

Akrecja w aktywnych jądrach galaktyk

I. Rys historyczny

a) BL Lac (“gwiazda zmienna” w gwiazdozbiore łaszczurki) ~ 1920

b) C. Seyfert, 1943, “Nuclear emission in spiral nebulae” (NGC 4151, NGC 1068, NGC 7469, NGC 3516 i NGC 1275) – bardzo jasne jądra oraz szerokie linie emisyjne

c) M. Schmidt, 1963, “3C 273: a star-like object with large red-shift” (wcześniej: identyfikacja optyczna po wyznaczeniu pozycji 3C 273 z zaćmienia radioźródła przez Księżyc) – wyłącznie jasne jądra i szerokie linie emisyjne.

Od początku sugerowano związek kwazarów i galaktyk Seyferta, ale powszechnie przyjęło się dopiero w latach 30'tych obejmować wszystkie obiekty wspólną nazwą:

aktywne jądra galaktyk.

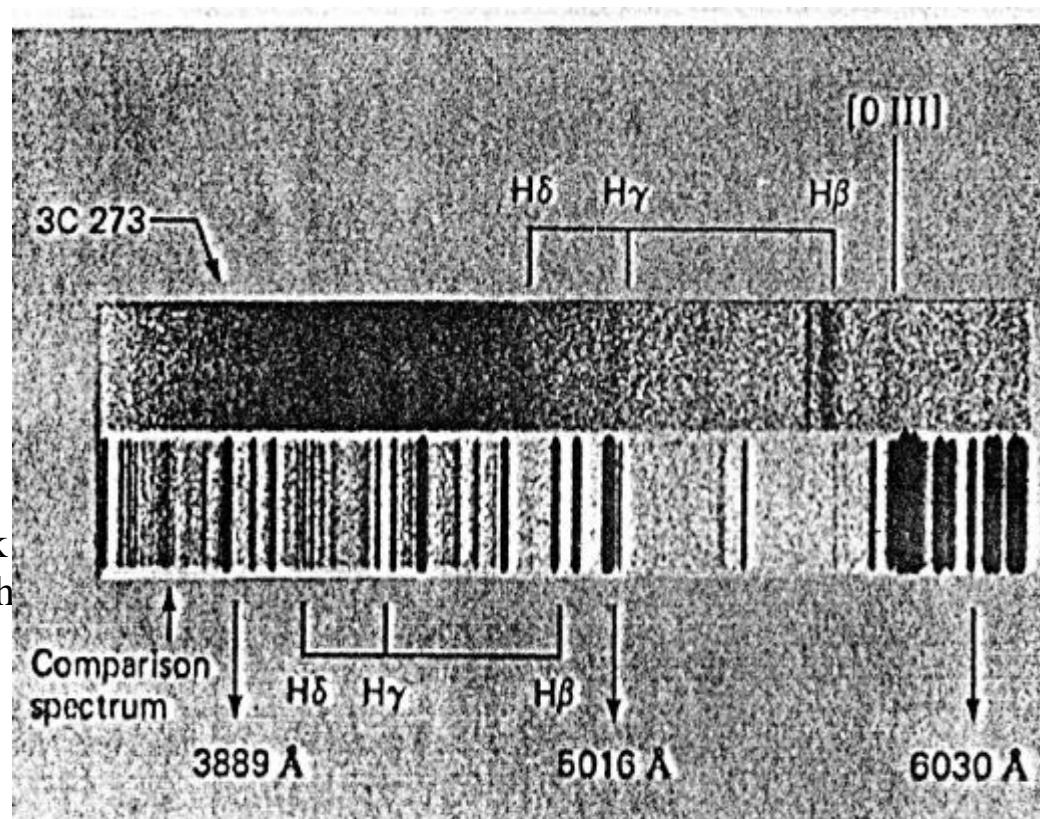
2. Dygresja o liniach emisyjnych

(a) widmo atomu wodoru

W obserwacjach linie te są bardzo silne ze względu na dużą obfitość wodoru oraz niezbyt wysokie temperatury w zewnętrznych częściach dysku akrecyjnego oraz otaczającej go materii (obłoki, wiatr?). Poziomy energetyczne atomu wodoru mogą być wyznaczone z równania Schrödingera w formie niezależnej od czasu: $H\psi = E\psi$. Zaniedbując efekty spinu i efekty relatywistyczne mamy równanie określające poziomy energetyczne:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 - \frac{e^2}{r}; \quad \psi = \frac{1}{2}R(r)Y(\theta, \phi); \quad \rightarrow \quad E_n = \frac{e^2}{2a_0 n^2} = -13.6 eV \frac{1}{n^2}$$

Widmo kwazara 3C 273 z pracy Schmidta (1963)



4. Dygresja o liniach emisyjnych c.d.

Przejścia między poziomami określa się podając energię (eV lub Rydberg) albo długość fali ($\lambda = c/v$; $E = h v$; $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$). Dla wodoru obowiązują dodatkowo tradycyjne nazwy:

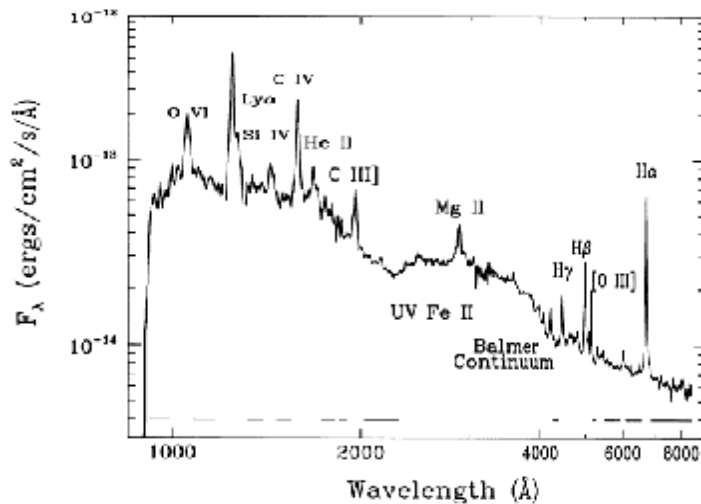
$\text{Ly}\alpha$	- 1216 \AA	Lyman	UV
$\text{H}\alpha$	- 6563 \AA	Balmer	opt
$\text{H}\beta$	- 4861 \AA	"	opt
$\text{H}\gamma$	- 4340 \AA	"	opt
$\text{Pa}\alpha$	-	Paschen	IR

Dla innych pierwiastków określanie poziomów energetycznych jest bardzo skomplikowane i konieczny rachunek zaburzeń. Dobrze policzony hel, ale atom żelaza policzony w miarę porządku dopiero niedawno.

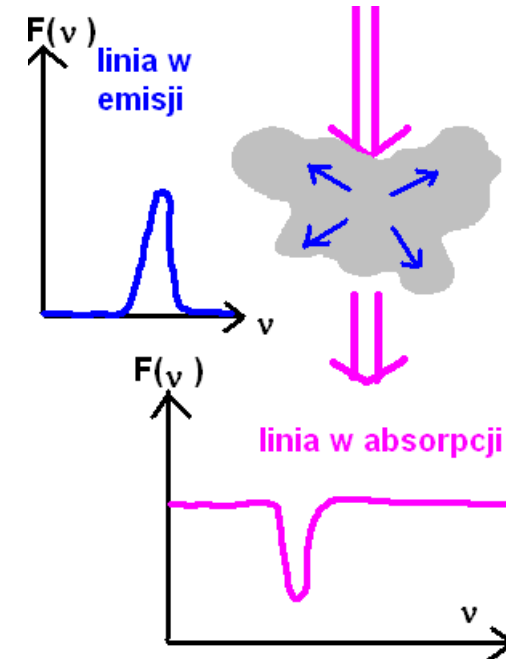
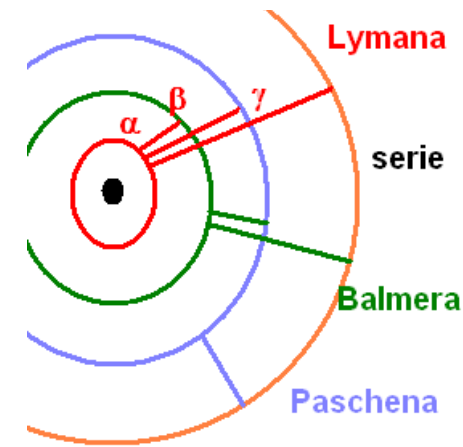
b) Formowanie się linii emisyjnych

Fotony z przechodzącego kontinuum są wydajnie absorbowane:

zaabsorbowany foton \rightarrow wyemitowany foton
 \rightarrow deekscytacja zderzeniowa



Nawet w tym pierwszym przypadku mogą się skutkiem absorpcji wytwarzać linie emisyjne i absorpcyjne, w zależności od linii widzenia, co ilustruje rysunek z prawej. Z lewej widmo Mrk 335, Zheng et al. 1995



2. Dygresja o liniach emisyjnych c.d.

W atmosferze typowej gwiazdy widzimy przede wszystkim linie absorpcyjne, natomiast przy odwróceniu profilu temperatury (np. w chromosferze Słońca) pojawiają się dodatkowo *slabe* linie emisyjne chromosferyczne. Natomiast właśnie w gazie (także na powierzchni gwiazdy) oświetlanym promieniowaniem rentgenowskim od zewnątrz pojawiają się silne linie emisyjne, przede wszystkim fluorescencyjne, pierwiastków ciężkich, a także linie emisyjne wodoru, jeśli powierzchnia nie jest zbyt gorąca.

c) szerokości linii emisyjnych

- szerokość naturalna – efekt kwantowy $\Delta E \times \Delta t > h$
- poszerzenie zderzeniowe $\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = \sqrt{\frac{kT}{mc^2}}$
- poszerzenie termiczne
- poszerzenie kinematyczne \rightarrow poszerzenie turbulენტne (parametr b)
- \rightarrow ruchy globalne

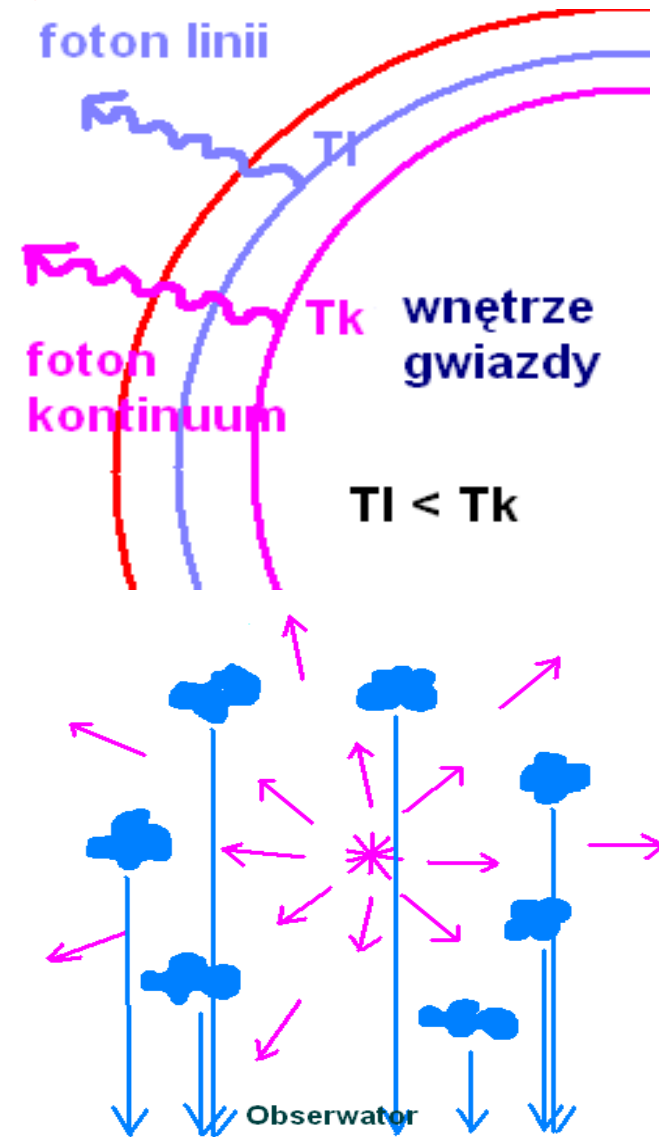
d) występowanie linii a warunki termodynamiczne

- gęstość (deekscytacja zderzeniowa)
- temperatura (całkowita bądź częściowa jonizacja)

e) natężenie linii a geometria

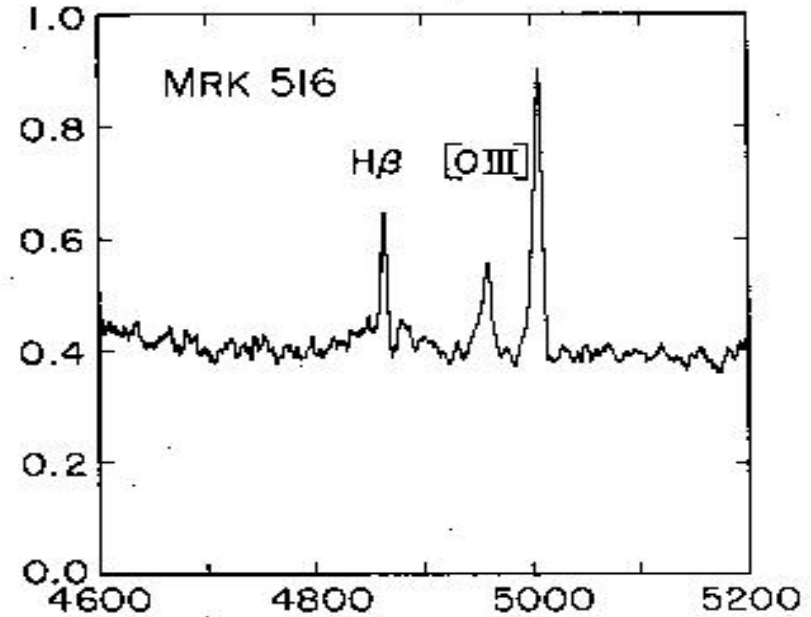
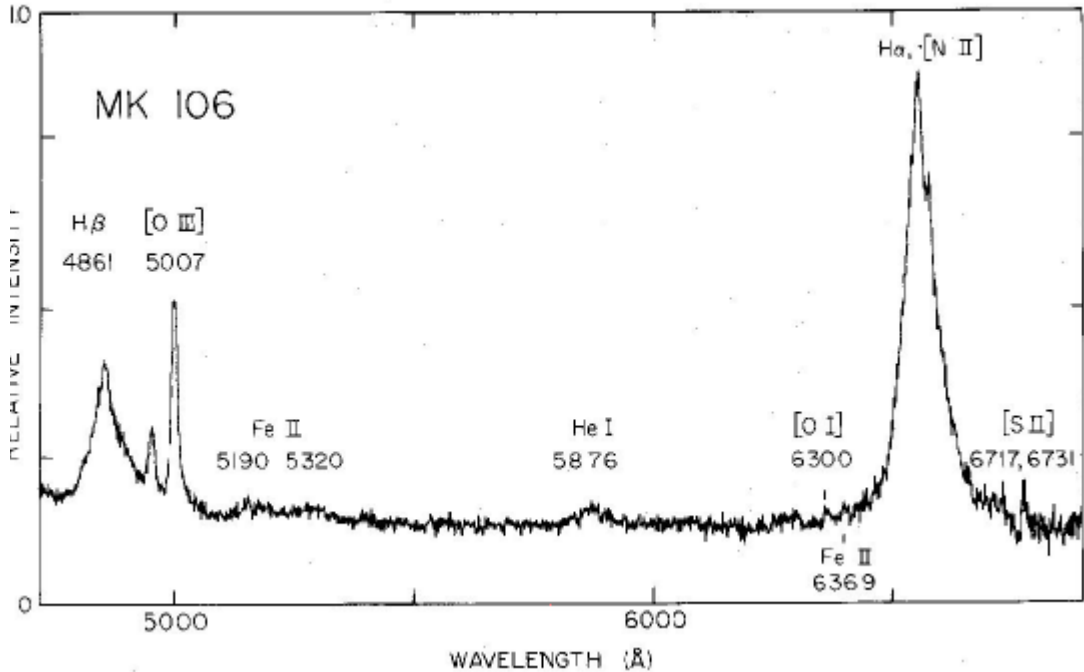
Jeśli przykładowo źródło emisji jest otoczone optycznie grubymi obłokami, będącymi źródłem emisji linii H β w wyniku reprocesowania, to pomiar jasności w linii H β określa nam stopień pokrycia nieba f przez obłoki.

$$L_{H\beta} = A(f_{\text{fizyka}}) L_{\text{tot}} f; \quad A(f_{\text{fizyka}}) - \text{prawdopodobieństwo zamiany fotonu kontinuum na } H\beta$$



5. Linie emisyjne w aktywnych jądrach galaktyk

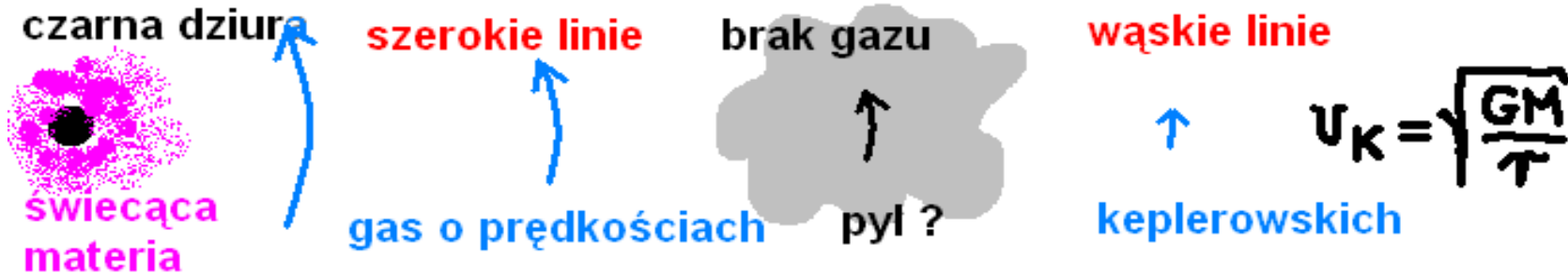
- a) szerokie linie emisyjne $v \sim 10\,000\text{ km/s}$
- b) wąskie linie emisyjne $v \sim 1\,000\text{ km/s}$



Seyfert 1 – galaktyka z szerokimi i wąskimi liniami emisyjnymi

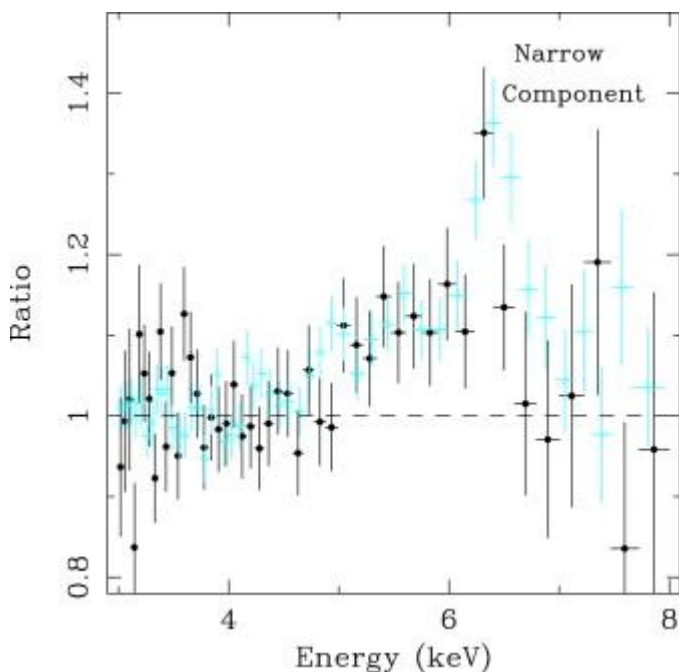
Seyfert 2 – galaktyka tylko z wąskimi liniami

Wyraźnie rozdzielone obszary o innej kinematyce. Prawdopodobne wyjaśnienie: obecność pyłu

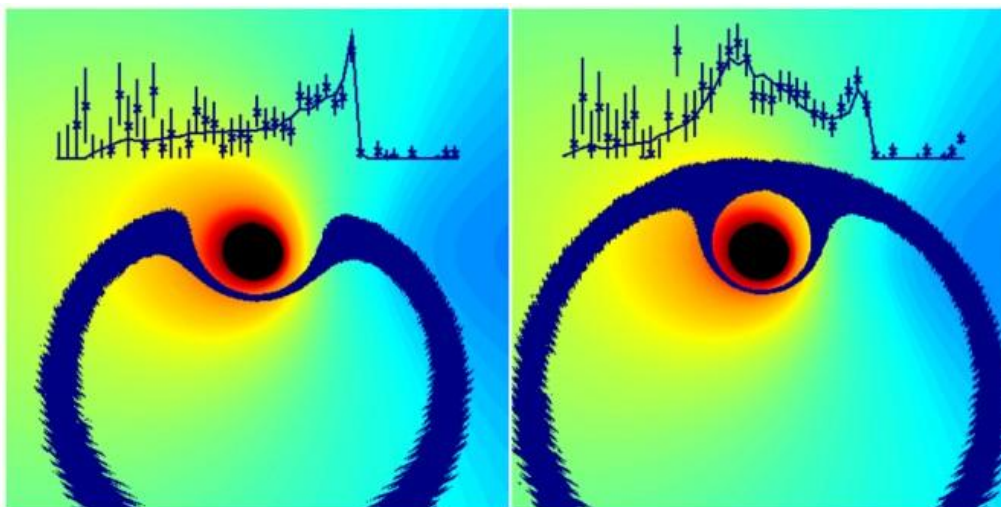


5. Linie emisyjne w aktywnych jądrach galaktyk – linie rentgenowskie

Oprócz linii w zakresie optycznym i nadfioletowym bada się też obecnie, o czym mówiliśmy, linie w zakresie rentgenowskim. Obserwuje się (zwykle wąskie i słabe) linie absorpcyjne, powstające w częściowo zjonizowanej materii (**warm absorber**) w odległościach (chyba) ułamka ps od centrum, oraz (wąskie i słabe) linie emisyjne z tego ośrodka i szerokie linie emisyjne z dysku akrecyjnego.



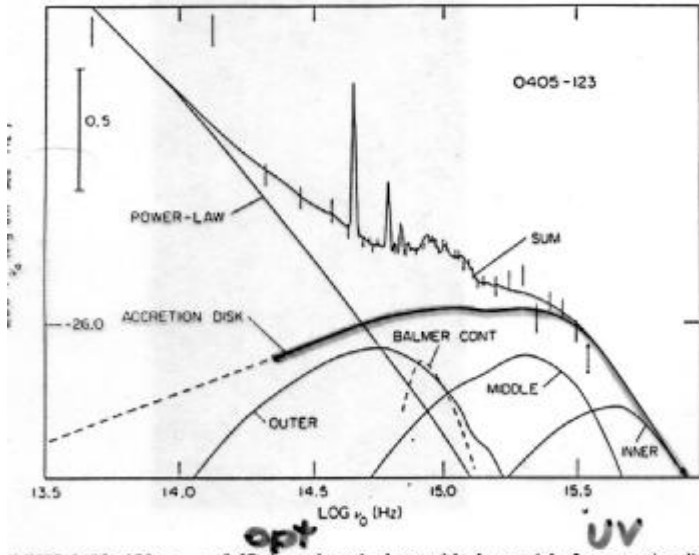
Badania linii żelaza $K\alpha$ metodą rewerberacji będzie doskonałą metodą badania geometrii przepływu tuż przy czarnej dziurze. Sądzi się, że umożliwi planowany instrument – Constellation X. Badanie AGN będzie bardziej korzystne niż badanie GBH, ponieważ liczba zliczeń na jedną skalę dynamiczną jest typowo o cztery rzędy wielkości większa (ze względu na długie skale!) niż dla obiektów galaktycznych.



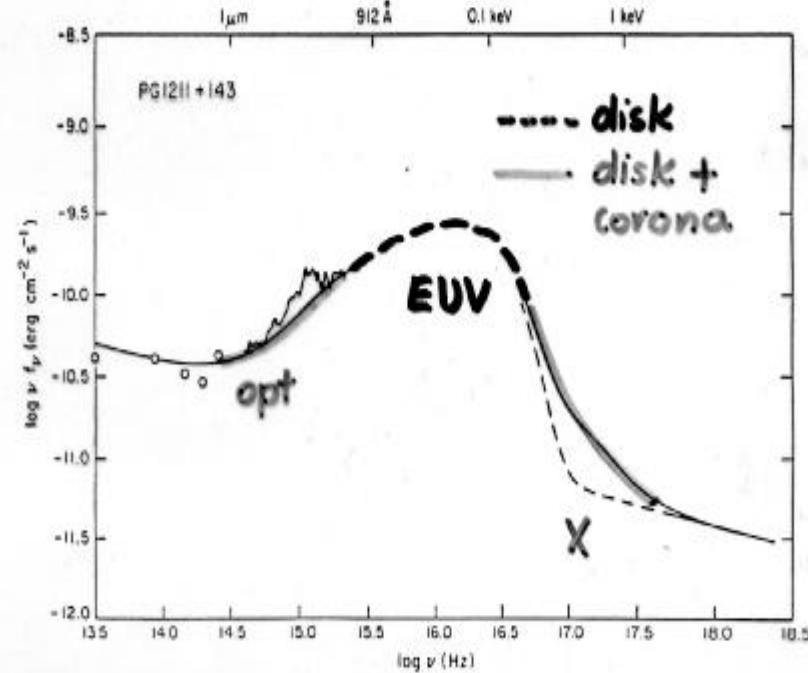
Lee et al. 2002, the $K\alpha$ profile in MCG -6-15-30)

4. Szerokopasmowe widma aktywnych galaktyk z szerokimi liniami emisyjnymi

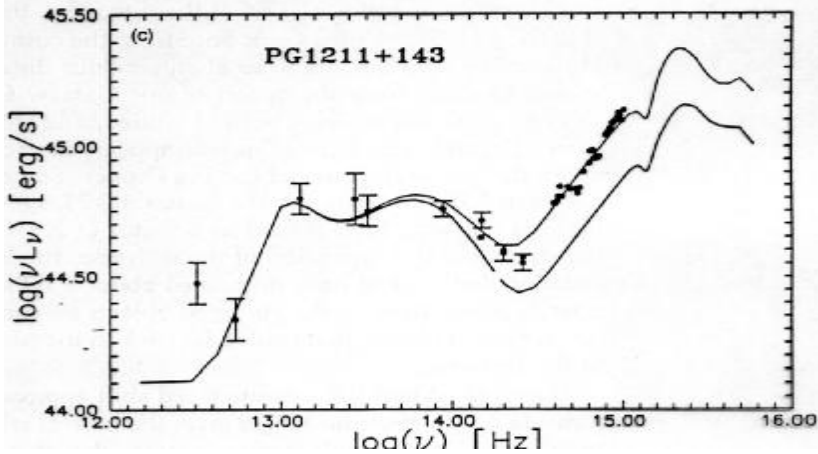
Początkowo opisywano widmo w zakresie optycznym jako widmo potęgowe. Dodanie obserwacji w podczerwieni i UV wskazało na 'nadwyżkę' w UV, którą wyjaśniono (Shields 1978) istnieniem dysku akrecyjnego.



Widmo kwazara z pracy Malkan (1983) z wkładem od dysku akrecyjnego

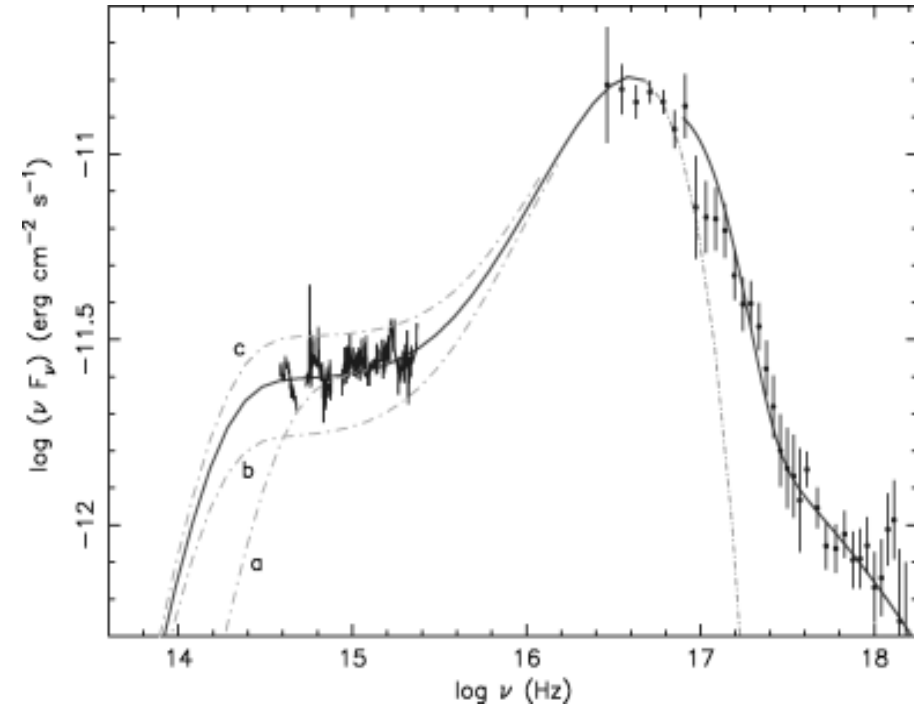
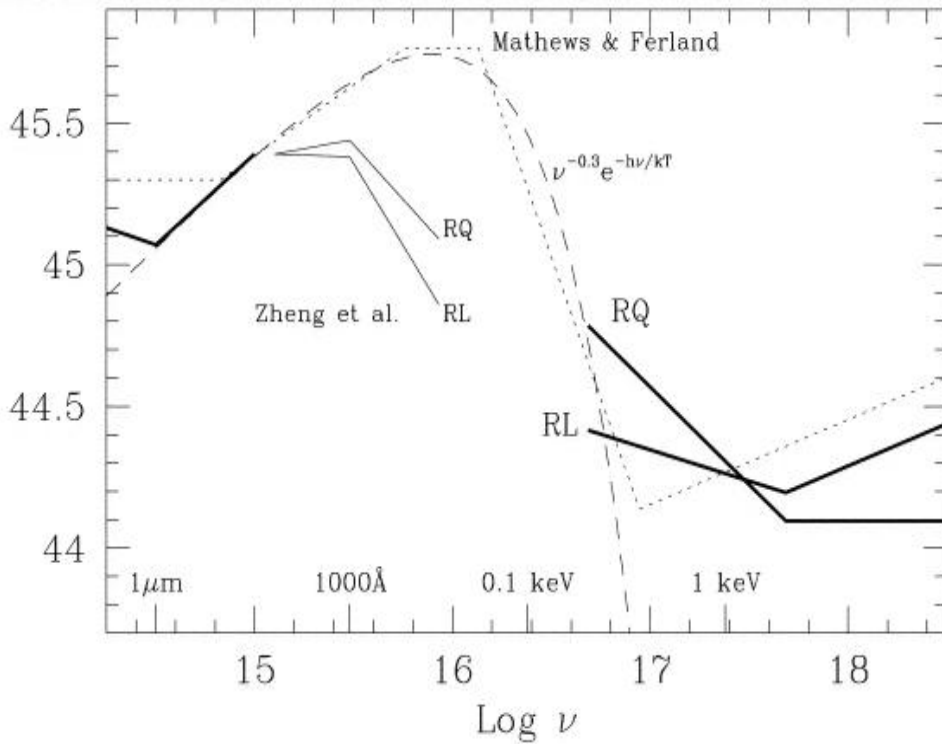


Prawdziwie szerokopasmowe widmo kwazara/NLS1 PG1211+143 (Czerny i Elvis 1987), model uwzględnia koronę wokół dysku akrecyjnego. Obok ten sam obiekt z lepszymi danymi w podczerwieni, modelowanymi jako optycznie cienki torus pyłowy (Loska i in. 1993).



4. Szerokopasmowe widnia aktywnej galaktyk z szerokimi liniami emisyjnymi c.d.

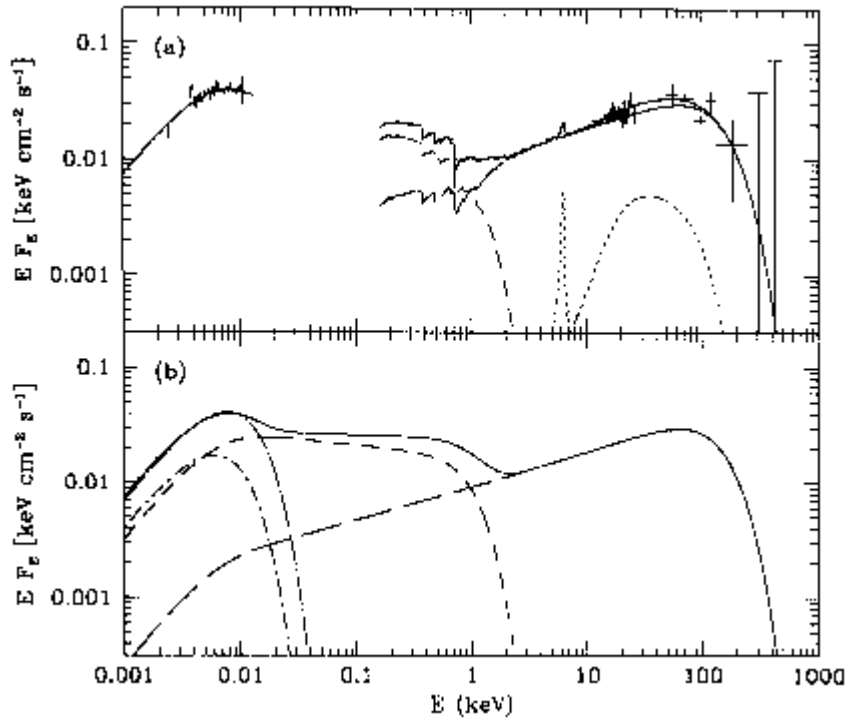
Pewien problem stanowi brak obserwacji pomiędzy dalekim UV a miękkim X. Nie było oczywiste, że miękka nadwyżka widziana w X jest kontynuacją składnika dyskowego, dominującego w opt/UV. Nie zawsze zresztą tak musi być – gdy nadwyżka jest bardzo słaba, może wynikać z odbicia od zjonizowanej materii. Gdy jednak jest silna, trudno się doszukiwać czegoś innego niż dysk, ewentualnie z silnym efektem komptonizacji. Argumenty:



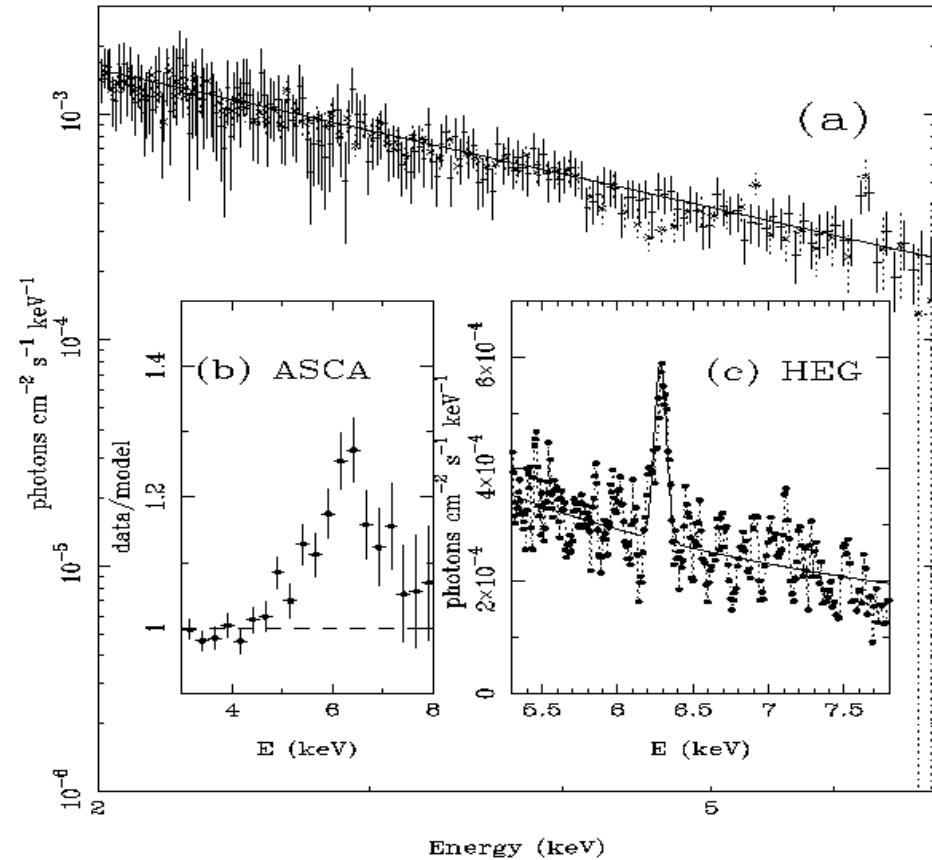
ompozyt dla radiowo głośnych (RL) i radiowo cichych (RQ) Wiazarów, Laor i in. 1997 Widmo galaktyki Seyferta (NLS1) RE J1034+396

4. SZEROKOPASMIOWE WIDMIA AKTYWNYCH GALAKTYK Z SZEROKIMI LINIAMI EMISYJNYMI c.d.

NGC 5548 natura miękkiej nadwyżki jest mniej jasna. Linia żelaza także jest wąska. Udział emisji rentgenowskiej w nośności bolometrycznej jest znacznie większy niż w kwazarach, co wskazuje na podobieństwo tego obiektu (i ogólnie, aktyk Seyferta) do układów galaktycznych w stanie niskim/twardym.



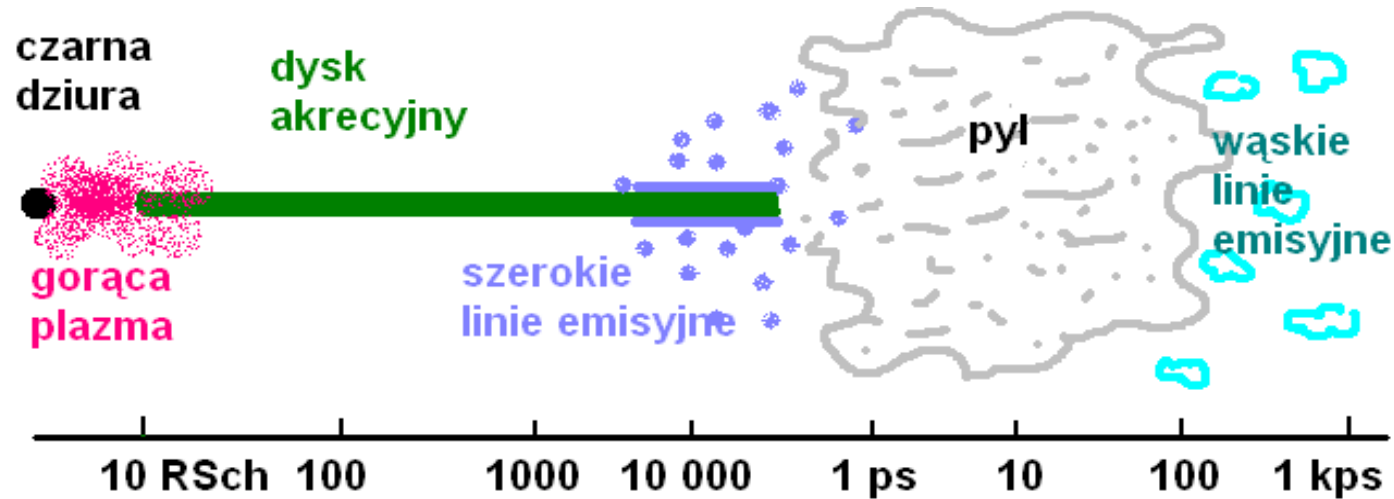
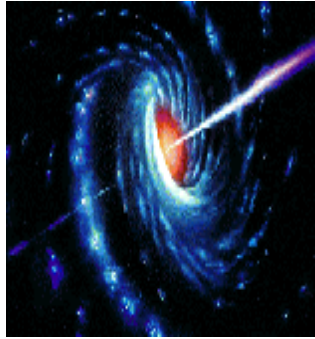
GN NGC 5548 from Magdziarz et al. 1998



NGC 5548, okolica linii żelaza, porównanie obserwacji z Chandry i z Asca, Yaqoob i in. 2001.

4. Szerokopasmowe widma aktywnych galaktyk z szerokimi liniami emisyjnymi c.d.

Schematyczny widok AGN

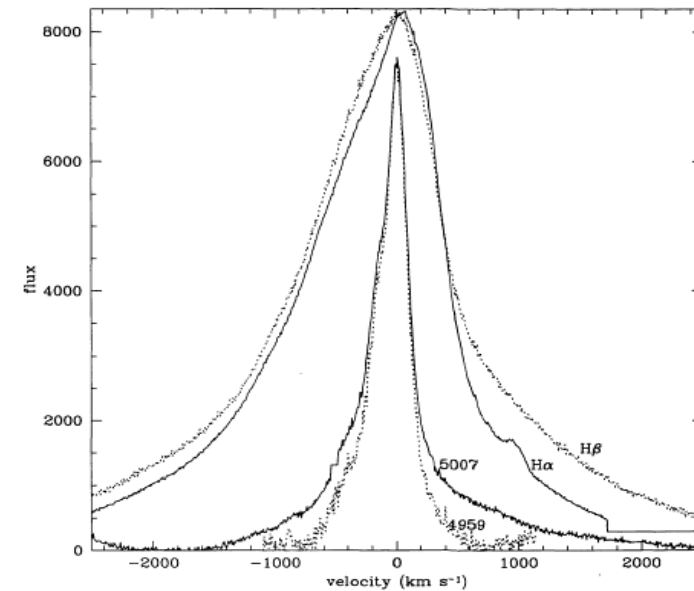


W odtwarzaniu widm szerokopasmowych napotykamy szereg problemów, idąc od obserwatora ku centrum:

- ekstynkcja w naszej Galaktyce
- ekstynkcja w galaktyce macierzystej
- materia woół jądra (torus pyłowy, warm absorber)
- Światło gwiazd

To ostatnie powoduje, że znamy bardzo słabo widma dla galaktyk o niskim poziomie aktywności (np. LINERS).

Doskonale obserwacje galaktyki Seyferta Mrk 335 teleskopem Keck II pokazują, że tak gładki profil linii można otrzymać tylko przy założeniu, że liczba obłoków w obszarze szerokich linii emisyjnych jest większa niż 3×10^6



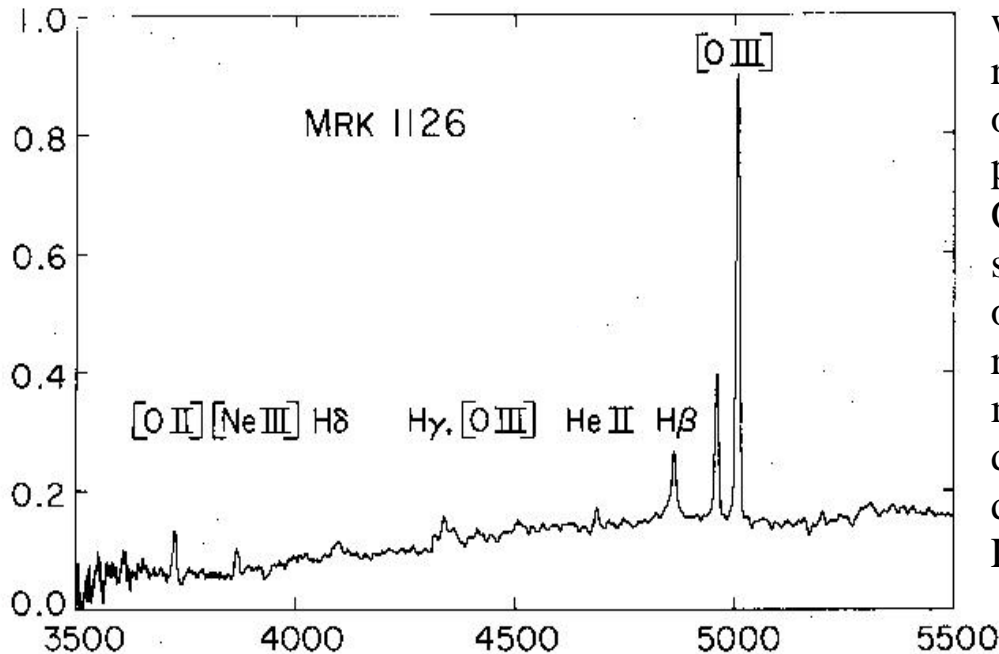
Klasyfikacje oraz Narrow Line Seyfert 1

Radiowo głośne/radiowo ciche: $\log (F(5 \text{ GHz})/F(B)) > 1$

QSO/Seyfert : jasność absolutna w barwie B w magnitudach MB < -23

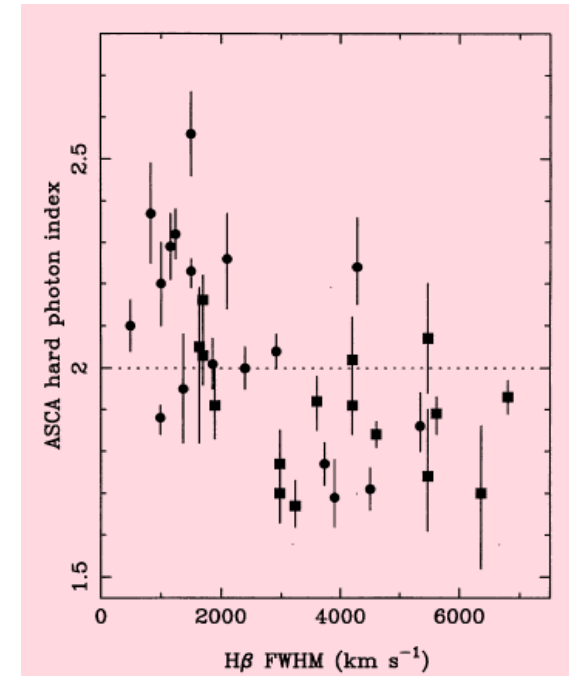
Sy 1, Sy 1.2, Sy 1.5, Sy 1.8, Sy 1.9, Sy 2: L(szeroka H β)/L([OIII]5007) powyżej 5, 5-2, 2 – 1/3, poniżej 1/3 ale ze śladami w H α , nic także w H α

NLS1 wyróżniają się także kształtem szerokopasmowego widma, które przypomina bardziej kwazary niż galaktyki Seyferta, nawet dla obiektów o stosunkowo małej jasności bolometrycznej. Ilustruje to zależność



Przykład widma NLS1

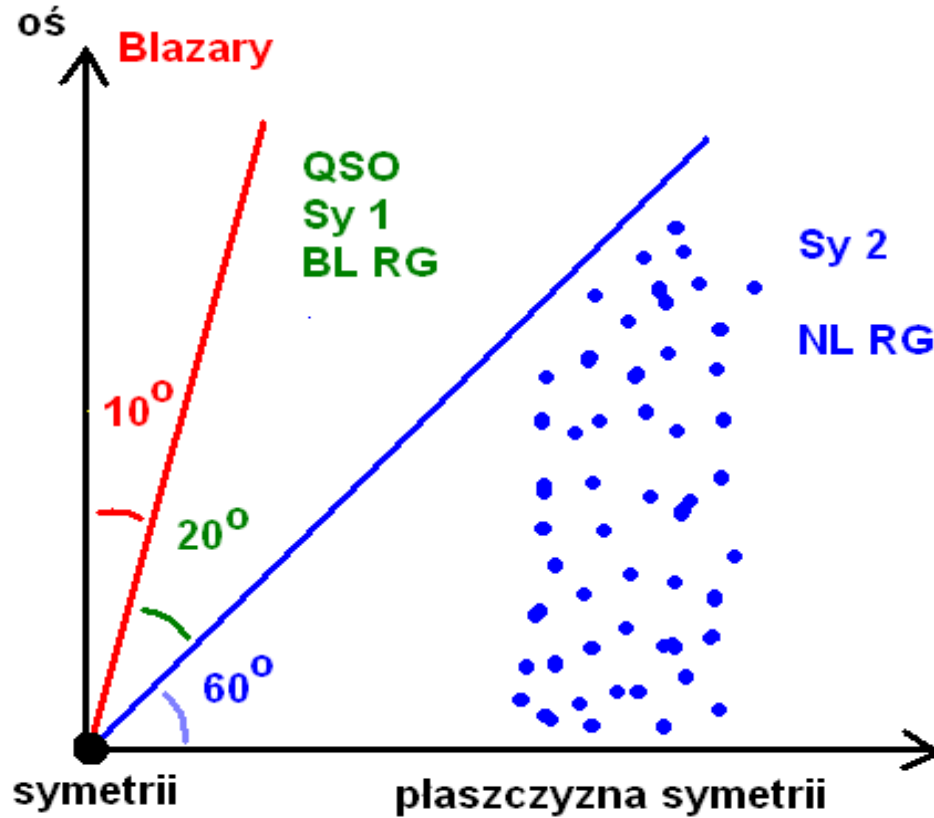
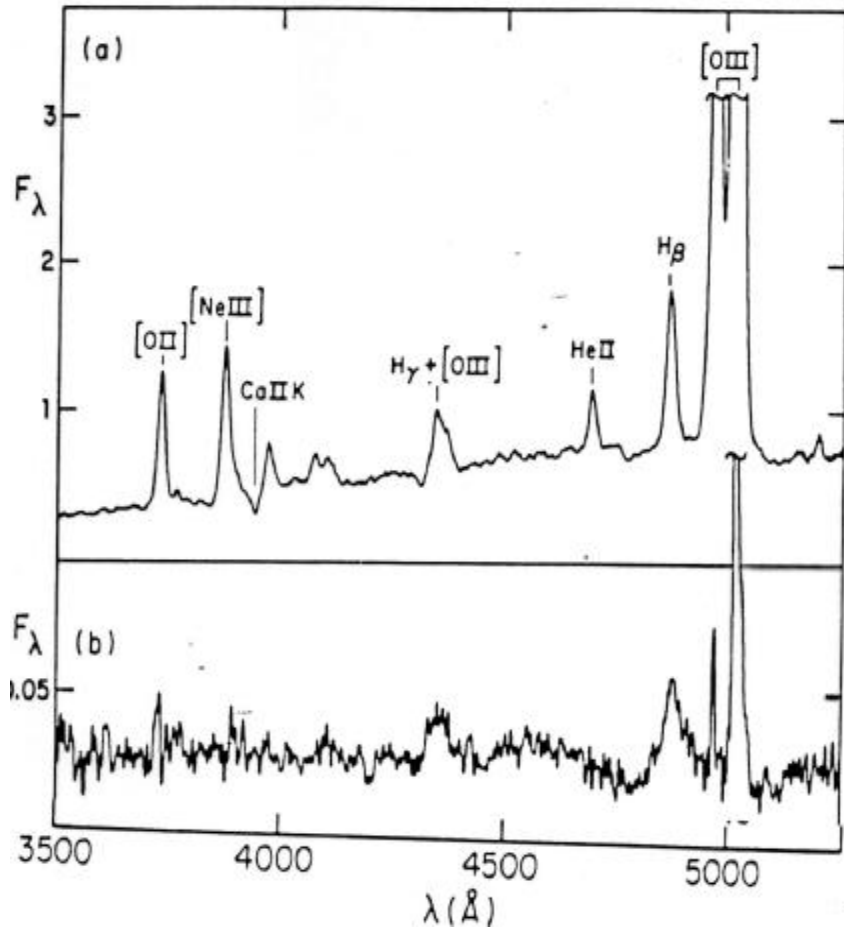
nachylenia widma w zakresie rentgenowskim od szerokości połówkowej H β . Ogólnie uważa się, że są to obiekty o relatywnie małej masie czarnej dziury, a za to dużym stosunku L/LEdd.



Zależność nachylenia widma w miękkich X od szerokości linii H β , Brandt i in. (1997)

7. SZEROKOPASMIOWE WIDMA AKTYWNYCH GALAKTYK I CZY szerokich linii emisyjnych

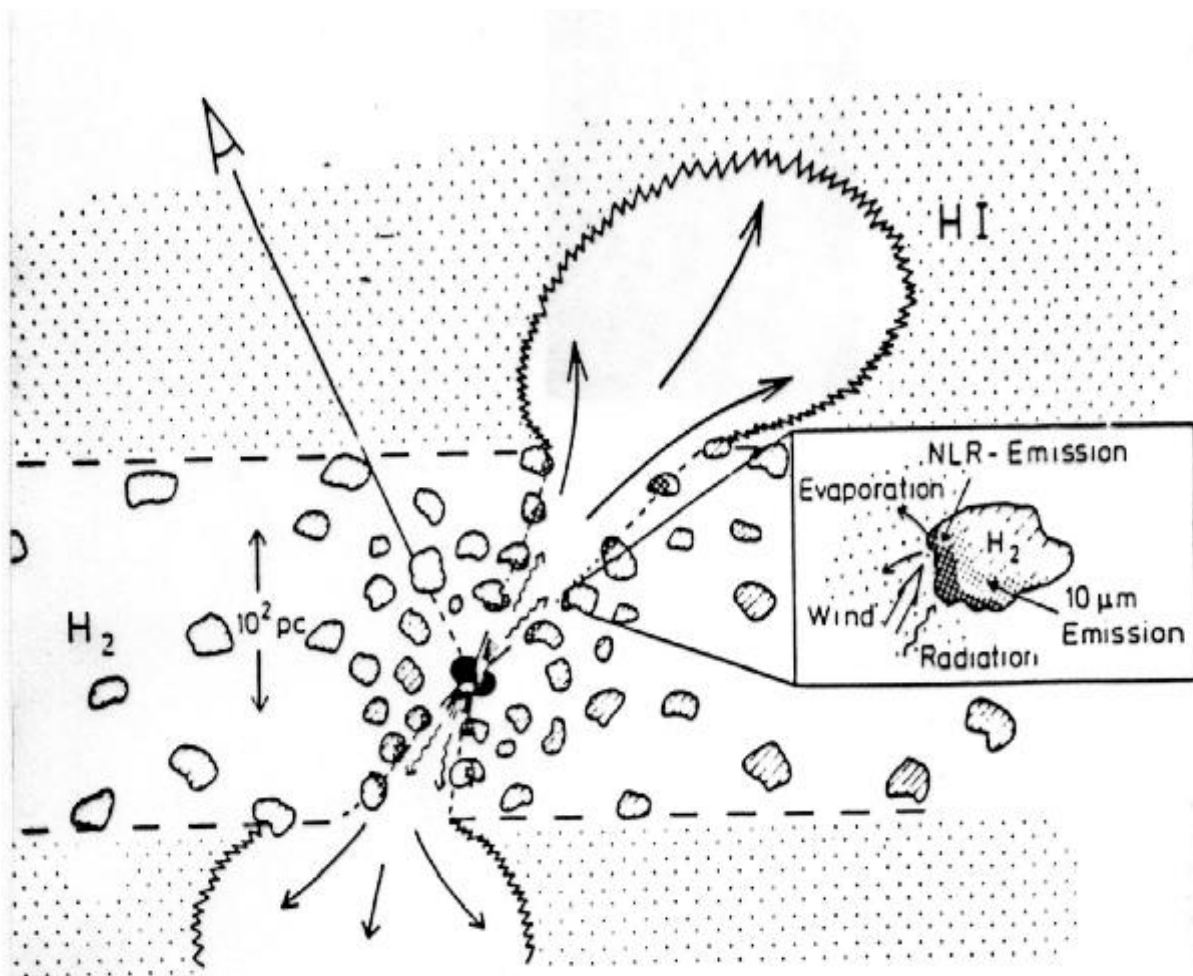
W części obiektów (np. galaktyki Seyferta typu 2, radiogalaktyki z wąskimi liniami emisyjnymi) linii szerokich nie widać, za to wąskie wyglądają podobnie jak w obiektach posiadających oba rodzaje linii. Problem był zagadkowy aż do 1985 r., kiedy to Antonucci i Miller wykonali obserwacje NGC 1068 w świetle spolaryzowanym.



Pytania: co przesłania?
co rozprasza?

5. Torus molekularno-pyłowy

stnienie pyłu jest oczywiste z punktu widzenia fizyki/chemii (pył powstaje i może istnieć w temperaturze poniżej 000 – 1500 K, w zależności od składu chemicznego. Drobin pyłu to węgiel amorficzny lub grafit (pył węglowy), lbo związki krzemu (silikaty), mogą być też pylinki bardziej złożone.



Wizja pyłu w NGC 1068 z pracy Cameron i in. (1993)

Kształt geometryczny materii przesłaniającej centrum w galaktykach typu 2 był (i częściowo nadal jest) dyskutowany i rozważano szereg możliwości:

- geometrycznie gruby torus pyłowy (Krolik & Begelman)
- wąsy (warps, Phinney 1989)
- kłaczkowaty torus (1987, Barvainis)
- Wiatr dyskowy, w którym tworzy się pył (Pier i Krolik 1993).

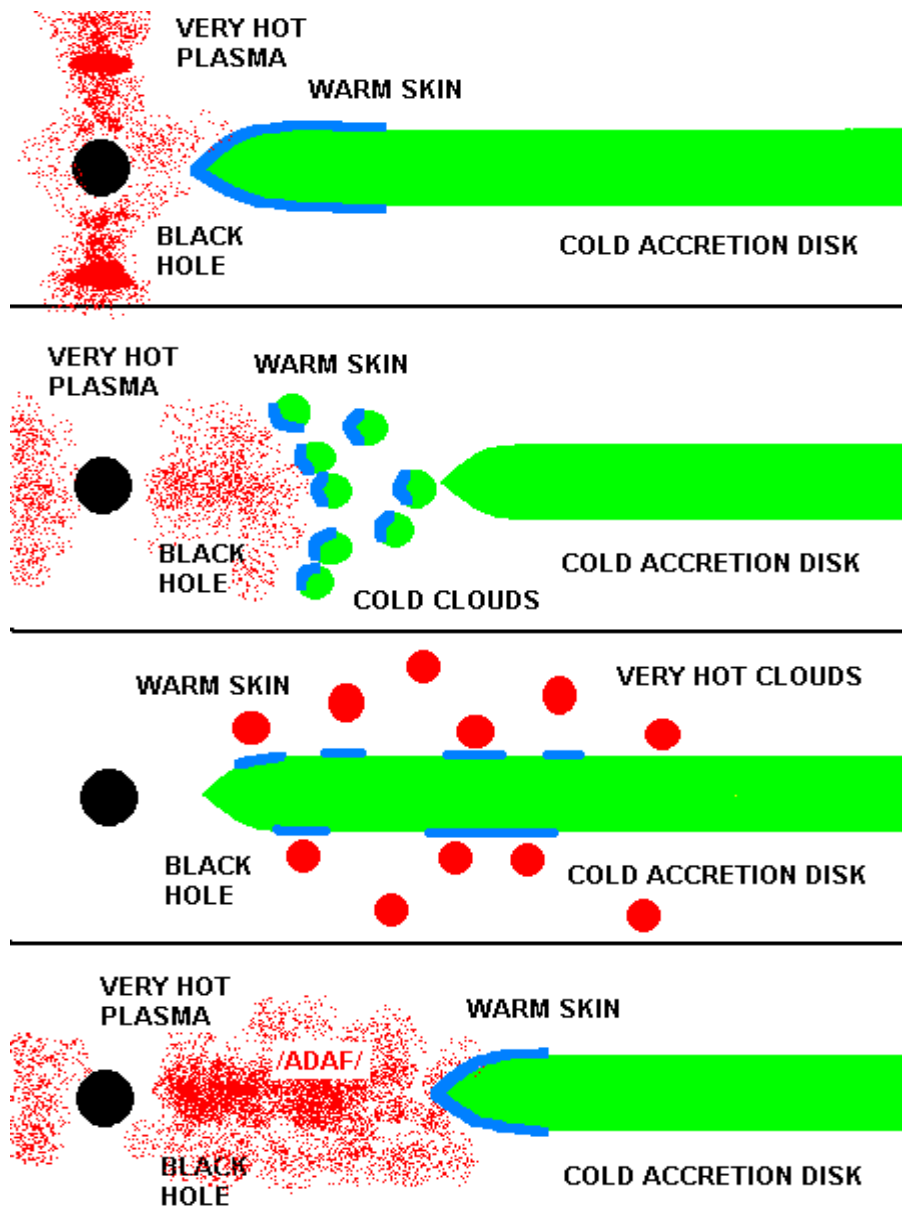
Problem do tej pory nie jest jasny, tak jak i związek pyłu z obszarem szerokich i wąskich linii emisyjnych. Pył występuje tak w obiektach jasnych (bump na 3 μm w kwazarach), jak i w słabych, ale tam **zakres kątowy** torusa jest chyba większy.

6. Stany jasnościowe w aktywnych jądrach galaktyk

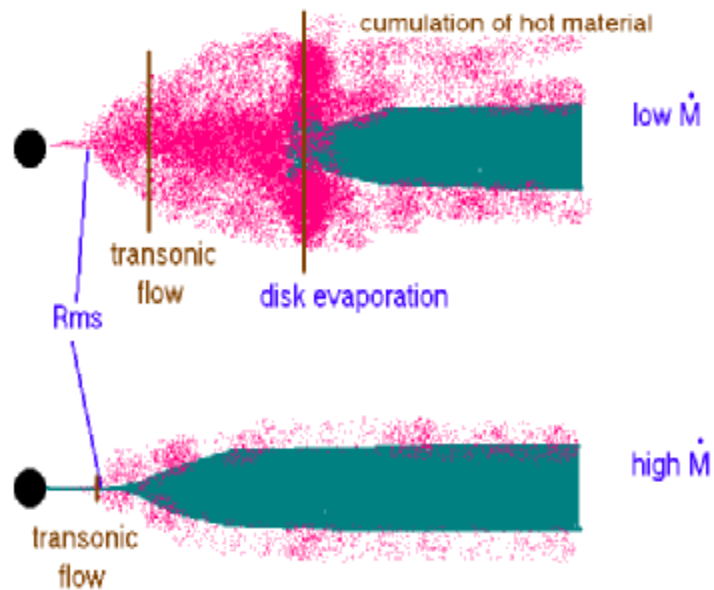
Klasyfikacja obiektów widzianych z góry (niezaabsorbowanych, o szerokich liniach emisyjnych) powinna być podobna do klasyfikacji obiektów galaktycznych, ale sprawę komplikuje znaczny zakres mas czarnych dziur.

	Very Bright	QSO	NLSy1	Sy1	Faint AGN
L/L_{edd}	1	0.3	0.1	0.03	1e-6
M	1e10	1e9	1e6-1e8	1e6-1e8	>1.e6?
Disk	yes	yes	yes	yes	No?
T_{in} [keV]	0.004	0.004	0.01	0.004	
R_{in} [R_{Schw}]	3	3	3	10 - 20	
Disk Compt.	?	strong	strong	yes	
ξ		moderate-high	500	<100	
Ω/4π	?		0.8	0.6	
Γ	2	1.9	2.0-2.7	1.9	
PL/Disk	0.02	0.1	0.1	0.4	
f₀ [Hz]	?	?	1e-6 - 1e-8	1e-6 - 1e-8	

7. Geometria procesu akrecji dla AGN



Tu można skorzystać z tego samego rysunku, jaki mieliśmy dla obiektów galaktycznych. Poza różnicą w temperaturze dysku akrecyjnego oraz nieco większą zmiennością tych obiektów w optyce/UV niż to się widzi w źródłach galaktycznych w rentgenach, w stanie miękkim, nie widać systematycznych różnic. Dokładniejsze oceny geometrii próbuje się robić też w oparciu o analizę linii żelaza, i chyba ten sam model jest znów najbardziej obiecujący.



8. Wyznaczanie masy supermasywnej czarnej dziury

szereg metod wyznaczania masy czarnych dziur w galaktykach (aktywnych bądź nieaktywnych):

analiza dynamiki pojedynczych gwiazd blisko czarnej dziury (centrum naszej Galaktyki)

rozkład jasności powierzchniowej gwiazd
pomiar dyspersji prędkości gwiazd
blisko czarnej dziury, gdzie dominuje jej pole grawitacyjne (dobre dla bliskich, nieaktywnych galaktyk, ewentualnie kwazarów)

pomiar szerokości linii H β i ocena rozmiaru obszaru szerokiej linii emisyjnych z emisji optycznej bądź bolometrycznej (dla AGN, zależy od parametryzacji)

pomiar szerokości linii H β i rozmiaru obszaru szerokiej linii emisyjnych metodą rewerberacji (dobre dla AGN z szerokimi liniami)

pomiar przesunięcia dopplerowskiego linii masera wodnego na 22 GHz

modelowanie szerokopasmowego widma obiektu (dla AGN, zależne od modelu)

porównywanie widma mocy w zakresie rentgenowskim z widmem mocy Cyg X-1 lub galaktyki wzorcowej (dla AGN)

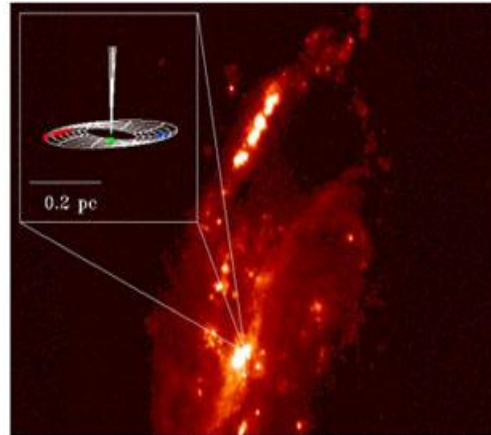
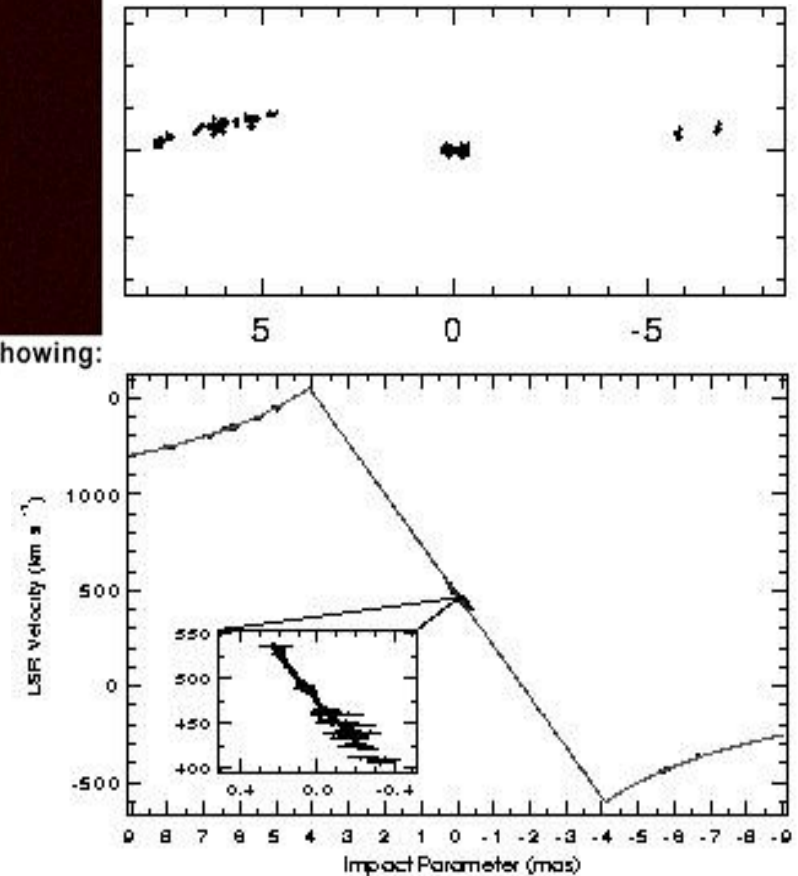


Image of a water maser disk showing:

- Red shifted region
- Constant speed region
- Blue shifted region



Obserwacja masera wodnego w galaktyce NGC 4258 (LINER, Sy 1.9). Wykres górny pokazuje rozkład przestrzenny emisji, a dolny prędkość gazu (Greenhill i in. 1997)

8. Wyznaczanie masy supermasywnej czarnej dziury c.d.

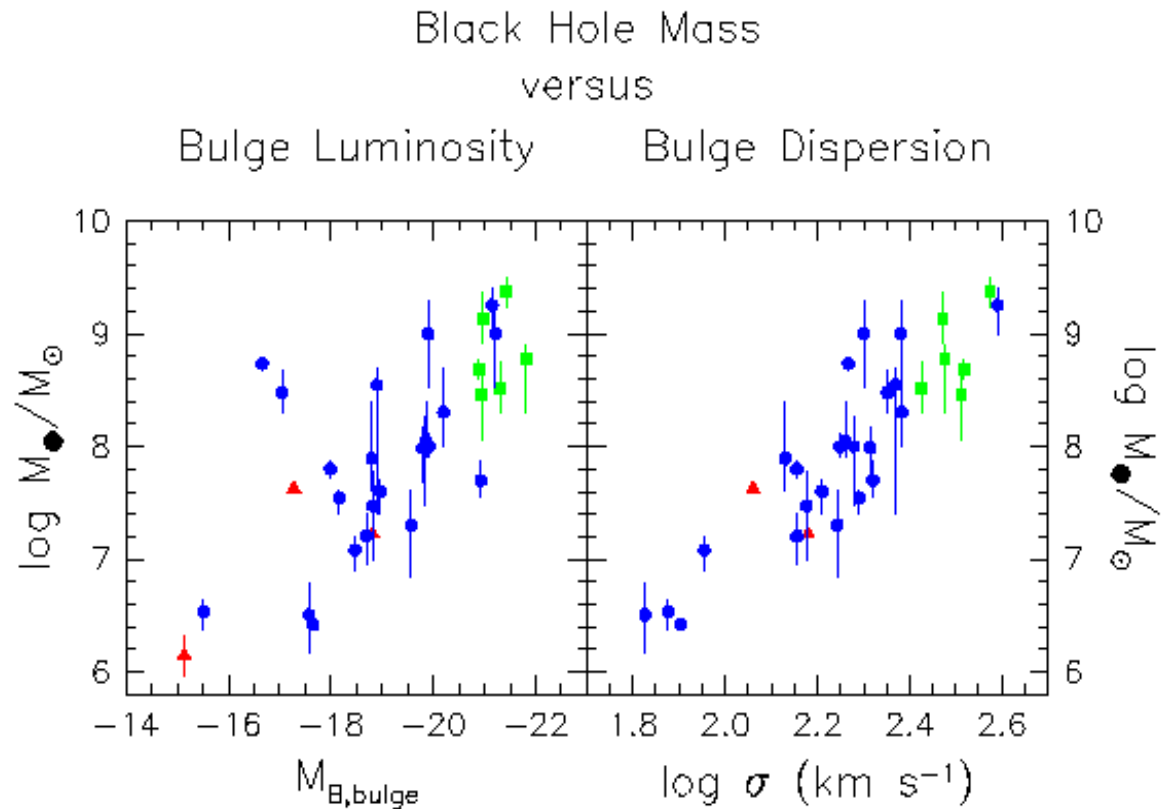
astosowane wcześniej metody doprowadziły do wprowadzenia obecnie jeszcze jednej, różnorodnej, opartej na wykrytym związku masy czarnej dziury z własnościami galaktyki macierzystej. Okazało się, że zarówno dla galaktyk nieaktywnych, jak i aktywnych, mamy dobry statystyczny związek masy centralnej czarnej dziury z jasnością centralnego skupienia w mag. dyspersją prędkości gwiazd centralnego grubienia masą centralnego zgrubienia.

ę ostatnią relację można zapisać jako

$$M_{BH} = 0.0012 M_{bulge}$$

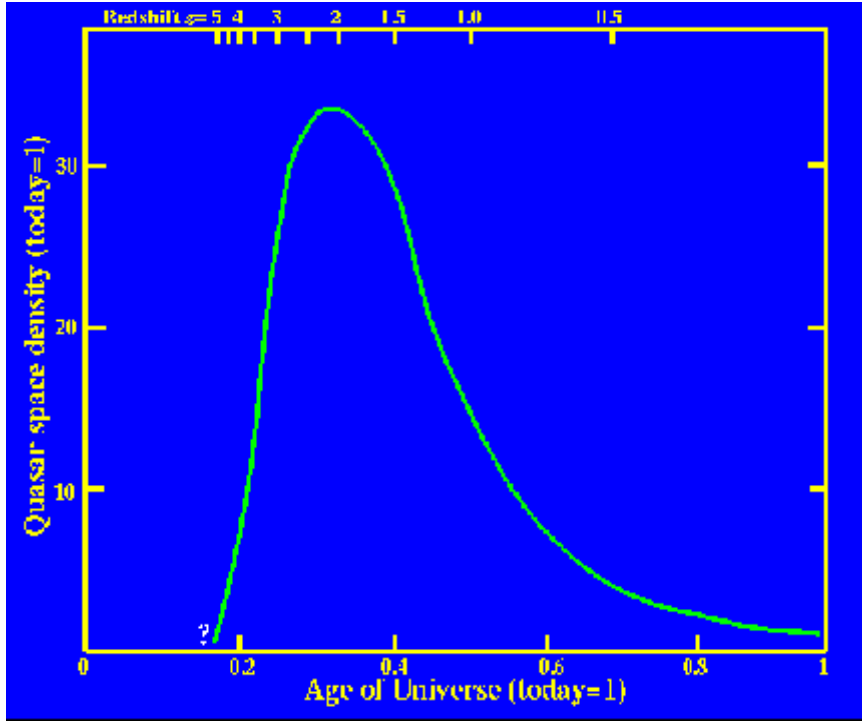
McLure & Dunlop (2001). Relacja ta zapewne odzwierciedla jakiś głęboki związek ewolucyjny pomiędzy galaktyką macierzystą a centralną czarną dziurą, ale natury tego związku jeszcze nie znamy.

Relacja z najmniejszą dyspersją to $\log M - \log \sigma$. Odwracając tę relację, można próbować oceniać masę czarnej dziury z własności galaktyki.



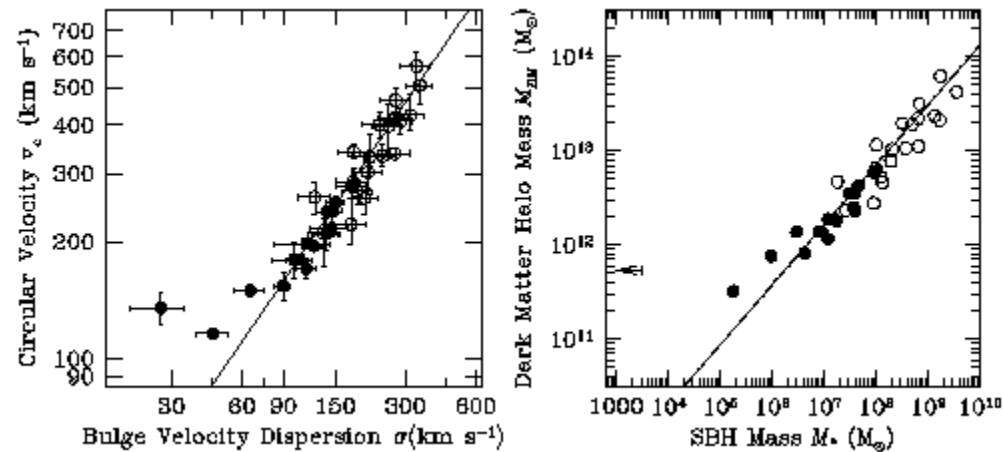
Związek masy czarnej dziury z jasnością centralnego zgrubienia galaktyki macierzystej oraz z dyspersją prędkości gwiazd centralnego zgrubienia (Camenzind i in.)

9. Ewolucja kosmologiczna



Jeśli chodzi o ewolucję aktywności galaktyk w skali kosmologicznej, to jak mówiliśmy, maksimum aktywności kwazarów przypada na redshift ok. 2, z tym że nie wiadomo, czy epoka ta poprzedzała okres intensywnej ewolucji galaktyk i silnej aktywności gwiazdotwórczej, czy też po niej następowała.

Obecnie wiadomo, że ewolucja galaktyki musi być silnie powiązana z tym, jak ewoluje galaktyczne halo ciemnej materii, ponieważ grawitacyjnie ciemna materia dominuje prawie dziesięciokrotnie nad materią barionową. Skoro tak, to narzucało się zbadanie, czy masa czarnej dziury koreluje się bezpośrednio z masą ciemnego halo. Wyniki poniżej wskazują, że tak chyba jest. Może to oznaczać, że czarna dziura nie jest śmietnikiem po fazie formowania gwiazd, ale dokładne implikacje poniższego wykresu należy dopiero zbadać.



Związek masy czarnej dziury z masą ciemnej materii tworzącej halo galaktyki macierzystej, Ferrarese 2002