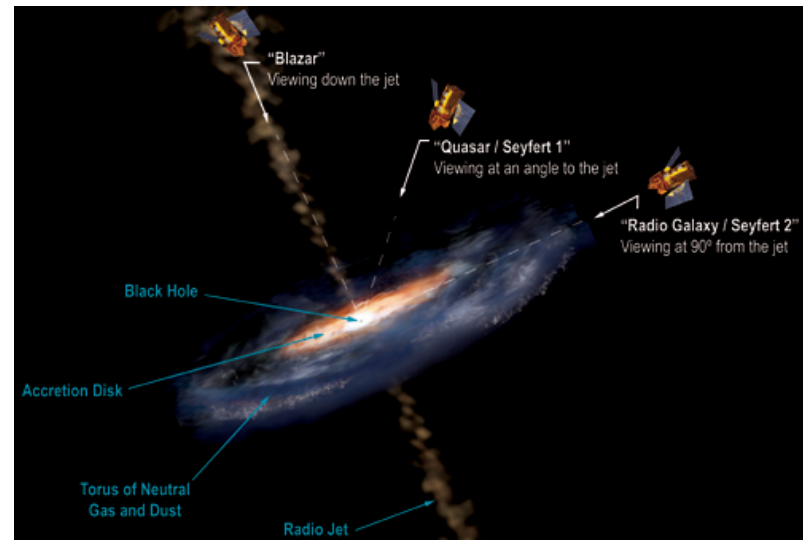
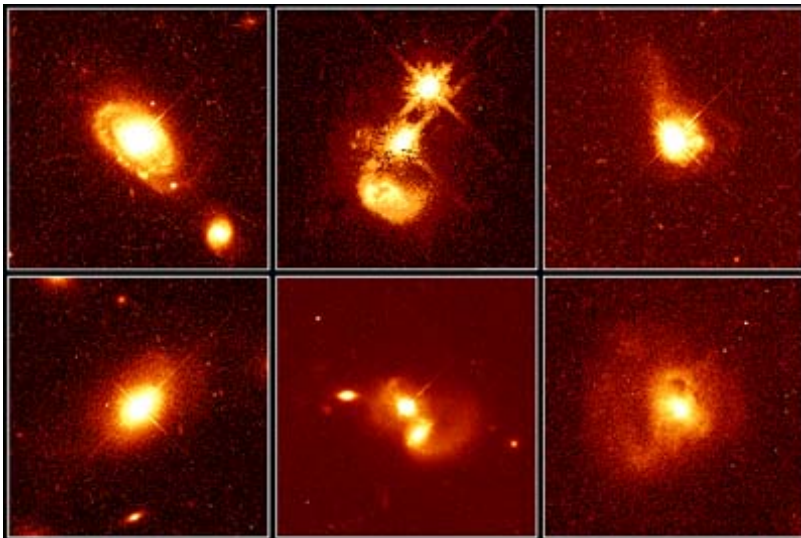
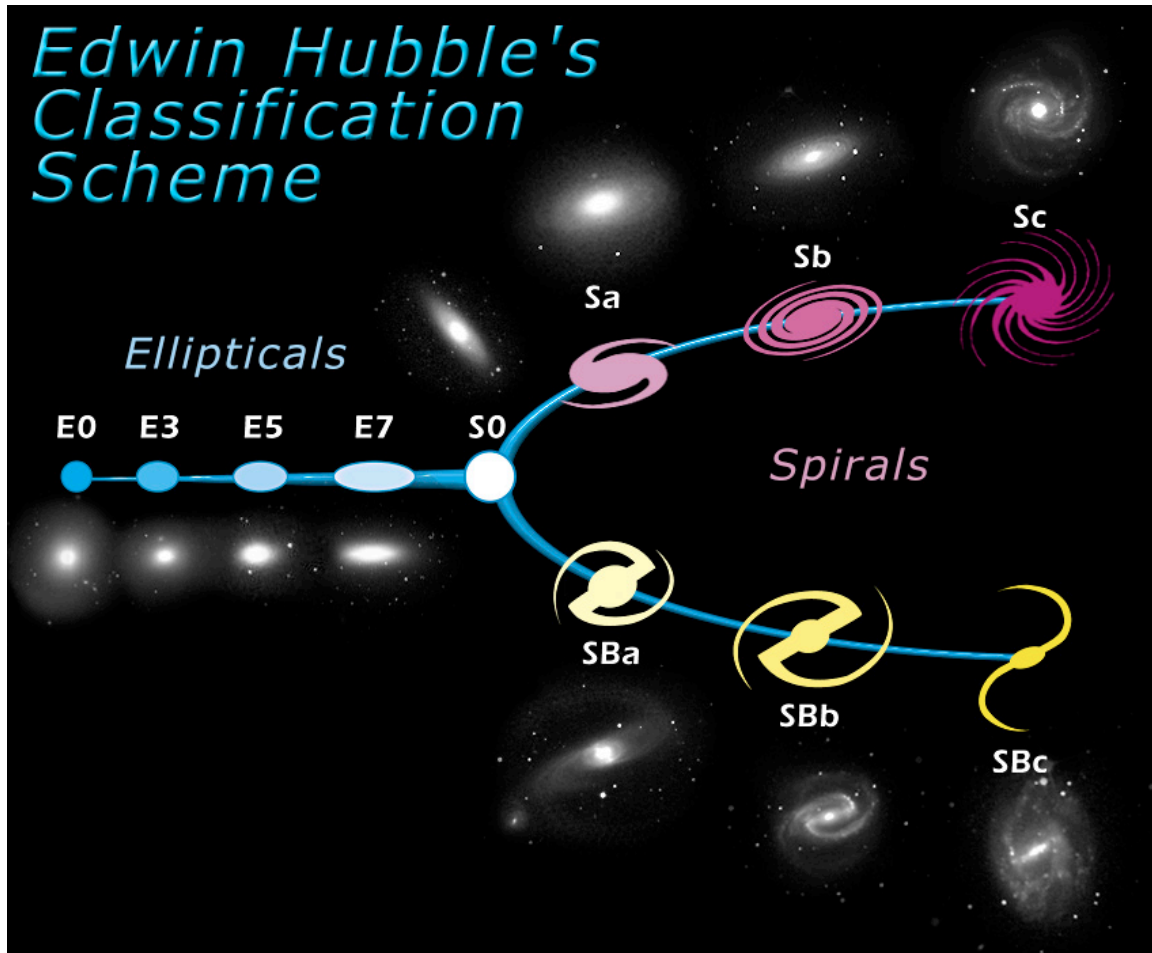


# Aktivne galakticke jezgre



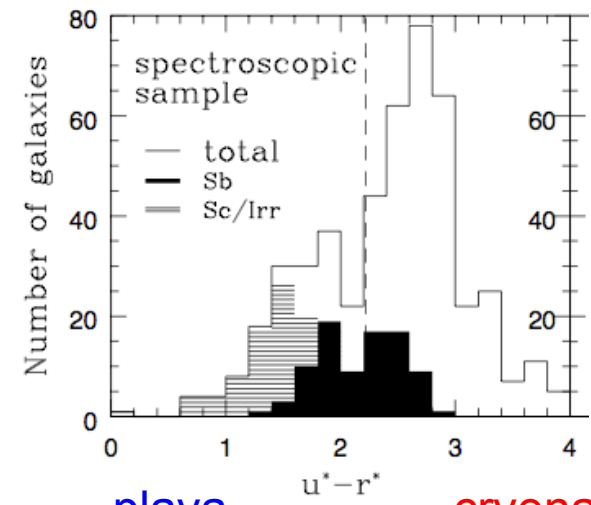
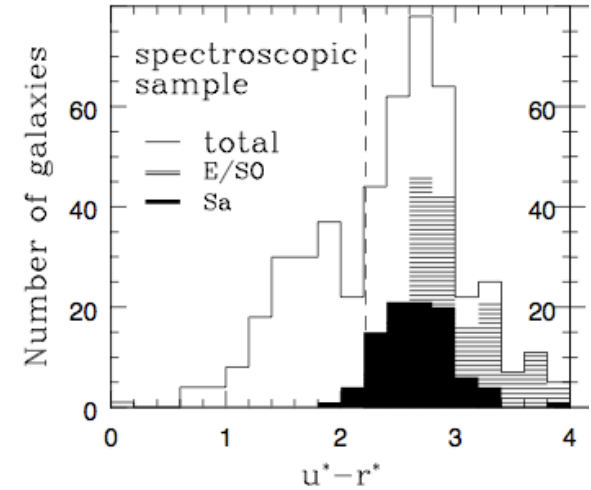
# Tipovi galaksija



Crvena boja

Plava boja

SDSS pregled neba (velik statisticki uzorak)



plava

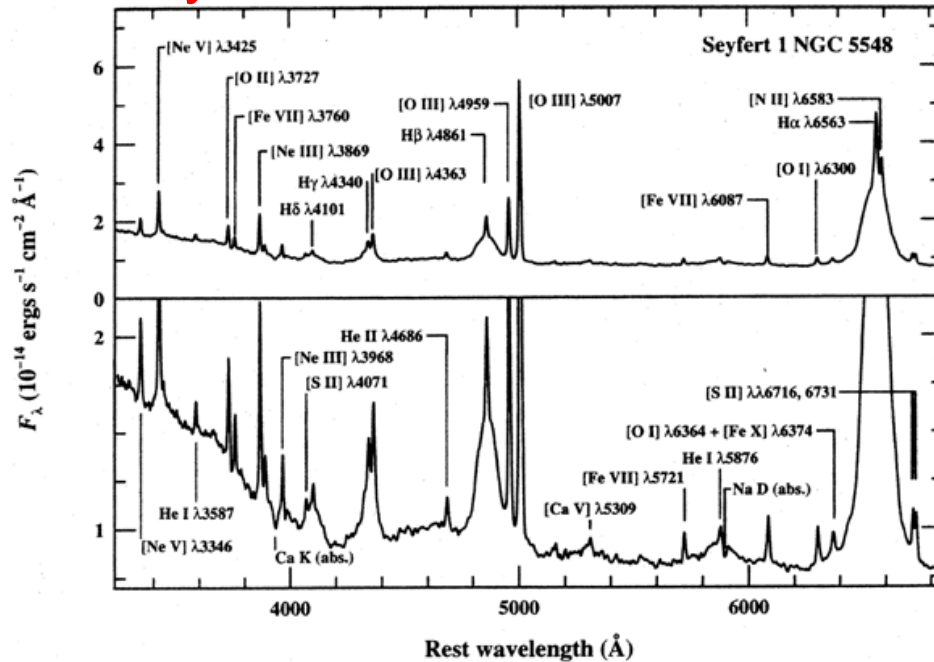
crvena

# Aktivne galakticke jezgre

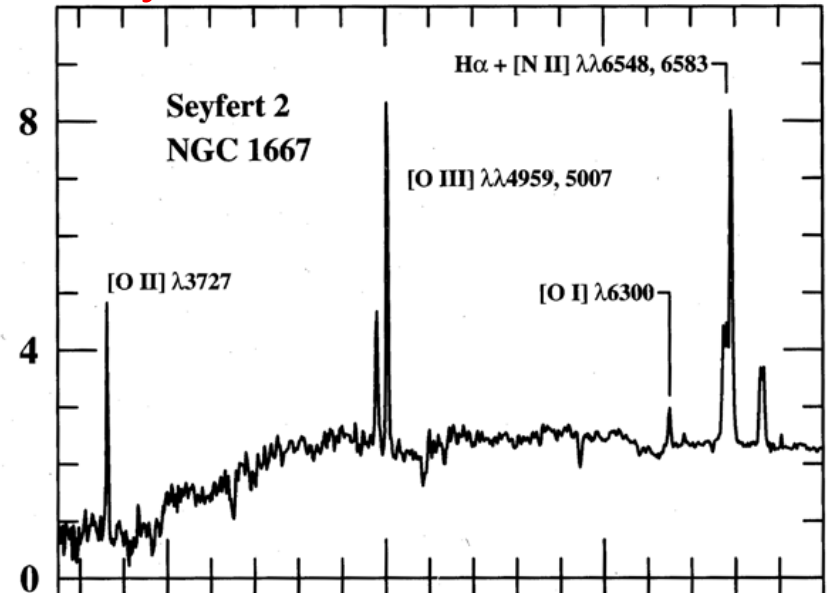
- Carl K. Seyfert (1943): **odredjen postotak galaksija posjeduje izrazito svjetle jezgre**
  - a) koje morfoloski djeluju poput zvijezda i
  - b) ciji spektar sadrzi siroke emisijske linije generirane od atoma u sirokome pojasu ionizacijskih stanja
- **Kvazar** (quasi stellar radio source):
  - Matthews & Sandage (1960): pronasli opticki izvor jakom radio izvoru 3C 48 → zvjezdoliki objekt neobicnog optickog spektra sa sirokim emisijskim linijama
  - Schmidt (1963): uzorak spektralnih linija odgovara nizu Balmerovih linija s velikim Dopplerovim pomakom prema crvenom ( $z=0.158$ )

# Seyfert galaksije

**Seyfert 1** (NGC1275)



**Seyfert 2** (NGC1667)

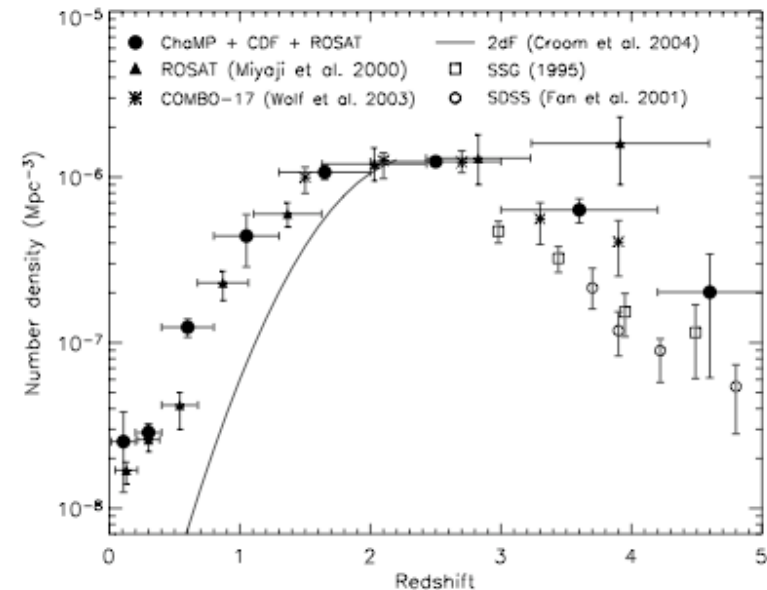
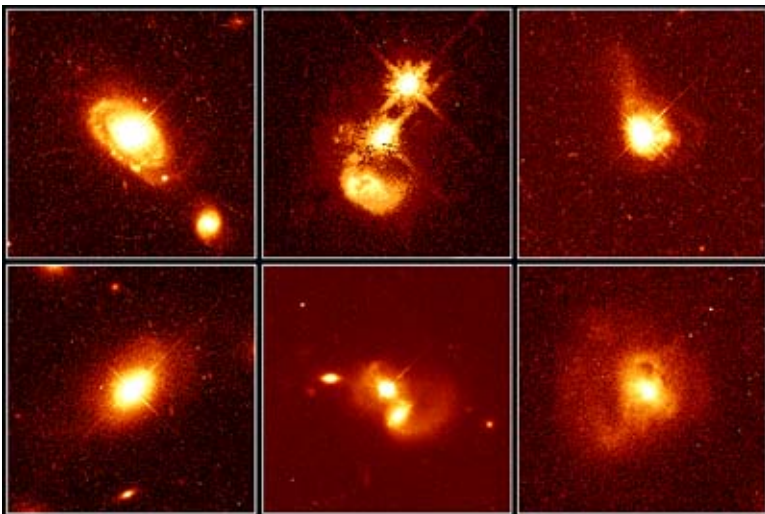


- Siroke emisijske linije (dopustene H I, He I, He II i uze zabranjene [O III]) + “uske” dopustene linije (koje su i dalje sire od spektralnih linija u normalnim galaksijama)
- Dopplerovo prosirenje linija  $\rightarrow$  izvor linija se giba brzinama 1,000 - 5,000 km/s (siroke linije) i 500 km/s (zabranjene linije)

- Samo uske emisijske linije (dopustene i zabranjene)
- Dopplerovo prosirenje linija  $\rightarrow$  izvor linija se giba brzinama 500 km/s
- Kontinuirano zracenje slabije od onoga u Sey 1 (u kojima zracenje cesto nadjaca kombinirani sjaj zvijezda iz “host” galaksije)

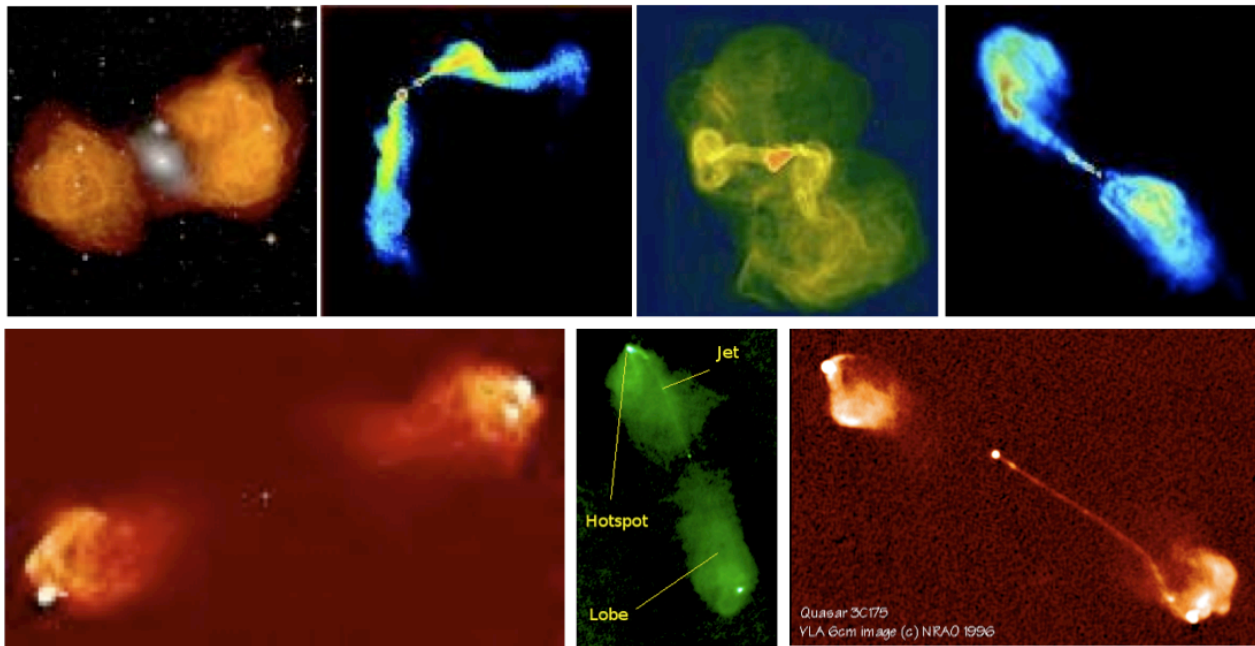
# Kvazari

- Sjajniji od Seyfert galaksija
- Sjaj jezgre obično nadjača sjaj “host” galaksije
- Na znatnim kozmoloskim udaljenostima → brojniji u prošlosti nego danas

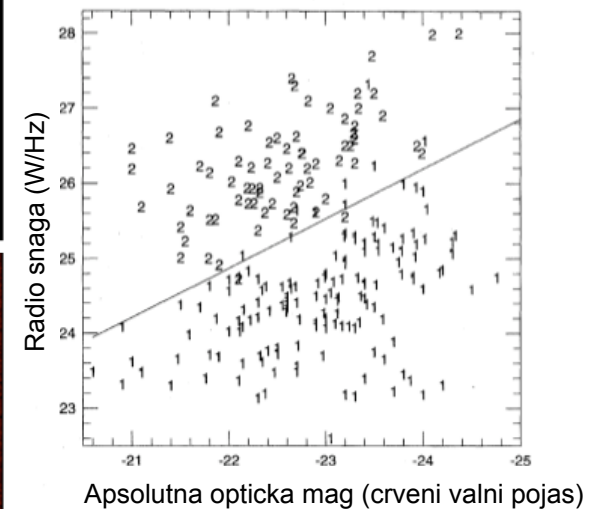


# Radio galaksije

- Broad line RGs: Opticki spektar sa širokim emisijskim linijama
- Narrow line RGs: Opticki spektar s uskim emisijskim linijama
- FR (Fanaroff & Riley) klasifikacija: prema radio morfologiji i radio luminozitetu



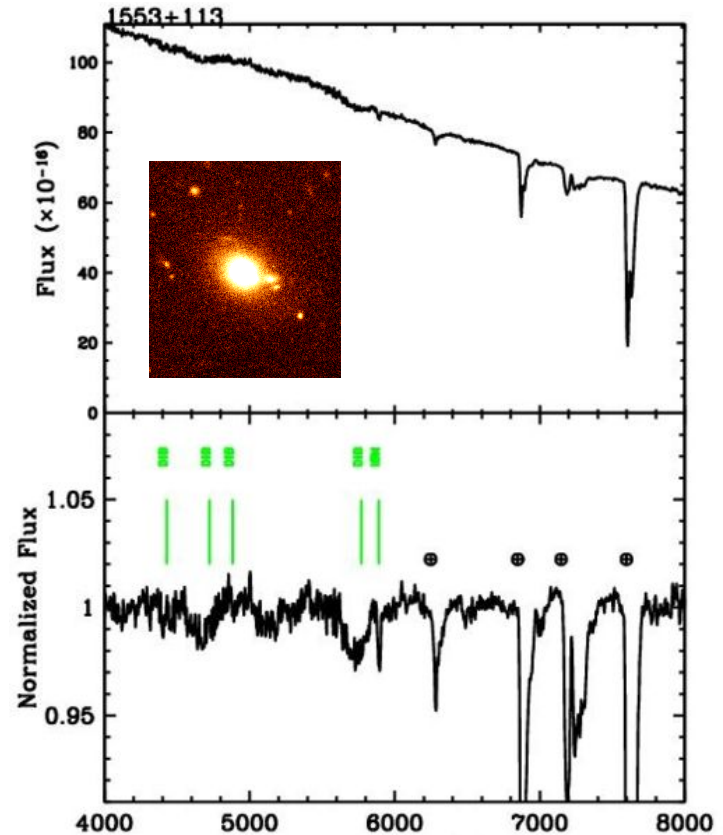
FR I: sjajniji u sredistu



FR II: Sjajniji na rubovima

# Blazari

- Brza varijabilnost (30% promjene sjaja u  $\approx 24$  sata) & visok stupanj linearne polarizacije u optickom valnom pojasu
- Kontinuum bez posebnih znacajki (jako slabe emisijske i apsorpcijske linije)
- Velike kozmoske udaljenosti
- 90% se nalazi u elipticnim galaksijama
- 2 tipa:
  - 1) BL Lac objekti
  - 2) Optically violently variable quasars (OVVs): kao BL Lac, ali mnogo sjajniji + siroke linije u spektru

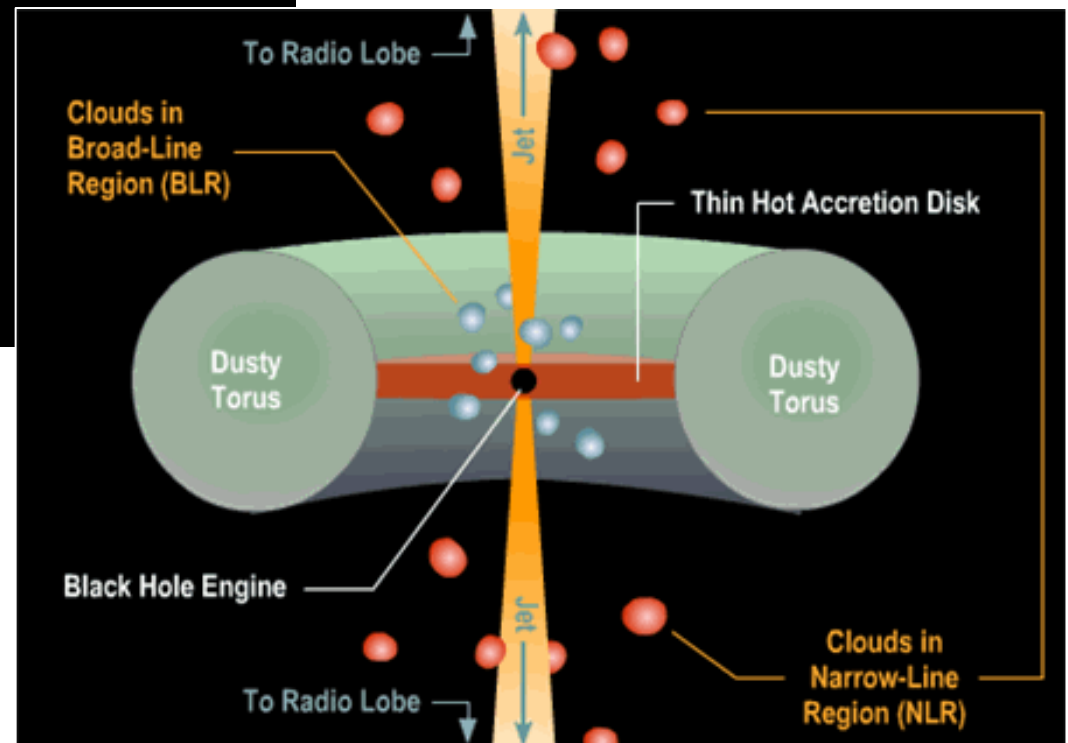
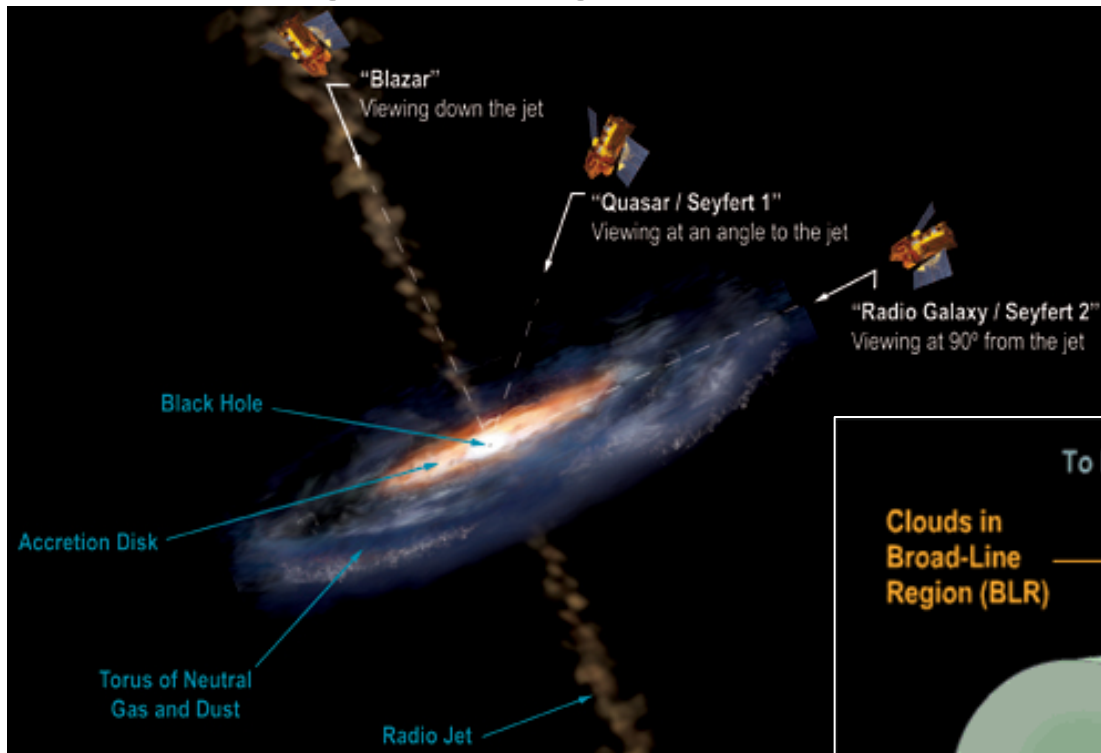


# Sto pokrece aktivne galaktice jezgre?

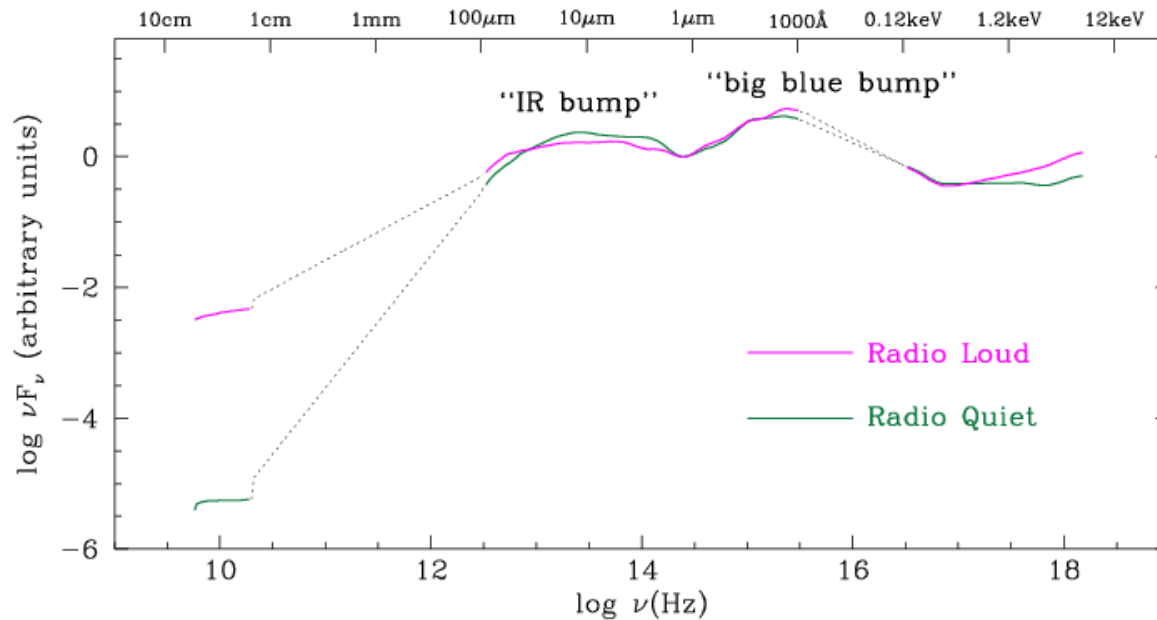
- Tipicni luminozitet kvazara  $\approx 5 \times 10^{39}$  W  
( $> 360$  Mljecnih Staza)
- Gornja granica luminoziteta vodi na donju granicu mase:  
 $L < L_{ED} \approx 1.5 \times 10^{31}$  W  $\times (M/M_{\odot}) \rightarrow M > 3.3 \times 10^8 M_{\odot}$
- Aktivne jezgre su promjenjive  $\rightarrow R \approx 7.2$  AU
- **Toliko velika masa u tako malenom prostoru je izravan dokaz za supermasivnu crnu rupu**



# Ujedinjeni model AGN-ova



# Spektralna energetska distribucija (SED) aktivnih galaktičkih jezgara



Spektar vrlo razlicit od termalnog spektra (crno tijelo) zvijezda ili galaksije (superpozicija mnogih zvezdanih spektara). Kontinuirani spektar kvazara je kombinacija termalnog in netermalnog zracenja i cesto se parametrizira s  $F_\nu \approx \nu^{-\alpha}$ ,  $\alpha=0.5-2$  i  $\alpha=f(\nu)$

Snaga dobivena u frekvencijskom intervalu  $\nu_1$ - $\nu_2$ :

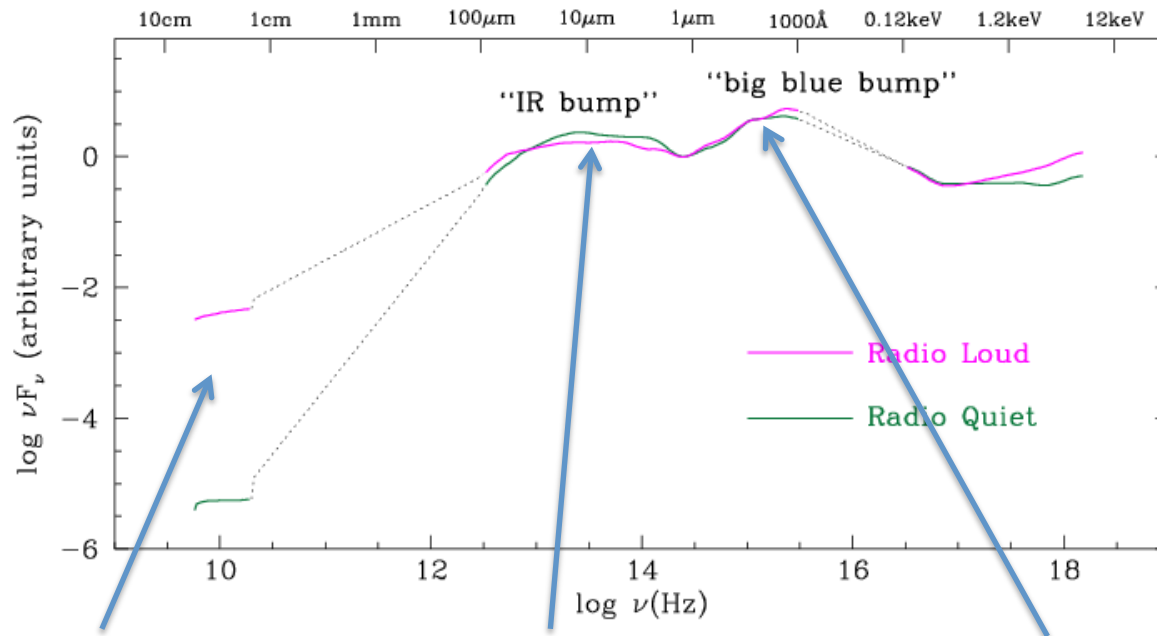
$$L_{\text{int}} \propto \int_{\nu_1}^{\nu_2} F_\nu d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_\nu \frac{d\nu}{\nu} = \ln 10 \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_\nu d \log_{10} \nu$$

Kolicina energije frekvencije izmedju  $\nu$  i  $\nu+d\nu$  po jedinici površine i jedinici vremena



Jednake površine ispod krivulje u  $\nu F_\nu$  vs.  $\log \nu$  dijagramu odgovaraju jednakim kolicinama energije

# Spektralna energetska distribucija (SED) aktivnih galaktičkih jezgara



## Radio zracenje:

- Netermalna komponenta
- Sinhrotronsko zracenje iz blizine crne rupe

## IR bump:

- Termalna komponenta koja vjerojatno dolazi od zracenja toplih zrnaca prasine ( $T \leq 2000\text{K}$ ) iz torusa prasine

## Big Blue bump:

- Termalna komponenta (akrecijski disk)
- Sadrzi velik dio bolometrijskog luminoziteta

Snaga dobivena u frekvencijskom intervalu  $\nu_1$ - $\nu_2$ :

$$L_{\text{int}} \propto \int_{\nu_1}^{\nu_2} F_{\nu} d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_{\nu} \frac{d\nu}{\nu} = \ln 10 \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_{\nu} d\log_{10}$$

Kolicina energije frekvencije izmedju  $\nu$  i  $\nu+d\nu$  po jedinici površine i jedinici vremena



Jednake površine ispod krivulje u  $\nu F_{\nu}$  vs.  $\log \nu$  dijagramu odgovaraju jednakim kolicinama energije

# Masa crne rupe

- Dinamicka masa (npr. preko orbita pojedinih zvijezda, gibanja plina oko crne rupe)
- Virijalna masa
- Masa preko “reverberation mapping”

# Masa crne rupe preko Virijalnog teorema

- **Virijalni teorem:** U gravitacijski vezanom sustavu u ravnotezi ukupna energija je polovica vremenski uprosjecene potencijalne energije:

$$-2\langle K \rangle = \langle U \rangle \text{ ili } \langle E \rangle = 0.5\langle U \rangle$$



$$M_{\text{virial}} \approx \frac{5R\sigma_r^2}{G}$$

# Masa crne rupe preko “reverberation mapping”

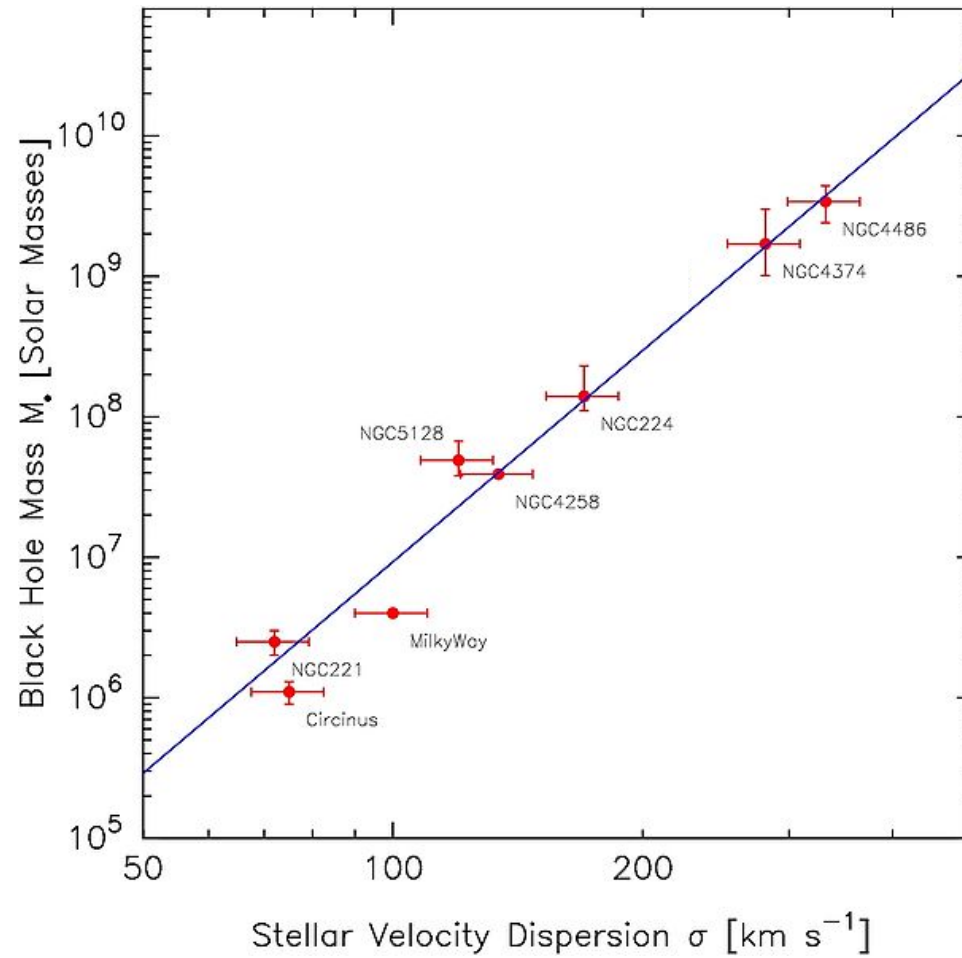
- “Reverberation mapping” = “kartiranje jeke”
  - Baza u promjenjivosti kvazara:
    - kontinuirano zracenje se stvara u centru
    - emisijske linije se stvaraju dalje od centra
- Postoji vremensko kasnjene ( $\Delta t$ ) promjene u linijama u usporedbi s promjenom u kontinuumu:

$$R_{BLR} = c \Delta t$$

$$\rightarrow M_{BH} = f \frac{R_{BLR} \sigma^2}{G} = \frac{f c \Delta t \sigma^2}{G}$$

f( $\approx 5.5$ ) mjeri strukturu,  
kinematiku i orijentaciju BLR

# M- $\sigma$ relacija



# Zracenje AGN-ova



# Crne rupe

- Potpuno opisane
  - 1) Masom;  $M$
  - 2) Angularnim momentom;  $L$
  - 3) Nabojem;  $Q$  ( $\sim 0$ )
- Opća teorija relativnosti, rješenja Einsteinovih jednačbi polja za prostor-vrijeme oko sferne mase  $M$
- $Q=0$  &  $L=0 \Rightarrow$  Schwarzschildove crne rupe
- $Q=0$ ,  $L \neq 0$ ,  $M \neq 0 \Rightarrow$  Kerrove crne rupe

# Schwarzschildove crne rupe

- Sfericna simetrija; u rjesenju su 2 vazna radijusa

1) “event horizon” ili Schwarzschildov polumjer:  $R_S = \frac{2GM}{c^2}$

- Informacija (tvar/zracenje) ne moze propagirati izvan  $R_S$
- $R_S = 3 \text{ km}$  za  $1M_{\text{Sun}}$ ;  $R_S = 2 \text{ AU}$  za  $10^8 M_{\text{Sun}}$

3) Posljednja stabilna kruzna orbita:  $R_{ms} = 3R_S = \frac{6GM}{c^2}$

- Izvan  $R_{ms}$  cestice se mogu beskonacno dugo gibati u stabilnim kruznim orbitama
- Unutar orbite su nestabilne; cestice brzo spiraliraju preko horizonta dogadjanja te u crnu rupu
- $R_{ms}$  definira unutarnji polumjer (akrecijskog) diska plina u AGN-ovima

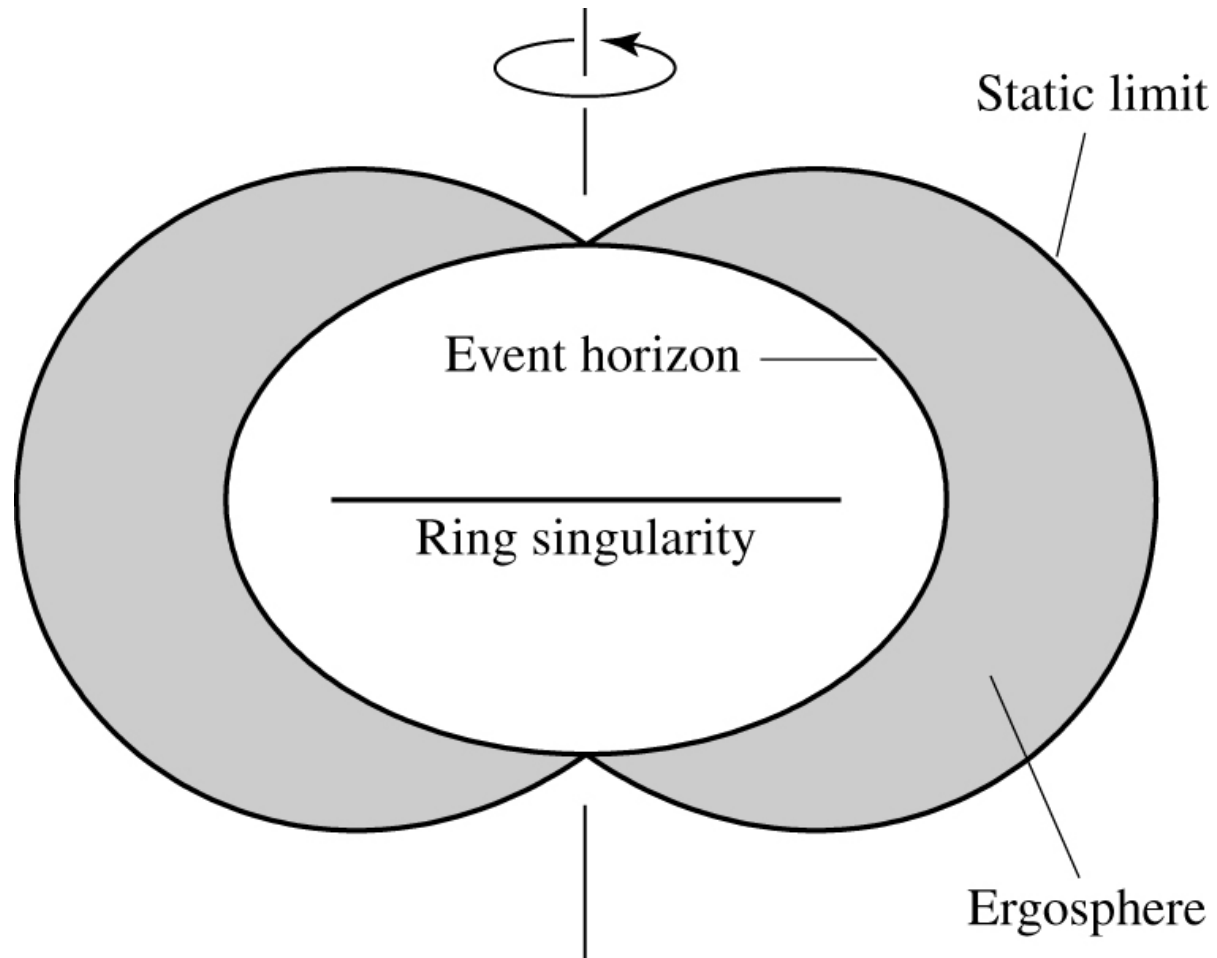
# Kerrove crne rupe

- Aksisimetrično rjesenje; crna rupa ima preferiran smjer rotacije
- Potoji cvrsti gornji limit na angularni moment

$$L_{\max} = \frac{GM^2}{c}$$

- Bezdimenzionalan parametar spina:  $a = \frac{cL}{GM^2}$ 
  - $a = 1$  za maksimalno rotirajucu crnu rupu
- Postoji horizont dogadjanja i posljednja stabilna kruzna orbita
  - Za cestice s orbitom u ekvatorijalnoj ravnini  $R_{\text{ms}}$  manji nego u Schwarzschild slucaju ako orbita korotira s crnom rupom, veca ako rotira u suprotnom smjeru

# Struktura maksimalno rotirajuće crne rupe



# “Zracenje” crne rupe

- Luminozitet AGN-a dolazi od otpustanja gravitacijske potencijalne energije kroz akreciju (prirast) mase na crnu rupu (plin spiralira kroz akrecijski disk prema crnoj rupi)
- Akrecijski luminozitet:  $L_{disk} = \eta \dot{M} c^2$   
 $\eta = \text{efikasnost}; 0.0572 \leq \eta \leq 0.423$

- Zbog viskoznosti (unutarnje trenje koje pretvara kinetičku energiju glavnog gibanja mase u nasumično termalno gibanje) plin u orbiti (u disku) gubi energiju i spiralira prema crnoj rupi (tocač mehanizam viskoznosti u ovom slučaju nije sasvim poznat)
- Pretpostavke: disk geometrijski tanak, ali optički debeo, zračenje crnog tijela
- Karakteristična temperatura diska se smanjuje kako se masa crne rupe povećava