



Linnunradan rakenne

FYS2053, 5 op, syksy 2022

D123 Exactum

**Luento 3: Tähtienvälinen ekstinktio,
19/09/2022**



Tällä luennolla käsitellään

1. Ekstinktiöhavainnot Linnunradassa ja yksinkertainen tasomalli Linnunradalle.
2. Tähtienvälisen aineen hiukkasten teoriaa. Hiukkasten synty, ekstinktiokaava, valon sirottuminen ja absorptio.
3. Tähtienvälinen punertuminen. Värieksessin määritelmä ja soveltaminen.
4. Ekstinkti-sovelluksia ja ekstinktion mittaaminen eri menetelmin.
5. Vastaa soveltuvin osin: **M:** sivut 35-46
S&E: sivut 149-163
B&M: sivut 131-143



3.1 Ekstinktio Linnunradassa



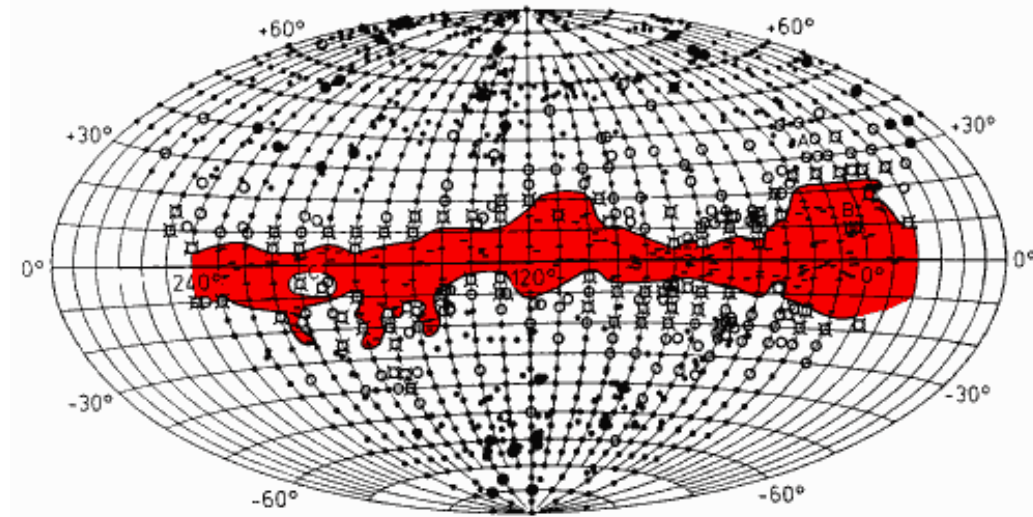
NGC 891

- Tähtienvälisessä avaruudessa on kaasun lisäksi hiukkasia (eng. interstellar grains), joiden kokonaismassa on tyypillisesti noin 1% tähtienvälisen kaasun massasta.
- Hiukkaset himmentävät hyvin tehokkaasti tähtien valoa ja kuten kaasu myös kiinteät hiukkaset ovat keskittyneet lähelle Linnunradan tasoa kerrokseen, jonka paksuus on vain noin ~ 100 pc.



Galaksihavainnot – Zone of Avoidance

- Hubble havaitsi galakseja 1934 ja huomasi, että tietyillä alueilla oli selvästi vähemmän galakseja.
- Laskemalla galaksien lukumäärä havaittuun rajamagnitudiin 20^m asti hän päätyi seuraavaan kaavaan, joka antaa galaksien lukumäärän galaktisen leveyden, b :n funktiona neliöastetta kohden:
- Kaava voimassa kun $|b| > 15^\circ$.



$$\log \bar{N}(20^m | b) = 2.115 - 0.15 \frac{1}{\sin b}$$

Alue Linnunradan tasossa jossa esiintyy keskimääräisesti vähemmän galakseja sai nimekseen: '**Zone of Avoidance**'.



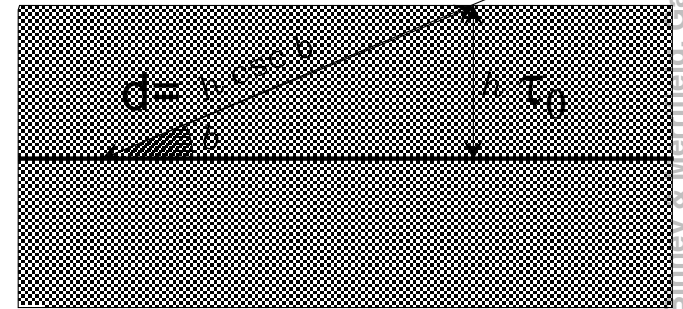
Tasomalli Linnunradalle I

- Havainnot voidaan yksinkertaisimmin selittää Linnunradan tasomallilla (eng. "plane parallel model") Tähtienvälinen aine sijaitsee ohuessa kiekossa jonka paksuus on h , tällöin valon kulkema matka kiekossa on:

$$\sin b = \frac{h}{d} \Rightarrow d = \frac{h}{\sin b} = h \operatorname{cosec} b$$

- Optinen paksuus on verrannollinen kuljettuun matkaan d : $\tau_\nu(x) = \int_0^x \rho(x') k_\nu(x') dx'$

$$I = I_0 e^{-\tau}, \quad \tau = \frac{\tau_0}{\sin b} = \tau_0 \operatorname{cosec} b$$





Tasomalli Linnunradalle II

- Ekstinktio voidaan lausua myös magnitudeissa:

$$\Delta m = -2.5 \log \frac{I}{I_0} = 2.5 \log e \cdot \tau = 1.086\tau$$

$$\Delta m(b) = 1.086\tau_0 \operatorname{cosec} b = \Delta m_0 \operatorname{cosec} b$$

- Tasaisesti taivaalle jakautuneille galakseille ja ilman ekstinktiota: galaksien lukumäärälle saadaan $N \propto r^3$, eli N verrannollinen tilavuuteen.

$$m - M = 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} \Rightarrow r \propto 10^{0.2m} \Rightarrow N \propto 10^{0.6m}$$

$$\log N(m|b) = 0.6m - 0.6 \cdot \Delta m_0 \operatorname{cosec} b + \text{const}$$

- Vertaamalla Hubblen kaavaa (kalvo 4) saadaan pystysuoralle ekstinktiolle Linnunradan napojen suunnassa: $\Delta m_0 = 0.^m25$, tarkempi nykyarvo on $\Delta m_0 = 0.^m4$.



Pimeät sumut ja ekstinktiiovaihtelut

- Yksityiskohtainen tarkastelu paljastaa että tähtienvälinen aine ei ole tasaisesti jakautunutta ja täten myös ekstinktiossa voi olla suuriakin paikallisia vaihteluita.
- Tähtienvälisen aineen pilvet ovat epäsäännöllisen muotoisia ja rakenne voi olla ”filamentti-maista”.
- Linnunradan tummissa kohdissa oleva ekstinktio syntyy osittain isoissa havaittavissa pilvissä, mutta noin kolmasosa ekstinktiosta tulee erittäin pienistä pilvirakenteista, joita on hyvin vaikea havaita suoraan.



Rho Ophiuchus alueen pilviä



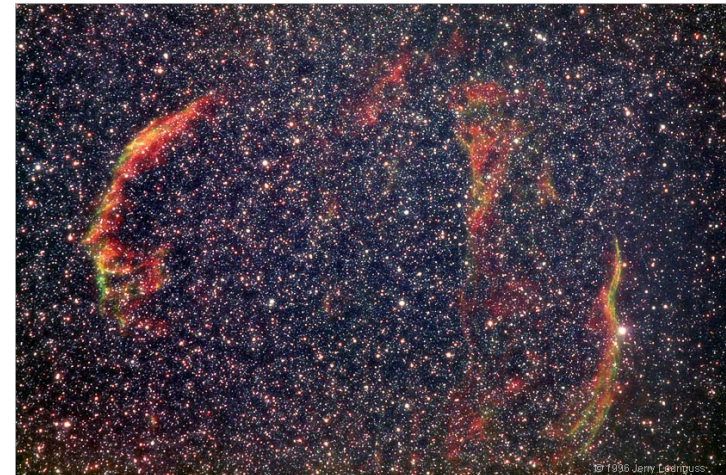
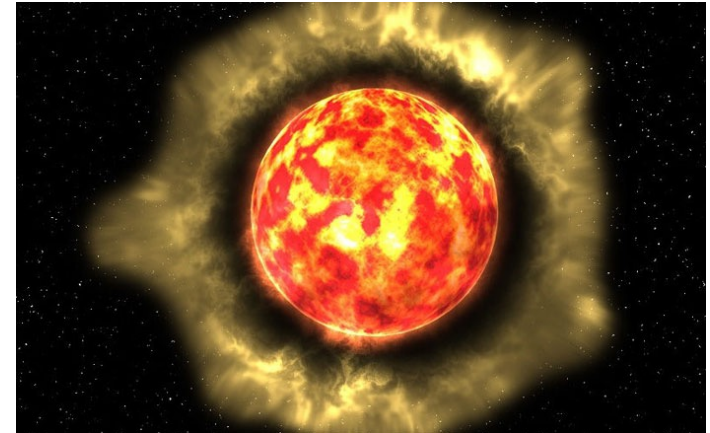
3.2 Tähtienvälisen aineen hiukkaset

- Tutkimalla ekstinktiota saadaan myös tietoa tähtienvälisen hiukkasten ominaisuuksista. Hiukkaset ovat kooltaan suunnilleen näkyvän valon aallonpituutta vastaavia. Hiukkaskoon perusteella olisi ehkä oikeampaa puhua ”tähtienvälisestä savusta” kuin ”tähtienvälisestä pölystä”.
- Tähtienväliset hiukkaset aiheuttavat ekstinktiota kahdella tavalla:
 1. Absorptiossa valoa imeytyy hiukkaseen, jossa se muuttuu lämpö-energiaksi. Hiukkasten lämpötila $T \approx 100$ K ja hiukkanen säteilee energiansa takaisin pääsääntöisesti infrapuna-alueella.
 2. Sirottumisessa valoa sirotaan alkuperäisestä suunnastaan kaikkiin eri suuntiin, joten intensiteetti alkuperäisessä suunnassa pienenee.
- Myös tähtienvälinen kaasu aiheuttaa vähäistä absorptiota kapeissa spektriviivoissa, mutta kokonaisekstinktion kannalta kaasulla on vain vähäinen merkitys.



Hiukkasten syntymekanismeja

- Hiukkasten synnyn kaksi päämekanismia:
 1. Punaisten jättiläistähtien ulko-osissa lämpötilat ovat varsin alhaisia ja niissä on runsaasti happea ja hiiltä (eli metalleja). Otollinen paikka hiukkasten synnylle, jotka leviävät avaruuteen tähtituulien kautta.
 2. Supernovaräjähdyksissä tähden ytimestä sinkoutuu ulos runsaasti raskaita aineita suurella nopeudella. Tämä aine törmää aikanaan ympäröivään tähtienväliseen aineeseen, jossa voi muodostua havaittuja pölyhiukkasia.





Kaava tähtienväliselle ekstinktiolle I

- Oletetaan että hiukkasten koko, taitekerroin ja lukumäärä cm^3 :ssä tunnetaan ja vielä yksinkertaisuuden vuoksi että kaikki hiukkaset ovat samansuuruisia palloja, säde= a cm. Tällöin hiukkasen todellinen ekstinktio-vaikutusala C_{ext} on:

$$C_{\text{ext}} = Q_{\text{ext}} \pi a^2$$

- Tekijä πa^2 on geometrinen vaikutusala ja kertoimen Q_{ext} laskemista käsitellään kalvosta 12 eteenpäin. Hiukkasten lukumäärätiheys on N [yksikkö cm^{-3}]. Tällöin intensiteetin I pienenemiselle matkalla dl ja optiselle paksuudelle saadaan lausekkeet:

$$dI = -INQ_{\text{ext}} \pi a^2 dl$$

$$d\tau = NQ_{\text{ext}} \pi a^2 dl \quad \text{ja} \quad dI = -Id\tau$$



Kaava tähtienväliselle ekstinktiolle II

- Integroimalla etäisyydelle r asti saadaan:

$$\tau(r) = Q_{\text{ext}} \pi a^2 \int_0^r N(l) dl = Q_{\text{ext}} \pi a^2 \bar{N} r$$

- \bar{N} on nyt keskimääräinen hiukkastiheys. Intensiteetille I ja ekstinktiolle A saadaan seuraava yhteys:

$$I = I_0 e^{-\tau(r)} = I_0 10^{-0.4A(r)} \quad \text{kaavasta } A(r) = -2.5 \log \frac{I}{I_0}$$

- Ekstinktio A on nyt magnitudi-yksiköissä. Käyttäen $\tau(r)$:n lauseketta saadaan tähtienväliselle ekstinktiolle kaava:

$$A(r) = 1.086 \tau(r) = 1.086 Q_{\text{ext}} \pi a^2 \int_0^r N(l) dl = 1.086 Q_{\text{ext}} \pi a^2 \bar{N} r$$



Sirottuminen ja absorptio I

- Edellä kaavoissa käytetty vaikutuskerroin Q_{ext} voidaan laskea pallomaisille hiukkasille, joiden säde on a ja kompleksinen taitekerroin $m=n-ik$ on annettu). Yleisesti pätee:

$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{sca}}$$

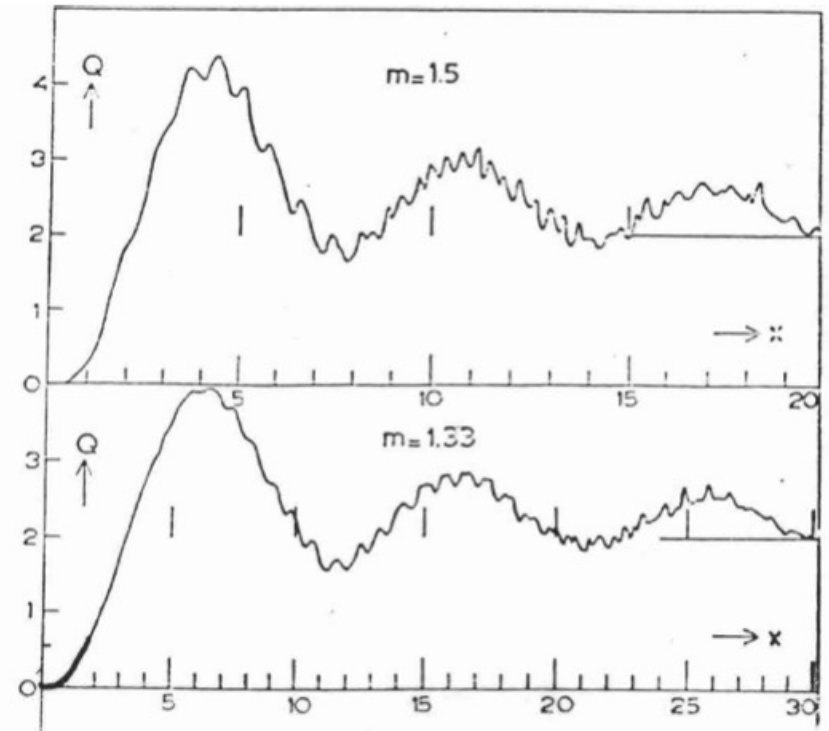
- Q_{abs} = absorptioin vaikutuskerroin ja Q_{sca} = sironnan vaikutuskerroin
- Hyvin pienille hiukkasille ($x \ll 1$) saadaan rajatapauksena kaavat (Rayleighin sironta, Astrofysiikan peruskursseilla enemmän tästä):

$$Q_{\text{abs}} = -4x \cdot \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$$
$$Q_{\text{sca}} = \frac{8}{3} x^4 \cdot \text{Re} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2$$
$$x = \frac{2\pi a}{\lambda}$$
$$m = n + ik$$



Sirottuminen ja absorptio II

- Mielivaltaisen kokoisille hiukkasille saadaan sarjakehitelmä (Mie & Debye, 1908), joka suppenee sitä hitaammin mitä suurempi x on.
- Oheisessa kuvassa on esitetty Q_{ext} x :n funktiona taitekertoimille $m=1.5$ ja $m=1.33$. Hyvin suurille hiukkasille ($x \gg 1$) saadaan $Q_{\text{ext}}=2$.
- Puhtaasti geometrisesti olisi odotettavissa $Q_{\text{ext}}=1$, mutta valon diffraktio hiukkasen reunoilla aiheuttaa Q_{ext} :n kaksinkertaistumisen (Babinet'n periaate).



Hyvin pienille x , eli suurille aallonpituuksille λ , $Q \rightarrow 0$.



Arvio hiukkasten massatiheydelle

- Linnunradan tähtien liikkeistä ja massamalleista voidaan päätellä että tähtienvälisen aineen tiheys Linnunradan tasossa voi olla korkeintaan $\sim 3 \times 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$, joka vastaa noin 2 vetyatomia kuutiosenttimetrissä.
- Havaittu $A_V = 1 \text{ mag/kpc}$ ekstinktio pitää siis tuottaa varsin pienellä ainemäärällä. Alla olevasta kaavasta voidaan arvioida hiukkasten lukumäärä: $a \approx \lambda$, $1 \text{ kpc} = 3 \times 10^{21} \text{ cm}$, yhdelle hiukkaselle $\rho_{\text{part}} = 1 \text{ g/cm}^3$.

$$A(r) = 1.086\tau(r) = 1.086Q_{\text{ext}}\pi a^2 \int_0^r N(l)dl = 1.086Q_{\text{ext}}\pi a^2 \bar{N}r$$

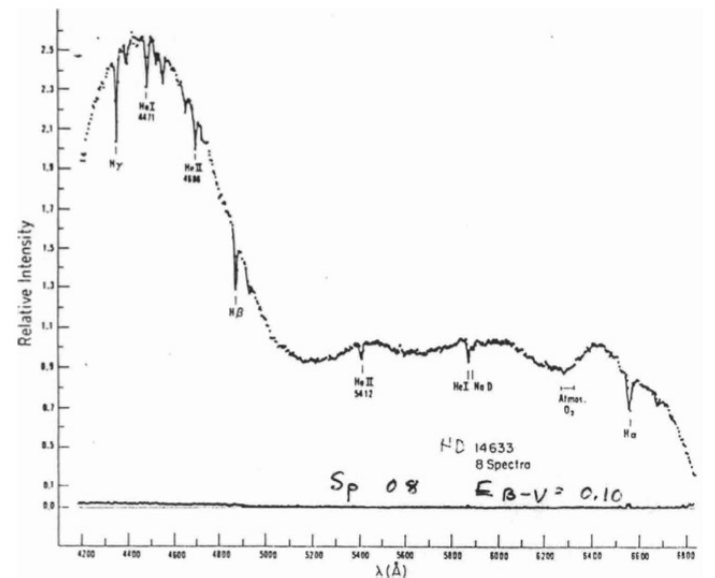
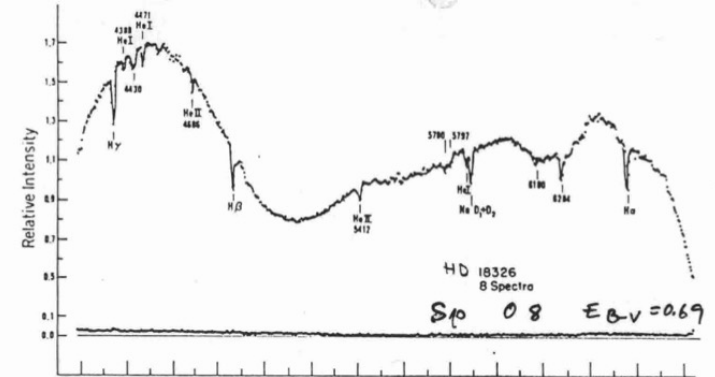
$$\bar{N} = (\pi a^2 r)^{-1} = (\pi \times (5 \cdot 10^{-5} \text{ cm})^2 \times 3 \cdot 10^{21} \text{ cm})^{-1} = 4 \cdot 10^{-14} \text{ part cm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{total}} = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_{\text{part}} \bar{N} = 2 \times 10^{-26} \text{ g/cm}^3 \quad \text{kaasu-pöly suhde=100:1}$$



3.3 Tähtienvälinen punertuminen

- Tähtienvälinen ekstinktio riippuu valon aallonpituudesta. Se kasvaa punaisesta UV-alueelle mentäessä likimain $\propto \lambda^{-1}$ lineaarisena funktiona.
- Tästä seuraa se, että suuren tähtienvälisen ekstinktion omaavien tähtien valo on punaisempaa kuin tähden spektrin perusteella olisi pääteltävissä.
- Kuvassa on kaksi saman spektriluokan omaavaa tähteä, mutta ylempi tähti on merkittävästi punertuneempi, joka näkyy vähäisemmässä sinisen alueen fluksissa.





Värieksessin määritelmä

- Tähdennäennäinen suuruusluokka saadaan tutusta kaavasta, A_V on V-kaistan ekstinktio magnitudeissa.

$$m_V = M_V + 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + A_V$$

- Tähdennhavaittu väri-indeksi $(B-V)_{\text{obs}}$ saadaan vastaavasti:

$$(B - V)_{\text{obs}} = M_B - M_V + A_B - A_V$$

$$(B - V)_{\text{obs}} = (B - V)_0 + E_{B-V}$$

- $(B-V)_0$ on tähden ominaisväri ja se riippuu tähden spektriluokasta.
- E_{B-V} on tähden värieksessi ja se riippuu tähtienvälisestä ekstinktiosta, ja on täten eri suuruinen eri suunnissa.



Värieksessin soveltaminen I

- Erittäin tärkeä luku on absorption A_V suhde värieksessiin E_{B-V} :

$$R = \frac{A_V}{E_{B-V}} = \frac{A_V}{A_B - A_V}$$

- R ei riipu havaitun tähden ominaisuuksista eikä myöskään ekstinktion suuruudesta. Sen arvoksi Linnunradassa on määrätty havainnoista **R=3.1**. Joidenkin tutkimusten mukaan R voi vaihdella 3-6 välillä (esim. $R \approx 5$ pimeissä tiheissä pilvissä), mutta $R=3.1$ arvoa käytetään yleisesti.
- Ekstinktion riippuvuutta aallonpituudesta, $A(\lambda)$ voidaan tutkia vertaamalla kahta tähteä toisiinsa, joilla on sama spektriluokka. Oletetaan yksinkertaisuuden vuoksi, että toisen tähden ekstinktio=0.



Värieksessin soveltaminen II

- Silloin voidaan kirjoittaa:

$$m_{V,1} - m_{V,2} = 5 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) + A_V \quad M_{V,1} - M_{V,2} = 0$$

- Vastaavasti muille kaistoille: Saadaan A:n additiivista vakiota vaille

$$m_{B,1} - m_{B,2} = 5 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) + A_B$$

$$m_{U,1} - m_{U,2} = 5 \log \left(\frac{r_1}{r_2} \right) + A_U$$

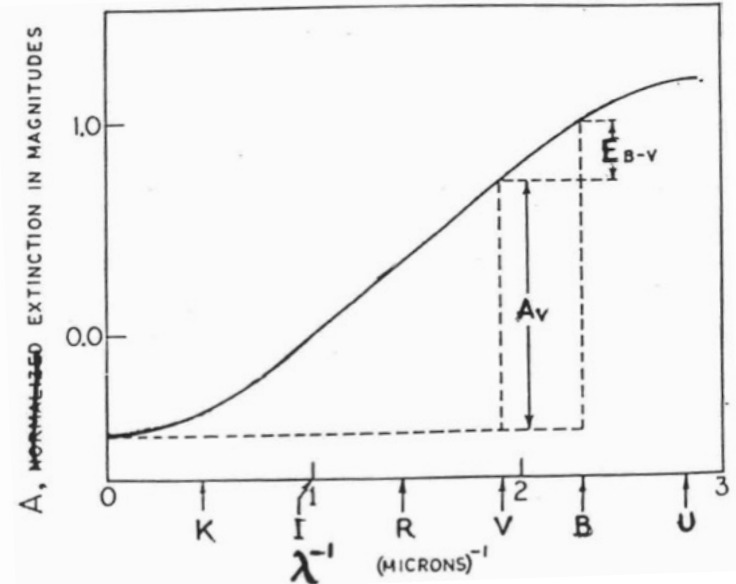
	U	B	V	R	I	J	K	L
$\lambda_{\text{eff}} [\mu]$	0.36	0.44	0.55	0.70	0.90	1.25	2.2	3.4
$\frac{1}{\lambda_{\text{eff}}} \left[\frac{1}{\mu} \right]$	2.90	2.30	1.83	1.56	1.19	0.86	0.47	0.30



Ekstinktiokäyrä

- Mittaukset ovat osoittaneet, että $A(\lambda) \rightarrow 0$, kun aallonpituus $\lambda \rightarrow$ kasvaa hyvin suureksi.
- Ekstrapolointi $Q_{\text{ext}} \rightarrow 0$, kun $x \rightarrow 0$, eli kun $\lambda \rightarrow \infty$, kuten teoria ennustaa.
- Mikäli molemmat tähdet ovat punertuneita voidaan käyttää kaavaa:

$$R = \frac{\Delta A_V}{\Delta E_{B-V}}$$



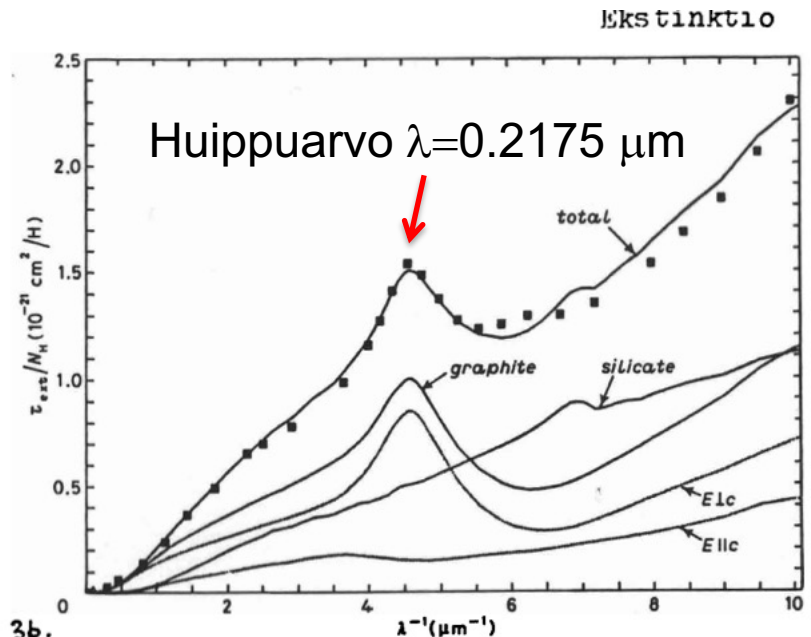


Hiukkasmalleja

- Punertumiskäyrä on tärkein ekstinktiöhavainto ja tehtävänä on löytää hiukkasmalli, joka selittää havaitun punertumiskäyrän.

$$\frac{A(\lambda)}{E_{B-V}} = \frac{Q_{\text{ext}}(\lambda)}{Q_{\text{ext}}(B) - Q_{\text{ext}}(V)}$$

- On olemassa useita eri hiukkasmalleja, mutta mikään yksittäinen malli ei selitä kaikkia havaintoja. Useimmissa malleissa hiukkaset ovat grafiitti-silikaatteja, eli metallisia (C/Si)-hiukkasia.



Kuva 3b.

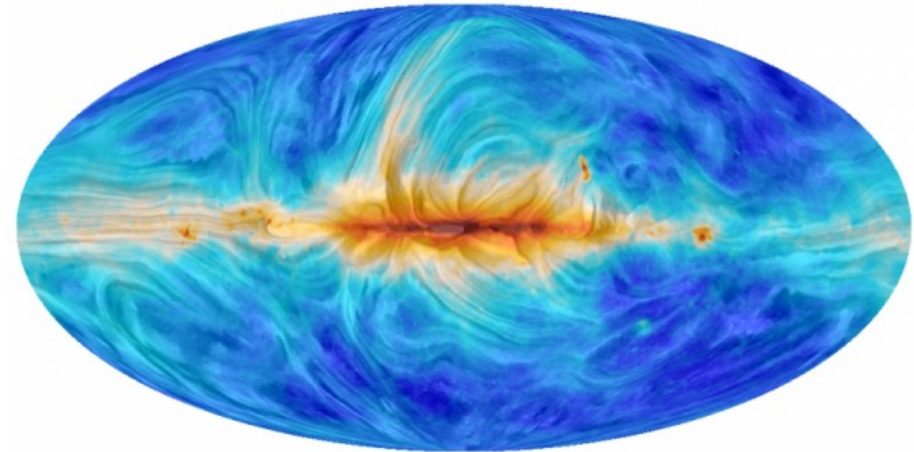
Fig. 3 - Extinction cross-sections per H nucleus computed for graphite and silicate spheres with the «MRN» power law size distribution. Extinction curves are given for silicate and graphite separately, and for each of the two graphite components ($E_{\perp c}$ and $E_{\parallel c}$). Also shown (square symbols) are «average» observed extinctions from ref. [5]. Taken from ref. [7].



Polarisaatiohavainnot

- Tähtienvälisen aineen hiukkaset aiheuttavat myös heikkoa valon polarisoitumista. Havainnot ovat osoittaneet, että:

1. Polarisaatioaste korreloi ekstinktion ja tähden punertumisen kanssa. Korkeimmat mitatut arvot ovat luokkaa $\approx 1\%$.
2. Suurimmat polarisaatioarvot on mitattu Linnunradan tason suunnassa.



- Polarisaatiohavainnot osoittavat että ainakin osa hiukkasista on osittain järjestäytyneessä tilassa. Todennäköinen syy tähän on Linnunradan verrattain heikko magneettikenttä: $B \approx 10^{-6}$ Gauss.

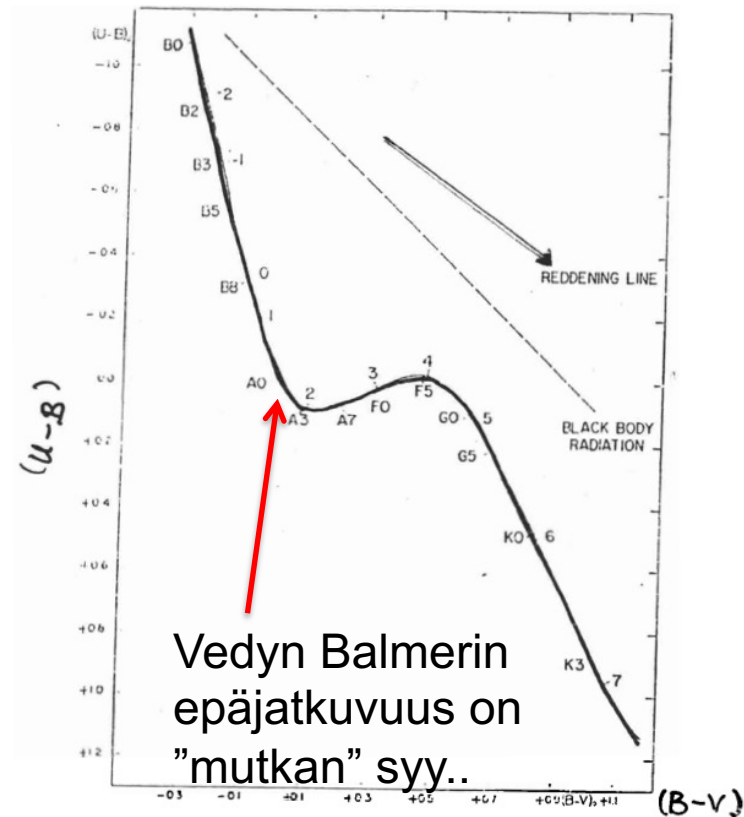


3.4 Ekstinkti Sovelluksia

- Tähden ominaisväri $(B-V)_0$ voidaan määrätä tähden spektristä tai 2-väridiagrammaa käyttäen.
- Punertumiskäyrästä voidaan päätellä, että myös seuraava suure on tähdestä ja ekstinktiosta riippumaton vakio:

$$\frac{E_{U-B}}{E_{B-V}} = \frac{A_U - A_B}{A_B - A_V}$$

- Tälle suureelle on määrätty arvo 0.72.
- Tähden paikat siirtyvät piirretyn nuolen suuntaisesti ("reddening line").



The relation between $(U - B)_0$ and $(B - V)_0$ for the main sequence (Johnson and Morgan 1953; Johnson 1958). The broken line represents black-body radiation. The arrow indicates the reddening path for the O stars.



Q-menetelmä I

- Tietyissä tapauksissa voidaan ”siirtää” tähti takaisin ominaisväriään vastaavaan paikkaan, ts. johtaa $(U-B)_0$ ja $(B-V)_0$ havaituista $(U-B)_{\text{obs}}$ ja $(B-V)_{\text{obs}}$. Toimii parhaiten O-B5-spektriluokkien tähdille.
- Käytetään H.L. Johnson:in laskennallista Q-menetelmää, missä määritellään apumuuttuja Q.

$$Q = (U - B)_{\text{obs}} - 0.72(B - V)_{\text{obs}}$$

- Sijoitetaan tähän:

$$(U - B)_{\text{obs}} = (U - B)_0 + E_{U-B}$$

$$(B - V)_{\text{obs}} = (B - V)_0 + E_{B-V}$$



Q-menetelmä II

$$\Rightarrow Q = (U - B)_0 - 0.72(B - V)_0$$

- Tämä suure on ekstinktiosta riippumaton. Se riippuu vain tähden ominaisväristä. Spektriluokkien O-A2 tähdille on saatu havaintojen perusteella seuraava riippuvuus, josta ekstinktio voidaan määrätä:

$$(B - V)_0 = 0.332Q$$

$$\Rightarrow E_{B-V} = (B - V)_{\text{obs}} - 0.332Q$$

$$A_V = 3.1E_{B-V}$$

- Ominaisvärin määrittäminen magnitudeista helpompaa mutta epätarkempaa kuin suoraan spektrihavainnoista.



$R=A_V/E_{B-V}$ suhteen määrittäminen

- Fotometrisessä etäisyydenmäärittäyksessä R on hyvin tärkeä luku, koska sen avulla saadaan kokonaisekstinktio A_V kun tähden värieksessä E_{B-V} tunnetaan. R :n määrittämiseksi on pääasiassa kaksi menetelmää:
 1. Ekstinktiokäyrän avulla ("color difference method"). Verrataan kahden tähden väri-indeksejä eri aallonpituusalueissa, esim. U-B, B-V, R-I, jne. Tähdillä sama spektriluokka, mutta eri ekstinktio. Saatu ekstinktiokäyrä ekstrapoloidaan $\lambda \rightarrow \infty$ ($\lambda^{-1} \rightarrow 0$) jolloin $A(\lambda) \rightarrow 0$, ja saadaan ekstinktion nollapiste. Katso kuva sivulta 19.
 2. Avoimissa tähtijoukoissa esiintyvien ekstinktion vaihtelujen avulla ("variable extinction method").



Avoim tähtijoukko menetelmä

- Tähtijoukkoon kuuluvilla tähdillä lähes sama etäisyys, joten etäisyysmoduli:

$$m_V - M_V = 5 \log \frac{r}{10 \text{ pc}} + A_V(r) = \text{const} + R \cdot E_{B-V}$$

- Etäisyysmoduli on vakio tähtijoukon tähdille, mikäli $A_V(r)$ sama kaikille tähdille. Interstellaarisen pölyn epätasaisesta jakautumasta (pilvirakenne) johtuen $A_V(r)$ vaihtelee tähdestä toiseen vaikka $r=\text{const}$, täten myös $m_V - M_V$ (toinen notaatio $V - M_V$) vaihtelee tähdestä toiseen.
- Määrätään tähtijoukon kullekin tähdelle:
- 1) Spektriluokka $\rightarrow M_V$, $(B-V)_0$, 2) $B-V \rightarrow E_{B-V} = (B-V) - (B-V)_0$, 3) $V \rightarrow V - M_V$



Avoin tähtijoukko esimerkkejä

- Suoran kulmakertoimesta saadaan R . Arvot yleensä sopusoinnussa $R=3.1$ arvon kanssa.
- Eräissä joukoissa on saatu arvoja $3.1 \leq R \leq 6$ mutta nämä arvot johtuvat pääsääntöisesti:
 - a) tähdistä jotka eivät kuulu joukkoon,
 - b) poikkeavista tähdistä, joilla sirkumstellaarista pölyä,
 - c) HII alueista.

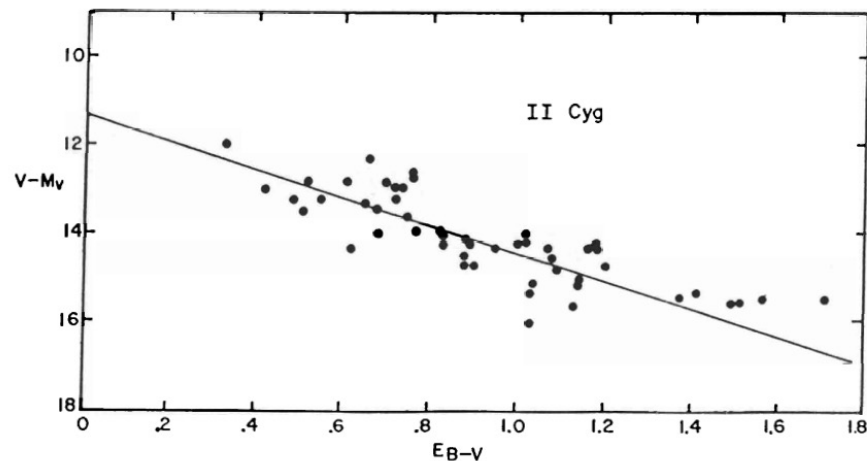
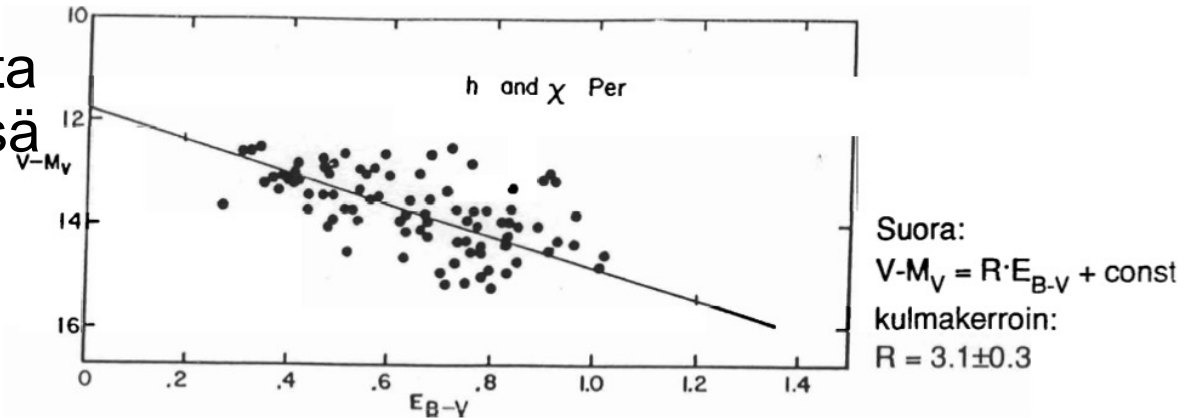


FIG. 8.—The variable-extinction diagram for II Cyg



Muita menetelmiä lyhyesti

3. Avoimien tähtijoukkojen läpimitta-menetelmä. Avoimen joukon lineaarinen läpimitta ei riipu etäisyydestä. Havaittu läpimitta ei riipu ekstinktiosta. Havaitaan kulmaläpimitta, väri-indeksit ja magnitudit -> Johdetaan etäisyys ja ekstinktio.
4. Pimeiden sumujen avulla. Lasketaan tähtiä eri aallonpituusalueilla ja päätellään niistä A_U , A_B , A_V , A_R , A_I ja ”Wolfen diagrammaa käyttäen”.
5. Galaksijoukkojen kirkkaimpien galaksien avulla, joilla oletetaan olevan sama absoluuttinen kirkkaus. Havaitaan galakseja eri galaktisilla leveysasteilla ja päätellään A_V , E_{B-V} ja R .



Mitä opimme?

1. Ekstinktio Linnunradassa on merkittävä tekijä joka heikentää hyvin tehokkaasti tähtien valoa ja vaikeuttaa täten Linnunradan tutkimista. Havaintojen pääpiirteet voidaan selittää hyvin yksinkertaisella tasomallilla.
2. Tähtienvälisen aineen hiukkaset aiheuttavat sirontaa ja absorptiota, jonka kokonaisvaikutus $\propto \lambda^{-1}$. Hyvin pitkille aallonpituuksille (infrapuna-alue), ekstinktio lähestyy nollaa.
3. Tähtienvälinen aine aiheuttaa tähtien valon punertumista ja värieksessin avulla voidaan arvioida ekstinktion määrää eri suunnissa.
4. Suhde $R=A_V/E_{B-V}$ ei riipu havaitun tähden ominaisuuksista eikä myöskään ekstinktion suuruudesta. Sen arvoksi Linnunradassa on määrätty $R=3.1$.