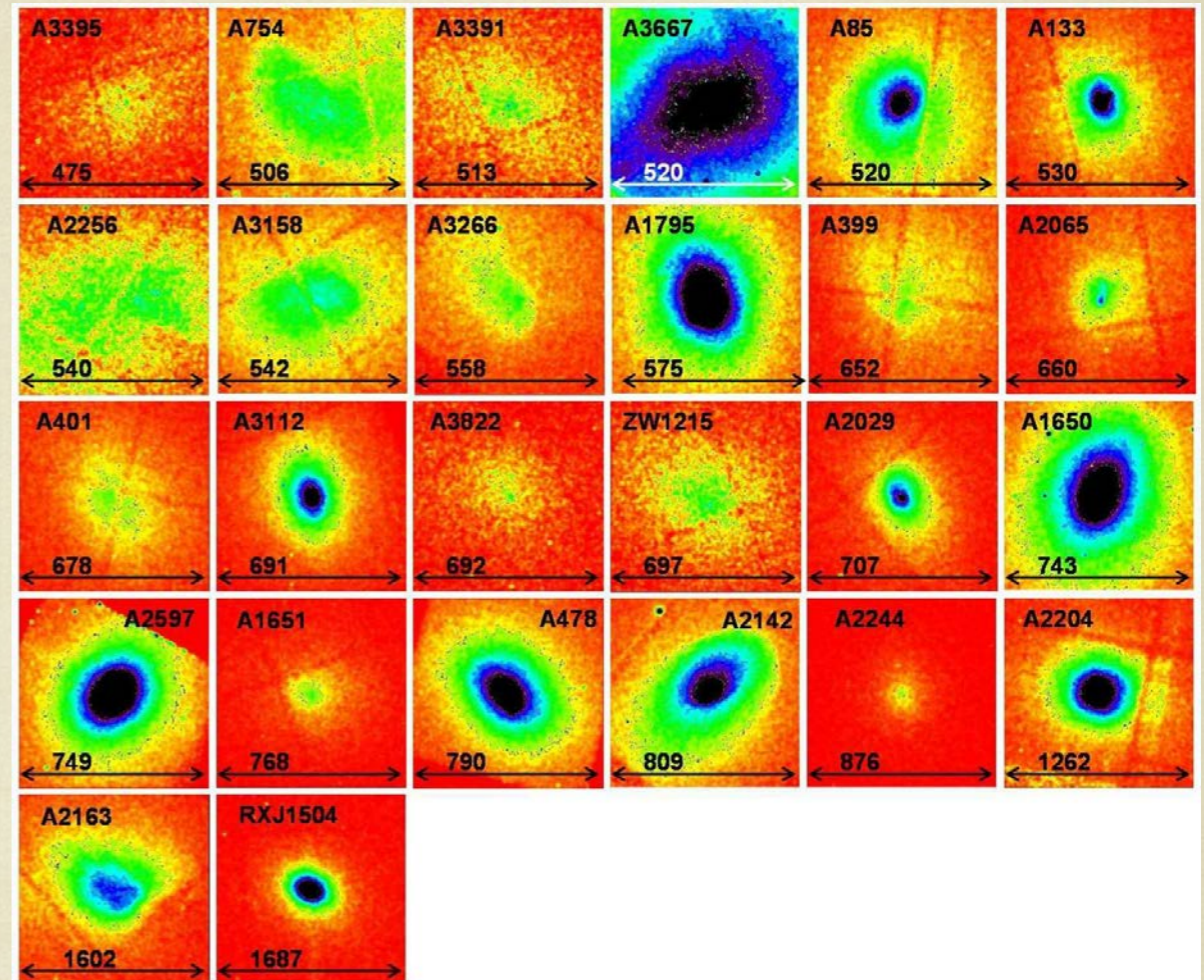
Werner et al. 2007
de Plaa et al. 2006



Cúmulos de Galaxias

Estructura a Gran Escala

- + El problema de los núcleos fríos:
"El tiempo de enfriamiento dinámico de los centros de los cúmulos de galaxias es menor al esperado"
- + 50-70% de los cúmulos locales presentan núcleos fríos



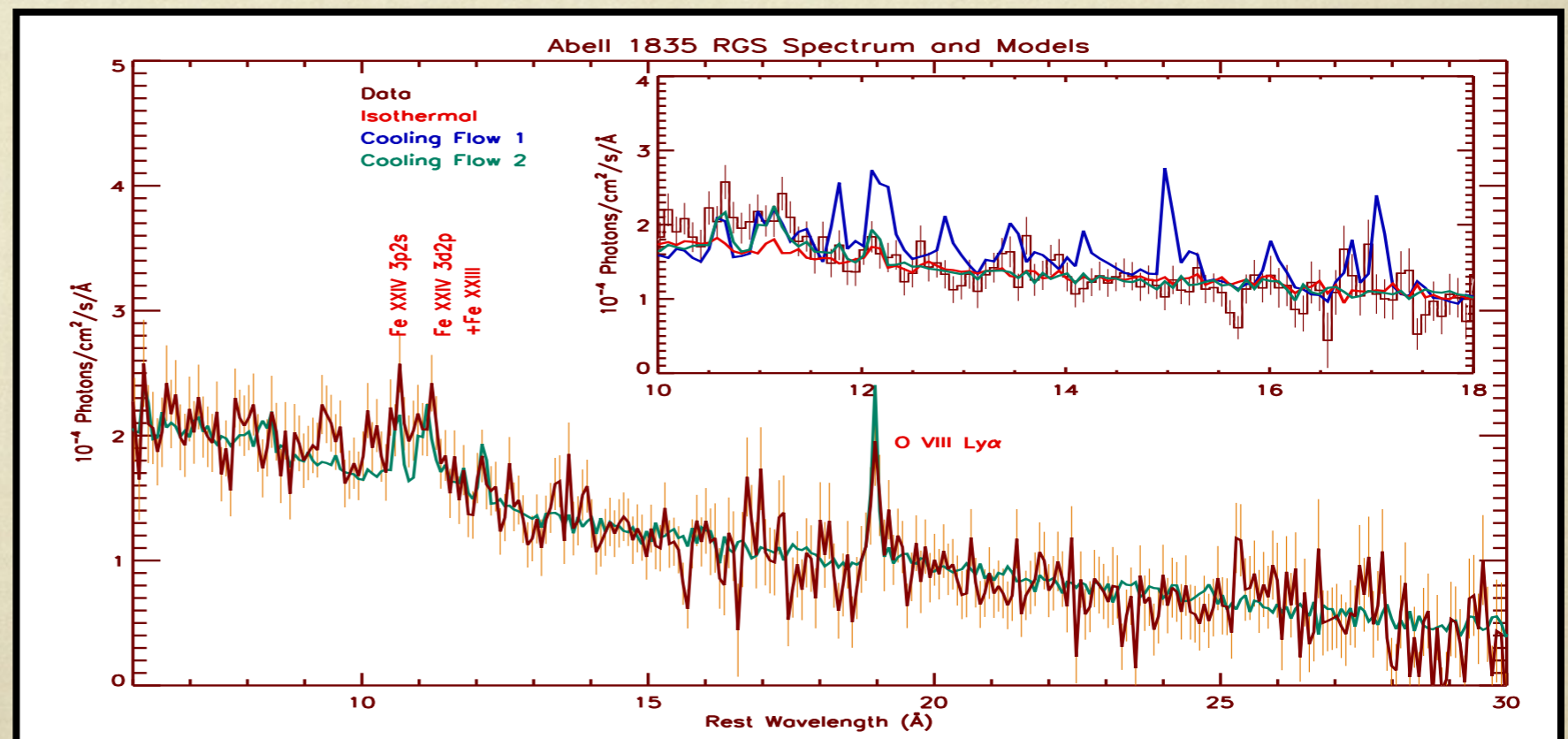
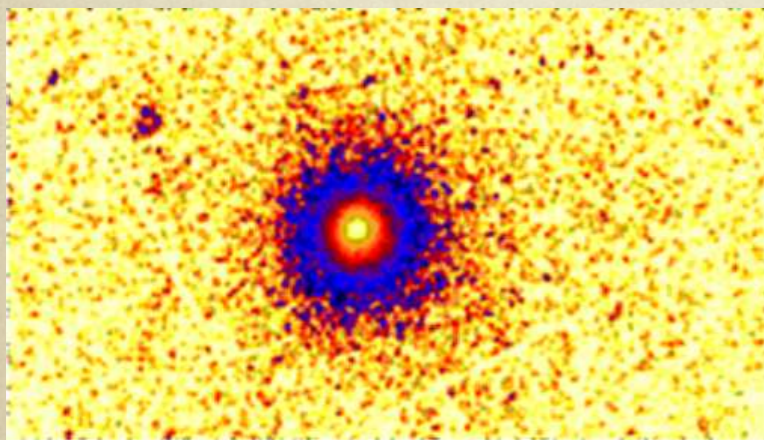
Cúmulos de Galaxias

+ La espectroscopía de alta resolución ha podido determinar las condiciones físicas del gas

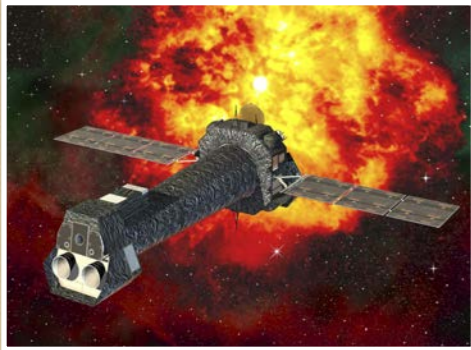
+ En el trabajo pionero de Abell 1835 encontraron grandes cantidades de gas "frío" en un medio multifásico rodeados por una burbuja de gas caliente $kT=8.2$ keV

+ La cantidad gas más frío, $kT=2.7$ keV, es mucho menor de la esperada según los modelos estándar para "cooling flows"

Peterson et al. 2001

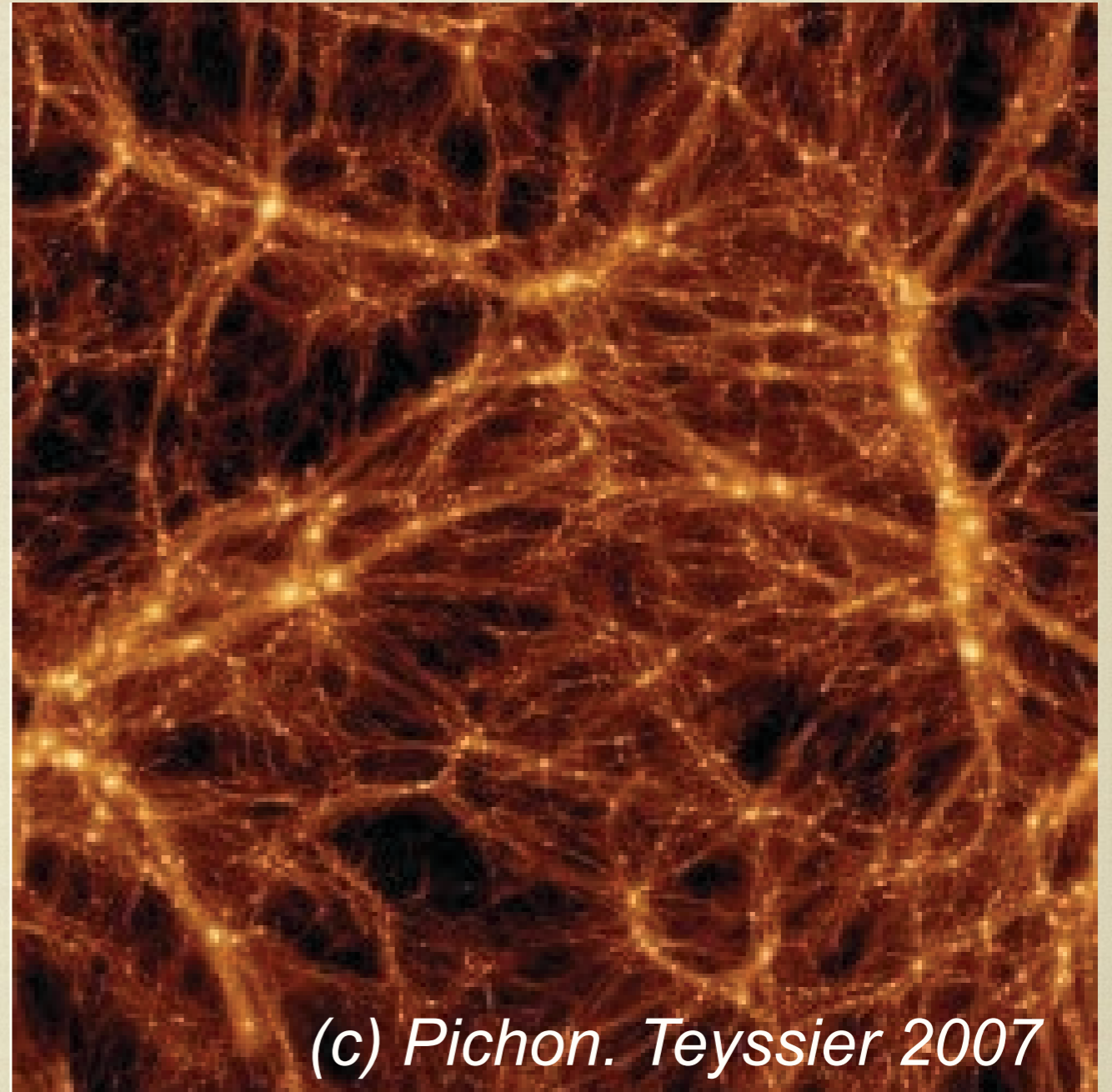


Cúmulos de Galaxias



Estructura a Gran Escala

- + La teoría estándar de formación de estructuras predice la presencia de una red de filamentos que conecta cúmulos de galaxias
- + La materia normal se acumula en las regiones de mayor densidad de materia oscura
- + Finogenov et al. 2007 encuentran en simulaciones que la mayor parte de la materia bariónica (difusos & calientes WHIM) del universo a $z < 2$ se concentran en las regiones donde se forman filamentos.



(c) Pichon. Teyssier 2007

Cúmulos de Galaxias

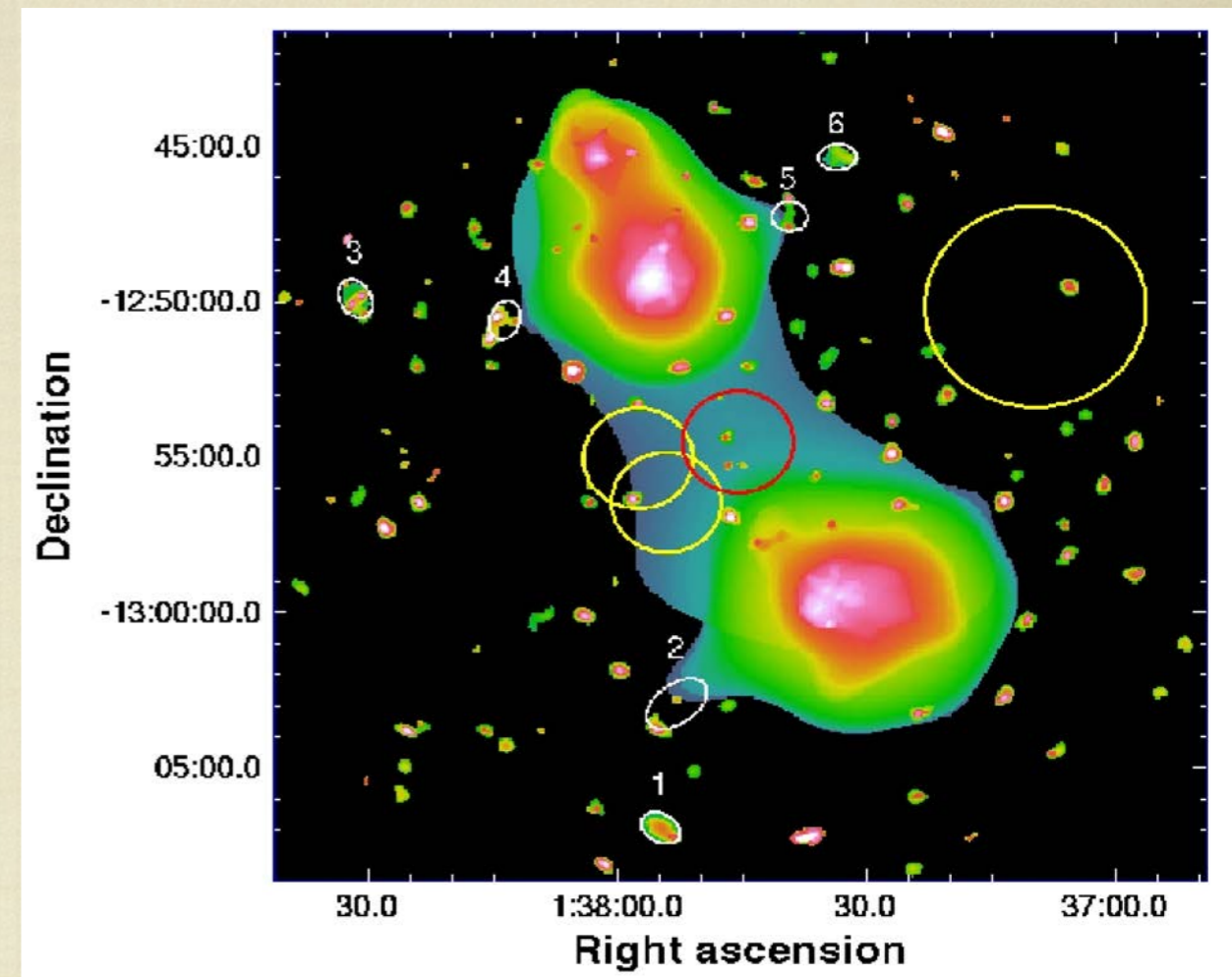
Estructura a Gran Escala

+ Primera detección de filamentos en rayos X:

+ El gas difuso y caliente que une dos cúmulos distantes Abell 222 y Abell 223

$T=10^7$ K y densidad $\sim 3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-3}$

Werner et al 2008



Chandra Deep Field

Looking back in time to see the first black holes



Chandra Image

The
X-ray Sky

Feb. 96 - Nov. 99

Instrumentation

- X-ray optics
- X-ray detection
- **Some challenges:**
 - X-rays are absorbed in atmosphere: space
 - 'poor' reflection of X-rays
 - Brightest source (Sco X-1) 150 ph/cm²/s, typical source 10⁴ or more fainter: large dynamic range
 - Large detectors have poor energy resolution hence focusing optics to be able to use smaller, high-resolution, detectors (and not loose collecting area).
 - Particle background is relatively high (1 particle/cm²/s), focusing helps
 - Radiation hard; > 10 krad, also non-ionizing particles (NB: 1 rad is the dose that makes 0.01 joule of energy to be absorbed per kg of matter)

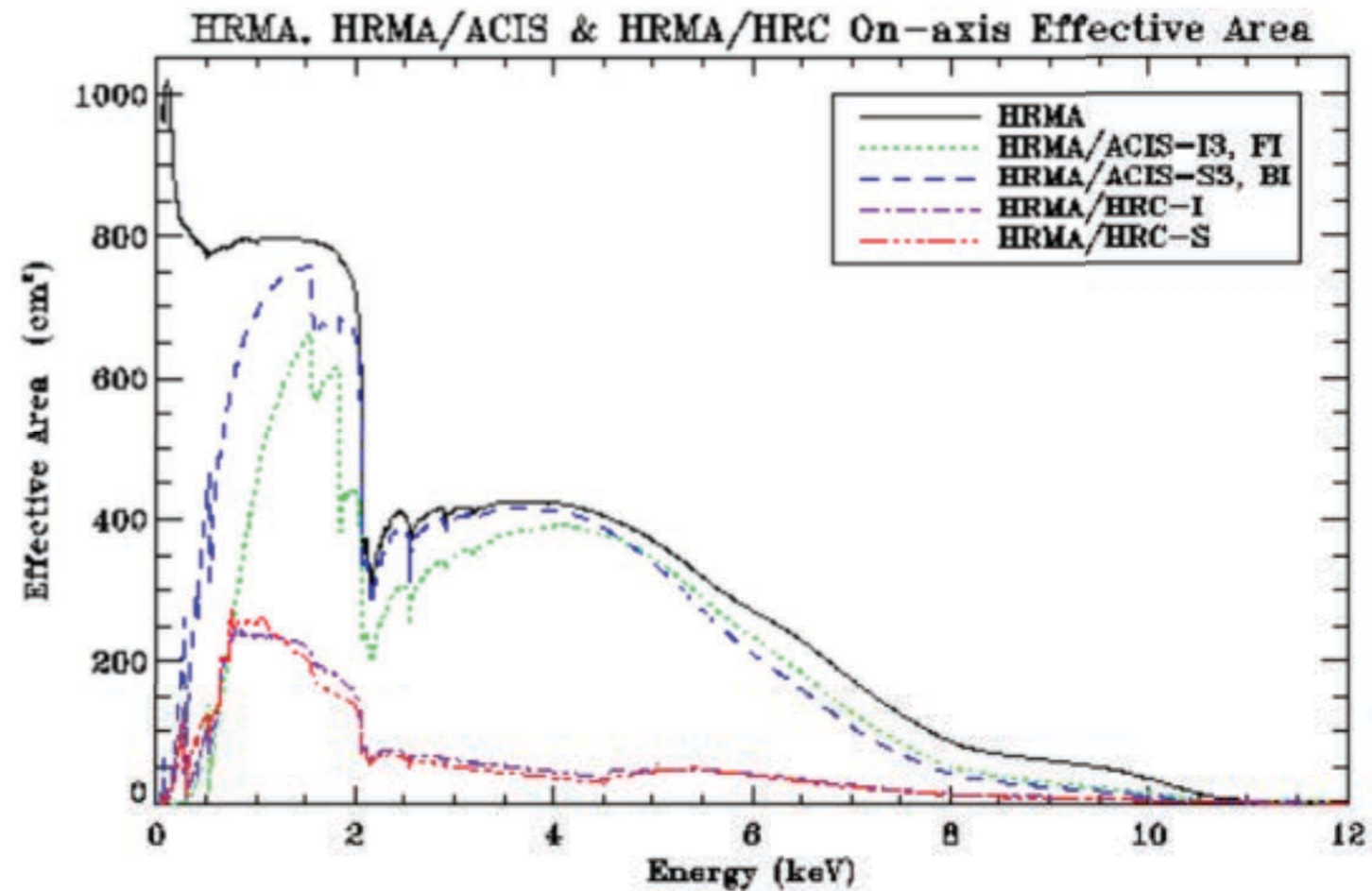
Optics

Challenges

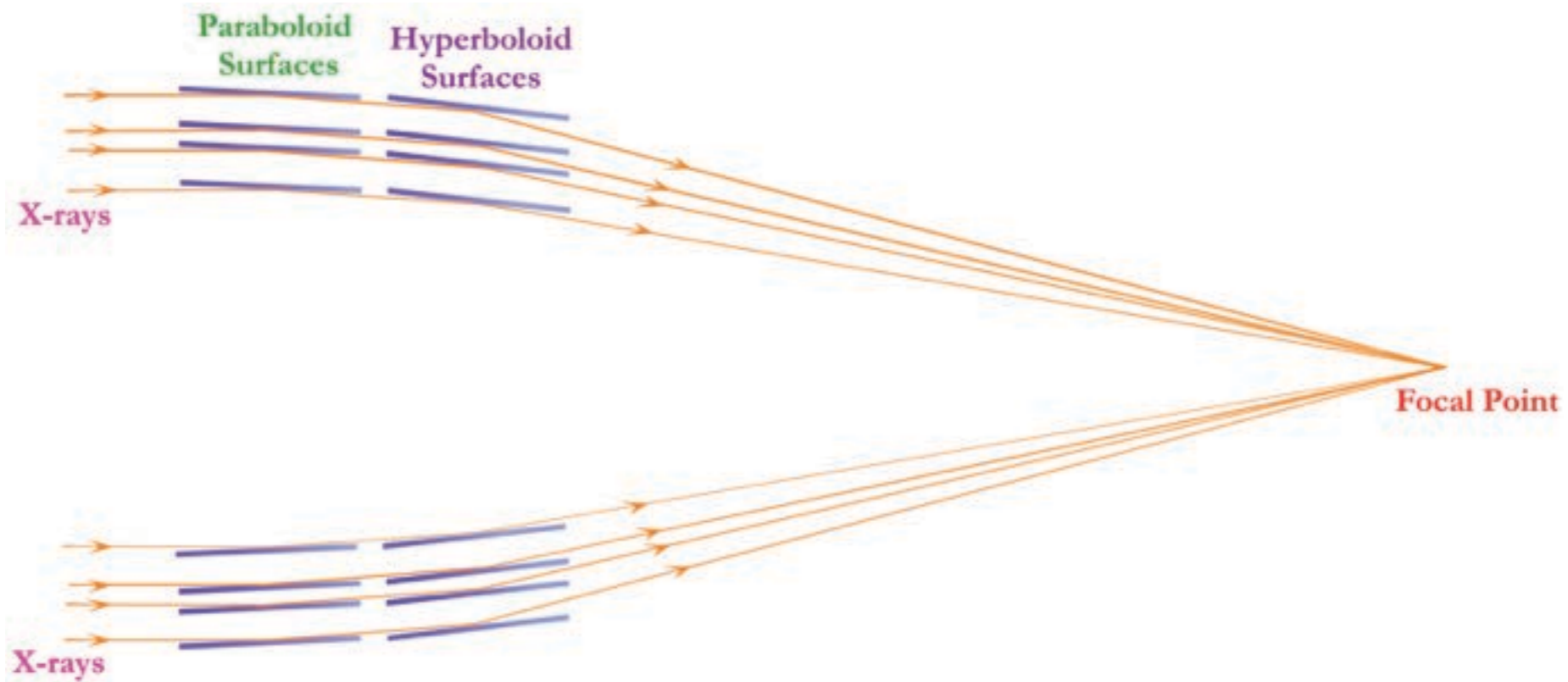
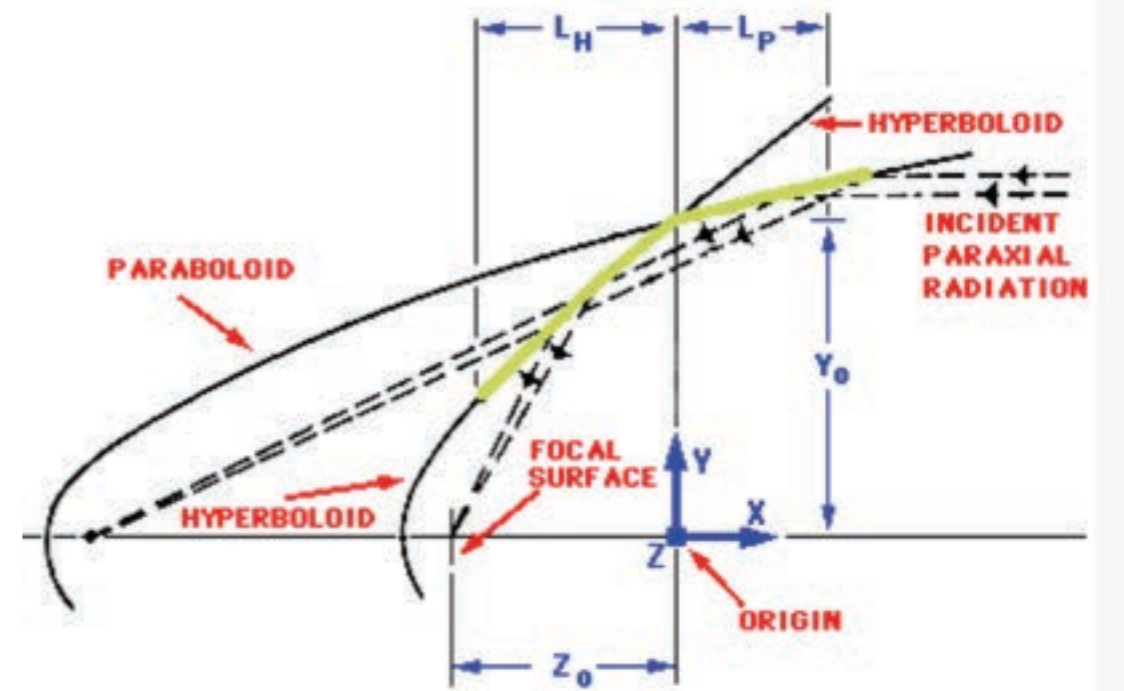
- Reflection only at grazing incidence angle
- Large collecting area over wide energy range
- Good resolution

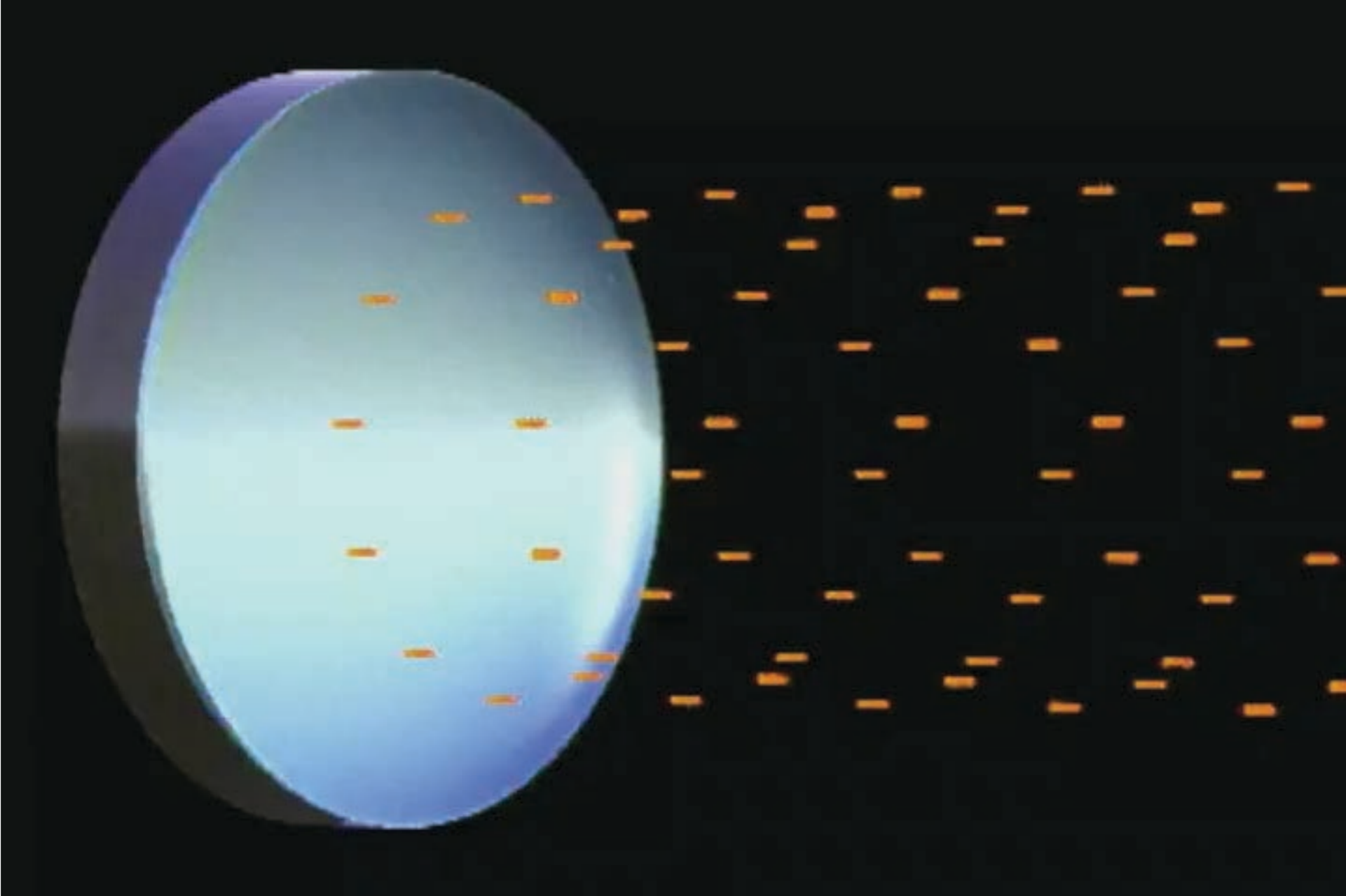
But

- Mass limited
- Focal length limited (< 10 m)



Wolter Optics





Principal high-energy astrophysics missions since 1990

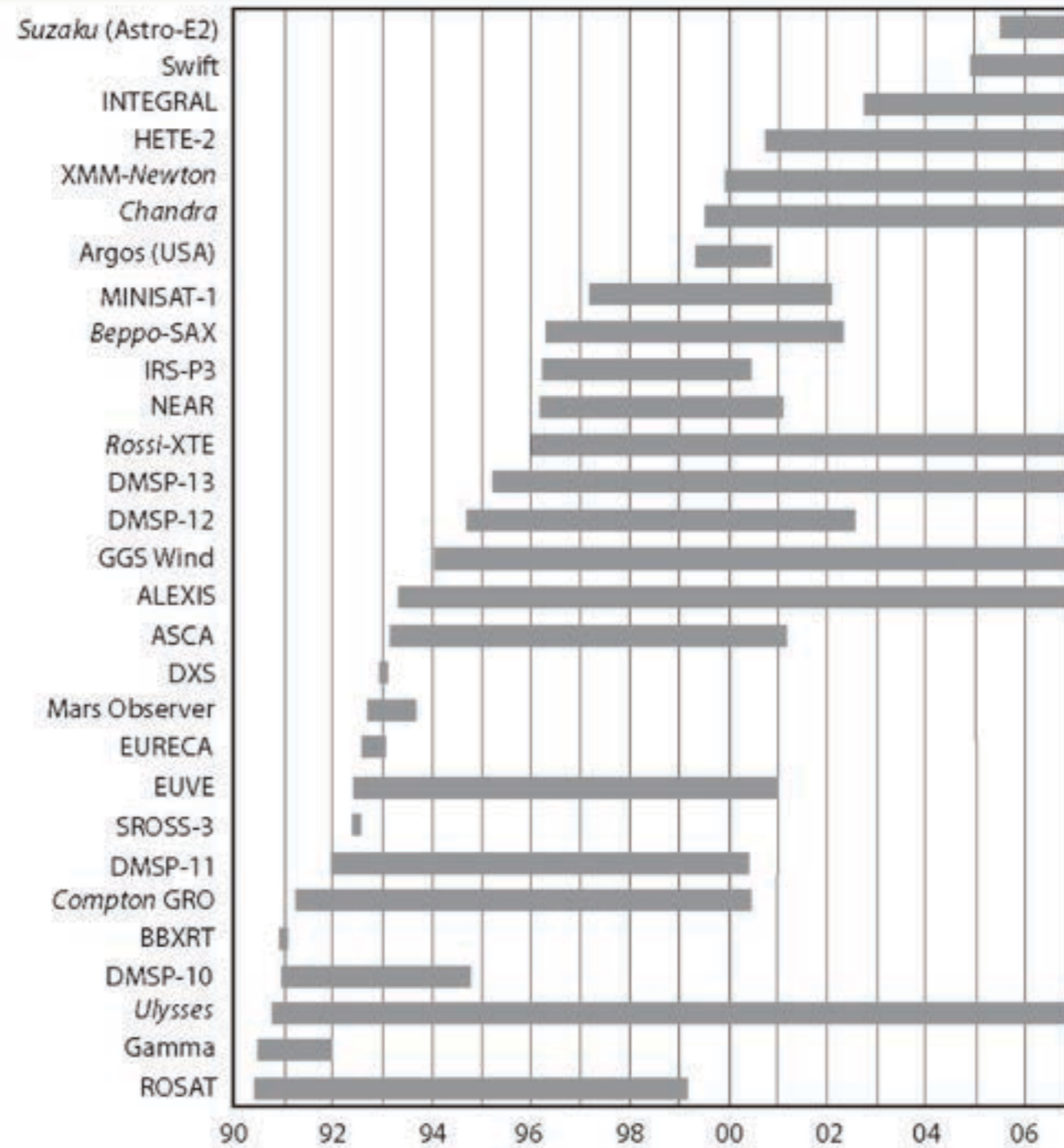
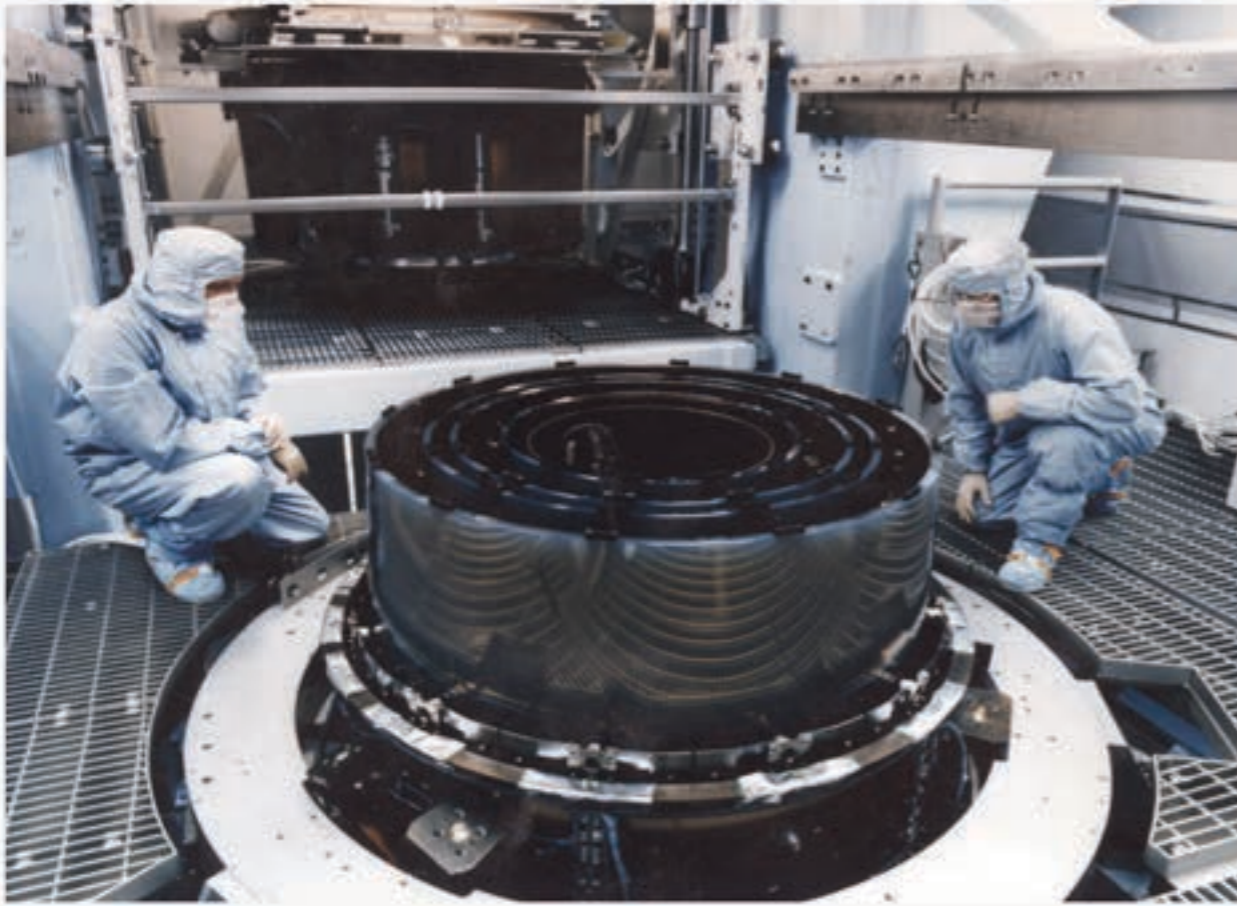


Figure 1.13 Timeline of principal high-energy astrophysics missions since 1990.

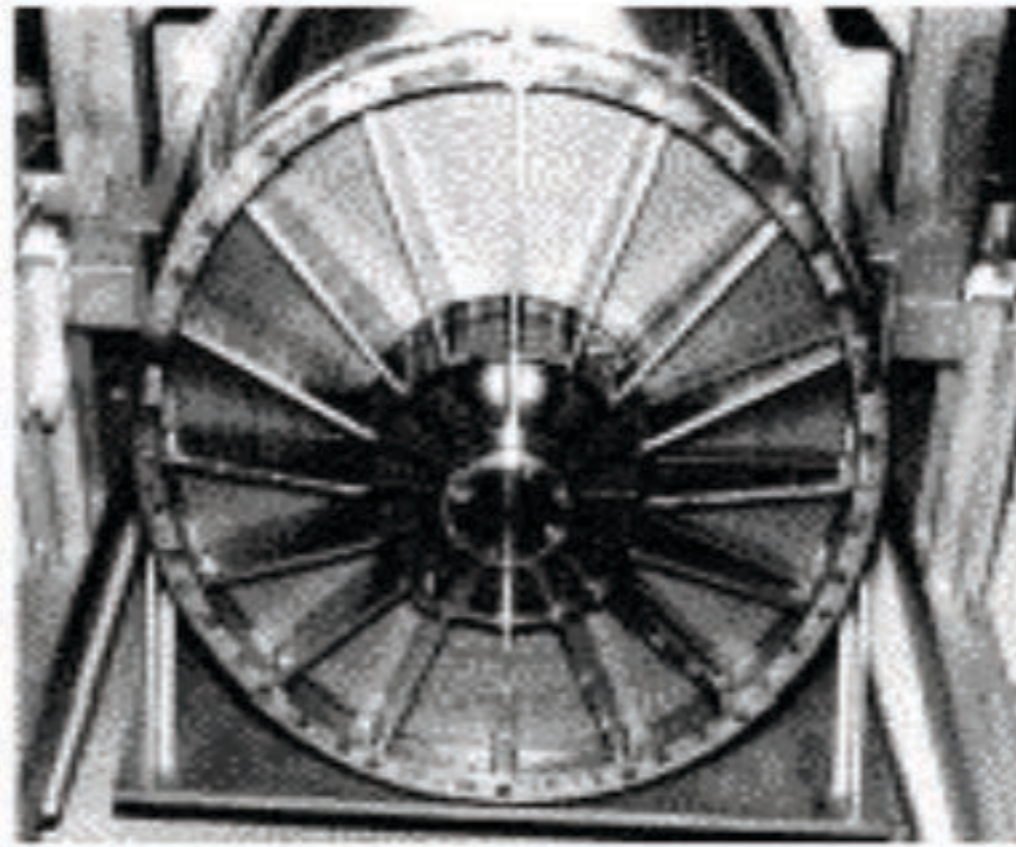
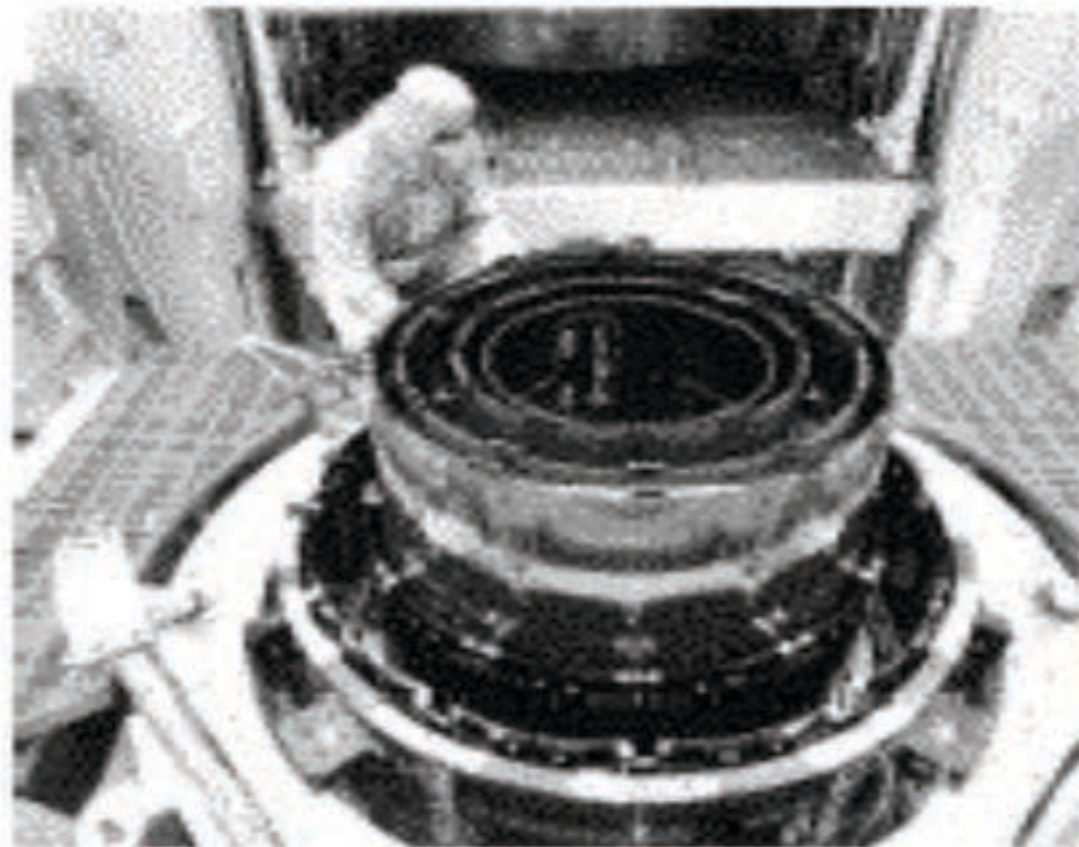
Chandra and XMM-Newton : mirrors



Wolter type I telescope
1 mirror module
4 nested mirrors
Iridium coated
 \varnothing 0.65 ,0.87 ,0.99 ,1.23 cm
F = 10 m
FWHM ~ 0.2" HEW ~ 0.5"



Wolter type I telescope
3 modules
58 nested mirrors
Gold coated
 \varnothing 0.30 - 0.70 cm
F = 7.5 m
FWHM ~ 6" HEW ~ 15"



CHANDRA XMM-NEWTON

0.5''

14''

18500 kg/m²

2300 kg/m²

Practical X-ray spectroscopy

Most X-ray instruments have low or moderate spectral resolution, typically $R = E/\Delta E \sim 3 - 20$.

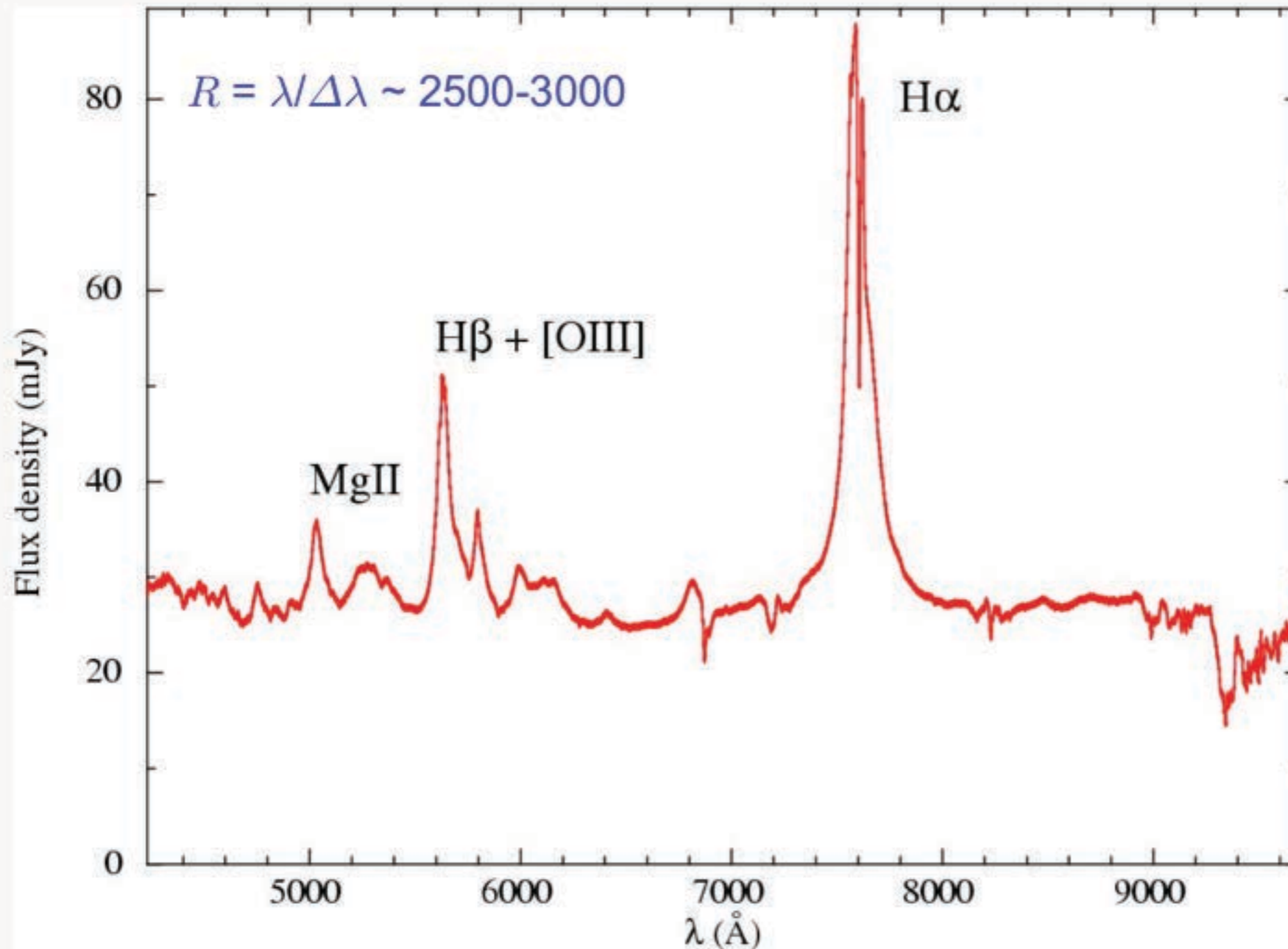
Compare with typical spectral resolution in optical spectrographs, $R \sim 2000 - 5000$ (up to $R \sim 70000$ possible).

However, band-passes of high-energy instruments extend over a factor $\sim 30 - 100$ in energy.

Compare with typical values of only $\sim 3 - 5$ in the optical.

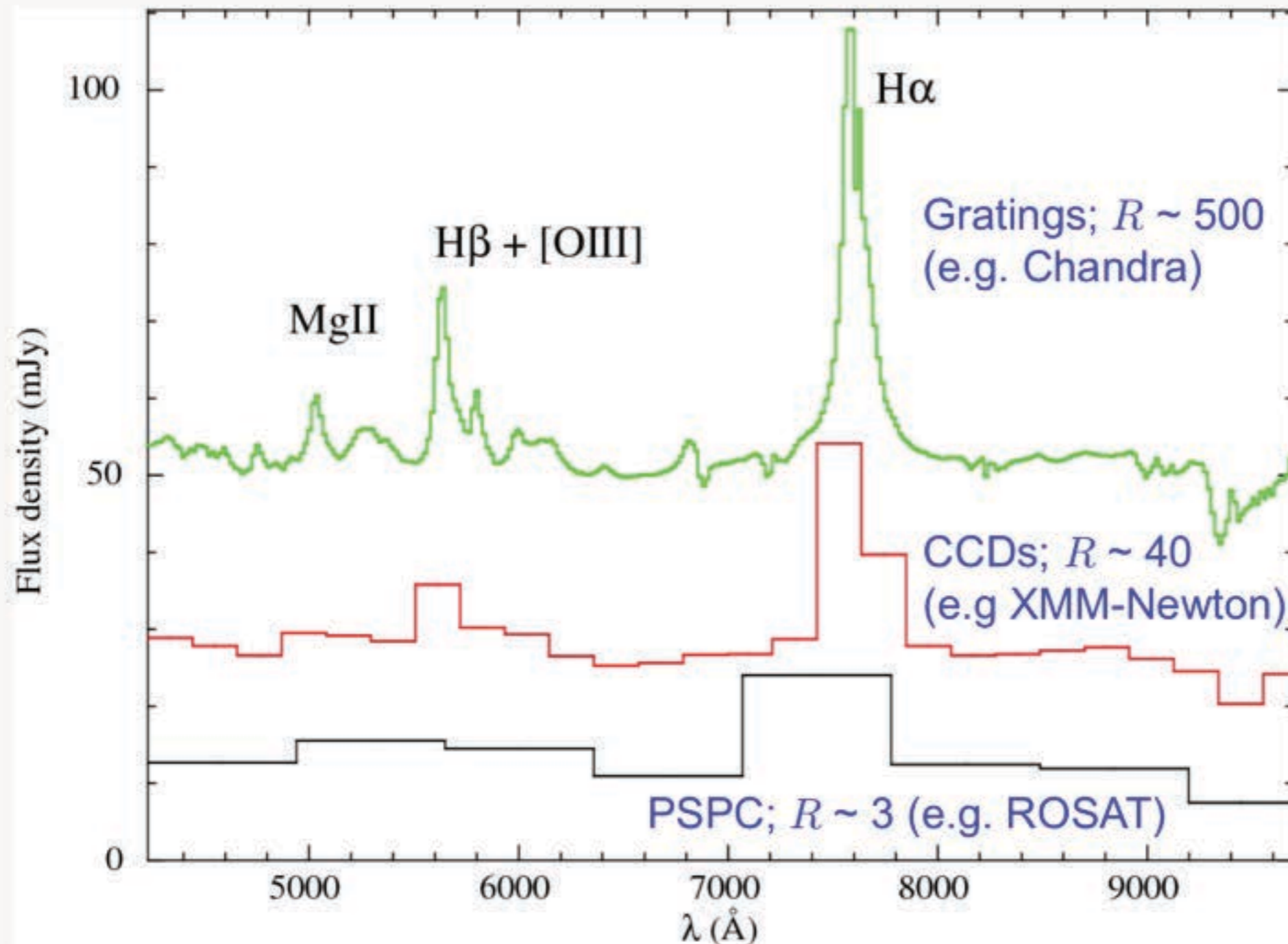
X-ray spectroscopy compared to optical spectroscopy

3C 273 Optical Spectrum (NTT/EMMI)



X-ray spectroscopy compared to optical spectroscopy

3C 273 Optical Spectrum with typical X-ray instruments



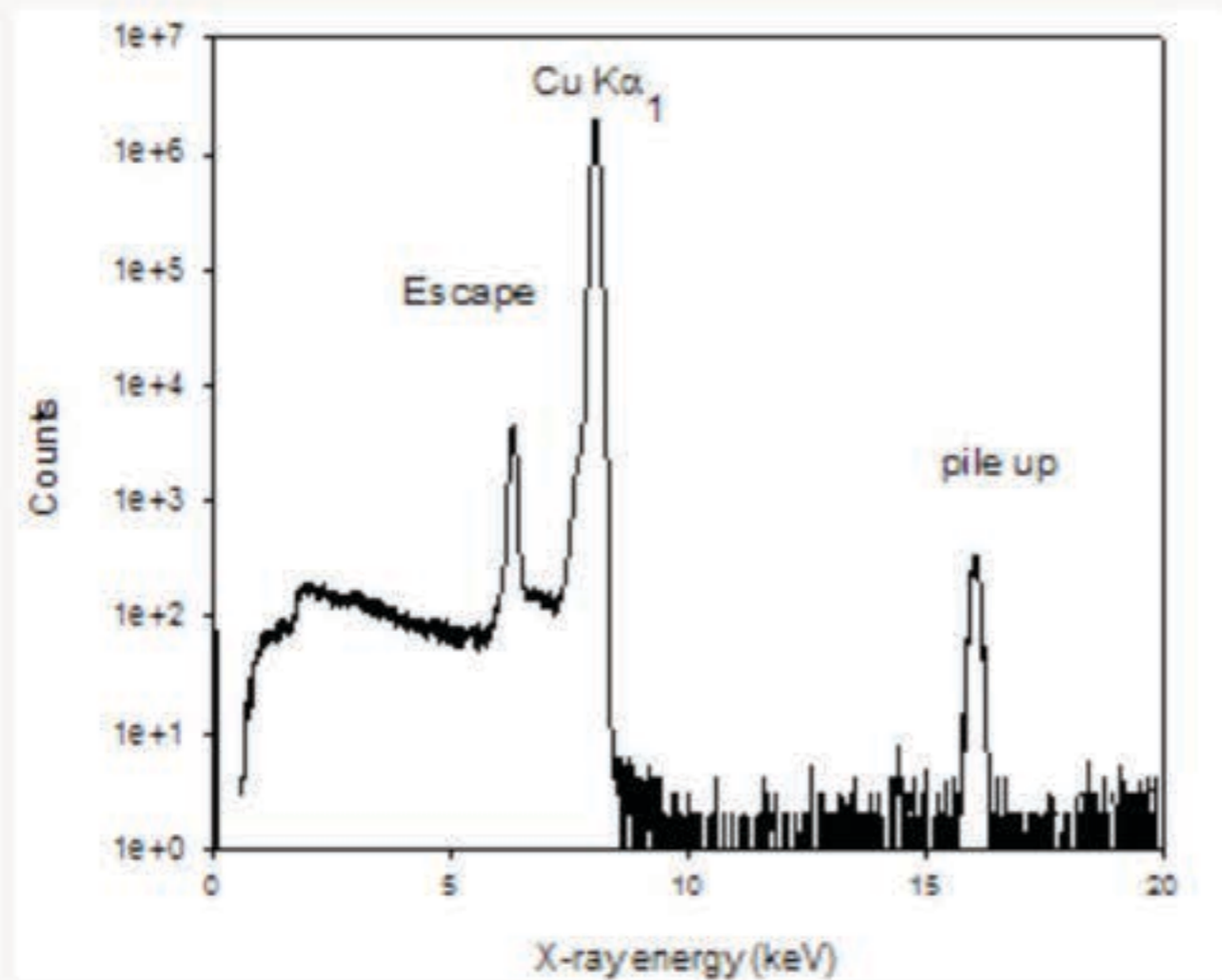
Practical X/ γ -ray spectroscopy

The limited spectral resolution of the X-ray detectors means that there is a non-negligible probability that a photon of energy E that enters the telescope is assigned an energy $E' \neq E$ within a certain energy range around E .

This can be expressed in terms of a function, $R(E, E')$, that gives the probability that a photon of energy E is assigned an energy E' in the detector.

Problems in X-ray astronomy

Detector response to incident quasi-monochromatic photons with $E \sim 8.03$ keV

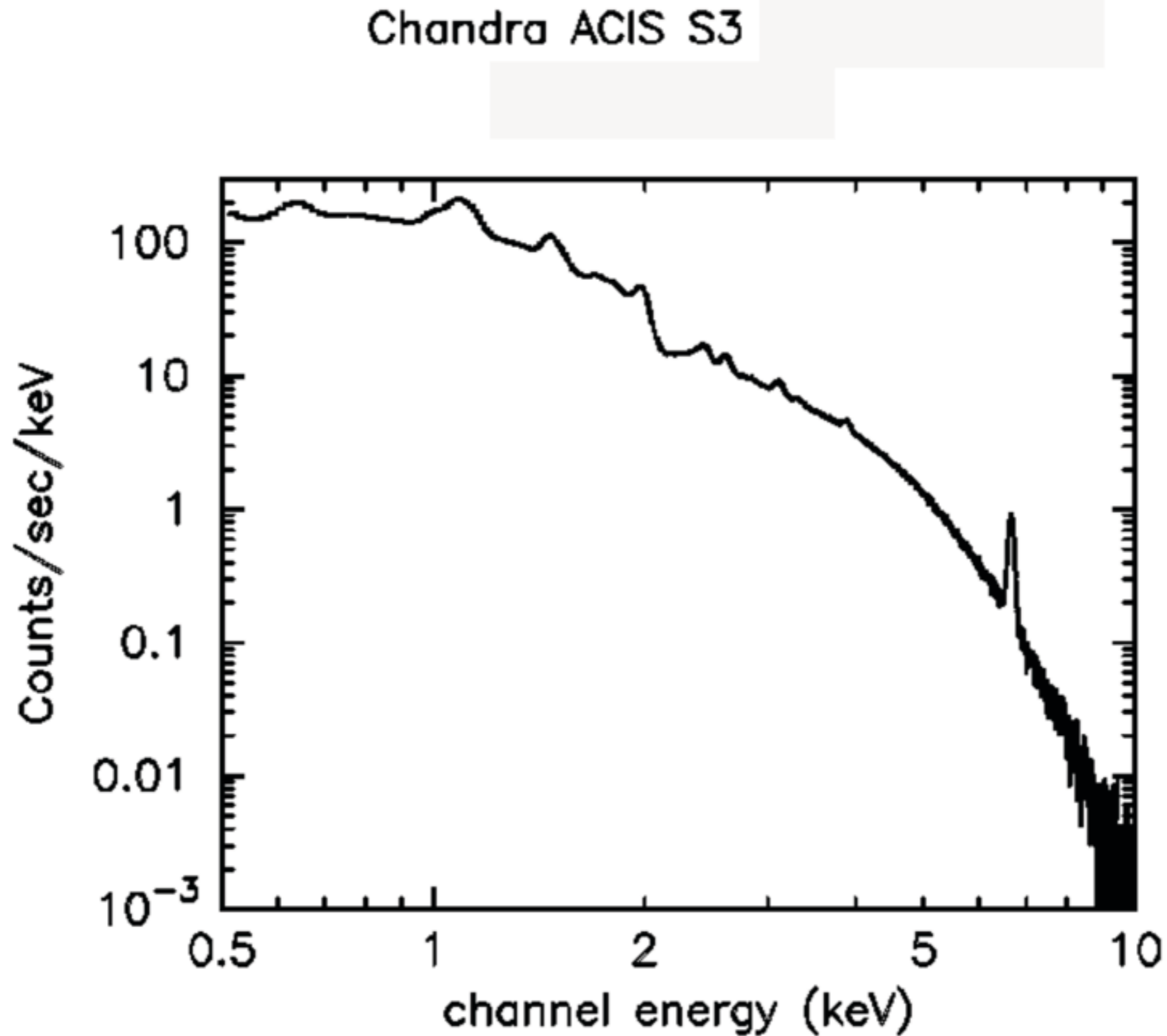


The Basic Problem (1)

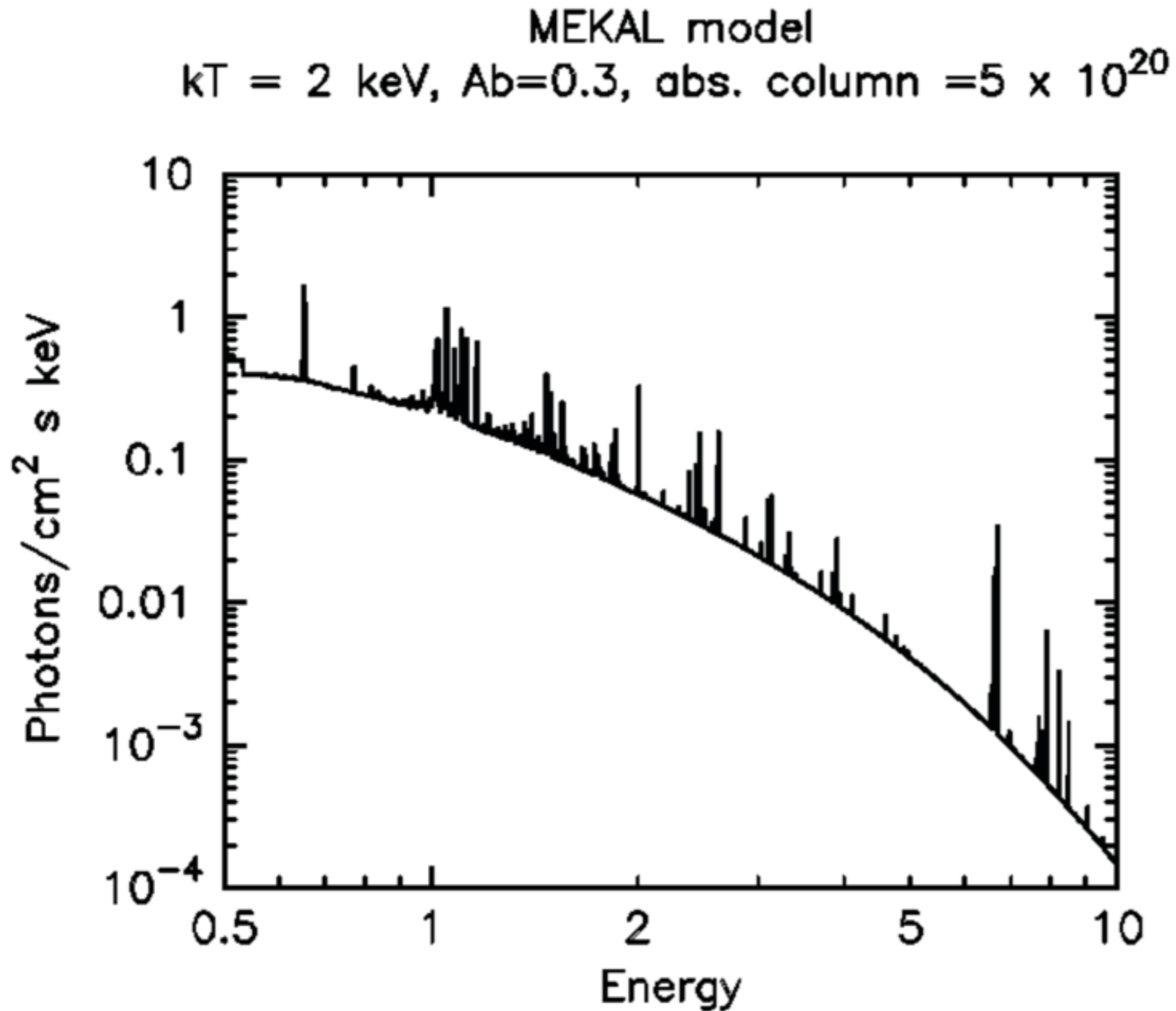
Suppose we observe a source and detect $D(E')$ photons per unit area, per unit time, per unit energy as a function of the measured energy E' of the photons, how can we infer $S(E)$, the number of photons per unit area, per unit time, per unit energy emitted by that source?

(Remember that the measured energy of each photon is not necessarily, and most likely is not, equal to the energy of the emitted photon!)

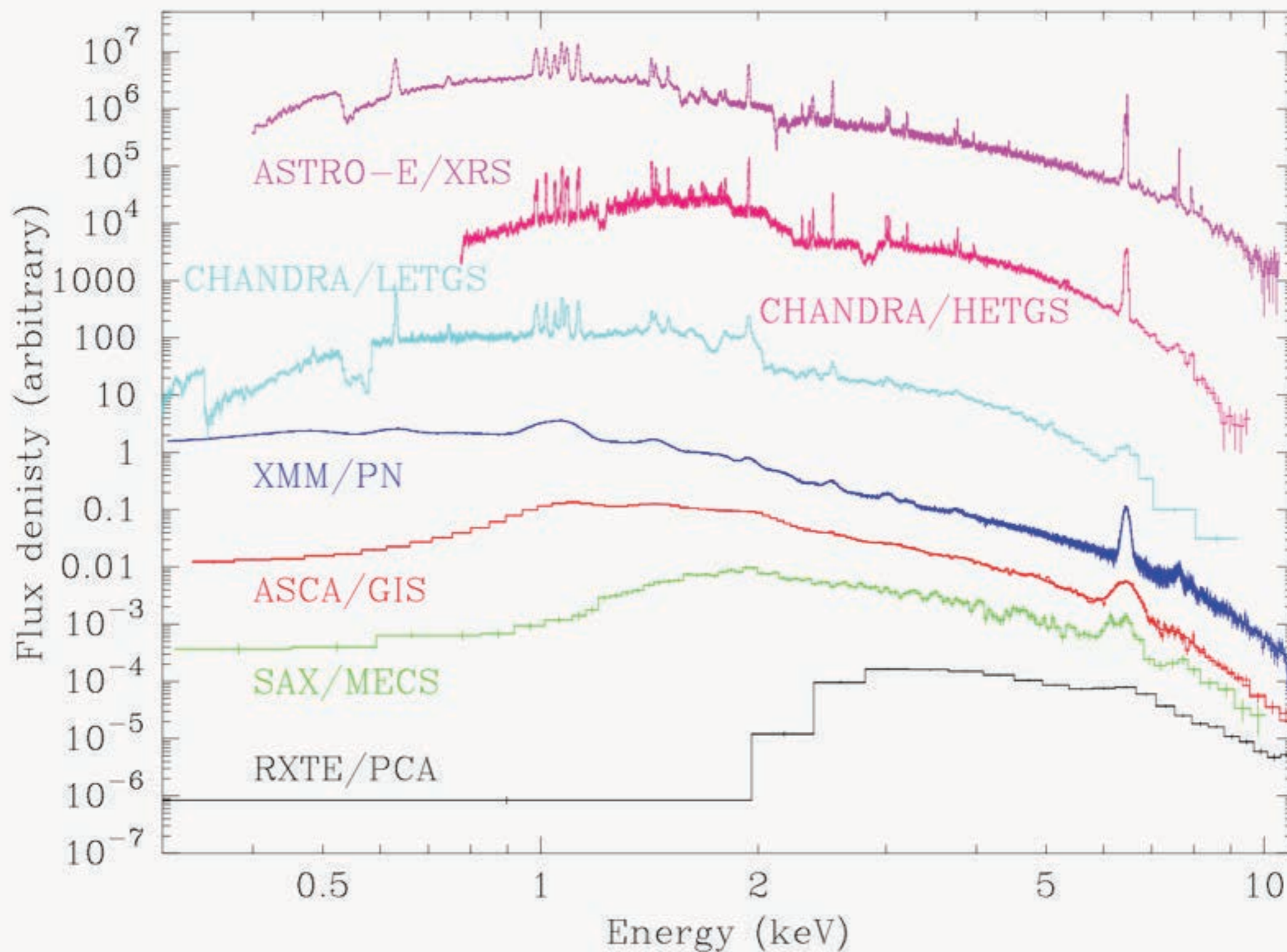
Can we start with this...



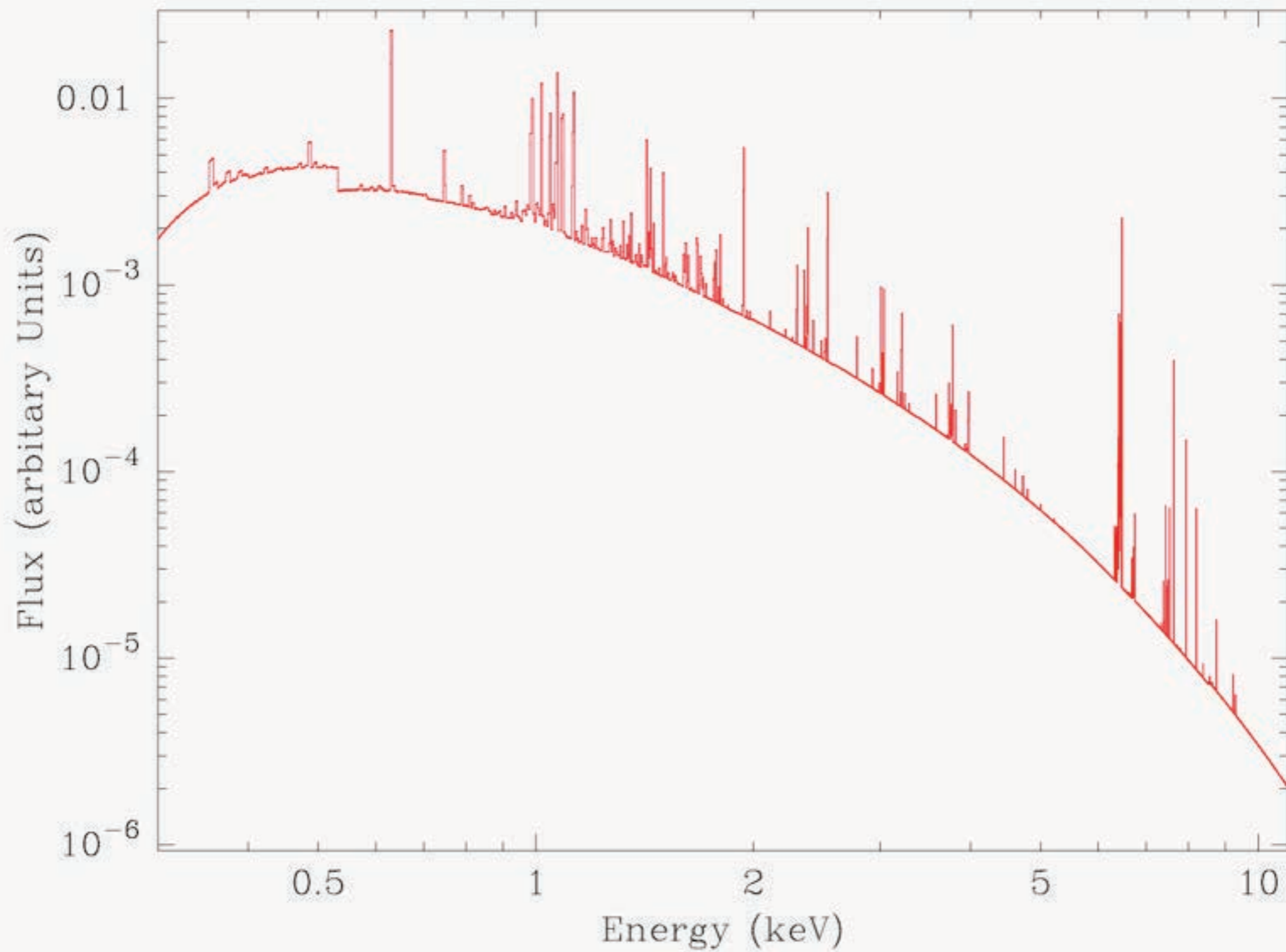
... and deduce this

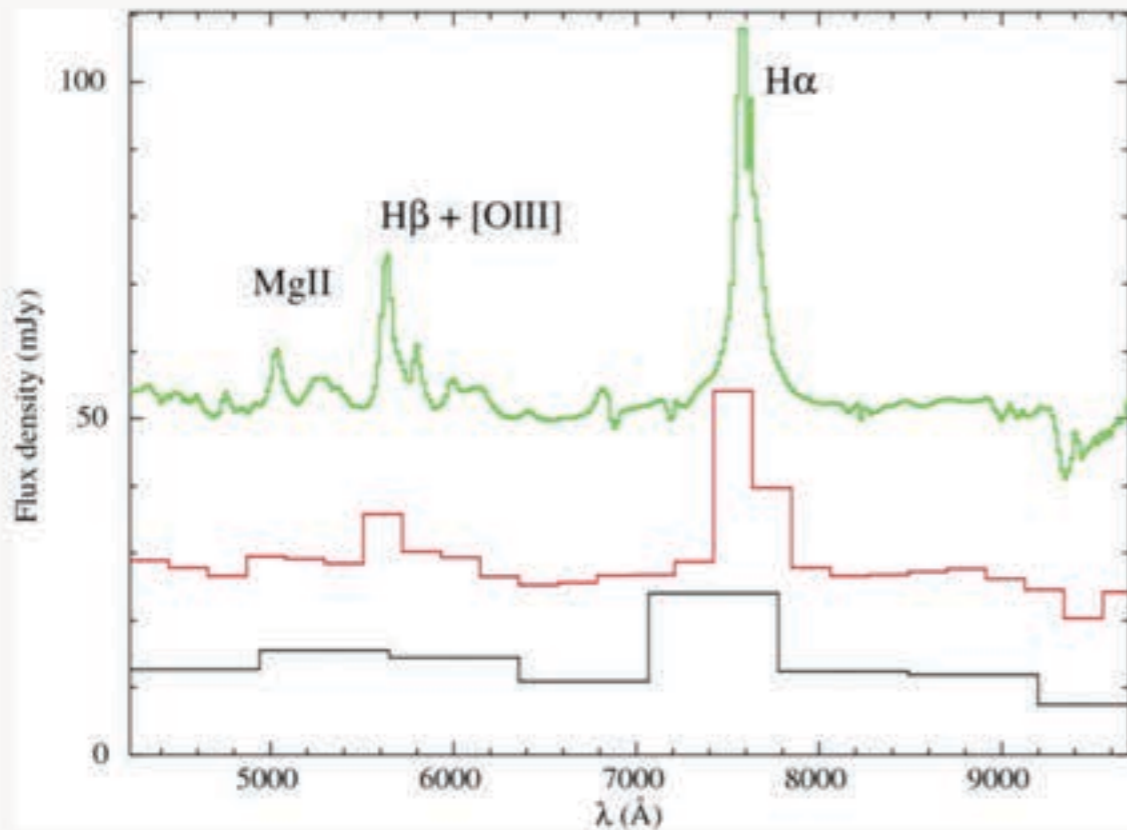


Can we start with any of these...

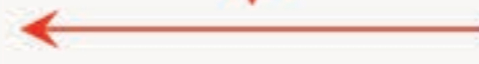
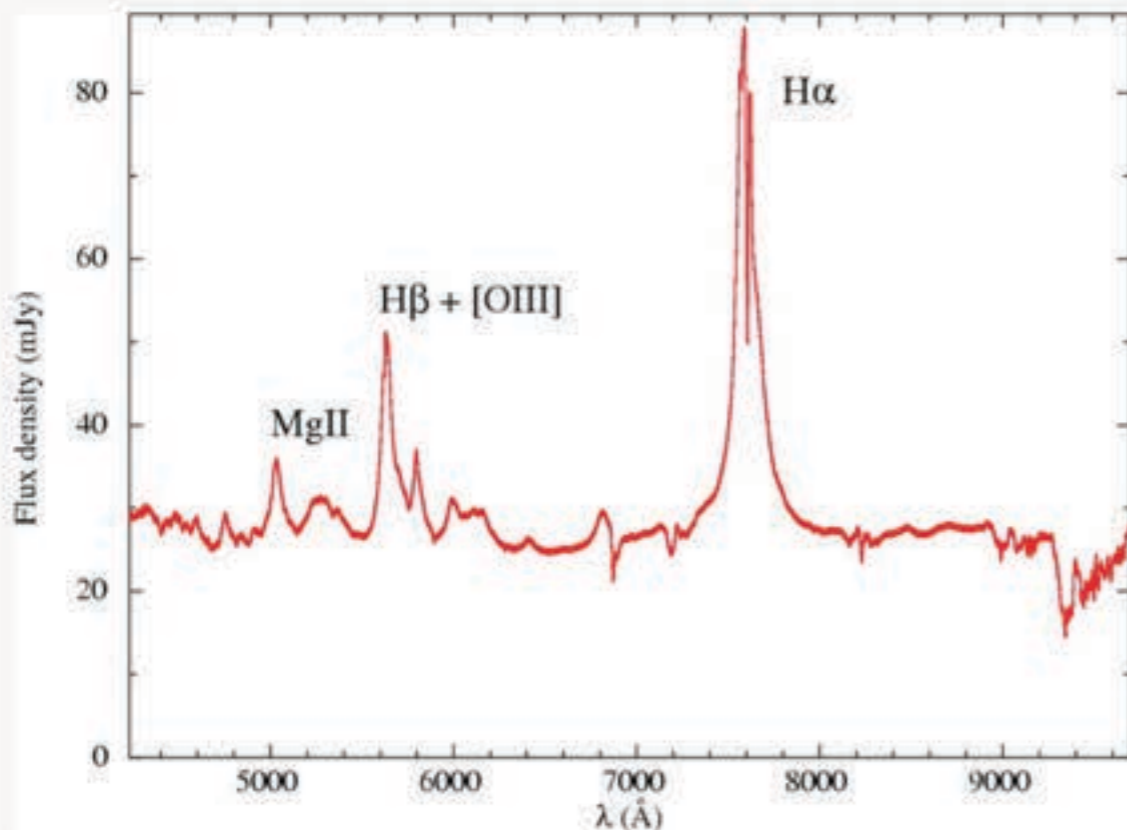
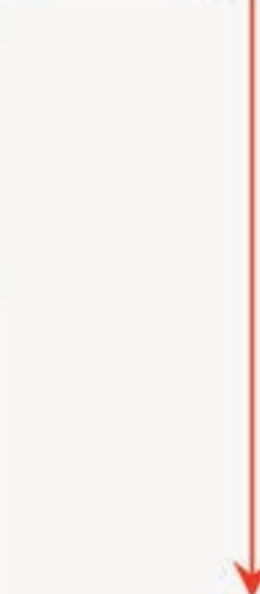


... and deduce this





Can we start with these...



and deduce this?

CONCLUSIONES

- + Los objetos estelares son los más brillantes y con más cosas que estudiar: binarias de rayos X, remanentes de supernova...
- + En las galaxias normales se ha estudiado con gran precisión la física del gas interestelar difuso y caliente y su origen en vientos supergalácticos
- + Se ha probado la presencia de agujeros negros de masa intermedia
- + Las líneas anchas relativistas de Fe han sido estudiadas en profundidad
- + Se determinó la existencia de las líneas de Fe "elusivas"
- + El "soft excess" sigue siendo un misterio
- + Los estudios de absorción fría y tibia han transformado el modelo unificado
- + Detección de filamentos de gas caliente, remanentes de Universo en formación
- + Muchas cosas más...

El lanzamiento de los satélites XMM-Newton y Chandra hace ya más de una década ha revolucionado la astronomía extragaláctica (observacional y teórica) de los fenómenos más energéticos del Universo pero sobretodo nos ha abierto la puerta a muchos más interrogantes aún pendientes de resolver.

Observar en Rayos X es complejo y el tratamiento de datos tampoco es trivial pero se puede obtener mucha información muy valiosa que no puede obtenerse en otras bandas de energía