

## Aktivne galaksije

Bistvena razlika je v spektru. Aktivne galaksije imajo dodatno emisijo. Poznamo 4 vrste:

- Seyfertove galaksije
- Kvazarji
- Blazarji
- Radijske galaksije

Velika količina dodatne energije/izseva je iz enega območja. Temu pravimo **aktivno galaktično jedro**. V bližnjem vesolju, je aktivnih galaksij manj < 2%. Sklepa se, da so masivne galaksije sle skozi to fazo.

Motor takih galaksij so supermasivne črne luknje. Velikost taksne črne luknje je okoli velikosti našega osončja z izsevom  $10^{11}L_{\odot}$ .

Kaj prispeva k spektru?

- Zvezde
  - Absorpcijske črte (kemična kompozicija,  $L$ ,  $T_{eff}$ )
  - Dopplerjev efekt (radialna hitrost, binarni sistemi dodatno)
- Plin
  - Seva emisijske črte (območja  $HII$  recimo)
- Prah
  - Prah absorbira UV in odda v daljnem IR

## Spekter navadne galaksije

**Širokopasovni spekter** navadne galaksije je vsota spektrov zvezd, plina in prahu. Črte v njem so manj izrazite.

- Premaknjene zaradi kozmološkega rdečega premika  $z = \Delta\lambda/\lambda$
- Premaknjene zaradi gibanja galaksije  $v/c = \Delta\lambda/\lambda$
- Razširjene zaradi gibanja zvezd, oblakov  $v/c = \Delta\lambda/\lambda$

Namesto  $\Delta\lambda$  govorimo progosto o hitrosti v  $km/s$

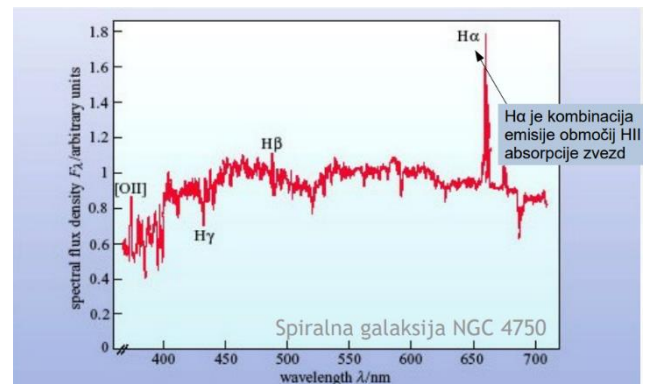
## Prepovedane emisijske črte

Prepovedane emisijske črte so prepovedane v smislu, da jih pod običajnimi pogoji (normalno gosta snov) ne opazimo; so kvantno prepovedani. V vesolju, kjer je plin redek in ne pride do trkov pa so taki prehodi možni.

## Optični spekter spiralne galaksije

Spekter je podoben spektru posamične zvezde.

- Optične absorpcijske črte so od zvezd

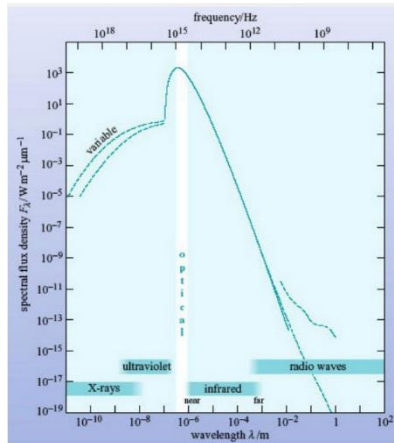


- Optične emisijske crte so od vročega plina

### Spekter Starburst galaksije

Spekter galaksije, ki ima izbruh nastanka novih zvezd prepoznamo po tem, da je zelo podoben spektru *HII* območja z izrazito  $H\alpha$  in ostalimi emisijskimi crtami (recimo  $[OIII]$ ,  $[NII]$ ). Crte so izrazite in špičaste.

### Siriokopasovni spekter spiralne galaksije



Spekter je podoben spektru sonca z več sevanja v rentgenski. To je zaradi rentgenskih dvojnic, ostankov supernov in vroče medzvezdne snovi (Bremsstrahlung).

### Spekter aktivne galaksije

**Spekter galaksije** je iz spektrov posameznih zvezd, plina (prispeva emisijske crte) in prahu. Crte se razširijo zaradi Dopplerjevega pojava.

#### Razlogi za Dopplerjevo razširitev

Do gibanja pride iz različnih razlogov:

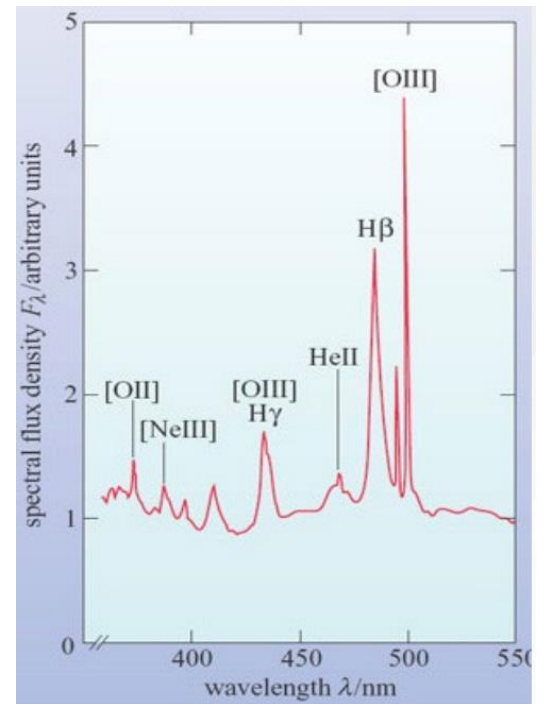
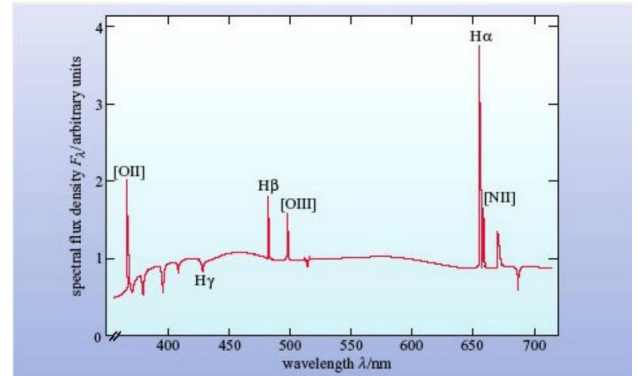
- Termično gibanje (delcev plina)
- Rotacija oblakov
- Kolaps/Eksplozija
- Inflow/Outflow plina (proti/ven iz središča)
- Kaotično gibanje

$$\Delta v/c = \Delta \lambda/c \quad \Delta v \approx (2kT/m)^{1/2}$$

#### Optični spekter aktivne galaksije

Ima prisotne zelo visoke emisijske crte in zelo razširjene crte (crte so se višje od Starburst galaksije in tudi široke). Ozke crte ustrezajo prepovedanim prehodom. Predvsem vodikove crte so zelo razširjenije zaradi dveh efektov:

- Zelo vroč plin
- Zelo hitro gibajoč plin



Primer:  $H\beta$  v AGN. Gre za vroč plin ali zelo hiter plin?

Recimo, da iz spektra preberemo:  $\lambda_{H\beta} = 485 \text{ nm}$   $\Delta\lambda = 6 \text{ nm}$

$$\Delta v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cong 3700 \text{ km/s}$$

$$E_{kin} = kT = \frac{m_H (\Delta v)^2}{2k} \cong 8 \cdot 10^8 K$$

To ne gre (bi bilo kot v zvezdi). Lahko uporabimo relativno moč crt za oceno temperature, kjer dobimo oceno okoli  $10^4 K$ . Ostane nam **da gre za hitro gibajoči plin**.

## Specifična gostota svetlobnega toka

$$j_\lambda = \frac{dE}{dt dS d\lambda} \left[ \frac{W}{m^2 \mu m} \right]$$

$$j_\nu = F_\nu = \frac{dE}{dt dS d\nu} \left[ \frac{W}{m^2 Hz} \right]$$

Specifična gostota svetlobnega toka nam **preceni** energijo pri nizkih  $\lambda$  in jo **podceni** pri visokih  $\lambda$ . To je zato, ker je  $d\lambda$  zelo odvisen.  $1 \mu m$  v radijskem je zelo malo ampak  $1 \mu m$  v rentgenskem je pa res veliko.

Zal nam  $j_\lambda = dj/d\lambda$  ne omogoča primerjave spektra pri različnih  $\lambda$ .

Spektralna distribucija energije (SED)  $\lambda j_\lambda$

Z njo popravimo precenjevanje/podcenjevanje spektralne gostote:

$$\lambda F_\lambda \quad \text{oz.} \quad \nu F_\nu$$

[Primer v zvezku]

## SED aktivnih galaksij

Spekter se ohranja preko 10 redov velikosti frekvence. Zgleda praktično raven. Se le ko narišemo log-log graf vidimo zanimivosti.

$$j_\nu \propto \nu^{-\alpha}; \quad \alpha \approx 1$$

kjer je  $\alpha$  **spektralni indeks**. Poglejmo recimo izsev med dvema frekvencama  $[\nu_1, \nu_2]$ :

$$L_{[\nu_1, \nu_2]} \propto \int_{\nu_1}^{\nu_2} F_\nu d\nu = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_\nu \frac{d\nu}{\nu} = \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_\nu d(\ln \nu)$$

Lahko pretvorimo se logaritmsko osnovo in dobimo:

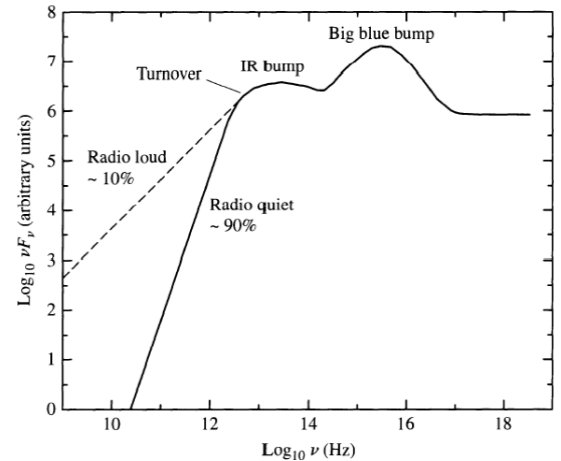
$$L_{[\nu_1, \nu_2]} = \log_{10} e \int_{\nu_1}^{\nu_2} \nu F_\nu d(\log_{10} \nu)$$

Dandanes vemo, da je spektralni indeks pravzaprav približek. Spekter kontinuuma je precej kompleksen. Ni vse kar vidimo termično sevanje (sinhotronsko sevanje in Bremsstrahlung). **Netermična emisija** je recimo posledica nevezanega elektrona v magnetnem oz. električnem polju.

Nekatere posebnosti so:

- **Big blue bump:** izvor naj bi bil akrecijski disk okoli črne luknje
- **IR bump:** posledica termične emisije prahu
- **Radio loud/quiet:** prva razlika med aktivnimi in normalnimi galaksijami, ki so jo našli
  - Loud  $\approx 10\%$
  - Quiet  $\approx 90\%$

Aktivne galaksije torej izsevajo **veliko več energije kot normalne**. Predvsem v UV (big blue bump) in veliko v x-ray in IR. **V optičnem spektru oddajajo aktivne galaksije in normalne približno enako energije.**



## Vrste aktivnih galaksij

**Vsem je skupno aktivno galaktično jedro (kompaktno in energetsko) z velikim izsevom iz jedra in spremenljivost.**

### Seyfertove galaksije

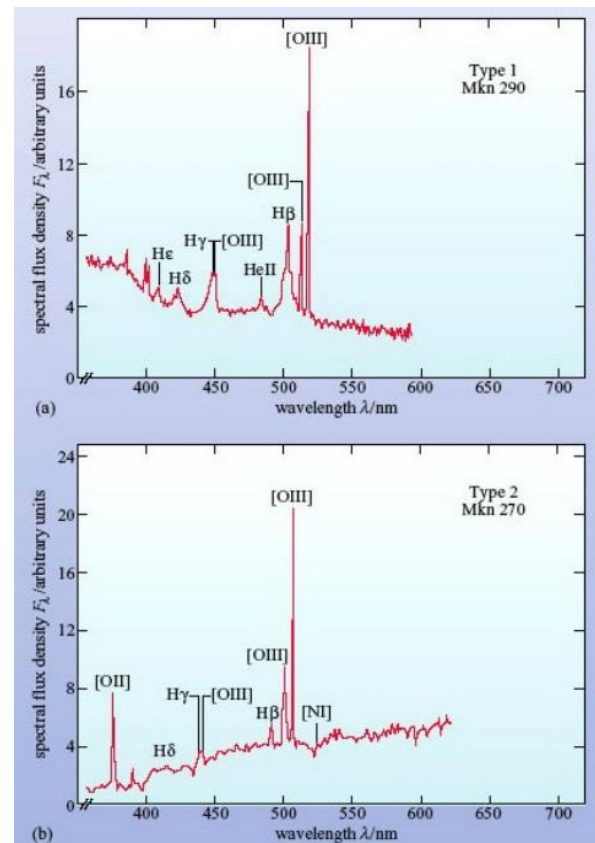
- Se imenujejo po Carlu Seyfertu
- Opazil je, da ima majhen delež spiralnih galaksij izrazito svetlo jedro
- Večina jih je dovolj blizu, da jih prepoznamo kot res spiralne
- Veliko takih galaksij je tudi v interakciji
- Presežek v FIR
- Kontinuum (preostali »ravni« del spektra) izvira iz središča
- Seyfertove galaksije so precej redke

Poznamo:

- **Seyfert 1**
  - Široke crte in ozke prepovedane crte
  - Več X sevanja
  - Spreminjajo v času
  - Hitrost od 1000 – 5000 km/s
- **Seyfert 2**
  - Samo ozke crte
  - $\sim 400$  km/s

### Radijske galaksije

- **Radijsko glasne galaksije** imajo emisijo izven galaksije. Imajo izrazite radijske ovale in eden ali dva curka.
- **Radijsko tihe galaksije** imajo svetlo jedro in curke, ki grejo dlje iz jedra. Radijska ovala nimata izrazitih robov.



- **Jedro obeh:**
  - Emisijske crte
  - Širokopasovni spekter širši od navadne
  - Spreminjajoči sij

V optičnem spektru poznamo **broad-line** ali pa **narrow-line** radio galaksije. **Nobena radijska galaksija ni spiralna**. Večina jih je eliptičnih. Veliko manj pogoste s v bližnjem vesolju, kot Seyfertove. Primer je recimo *M87*, kjer so slikali prvo črno luknjo.

*Primer: radijska galaksija Labod A*

Pri predavanjih smo izračunali, da ima ta galaksija v radijskem delu spektra izsev:

$$L_{radio} = 4.8 \cdot 10^{37} W$$

ker je okoli 3x toliko kot je izsev nase Galaksije.

### Blazarji

- Značilna hitra sprememba sija (iz središča) s periodo nekaj dni. (Spremembe tudi v radijskem območju)
- V vidnem območju prihaja do nas vedno visoko linearno polarizirana svetloba
- Konstanten spekter na širokem območju

Poznamo dve podvrsti:

- **BL Lac**
  - Ni emisijskih crt
  - Relativno nizek  $z$
  - Pretežno eliptične
- **OVV** (optically violent variables)
  - Svetle
  - Široke emisijske crte
  - Višji  $z$

### Kvazarji

Na začetku, so se spraševali ali gre to res za objekt v naši Galaksiji ali ne. Opazovanje z interferometrom izboljša slabo resolucijo radijske astronomije. Poglejmo premik in širine Balmerjevih crt za enega od prvih kvazarjev 3C 273:

$$\lambda_{H\beta} = 485nm \quad \lambda \cong 560 nm$$

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{560 - 485}{485} = 0.15$$

Po Hubblovem zakonu:

$$v = z \cdot c = 0.15c \Rightarrow zc = H_0 d \rightarrow d = \frac{v}{H_0} = 642 Mpc$$

Tako so torej ugotovili, da gre za objekt z vodikovimi emisijskimi črtami na velikih rdečih premikih

- Značilno, da so tako svetli, da zglejajo kot zvezde čeprav so zelo daleč stran
  - Od tod ime Quasi stellar radio source/object  $\Rightarrow$  quasar
- Na visokih rdečih premikih
- Pretežno vodikove crte
- Presežek v IR
- Spreminjajo sij s periodo nekaj dni/mescev
- Prisotnost curka
- Podobne zelo oddaljenim Seyfertovim galaksijam
- Delitev:
  - **Radio loud** ( $\approx 10\%$ )
  - **Radio quiet**

## Aktivno galaktično jedro (AGJ)

### Fizična velikost

Na velikost lahko le sklepamo s pomočjo optičnih posnetkov, kjer so jedra pod mejo ločljivosti tudi za najboljše teleskope. Zgornja meja (za najbližjo Seyfertovo galaksijo) je:

$$l = d\theta < 1pc$$

Torej ima območje z velikostjo  $1pc$  izsev kot cela galaksija. Druga metoda je pa preko spremenljivosti na skalah:

$$\Delta t = 10^3 - 10^4 s$$

Analogija z žarnico:

$$\Delta t = R/c$$

Ce bi sli pod mejo ločljivosti, bi gledali spremembo svetlosti (utrip) v središču in čakali, da sprememba pride do roba. Kaj se zgodi če žarnica utripa z  $\Delta t_u$ ?

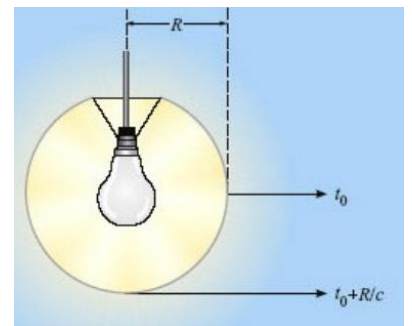
- Ce je  $\Delta t_u < \Delta t$  se utripanje zabrise
- Spremembe vidimo le, če je  $\Delta t_u > \Delta t$ .

Tako lahko rečemo, da če vidimo spremembe na  $\Delta t'$  imamo neko oceno:

$$R \leq c\Delta t'$$

Kot primer za Seyfertovo galaksijo *MGC – 6 – 3 – 15*:

$$\Delta t = 10^4 s \Rightarrow R = 20AU$$



## Izsev

Sevajo v širokem območju valovnih dolžin, skupno vsaj nekajkrat več kot normalna galaksija:

$$L_{Galaksija} = 8 \cdot 10^{36} W \quad L_{AGJ} \approx 10^{38} W$$

- **Seyfertove galaksije:**
  - Optično  $L = L_{Gal}$
  - UV in IR  $L \cong 3L_{Gal}$
- **Kvazarji**  $L > L_{Gal}$
- **Radijske galaksije** (iz radijskih ovalov)  $L > L_{Gal}$
- **Blazarji:**  $L > L_{QSO}$  (se svetlejši od kvazarjev).

## Supermasivna črna luknja

Supermasivna crka luknja ima maso:

$$M > 10^6 M_{\odot}$$

Supermasivne črne luknje se razlikujejo od zvezdni sploh po nastanku. Sklepa se, da so nastale preko akrecije in združevanja črnih lukenj (npr. lahko tudi trk dveh galaksij, kjer se središčni črni luknji združita).

**Schwartschildov radij:**

$$R_{sch} = \frac{2GM}{c^2}$$

*Kakšno črno luknjo lahko spravimo v AGJ? (Ocena mase)*

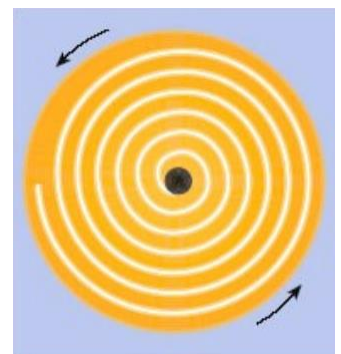
$\Delta t = 1 \text{ dan} \Rightarrow R < 3 \cdot 10^{13} m$  in recimo da ocenimo  $R \approx 10R_{sch}$ . Tako dobimo maso:

$$M = \frac{R_{sch} c^2}{2G} = 10^9 M_{\odot}$$

Iz tega sklepamo, da bi res lahko SMBH stisnili v AGJ.

## Akrecijski disk

Plin okoli črne luknje se zgoščuje in se segreva tudi zaradi trenja (plin na manjši orbiti/bližje, gre hitreje). Zaradi tega trenja pride tudi do oddaje X žarkov. Približna velikost notranjega diska (akrecijski disk je bolj kolobar in ne seže prav do črne luknje) je okoli  $10AU$ . Velikost celega diska pa je primerljiva z velikostjo našega osončja.



## Akrecijska moč

Akrecijska moč je energija, ki se odda ko gre neka masa proti črni luknji. Prihaja iz gravitacijske energije:

$$\Delta E_{grav} = \frac{GMm}{r_{konc}}; \quad r_{konc} \approx 5R_{sch} \Rightarrow \Delta E_{grav} = 0.1mc^2 = \eta mc^2$$

kjer je  $\eta$  izkoriste. Spomnimo se, da je za fuzijo  $\eta = 0.007$ . Torej črne luknje zelo dobro izkoristijo maso.

Izsev AGJ je odvisen od hitrosti padanja snovi  $dm/dt$ :

$$L_{AGJ} = 0.1 \frac{dm}{dt} c^2$$

Ce vzamemo karakterističen izsev  $L_{AGJ} \approx 10^{38} W$  dobimo oceno za akrecijo:

$$\frac{dm}{dt} \approx 0.2 \frac{M_{\odot}}{year}$$

## Eddingtonova limita

Največja svetlost objekta, ki je se lahko v hidrostatičnem ravnovesju. To je limita za izsev, ko sevanje dodat toliko tlaka, da se zvezda razpihne:

$$L \leq \frac{4\pi Gc}{\kappa} M = L_{Edd}$$

kjer je  $\kappa$  **neprozornost** snovi.

Izpeljava:

$$p_{rad} = \frac{j}{c} \quad \frac{dj}{j} = -\kappa \rho dr$$

kjer sta  $\kappa$  neprornost in  $\rho$  gostota plina. Napišemo hidrostatično ravnovesje:

$$\frac{dp}{dr} = -G \frac{M\rho}{r^2} \geq \frac{dp_{rad}}{dr} = \frac{dj}{dr} \frac{1}{c} = \frac{1}{c} (-\kappa \rho j)$$

$$-G \frac{M\rho}{r^2} \geq -\frac{\kappa \rho}{c} \frac{L}{4\pi r^2}$$

$$L \leq L_{Edd} = \frac{4\pi c G M}{\kappa}$$

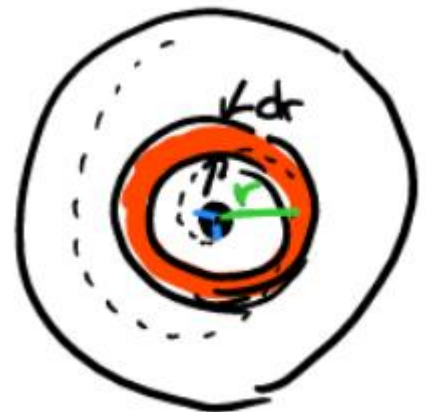
Ce ocenimo za plin iz vodika:

$$L_{Edd} \cong 1.5 \cdot 10^{31} \frac{M}{M_{\odot}} W$$

## Profil temperature in izseva akrecijskega diska

Predpostavimo:

- Optično debeli akrecijski disk (snov preko katere gre malo svetlobe)
- Zanemarimo viskoznost
- Sevanje kot črno telo





Zapišimo celotno energijo, kjer je  $M$  masa črne luknje,  $m$  masa plina,  $r$  razdalja do kolobarja (en izsecek diska) in  $R$  notranji radij akrecijskega diska.

$$dW_{tot} = -\frac{GMm}{2r}$$

Za obroč zapišemo:

$$dW = \frac{dW}{dr} dr = \frac{d}{dr} \left( -G \frac{Mm}{2r} \right) dr = G \frac{M\dot{m}t}{2r^2} dr; \quad m = \dot{m}t$$

Za obroč lahko potem zapišemo izsev na dva načina (se Stefanov zakon):

$$dL = dW = G \frac{M\dot{m}t}{2r^2} dr$$

$$dL = 4\pi r dr \sigma T^4$$

Kjer smo upoštevali dve površini kolobarja  $2 \cdot (2\pi r dr)$ . Tako imamo:

$$4\pi r \sigma T^4 dr = G \frac{M\dot{m}}{2r^2} dr$$

$$T^4 = G \frac{M\dot{m}}{8\pi\sigma r^3} \cdot \left(\frac{R}{r}\right)^3$$

Tako dobimo profil (ki ga lahko izrazimo s karakteristično temperaturo):

$$T = \left(\frac{GM\dot{m}}{8\pi\sigma R^3}\right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{3}{4}}; \quad T_{disk} = \left(\frac{GM\dot{m}}{8\pi\sigma R^3}\right)^{\frac{1}{4}}$$

V resnici bi pa dobili:

$$T(r) = T_{disk} \left(\frac{R}{r}\right)^{\frac{3}{4}} (1 - \sqrt{R/r})^{\frac{1}{4}}$$

### Notranji radij akrecijskega diska

Notranji radij je odvisen od tipa črne luknje:

- **Ne vrteča** črna luknja  $R \cong 3 - 5 R_{sch}$
- **Vrteča** črna luknja  $R \cong 0.5 R_{sch}$

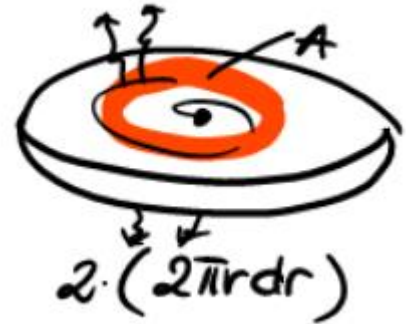
(To je zato, ker  $R_{sch}$  ne upošteva, da se črna luknja lahko vrti)

Ce privzamemo:

$$R = 0.5 R_{sch} = \frac{1}{2} \frac{2GM}{c^2} = \frac{GM}{c^2}$$

Kaj se zgodi z karakteristično temperaturo diska?

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



## Delež (izraz akrecije)

Lahko definiramo Eddingtonov delež/fraction:

$$f_{Edd} = \frac{L_{disk}}{L_{Edd}}$$

$$\eta \dot{m} c^2 = f_{Edd} L_{edd} = f_{Edd} \frac{4\pi G M c}{\kappa}$$

Tako lahko izrazimo akrecijo:

$$\dot{m} = \frac{f_{Edd} 4\pi G M}{\eta \kappa c}$$

In s tem izrazim lahko poenostavimo izraz za karakteristično temperaturo diska:

$$T_{disk} = \left( \frac{3c^5 f_{Edd}}{\eta \kappa 2G\sigma} \frac{1}{M} \right)^{\frac{1}{4}} \propto M^{-1/4}$$

## Curki

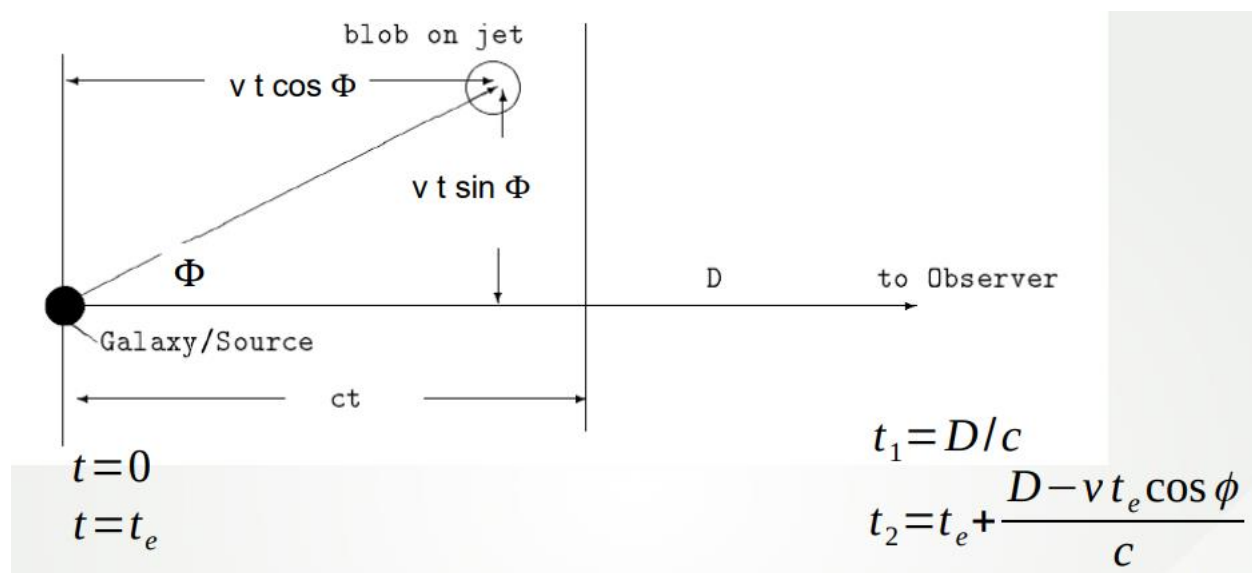
Curki so iz relativističnih delcev, ki so bili del akrecijskega diska. Ne vemo ravno od kje so oz. kako to, da imajo tako visoke energije. Možna teorija je bila, da jih pospeši sevanje, ampak to nam ne da dovolj energije. Druga bolj obetavna teorija je zaradi magnetnih polj.

## Relativistic beaming (aberracija svetlobe)

Dobro vprašanje je tudi zakaj imajo kakšne galaksije samo en curek. Odgovor na to je **relativistic beaming** pri skoraj hitrosti svetlobe. Pri tako visokih hitrosti se relativistični curek usmeri v smer gibanja. Tisti, ki kaze na drugo stran pa sploh ne utegnemo videti, ker se se bolj usmeri v drugo smer.

## Superluminalno gibanje

Navidezno gibanje z več kot svetlobno hitrostjo.



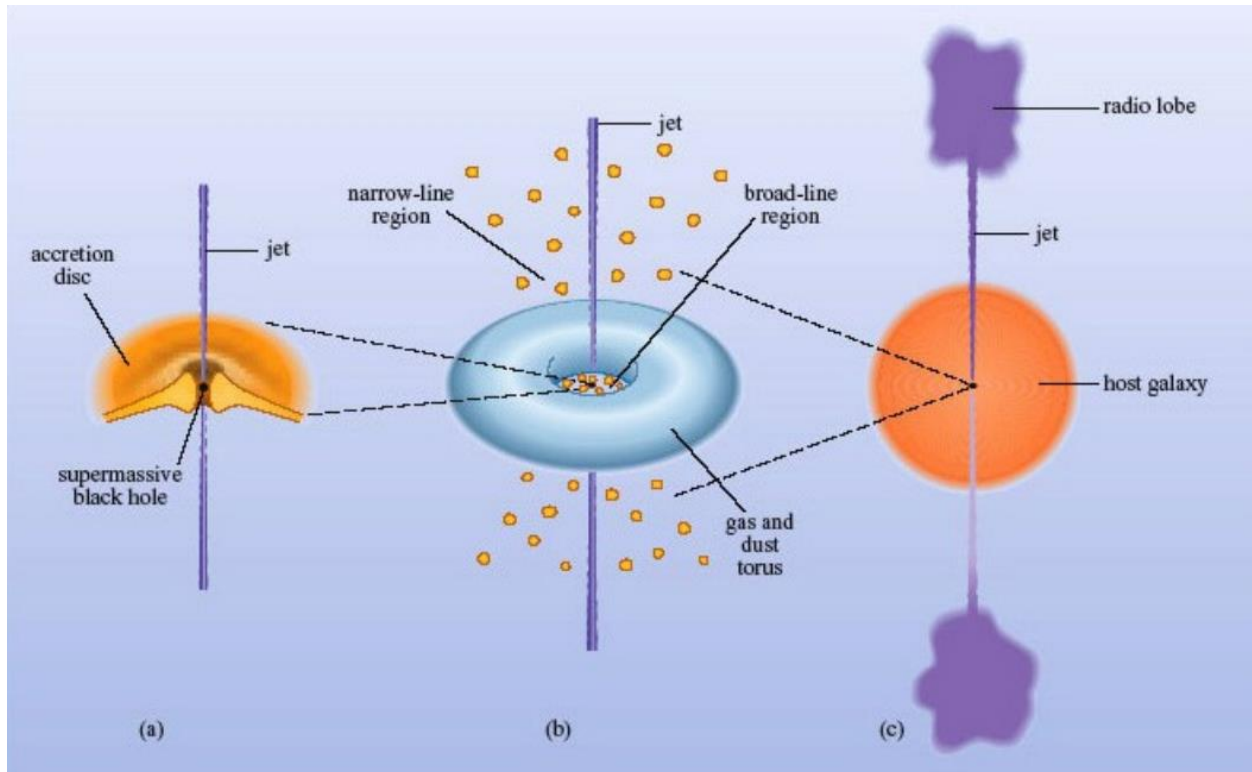
Ce si pogledamo čas potovanja za en foton in potem za drugi foton oddan malo kasneje, dobimo  $t_1$  in  $t_2$ :

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

Tako dobimo navidezno hitrost:

$$\beta_{nav} = \frac{\beta \sin \phi}{1 - \beta \cos \phi} \quad \beta = \frac{\beta_{nav}}{\sin \phi + \beta_{nav} \cos \phi}$$

## Model Aktivnih galaktičnih jeder



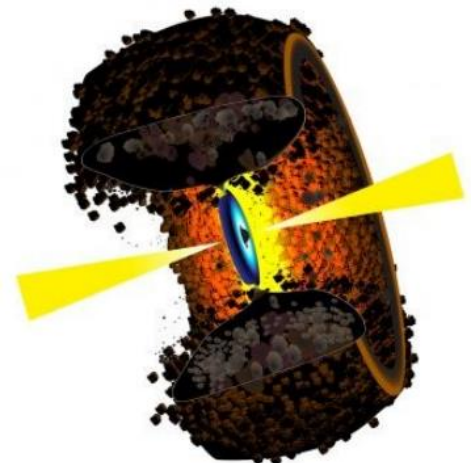
Ce bi gledali samo akrecijski disk, bi videli le X/UV sevanje. Vemo pa da AGJ, tudi močno sevajo v IR. Zato slutimo prisotnost torusa plina in prahu izven jedra (stran od akrecijskega diska).

### Torus iz plina in prahu

- $T < 2000K$  (zaradi prahu, da nam ne sublimira)
- Vemo, da je prisoten zaradi velikega izseva v IR
- Torus ni v središču ampak obkroža disk in središče
- Običajno ni perfekten (tako ga tu samo narišemo) v resnici je bolj luknjičast.

Lahko si pogledamo notranji radij če navzgor ocenimo temperaturo (kaj bližje in bi prah sublimiral).

$$j(r) = \frac{L}{4\pi r^2} \quad S = \pi a^2$$



kjer je  $L$  iz središča in  $S$  površina delca prahu.

$$\frac{L}{4\pi r^2} \pi a^2 = 4\pi a^2 \sigma T^4$$

Tako dobimo **oceno za notranji radij**:

$$r = \left( \frac{L}{16\pi\sigma T^4} \right)^{1/2}; \quad r \sim 0.2pc$$

### Območja širokih (BLR) in ozkih (NRL) crt

#### Broad-line region

- Do širokih crt pride zaradi Dopplerjeve razširitve, zato je to posledica plina ki je hiter. Torej je blizu akrecijskega diska in SMBH.
- Gre za plin **znotraj torusa plina in prahu**

#### Ocena skupne mase BLR

$$r_{BLR} \cong 10^{15}m \rightarrow v \cong 5000 km/s \quad T \sim 10^4K \quad N \sim 10^{10} \Rightarrow M_{BRLtot} < 10M_{\odot}$$

#### Narrow-line region:

- V spektru vidimo tudi ozke crte, ki pa ustrezajo plinu, ki se ne giblje hitro. To je plin iz NRL
- Gre za plin **izven območja torusa**, daleč stran od SMBH

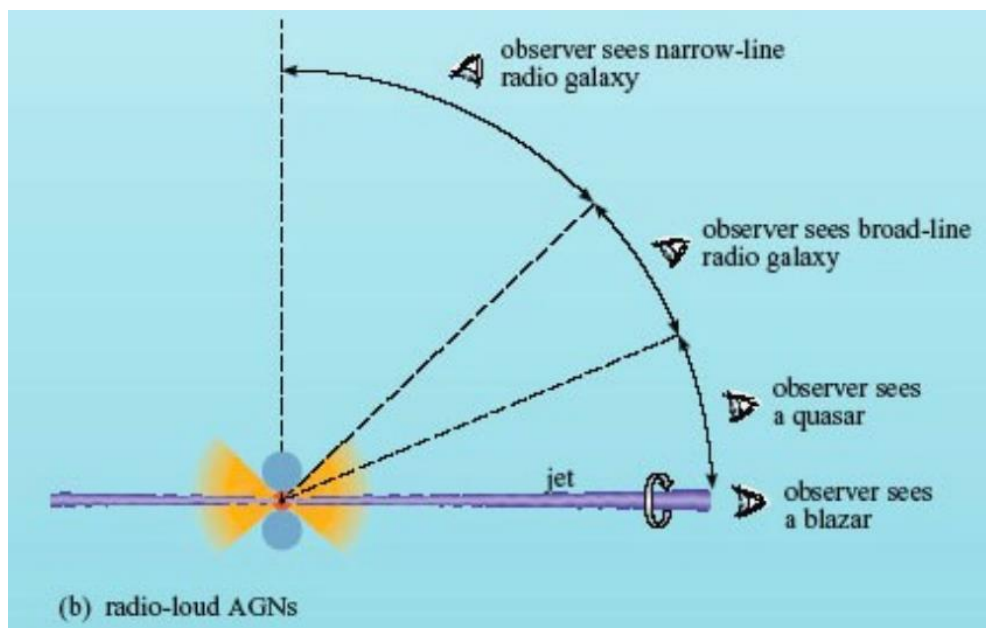
$$v \sim 200 - 900 km/s$$

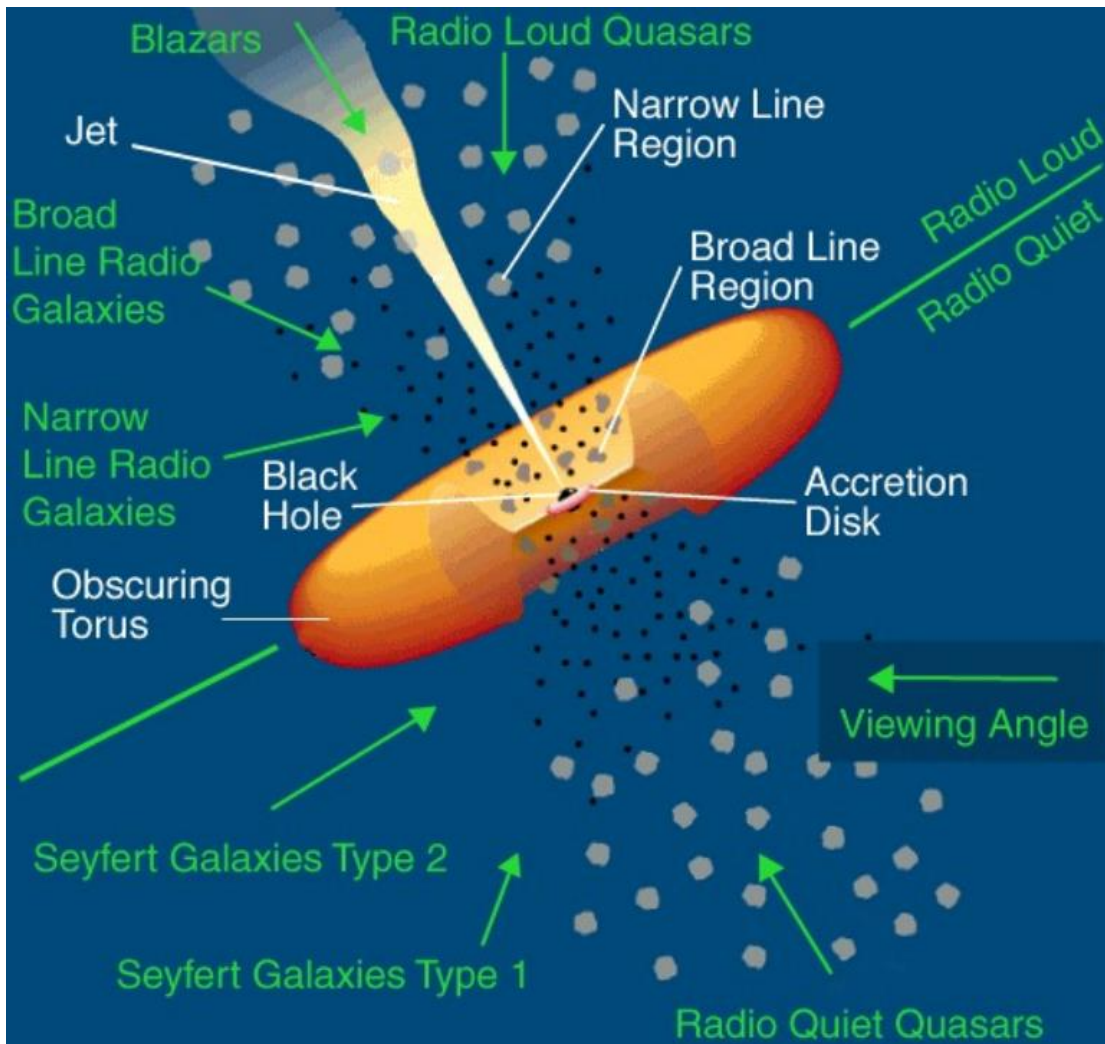
#### Extended narrow-line region

Posledica plina, ki ga ionizira sevanje iz sredisca. Je lahko tudi zelo dlje od okolice sredisca.

### Enotni model

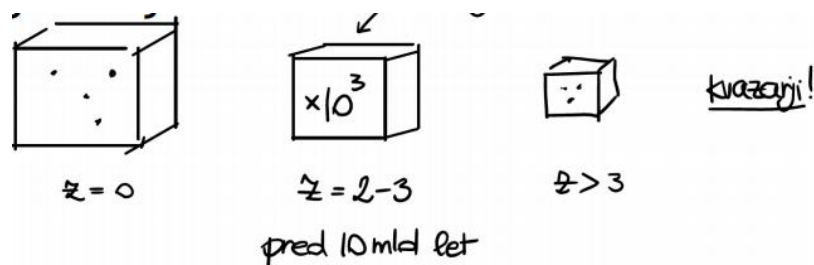
Pravi, da so različni tipi aktivnih galaksij pravzaprav le odvisni ot tega pod kakšnim kotom gledamo galaksijo.





## Nastanek (Kvazarji v zgodovini vesolja)

Kvazarji na visokih redečih premikih so nastali v prvih milijardah let vesolja. Lahko štejemo število kvazarjev pri različnih  $z$ . Spremljamo njihovo število in lahko opazujemo kako so se razvijali. Ob tem moramo upoštevati, da dlje ko pogledamo nazaj bolj je nas »testni volumen« skrčen.



Torej vidimo, da je število kvazarjev doseglo vrh pri  $z \approx 2.5$ .

Vemo, da nimajo le AGJ-ji SMBH. Tudi naša Galaksija  $M \sim 4.3 \cdot 10^6 M_{\odot}$  in Andromeda  $M \sim 10^8 M_{\odot}$  jih imata čeprav jih ne uvrstimo med aktivne.

**Sklepamo, da je aktivnost galaksije le faza navadne galaksije.**

(Vemo, da so v preteklosti bili trki med galaksijami zelo pogosti)

Katero vlogo imajo Aktivne galaksije v razvoju samih galaksij?

AGJ segreje bližnji plin, ji se začne siriti ven (outflow), kot neke vrste konvekcija. Dobimo več efektov:

- V središču ni več hladnega plina
- S tem ustvarimo nastanek novih zvezd
- Gibanje vročega plina učinkuje na molekularni plin (sproži nastanek novih zvezd nekje drugje, ne v središču)

Skratka sprošča se termična energija in kinetična energija v obliki udarnih valov.

Kaj je prej, galaksija ali črna luknja

Recimo da črna luknja podvoji svojo maso vsake  $3.4 \cdot 10^7$  let. Poglejmo si kvazar na  $z \sim 7$  (takrat starost vesolja  $750 \cdot 10^6$  let). Recimo da je začenja črna luknja  $M_{seed} = 10M_{\odot}$ . Koliko podvojitvev mas je lahko naredil črna luknja?

$$M_{BH} = M_{seed} 2^n; n = \frac{750 \cdot 10^6}{3.4 \cdot 10^7} = 22 \Rightarrow M_{BH} = 4.5 \cdot 10^7 M_{\odot}$$

## Preučevanje vesolja s kvazarji

### Gravitacijsko lečeni kvazarji

Vemo, da gre za isti objekt preko opazovanja spektra. (Odštejemo spektra obeh slik in vidimo, da ostane le sum). Zgodijo se lahko tudi zanimivi pojavi kot **Einsteinov kriz**, kjer iz enega izvora nastane 4 slike in ne obroč. To je zaradi tega, ker mase leč niso točkaste (običajno gre za lečenje na neki galaksiji).

### Gravitacijski časovni zamik

Lahko pride do časovnega zamika med curkoma pri lečenju. Takrat pride do gravitacijskega časovnega zamika. Recimo da pošljemo radijski signal od zemlje do Venere in nazaj dobimo  $200\mu s$  časovnega zamika zaradi sončeve gravitacije

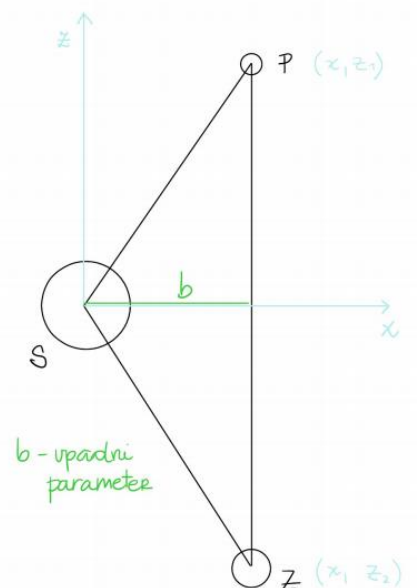
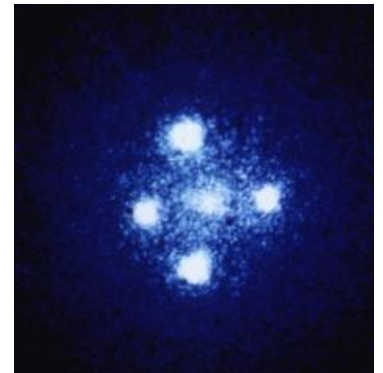
$$v(r) = c \sqrt{1 + \frac{2\phi(r)}{c^2}}; b \ll |z_z|, |z_p| \rightarrow \sqrt{1 - \xi} \approx 1 - \frac{\xi}{2}$$

$$r_z = \sqrt{z_z^2 + b^2} \quad r_p = \sqrt{z_p^2 + b^2}; \quad \phi(r) = -\frac{GM}{r}$$

$$\Rightarrow v(r) = \frac{dz}{dt} = c \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} \cong c \left(1 - \frac{GM}{rc^2}\right)$$

$$\Rightarrow dt = \frac{1}{c} \left(1 - \frac{GM}{\sqrt{z^2 + b^2} c^2}\right)^{-1} dz$$

$$\Rightarrow \delta t = \int_{t_p}^{t_z} dt = \frac{GM}{c^3} \ln \left( \frac{z_z + \sqrt{z_z^2 + b^2}}{z_p + \sqrt{z_p^2 + b^2}} \right)$$



## Lyman $\alpha$ gozd

Lyman  $\alpha$ : prehod med  $n = 1$  in  $n = 2$ ;  $\lambda = 121.6 \text{ nm}$

Neka galaksija odda foton pri  $121.1 \text{ nm}$ , ki potuje skozi vesolje (ki se siri). Vsakič ko zadane foton nek oblak plina, se absorbira na istem mestu  $121.6 \text{ nm}$  ampak celoten spekter se zamika v rdeče zaradi rdečega premika. Torej originalna crta se zamakne in na levo od nje, dobimo absorpcijske crte.

Tako lahko zaznamo plin med nami in kvazarjem. Iz rdečega premika Lyman  $\alpha$  in absorpcijskih crt lahko sklepamo o oddaljenosti izvora in oblakov:

$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} = 1 + z$$

Temu pravimo **gozd**, ker so te absorpcijske crte posejane tako gosto kot drevesa v gozdu.

### Damped Lyman $\alpha$ system

Svetloba gre skozi območje z gostejšim plinom (povezujemo običajno z oddaljenimi galaksijami). Območje skozi katerega gre ima za  $10^6$  večjo gostoto od povprečja IGM (intergalactic medium). Verjetno povezana z nastankom zvezd znotraj galaksij.

### Učinek Gunn-Peterson

Primordialni nevtralni vodik absorbira UV fotone. Zakaj vidimo oddaljene kvazarje? Zakaj se  $Ly_{\alpha}$  fotoni ne absorbirajo v večjih količinah?

Odgovor za to je **reionizacija**. Nevtralni vodik se je znova ioniziral v preteklosti verjetno od UV od mladih zvezd ali pa, da so bili kvazarji v preteklosti zelo pogosti. Ni se jasno, kako se je lahko plin na tako veliki skali ioniziral.

