

Galaxias de Núcleo Activo: Procesos Físicos

FIA0411

Agujeros Negros: definiciones

- Radio de Schwarzschild: (Horizonte de eventos)

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}$$

- Radio gravitacional:

$$r_g = \frac{GM}{c^2} = \frac{r_s}{2}$$

- Si el BH rota, se define el momento angular s :

$$s \sim I \times \Omega \sim (Mr_g^2) \times \left(\frac{c}{r_g}\right) = Mr_g c$$

Agujeros Negros: definiciones

Definimos eficiencia η como:

$$E = \eta mc^2$$

La luminosidad queda:

$$L = \frac{dE}{dt} = \eta \dot{m} c^2$$

Usando L_{edd} , se define la tasa de acreción de Eddington $\dot{m}_{\text{edd}}$ /dt:

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{L_{\text{Edd}}}{\eta c^2} \approx 3 \left(\frac{M}{10^8 M_{\odot}} \right) \left(\frac{\eta}{0.1} \right)^{-1} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$$

El tiempo típico de acreción asociado a esta tasa de acreción se denomina “tiempo de Eddington”:

$$t_{\text{Edd}} = \frac{M}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \approx 4 \times 10^8 \eta \text{ yr}$$

Factor de Eficiencia

- Fusión nuclear H->He: $\eta = 0.007$ (0.7%)
- Liberación de energía gravitacional
 - Igualando energía gravitacional disponible con la definición de eficiencia:

$$E = \frac{GMm}{R_{ac}} = \eta mc^2$$

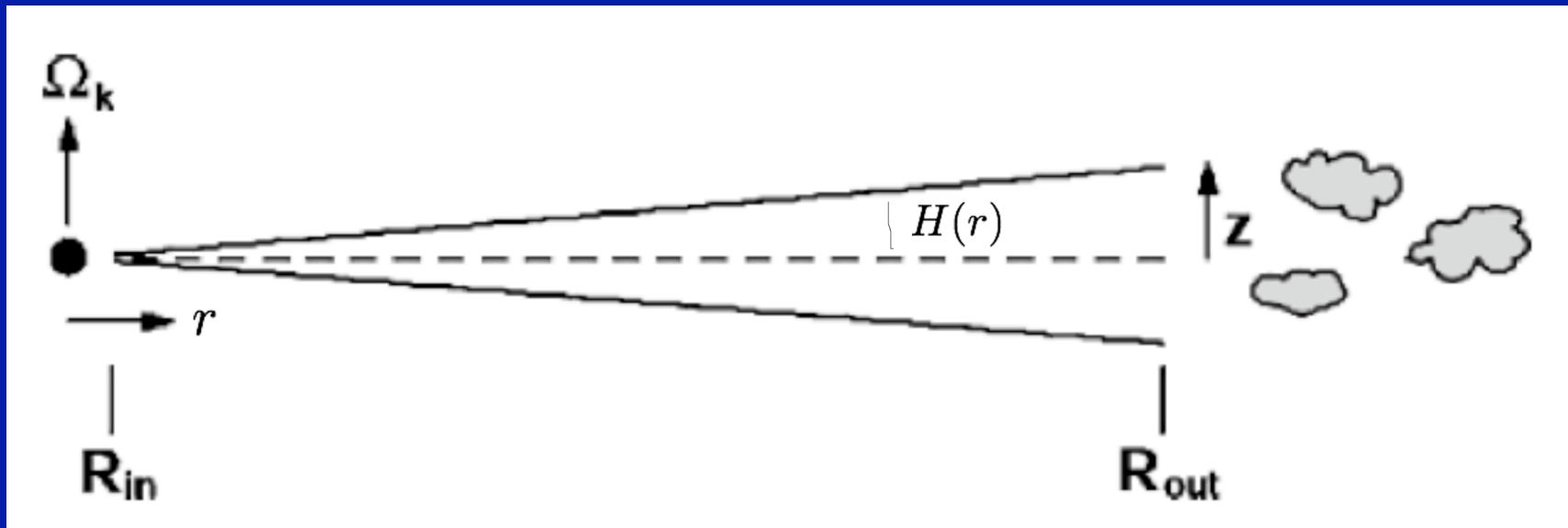
$$\Rightarrow \eta = \frac{GM}{c^2 R_{ac}}$$

- Ejemplo enana blanca: $M=0.6 M_{\text{sol}}$ y $R_{ac}=8500\text{Km}$ --> $\eta = 0.0001$ (0.01%)
- Ejemplo estrella neutrones: $M=1.5 M_{\text{sol}}$ y $R_{ac}=15\text{Km}$ --> $\eta = 0.15$ (15%)
- BH: Depende de la rotación: $\eta = 0.05$ sin rotación, y $\eta = 0.42$ para rotación máxima.

Discos de acreción

- Modelo simple:
 - Ópticamente grueso y geométricamente delgado
 - Órbitas keplerianas, velocidad radial despreciable comparado con la vel. azimuthal
 - Estado estacionario
 - Masa del disco despreciable c/r al SMBH
- Variables:
 - v_k , v_r , v_ϕ : velocidades kepleriana, radial y azimuthal. ($v_k \approx v_\phi$)
 - N : Torque
 - Σ , ρ : densidad superficial/volumetrica de masa
 - M , dM/dt : Masa del SMBH, tasa de acreción

- Variables:
 - s : momento angular
 - Ω_k : velocidad angular kepleriana
 - $H(r)$: media altura (grosor) del disco
 - r_{in} y r_{out} : Radios mínimo y máximo del disco



Si m es la masa de un anillo del disco a un radio r , su momento angular será:

$$s = mv_{\phi}r \approx mv_Kr$$

La velocidad azimutal (kepleriana):

$$F = ma \Rightarrow v_K = \sqrt{\frac{GM}{r}}, \quad \Omega_K = \frac{v_K}{r}$$

La tasa de acreción está determinada por v_r y la densidad superficial:

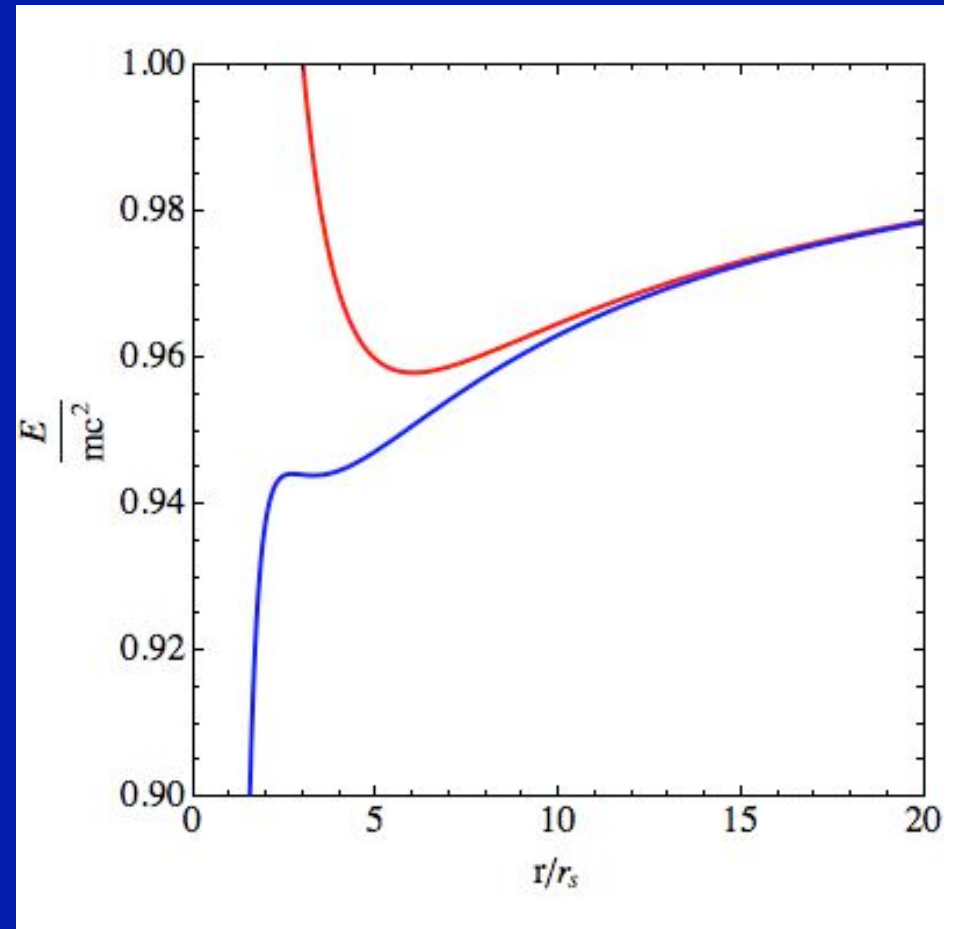
$$\dot{M} = -2\pi r \Sigma v_r$$

Y la densidad superficial cumple:

$$\Sigma(r) = 2\rho(r)H(r)$$

Órbitas alrededor de un BH

- En RG, existe un radio mínimo para órbitas estables
- Figura muestra el caso de órbitas circulares en un BH sin rotación
 - $R_{\min} = 3r_s = 6r_g$
- Para un BH de Kerr con rotación máxima, $R_{\min} = 1.2 r_s$



Integrando la ecuación de conservación de momentum, se obtiene el torque entre dos anillos adyacentes:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{dm}{dt} \sqrt{GM r} = \dot{M} \sqrt{GM r}$$

$$\Rightarrow N(r) = \dot{M} \sqrt{GM r} + Const.$$

La constante queda fijada por la condición de que en el radio mínimo el torque sea nulo:

$$\Rightarrow N(r) = \dot{M} \sqrt{GM} (\sqrt{r} - \sqrt{r_{in}})$$

Balance energético

Energía mecánica de un anillo:

$$E = K + U = -\frac{GMm}{2r}$$

La luminosidad debido a esa energía:

$$dL_g = d\left(\frac{dE_g}{dt}\right) = -d\left(\frac{GM\dot{M}}{2r}\right)$$

Otra componente es la luminosidad debido al trabajo producido por el torque:

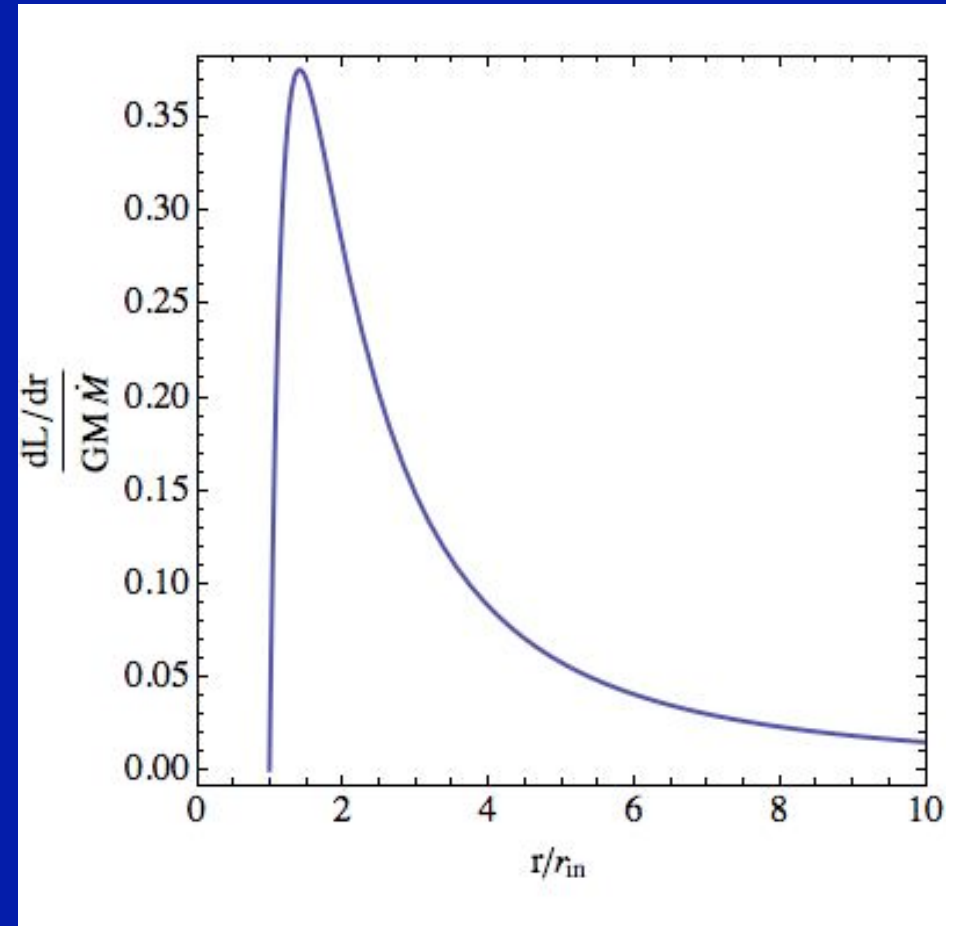
$$\Delta E_N = -N(r)\Delta\theta \Rightarrow dL_N = d\left(\frac{dE_N}{dt}\right) = -d(N\Omega_K)$$

Sumando las dos contribuciones y
derivando c/r a r:

$$\frac{d(L_g + L_N)}{dr} = \frac{d}{dr} \left[-\frac{GM\dot{M}}{2r} - GM\dot{M} \left(\frac{1}{r} - \frac{r_{in}^{1/2}}{r^{1/2}} \right) \right]$$

$$\Rightarrow \frac{dL}{dr} = \frac{3GM\dot{M}}{2r^2} \left(1 - \frac{r_{in}^{1/2}}{r^{1/2}} \right)$$

- Gran parte de la energía es liberada cerca del radio mínimo r_{in}
 - Según la expresión anterior, más de la mitad sale entre r_{in} y $5r_{\text{in}}$
- Esta expresión es válida hasta un r_{out} determinado por la geometría del disco
- La expresión más exacta debería tomar en cuenta mecánica relativista...



Temperatura del disco:

- Emisividad de un lado del disco:

$$D(r) = \frac{1}{2 \times \text{area}(\text{anillo})} \frac{dL}{dr}$$

- Si asumimos que cada anillo del disco emite como cuerpo negro $D = \sigma T^4$. La temperatura resulta:

$$T(r) = \left(\frac{3GM\dot{M}}{8\sigma\pi r^3} \left[1 - \sqrt{\frac{r_{in}}{r}} \right] \right)^{1/4}$$

- Para $r \gg r_{in}$, $T(r)$ escala como (para L/L_{edd} fijo):

$$T(r) \propto M^{-1/4} \left(\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \right)^{1/4} \left(\frac{r}{r_g} \right)^{-3/4}$$

Luego, los discos más masivos son más fríos!!

Integrando espectros de cuerpos negros para cada anillo, obtenemos el espectro del disco:

$$L_\nu = \int_{r_{in}}^{r_{out}} dL_\nu = \int_{r_{in}}^{r_{out}} 2\pi r (\pi B_\nu) dr$$

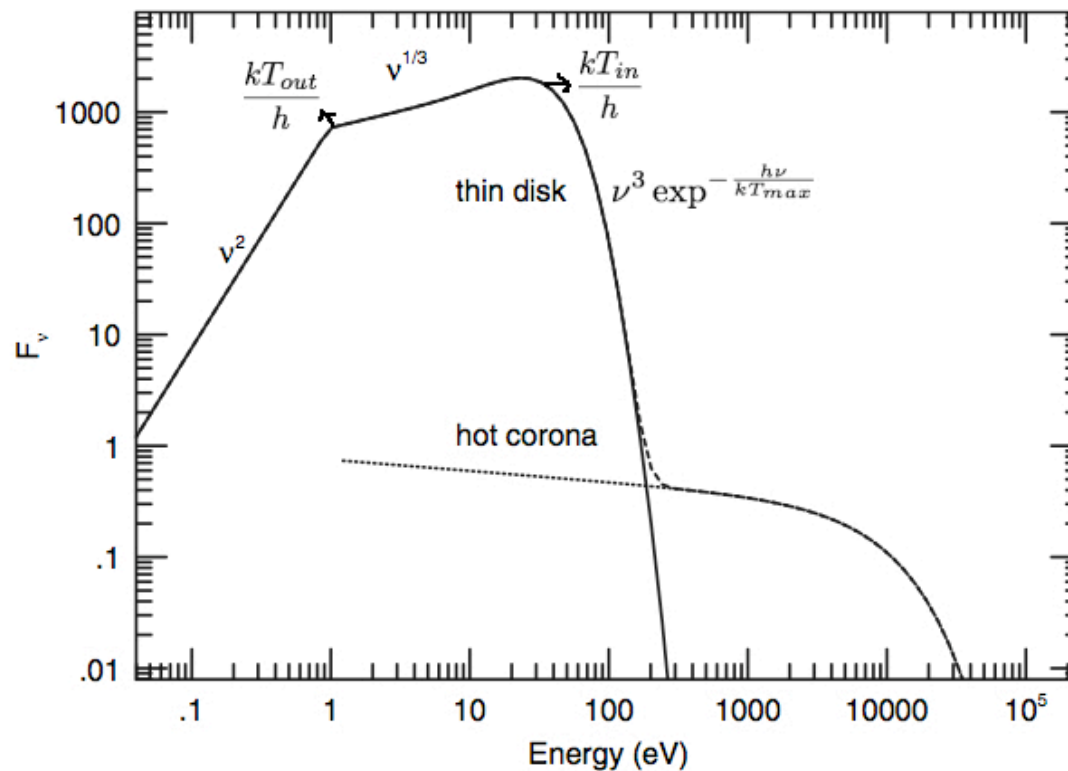


Fig. 2. Schematic representation of a disk-corona spectrum assuming a geometrically thin optically thick accretion disk with $T_{max} = 10^5$ K and an optically thin corona with $T_{cor} = 10^8$ K

Condiciones físicas del gas

- El estado del gas de la diferentes componentes del AGN se debe más que nada a fotoionización.
- En equilibrio, se puede definir un “parámetro de ionización” que es proporcional al nivel de ionización del gas:

$$U = \frac{Q}{4\pi r^2 c N_H}, \quad Q = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \frac{L_\nu}{h\nu} d\nu = \int_{E_1}^{E_2} \frac{L_E}{E} dE$$

- Donde:
 - Q es el número de fotones ionizantes
 - r es el radio de la zona ($r = 0$ es donde está el BH)
 - N_H es la densidad del gas hidrógeno
 - Las frecuencias 1 y 2 (o energías 1 y 2) son las que determinan el rango del espectro que puede ionizar al elemento
- En general, cuando U está entre 0.01 - 0.1 se producen líneas fuertes en el rango de energía en cuestión.
 - Para valores menores, el gas está mayormente neutro, no emite
 - Para valores mayores, casi todo el gas está ionizado y ya es transparente.

Se puede calcular para varios elementos, dependiendo de qué domine el “enfriamiento” o emisión de líneas en esa zona.

Table 1. Various ionization parameters used in the literature

Ionization Parameter	E_1	E_2	Conversion Factors, $L_E \propto E^{-1.3}$
$U(\text{hydrogen})$	13.6 eV	∞	1000
$U(\text{helium})$	54.4 eV	∞	165
$U(\text{X-ray})$	0.1 keV	10 keV	73.3
$U(\text{oxygen})$	0.54 keV	10 keV	8.2

Table 2. AGN components

Component	Location	Density	Ionization Parameter
Accretion disk	10^{-3} pc	$\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$	$U(\text{oxygen}) = 10^{-3} - 10^{-1}$
BLR	0.01–1 pc	$\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$	$U(\text{hydrogen}) \sim 10^{-2}$
Torus	1–10 pc	10^{3-6} cm^{-3}	$U(\text{oxygen}) \sim 10^{-2}$
HIG	~ 1 pc	$10^3 - 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$U(\text{oxygen}) \sim 10^{-2}$
NLR	100–1000 pc	10^{3-5} cm^{-3}	$U(\text{hydrogen}) \sim 10^{-2}$
Starburst	~ 1000 pc	$10^0 - 10^3 \text{ cm}^{-3}$	$U(\text{oxygen}) = 10^{-2} - 10^{-4}$

Mapeo de Reverberación

- Técnica para medir la masa del agujero negro usando su variabilidad, el ancho de las líneas y el teorema del virial
- Se mide el radio de la BLR mediante las curvas de luz de las líneas anchas y el continuo adyacente.
 - Se asume que el continuo es producido por una zona de tamaño despreciable c/r a la BLR
 - Se asume que las nubes de la BLR responde instantáneamente la radiación del núcleo.

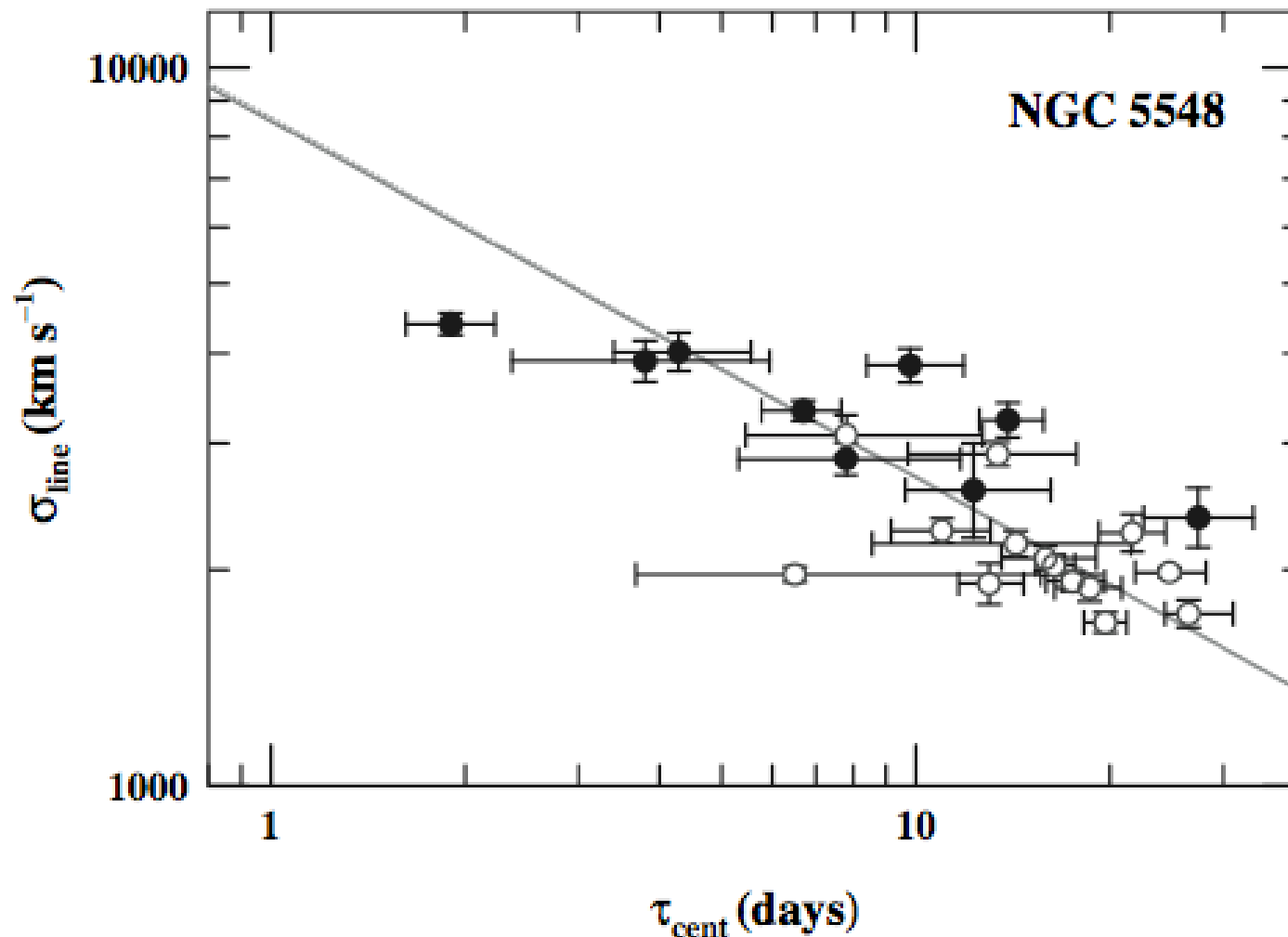
Mapeo de Reverberación

Del teorema del virial:

$$K = U/2 \Rightarrow \frac{1}{2} m_{nube} V^2 \sim \frac{1}{2} \times \frac{G m_{nube} M_{BH}}{R_{BLR}}$$

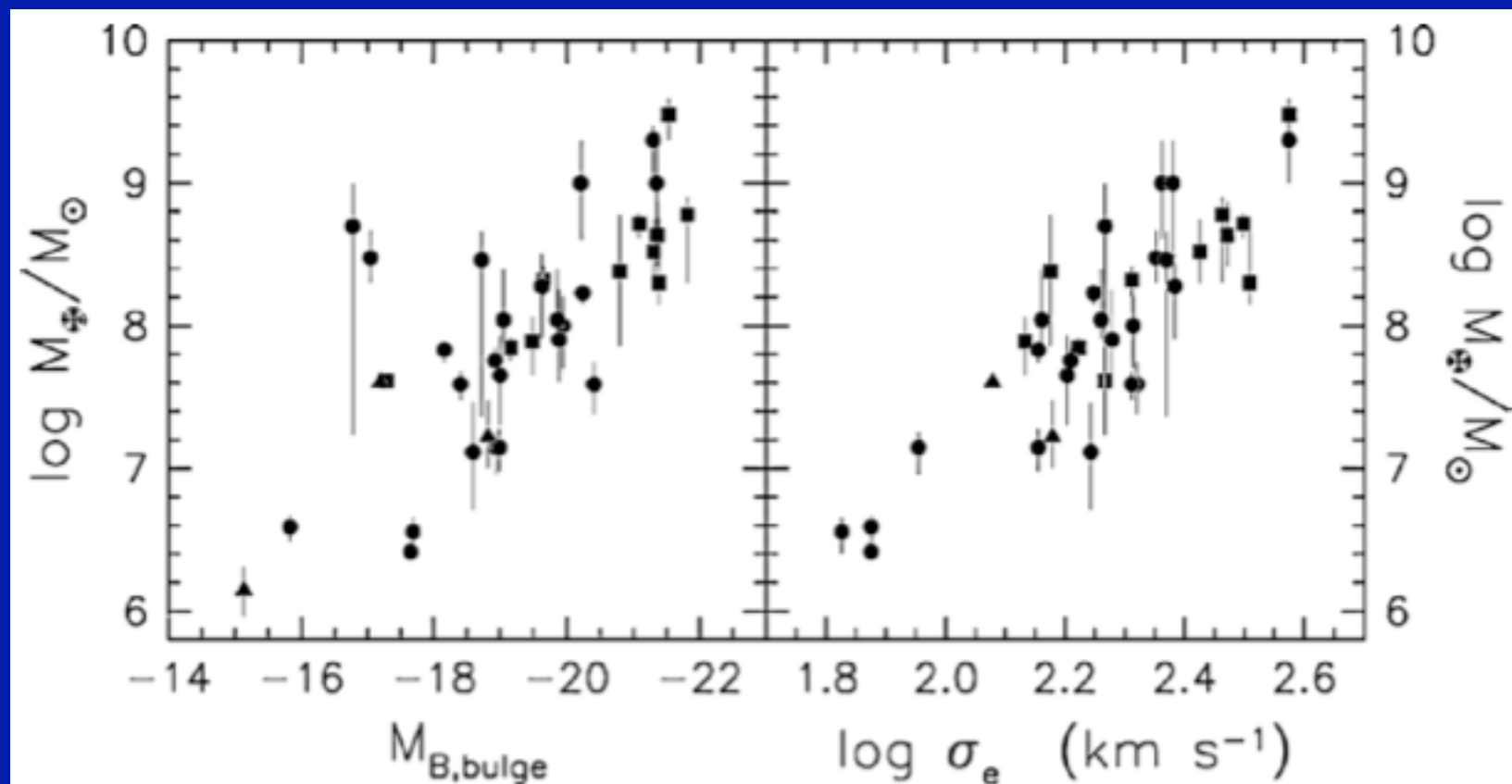
$$\Rightarrow M_{BH} = \frac{f c \tau \Delta V^2}{G}$$

Donde f es un factor geométrico que de cuenta de la aproximación de arriba. Se calibra con AGN que tienen otras mediciones directas (cinemáticas).



- Ej. ngc 5548: ancho de varias líneas (negro) del espectro y H β (blanco) versus el retardo de la curva de luz para cada una de ellas. La pendiente ha sido forzada a -0.5.

Relación entre SMBH y galaxia huésped

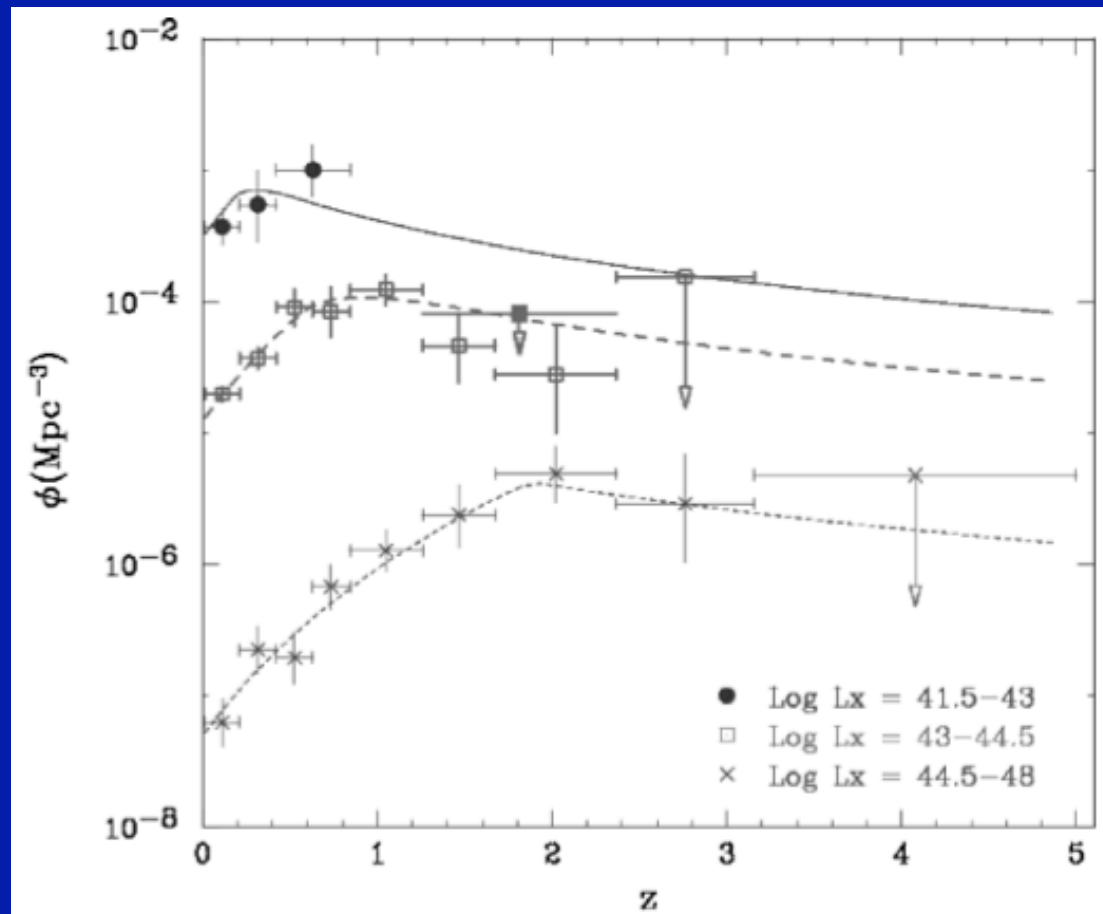


Masa del SMBH correlaciona con al brillo del bulbo de las galaxias huésped, y también con la dispersión de velocidades en el bulbo.

La relación aproximada es $M = K\sigma^4$

Función de luminosidad

- Se busca calcular $\phi(L,z)$, el número de AGN por Mpc^3 a redshift z por rango de luminosidad.
- Típicamente se modela como una ley de potencias quebrada a bajo redshift.



Función de luminosidad

Para parametrizar la función de luminosidad, típicamente se usa:

$$\Phi(M_g, z) = \frac{\Phi(M_g^*)}{10^{0.4(\alpha+1)(M_g - M_g^*)} + 10^{0.4(\beta+1)(M_g - M_g^*)}}$$

Donde la evolución en redshift está implícita en $M^*(z)$ y $\phi(M^*, z)$. Normalmente en el restframe del espectro esta magnitud está cerca de 1450Å.

Bibliografía

- Julian A. Krolik, “Active Galactic Nuclei: From the Central Black Hole to the Galactic Environment”, Princeton University Press
- H. Netzer, “Active Galactic Nuclei: Basic Physics and Main Components”, Lect. Notes Phys. 693, 1-38 (2006)
- B.M. Peterson, “The Broad-Line Region in Active Galactic Nuclei”, Lect. Notes Phys. 693, 77-100 (2006)