



Galaksit ja kosmologia

FYS2052, 5 op, syksy 2023

E207 Physicum

Luento 9: Aktiiviset galaksit,
06/11/2023



Tällä luennolla käsitellään

1. Aktiivisten galaksien luokittelu ja perusominaisuudet.
2. Seyfert-galaksien, radiogalaksien, kvasaareiden ja blasaareiden perusominaisuudet.
3. Aktiivisten galaksien yhtenäismalli.
4. Aktiivisten galaksien fysiikkaa: Eddingtonin luminositeetti, synkrotronisäteily sekä havaittu superluminaarinen liike.
5. Kvasaareiden absorptiojärjestelmät: Damped Lyman- α järjestelmät, Lyman-limit järjestelmät, sekä Lyman- α forest kaasupilvet.
6. Vastaa soveltuvin osin: **S&G:** luvut 8.1-8.2 (vanha painos)
S&G: luvut 9.1-9.3 (uusi painos)



9.1 AGN:ien luokittelu - Seyfertit

- Ensimmäiset havainnot aktiivisista galakseista (AGN=Active Galactic nuclei) tehtiin jo 1900-luvun alussa, mutta ensimmäisen luokittelun sai valmiiksi Carl Seyfert vasta vuonna 1943.
- Seyfert havaitsi 12 galaksia, joiden spektreistä löytyi leveitä emissioviivoja, joiden virittymiseen vaadittiin hyvin energettistä säteilyä. Seyfertin galaksit ovat yleisimmin spiraali ja S0-galakseja.

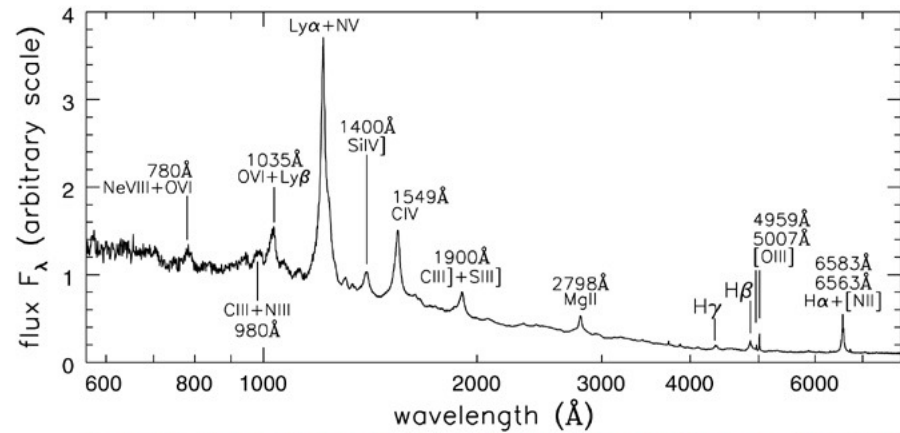


Fig 9.1 (Telfer et al.) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Seyfert I-typin galakseissa on hyvin leveitä viivoja ja Seyfert II-typin galakseissa hieman kapeampia ($v \leq 1000 \text{ km s}^{-1}$) spektriviivoja.



Seyfertien säteily

- Seyfert-galaksit säteilevät voimakkaasti infrapuna-, UV-, röntgen- sekä optisella alueella mutta eivät yleensä kovin voimakkaasti radio-alueella.
- Kontinuumi-säteily tulee todennäköisesti kertymänkiekon kuumasta kaasusta (UV- ja röntgen-säteily kiekon sisäalueelta, optinen ulompaa). Radioemissio tulee suihkuista. Osa IR-säteilystä tulee kuumasta pölystä.

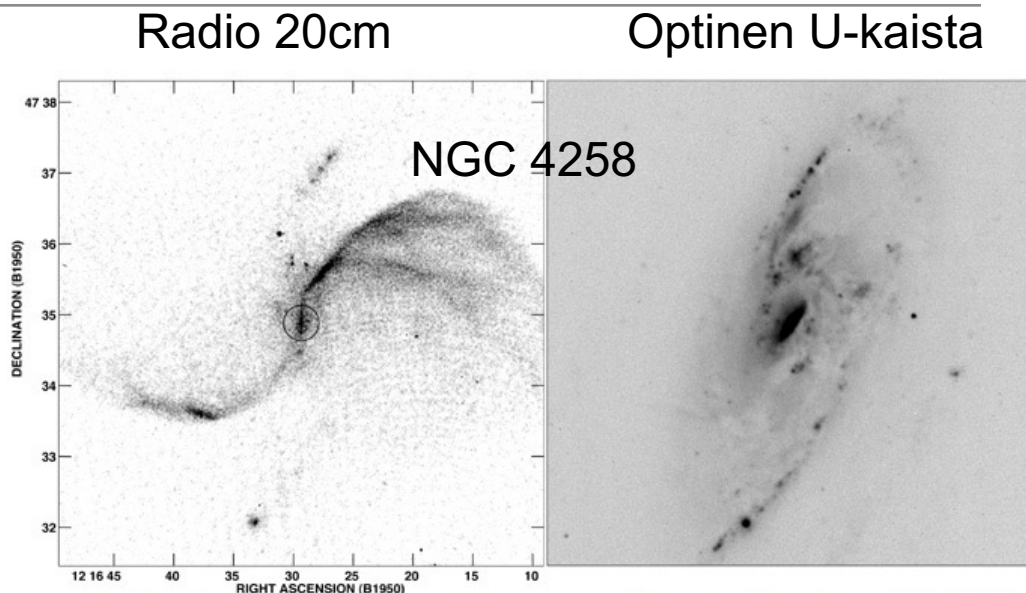


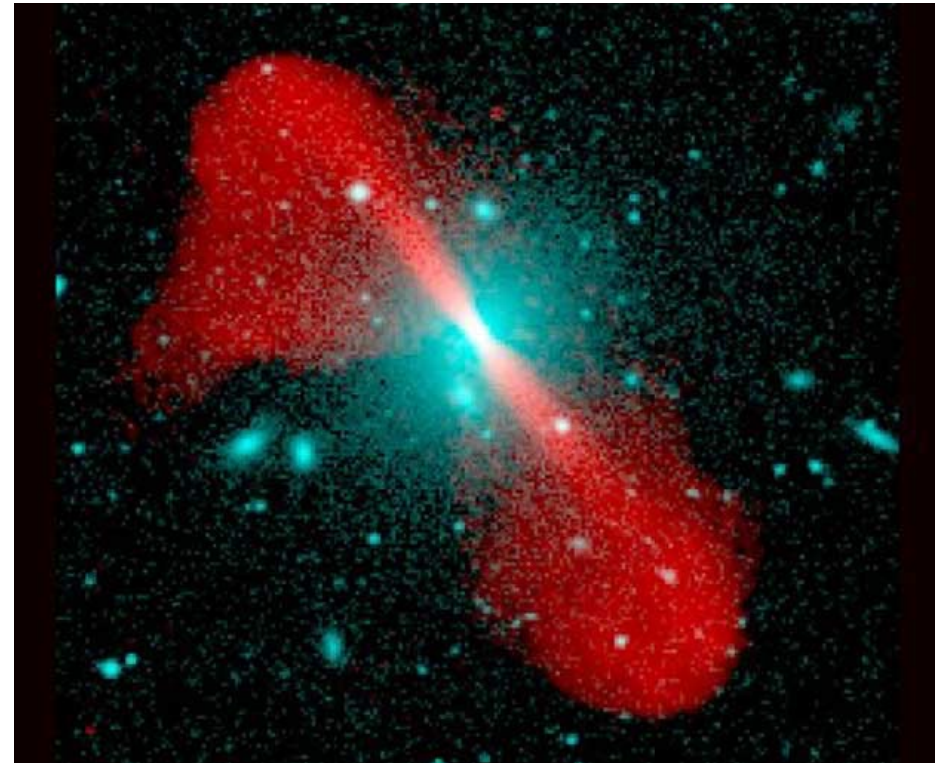
Fig 9.2 (G. Cecil)'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- Seyfert-galaksien ytimellä $L \leq 10^{11} L_{\odot}$. Noin 10% Sa- ja Sb-galakseista ovat Seyfertejä. Noin 25% on heikompia LINER:eitä (Low ionization nuclear emission regions).



Radiogalaksit

- Radiohavaintojen yleistyessä 1950-luvulla huomattiin että monet kirkkaimmat radiokohteet olivat massiivisia ellipsigalakseja.
- Radioemissio on luonteeltaan ei-termistä, eli se ei ole tähtien ja kaasun lämpötilasta johtuvaa säteilyä.
- Tarkemmat havainnot osoittivat että säteily tulee kompaktilta ydinalueelta, joka on yleensä yhteydessä kahteen laajaan lohkon galaksin ulkopuolella.





Radiogalaksien lohko-alueet

- Radiogalakseissa: $L_{\text{radio}} \geq 10^8 L_{\odot}$ ja kirkkaimmissa jopa $L_{\text{radio}} \geq 10^{12} L_{\odot}$.
- Radiogalakseissa on yleensä kaksois-lohkorakenne, mitä kirkkaampi kohde sitä suuremmat lohkot ovat (koko jopa ~ 3 Mpc).
- Lohkot ovat optisesti ohuita ja kirkkaampia matalilla radiotaajuuksilla ja niissä sijaitsee usein kuumia pisteitä (hot spots), joiden koko on noin ≈ 1 kpc.

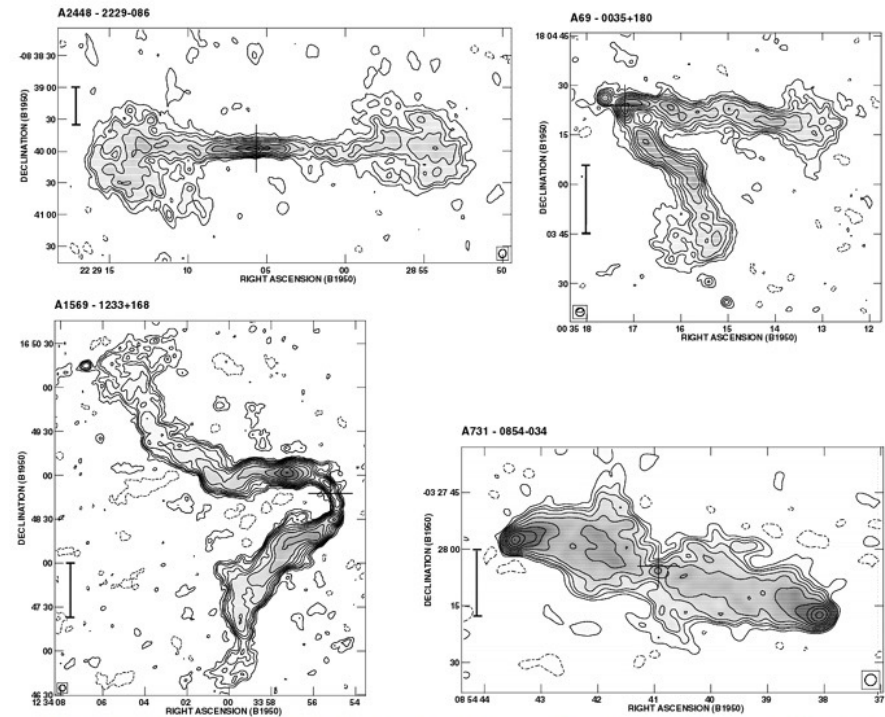


Fig 9.4 (M. Ledlow) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Radiogalaksien ydinalueet

- Radiogalaksien ydinalueet ovat yleensä optisesti paksuja ja kirkkaus voi muuttua alle vuoden aika-skaaloilla, täten niiden koko täytyy olla ≤ 1 valovuosi.
- Ytimestä lähtee usein kapeita suihkuja ja suihkut siirtävät tehokkaasti energiaa ytimestä lohkoihin.
- Kirkkaat radiogalaksit ovat aina ellipsigalakseja, joissa on hyvin vähän kylmää kaasua.

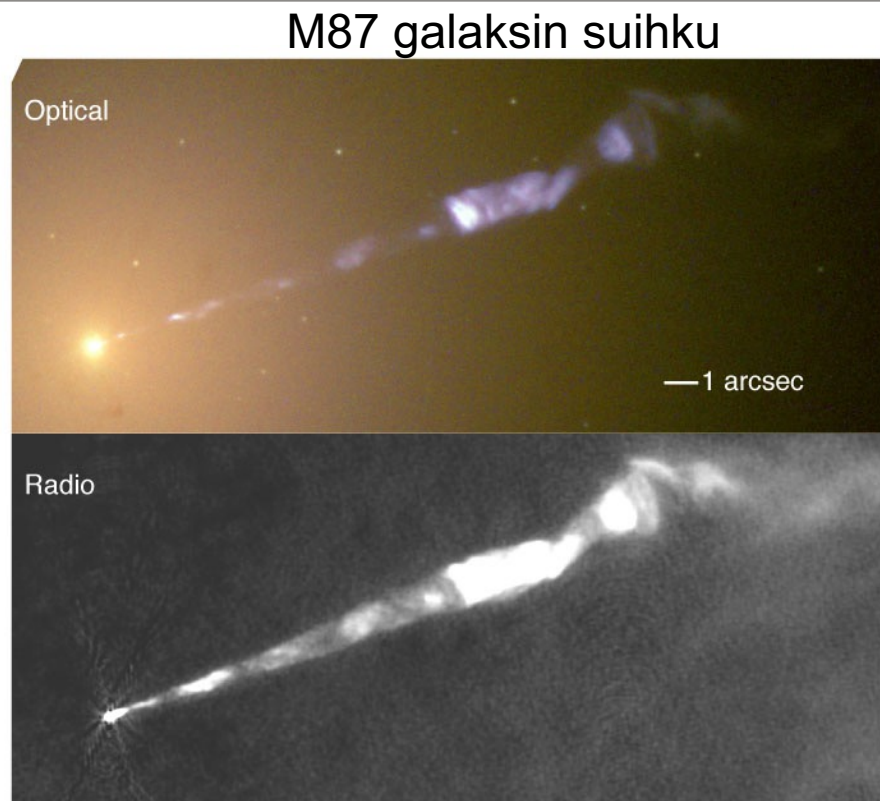


Fig 9.5 (J Biretta/HST) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

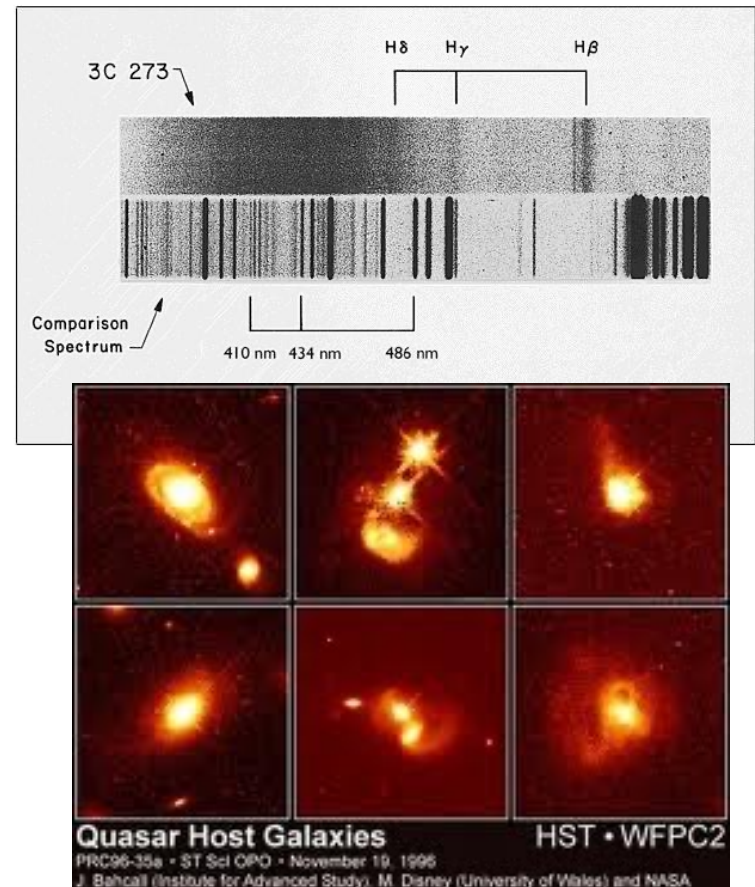
$$L_\nu \propto \nu^{-\alpha}, \quad 0.7 \lesssim \alpha \lesssim 1.2 \text{ (lohkot)}, \quad \alpha \sim 0 \text{ (ydin)}$$



Kvasaarit

- Ensimmäiset kvasaarit havaittiin 1960-luvulla pistemäisinä ja tähtimäisinä kohteina (nimi: quasi-stellar object=quasar).
- Maarten Schmidt ymmärsi vuonna 1965 että kvasaarit näyttävät pistemäisiltä koska ne ovat erittäin kaukaisia kohteita.
- Nykyiset havainnot Hubblella ja isoilla maanpäällisillä kaukoputkilla ovat löytäneet kvasaareita ympäröivät emogalaksit.

Ensimmäinen löydetty kvasaari 3C 273 $z=0.158$.





Kvasaareiden ominaisuuksia

- Kvasaarit ovat kirkkaimpia aktiivisia galakseja, $L_V \geq 10^{11} L_\odot$.
- Suurin osa kvasaareista ovat radiohiljaisia, vain 3-10%:ssa on voimakasta radioemissiota.
- Yleisesti melko tasainen energiajakauma, kohteet joissa vahvaa radio-emissiota on myös vahva gamma-alueen-emissiota.
- Havaintoja $10^9 M_\odot$ massan mustista aukoista jo punasiirtymällä $z \approx 7.5$ -> kvasaarit muodostuivat lyhyessä ajassa. Massankasvu $\sim 1 M_\odot/\text{yr}$.

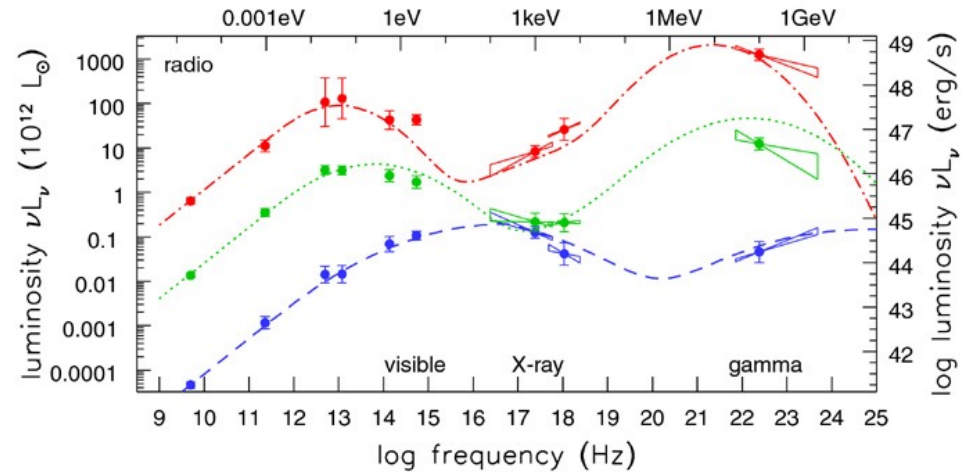


Fig 9.9 (G. Fossati) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Tyypillisesti oletetaan että noin 10% mustaan aukkoon putoavasta lepoenergiasta muuttuu säteilyksi.

$$\sim 0.1 M_\odot c^2 \Rightarrow L \sim 10^{12} L_\odot$$

$$\Rightarrow t \sim 100 \text{ Myr} \Rightarrow M_{\text{BH}} \sim 10^8 M_\odot$$



BL Lac kohteet ja Blasaarit

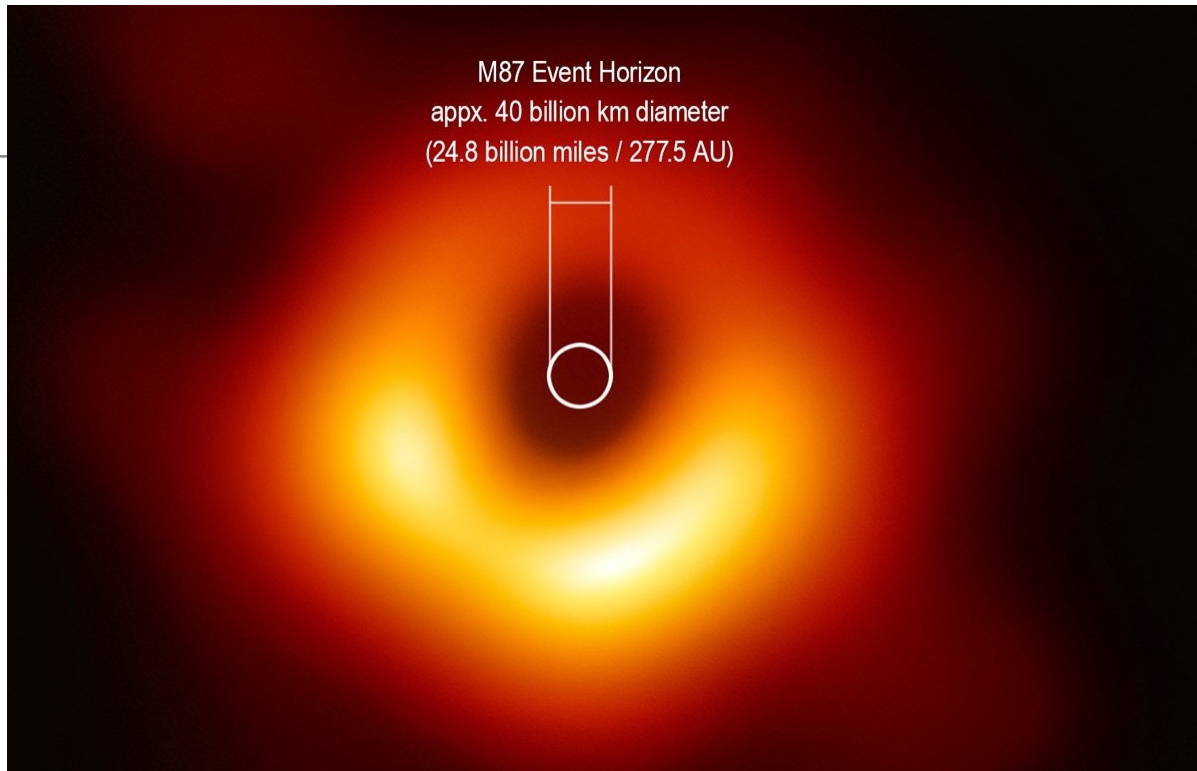
- BL Lac kohteet ovat kvasaareita joiden spektreissä on hyvin heikot emissioviivat. Valonvaihtelut näissä kohteissa ovat hyvin voimakkaita ja lyhytkestoisia.
- OVV-kvasaareissa (Optically violent variable quasars) on vahvemmat viivat, mutta samantyyppinen voimakas valovaihtelu.
- Yhteisesti näitä kohteita kutsutaan blasaareiksi.



Voimakas valonvaihtelu johtuu todennäköisesti siitä, että havaintosäteemme ja kohteista lähtevien suihkujen välinen kulma on pieni. Näemme siis suihkun melko lailla suoraan päältä päin.



Suoria musta aukko havaintoja



- Keväällä 2019 Event Horizon Telescope kolloboraatio julkaisi suoria kuvia M87-galaksin mustan aukon varjosta. Itse tapahtumahorisontti on pienempi tekijällä ~ 2 , mutta tämä havainto osoitti aukottomasti mustien aukkojen olemassaolon.



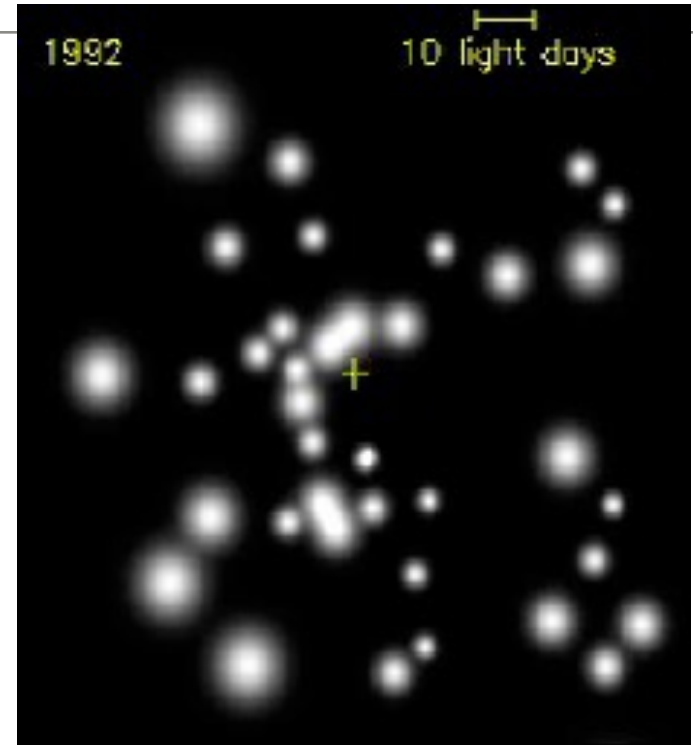
9.2 Aktiivisten galaksien energianlähde

- Aktiivisten galaksien energianlähteenä on niiden keskustassa olevat supermassiiviset mustat aukot. Kaasun potentiaali-energia muuttuu säteilyksi.

1. Lyhyen aikavälin muutokset valokäyrissä: emittoiva alue voi olla vain muutamien valopäivien tai valoviikkojen kokoinen.

2. Kaasun liikkeistä $V \approx 10^4$ km/s ja säteilevän alueen koosta

$$R \approx 0.01 \text{ pc: } M(< r) = \frac{rV^2(r)}{G} \sim 10^8 M_{\odot}$$



Tähtien radoista saadaan Linnunradan mustalle aukolle: $M_{\text{BH}} \approx 4.3 \times 10^6 M_{\odot}$.



Aktiivisten galaksien yhtenäismalli

- Yhtenäismallissa aktiivisen galaksin ominaisuudet riippuvat siitä missä kulmassa havaitsemme galaksin.
- 1) BLR ($n_H \geq 10^{10}$ atomia cm^{-3}), lähellä mustaa aukkoa, epätasainen rakenne.
- 2) NLR ($n_H \leq 10^8$ atomia cm^{-3} , kiellettyjä siirtymiä ([OII], [OIII]).
- Näkösäteestä riippuen näemme tyypin 1 ja 2 AGN:eitä, sekä blasaareita.

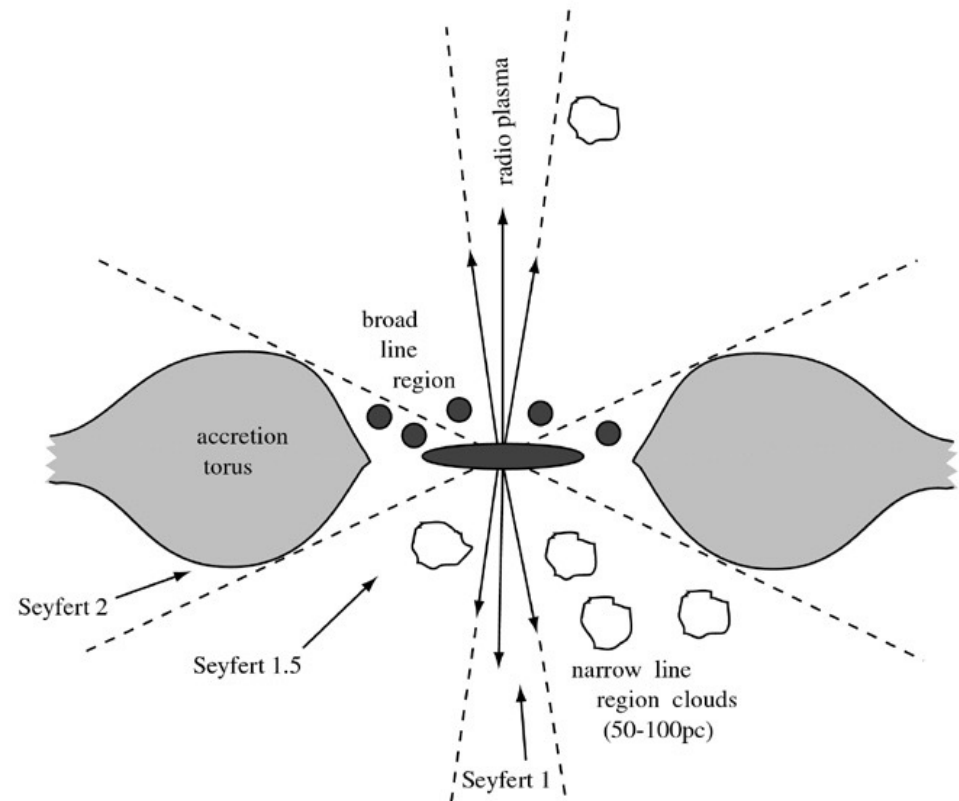


Fig 9.3 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



9.3 Aktiivisten galaksien fysiikkaa

- Miten galakseissa oleva kaasu kulkeutuu mustiin aukkoihin?
 - Koska energiantuotto mustissa aukoissa on hyvin tehokasta, hyötysuhde lepomassaenergiasta noin 10% (vertaa tähtiin jossa $4p \rightarrow He$ hyötysuhde $\sim 0.7\%$) kaasun tarve ei ole kovin suuri.
1. Vuorovaikuttavissa galakseissa vuorovesivoimat vähentävät tehokkaasti kaasun impulssimomenttia ja kaasu voi kulkeutua keskustaan.
 2. Sauvagalakseissa kaasu voi kulkeutua sauvan sisällä tehokkaasti galaksin ytimeen.
 3. Tähtipopulaatioista tähtituulien kautta avaruuteen leviävä kaasu voi kulkeutua galaksin ytimen mustaan aukkoon.



Eddingtonin luminositeetti

- Kaasun säteilypainne: Oletetaan että kaasu on täysin ionisoitunutta ja lasketaan ulospäin suuntautuva säteilypainnevoima Thomsonin sironnasta. Elektroniin säteellä r vaikuttaa voima:

$$F_{\text{rad}} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c}, \quad \sigma_T = \frac{e^4}{6\pi\epsilon_0^2 c^4 m_e^2} = 6.653 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$$

- Vastavoimana on painovoima, joka vaikuttaa sekä elektroniin ja protoniin, jotka liikkuvat yhdessä elektrostaattisen voiman takia.

$$F_{\text{grav}} = \frac{GM(m_e + m_p)}{r^2} \approx \frac{GMm_p}{r^2} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c}$$

- Eddingtonin luminositeetti: $L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T} \approx 30000 \times \frac{M}{M_\odot} L_\odot$



Synkrotroniemissio I

- Kiihtyvässä liikkeessä oleva varattu hiukkanen säteilee. Lisäksi magneetti-kentässä oleva elektroni liikkuu spiraalimaisella radalla:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 |\mathbf{a}|^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \quad \& \quad \nu_L = \frac{eB}{2\pi m_e c} \quad \& \quad a = 2\pi\nu_L V \sin\theta$$

- Koska protoneilla on suurempi massa niiden kiihtyvyys on pienempää. Kun nopeus lähenee valonnopeutta elektronin massa kasvaa tekijällä:

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - V^2/c^2}$$

- Samalla säteilyn taajuus kasvaa tekijällä γ^2 ja säteily puristuu kapeaan kartioon jonka kulma on $\theta=1/\gamma$. Kun $\gamma \gg 1$ puhutaan synkrotronisäteilystä.



Synkrotroniemissio II

- Säteily tulee meille vain väliltä A-B kuvassa. Fotonit lähtevät pisteestä B myöhemmin kuin pisteestä A ja saapuvat perille myöhemmin:

$$\Delta t(1 - V/c) \approx \Delta t/(2\gamma^2) \sim 1/(\gamma^2 \nu_L)$$

- Suurin osa säteilystä saapuu taajuudella, missä $\nu_L \sim 1/\Delta t$.

$$\nu_C = \frac{3}{2}\gamma^2 \nu_L = 4.2\gamma^2 \left(\frac{B}{1\text{Gauss}} \right) \text{MHz}$$

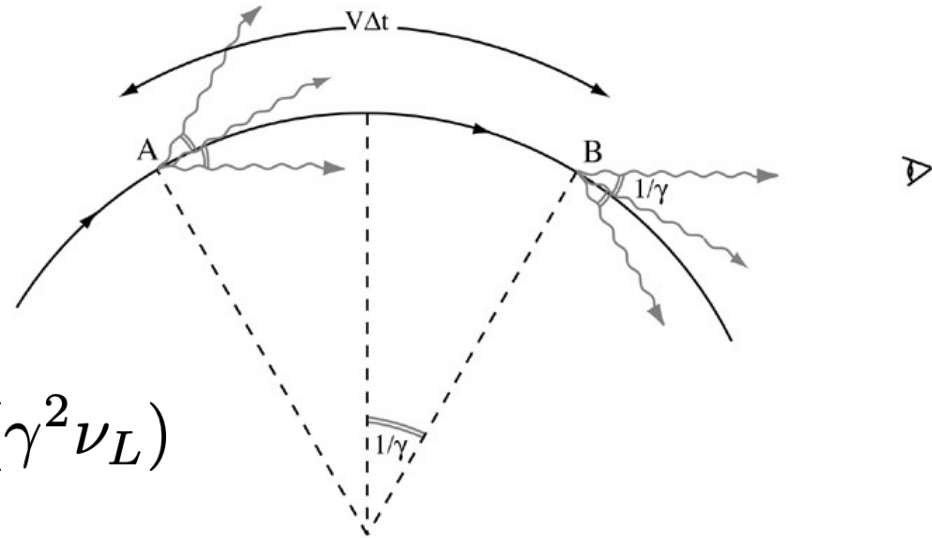


Fig 9.7 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Synkrotroniemissio III

- Voimme arvioida kuinka nopeasti keskimääräinen elektroni menettää energiaansa:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3}\sigma_T c U_{\text{mag}} \gamma^2$$

$$t_{1/2} = \frac{E}{2} \left| \frac{dt}{dE} \right| \approx 34 \left(\frac{10^{-5} \text{ Gauss}}{B} \right)^{3/2} \left(\frac{10^9 \text{ Hz}}{\nu} \right)^{1/2} \text{ Myr}$$

- Tyypillisille magneettikentille $B=10^{-5}$ Gauss ja $\nu=5$ GHz, $t_{1/2}=10$ miljoonaa vuotta. Korkeamman taajuuden optisessa ja röntgenissä synkrotronisäteilylle puoliintumisaika on vain $t_{1/2}=10^3-10^4$ vuotta.
- Kohteissa usein magneettinen energia ja elektronien emittoima energia on tasapainossa: $U_{\text{mag}} \approx U_e$.



Superluminaarinen liike I

- Käyttäen interferometrisiä VLBI havaintoja voimme suoraan mitata kaasun liikkeitä kvasaareissa.
- Monissa kohteissa kaasu on jakautunut useaan pienempään rakenteeseen ('bloppiin') ja lisäksi näiden massakeskittymien liike taivaalla on usein näennäisesti superluminaarista, $v \approx 3-50c$.

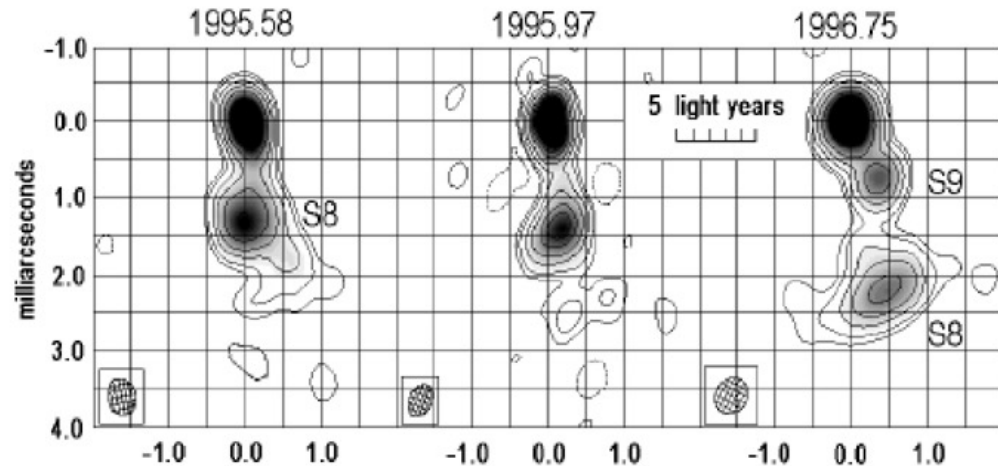


Fig 9.10 (G. Denn) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Radio-karttoja BL Lac kohteesta



Superluminaarinen liike II

- Havaitaan kohdetta joka liikkuu kulmassa θ näkösäteeseen suhteen. Havaintojen välinen aika pisteen S ja T välillä on:

$$\Delta t_{\text{obs}} = \Delta t(1 - V \cos \theta/c)$$

- Näennäinen nopeus taivaalla:

$$V_{\text{obs}} = \frac{V \sin \theta}{1 - V \cos \theta/c}$$

- Kun näennäinen nopeus taivaalla $5-10c$, liike $\gamma=5-10$.

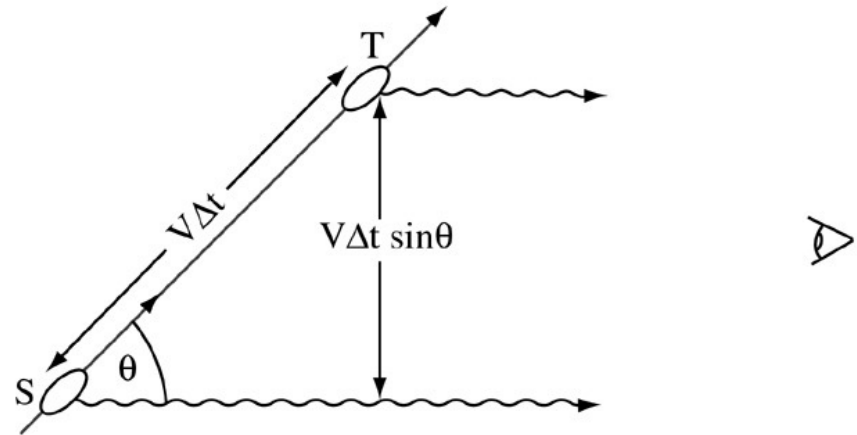
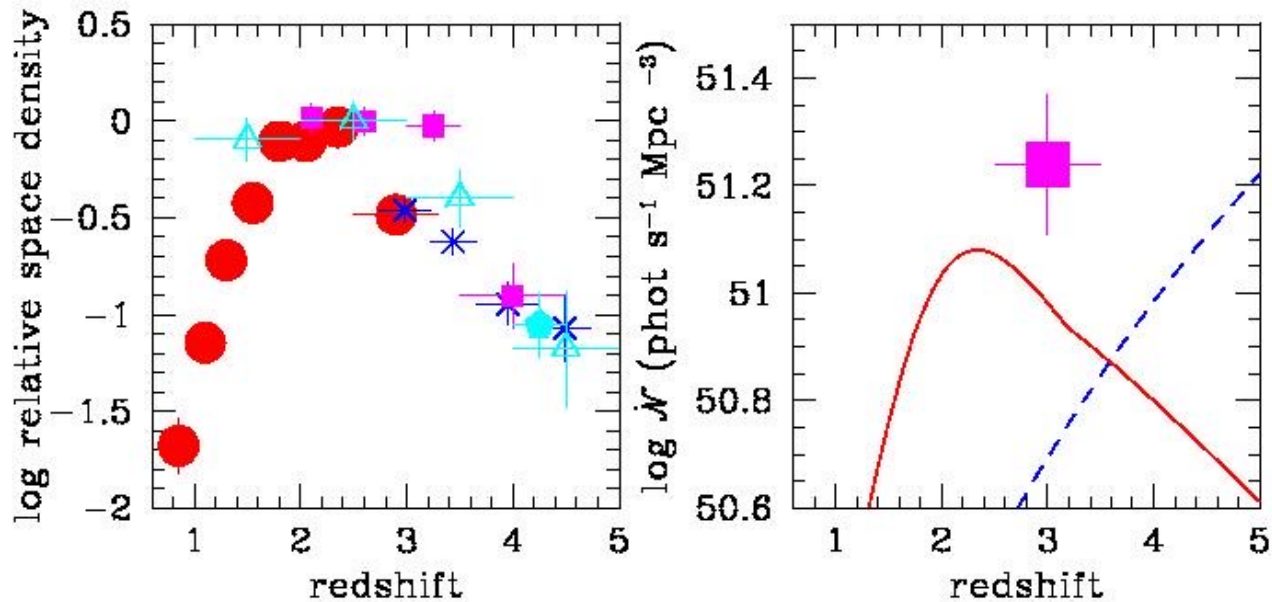


Fig 9.11 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Kohti tulevan suihkun valo sinisiirtyy ja kirkastuu, loittonevan suihkun valo punasiirtyy ja himmenee. Kirkkausero on noin $(2\gamma)^4 \approx 10^4-10^6$, kun $\gamma \approx 5-10$.



Kvasaarien jakauma punasiirtymän funktiona

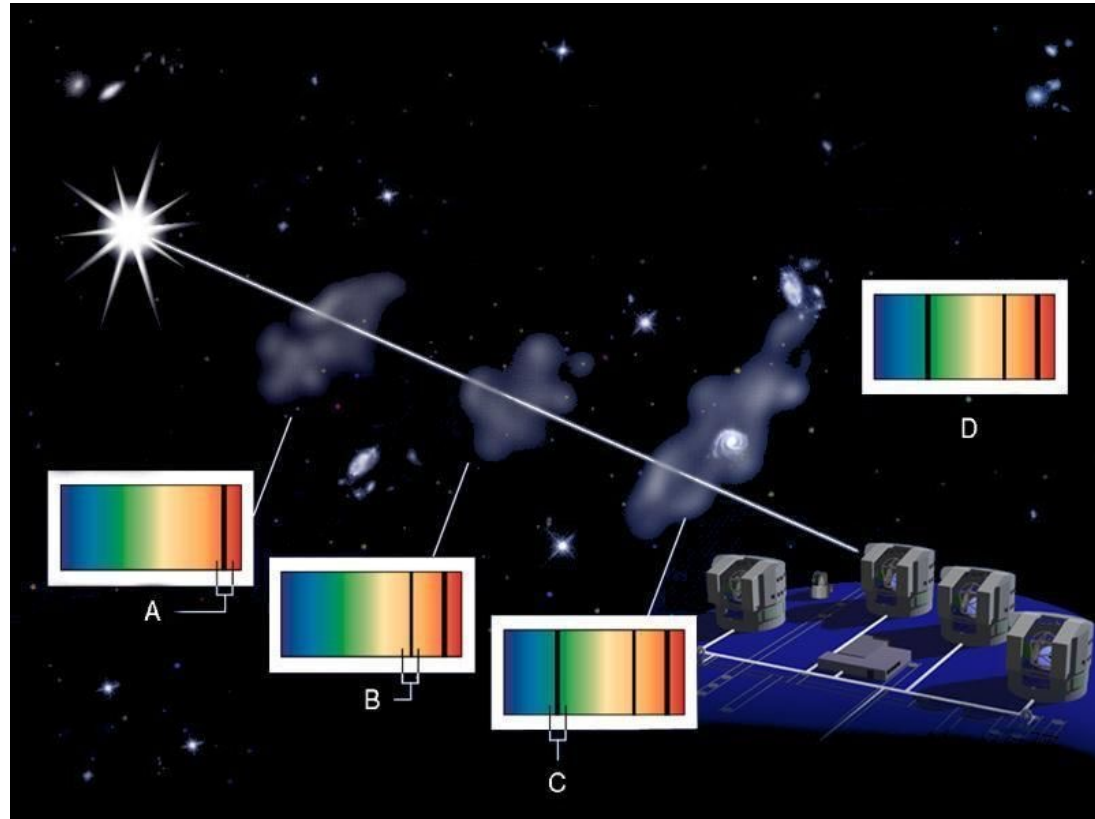


- Kvasaarien lukumäärä per mukana-liikkuva tilavuus ('comoving-density') oli huipussaan punasiirtymillä $z \approx 2-3$. Tänä päivänä yksi galaksi miljoonasta on kvasaari, kun punasiirtymällä $z \approx 3$ noin yksi tuhannesta oli kirkas kvasaari. Ehkä kaikki massiiviset galaksit olivat jossain vaiheessa lyhyen hetken kvasaareja \rightarrow duty cycle on/off.



9.4 Kvasaareiden absorptiojärjestemät

- Tutkimalla kvasaareiden absorptioviivoja voidaan selvittää meidän ja kvasaarin välissä olevan kaasun ominaisuuksia.
- Kvasaarit ovat hyvin kirkkaita ja kaukana, joten toimivat hyvin ”taskulamppuina”, jotka valaisevat keilan avaruuden läpi.





Kvasaareiden lähellä oleva absorboiva kaasu

- Joistakin kvasaareista on löydetty punasiirtyneitä ja epäsymmetrisiä absorptioviivoja (P Cygni tyyppin viivoja), jotka viittaavat siihen että kaasua virtaa ulos näistä kvasaareista nopeudella $v \approx 0.1c$.
- Vahvimmat viivat tulevat yleensä useasti ionisoituneista ioneista, kuten SiIV, CIV, NV, OVI, nämä viivat vaativat voimakkaan säteilykentän ja esim. vedyn $H\alpha$ ja magnesiumin MgII viivoja havaitaan harvemmin.
- Vain radiohiljaisissa kvasaareissa havaitaan absorptiota. Radiokvasaareilla todennäköisesti ei ole kylmää kaasua, joka voi aikaansaada absorptiota. Absorptioviivoja havaitaan 3-10% kohteista, ehkä kaasun rakenne on epätasaista ja siksi vain pienessä osassa kohteita nähdään absorptiota.



Intergalaktisen kaasun ominaisuudet

- Suurin osa kvasaarin spektrissä olevista absorptioviivoista syntyy kaasussa meidän ja kvasaarin välissä.
- Helpointa on havaita alkuaineita, joiden spektriviivat esiintyvät selkeissä ryppäissä, esim. vedyn Lyman sarja, MgII ja CIV viivat.

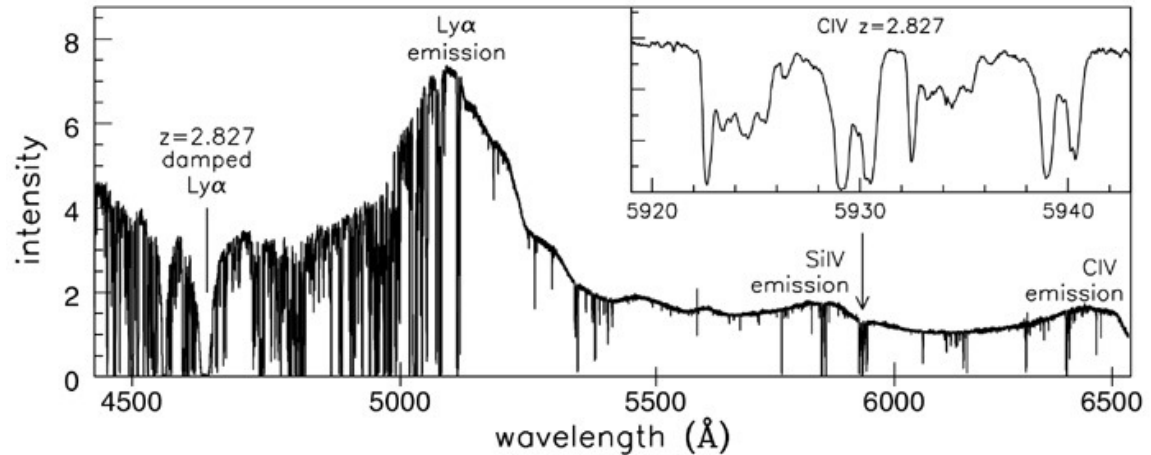


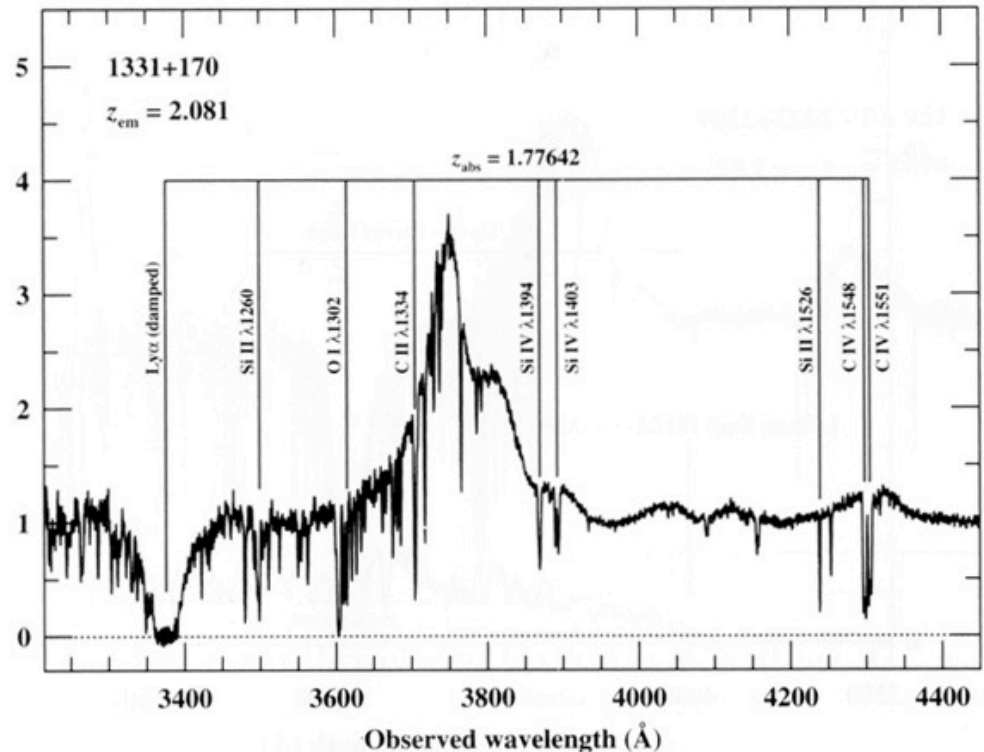
Fig 9.12 (L. Lu, M. Rauch) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Havaitsemalla viivan tietyllä punasiirtymällä, voidaan yrittää etsiä myös muiden alkuaineiden absorptioviivoja samalla punasiirtymällä. Esim. DLA, SiIV ja CIV viivat ovat kuvassa samalla punasiirtymällä.



Damped Lyman- α systeemit

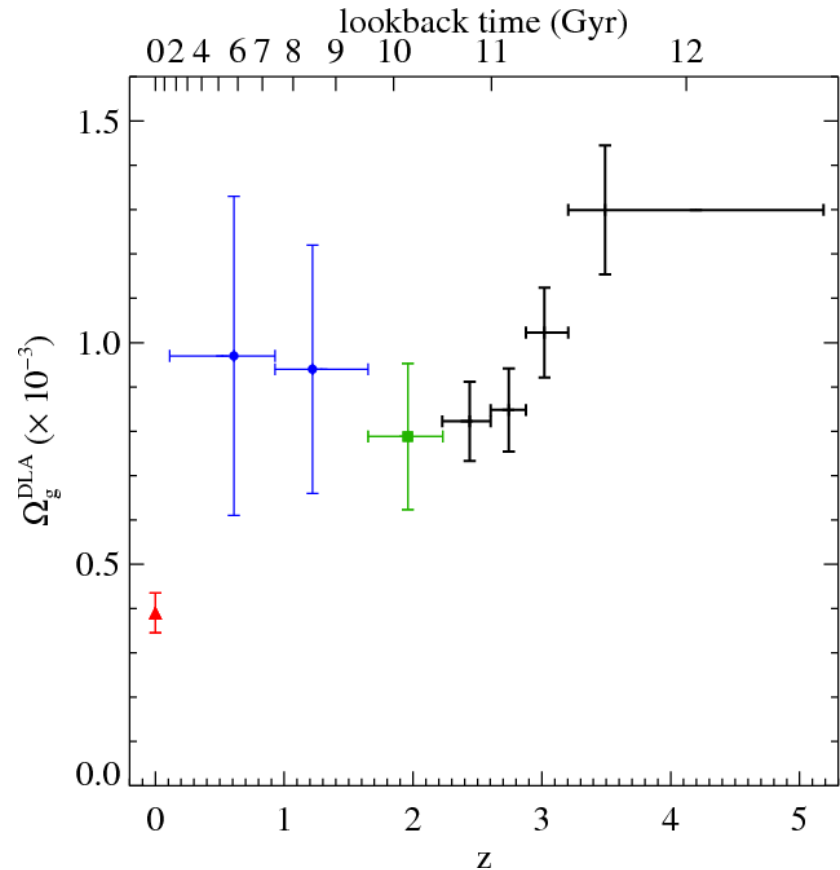
- DLA-systeemeissä on kaikista syvin absorptio, sprektriivi on optisesti paksu ja vastaa pylvästiheyttä $N(\text{HI}) \approx 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$.
- Nämä systeemit koostuvat neutraalista kaasusta ja absorptio on aiheutunut kun kvasaarin valosäde on kulkenut esim. protogalaksin kaasukiekon läpi.





Neutraalin kaasun määrä maailmankaikkeudessa

- Suurin osa maailmankaikkeuden neutraalista kylmästä kaasusta sijaitsee DLA-systeemeissä ja havaitsemalla näitä voimme arvioida kylmän kaasun kehitystä maailmankaikkeudessa.
- Kylmän kaasun määrä on ollut melko vakio punasiirtymälle $z \approx 1$ asti, jonka jälkeen se on pienentynyt. Samoin tähtiensynty oli huipussaan $z \approx 1$ ja on pienentynyt sen jälkeen.





Metallipitoisuuden kehitys maailmankaikkeudessa

- Havaitsemalla DLA-järjestelmien yhteydessä olevia metallijärjestelmiä voimme arvioida metallipitoisuuden kehitystä maailmankaikkeudessa.
- Tyypillisesti metallipitoisuus on noin $0.1 Z_{\odot}$ ja pitoisuudet kasvavat jonkun verran lähestyttäessä $z=0$.

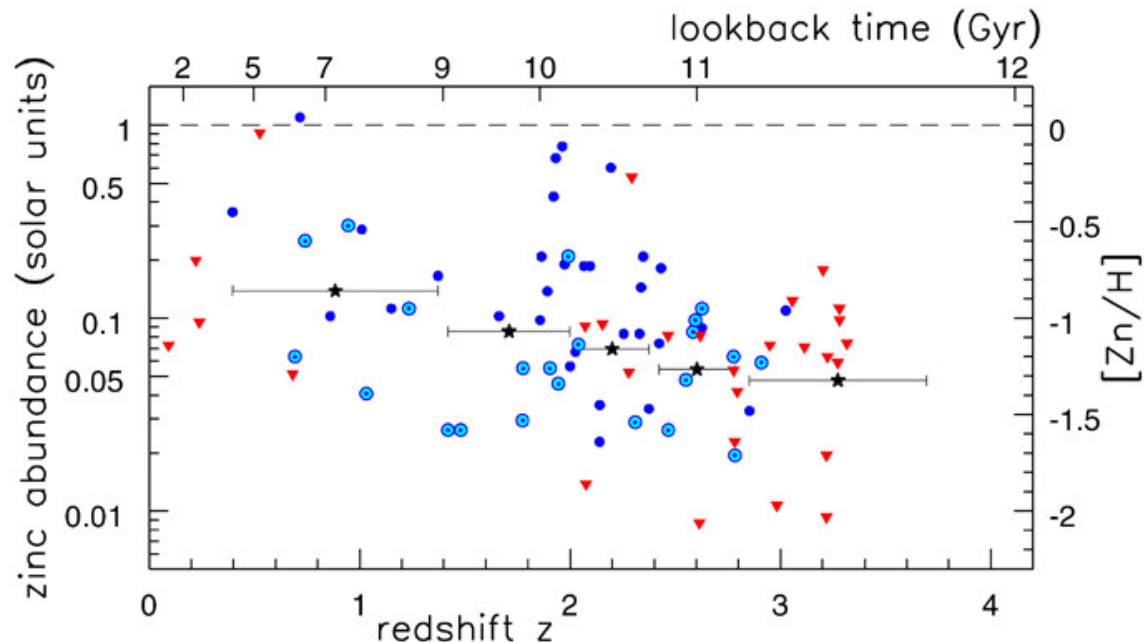


Fig 9.13 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



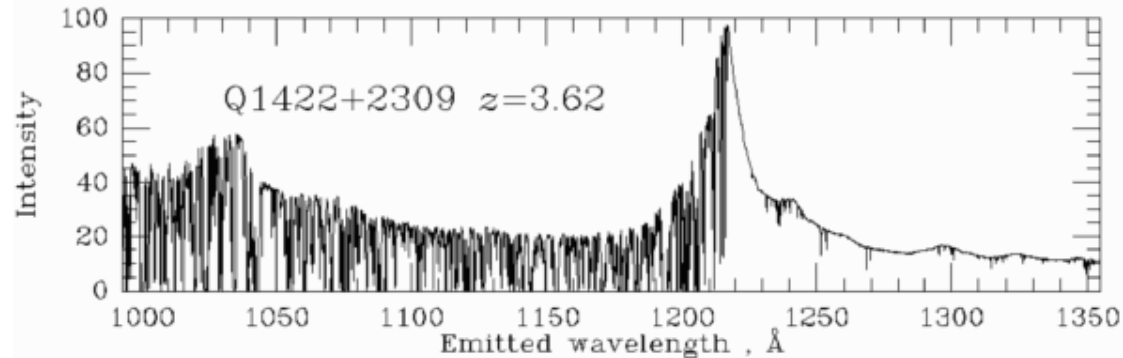
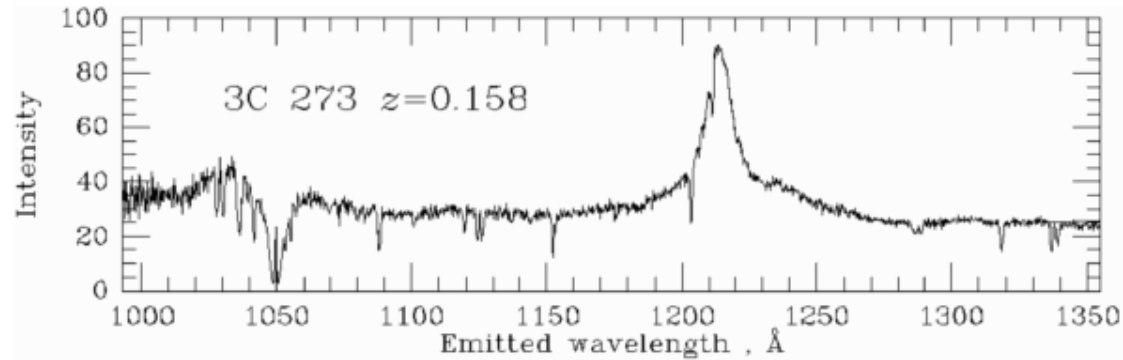
Lyman limit järjestelmät

- Lyman limit järjestelmissä melkein kaikki Lyman fotonit absorboituvat ja järjestelmät ovat edelleen enimmäkseen neutraaleja, vastaavat pylvästiheyttä $N(\text{HI}) \approx 2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$. Tätä pienimmillä pylvästiheyksillä UV-säteily pääsee pilven sisään ja havaitsemme ionisoituneita metallien viivoja.
- Kun olemme havainneet DLA tai Lyman-limit systeemin voimme yrittää havaita sitä vastaavan galaksin. Usein tämä on hyvin vaikeata koska on vaikeata nähdä himmeä galaksi lähellä kirkasta kvasaaria, mutta niissä muutamissa tapauksissa missä tämä on onnistunut, galaksissa on yleensä suhteellisen paljon tähtiensyntyaktiivisuutta ja metallit sijaitsevat galaksin halossa noin 25-50 kpc/h päässä galaksin ytimestä.



Lyman- α forest

- Matalimman absorption järjestelmiä kutsutaan termillä Lyman- α forest. Pylvästiheys on $N(\text{HI}) \leq 3 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ja mitä suuremmille punasiirtymille katsomme sitä tiheämmässä Lyman- α forestin viivat ovat.
- Nämä järjestelmät ovat hyvin pienimassaisia vetypilviä.





Mitä opimme?

1. Kaikissa aktiivisissa galakseissa: Seyferteissä, radio-galakseissa, kvasaareissa ja blasaareissa, energianlähteenä on niiden ytimessä olevat supermassiiviset mustat aukot.
2. Tyypin I ja tyypin II aktiivisten galaksien ominaisuudet riippuvat siitä missä kulmassa havaitsemme galaksin.
3. Eddingtonin luminositeetti on maksimiluminositeetti, aktiivisten galaksien radiosäteily on ei-termistä synkrotronisäteilyä ja useassa kohteessa havaitaan superluminaarista liikettä.
4. Kvasaareiden absorptiospektriviivoja havaitsemalla saadaan tietoa neutraalin kaasun ja metallipitoisuuden kehityksestä maailmankaikkeudessa.