



# **Galaksit ja kosmologia**

## **FYS2052, 5 op, syksy 2023**

E207 Physicum

**Luento 9: Aktiiviset galaksit,**  
**06/11/2023**



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita I

---

- **Kalvo 3:** Mustan aukon Schwarzschildin säde saadaan kaavasta:

$$R_S = \frac{2GM_{\text{MBH}}}{c^2} \approx 3 \times \frac{M_{\text{BH}}}{M_{\odot}} \text{ km}$$

- **Kalvo 3:** AGN:ien spektriviivoille on tunnuksenomaista, että spektriviivat ovat melko leveitä, joka viittaa suuriin nopeuksiin ja että monella spektriviivalla on korkea ionisaatio-aste, esim. typen NV- ja hapen OVI-viivat, jotka vaativat hyvin korkeaaenergistä säteilyä virittyäkseen.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita II

---

- **Kalvo 4:** Korkeat ionisaatioasteet viittaavat voimakkaasti AGN-aktiivisuuteen, matalammat ionisaatioasteet (esim. LINER) on mahdollista saavuttaa myös tähtiensynty-prosessien kautta (esim. massiiviset tähdet).
- **Kalvo 6:** Voimakas radio-säteily on vahva merkki suihkuaktiivisuudesta, jota esiintyy useilla AGN:eillä, mutta ei kuitenkaan läheskään kaikilla. Tavallisilla galakseilla radio-alueen luminositeetti on yleisesti hyvin vähäistä, esim. Linnunradalla vain  $L_{\text{radio}} = 2500 L_{\odot}$ .
- **Kalvo 6:** AGN:ien suihkut ovat kirkkaita radio-alueilla, mutta jotkut suihkut säteilevät myös optisella- ja röntgen-alueella.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita III

---

- **Kalvo 9:** Tyypillisesti kvasaareiden ”hyötysuhde” on noin 10%, eli tämä osuus mustaan aukkoon putoavasta massasta muuttuu energiaksi. Teoreettisesti maksimi-hyötysuhde voi olla ~42%, jos mustalla aukolla on maksimi spin. Tähdissä tapahtuvan vety-vety fuusion hyötysuhde on vain ~0.7%.
- **Kalvo 10:** Blasaareiden heikot spektriviivat johtuvat siitä, että suihkun synkrotronisäteily peittää alle kaiken muun säteilyn (suihku tulee suoraan tai lähes suoraan kohti).



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IV

---

- **Kalvo 11:** Event Horizon havainnot tehtiin yhdistämällä radio-kaukoputkia ympäri maailman, jolloin saatiin interferometri, jonka erotuskyky vastaa lähes Maapallon kokoista kaukoputkea.
- **Kalvo 11:** Linnunradan musta aukko Sagittarius A\* on noin 2000 kertaa lähempänä kuin M87:n musta aukko, mutta se on myös noin 2000 kertaa kevyempi, joten tapahtumahorisonttien kulmakoko taivaalla on lähes sama. Sagittarius A\*:n havaitseminen on haastavampaa, etualan häiriöitä on enemmän ja lisäksi säteily mustan aukon läheisyydessä muuttuu vain minuuttien aikaskaalassa (M87:n tapauksessa muutokset ovat viikkojen aikaskaaloissa). EHT tekee yleensä noin ~10 minuuttisia havaintoja.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita V

---

- **Kalvo 12:** Arvio mustan aukon massalle saadaan, jos havainnoista saadaan esim. kaasun tai tähtien nopeudet ja etäisyydet mustasta aukosta:

$$V^2(r) = \frac{GM(< r)}{r} \Rightarrow M(< r) = \frac{rV^2(r)}{G}$$

- **Kalvo 12:** Linnunradan mustan aukon massan tarkasta määrittämisestä myönnettiin Fysiikan Nobelin palkinto vuonna 2020 (Reinhard Genzel ja Andrea Ghez).



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VI

---

- **Kalvo 13:** Yhtenäismallin mukaan kaikki AGN:t on pohjimmiltaan samanlaisia. Havaitut erot johtuvat pitkälti siitä missä kulmassa havaitsemme niitä. Lähellä mustaa aukkoa kaasun tiheys ja nopeudet ovat suurempia ja näemme leveitä 'sallittuja' spektriviivoja (BLR). Kauempana mustasta aukosta kaasun on tiheys ja nopeudet ovat pienempi' ja havaitsemme 'kiellettyjä' spektriviivoja (NLR). Astrofysiikan peruskurssi II:lla käsitellään tarkemmin 'sallittuja' ja 'kiellettyjä' spektriviivoja ja niiden syntyä.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VII

---

- **Kalvo 15:** Eddingtonin luminositeetissa oletetaan, että kaasu putoaa mustaan aukkoon täysin pallomaisesti ja ainut gravitaatiota vastustava voima on säteilypainne vapaisiin elektroneihin (kaasu on täysin ionisoitunutta). Vapaan elektronin vaikutuspinta-ala on niin kutsuttu Thomsonin ala. (Astrofysiikan peruskurssi II:lla tarkemmin tästäkin).
- **Kalvo 15:** Säteilypainne vaikuttaa elektroneihin, mutta painovoima lähinnä protoneihin, koska  $m_p/m_e \sim 1836$ . Elektrostaattisen voiman takia protonit ja elektronit pysyvät yhdessä.





# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita VIII

- **Kalvo 15:** Säteilypaineen yksikkö:

$$[F_{\text{rad}}] = \frac{[\text{m}^2\text{W}]}{[\text{m}^2\text{m/s}]} = \frac{[\text{Ws}]}{[\text{m}]} = \frac{[\text{Js}]}{[\text{sm}]} = \frac{[\text{Nm}]}{[\text{m}]} = \text{N}$$

- **Kalvo 15:** Eddingtonin luminositeetti on maksimiluminositeetti kun kaasu putoaa mustaan aukkoon pallomaisesti:

$$F_{\text{grav}} = F_{\text{rad}} \Rightarrow \frac{GMm_p}{r^2} = \frac{\sigma_T L}{4\pi r^2 c} \Rightarrow L_{\text{edd}} = \frac{4\pi GMm_p c}{\sigma_T}$$

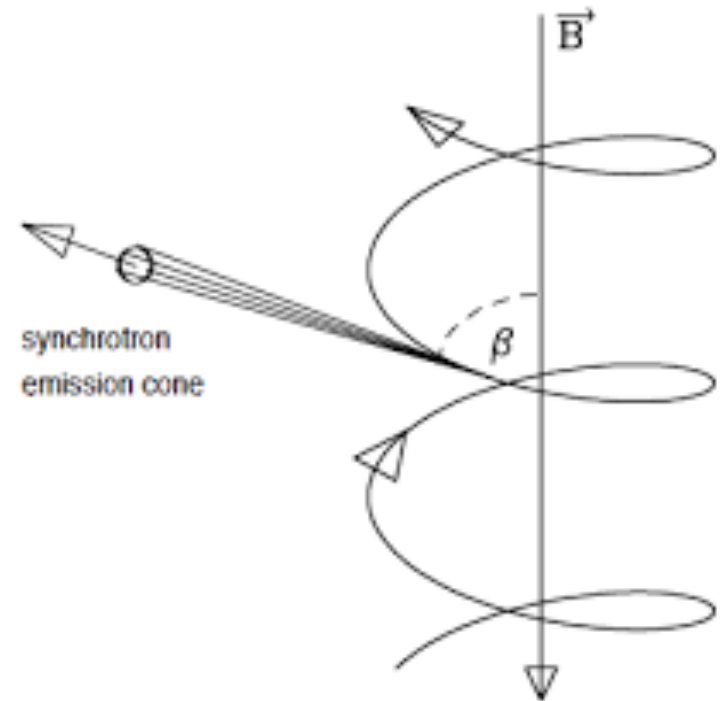


# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita IX

- **Kalvo 16:** Synkrotroniemissio: Varatun hiukkasen spiraalimaista liikettä magneettikentässä.

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{q^2 |\mathbf{a}|^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

- **Kalvo 16:**  $q$ =sähkövaraus,  
 $\mathbf{a}$ =kiihtyvyys  
 $c$ =valonnopeus  
 $\epsilon_0$ =tyhjiön permittiivisyys





# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita X

---

- **Kalvo 18:** Synkrotroniemissio. Magneettikentän energiatiheys SI-yksiköissä:

$$U_{\text{mag}} = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

- **Kalvo 18:** B=magneettivuon tiheys  
 $\mu_0$ =tyhjiön permeabiliteetti
- **Kalvo 18:** Korkeimmilla taajuuksilla (optinen ja röntgen) elektronien synkronisäteily-elinikä on hyvin lyhyt. Elektronien kiihdytys täytyy tapahtua ydinalueiden ulkopuolella (esim. shokeissa), muuten säteilevät alueet (~kpc) eivät voisi sijaita kaukana ydinalueesta. Huom. 1 Gauss =  $10^{-4}$  T.



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XI

---

- **Kalvo 20:** Havaintojen välinen aika-ero:

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

- **Kalvo 20:** Näennäinen nopeus taivaalla:

$$V_{\text{obs}} = \frac{x_{\text{sky}}}{\Delta t_{\text{sky}}} = \frac{V \Delta t \sin \theta}{\Delta t(1 - V \cos \theta/c)} = \frac{V \sin \theta}{1 - V \cos \theta/c}$$

- **Kalvo 20:** Kohti tulevan suihkun säteily sinisiirtyy ja voimistuu voimakkaasti. Usein näyttääkin siltä, että suihkuja on vain yhdellä puolella. Kirkkausero:  $\sim (2\gamma^4) \sim 10^4 - 10^6$



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XII

---

- **Kalvo 21:** Suurin osa massiivisista galakseista olivat kvasaareita jossain vaiheessa. Kvasaareilla on oletettavasti niin kutsuttu 'duty-cycle' aktiivisuus-sykli. Suurimman osan ajasta kvasaari on off-tilassa, on-tilassa ehkä vain noin  $10^{-5}$  osa kvasaarin eliniästä.
- **Kalvo 24:** Havaitsemalla kvasaareiden spektreistä intergalaktisen kaasun spektriviivoja voimme päätellä miten esim. maailmankaikkeuden metallipitoisuus on kehittynyt.
- **Kalvo 25:** Pylvästiheys mittaa paljonko atomeja tai molekyyliä on pylväessä jonka pinta-ala on  $\text{cm}^2$  ja joka ulottuu kohteeseen asti, esim.  $N_{\text{H}}=10^{21}$  vety-atomia/ $\text{cm}^2$ .



# Selventävä lisämateriaali ja laskujen välivaiheita XIII

---

- **Kalvo 27:** Maailmankaikkeuden metallipitoisuus kasvaa lähestyttäessä nykypäivää, mutta eri kohteiden väliset erot voivat olla hyvin suuria. Tähdet tuottavat metalleja, mutta ne jakautuvat epätasaisesti ympäri maailmankaikkeutta.
- **Kalvo 28:** Pienimmän pylvästiheyden järjestelmät muodostavat Lyman- $\alpha$  metsän (Lyman- $\alpha$  forest) ja näitä pilviä näkyy sitä enemmän mitä korkeammalle punasiirtymälle havaitaan, eli mitä pitemmän matkan näkösäde kulkee.