

Supernovien esiintymisrunsaudet läheisessä maailmankaikkeudessa

Luk-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikan ja tähtitieteen laitos
Fysiikka
Helmikuu 2024
Tuomas Ollila
Tarkastaja:
prof. Seppo Mattila

Ollila, Tuomas Supernovien esiintymisrunsaudet läheisessä maailmankaikkeudessa

Luk-tutkielma
Tähtitiede
Helmikuu 2024

Tämän Luk-tutkielman aiheena on luhistumissupernovien esiintymisrunsaudet läheisessä maailmankaikkeudessa. Luhistumissupernovat ovat massiivisten tähtien ($M \geq 8M_{\odot}$) räjähdyksiä niiden elinkaaren loppuvaiheessa. Läheinen maailmankaikkeus käsittää tässä tapauksessa luhistumissupernovat, joiden etäisyys on korkeintaan 15 Megaparsekia. Tässä tutkielmassa on laskettu luhistumissupernovien esiintymisrunsaudet, pohdittu laskelmiin liittyviä virhelähteitä sekä vertailtu olemassa olevaan tutkimustietoon.

Esiintymisrunsauksien laskemista varten on eri katalogeista kerätty vuosina 2000–2019 löydettyistä luhistumissupernovista 69 supernovan otos. Otoksessa on havaittavissa luhistumissupernovien esiintymisrunsauden olevan selvästi suurempi alle 6 Mpc:n etäisyydellä, kun alle 6 Mpc:n etäisyydellä oleva luhistumissupernovat jätettiin pois laskuista, määrä ei muuttunut enää merkittävästi 10 Mpc:stä eteenpäin. Lisäksi otoksessa ei havaittu kirkkauden etäisyysriippuvuutta.

Lopulliseksi esiintymisrunsaudeksi on välillä 6 Mpc – 15 Mpc saatu $R_{CC} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3} \pm 0,3 \cdot 10^{-4} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$. Tästä laskettiin Salpeterin alkueperäisen massan jakauman avulla tähtien syntynopeus läheisessä maailmankaikkeudessa $\psi = 0,027 M_{\odot} \cdot 10^{-4} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3} \pm 0,009 M_{\odot} \cdot 10^{-4} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$. Molemmat olivat virheiden puitteissa yhtäpitäviä olemassaolevan tutkimustiedon kanssa.

Tässä tutkielmassa on laskuihin on otettu huomioon vain otoksen koosta johtuva statistinen virhe, joka seuraa Poissonin jakaumaa. Käytännössä supernovien esiintymisrunsauslaskelmissa supernovia jää havaitsematta, koska osa niistä on luonnostaan himmeitä, ja osa sijaitsee galakseissa ja suunnissa, joissa havaintoihin käytetyillä aallonpituuksilla on voimakas ekstinktio.

Asiasanat: Supernovat, luhistumissupernovat, galaksit

Sisällys

Johdanto	1
1 Supernovien esiintymisrunsaudet	3
1.1 Otos	3
1.2 Virhelähteet	9
2 Omat päätelmät	11
Viitteet	15
A Liitekappale	A-1

Johdanto

Supernovat ovat massiivisten tähtien elinkaaren loppuvaiheilla tapahtuvia räjähdyksiä. Supernovat voidaan jakaa niiden syntyvän mukaan, sekä niiden spektrin ja valokäyrän mukaan tyypeihin Ia, Ib, Ic, IIn, Iib, IIP ja IIL. Tyypin Ia supernovat ovat peräisin kaksoistähtijärjestelmistä, valkoisen kääpiön pinnalle putoava aine käynnistää fuusioreaktiot uudelleen tähden massan ylitettyä Chandrasekharin rajan $M_{\text{Ch}} = 1,4M_{\odot}$, jolloin fuusioreaktiot hajottavat tähden. Tyypin Ia supernovien spektrissä ei näy vetyä, ja ionisoituneen piin SiII 615 nm:n absorptioviiva on selvästi näkyvissä [1].

Tässä tutkielmassa käsitellän vain luhistumissupernovia, joiden joukko on fuusio-supernovia huomattavasti kirjavampi. Luhistumissupernovat syntyvät massiivisten ($M \geq 8M_{\odot}$) tähtien elinkaaren loppuvaiheessa, jolloin tähden ydin luhistuu ja ulko osat lentävät ympäröivään avaruuteen. Jäljelle jää tähden massasta riippuen joko neutronitähti tai musta aukko, jota ympäröi kaasua ja tähtienvälisen pölyn pilvi [1].

Supernovat tuottavat kaasua, tähtienvälistä pölyä ja rautaa raskaampia alkuaineita, mikä tekee niistä merkittävän galaksien kehitykseen vaikuttavan tekijän. Supernovista peräisin oleva kaasua päätyy tähtienväliseen avaruuteen, ja tähtienvälisessä avaruudessa olevat kaasupilvet tiivistyvät uusiksi tähdiksi. Lisäksi supernovassa syntynyt laajeneva pilvi voi saada tähtienvälisen aineen tiivistymään käynnistämällä tähden muodostumisen. Luhistumissupernovat ovat peräisin lyhytikäisistä massiivisista tähdistä, joten ne ovat suoraan yhteydessä tähtien syntyneeseen [2]. Supernovien esiintymisrunsausten tarkastelu on yksi vaihtoehto tähtien syntyneeseen sekä galaksien kemiallisen evoluution tutkimiseen [3].

Supernovien esiintymistä on kartoitettu läheisessä $z \leq 0,1$ maailmankaikkeudessa kattavasti [4][5][6]. Suuremmilla etäisyyksillä kartoituksia on vähemmän, esimerkiksi Strolger ym. ($z < 2,5$) [2], ja Petrushevska ym. ($z < 2,9$) [7]. Kartoitukset ovat huomattavasti yleisempiä läheisessä maailmankaikkeudessa [2]. Yleinen tren-

di on kasvava supernovien esiintymisrunsaus välillä $z = 0$ ja $z \sim 1$ [3]. Kaiken kaikkiaan supernovien esiintymisrunsaudet ovat kasvaneet välillä 2000–2010, kasvu on ollut nopeampaa paikallisen maailmankaikkeuden ulkopuolella [8]. Keskeisimpiä virhetekijöitä supernovien esiintymisrunsauslaskelmissa ovat olleet todellinen kirkkausjakauma sekä emogalaksin ekstinktio [9].

Tässä tutkielmassa on tarkoitus laskea luhistumissupernovien esiintymisrunsaus 15 Mpc:n sisällä, ja tutkia hieman luhistumissupernovien esiintymisrunsauden yhteyttä tähtien syntynopeuteen. Otoksen keräämiseen käytetään katalogeja. Lisäksi tarkoitus on myös pohtia tekijöitä, jotka aiheuttavat virheitä laskelmissa.

1 Supernovien esiintymisrunsaudet

1.1 Otos

Otoksen keräys aloitettiin etsimällä Open Supernova Catalog–katalogista [10] vuosina 2012–2019 löydetty luhistumissupernovat, joiden säteisnopeudet v_r paikallisen lepostandardin suhteen ovat korkeintaan 1500 km/s. Tämä vastaa Hubblen lain

$$v_r = Hd \tag{1}$$

mukaan etäisyyttä $d \sim 20$ Mpc kun Hubblen vakio on $H = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Hubblen laissa tietenkin oletetaan, että säteisnopeus johtuu ainoastaan maailman-kaikkeuden laajenemisesta. Näistä luhistumissupernovista valittiin HyperLeda–tietokannasta [11] ne, joiden emogalaksien etäisyydet olivat korkeintaan 15 Mpc. Emogalaksien inkliinaatiot ja Virgoon putoamisen suhteen korjatut säteisnopeudet ovat HyperLeda tietokannasta. Useimmat etäisyydet ovat keskiarvoja, ja jos etäisyyksiä ei ole annettu, ne on laskettu Hubblen laista. Otoksessa olevien absoluuttisten magnitudien maksimiavot M_{peak} on laskettu ekstinktion avulla kaavasta

$$M_{\text{peak}} = m_V - 5 \log \frac{d}{10 \text{ pc}} - A_V \tag{2}$$

jossa m_V on maksimi näennäinen visuaalinen magnitudi ja A_V on ekstinktio samalla aallonpituuskaistalla Linnunradassa. Näennäiset visuaaliset magnitudit kerättiin Open Supernova Catalog–katalogista, ja ekstinktiot NASA/IPAC Extragalactic Database–katalogista. Lisäksi taulukkoon on listattu galaksien kirkkaudet infrapuna-alueella jaettuna auringon kirkkaudella $\log L_{IR} = \log(L_{\text{Galaksi}}/L_{\odot})$.

Lopulliseen otokseen valittiin 32 vuosina 2012–2019 löytynyttä luhistumissupernovaa. Vuosina 2000–2012 löydettyistä supernovista poistettiin yli 15 Mpc:n etäisyydellä olevat supernovat SN2000db, SN2003J sekä SN2006my [4]. Vuosina 2000–2012 löydettyihin supernoviin lisättiin alle 15 Mpc:n etäisyydellä olevat SN2001X, SN2003B, SN2009bw ja SN2010gi. Otokseen kuuluu lisäksi kuusi supernovaa, joiden alkuperästä ei ole var-

muutta: neljä ns. 08S-kaltaista ja kaksi II_n/LBV tyyppistä. Taulukkoon 1 on koottu yhteensä 69 supernovaa.

Taulukko I: Luhistumissupernovat 15 Mpc:n sisällä

SN	Galaksi	v_r km s ⁻¹	d Mpc	Menetelmä	Tyyppi	A_V MW	M_{peak}	Inkl. °	log L_{IR} L_{\odot}
2001X	NGC 5921	1596	14.0	TF	IIP	0.11	-	50	-
2001ig	NGC 7424	768	11.0	Hubble	I b	0.03	-17.4	59	-
2002ap	NGC 628	651	8.7	Kesk.	Ic	0.24	-17.7	20	9.83
2002bu	NGC 4242	739	5.5	Kesk.	08S-kalt.	0.04	-	52	-
2002hh	NGC 6946	334	6.0	Kesk.	IIP	1.13	-18.4	18	9.98
2003B	NGC 1097	1028	14.9	Kesk.	II	0.07	-	55	10.61
2003gd	NGC 628	651	8.7	Kesk.	IIP	0.23	-16.6	20	9.83
2003ie	NGC 4051	917	10.3	Kesk.	IIP	0.04	-	49	9.69
2003jg	NGC 2997	893	7.1	TF	Ic	0.36	-17.8	54	-
2004am	M 82	469	3.6	Kesk.	IIP	0.53	-15.4	77	10.74
2004dj	NGC 2403	338	3.2	Kesk.	IIP	0.13	-16.6	61	9.18
2004et	NGC 6946	334	6.0	Kesk.	IIP	1.13	-17.9	18	9.61
2005ae	ESO 209-G009	833	12.6	Kesk.	I b	0.86	-	90	9.87
2005af	NGC 4945	399	3.6	Kesk.	IIP	0.61	-15.7	90	10.40
2005at	NGC 6744	665	8.3	Kesk.	Ic	0.14	-16.1	54	9.84
2005ay	NGC 3938	1014	14.5	Hubble	IIP	0.07	-	18	9.92
2005cs	M 51	718	7.7	Kesk.	IIP	0.12	-15.9	33	-
2007gr	NGC 1058	590	9.3	Kefeidi	Ic	0.21	-17.5	59	-
2007it	NGC 5530	1083	11.4	Kesk.	II	0.39	-	66	-
2008S	NGC 6946	334	6.0	Kesk.	08S-kalt.	1.12	-	18	9.61
N300-OT	NGC 300	-52	2.0	Kesk.	08S-kalt.	0.04	-	49	8.39
2008ax	NGC 4490	804	9.6	Sosie	I b	0.07	-18.5	90	10.13
2008bk	NGC 7793	59	3.8	Kesk.	IIP	0.07	-15.2	64	9.02
2008iz	M 82	469	3.6	Kesk.	RSN	0.53	-	77	10.74
2008jb	ESO 302-G014	591	8.4	Hubble	IIP	0.03	-15.3	74	-
2009N	NGC 4487	1043	11.2	TF	IIP	0.07	-	58	-
2009bw	UGC 2890	1382	13.9	Kesk.	II	0.61	-	90	-
2009dd	NGC 4088	980	13.9	Kesk.	II	0.07	-	71	10.28
2009hd	NGC 3627	780	10.4	Kesk.	II	0.11	-17.7	68	10.42
2009ib	NGC 1559	984	12.3	Kesk.	IIP	0.10	-	60	10.19
2009ls	NGC 3423	1013	11.7	TF	II	0.10	-	32	-
2010br	NGC 4051	917	10.3	Kesk.	I b /c	0.04	-	49	9.69
2010dn	NGC 3184	743	10.2	Kesk.	08S-kalt.	0.06	-	14	9.61
2010gi	IC 4660	1547	11.8	Kesk.	I b	0.10	-	87	-

2011dh	M 51	718	7.7	Kesk.	I Ib	0.12	-17.0	33	-
2011ja	NGC 4945	399	3.6	Kesk.	IIP	0.59	-17.5	90	10.40
2011jm	NGC 4809	1048	15.0	Hubble	Ic	0.11	-	90	-
2012A	NGC 3239	798	11.4	Hubble	IIP	0.09	-16.5	47	-
2012aw	NGC 3351	810	9.9	Kesk.	IIP	0.07	-16.8	55	9.82
2012cc	NGC 4419	-114	14.6	Kesk.	II	0.09	-	85	9.82
2012fh	NGC 3344	681	9.8	TRGB	I Ib/Ib/c	0.09	-11.2	19	9.61
2013ak	ESO 430-G20	793	11.3	Hubble	Ib	1.22	-17.3	70	-
2013am	NGC 3623	794	13.3	Kesk.	II	0.07	-14.4	73	-
2013bu	NGC 7331	863	14.8	Kesk.	II	0.24	-15.1	90	10.59
2013by	ESO 138-G10	983	14.0	Hubble	II L/II n	0.58	-18.1	49	-
2013ej	NGC 628	651	8.7	Kesk.	IIP/L	0.19	-17.4	20	9.83
2013ge	NGC 3287	1359	13.9	Kesk.	Ic	0.06	-16.0	75	-
2013gc	ESO 430-G20	793	11.3	Hubble	II	1.22	-	70	-
PSNJ14041297 -0938168	IC-4363	901	12.9	Hubble	II n	0.08	-	-	-
ASASSN-14ha	NGC 1566	1192	6.0	Kesk.	II	0.02	-14.3	49	9.20
2014C	NGC 7331	994	14.8	Kesk.	Ib	0.24	-21.2	70	10.59
2014bc	NGC 4258	682	7.5	Kesk.	IIP	0.04	-	68	-
2014bi	NGC 4096	786	11.7	Kesk.	IIP	0.05	-	81	9.67
2016X	UGC 8041	1383	14.9	Kesk.	IIP	0.06	-16.9	54	-
2016adj	NGC 5128	423	3.6	Keek.	I Ib	0.31	-13.4	45	10.01
2016aqf	NGC 2101	883	12.6	Hubble	IIP	0.13	-14.8	69	-
2016bkv	NGC 3184	743	10.2	Kesk.	II	0.05	-15.4	14	10.02
2016cok	M 66	780	10.4	Kesk.	IIP	0.09	-13.9	68	10.41
2017bzb	NGC 7424	768	11.0	Hubble	II	0.03	-	59	-
2017eaw	NGC 6946	334	6.0	Kesk.	IIP	0.92	-17.0	18	10.26
2017ein	NGC 3938	1014	14.5	Hubble	Ic	0.06	-16.4	18	9.92
2017gax	NGC 1672	1026	14.7	Hubble	Ib/c	0.06	-15.8	29	10.47
2018aoq	NGC 4151	1189	13.9	TF	II	0.07	-15.3	42	9.93
2018hna	UGC 7534	978	14.0	Kesk.	II	0.03	-	41	-
2018ivc	M 77	1023	10.0	TF	II	0.09	-	35	11.0
2019ejj	ESO 430-G20	793	11.3	Hubble	II	1.3	-	70	-
2019fcn	ESO 430-G20	793	11.3	Hubble	II	1.3	-	70	-
2019krl	M 74	651	8.7	Kesk.	II n/LBV	0.19	-	20	-
2019qyl	NGC 300	-52	2.0	Kesk.	II n/LBV	0.04	-	49	8.39

Taulukossa on supernovan tunniste, emogalaksi, säteisnopeus, etäisyys, etäisyyden määrittymenetelmä, supernovan luokka, ekstinktio Linnunradassa, absoluuttinen magnitudi, inkliinaatio, kirkkaus infrapuna-alueella.

Supernovien esiintymisrunsaudet on laskettu kaavasta

$$R_{CC} = \frac{N}{Vt} \quad (3)$$

jossa N on luhistumissupernovien lukumäärä, $V = \frac{4}{3}\pi d^3$ on d säteisen pallon tilavuus ja $t = 20v$ on ajanjakso, jossa supernovat on havaittu. Taulukkoon 2 merkityistä tuloksista havaitaan selvästi, että laskuissa painottuvat alle 6 Mpc:n etäisyydellä olevat luhistumissupernovat. Määrä ei muutu merkittävästi 10 Mpc:stä etempään kun alle 6 Mpc:n etäisyydellä olevat supernovat jätetään pois laskuista. Luhistumissupernovien esiintymisrunsaus välillä 6-15 Mpc on $R_{CC} = {}^{+0,3}_{-0,3} 1,9 \cdot 10^{-4} v^{-1} \text{Mpc}^{-1}$. Ylärajat ja alarajat on esitetty 84,13 % luottamustasolla.

Taulukko II. Supernovien esiintymisrunsaudet

d (Mpc)	SN esiintymisrunsaus [$10^{-4} \text{v}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$]			
	CCSNe + 08S-like ¹²		CCSNe ¹²	
5	$8,6_{-2,8}^{+3,9}$ (9)	-	$7,6_{-2,6}^{+3,8}$ (8)	-
6	$8,3_{-2,1}^{+2,7}$ (15)	-	$6,6_{-1,9}^{+2,6}$ (12)	-
7	$5,2_{-1,3}^{+1,8}$ (15)	0 (0)	$4,2_{-1,2}^{+0,7}$ (12)	0 (0)
8	$4,4_{-1,0}^{+1,3}$ (19)	$0,93_{-0,4}^{+0,7}$ (4)	$3,7_{-0,9}^{+1,2}$ (16)	$0,93_{-0,4}^{+0,7}$ (4)
9	$4,1_{-0,8}^{+1,0}$ (25)	$1,6_{-0,5}^{+0,7}$ (10)	$3,6_{-0,8}^{+1,0}$ (22)	$1,6_{-0,5}^{+0,7}$ (10)
10	$3,6_{-0,7}^{+0,8}$ (30)	$1,8_{-0,5}^{+0,6}$ (15)	$3,2_{-0,6}^{+0,8}$ (27)	$1,8_{-0,5}^{+0,6}$ (15)
11	$3,4_{-0,5}^{+0,7}$ (38)	$2,1_{-0,5}^{+0,5}$ (23)	$3,1_{-0,6}^{+0,6}$ (34)	$2,0_{-0,4}^{+0,5}$ (22)
12	$3,3_{-0,5}^{+0,6}$ (48)	$2,3_{-0,4}^{+0,5}$ (33)	$3,0_{-0,4}^{+0,6}$ (44)	$2,2_{-0,4}^{+0,5}$ (32)
13	$2,8_{-0,4}^{+0,5}$ (52)	$2,0_{-0,3}^{+0,4}$ (37)	$2,6_{-0,4}^{+0,4}$ (48)	$2,0_{-0,4}^{+0,3}$ (36)
14	$2,6_{-0,3}^{+0,4}$ (60)	$2,0_{-0,3}^{+0,3}$ (45)	$2,4_{-0,3}^{+0,4}$ (56)	$1,9_{-0,3}^{+0,4}$ (44)
15	$2,4_{-0,3}^{+0,4}$ (69)	$1,9_{-0,3}^{+0,3}$ (54)	$2,3_{-0,3}^{+0,6}$ (65)	$1,9_{-0,3}^{+0,3}$ (53)

¹ Sarakkeissa 3 ja 5 on laskettu supernovat etäisyydellä $d > 6$ Mpc

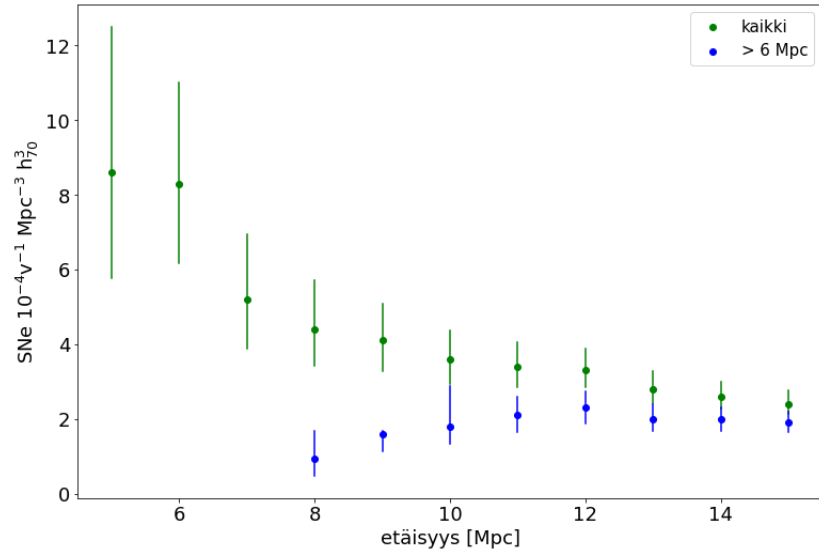
² Suluissa supernovien lukumäärä etäisyydellä d

Luhistumissupernovat ovat peräisin massiivisista, lyhytikäisistä tähdistä, joten niiden avulla voidaan arvioida tähtien syntynopeutta $\psi(z)$, mikä kertoo kuinka nopeasti tähtienvälinen aine muuttuu tähdiksi jossakin tilavuudessa. Supernovien esiintymisrunsauden yhteys tähtien syntynopeuteen saadaan yhtälöstä

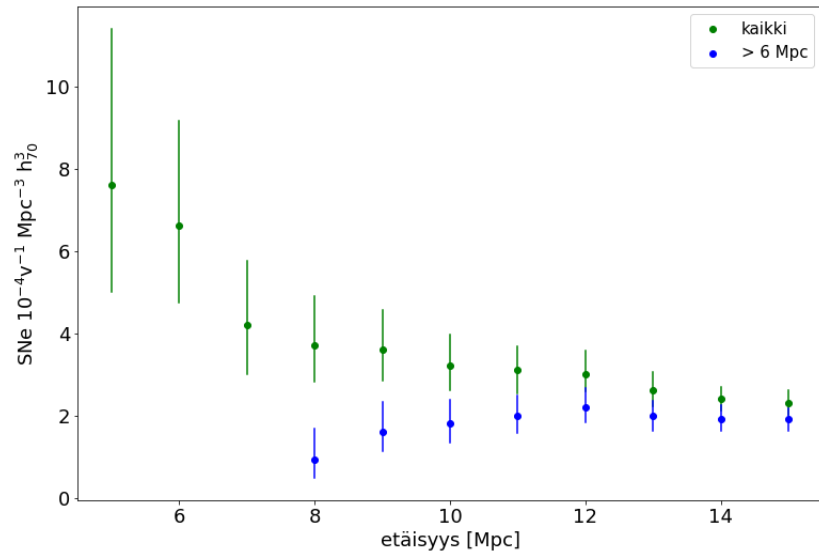
$$R_{CC} = \frac{\int_{m_{\min}}^{m_{\max}} \phi(z) dm}{\int_{m_l}^{m_u} m \phi(z) dm} \psi(z) = k_{CC} \psi(z) \quad (4)$$

jossa $\phi(z)$ on alkuperäisen massan funktio etäisyydellä z , ja m_{\max} ja m_{\min} ovat supernovaksi päätyneiden tähtien massojen ylä- ja alarajat. alkuperäisen massan funktio antaa tähtipopulaation alkuperäisen massajakauman, ja se on normalisoitu. Parametri k_{CC} antaa siis supernovaksi päätyvien tähtien osuuden massayksikköä kohden [3]. Salpeterin alkuperäisen massan funktiosta välille $M \in [8M_{\odot}, 50M_{\odot}]$

Kuva 1. Supernovien esiintymisrunsaudet



Kuva 2. Supernovien esiintymisrunsaudet ilman 08S-kaltaisia



saadaan parametri $k_{CC} = 0,007M_{\odot}^{-1}$, tähtien syntynopeudeksi tulee $0,027M_{\odot} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3} \pm 0,009M_{\odot} \text{ v}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}$. Tähtien muodostumisnopeudelle on laskettu absoluuttisen virheen yläraja $|\Delta\psi| \leq |\Delta R_{CC}/k_{CC}|$ olettaen k_{CC} :n olevan virheetön.

1.2 Virhelähteet

Ensimmäinen virhelähde on luonteeltaan tilastollinen, ja seurausta otoksen pienestä koosta. Havaittu supernovien lukumäärä n noudattaa Poissonin jakaumaa, jolloin varianssin λ ylä- ja alarajalle on voimassa seuraavat yhtälöt

$$\sum_{x=0}^n \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} = CL, \quad (5)$$

$$\sum_{x=0}^{n-1} \frac{\lambda^x e^{-\lambda}}{x!} = 1 - CL \quad (6)$$

Tilastolliset virheet noudattavat Poissonin jakaumaa, jotka pienille lukumäärille saadaan Gehrels'n taulukoista. Suuremmille lukumäärille yhtälöt 5 ja 6 on ratkaistava numeerisesti [12].

Toinen virhelähde on seurausta eri havainnoissa käytetyistä laitteistoista. Laitteistosta riippuen tiettyä magnitudia himmeämpiä kohteita ei ole mahdollista havaita. Tämän tutkielman aineistosta matalin absoluuttinen visuaalinen magnitudi on $M_V = -11,2$. Supernovan havaittavuus riippuu myös havaintoihin käytetystä aallonpituudesta, sillä supernovatyypin kirkkaudet vaihtelevat käytetystä kaistasta riippuen [13][9]. Richardson ym. [14] mukaan B-kaistalla kirkkaimpia luhistumis-supernovia olivat IIn-tyyppiset ja himmeimpiä IIP-tyyppiset. Luonnollisestikin jos kartoituksessa otos valitaan kirkkauden mukaan, jäävät himmeämmät kohteet helpommin otoksen ulkopuolelle, mikä puolestaan vääristää tuloksia. Toinen havaintolaitteistoon liittyvä tekijä on laitteiston resoluutio: galaksin kirkkaan keskustan

läheisyydessä hyvin pienelle alueelle keskittyneen kohteen havaitseminen voi olla vaikeaa, myös kohteen etäisyys pienentää kohteen havaittua kulmaläpimittaa.

Kolmas virhelähde peräisin väliaineessa tapahtuvasta sähkömagneettisen säteilyn absorboitumisesta ja siroamisesta. Väliaineessa tapahtuvaa sähkömagneettisen säteilyn siroamista ja absorboitumista kutsutaan ekstinktioksi. Ekstinktio on säteilyn aallonpituuden, väliaineen kemiallisen koostumuksen sekä väliaineen tiheyden funktio. Käytännössä supernovia havaittaessa ekstinktiota tapahtuu niin Linnunradassa kuin supernovan emogalaksissa, ja maanpäällisissä havainnoissa vielä ilmakehässä. Mattila ym. [4] havaitsivat, että näkyvän valon alueella havaintoja tehtäessä jopa 83 % supernovista Arp 299:n kaltaisissa pölyisissä galakseissa voi jäädä havaitsematta ekstinktion takia, tavallisissa galakseissa osuus oli 19 %.

Linnunradassa tähtienvälinen aine koostuu pääosin vedystä (noin 70%), heliumista (noin 28%) ja pienestä määrästä raskaampia alkuaineita. Osa alkuaineista on sitoutunut molekyyleiksi tai suuremmiksi pölyhiukkasiksi kuten molekulaarinen vety H_2 , hiilivety CH , hiilimonoksidi CO , jotka voi havaita näkyvällä sekä ultravioletilla, radioalueella on havaittavissa raskaampia molekyylejä kuten vettä H_2O tai ammoniakki NH_3 . Yksiatomisista kaasuista neutraalin vedyn $H I$ Balmerin sarja on havaittavissa näkyvän valon aallonpituudella, ja esimerkiksi radioalueella on suhteellisen helposti havaittava vedyn 21 cm viiva. Ionisoitunut vety $H II$ taas on keskittynyt esimerkiksi O- ja B-luokan tähtien ympärille, joiden säteily pystyy ionisoimaan ympäröivää tähtienvälistä ainetta [15].

Säteilyn ekstinktio tähtienvälisestä pölystä on voimakkainta näkyvän valon sinisellä alueella, ultraviolettialueella sekä lähi-infrapuna-alueella, uudelleensäteily tapahtuu pidemmällä infrapunasäteilyn aallonpituuksilla [16]. Pölyn jakautuminen linnunradassa ei ole homogeeninen eikä isotrooppinen, vaan pöly on keskittynyt linnunradan tasoon ja eri puolilla galaksia oleviin pilviin. Linnunradassa pölyn jakautumista on kartoitettu kattavasti [17] [18] [16]. On siis selvää, että tietyissä suun-

nissa tähden valon himmeneminen tietyillä aallonpituuksilla on voimakkaampaa, jolloin himmeämmät kohteet jäävät helpommin havaitsematta. Lisäksi esim. kaukaisesta galaksista lähtöisin oleva UV-säteily punasiirtyy optiselle alueelle, ja siitä infrapuna-alueelle [19].

Pölyiset galaksit ovat kirkkaita infrapuna-alueella, ja aktiivisia tähtien synnyttäjiä [20] [21], merkittävä osa supernovista voikin jäädä ekstinktion takia havaitsematta [22]. Ilmiö on mahdollisesti voimakkaampi etäisyyden kasvaessa, sillä pölyisiä galakseja on suurilla etäisyyksillä enemmän [23]. Kuten Linnunrata, galaksien pöly ja kaasu ovat keskittyneet ohueksi kiekoksi [24]. Inklinaatio i määritellään galaksin puolipääakselin a ja puolipieni akselin b suhteesta

$$\cos i = \frac{b}{a}, \quad (7)$$

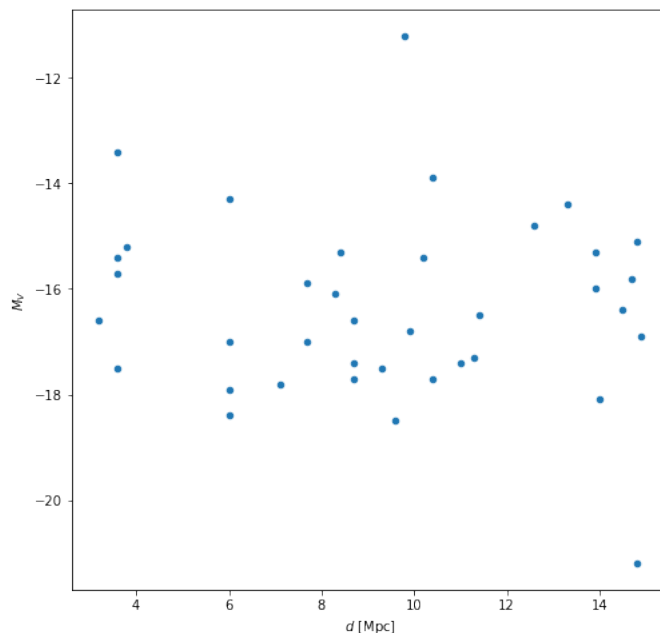
Käytännössä inklinaatio 90° tarkoittaa, että galaksia katsotaan sen kiekon tasosta, kun taas $i = 0^\circ$ tarkoittaa, että galaksia katsotaan kohtisuorassa kiekkoa vasten.

Supernovat jaetaan tyypeihin niiden spektrin ja valokäyrän mukaan. Supernovatyyppeiden valokäyrissä, kirkkaudet sekä suhteelliset esiintymisrunsaudet vaikuttavat niiden havaittavuuteen kartoituksissa [2]. Eri supernovien esiintyminen on myös sidoksissa emogalaksien ominaisuuksiin kuten galaksin tyyppiin ja kirkkauteen [9]. Tunnettujen luokkien lisäksi on olemassa joukko supernovia tai supernovien kaltaisia ilmiöitä, joiden alkuperä ei ole täysin selvä [25] [26]. Tähän tutkielmaan on sisällytetty neljä ns. 08S-kaltaista kohdetta, ja kaksi kohdetta, joiden tyyppi on toistaiseksi tuntematon.

2 Omat päätelmät

Supernovien esiintymisrunsaudeksi saatiin välillä 6-15 Mpc siis $R_{CC} = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{v}^{-1} \text{Mpc}^{-3} \pm 0,3 \cdot 10^{-4} \text{v}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$, mikä on yhteensopiva virheiden rajoissa kuin Mattila ym. [4] $1,5_{-0,3}^{+0,4} \cdot 10^{-4} \text{v}^{-1} \text{Mpc}^{-3}$. Havainnoissa toistuva ilmiö on suurempi esiintymis-

Kuva 3. Absoluuttinen visuaalinen magnitudi etäisyyden funktiona



runsaus alle 10 Mpc:n etäisyydellä, jonka jälkeen määrä pysyy vakiona. Tämän tutkielman tapauksessa supernovia oli alle 6 Mpc:n etäisyydellä enemmän (14): näistä 4 löytyy galaksista NGC 6946, galakseissa M 82, NGC 4945 ja NGC 300 oli kussakin 2, muut 6 Mpc:n sisällä olevat galaksit sisälsivät kukin yhden. 6 Mpc:n sisällä on muutama pölyinen galaksi kuten M 82 ja NGC 4945, missä on havaittu useampi supernova välillä 2000–2019. Kaiken kaikkiaan 6 Mpc:n sisällä supernovat näyttäisivät keskittyneen muutamaan aktiivisempaan galaksiin. Välillä 6–15 Mpc supernovat ovat jakautuneet tasaisemmin: aktiivisimpia olivat ESO 430-G20 (4) ja NGC 628 (3), joista molemmat olivat yli 8 Mpc:n etäisyydellä.

Visuaalisen magnitudin huippuarvo on löytynyt yhteensä 38 supernovalle: näistä kirkkain oli SN 2014C ($M_V = -21, 1$) ja himmein SN 2012fh ($M_V = -11, 2$). Absoluuttisen visuaalisen magnitudin ja etäisyyden välillä ei näyttäisi olevan korrelaatiota (kuva 3). Spearmanin r -testin p arvoksi tuli 0,99 ja korrelaatiokertoimeksi $-0,013$, joten tämän perusteella suureilla ei ole monotonista riippuvuutta 15 Mpc:n sisällä. Toisin sanoen etäisyyden kasvaessa absoluuttisen magnitudin huippuarvot

Taulukko III. Supernovien inkliinaatoriippuvuus

Inkl. [°]	Supernovien lkm.	Osuus
$0 \leq i \leq 30$	14	0,21
$30 < i \leq 60$	26	0,38
$60 < i \leq 90$	28	0,41

eivät kasva tai pienene. Tämän perusteella ei tietenkään voi olettaa, että otos ei kärsisi Malmquistin biasista, vaan on edelleen mahdollista, että näytteeseen olisi valikoitunut kirkkaampia supernovia. Spearmanin r-testin kohdalla on huomioitava, että otoksen koko on suhteellisen pieni, joten testin tarkkuus ei ehkä ole paras mahdollinen. Ongelmana on myös, että absoluuttisissa magnitudeissa on otettu huomioon vain ekstinktio Linnunradan sisällä, emogalaksin sisällä ekstinktio tietenkin kasvattaisi absoluuttista magnitudia, jolloin otokseen saattaisi syntyä jonkinlaista magnitudin etäisyysriippuvuutta.

38 supernovasta, joille oli laskettu absoluuttiset magnitudit, kuudelle $M_V > -15$. Himmeiden supernovien osuus supernovista, joille absoluuttiset magnitudi on laskettu oli $0,16_{-0,07}^{+0,10}$, jossa virheiden ylä- ja alarajat on ilmoitettu 84,13 % luottamustasolla. Virherajojen puitteissa selvää eroa ei esimerkiksi Li ym. [9] (0,09) näy, jotka keräsivät näytteen 60 Mpc:n sisällä. Li ym. [9] arvioivat, että himmeiden supernovien osuus kartoituksissa voisi olla jopa 30 %. Vertailu on hieman hankalaa otoksen pienestä otannasta johtuen. Tässä on jälleen hyvä mainita, että magnitudeja ei ole korjattu emogalaksin ekstinktion suhteen, joten osa himmeämmistä supernovista on mahdollisesti kirkkaampia kuin $M_V = -15$.

Taulukossa 3 on koottu supernovat isäntägalaksien ekstinktioiden mukaan. Yli kolmasosa supernovista on väleillä $60^\circ - 90^\circ$ ja $30^\circ - 60^\circ$, selvästi pienin osuus supernovista on taas välillä $0^\circ - 30^\circ$. Mattila ym. [4] verrattuna huomattavasti suurempi osa on välillä $60^\circ - 90^\circ$, mutta selvästi pienempi määrä välillä $30^\circ - 60^\circ$, pienimmillä inkliinaatioilla osuudet ovat lähempänä toisiaan. Mattila ym. [4] verrattuna otoksen

koko on selvästi suurempi, ja supernovien jakautuminen emogalaksin inkliinaatioiden suhteen näyttää vastaavan paremmin heidän ennustettaan.

Tähtien syntynopeus on virherajojen puitteissa yhtäpitävä kuin esim. $0,019M_{\odot}v^{-1}\text{Mpc}^{-3}$ [22] ja $0,023M_{\odot}v^{-1}\text{Mpc}^{-3}$ [27]. Tähtien syntynopeuden tiheys paikallisessa maailmankaikkeudessa on siis tämän tutkielman virherajojen puitteissa yhtäpitävä supernovien esiintymisrunsaudesta arvioidun tähtien syntynopeuden kanssa. Tämän perusteella himmeämpiä kohteita ei ole jäänyt otoksesta pois. Kuten supernovien esiintymisrunsauksissakin, tähtien syntynopeudessaakin on havaittavissa, että alle 10 Mpc:n sisällä tähtien syntymisestä alkuperätähtiä merkittävä osa tapahtuu muutamassa aktiivisessa galaksissa [4][27].

Tähtien syntynopeutta laskettaessa on käytetty parametrin arvoa $k_{CC} = 0,007M_{\odot}^{-1}$, mikä vastaa Salpeterin IMF:llä supernoviksi päätyviä tähtiä välillä $M \in [8M_{\odot}, 50M_{\odot}]$. Tämä on sikäli ongelmallista, että yli $20M_{\odot}$ supernovien alkuperätähtiä ei olla havaittu läheisessä maailmankaikkeudessa [28]. Eräs mahdollinen ratkaisu ongelmaan on, että lähiavaruuden massiiviset tähdet ovat päätyneet suoraan mustaksi aukoksi ilman varsinaista supernovaa [28].

Tässä työssä kerättiin 15 Mpc:n sisällä 68 luhistumissupernovaa sisältävä otos katalogeista, josta laskettiin 6-15 Mpc:n sisällä luhistumissupernovien esiintymisrunsauden alarajaksi $1,9 \cdot 10^{-4}v^{-1}\text{Mpc}^{-3} \pm 0,3 \cdot 10^{-4}v^{-1}\text{Mpc}^{-3}$. Otoksesta havaittiin supernovien keskittyminen muutamaa galaksiin 6 Mpc:n sisällä. Esiintymisrunsaus oli virherajojen puitteissa yhtäpitävä esiintymisrunsauksien kanssa, joissa otokset oli kerätty samalla tavalla. Otoksessa ei havaittu kirkkauden etäisyysriippuvuutta, tai himmeämpien kohteiden puuttumista. Näytteestä arvioitu tähtien syntynopeus 15 Mpc:n sisällä on myös virheiden puitteissa yhtäpitävä tutkimusten kanssa.

Viitteet

- [1] H. Karttunen, K. J. Donner, P. Kröger, H. Oja ja M. Poutanen, *Tähtitieteen Perusteet* (Ursa, 2016).
- [2] L. G. Strolger, T. Dahlen, S. A. Rodney, O. Graur, A. G. Riess, C. McCully, S. Ravindranath, B. Mobasher ja A. K. Shahady, *The Astrophysical Journal* **813**, 93 (2015).
- [3] P. Madau ja M. Dickinson, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **52**, 415 (2014).
- [4] S. Mattila, T. Dahlen, A. Efstathiou, E. Kankare, J. Melinder, A. Alonso-Herrero, M. Á. Pérez-Torres, S. Ryder, P. Väisänen ja G. Östlin, *The Astrophysical Journal* **756**, 111 (2012).
- [5] Botticella, M. T., Riello, M., Cappellaro, E., Benetti, S., Altavilla, G., Pastorello, A., Turatto, M., Greggio, L., Patat, F., Valenti, S., Zampieri, L., Harutyunyan, A., Pignata, G. ja Taubenberger, S., *Astronomy and Astrophysics* **479**, 49 (2008).
- [6] O. Graur, F. B. Bianco ja M. Modjaz, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **450**, 905 (2015).
- [7] T. Petrushevskaja, R. Amanullah, A. Goobar, S. Fabbro, J. Johansson, T. Kjellsson, C. Lidman, K. Paech, J. Richard, H. Dahle, R. Ferretti, J. P. Kneib, M. Limousin, J. Nordin ja V. Stanishev, *Astronomy and Astrophysics* **594**, A54 (2016).
- [8] A. Goobar ja B. Leibundgut, *Annual Review of Nuclear and Particle Science* **61**, 251 (2011).

- [9] W. Li, J. Leaman, R. Chornock, A. V. Filippenko, D. Poznanski, M. Ganesalingam, X. Wang, M. Modjaz, S. Jha, R. J. Foley ja N. Smith, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **412**, 1441 (2011).
- [10] J. Guillochon, J. Parrent, L. Z. Kelley ja R. Margutti, *The Astrophysical Journal* **835**, 64 (2017).
- [11] D. Makarov, P. Prugniel, N. Terekhova, H. Courtois ja I. Vauglin, *Astronomy and Astrophysics* **570**, A13 (2014).
- [12] N. Gehrels, *The Astrophysical Journal* **303**, 336 (1986).
- [13] D. Richardson, D. Branch, D. Casebeer, J. Millard, R. C. Thomas ja E. Baron, *The Astronomical Journal* **123**, 745 (2002).
- [14] D. Richardson, R. L. J. III, J. Wright ja L. Maddox, *The Astronomical Journal* **147**, 118 (2014).
- [15] K. M. Ferrière, *Rev. Mod. Phys.* **73**, 1031 (2001).
- [16] G. M. Green, E. F. Schlafly, D. P. Finkbeiner, H.-W. Rix, N. Martin, W. Burgett, P. W. Draper, H. Flewelling, K. Hodapp, N. Kaiser, R. P. Kudritzki, E. Magnier, N. Metcalfe, P. Price, J. Tonry ja R. Wainscoat, *The Astrophysical Journal* **810**, 25 (2015).
- [17] D. J. Schlegel, D. P. Finkbeiner ja M. Davis, *The Astrophysical Journal* **500**, 525 (1998).
- [18] E. F. Schlafly ja D. P. Finkbeiner, *Astrophysical Journal* **737**, 103 (2011).
- [19] T. Dahlen, L.-G. Strolger, A. G. Riess, S. Mattila, E. Kankare ja B. Mobasher, *The Astrophysical Journal* **757**, 70 (2012).

- [20] E. L. Floc'h, C. Papovich, H. Dole, E. F. Bell, G. Lagache, G. H. Rieke, E. Egami, P. G. Pérez-González, A. Alonso-Herrero, M. J. Rieke, M. Blaylock, C. W. Engelbracht, K. D. Gordon, D. C. Hines, K. A. Misselt, J. E. Morrison ja J. Mould, *The Astrophysical Journal* **632**, 169 (2005).
- [21] B. Magnelli, D. Elbaz, R. R. Chary, M. Dickinson, D. Le Borgne, D. T. Frayer ja C. N. A. Willmer, *Astronomy and Astrophysics* **528**, A35 (2011).
- [22] S. Horiuchi, J. F. Beacom, C. S. Kochanek, J. L. Prieto, K. Z. Stanek ja T. A. Thompson, *The Astrophysical Journal* **738**, 154 (2011).
- [23] F. Mannucci, M. Della Valle ja N. Panagia, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **377**, 1229 (2007).
- [24] T. Padmanabhan, *Theoretical Astrophysics: Volume 3, Galaxies and Cosmology, Theoretical Astrophysics* (Cambridge University Press, 2000).
- [25] A. Gal-Yam, *Science* **337**, 927 (2012).
- [26] A. Heger ja S. E. Woosley, *The Astrophysical Journal* **567**, 532 (2002).
- [27] M. S. Bothwell, R. C. Kennicutt, B. D. Johnson, Y. Wu, J. C. Lee, D. Dale, C. Engelbracht, D. Calzetti ja E. Skillman, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **415**, 1815 (2011).
- [28] S. J. Smartt, *Publications of the Astronomical Society of Australia* **32**, e016 (2015).

A Liitekappale