

Tema 5:

Actividad nuclear en galaxias

- Consultar: "*Galactic Astronomy*", Binney & Merrifield, 1998, Princeton, tema 4.
- "*Galaxies and the Cosmic Frontier*", Waller & Hodge, 2003, Harvard, temas 1 y 2.
- "*Galaxies and Cosmology*", Jones & Lambourne, 2007, Cambridge, tema 3 (J&L07).
- "*An Introduction to Modern Astrophysics*", Carroll & Ostlie, 2007, Pearson, tema 28 (C&O07).
- "*Galaxies in the Universe*", Sparke & Gallagher III, 2008, Cambridge, tema 9.
- "*Galaxy Formation and Evolution*", Mo, van den Bosch, White, 2010, Cambridge, Tema 2.
- NASA Extragalactic Database (NED) Level 5: <http://ned.ipac.caltech.edu>.



Objetivos del tema

- **Descripción del fenómeno de actividad nuclear en galaxias.**
 - ◆ **¿Qué son los AGN?**
 - ◆ **¿Tipos de AGN?**
 - ◆ **Rasgos observacionales de los AGN.**
 - ◆ **Modelos de AGN.**
 - ◆ **Importancia cosmológica.**



5.1. Galaxias con actividad nuclear

La emisión de las galaxias está normalmente dominada por la luminosidad de la **componente estelar** (sobre todo en el óptico), la radiación procedente de **polvo** interestelar (en el MIR/FIR) y del **gas** (sobre todo en el radio).

Además algunas galaxias muestran signos característicos en todas las longitudes de onda de una **emisión nuclear** que puede ser tremendamente brillante, tanto o más que la galaxia entera. Este tipo de galaxias se conocen como galaxias con **Núcleos Galácticos Activos (AGN)**. A veces se toma la parte por el todo y se dice que "tal galaxia es un AGN", cuando se debería decir "alberga un AGN", o "tiene un núcleo activo".

La emisión de los AGN se explica mediante la existencia de un **agujero negro supermasivo (SMBH)** en el centro de estas galaxias, que convierte a energía gravitatoria en energía electromagnética. Explicaciones alternativas como la existencia de grandes brotes de formación estelar en los núcleos galácticos no están descartadas, aunque no parecen ser suficientes para explicar todas las propiedades observacionales de los AGN.

Los AGN se detectan mediante diferentes métodos, lo que lleva a una clasificación en distintos tipos. Sin embargo, todos los AGN parecen tener el mismo origen y se intenta construir una **teoría o modelo unificado** que explique sus distintas propiedades observacionales.

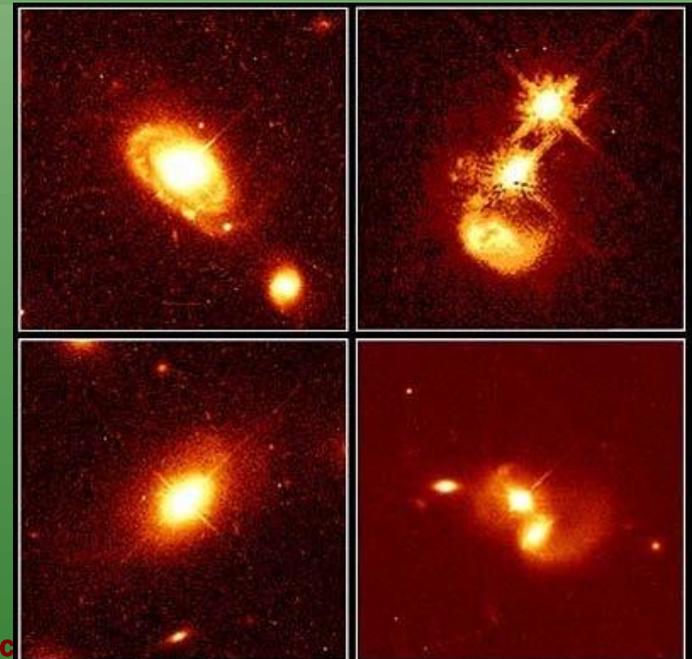


5.2. Rasgos observacionales de los AGN

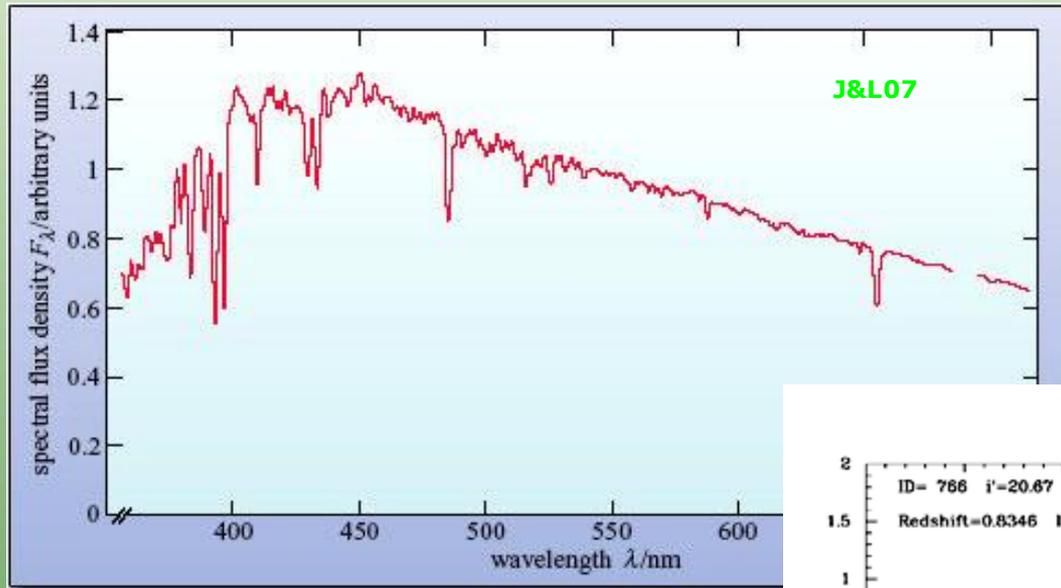
Morfológicamente el aspecto de la mayoría de los AGN es el de una galaxia normal. Los AGN más brillantes, los cuásares (QSO) pueden tener un aspecto totalmente estelar y/o ir acompañado de una morfología de galaxia.

Los espectros de los AGN son claramente reconocibles y distinguibles de los de "galaxias normales".

Los espectros de los AGN son en realidad la suma del espectro de la población estelar, el gas, el polvo y un AGN. El espectro típico de un AGN puro tendría además las mismas componentes: emisión de poblaciones estelares afectadas por el AGN, de gas y polvo alrededor del AGN y de partículas aceleradas por el AGN.

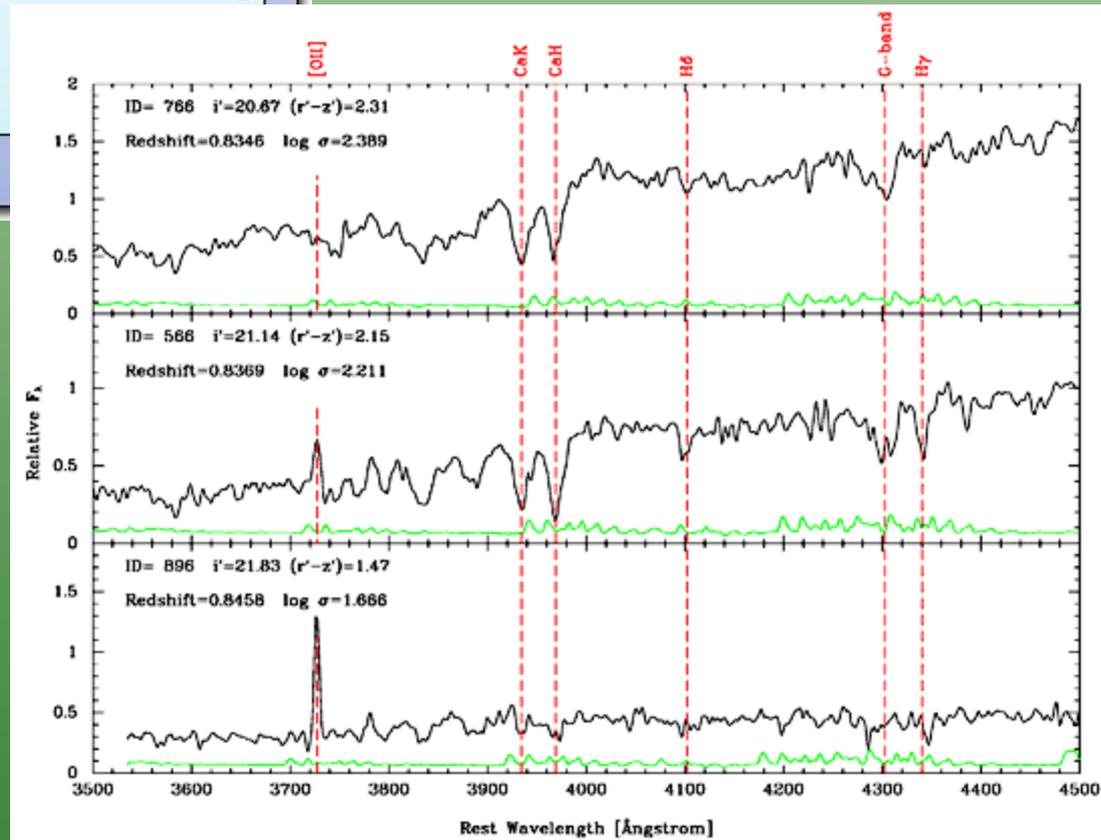


5.2. Rasgos observacionales de los AGN



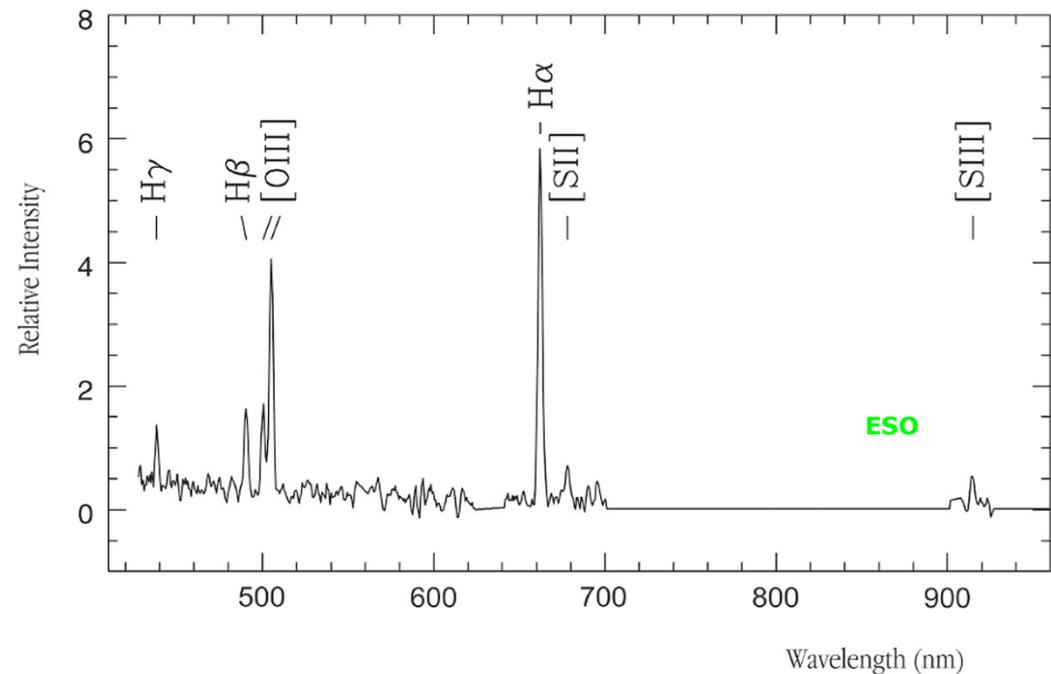
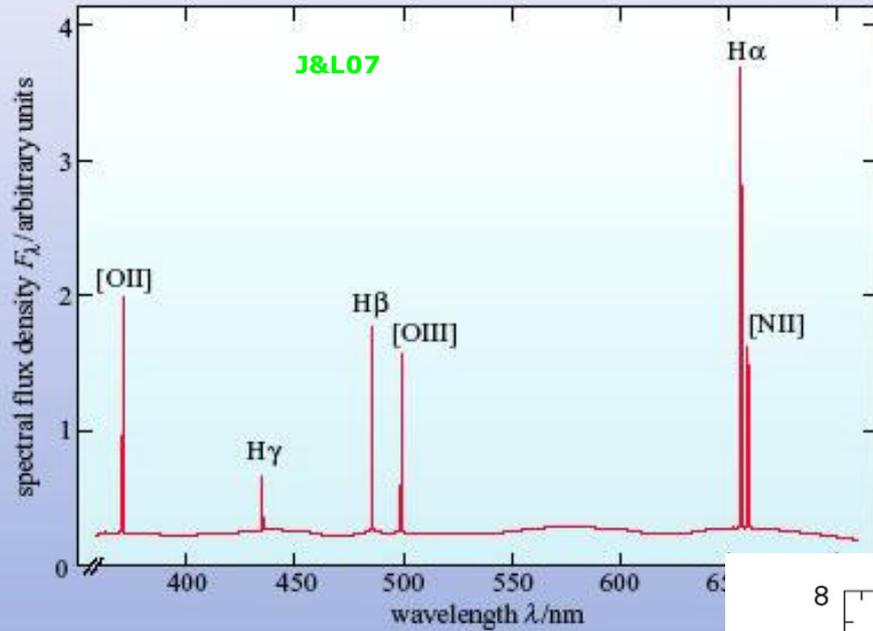
Espectros típicos de poblaciones evolucionadas

Jorgensen et al. (2005)

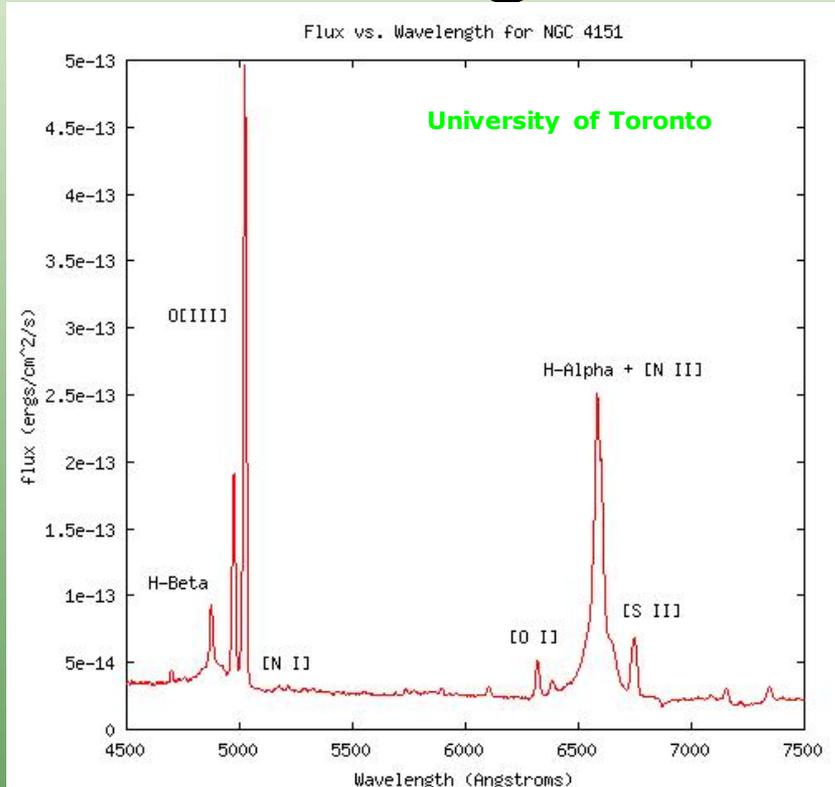


5.2. Rasgos observacionales de los AGN

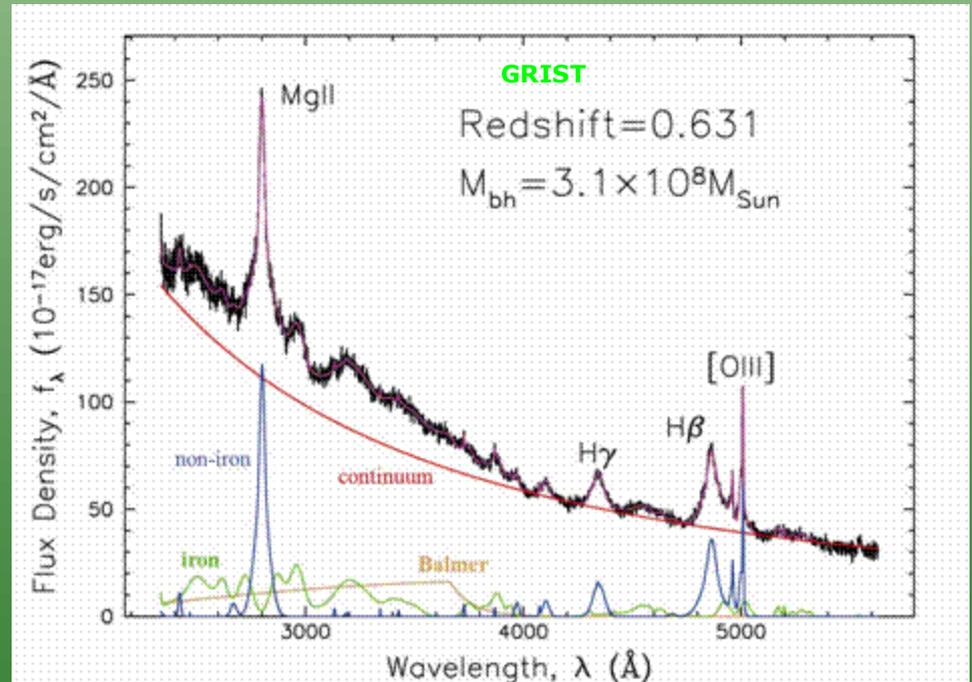
Espectros típicos de poblaciones jóvenes



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

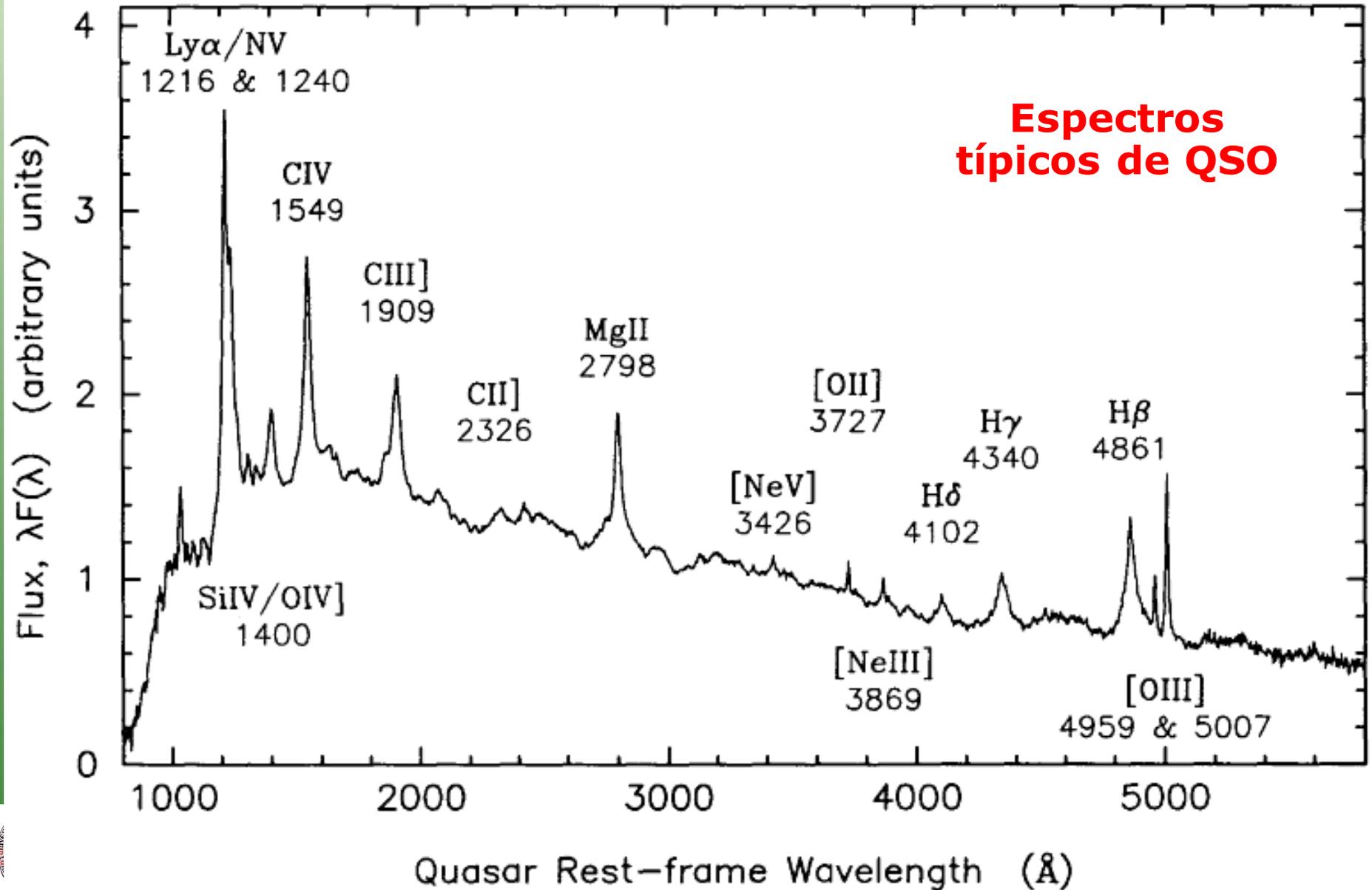


Espectros típicos de AGN (mixto)

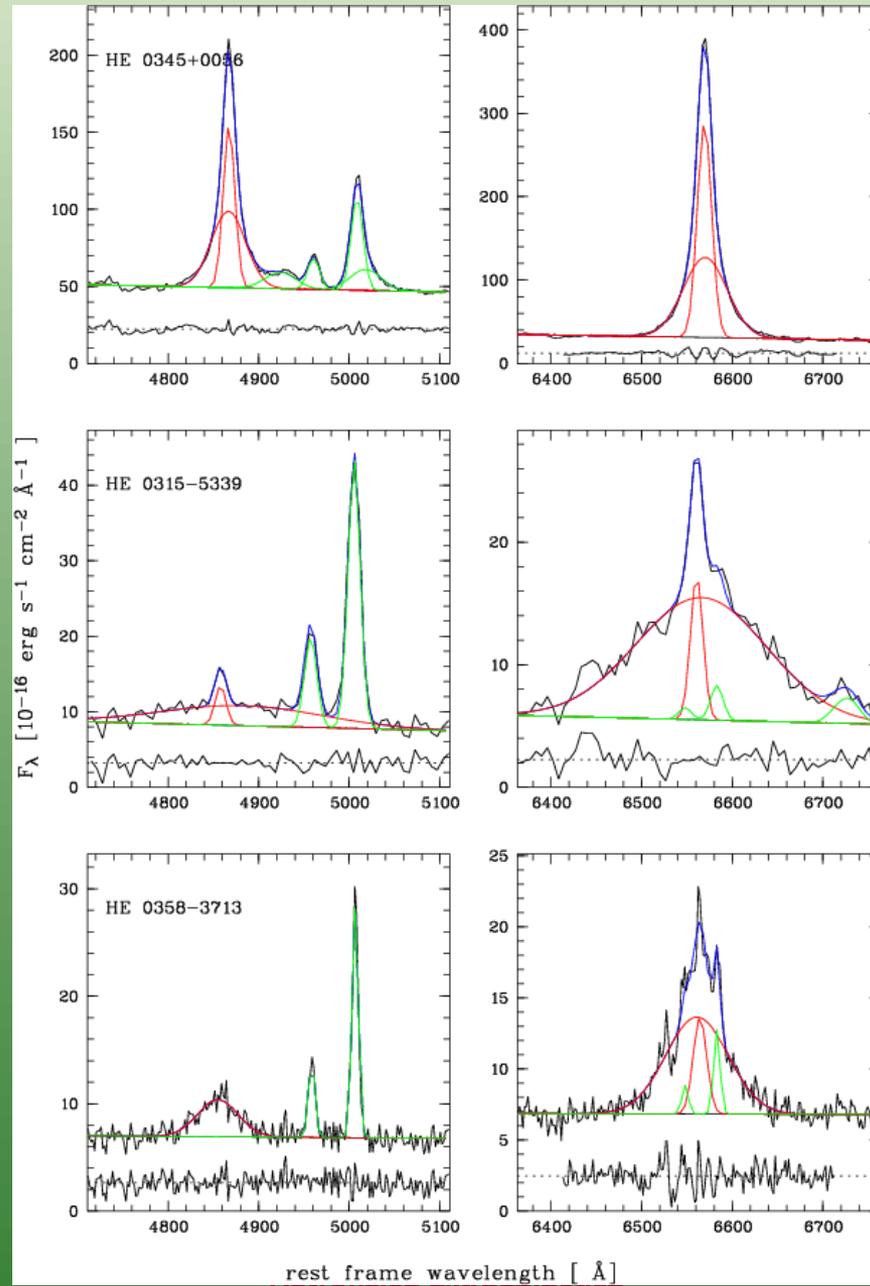


5.2. Rasgos observacionales de los AGN

Francis et al. (2001)



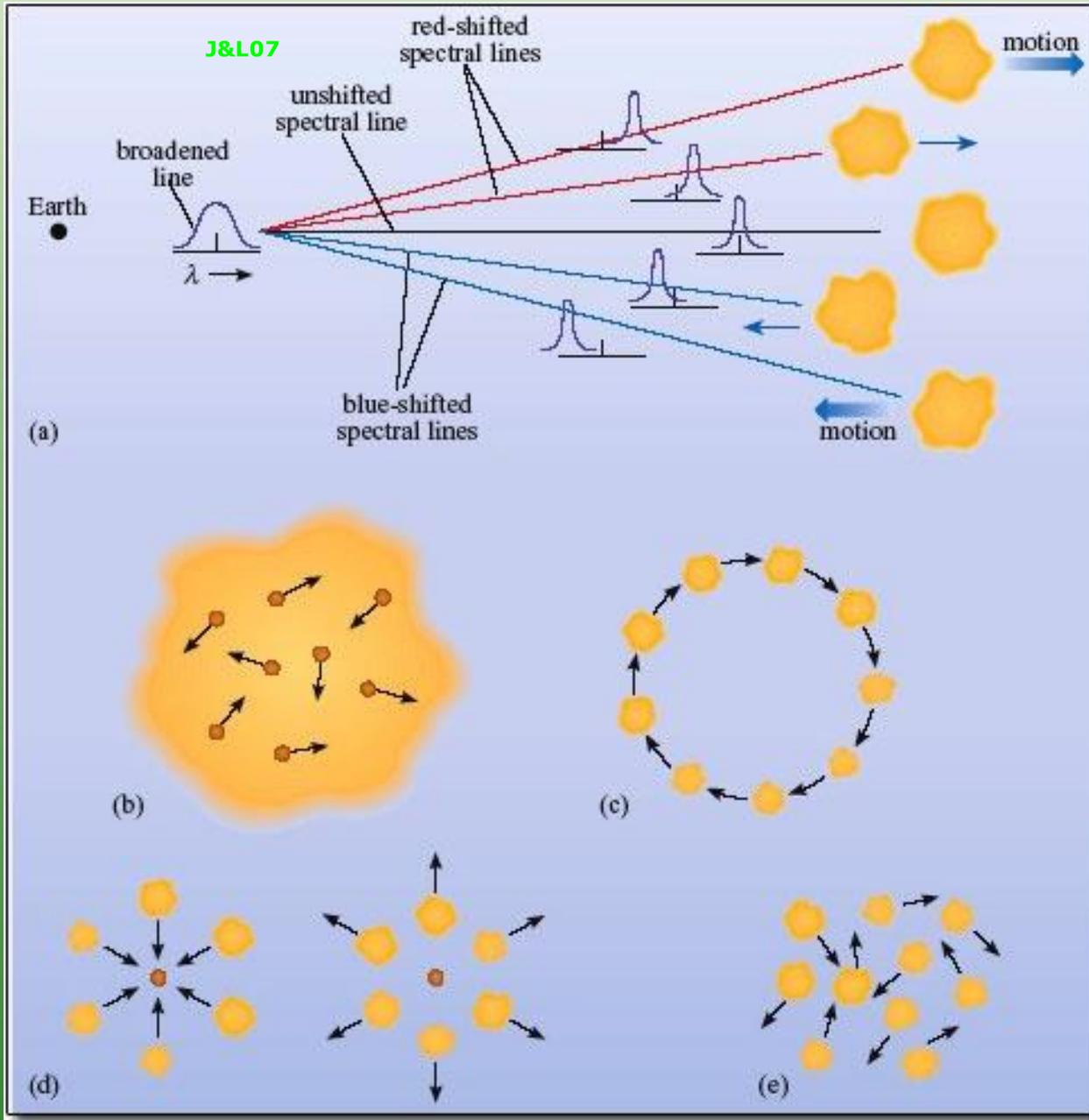
5.2. Rasgos observacionales de los AGN



Schulze et al. (2009)



5.2.Rasgos observacionales de los AGN



$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{\Delta v}{c}$$

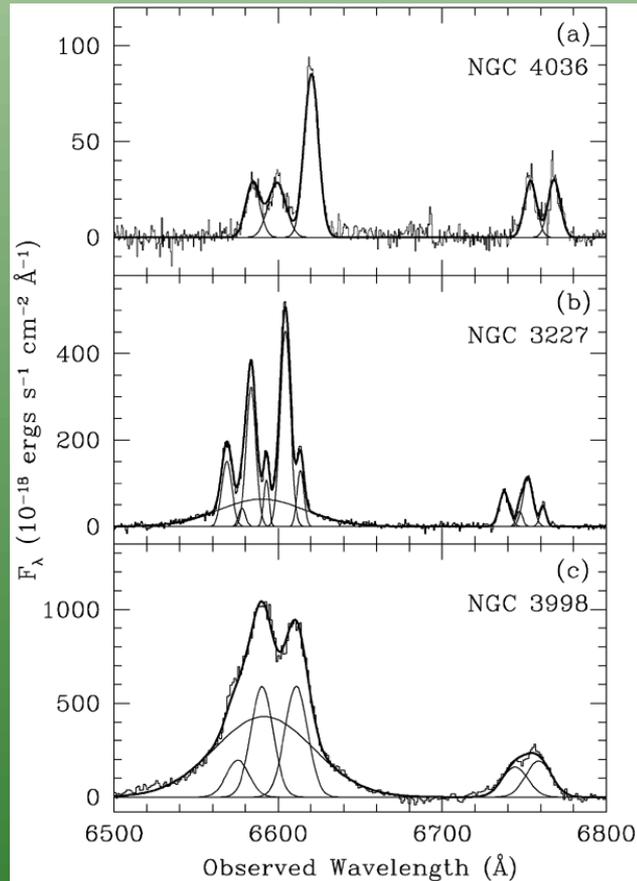
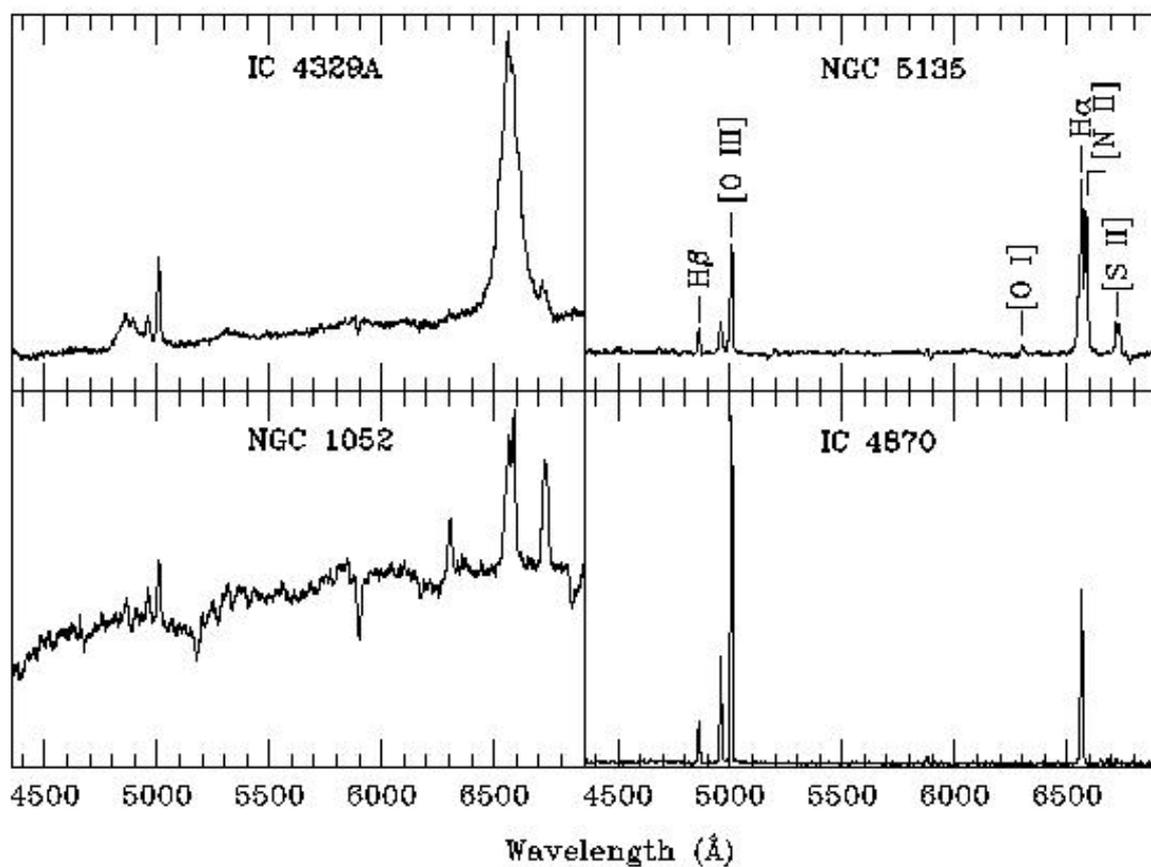
$$\Delta v = \left(\frac{2kT}{m} \right)^{1/2}$$



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

Valores típicos de la anchura de líneas de emisión en galaxias normales van desde 100 hasta 300 km/s. Por ejemplo, una galaxia de $10^{12} M_{\odot}$ y 50 kpc de radio podría tener una velocidad de 300 km/s.

En los AGNs las líneas de emisión pueden tener anchuras que indican velocidades de al menos 400 km/s, y pueden llegar a varios miles de km/s.



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

El espectro de líneas de emisión de los AGN se divide en varias componentes, que suelen ser **temporalmente variables**:

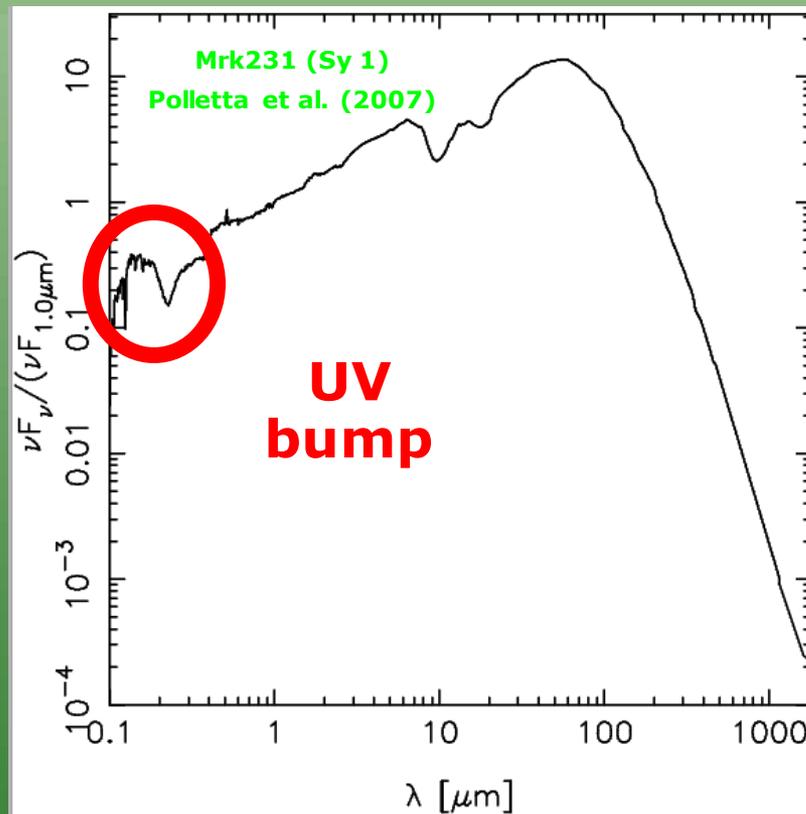
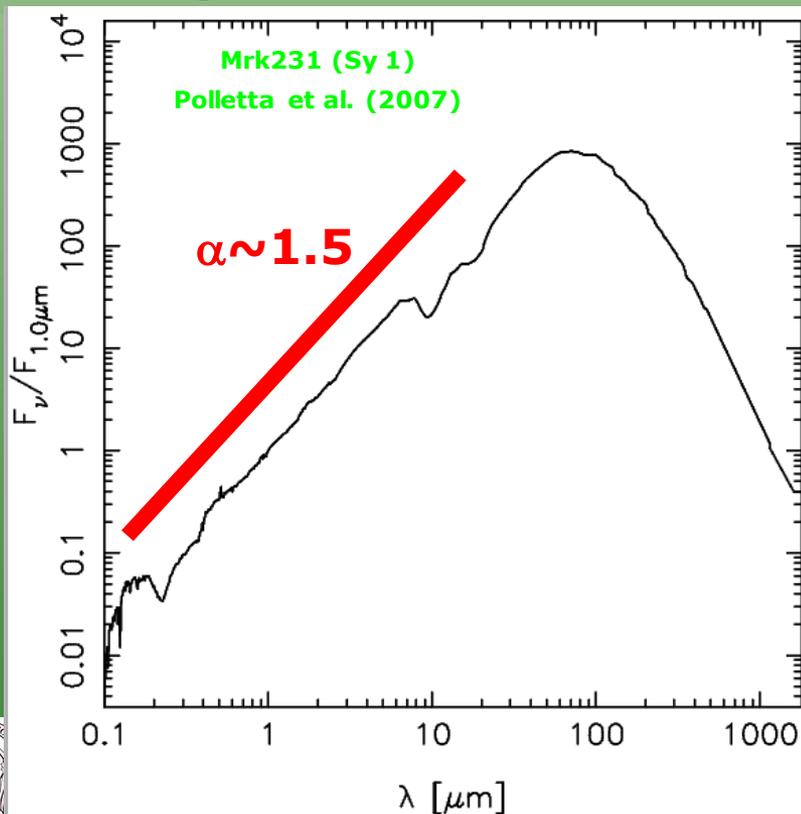
- ◆ Una componente de líneas relativamente estrechas (procedentes de la **NLR**), aunque más anchas que en galaxias normales ($v=400-500$ km/s), correspondientes a líneas prohibidas como $[\text{NII}]\lambda 654.8, 658.4$, $[\text{OIII}]\lambda 495.9, 500.7$, $[\text{OII}]\lambda 372.7$ (también líneas de alta ionización). Las líneas prohibidas son aquellas que provienen de transiciones que parten de un estado excitado muy estable (con una vida media muy larga), de modo que solo en entornos de muy baja densidad existen átomos en estos estados, que a densidades normales en la Tierra serían despoblados por colisiones de átomos.
- ◆ Una componente de líneas anchas (procedentes de la **BLR**), con velocidades de $1000-10000$ km/s, formada por líneas permitidas como la serie de Balmer de Hidrógeno, HeI, HeII.
- ◆ El espectro combinado de un AGN también puede mostrar **líneas típicas de formación estelar** que conviven con las más relacionadas con el propio AGN. De hecho, el fenómeno de AGN convive con el de formación estelar en la mayoría de galaxias, lo que supone un problema a la hora de identificar y estudiar en detalle ambos procesos.



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

La SED de los AGNs es también característica. Los AGN más potentes que dominan la emisión por encima de su galaxia anfitriona tienen una SED denominada de **ley de potencias** ($F_\nu \sim \nu^{-\alpha}$ con $\alpha \sim 0.5-2.0$), con ausencia de características espectrales estelares como líneas de absorción o "breaks" (como el de Balmer).

El UV también puede mostrar el conocido como **UV/blue bump**, que no suele tener ningún tipo de absorción (blue featureless continuum).



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

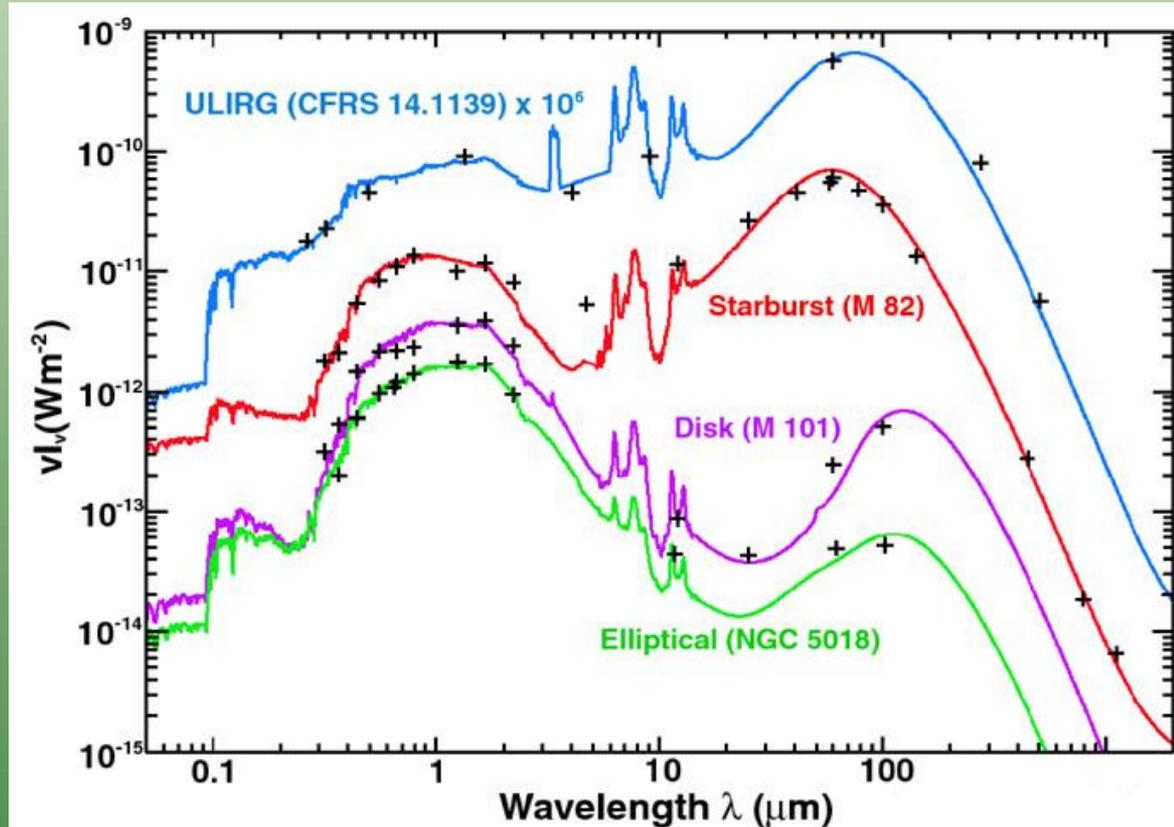
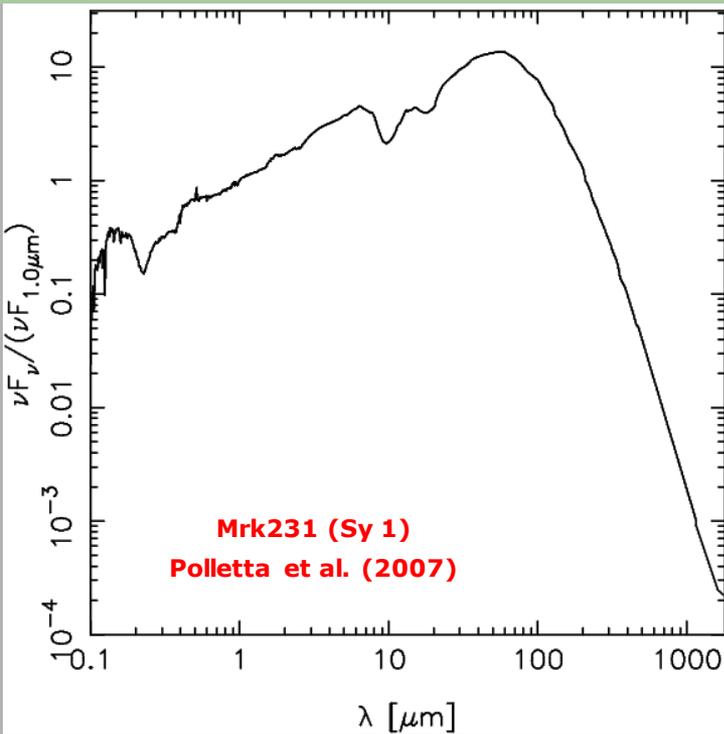
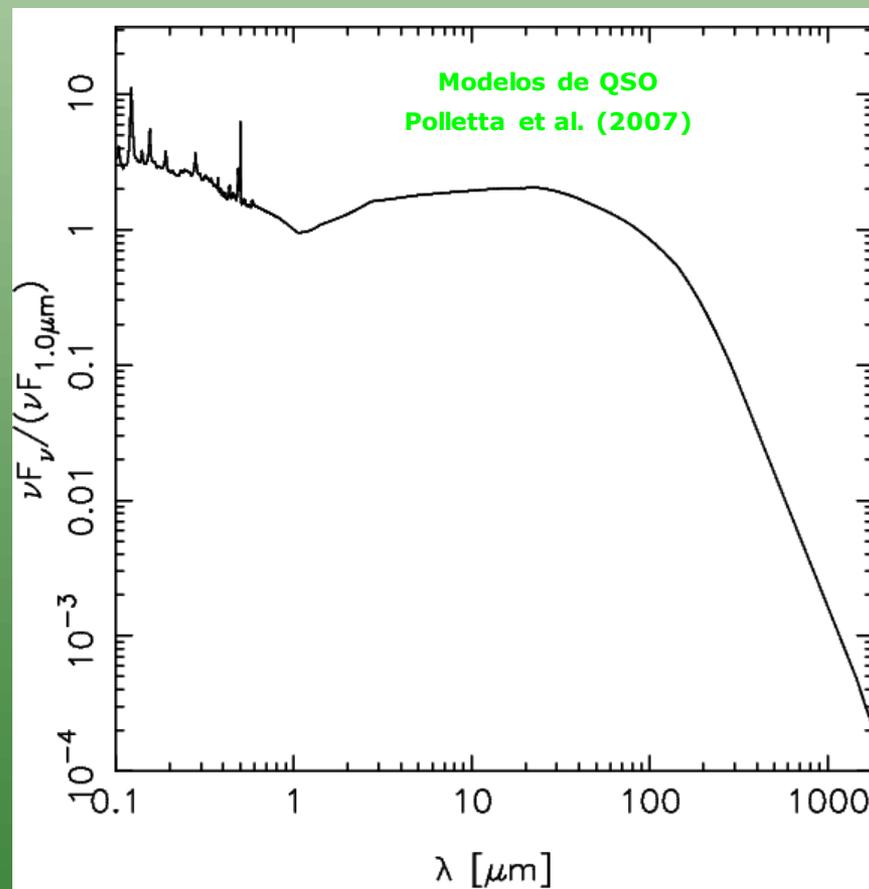
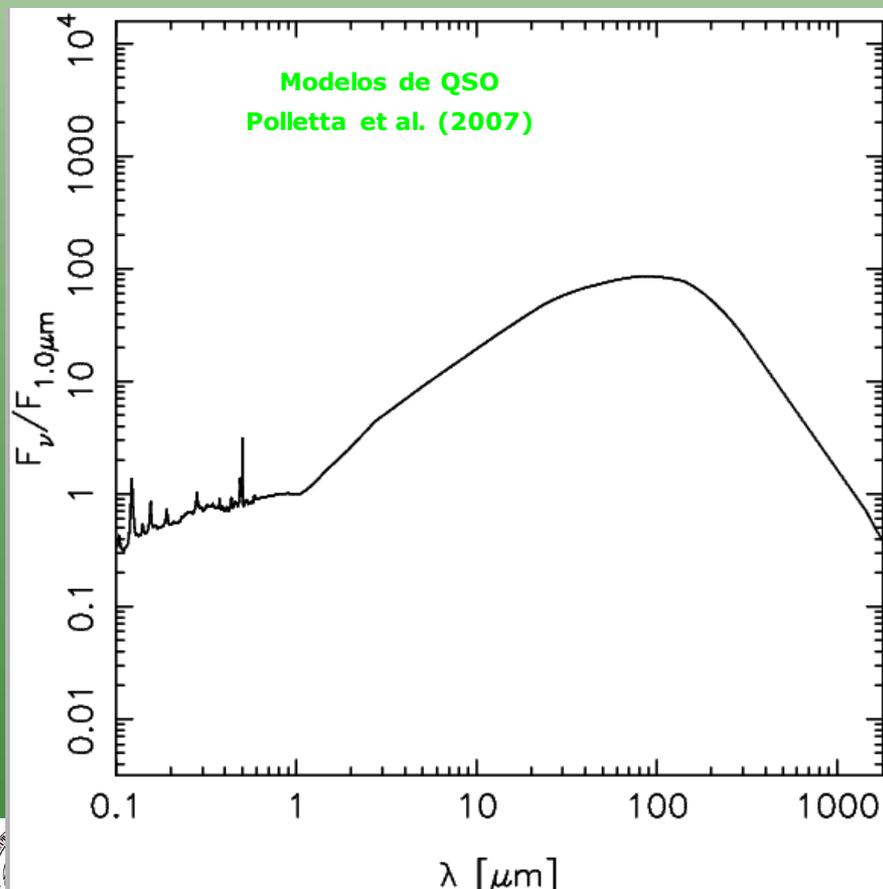


Fig 7.7 (P. Chaniai, G. Lagache) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



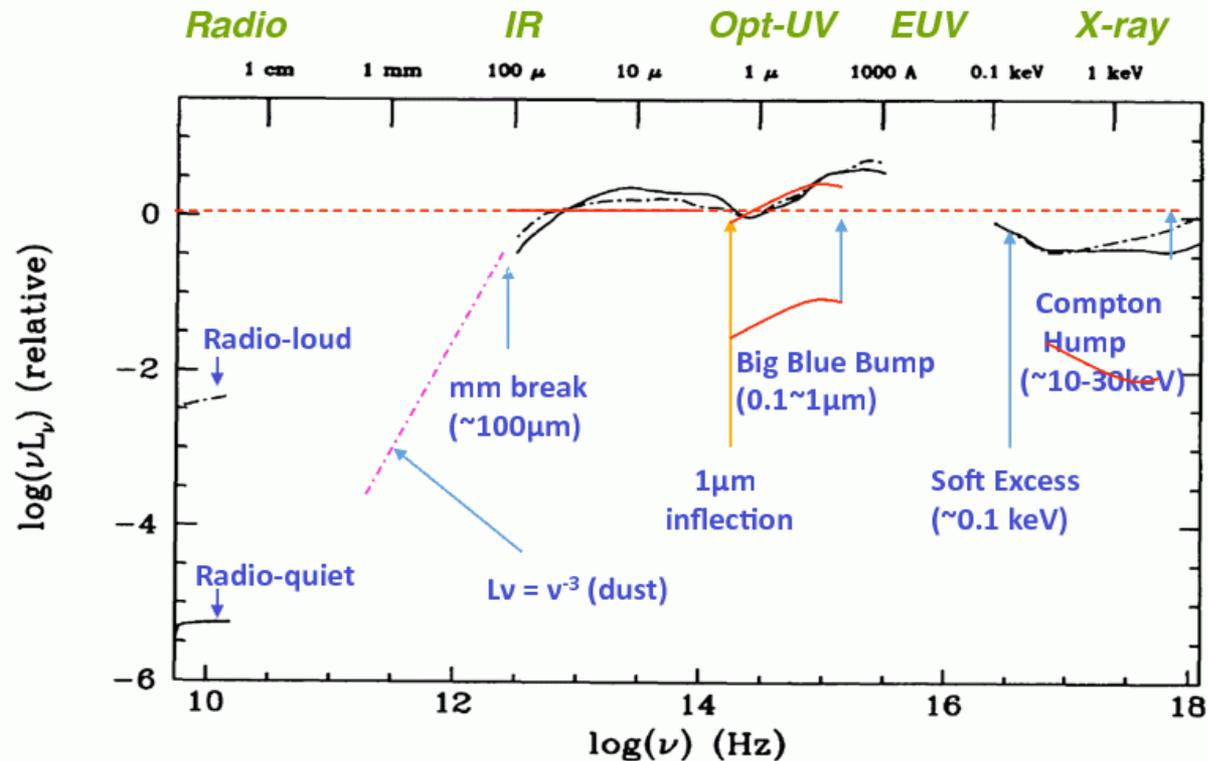
5.2. Rasgos observacionales de los AGN

En el caso de los QSO la SED en formato νF_ν es prácticamente plana, incluso hasta la zona de rayos-X (p.e., 3C 273), con líneas de emisión muy prominentes y anchas. La emisión puede estar altamente polarizada. La SED se interpretaría como compuesta por emisión de un disco de acreción ópticamente espeso (UV) o emisión free-free, mientras que en el IR emitiría polvo caliente a $T=100-2000$ K.



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

La SED de ley de potencias es típica de radiación sincrotrón proveniente de electrones relativistas acelerados en campos magnéticos intensos. A una determinada frecuencia la radiación de este tipo decrece como $\nu^{2.5}$ ya que el propio plasma absorbe su radiación (auto-absorción de radiación sincrotrón).

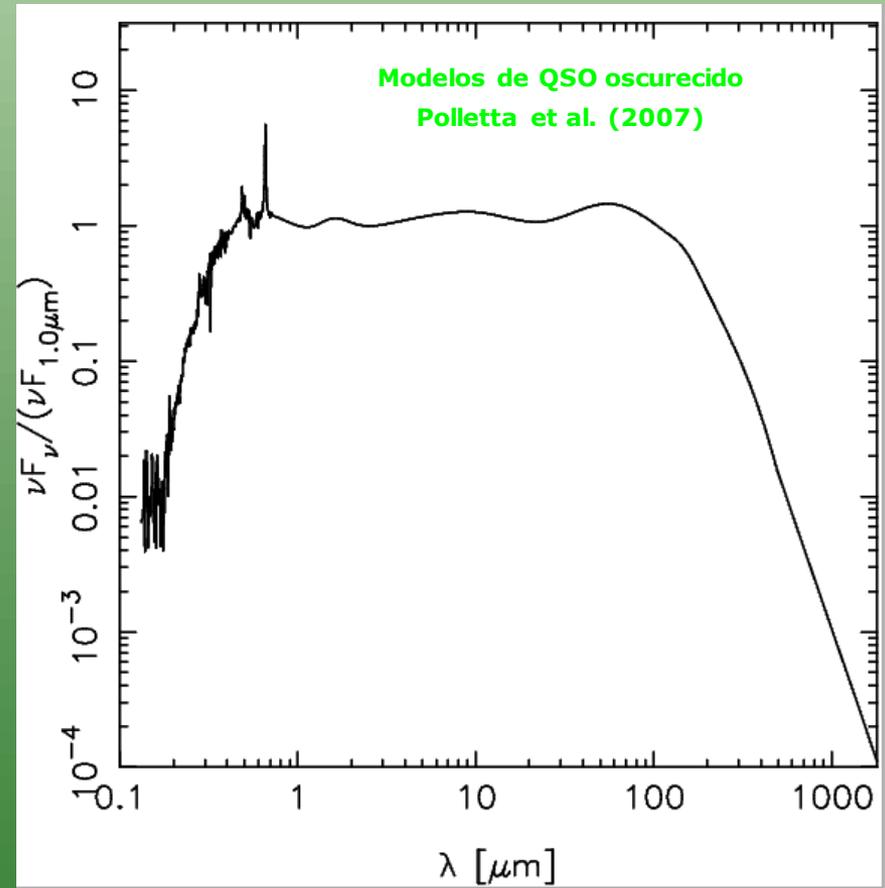
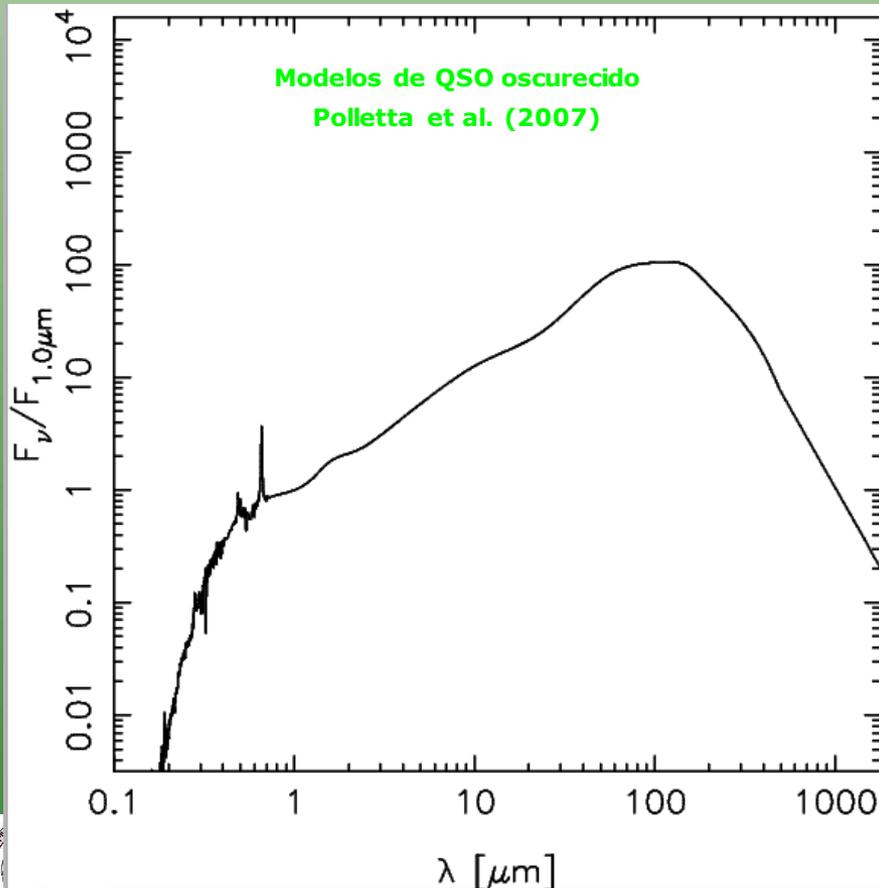


Elvis et al., 1994, ApJS, 95, 1



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

Existen QSO (y otros AGNs) muy oscurecidos en los que la emisión UV está muy atenuada (y la rayos-X) y domina la emisión IR. Esto serían AGN oscurecidos, que tiene gran importancia en los modelos de evolución de galaxias.



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

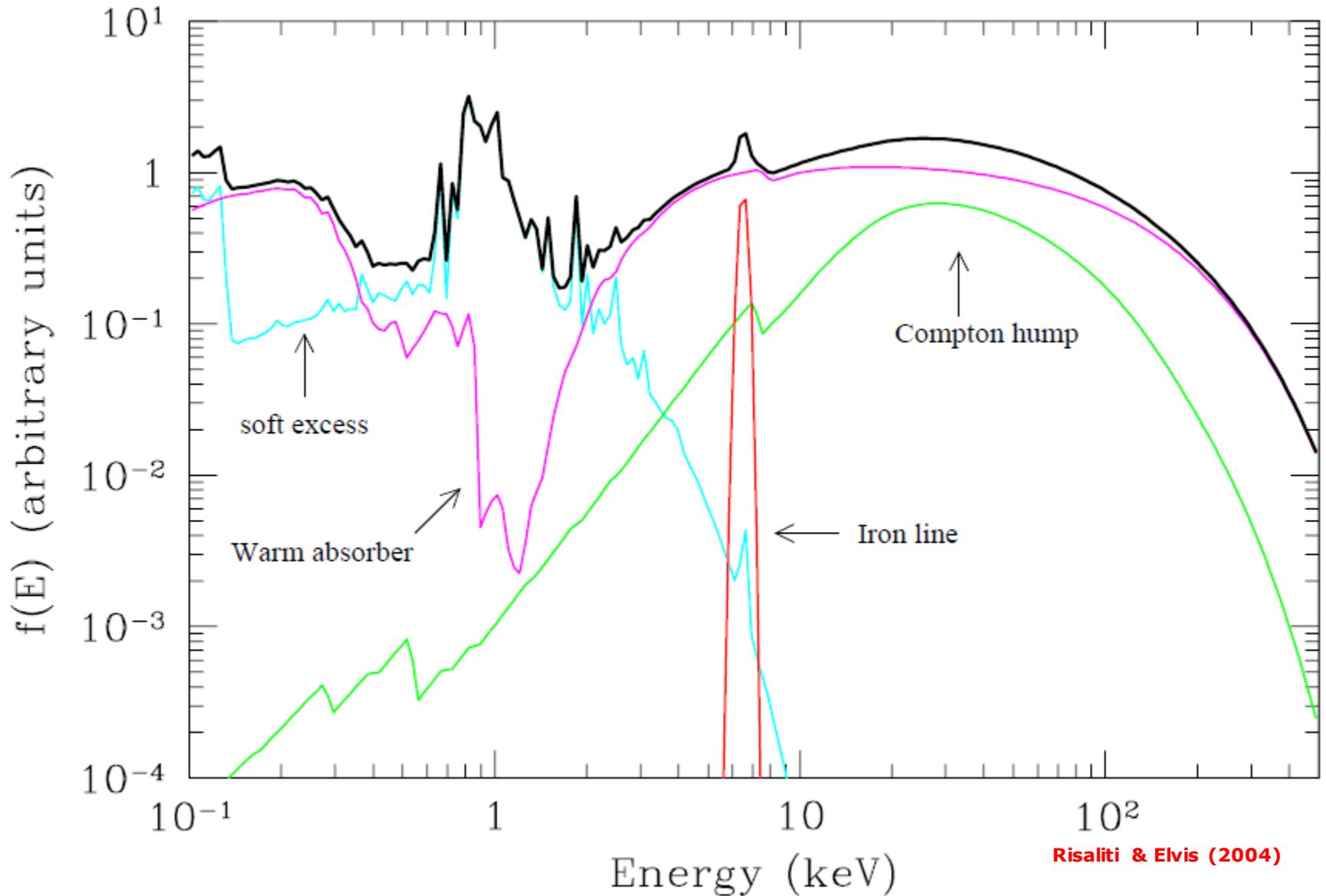
Los AGN son normalmente potentes emisores en rayos-X, en rayos- γ , en el IR medio y en ondas radio (de ahí que un tipo de AGN sean las radio-galaxias).

La emisión a todas las longitudes de onda puede ser **muy variable**. Por ejemplo, la emisión continua y de líneas anchas de algunas Sy 1 y QSO varían hasta un factor 2 en meses, semanas o incluso días, existiendo una correlación entre la variación de ambas componentes (primero suele variar el continuo y luego las líneas anchas). La variación en la componente estrecha no tiene por qué estar correlacionada con la anterior. La variación en rayos-X también puede ser apreciable aunque menos marcada, pero también mucho más rápida (en minutos). También existen brotes muchos más intensos pero más raros (p.e., en 1937 el QSO 3C279 incrementó su luminosidad en un factor 250 en el visible, durando el brote unos años).

La emisión visible de los AGN suele mostrar un nivel de **polarización** muy bajo (3% o menos). Pero algunos objetos muestran polarizaciones lineales muy marcadas en la emisión radio procedente de sus lóbulos (hasta del 60%). La polarización proviene de la radiación sincrotrón y la presencia de campos magnéticos intensos.



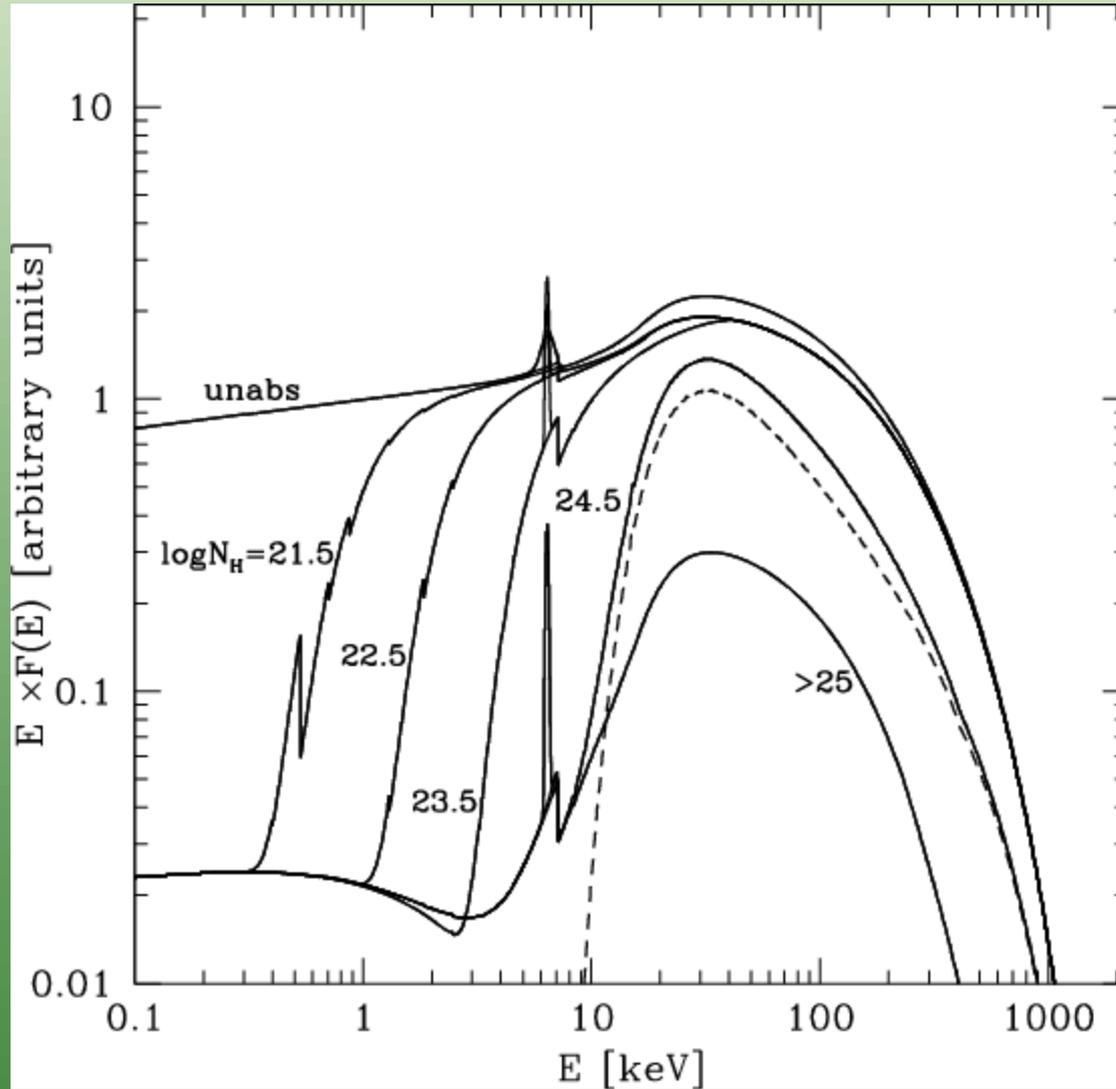
5.2. Rasgos observacionales de los AGN



Risaliti & Elvis (2004)



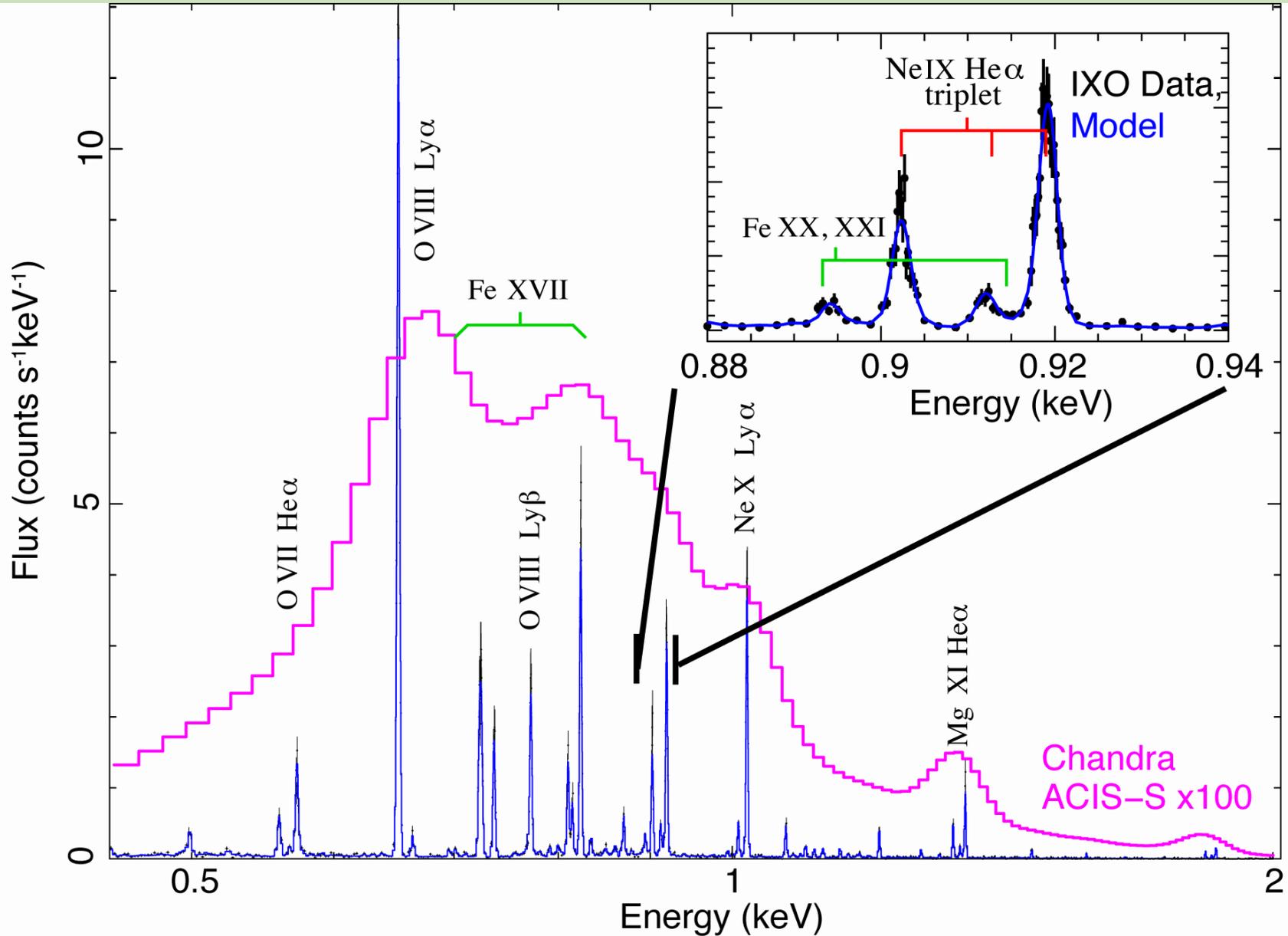
5.2. Rasgos observacionales de los AGN



Gilli(2007)



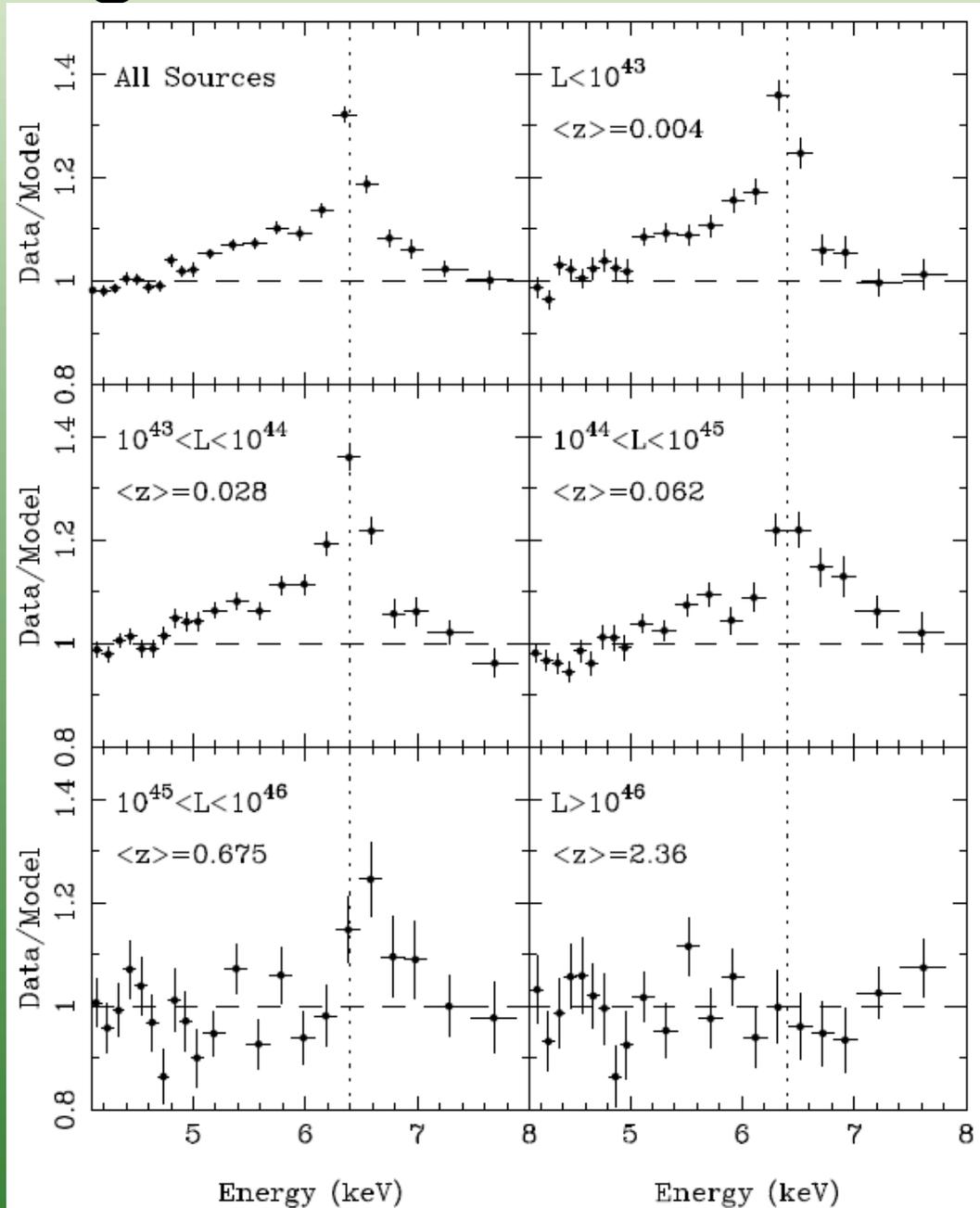
5.2. Rasgos observacionales de los AGN



D. Strickland et al.



5.2. Rasgos observacionales de los AGN



Nandra
(1996)



5.2. Rasgos observacionales de los AGN

En resumen, se deben conocer las características básicas de los AGN en las distintas zonas del espectro EM y las características principales del material que emite:

- ◆ Emisión muy energético (rayos γ).
- ◆ Espectro rayos-X (continuo y líneas).
- ◆ UV-bump.
- ◆ Líneas de emisión: NLR, BLR.
- ◆ Espectro continuo de ley de potencias.
- ◆ Emisión MIR/FIR.
- ◆ Emisión radio.
- ◆ Variabilidad.
- ◆ Polarización.
- ◆ Velocidades del material.
- ◆ Composición de material que emite y propiedades físicas (temperatura, excitación).



5.3. Clasificación de los AGN

Existen muchos tipos de AGN, divididos según sus características observacionales en distintos rangos del espectro EM. Los tipos se refieren a esas características, por lo que a veces un **AGN se clasifica de diferentes formas**.

Una de las clasificaciones más usadas es la llevada a cabo por **Seyfert** en 1943. Su clasificación establece un tipo llamada Sy 1, caracterizado por la presencia de NLs y BLs muy brillantes, con un continuo sin demasiadas líneas de absorción, casi completamente dominado por un objeto central (no por las estrellas de la galaxia anfitriona). Las Sy 2 no tienen líneas anchas o son muy débiles, estando el espectro dominado por líneas estrechas de ~ 500 km/s y el continuo es más débil, con mayor contribución de la emisión estelar. Hay tipos intermedios entre las Sy 1 y Sy 2, como una Sy 1.5.

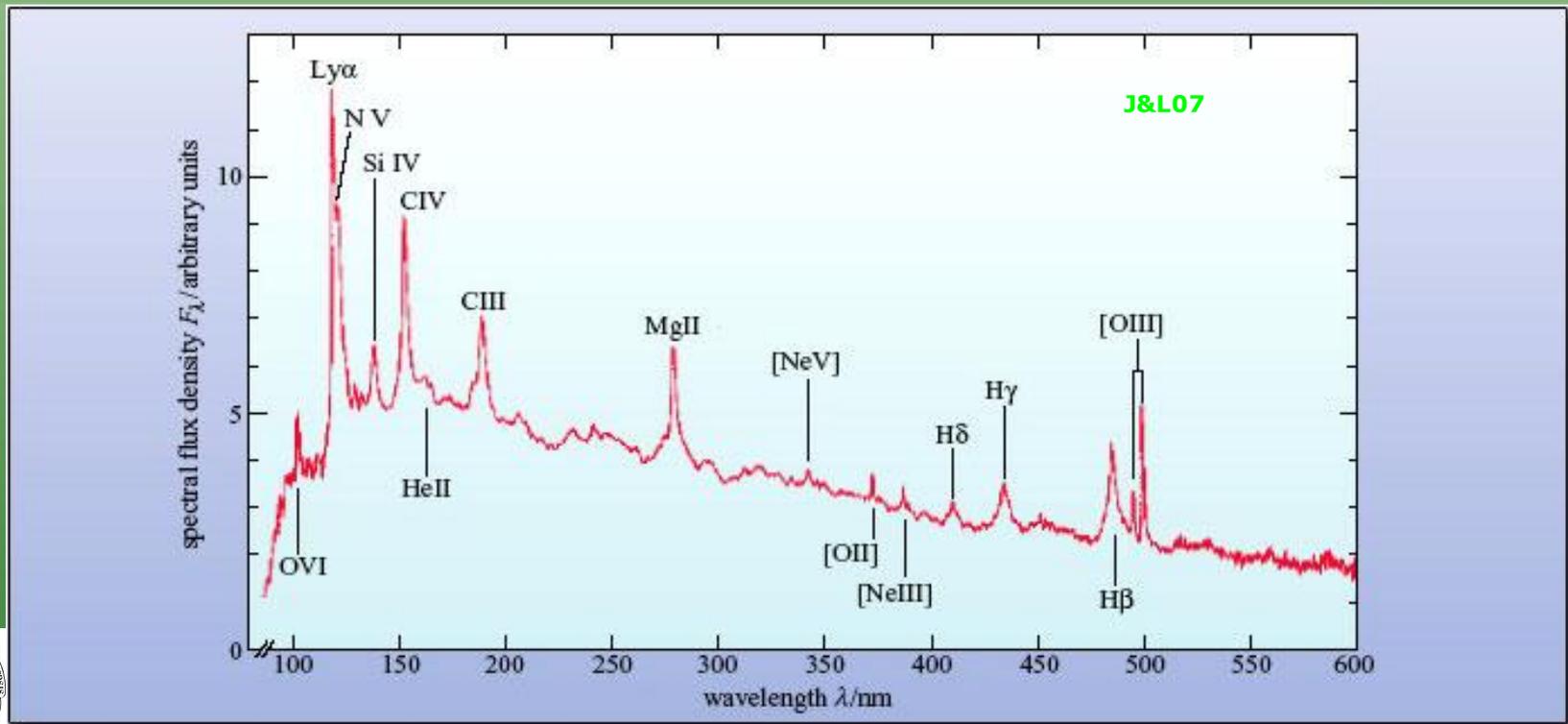
Las galaxias Sy 1 y Sy 1.5 son potentes emisores de rayos-X, y muestran bastante variabilidad (en escalas de horas o días). La emisión rayos-X de las Sy 2 es mucho más débil y un análisis espectral en este rango indica que una gran parte de la emisión rayos-X ha sido absorbida por material con densidades de columna de $10^{26-28} \text{ m}^{-2}$ ($10^{22-24} \text{ cm}^{-2}$).

Las galaxias Sy no son muy comunes (10-20% del total de galaxias), y se suelen encontrar en galaxias espirales (típicamente en Sb o SBb). Además muchas Sy muestran compañeras y/o signos de interacción.

5.3. Clasificación de los AGN

Otros tipos de AGN son los cuásares, LINERs, blazars o las radio-galaxias.

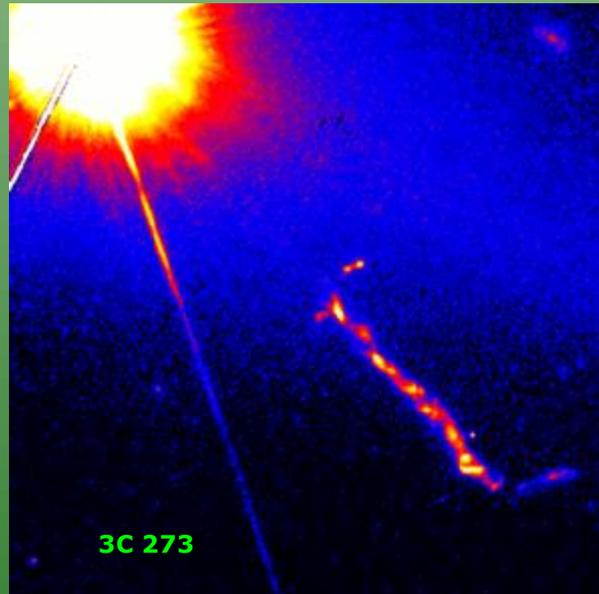
Los cuásares fueron descubiertos (reconocidos como tales) en 1963, y están caracterizados por imágenes débiles de aspecto puntual (star-like) con un espectro muy característico de líneas de emisión anchas y continuo de ley de potencias. El espectro es parecido a una Sy 1, pero la componente estrecha es muy poco significativa y suele haber más emisión de átomos muy ionizados. Hay QSO a desplazamientos al rojo muy altos (hasta $z=8$, o hace 13 Gyr).



5.3. Clasificación de los AGN

Los cuásares tienen un exceso de emisión en el IR y otras longitudes de onda (respecto a lo típico en galaxias normales). Un 10% de QSO emiten de manera importante en radio (son **radio loud**). Esta emisión es especialmente brillante en chorros (variables y móviles) que emanan de los QSO y que a veces son visibles en el óptico.

Los QSO se observan hasta muy alto redshift debido a su alta luminosidad intrínseca. Las galaxias anfitrionas no presentan una correlación clara con el **tipo morfológico**, aunque los radio-loud QSO suelen estar en objetos esferoidales con interacciones y fusiones, mientras que los radio quiet tienden a encontrarse en elípticas o espirales. La terminología a veces es confusa. Los QSO serían la punta del iceberg en la actividad nuclear.



Astrofísica Extragaláctica

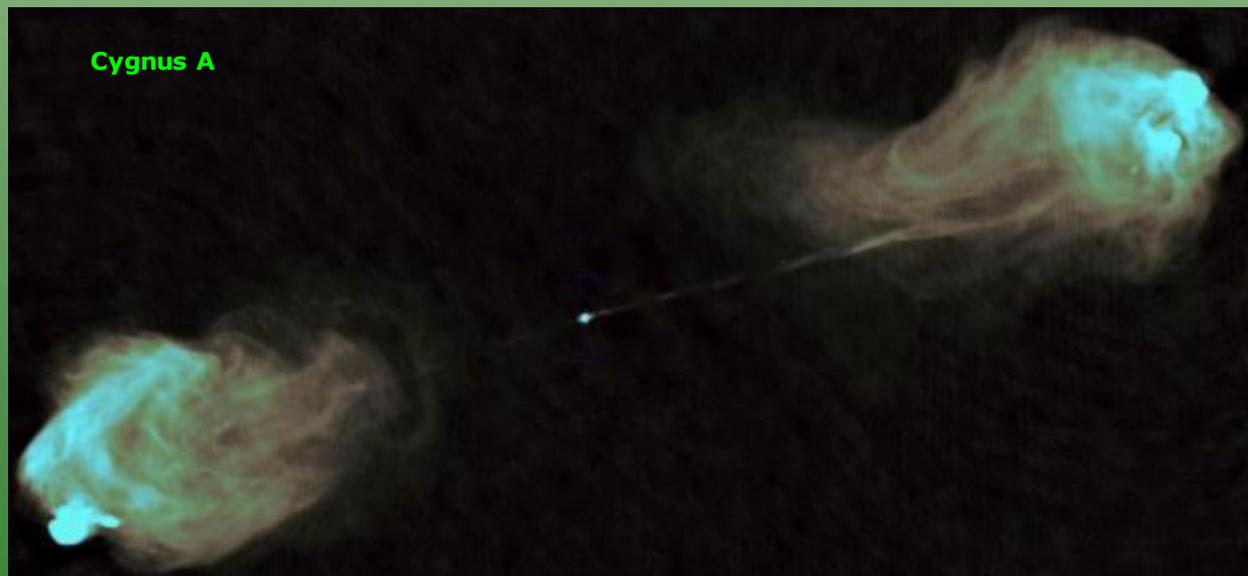


5.3. Clasificación de los AGN

Las radio-galaxias son un tipo de AGN que fueron descubiertos al realizar observaciones radio. La emisión radio suele concentrarse en el núcleo, lóbulos y chorros (jets) alejados del objeto central. A veces se observan dos jets, a veces uno solo. Estos jets serían material eyectado del objeto central que se interna hasta 100 kpc en el IGM y produce radiación sincrotrón al frenarse. En las radio galaxias el núcleo presenta características de "AGN normales" (tipo Sy 1-2, QSO), dividiéndose en BLRGs y NLRGs. También muestran una importante emisión en rayos-X.

La mayoría de radio-galaxias son elípticas (p.e., M87). Son unas 100 veces menos abundantes que las Sy.

Cygnus A



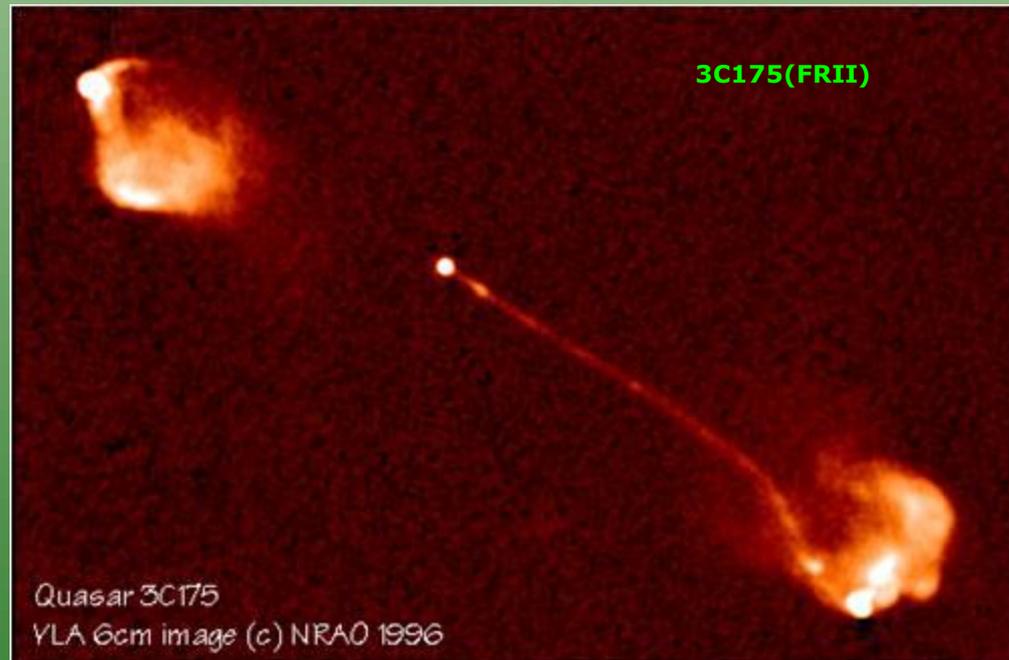
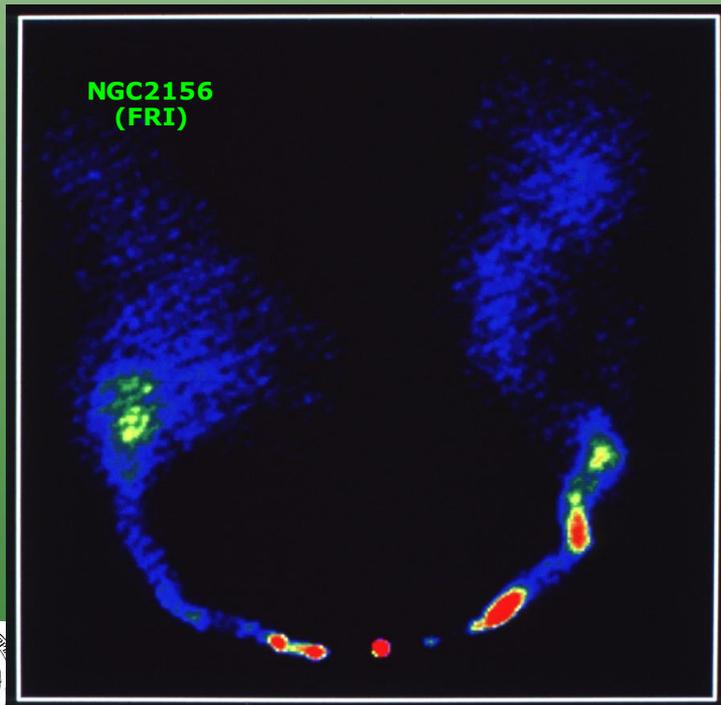
M87



5.3. Clasificación de los AGN

Las radio galaxias se dividen en clase FRI (de Fanaroff & Riley 1974) y FRII según las características de sus lóbulos. Las FRI tienen luminosidades radio más bajas según nos alejamos del centro de la galaxia. Las FRII tienen su mayor emisión al final de los lóbulos. También es común que las FRI tengan dos jets y las FRII solo uno o dos pero uno siendo muy débil. Las galaxias FRI suelen tener jets curvos y las FRII tienen jets más rectos.

La luminosidad también es diferente: las FRI tienen $L(1.4\text{GHz}) < 10^{25} \text{ WHz}^{-1}$, y las FRII están por encima de este valor.

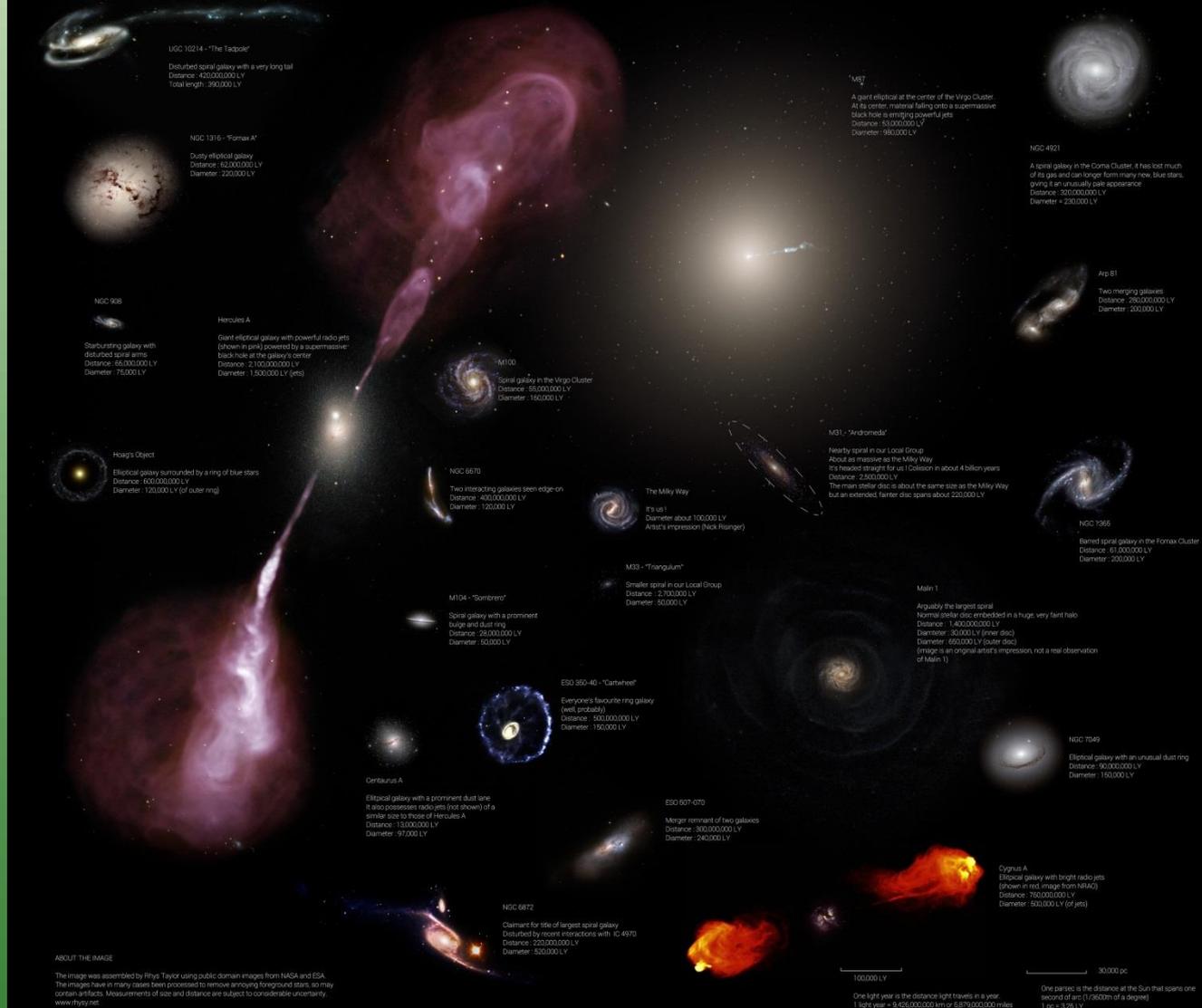


5.3. Clasificación de los AGN

Galaxy Size Comparison Chart

A selection of galaxies shown to the same scale

<http://www.rhys.net/Science/GChart1.jpg>



ABOUT THE IMAGE

The image was assembled by Rhys Taylor using public domain images from NASA and ESA. The images have in many cases been processed to remove annoying foreground stars, so may contain artifacts. Measurements of size and distance are subject to observational uncertainty. www.rhys.net



5.3. Clasificación de los AGN

Otros objetos de interés, de la multitud de clasificaciones existentes (dependiendo de la región de observación, del astrónomo, etc):

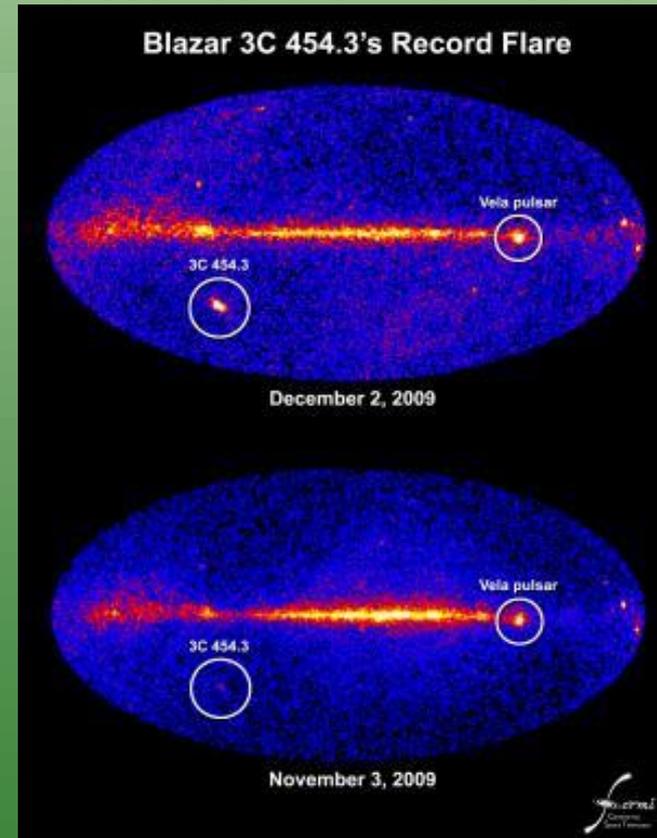
Blazars: son como los QSO, pero muy variables y con emisión radio muy intensa y polarizada.

Los objetos **BL Lac** (nombrados como el primer objeto de este tipo) no tiene prácticamente líneas de emisión o incluso están ausentes. Se han detectado a bajo redshift. Varían en factores de 1.3-100 en horas-días.

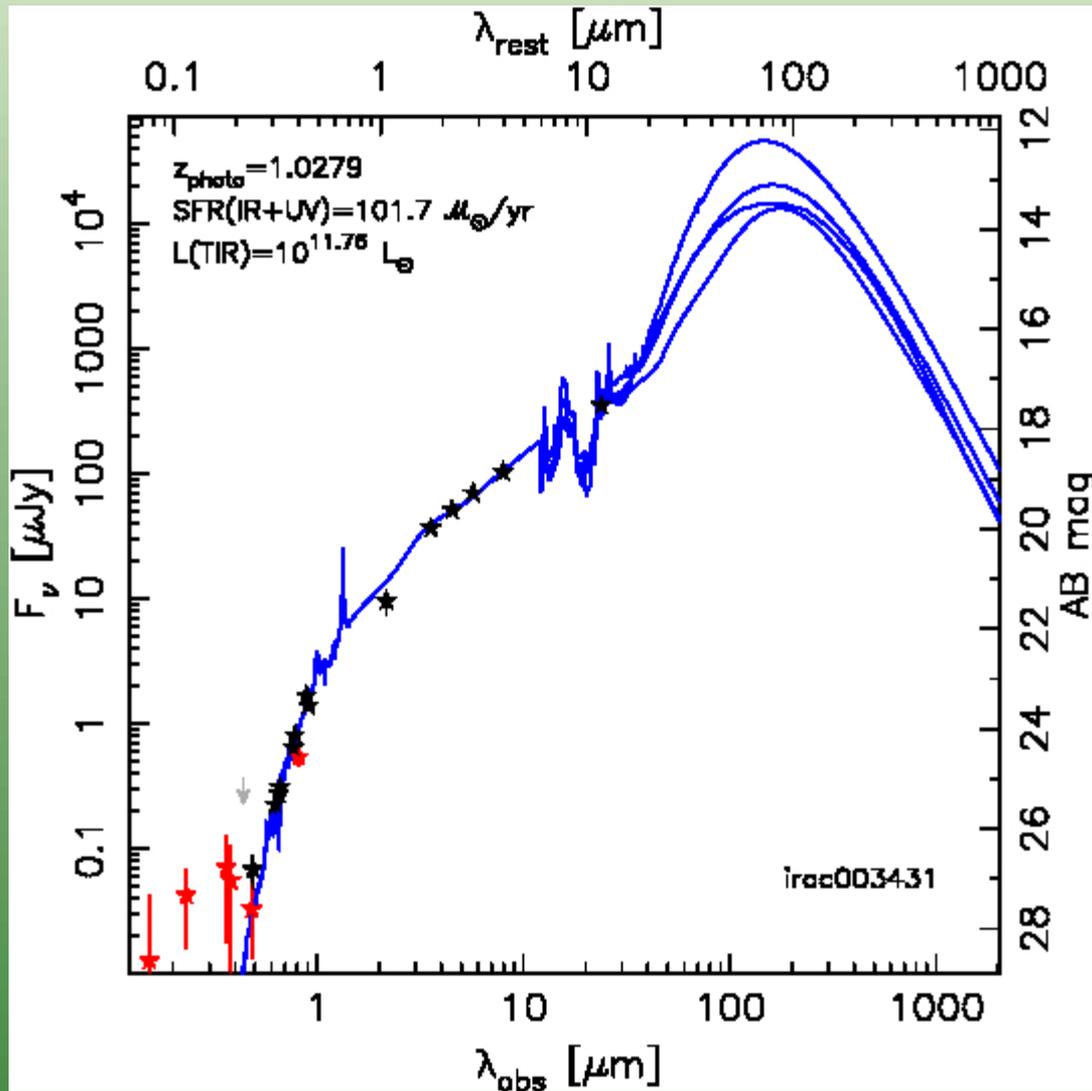
Tienen SEDs de ley de potencias con una polarización lineal del 30-40%. El 90% de estos objetos son Es.

Los **OVVs** (optically violent variables) son como los BL Lac pero con líneas anchas más intensas y más brillantes en general, lo que permite detectarlos a más alto redshift.

AGN oscurecidos: MIR (IRAC) power-law galaxies.

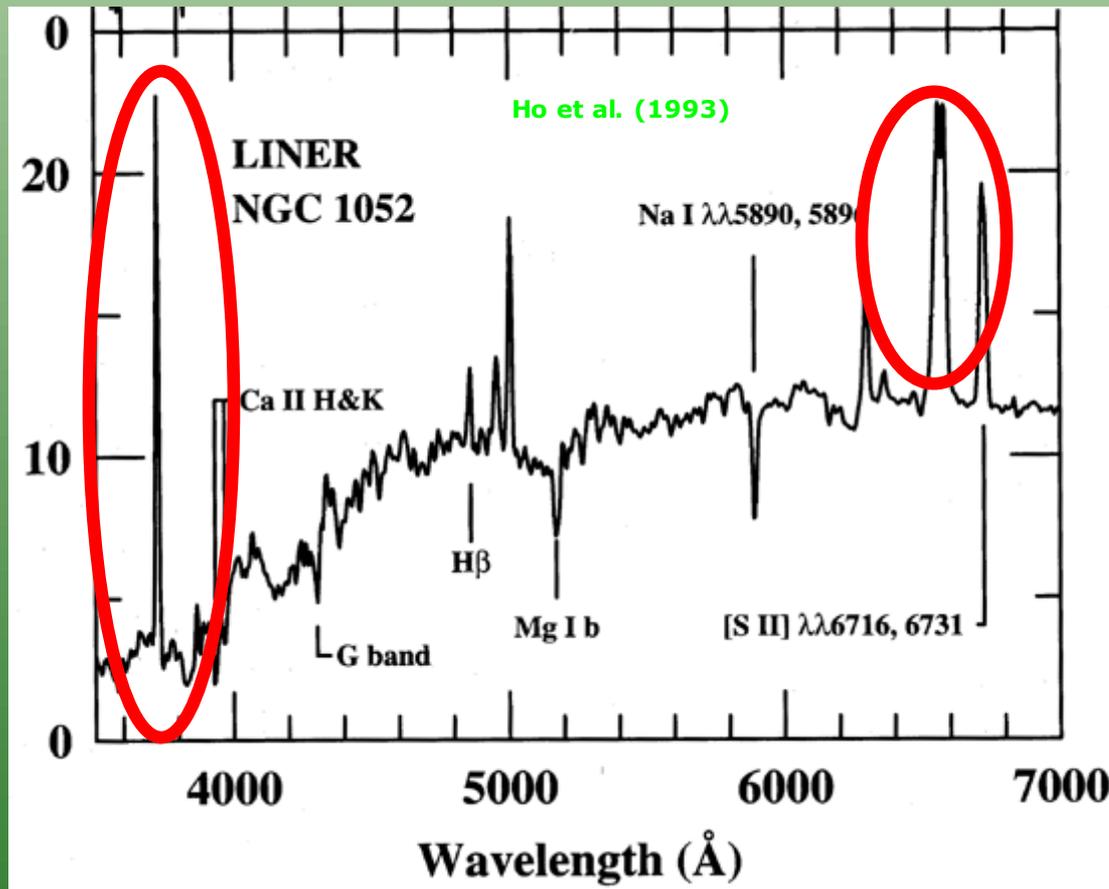


5.3. Clasificación de los AGN



5.3. Clasificación de los AGN

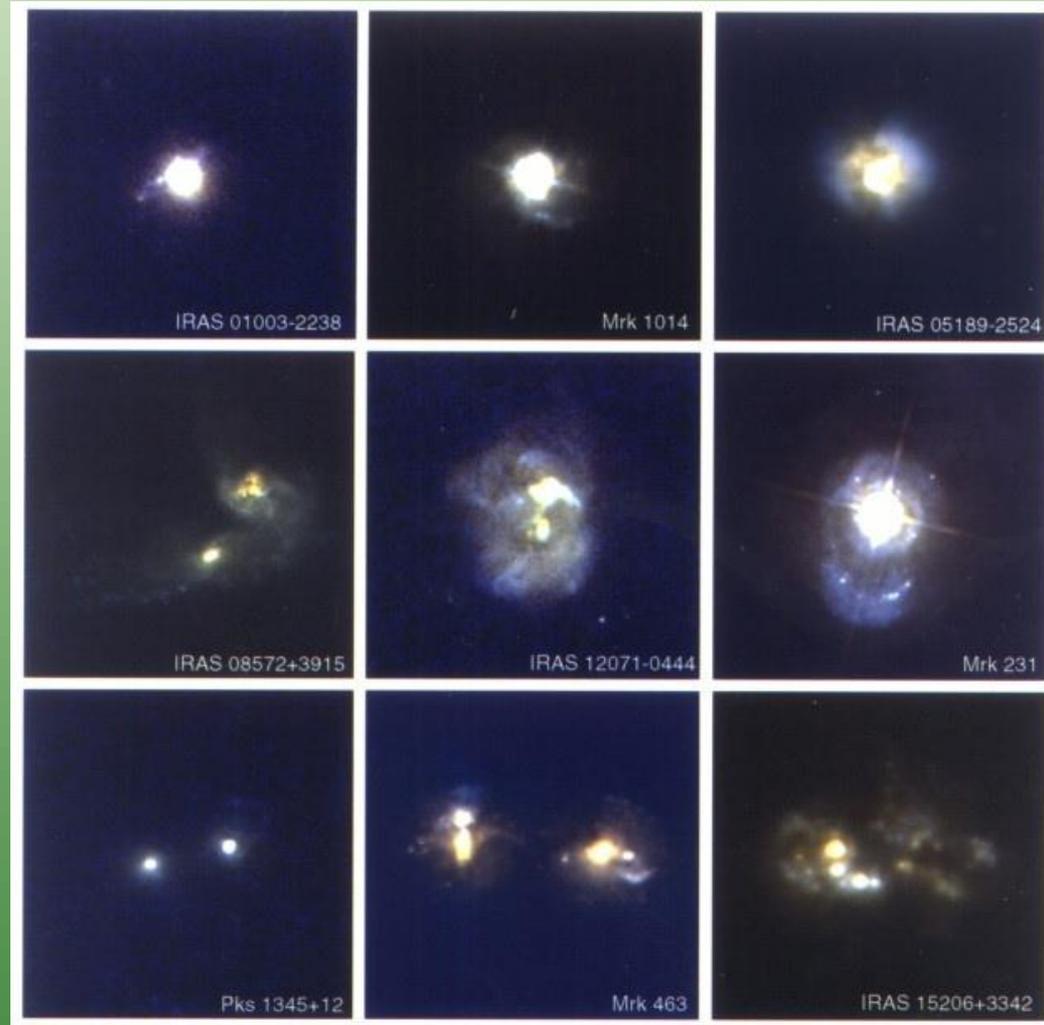
Los **LINERs** (Low Ionization Nuclear Emission-line Regions) tiene núcleos poco luminosos pero líneas de baja ionización ([OI], [OII], [NII]) muy intensas. Esto se suele identificar con material excitado o ionizado por choques. Parece haber LINERs relacionados con AGNs pero también con formación estelar. Casi todas las espirales tienen espectro LINER en sus núcleos, y algunas regiones HII también lo muestran.



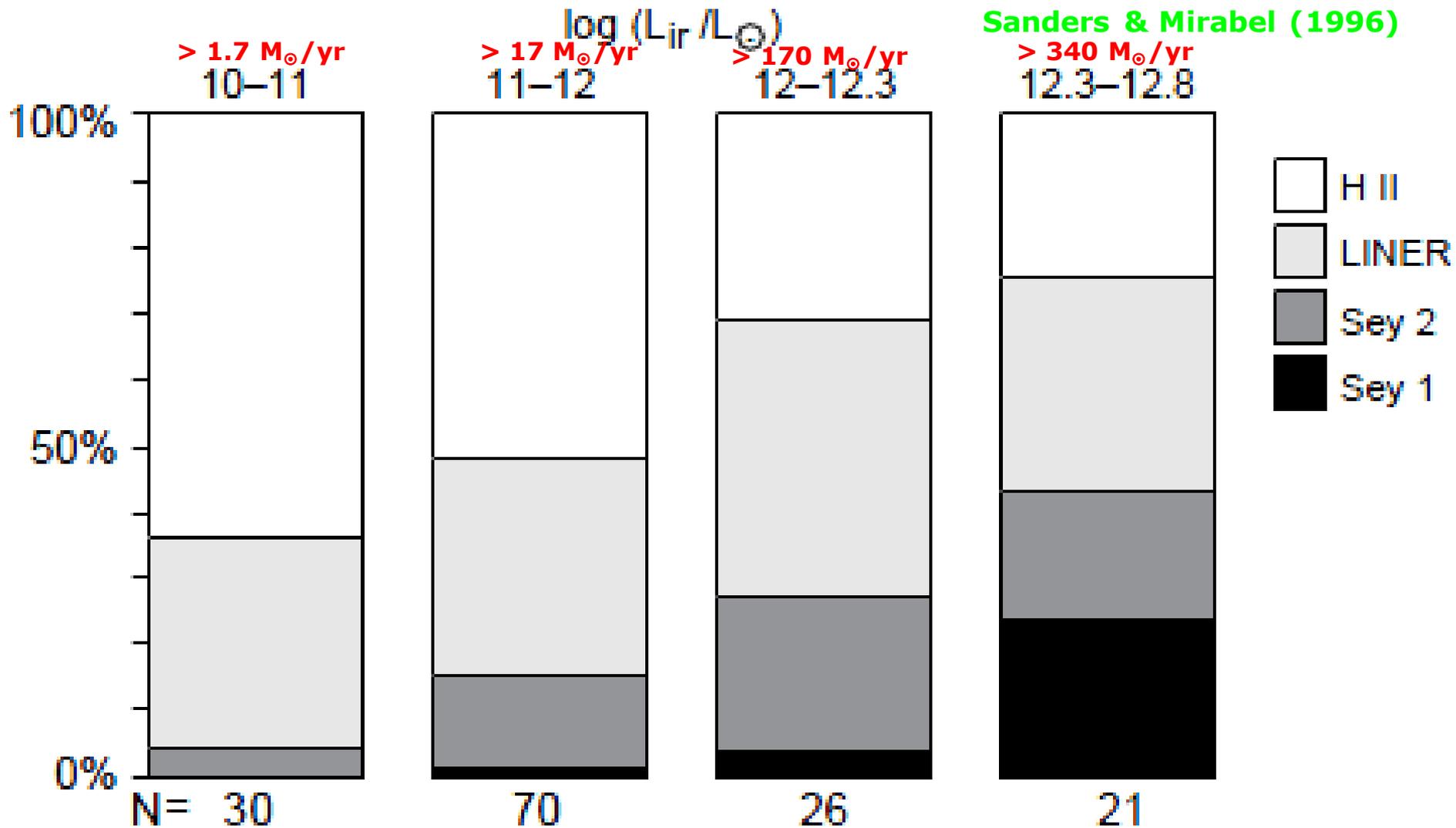
5.3. Clasificación de los AGN

Aunque las galaxias **starburst** no son galaxias activas, sí es verdad que la formación estelar intensa y la actividad nuclear van juntas en multitud de objetos. Esto llevaría a pensar en un origen común entre los dos procesos, tema que está siendo ampliamente estudiado y debatido en la actualidad.

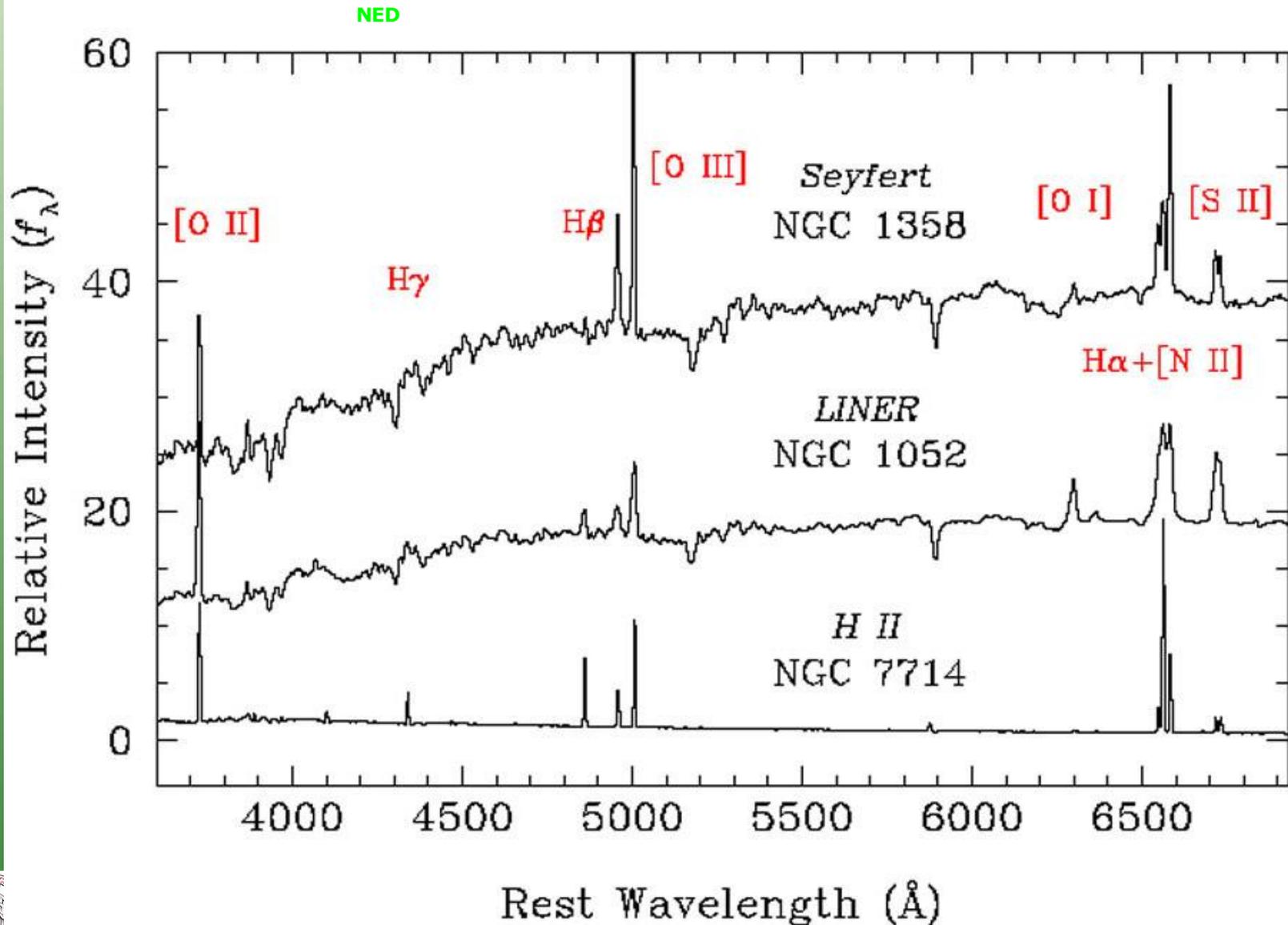
En este sentido, las **ULIRGs** muestran también AGNs muy intensos que podrían explicar (gran?) parte de su L(IR), pero cuentan también con formación estelar muy intensa.



4.5.LIRGs

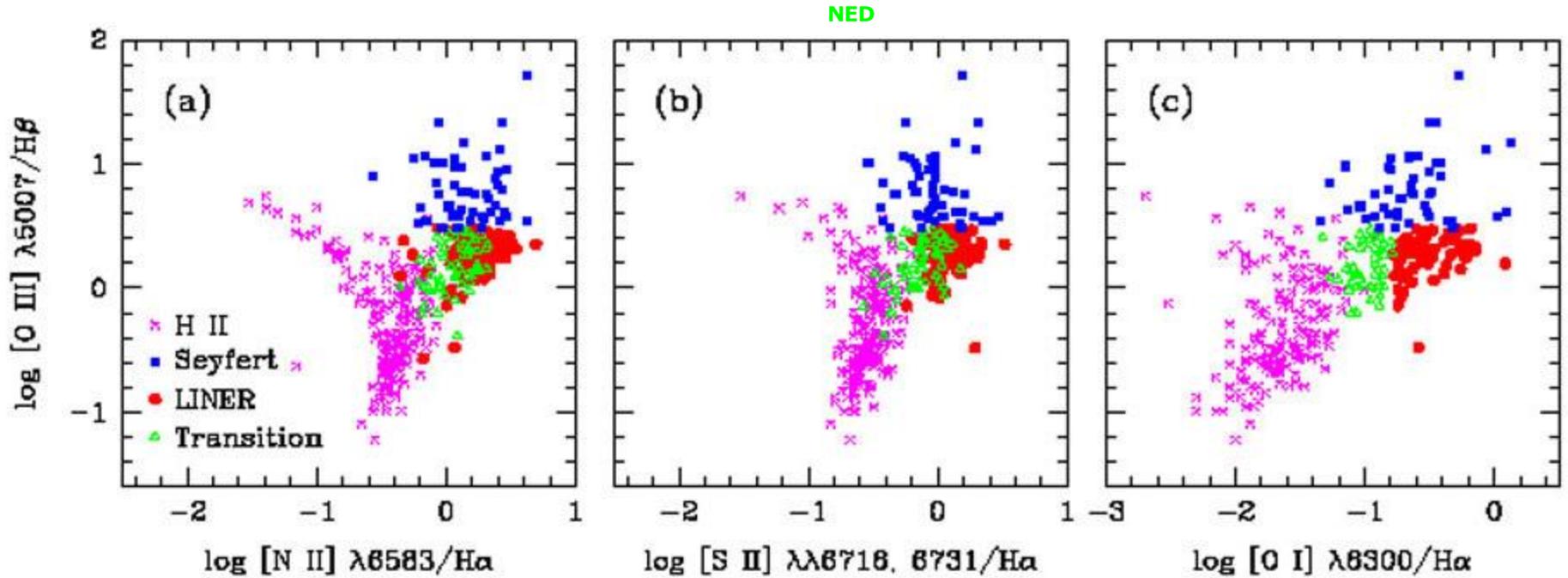


5.3. Clasificación de los AGN



5.3. Clasificación de los AGN: diagnóstico

Baldwin, Phillips & Terlevich (BPT diagram)



5.3. Clasificación de los AGN

TABLE 28.1 A Summary of AGN Classes.

C&O07

Extendido a todos los AGN.

Class	Sub-class	Description
Seyferts	Type 1	broad and narrow emission lines, weak radio emission, X-ray emission, spiral galaxies, variable
	Type 2	narrow emission lines only, weak radio emission, weak X-ray emission, spiral galaxies, not variable
Quasars	Radio-loud (QSR)	broad and narrow emission lines, strong radio emission, some polarization, FR II, variable
	Radio-quiet (QSO)	broad and narrow emission lines, weak radio emission, weak polarization, variable
Radio Galaxies	BLRG	broad and narrow emission lines, strong radio emission, FR II, weak polarization, elliptical galaxies, variable
	NLRG	narrow emission lines only, strong radio emission, FR I and FR II, no polarization, elliptical galaxies, not variable
Blazars	BL Lacs	almost devoid of emission lines, strong radio emission, strong polarization, rapid variability, 90% in ellipticals
	OVV quasars	broad and narrow emission lines, strong radio emission, strong polarization, rapid variability, much more luminous than BL Lacs
ULIRGs		possibly dust-enshrouded quasars, alternatively may be starburst phenomena
LINERs		similar to low-luminosity Seyfert 2, low-ionization emission lines, in many (perhaps majority of) spiral galaxies, alternatively may be starburst phenomena or H II region emission



5.4. Propiedades físicas de los AGN

Los AGN aparecen como regiones puntuales incluso a la resolución del HST (0.05") o de interferometría radio (0.001"). El AGN más cercano es NGC4395, a 4.3 Mpc, lo que supone que el tamaño de la región que provoca las características AGN debe ser menor que 1 pc (0.05 pc para 0.001").

El tamaño también se puede estimar por argumentos de variabilidad. El tamaño sería $T=c\Delta t$. Para MCG-6-30-15 el tiempo típico de variabilidad es de 10^4 s, lo que implica $T\sim 10^{-4}$ pc. Esto es unas 20 AU. La variabilidad depende de la longitud de onda.

Además hay medidas de dinámica de la MW que nos dan un tamaño del motor del AGN menor que 0.001 pc.

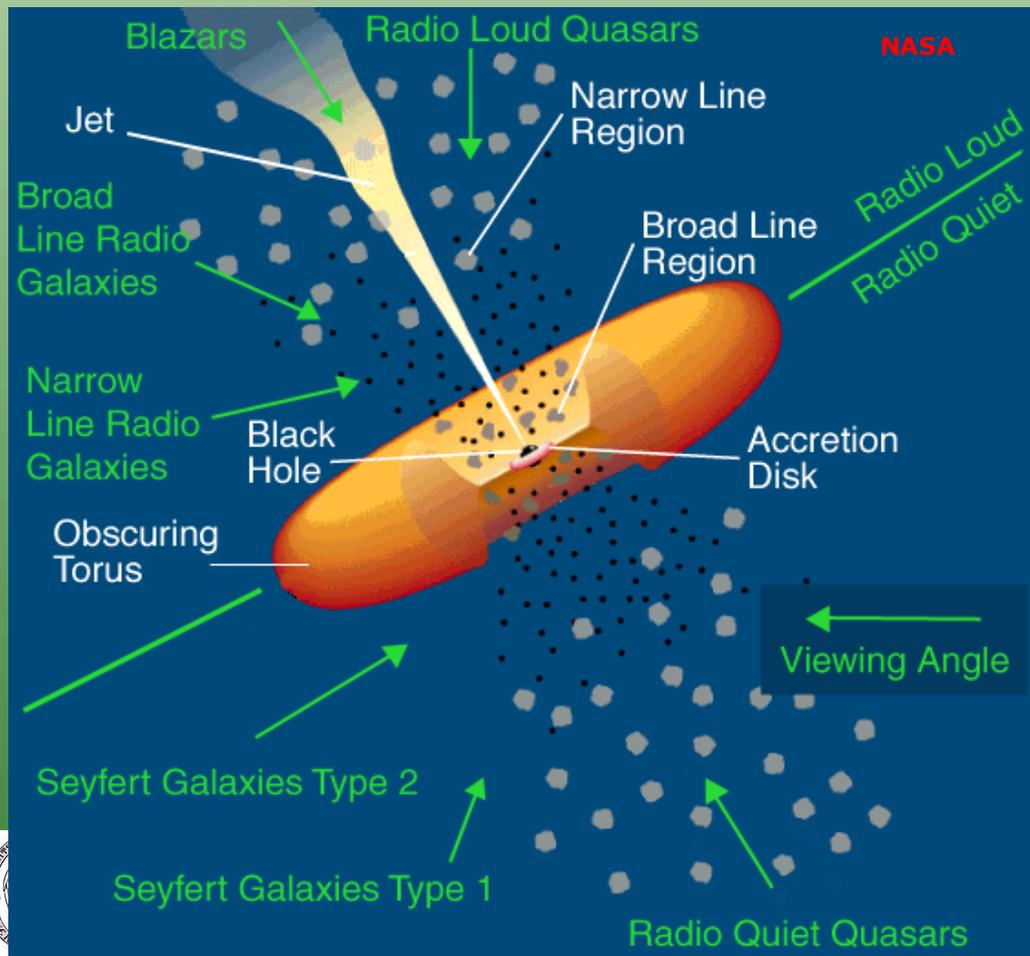
La energía bolométrica de un QSO es superior a 10^{38} W ($2.6\times 10^{11} L_{\odot}$) y puede llegar hasta 10^{41} W ($2.6\times 10^{14} L_{\odot}$), siendo lo típico 5×10^{39} W ($1.3\times 10^{13} L_{\odot}$). Eso quiere decir que son hasta 100000 veces más brillantes que una galaxia entera.

Los AGNs menos luminosos (Sy, BLAZARS, LINERs) también necesitan energías inmensas para explicar los jets. Por tanto, el motor de un AGN debe explicar luminosidades de más de billones de soles en un tamaño del orden del Sistema Solar o menor.



5.4. Estructura de un AGN

El modelo más aceptado actualmente para explicar el fenómeno AGN es la presencia de un agujero negro supermasivo en el centro de las galaxias, rodeado de una disco de acreción y un toro de gas y polvo. Las propiedades físicas del SMBH y del disco, así como la orientación del disco en cuanto al observador nos explicarían las propiedades características de los distintos tipos de AGN.



5.4. Estructura de un AGN

La formación del disco de acreción se produciría cuando nubes de gas orbitan alrededor del agujero negro y acaban alcanzando una órbita más o menos circular al perder energía por los choques entre nubes (viscosidad). El sentido de rotación sería el de la mayoría de nubes en el momento inicial de formación del disco. Si se forma por un merger, podría ser el sentido en el que viene el material de la galaxia canibalizada.

Las colisiones también tendrán un efecto térmico, por lo que el gas del disco debe estar muy caliente, tanto más caliente cuanto más cerca del SMBH. Además la viscosidad puede ser tan grande que parte del material caiga al agujero negro. Gran parte de la energía radiada por un AGN proviene del disco de acreción, que puede tener temperaturas de miles de K.



5.4. Estructura de un AGN

El material puede subsistir hasta una distancia de unos pocos **radios de Schwarzschild**. Este radio es dos veces el que iguala la gravedad a la fuerza centrífuga para una partícula viajando a la velocidad de la luz en un campo gravitatorio. El valor es:

$$r_s = \frac{2GM_{BH}}{c^2}$$

Para un SMBH de $10^8 M_{\odot}$ $r_s \sim 2 \text{ AU} \sim 10^{-5} \text{ pc}$. Este es aproximadamente el tamaño del motor central del AGN que obtuvimos con el argumento de la variabilidad de los AGN. Dado que un BH "normal" de una estrella binaria emisora de rayos-X tiene como $10 M_{\odot}$, los motores de los AGN se denominan SMBH.

El radio de Schwarzschild corresponde con un horizonte de sucesos, más allá del cual no puede escapar la radiación electromagnética, por lo que no tenemos información de lo que ocurre. La materia cerca del r_s cae en el SMBH, proceso durante el cual pueden existir reacciones nucleares de alta energía (que se verían en rayos-X o γ).



5.4. Estructura de un AGN

Otra cantidad importante en un AGN es la **luminosidad de Eddington**, que es aquella que provocaría una presión de radiación tal que dispersaría la materia alrededor del SMBH. Asumiendo solo hidrógeno ionizado (OK para un AGN) y simetría esférica (not OK):

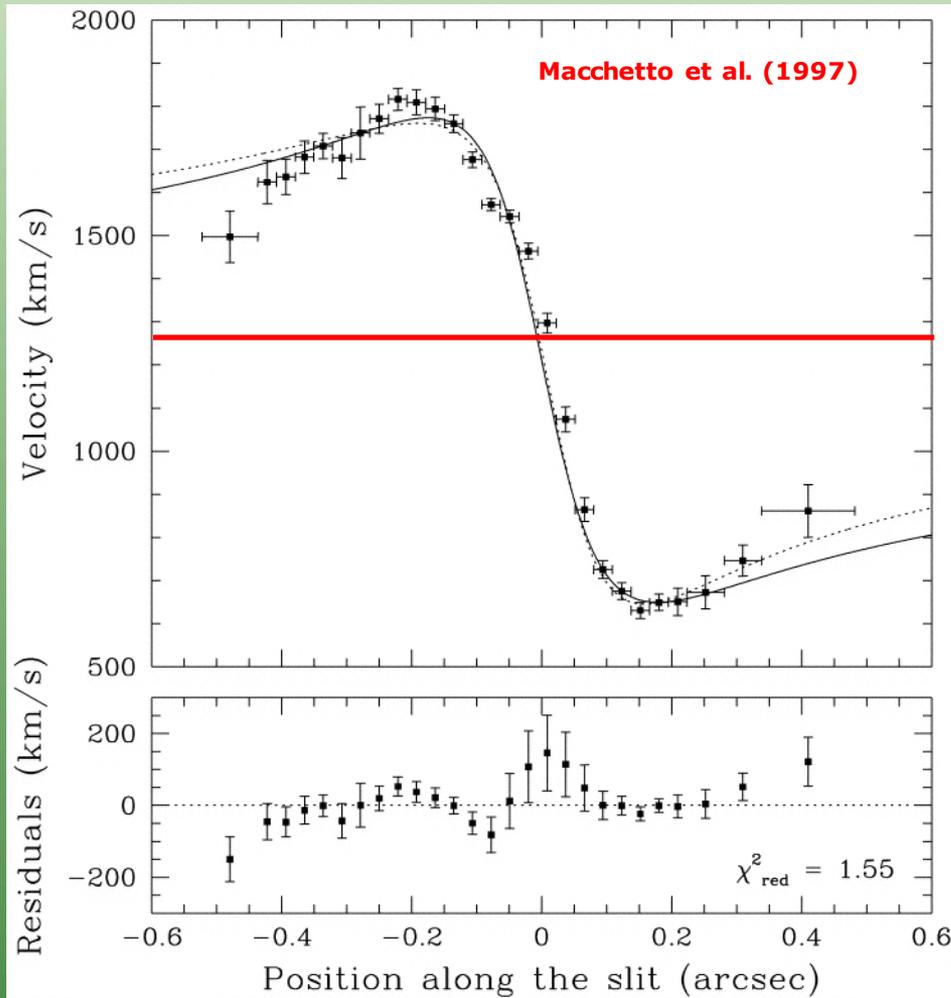
$$L_{Ed} = \frac{4\pi G c M_{BH} m_p}{\sigma_T} \approx 1.3 \times 10^{31} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) W = 3.3 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) L_{\odot}$$

Las estrellas tienen luminosidades muy por debajo del límite de Eddington, pero en el caso de un SMBH los valores observados pueden estar próximos. Los discos de acreción están regulados por esta cantidad, así que a medida que la luminosidad de un AGN crece la masa del SMBH debe también crecer para que el sistema pueda subsistir.

Para una luminosidad típica de un AGN de 5×10^{39} W, tenemos un SMBH de $3.8 \times 10^8 M_{\odot}$. Tanto el argumento de variabilidad combinado con el radio de Schwarzschild, como el argumento de la luminosidad de los AGN junto con el valor de Eddington proporcionan una masa parecida.



5.4. Estructura de un AGN



Por ejemplo, en M87 ($v=1290$ km/s, a 15 Mpc, así que $0.1''$ son 7.3 pc) se observa gas ionizado con la curva de rotación mostrada (notar que los datos van mucho más allá del motor central). Tenemos que la velocidad máxima del material es de unos 550 km/s (con respecto a la velocidad sistémica) y se alcanza a unos $0.1''-0.2''$, es decir, unos 7-15 pc. Esto nos da un SMBH de $3 \times 10^9 M_{\odot}$, teniendo en cuenta efectos de inclinación.



5.4. Estructura de un AGN

¿Cuánta materia acreta un SMBH? Cálculos teóricos establecen que la radiación proveniente del material que acreta un SMBH es aproximadamente un 10% de su energía en reposo. Este proceso es altamente eficiente. Por ejemplo la fusión de hidrógeno en las estrellas produce un 0.7% de la energía en reposo de los 4 átomos de H necesarios para producir uno de He. El valor puede ser incluso mayor (hasta casi un 50%) para SMBH rotantes donde el material puede tener órbitas estables más cerca del SMBH, debido a que la rotación del SMBH crea energía que puede estabilizar órbitas muy cerca (o por debajo?) del radio de Schwarzschild.

La cantidad de materia que cae en el SMBH por unidad de tiempo se conoce como ritmo de acreción (accretion rate). La energía producida en el proceso sería:

$$L = \eta \dot{M} c^2$$

donde $0.0572 < \eta < 0.423$. Para un AGN de 5×10^{39} W, asumiendo $\eta = 0.1$, tenemos un ritmo de acreción de $8.8 M_{\odot}/\text{yr}$. Esta es una cantidad de materia que observacionalmente se sabe que fácilmente habita en los núcleos de las galaxias.



5.4. Estructura de un AGN

¿Cuál es la temperatura del disco de acreción? Depende del ritmo de acreción de materia y de la masa del SMBH. La fórmula derivada considerando efectos relativistas sería, considerando un SMBH rotando rápidamente y un disco de polvo con un radio interno igual a $0.5R_S$.

$$T_{disk} = \left(\frac{3c^6 \dot{M}}{8\pi\sigma G^2 M^2} \right)^{1/4}$$

Considerando un disco que radia a una fracción de la luminosidad de Eddington ($f_{Ed} \sim 1$ para QSO y $f_{Ed} = 0.01-0.1$ para Sy):

$$f_{Ed} \equiv \frac{L_{disk}}{L_{Ed}}$$

$$\eta \dot{M} c^2 = f_{Ed} \frac{4\pi Gc}{\kappa} M$$

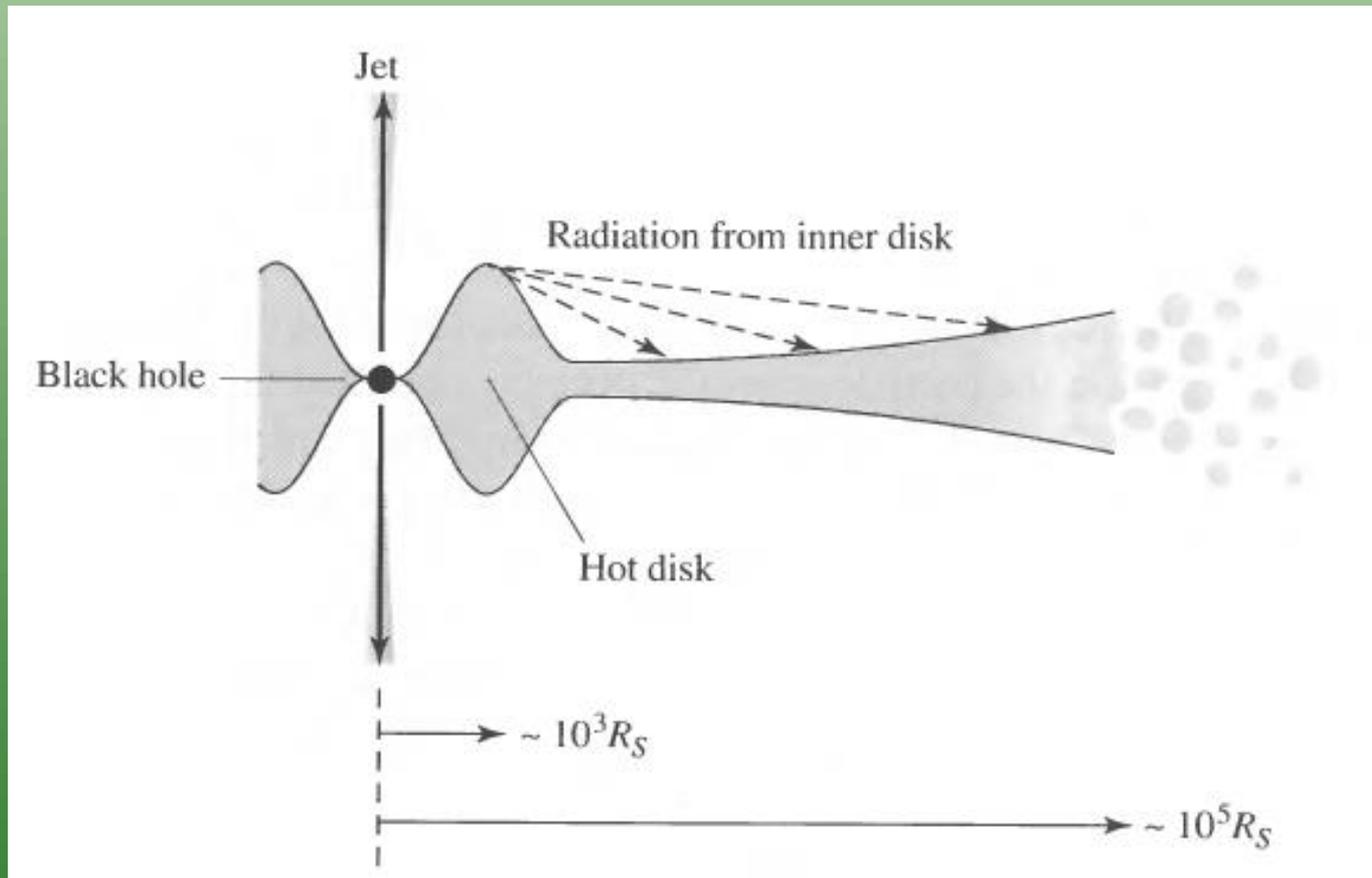
$$T_{disk} = \left(\frac{3c^5 f_{Ed}}{2\kappa\sigma GM\eta} \right)^{1/4}$$

donde σ es la constante de Boltzmann, y $\bar{\kappa}$ es la opacidad del medio.



5.4. Estructura de un AGN

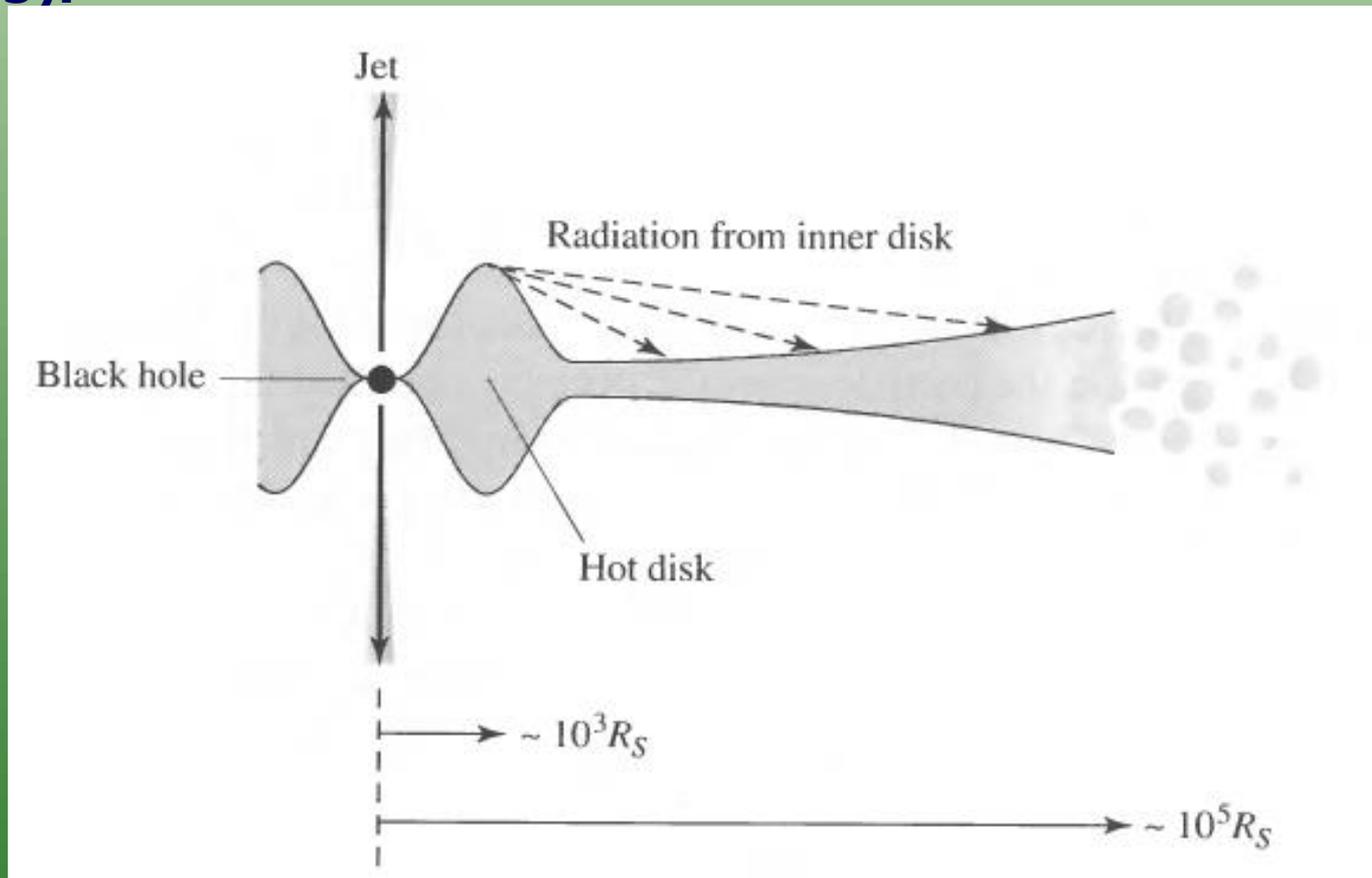
El disco de acreción puede tener en sí estructura interna. Los modelos aún deben ser mejorados pero la estructura sería aproximadamente la siguiente. La parte más interna, que podría llegar hasta $1000r_s$, tiene una temperatura muy alta y una radiación que excede la presión del gas, por lo que se trata de un disco grueso y muy caliente. Probablemente este es el origen de la emisión UV de los AGN.



5.4. Estructura de un AGN

En una región más externa, hasta $10^5 r_s$ (1pc para $10^8 M_\odot$) habría un disco fino soportado por presión del gas. Esta parte del disco es cada vez más ancha según nos alejamos del SMBH. Como la parte interna es ancha, el disco caliente puede irradiar el disco más externo.

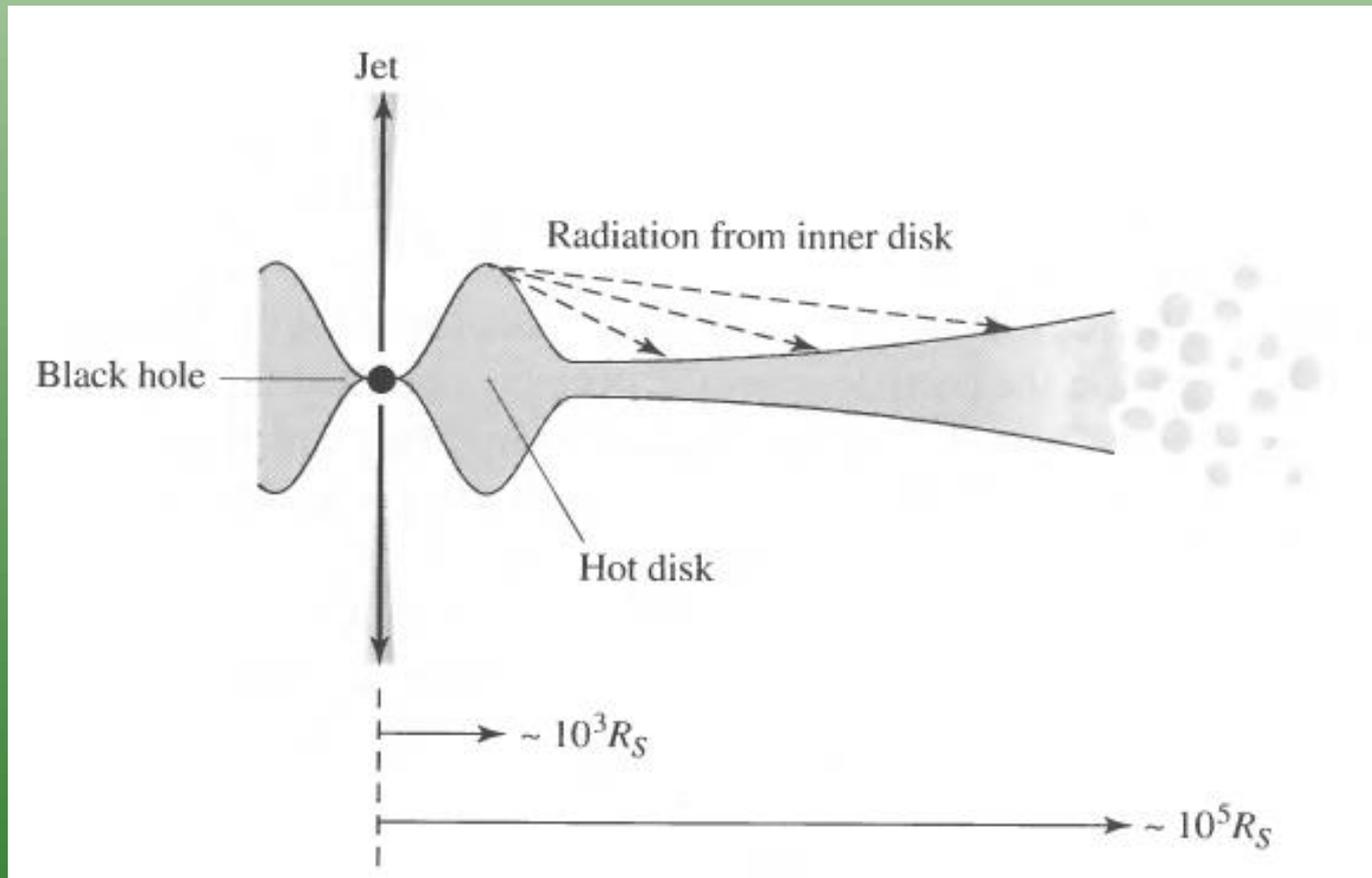
Finalmente la parte más externa se rompería en nubes de gas individuales (que podrían ir cayendo a zonas más internas al chocar entre ellas).



5.4. Estructura de un AGN

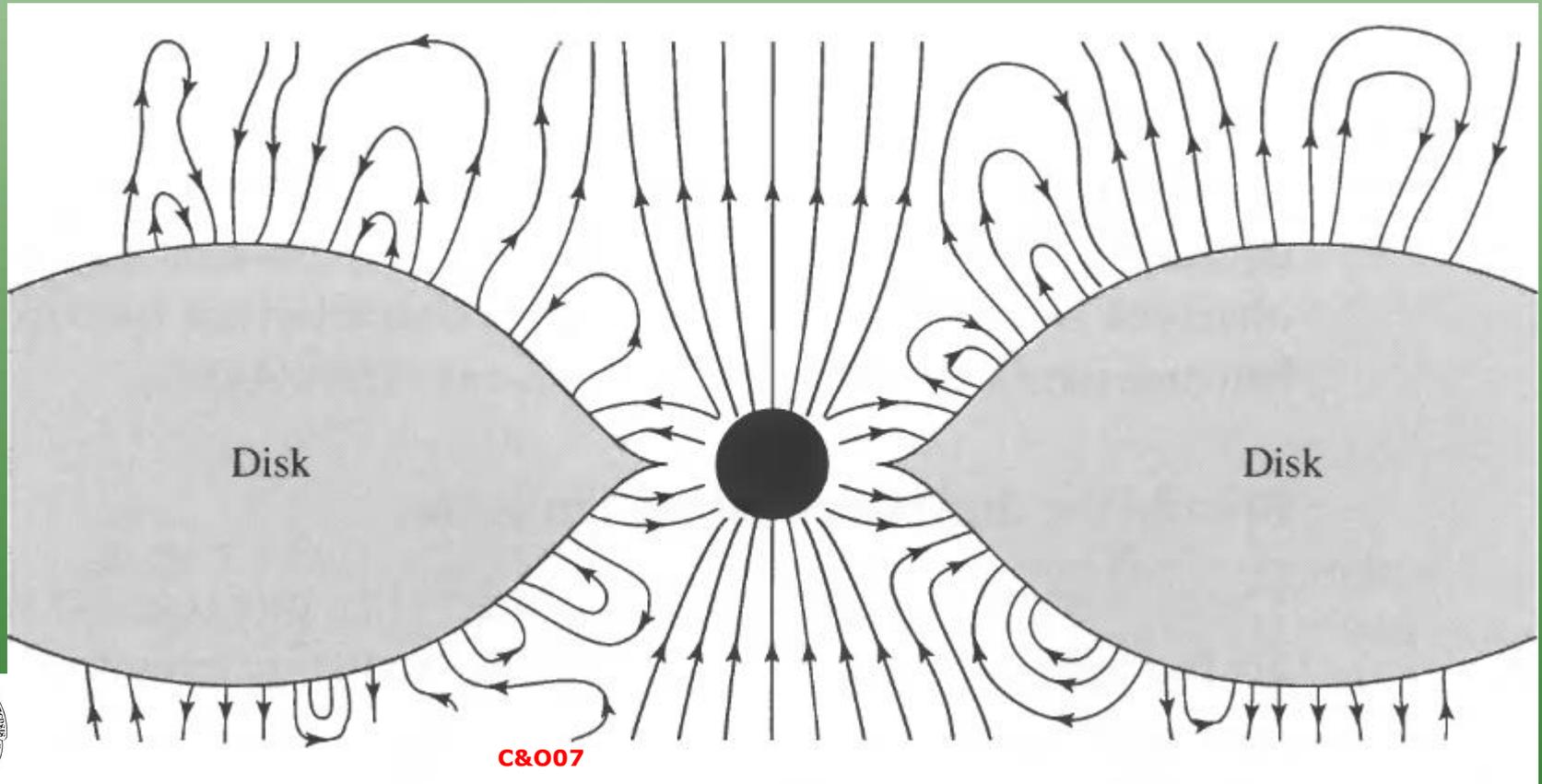
El material caliente del disco puede dar lugar a campos magnéticos muy intensos, que explicarían la radiación sincrotrón con altas polarizaciones que se observan en AGNs como los BLAZARs.

Además las altas energías explicarían la existencia de metales muy ionizados, que se observan en espectros rayos-X.



5.4. Estructura de un AGN

El campo magnético (con intensidades del orden de 1 T), que podría ser alimentado también por la rotación del SMBH, podría explicar la expulsión de partículas cargadas a velocidades relativistas. La energía podría ser suficiente para acelerar partículas (sobre todo electrones y positrones) que al moverse en espiral alrededor de las líneas de campo magnético emitirían radiación sincrotrón. Este tipo de observación es muy común en AGNs.

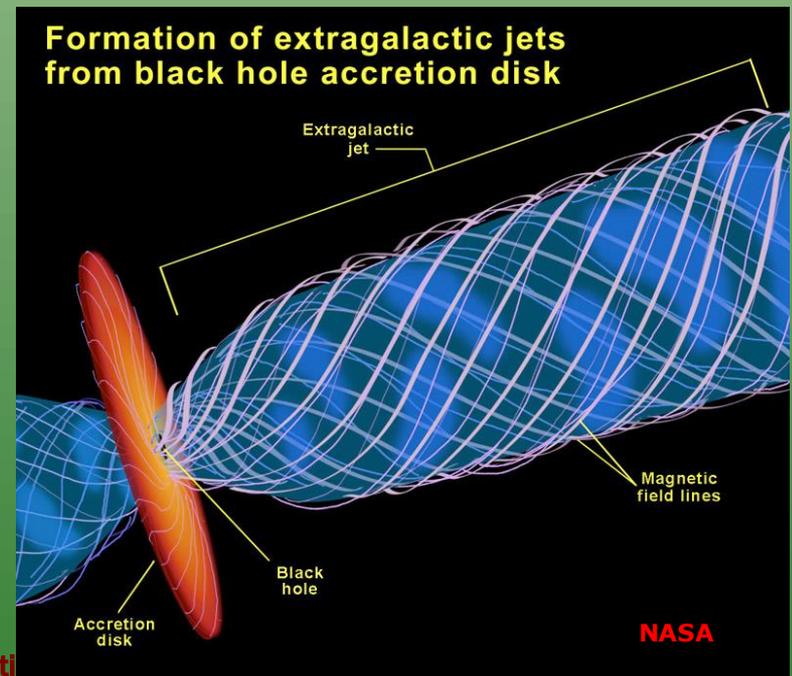


5.4. Estructura de un AGN

Tanto la existencia de un disco grueso cerca del SMBH como la presencia de campos magnéticos están siendo investigados como posibles causantes de la existencia de jets en los AGN. Los jets estarían alineados con el eje de rotación del disco y el disco grueso haría de embudo para material que sería expulsado a velocidades relativistas, ayudados y siguiendo la trayectoria impuesta por los campos magnéticos.

El hecho de que en muchos AGN solo se observa un jet se suele explicar con efectos de orientación, ya que si el jet está ligeramente alineado con la visual existen efectos de "relativistic beaming" que hace que el jet apuntando hacia el observador aparezca mucho más brillante que el otro.

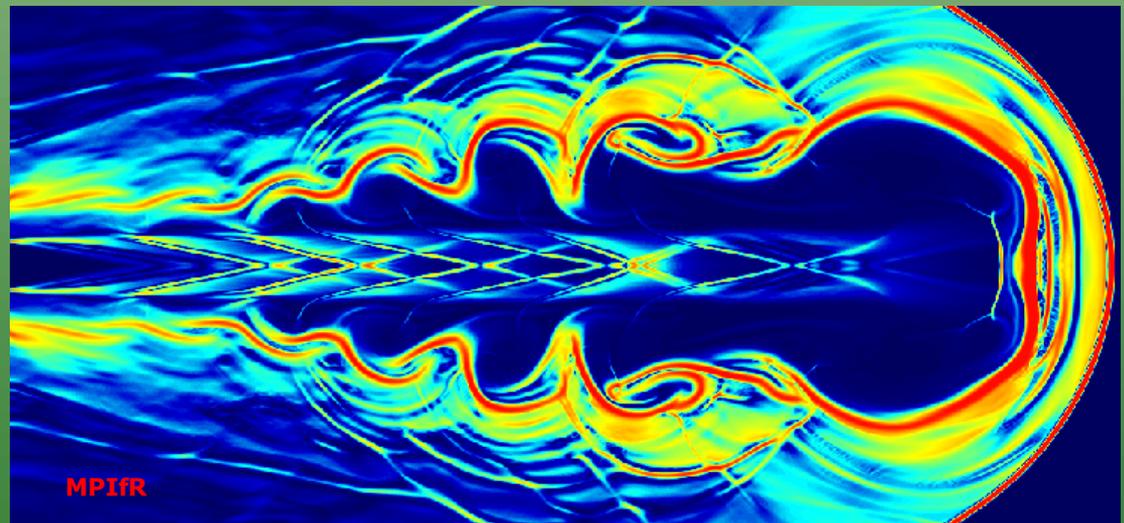
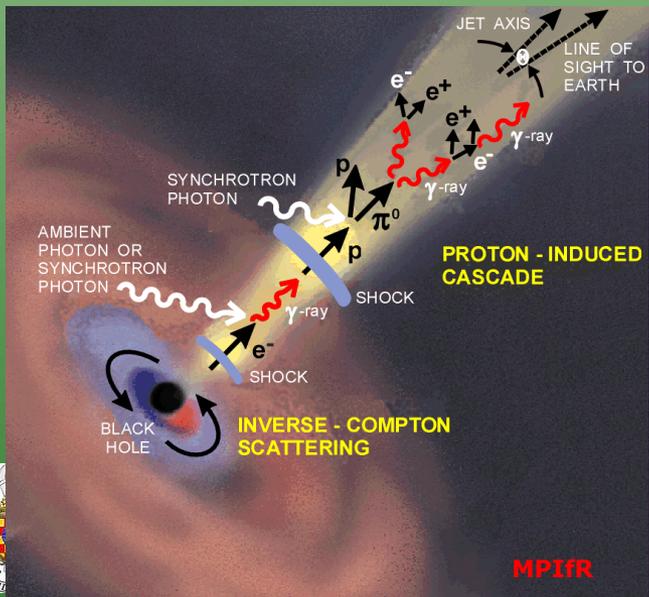
Los jets son globalmente neutros, así que deben estar formados por electrones/positrones (menos masivos y más fáciles de acelerar) o electrones/iones.



5.4. Estructura de un AGN

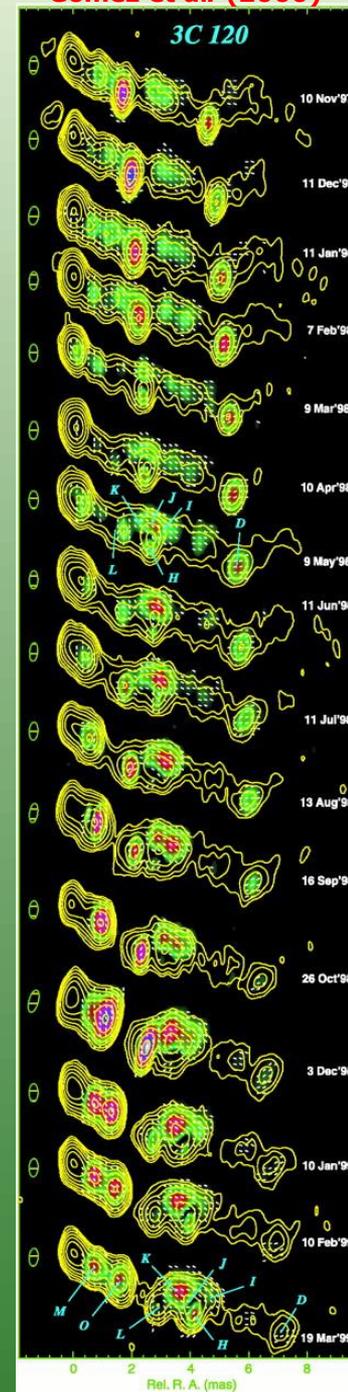
Cuando el material es expulsado en la forma de un jet, su energía es en su mayor parte cinética. Este jet encuentra material del IGM y se frena, excitando nubes de gas y polvo y produciendo ondas de choque. Este proceso es muy complicado (debe tener en cuenta también turbulencias, interacción del campo magnético con el material del IGM, etc...).

Los jets emiten radiación sincrotrón, que debe desacelerar las partículas. Típicamente las partículas deberían frenarse por completo (haber radiado toda su energía) antes de 10000 yr, por lo que no puede haber jets muy largos. Pero estos se observan, así que deben existir mecanismos de aceleración (choques, campos magnéticos perturbados, presión de radiación,...).



5.4. Estructura de un AGN

Gómez et al. (2000)



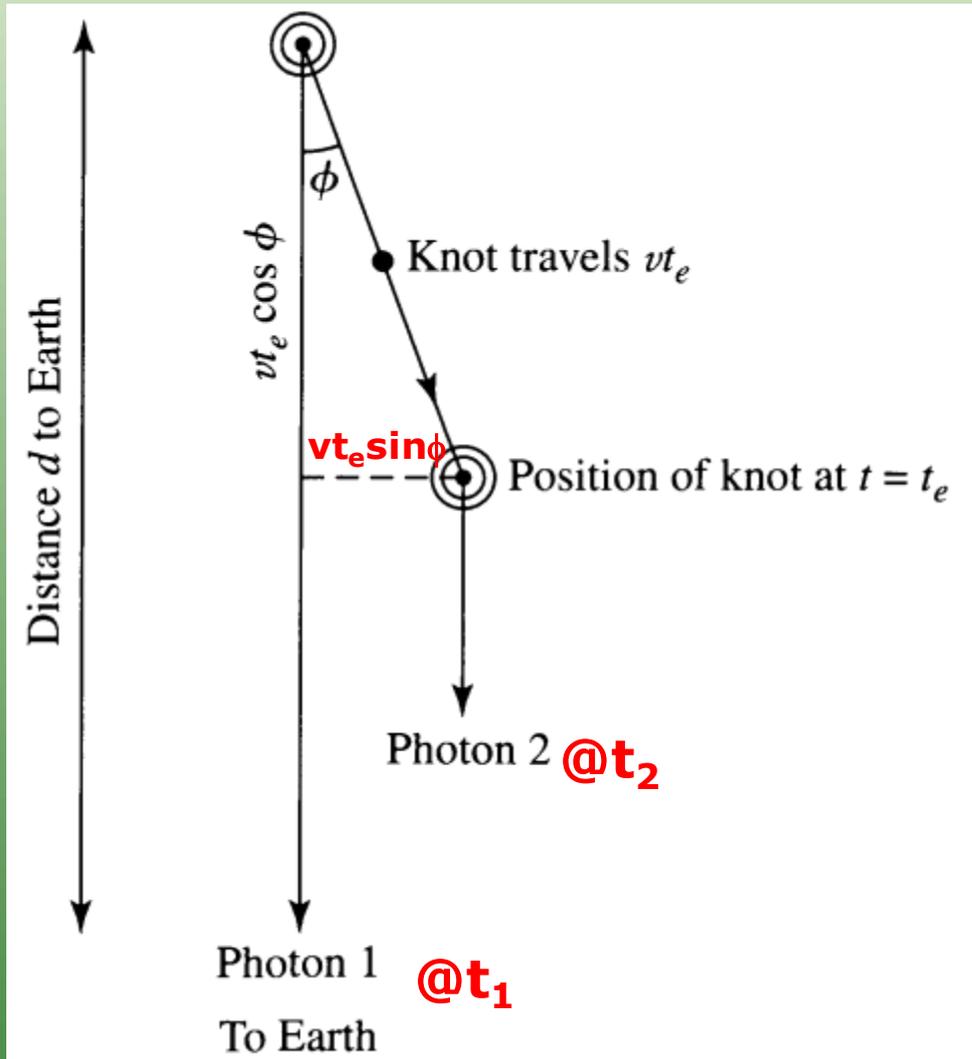
La velocidad del material en los jets no se mide directamente. Se ha medido por medio de la observación de estructuras que “viajan” a lo largo de jets en tiempos relativamente cortos.

Por ejemplo, en 3C120 parece haber material moviéndose a una velocidad de $4.4h_{65}^{-1}c$.

La explicación es la siguiente.



5.4. Estructura de un AGN



$$t_1 = \frac{d}{c} \quad t_2 = t_e + \frac{d - vt_e \cos \phi}{c}$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = t_e \left(1 - \frac{v}{c} \cos \phi \right)$$

$$\Delta t < t_e$$

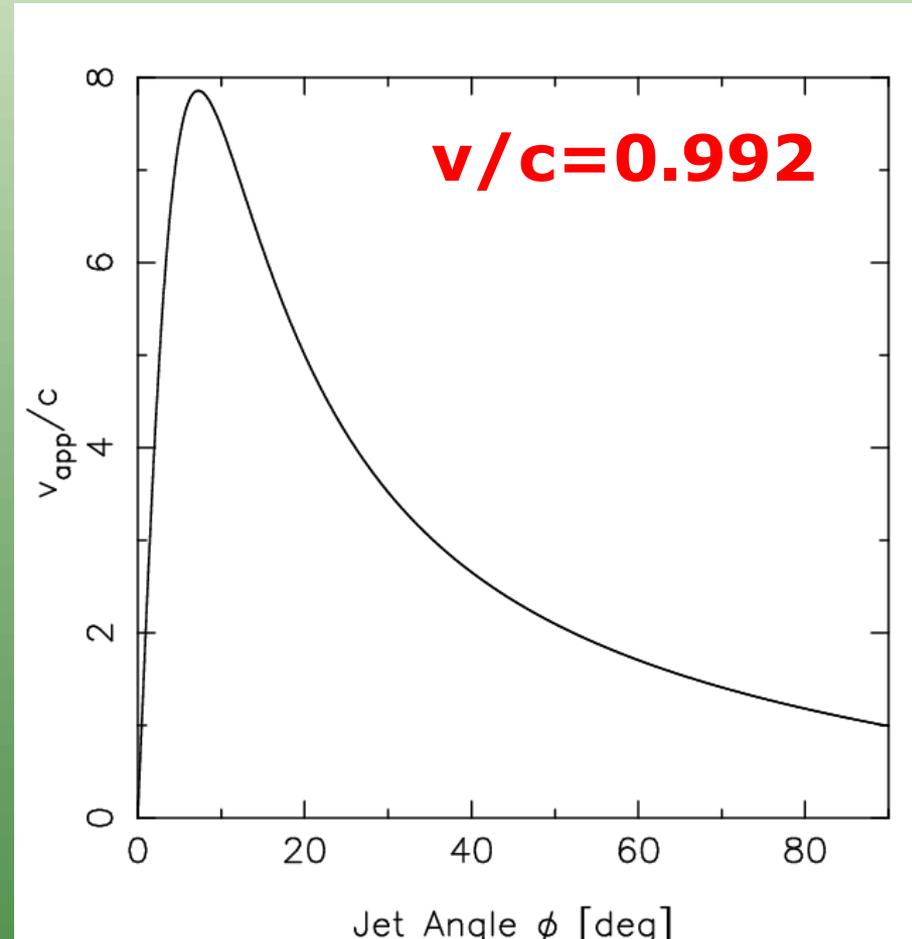
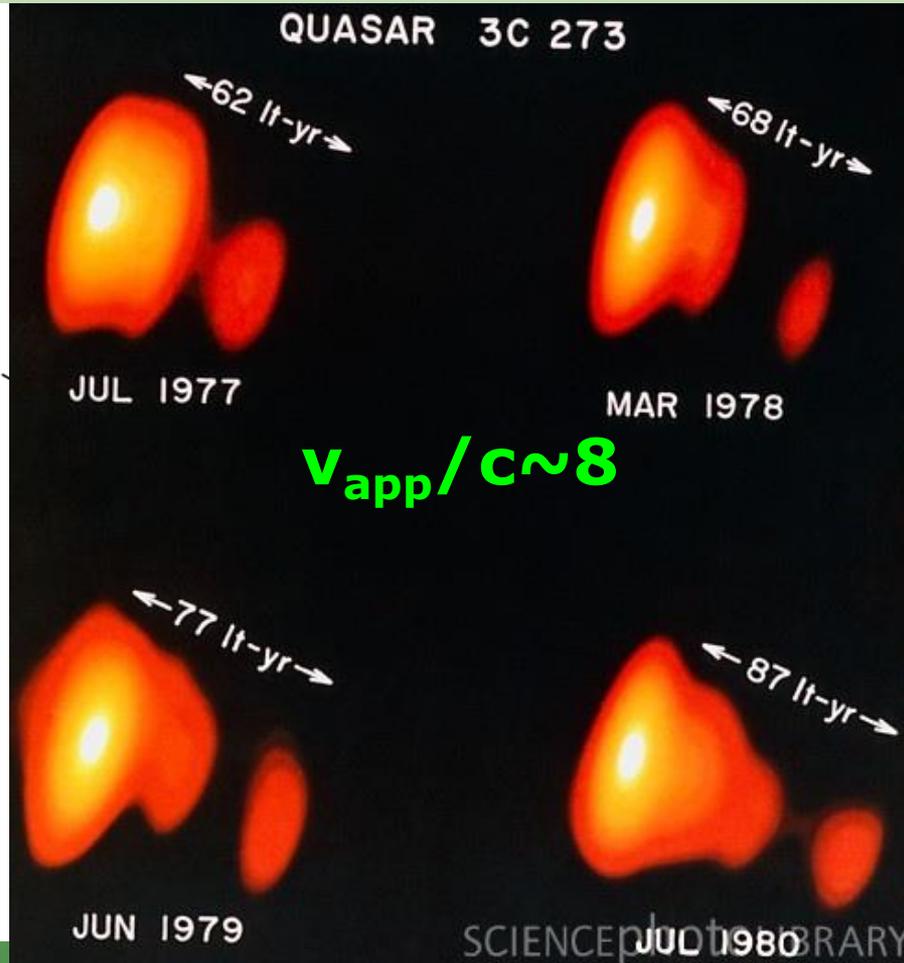
$$v_{app} = \frac{vt_e \sin \phi}{\Delta t} = \frac{v \sin \phi}{1 - (v/c) \cos \phi}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{v_{app}/c}{\sin \phi + (v_{app}/c) \cos \phi}$$

$$v/c < 1?$$



5.4. Estructura de un AGN



5.4. Estructura de un AGN

Cuando el ángulo sea muy pequeño toda la energía del jet que se aproxima a nosotros se concentrará y aparecerá mucho más brillante que el jet que se aleja (*relativistic beaming*). Esta sería la explicación de los AGN con un solo jet.

Casi todos los AGN con jets de velocidad superluminal muestran halos de materia que podrían ser lóbulos radio vistos de cara. En este tipo de objetos las variaciones temporales también se verían afectadas (serían más rápidas) por efectos relativistas. Esto explicaría la rápida variación de los **BLAZARS**.

De igual manera un jet casi alineado con la visual pero alejándose sería muy débil. En general todos los objetos que muestran velocidades superluminales solo tienen un jet (aunque pueden tener dos lóbulos radio), lo que parece favorecer esta explicación.

Casi todos los AGN muestran compañeros y **signos de interacciones** con otras galaxias. Además casi todas las Sy son espirales. Esto asegura la existencia de material que puede ser dirigido hacia el núcleo fruto de la fusión. También habría formación estelar, cosa que se observa en casi todas las Sy, y finalmente el resultado de la fusión podría ser una galaxia E con poco gas que no tiene mucho material para acretar y se convierte en una joven radio-galaxia.

Además los SMBH de las galaxias en **fusión** pueden también fusionarse.

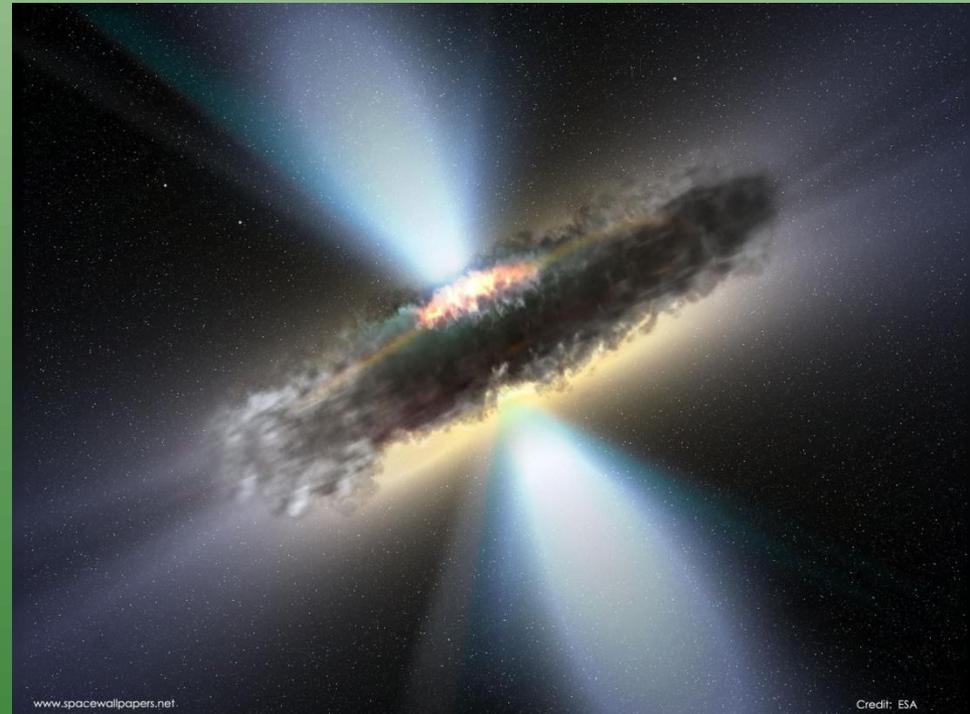
5.4. Estructura de un AGN

Rodeando el SMBH y el disco de acreción puede existir un **toro de gas y polvo** con una densidad elevada que produciría una extinción importante de la radiación proveniente de su interior. Este toro es necesario porque observacionalmente se ve que una gran mayoría de AGNs presentan una emisión en el MIR y FIR muy significativa.

El polvo del toro debe estar a una temperatura de menos de unos 2000 K, pues a mayores valores los granos se vaporizarían. Estos granos suelen ser de grafitos.

El toro absorbe radiación X y UV y la reemite en el MIR/FIR. Si el toro es muy grande y denso puede llegar a absorber toda la radiación energética del motor central (esto se conoce como "obscured AGN").

El toro no es lo mismo que el disco de acreción, aunque puede (O NO) estar en el mismo plano y tener material que luego pasará al disco y al SMBH.

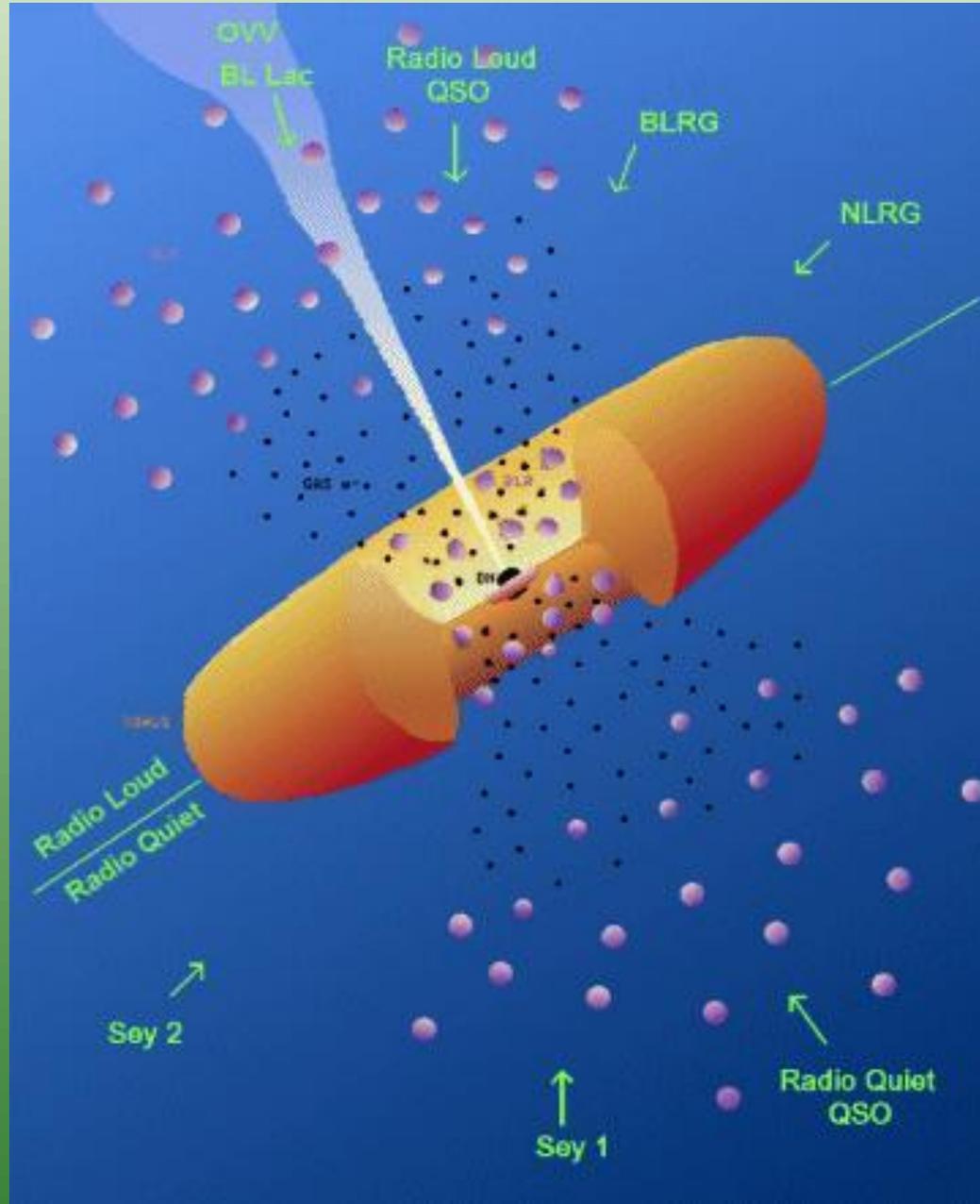


www.spacewallpapers.net

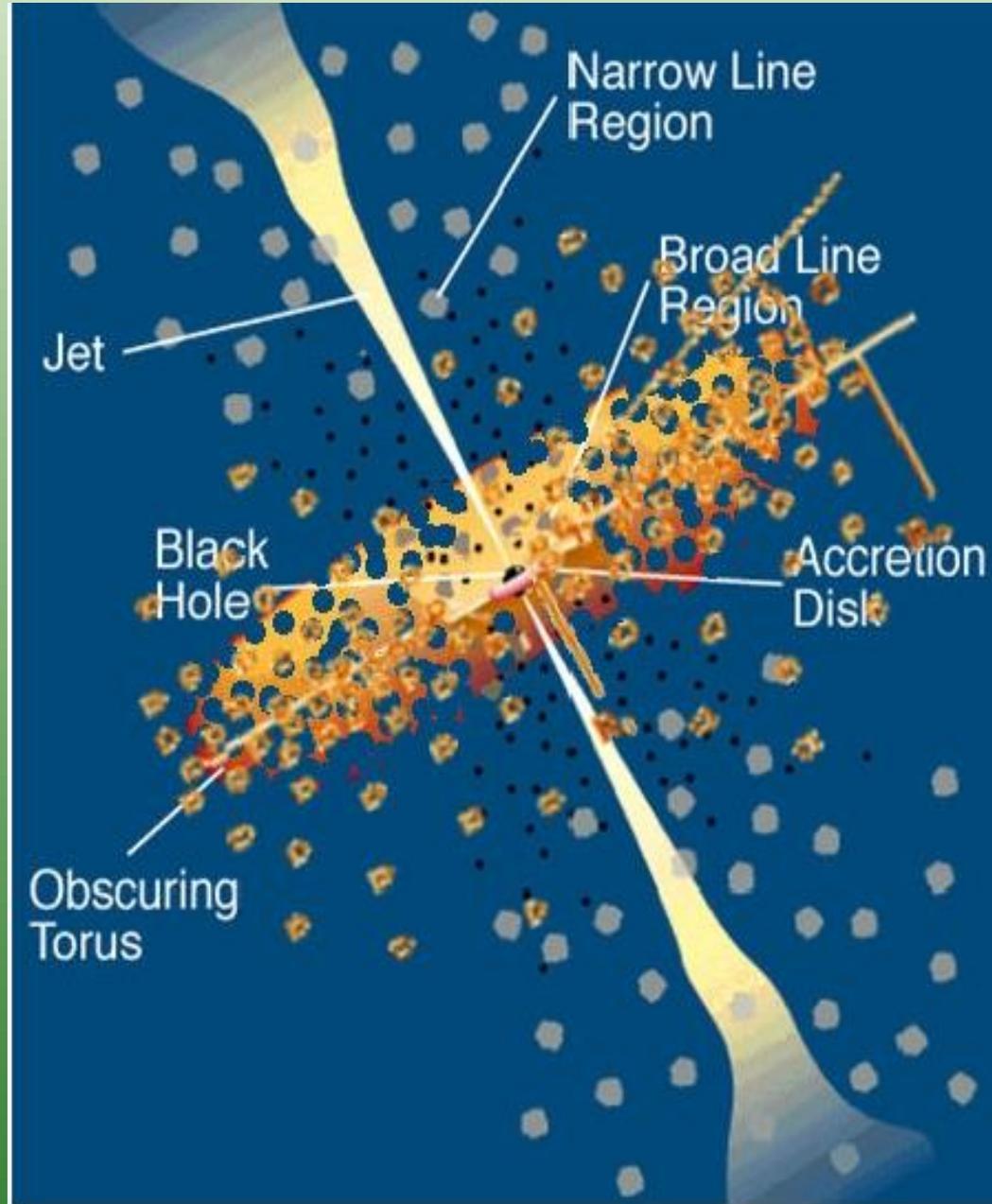
Credit: ESA



5.4. Estructura de un AGN

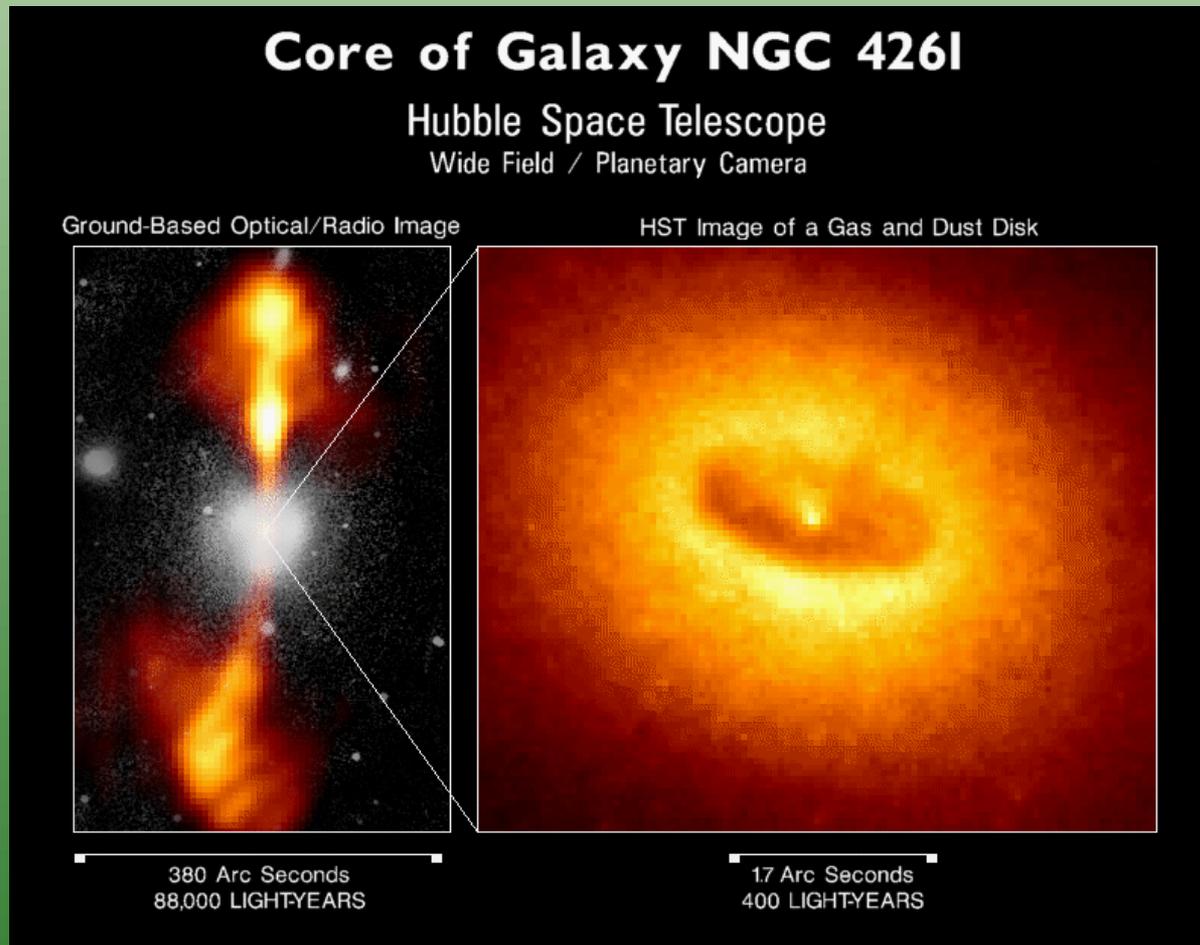


5.4. Estructura de un AGN



5.4. Estructura de un AGN

El tamaño del toro suele ser unas 1000-10000 veces más grande que la parte del disco de acreción que emite. El radio del toro viene dado por el radio de sublimación, aquel en el que el polvo es capaz de absorber la radiación del motor central y reemitirla sin sublimar (es decir, aquel que iguala la energía del AGN con la emisión del polvo para la temperatura máxima de 2000 K).



5.4. Estructura de un AGN

En el **modelo unificado** las **líneas anchas**, que se asocian con material en regiones densas moviéndose a gran velocidad, provendrían del disco de acreción (las partes más externas) más adentro del toro de polvo/gas. Aquí habría nubes calentadas por el motor central (SMBH+disco más cercano) a más de 10^4 K suficientemente cerca del SMBH para que sus velocidades puedan ser de miles de km/s. Estas nubes de gas caliente deberían ser cientos de millones con una masa de unas pocas masas solares cubriendo como un 10% del cielo visto desde el SMBH.

Las **líneas estrechas**, que se asocian con gas mucho menos denso (hay líneas prohibidas) y con menores velocidades provendrían de nubes mucho más externas, donde las órbitas no son tan veloces, fuera del toro de gas/polvo y/o lejos del motor central. Estando fuera del toro, rodeando todo el SMBH y a distancias relativamente grandes del motor central, la radiación no es tan intensa. Además la NLR debe ser visible en todos los AGN y puede extenderse varios kpc (formando la **extended NLR**). Por otra parte, dado que en los núcleos de las galaxias suele co-existir el SMBH con formación estelar intensa, la NLR puede también asociarse con esa formación estelar. Puede haber nubes neutras protegidas por el toro. Las nubes de la NLR suelen presentar velocidades radiales, como si fueran barridas por la presión de radiación.

Este escenario explica la **variabilidad**, que es mucho mayor en las líneas anchas, e incluso inexistente en las estrechas.

5.4. Estructura de un AGN

Una consecuencia del movimiento de la NLR es que las nubes pueden dispersarse en un periodo relativamente corto, lo que implica que **la fase Sy/QSO de una galaxia no es muy larga**. A esto se suma la posibilidad de quedarse sin material que acretar cuando acaba la fusión de galaxias.

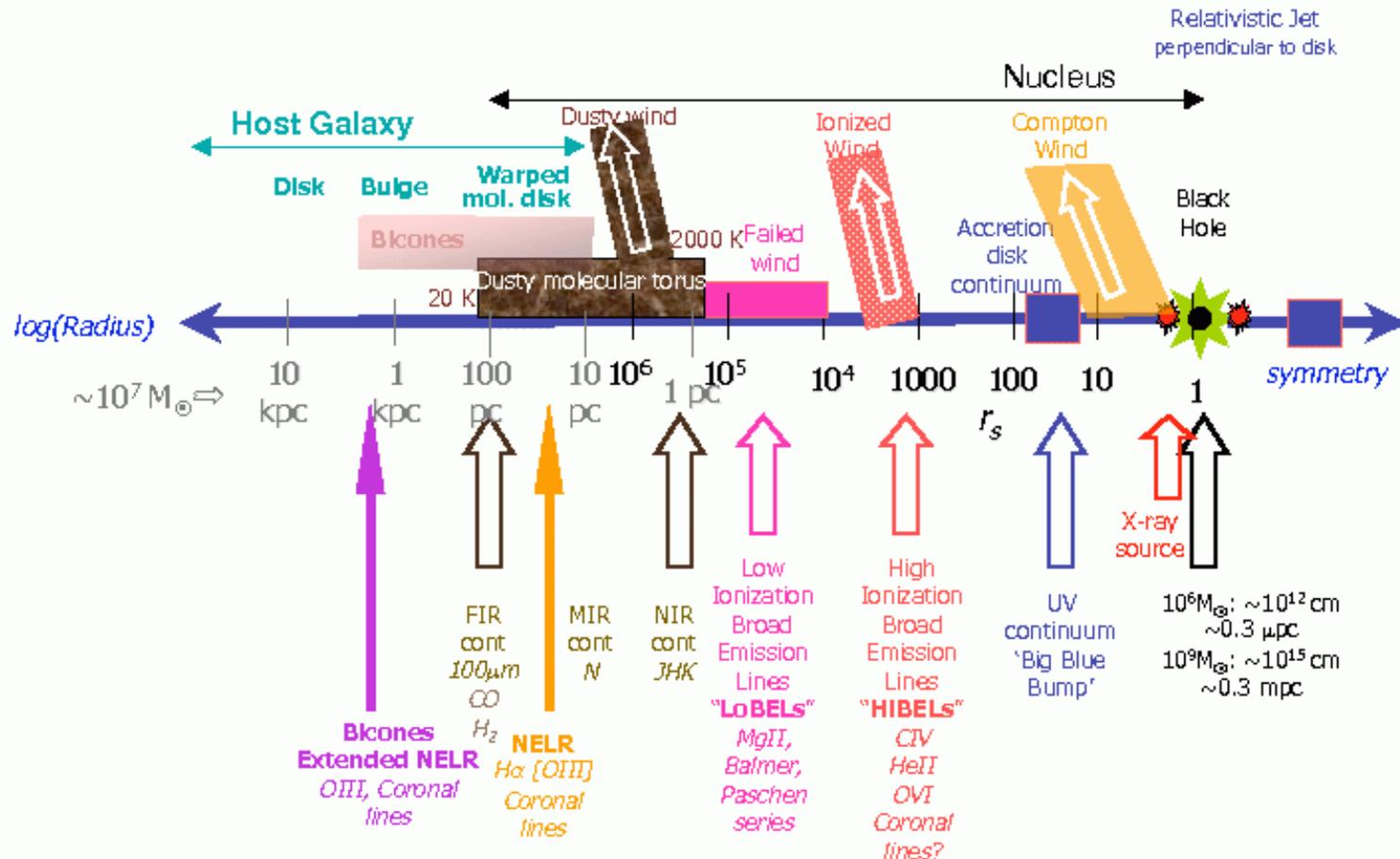
La radiación rayos-X de los AGN proviene de varios procesos. La propia **radiación sincrotrón puede explicar parte de la emisión rayos-X**. También la emisión muy energética de la parte más interna del disco de acreción, es decir, la cola del "blue/UV bump" podría dominar los rayos-X blandos. Los electrones relativistas también pueden chocar con partículas y producir rayos-X y rayos cósmicos (**inverse Compton scattering**). Por último, **thermal bremsstrahlung** producidos por interacciones electrón-electrón puede sumarse a la emisión rayos-X.

La radiación de **rayos- γ y de partículas cargadas** y muy energéticas que se observa en algunos AGN se debería a **inverse Compton scattering**, reacciones nucleares cerca del horizonte de sucesos y explosiones de SN en formación estelar cerca de los SMBHs.



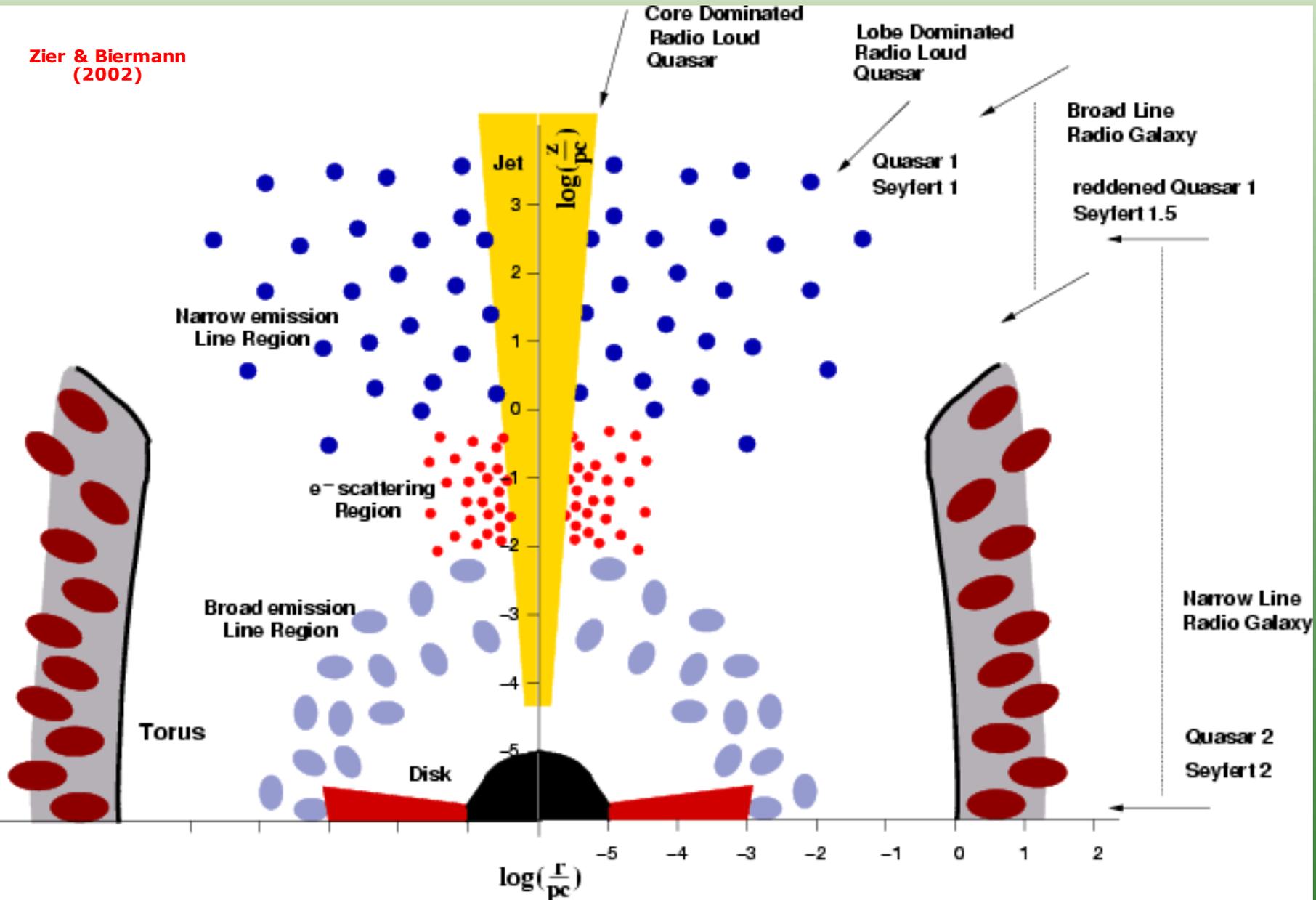
5.4. Estructura de un AGN

Scale of Quasar/AGN Components



5.4. Estructura de un AGN

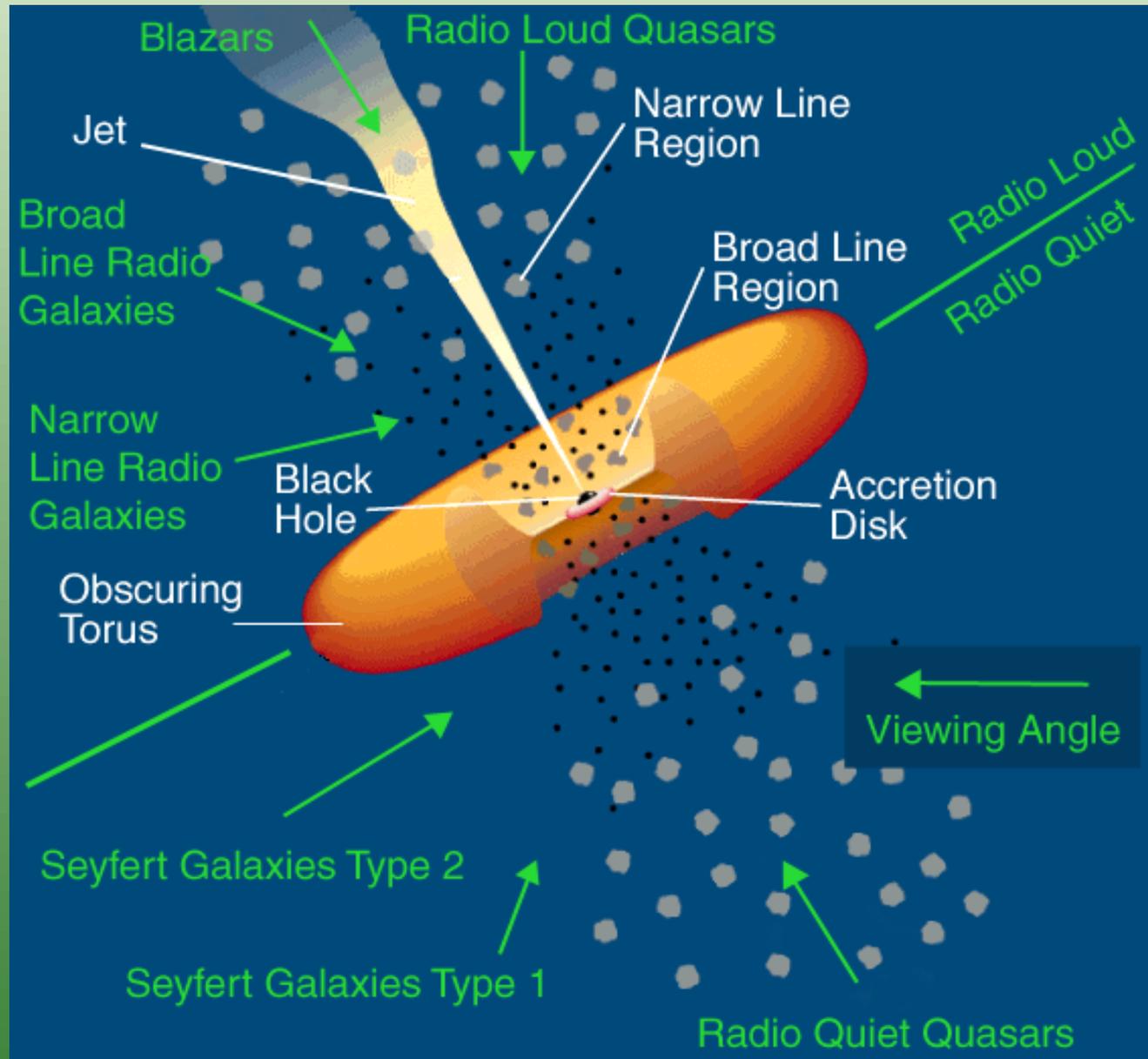
Zier & Biermann
(2002)



5.5. Modelo unificado de AGN

El modelo unificado establece la diferencia entre los distintos tipos de AGN en función de la masa del SMBH, del ritmo de acreción y de la orientación del disco de acreción y el toro de polvo en función del observador.

Un BLAZAR se produciría si estamos viendo el AGN justo a través del jet. Efectos relativistas explicarían la alta variabilidad.

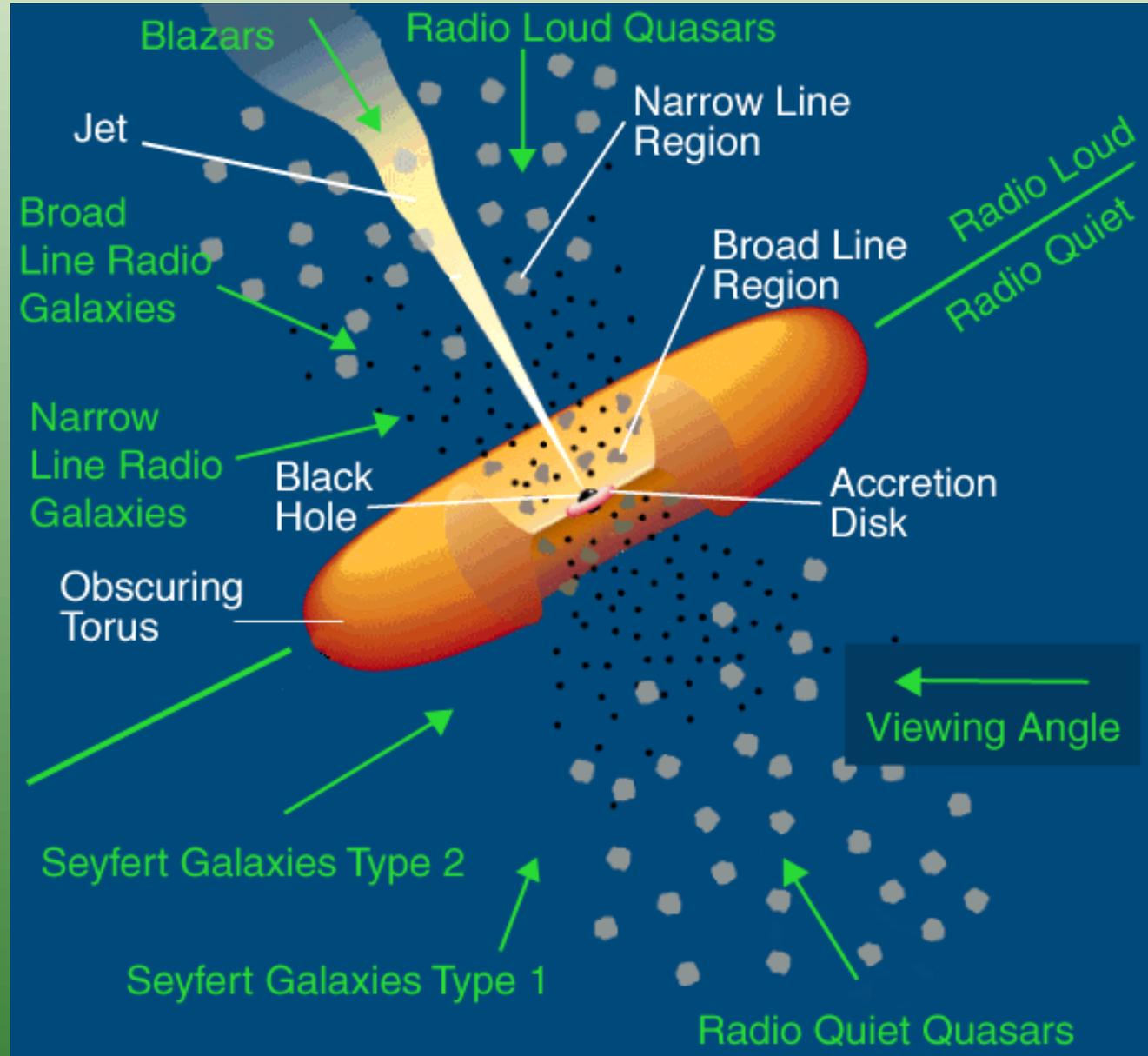


5.5. Modelo unificado de AGN

Una Sy1 sería un AGN con un SMBH muy masivo, con alto ritmo de acreción y visto en una dirección en el que el toro no "estorba", por lo que se ve la BLR y la NLR.

En una Sy2 podría haber un SMBH menos masivo, con menos material para acretar y la BLR estaría tapada por el toro de polvo.

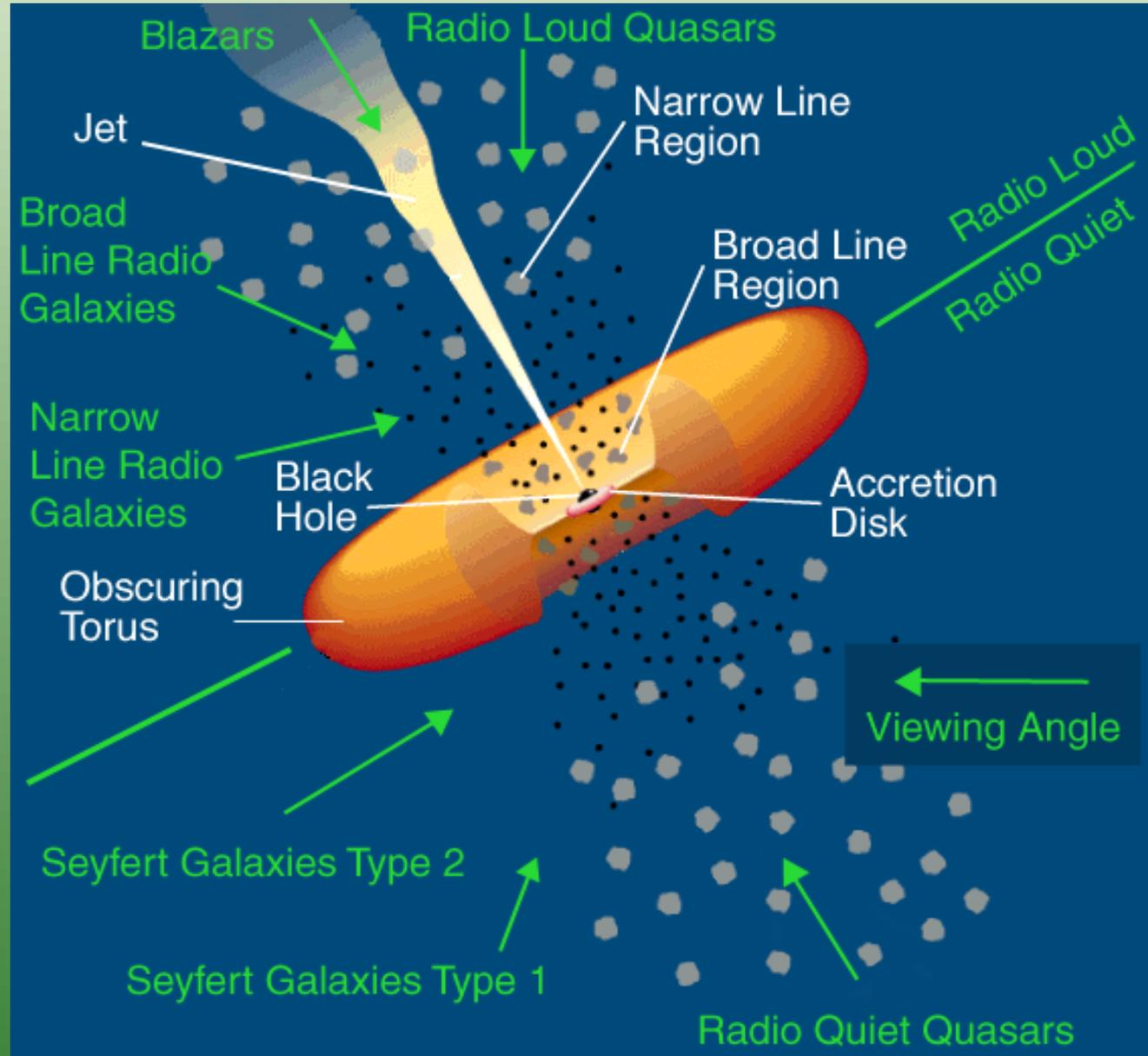
Nota: si la cantidad de polvo y emisión es igual, la emisión IR es igual. ¿Lo es? No parece.



5.5. Modelo unificado de AGN

Los QSO (radio quiet) serían versiones de las Sy1 muy luminosas, porque tienen SMBH más grandes o/y mucho mayor ritmo de acreción.

Si el motor central produce jets se verá emisión radio, pero cómo la vemos depende de la orientación de nuevo.



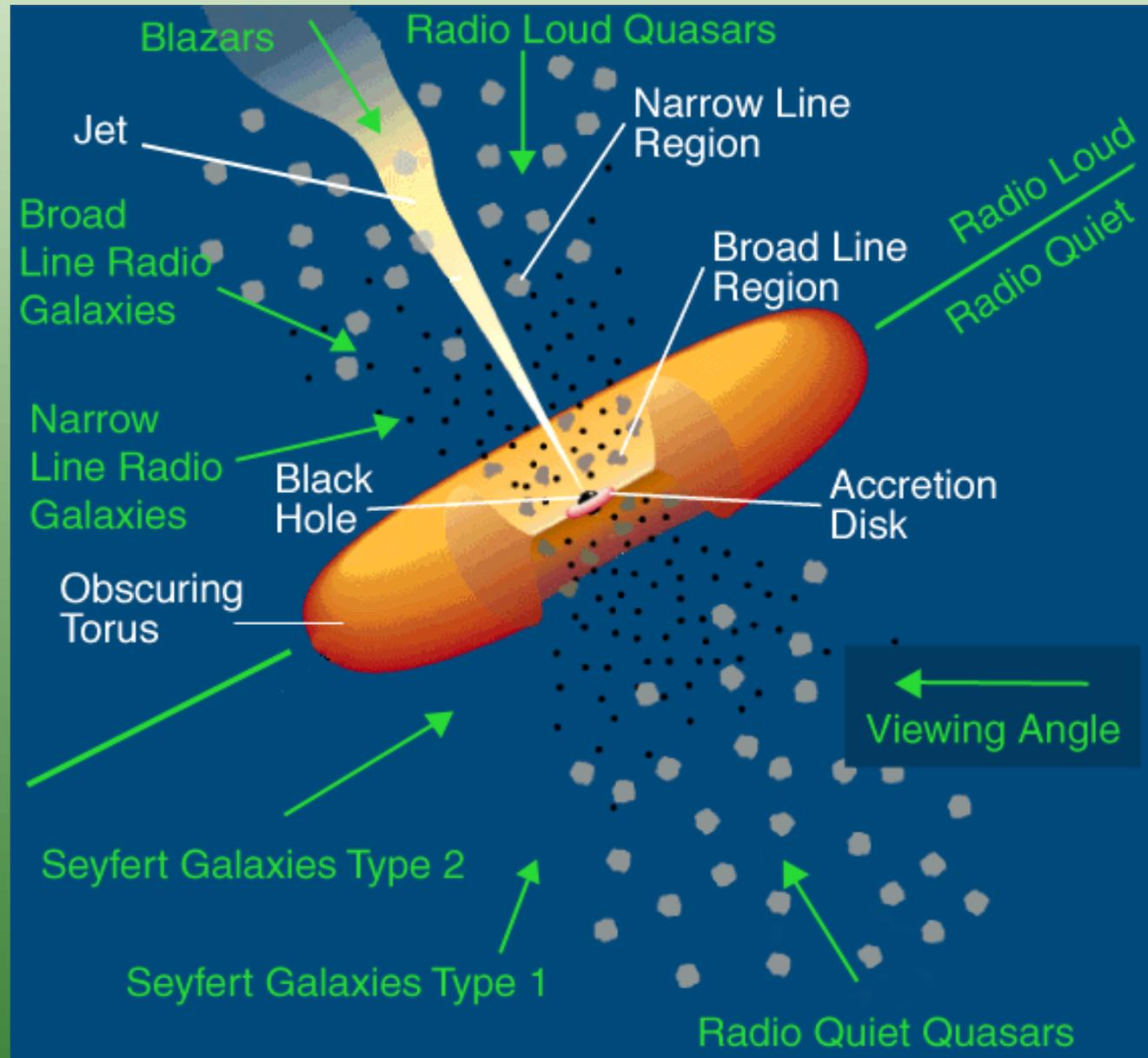
5.5. Modelo unificado de AGN

A ángulos altos se ven dos jets y la NLR. A ángulos bajos desde el jet se ve unos solo y la BLR. Esto es un BLAZAR o un QSO_r.

La radiación de los BLAZAR sería del jet en sí, por lo que no se verían líneas sino un continuo.

El modelo no es perfecto aún. Por ejemplo, ¿por qué no se ven BL o NL en los BLAZAR?

¿Por qué hay radio-loud y radio-quiet AGNs? ¿SMBH con spin fruto de mergers?



5.5. Modelo unificado de AGN

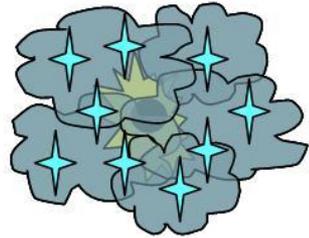
Más problemas o alternativas del modelo unificado:

- ◆ Puede haber efecto de edad y cantidad de material disponible.
- ◆ Puede haber efecto de tamaño del SMBH.
- ◆ ¿Por qué hay radio-loud y radio-quiet? Parece haber AGN que no tienen jets, no es un efecto de orientación.
- ◆ Algunas Sy 2 no muestran tanta extinción como se esperaría.
- ◆ Algunas Sy 2 muestran BL en luz polarizada.
- ◆ Algunas Sy 1 parecen tener una zona central muy oscurecida.
- ◆ Algunos AGN parecen oscurecidos en algunas longitudes de onda pero no en otras.
- ◆ Se suelen introducir otros elementos como "clumpy medium", efectos de reflexión del material, etc...



5.6. Evolución de los AGN

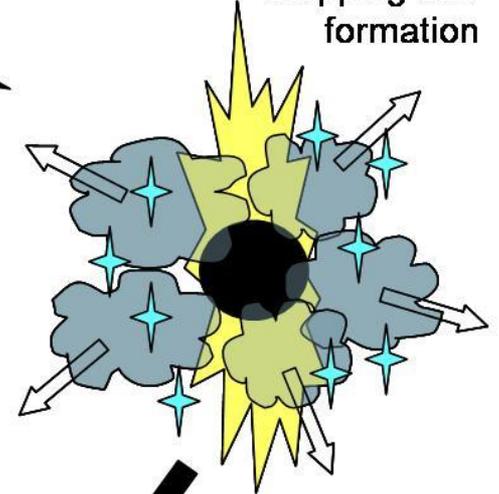
New black hole in star forming clouds



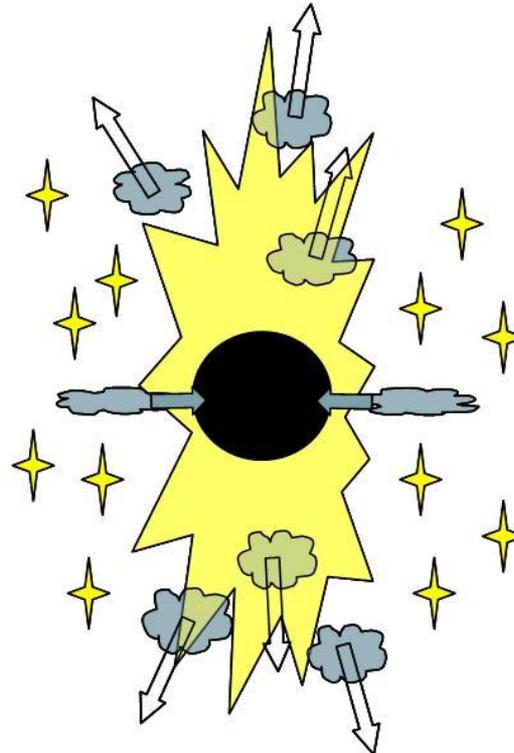
Black hole grows, stars form



Energy output blasts away gas clouds, stopping star formation



Black hole accretes remaining gas unobscured

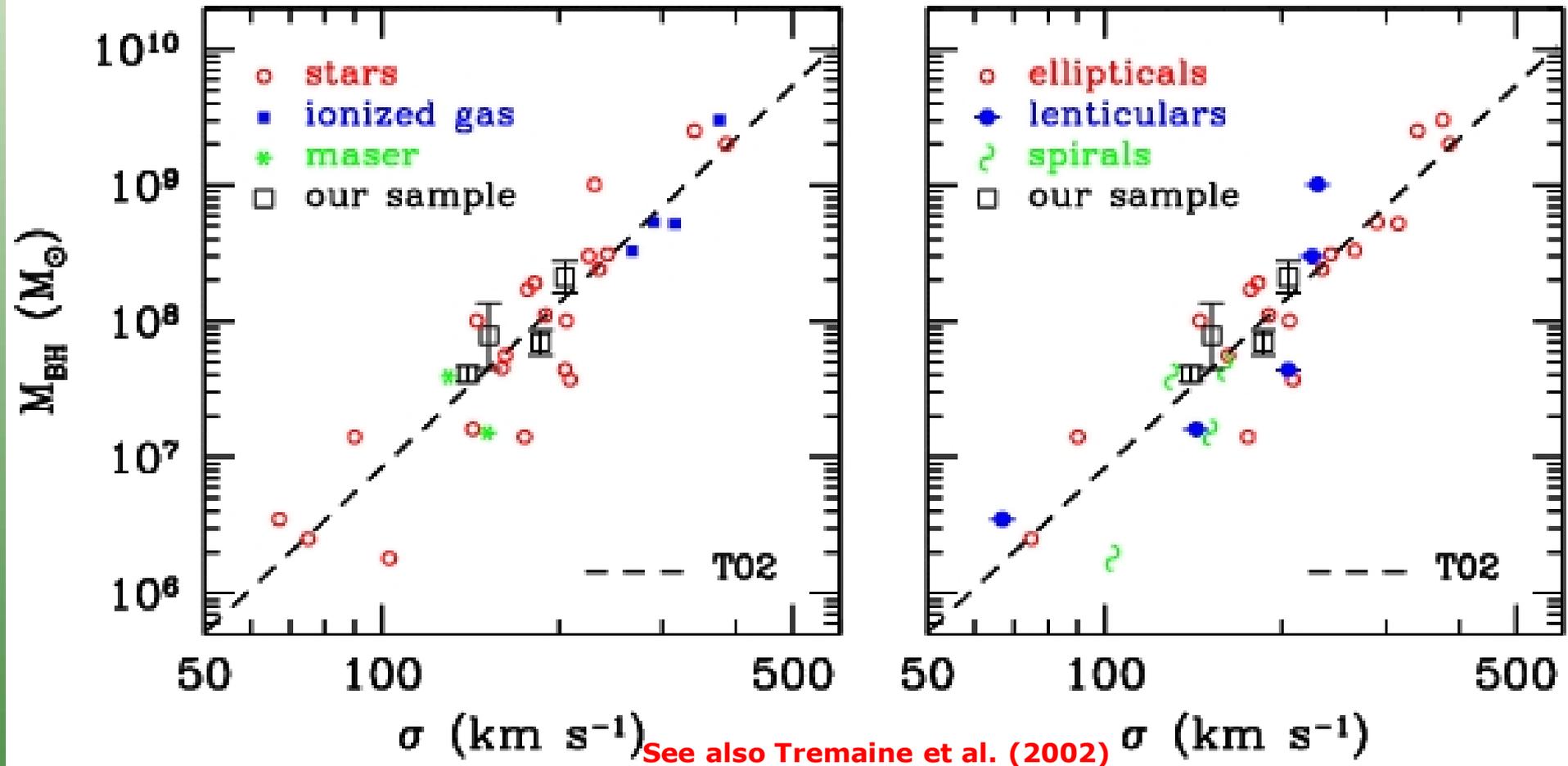


Dormant black hole, fuel used up



University College
London

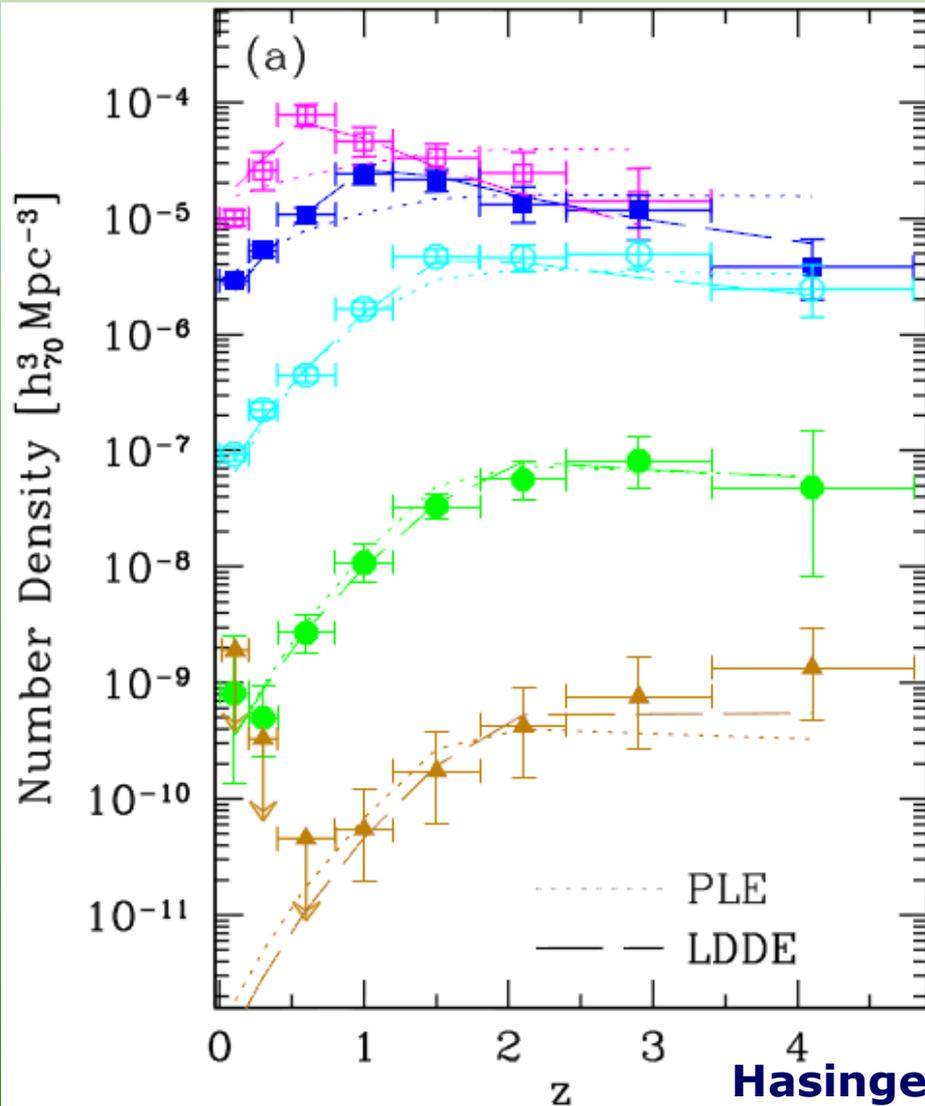
5.6.AGN y la evolución de galaxias



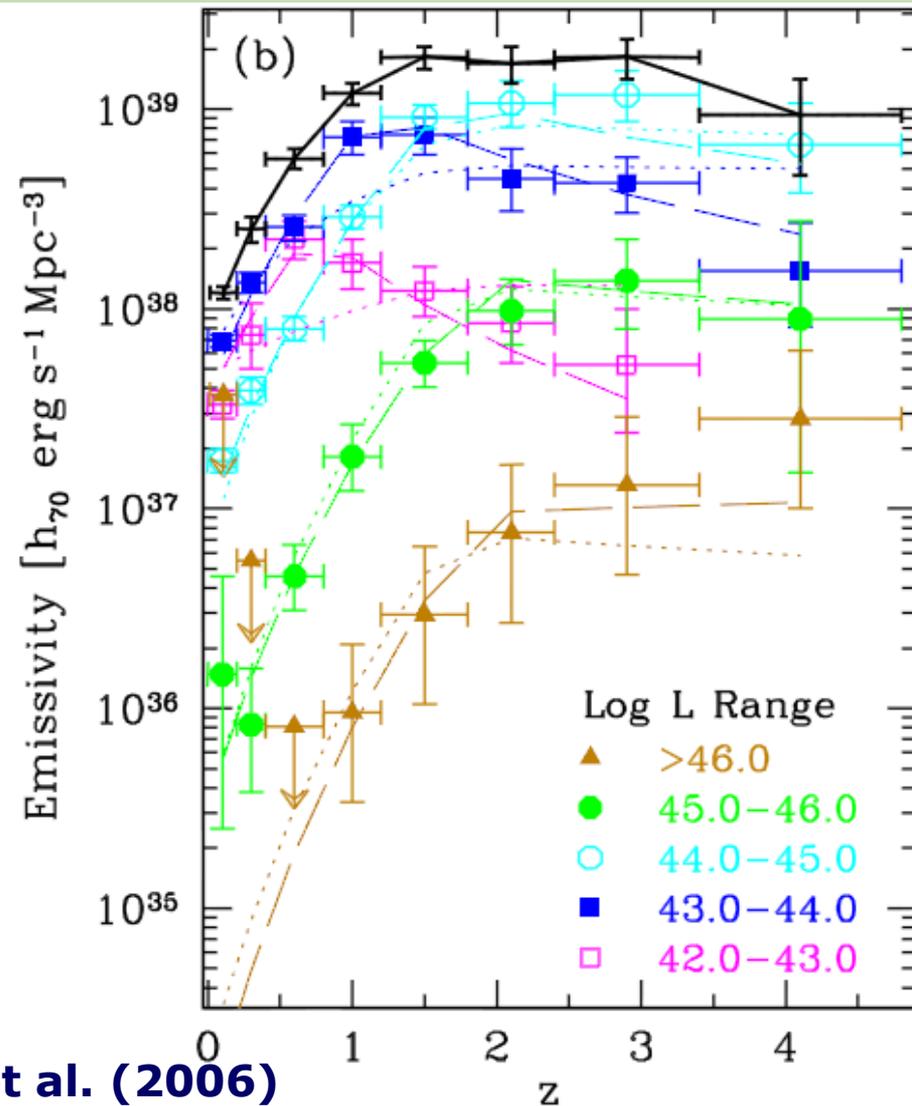
<http://star-www.herts.ac.uk/~sarzi/SUNNS/SUNNS.html>



5.6.AGN y la evolución de galaxias



Hasinger et al. (2006)



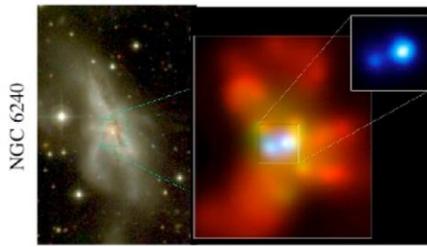
5.6.AGN y la evolución de galaxias

(c) Interaction/"Merger"



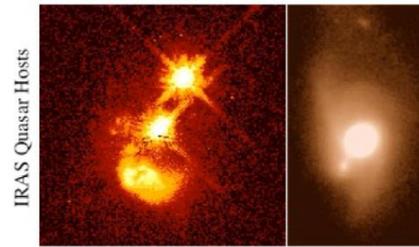
- now within one halo, galaxies interact & lose angular momentum
- SFR starts to increase
- stellar winds dominate feedback
- rarely excite QSOs (only special orbits)

(d) Coalescence/(U)LIRG



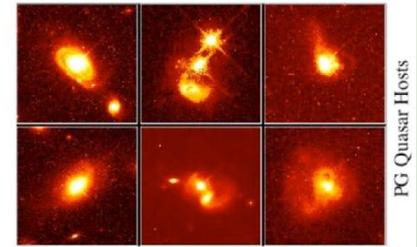
- galaxies coalesce: violent relaxation in core
- gas inflows to center: starburst & buried (X-ray) AGN
- starburst dominates luminosity/feedback, but, total stellar mass formed is small

(e) "Blowout"



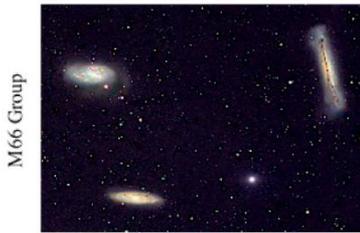
- BH grows rapidly: briefly dominates luminosity/feedback
- remaining dust/gas expelled
- get reddened (but not Type II) QSO: recent/ongoing SF in host
- high Eddington ratios
- merger signatures still visible

(f) Quasar



- dust removed: now a "traditional" QSO
- host morphology difficult to observe: tidal features fade rapidly
- characteristically blue/young spheroid

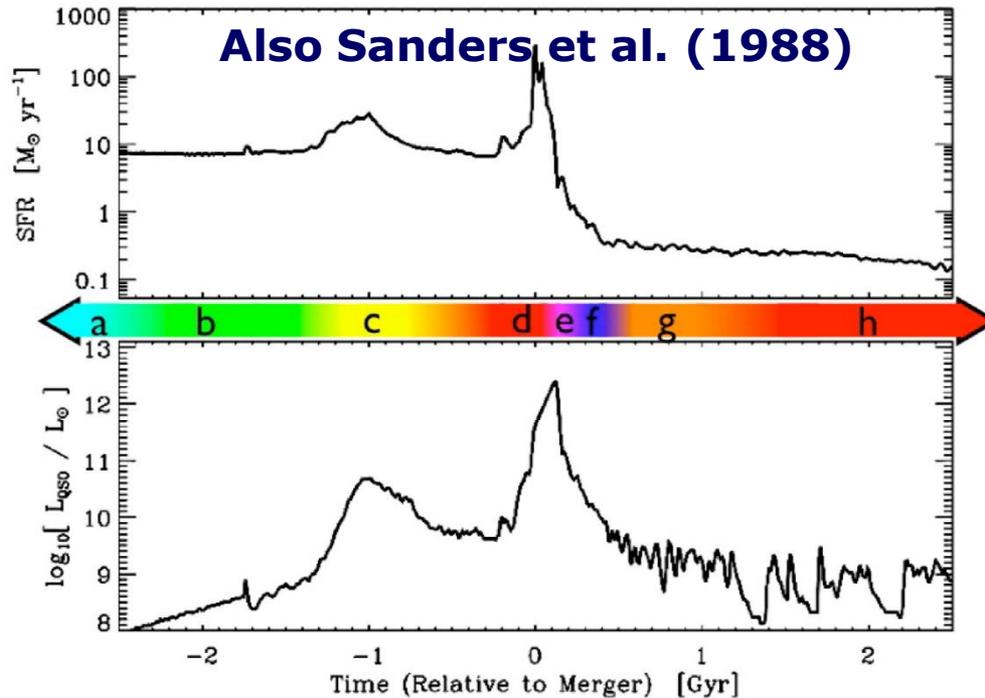
(b) "Small Group"



- halo accretes similar-mass companion(s)
- can occur over a wide mass range
- M_{halo} still similar to before: dynamical friction merges the subhalos efficiently

Hopkins et al. (2008)

Also Sanders et al. (1988)



(g) Decay/K+A



- QSO luminosity fades rapidly
- tidal features visible only with very deep observations
- remnant reddens rapidly (E+A/K+A)
- "hot halo" from feedback
- sets up quasi-static cooling

(a) Isolated Disk



- halo & disk grow, most stars formed
- secular growth builds bars & pseudobulges
- "Seyfert" fueling (AGN with $M_{\text{B}} > -23$)
- cannot redden to the red sequence

(h) "Dead" Elliptical



- star formation terminated
- large BH/spheroid - efficient feedback
- halo grows to "large group" scales: mergers become inefficient
- growth by "dry" mergers



Resumen

- **¿Qué es un AGN?**
- **Características observacionales de un AGN en todo el espectro.**
- **Tipos de AGN.**
- **Parámetros físicos que definen AGN: radio, luminosidad, etc...**
- **Estructura de un AGN (motor central y alrededores).**
- **Modelo unificado de AGN: éxitos y problemas.**
- **Evolución e importancia cosmológica de los AGN.**

