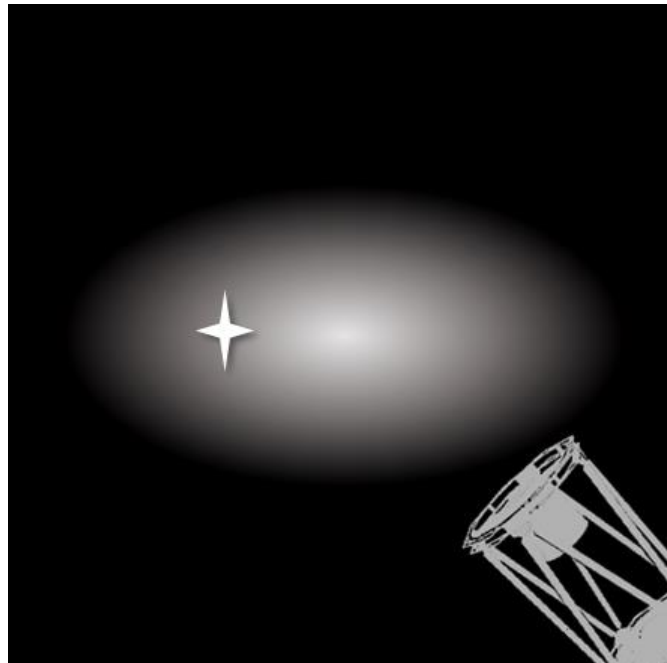


GALAKTIČNA ARHEOLOGIJA S SUPERNOVAMI TIPA IA



Avtorja:

Klemen Jurčević

Miha Bogataj

Mentorja:

dr. Jure Japelj

Lojze Vrankar

Gimnazija in srednja šola Rudolfa Maistra Kamnik

Kamnik, 2024/25

Gimnazija in srednja šola Rudolfa Maistra Kamnik

Novi trg 41a

1241 Kamnik

Naslov naloge:

Galaktična arheologija s supernovami tipa Ia

Področje:

Astronomija

Avtorja:

Klemen Jurčevič

klemenjurcevic@gmail.com

Miha Bogataj

mihl.bogataj@gmail.com

Mentorja:

Lojze Vrankar

lojze.vrankar@gssrm.si

dr. Jure Japelj

jure.japelj@ung.si

Kamnik, 2024/25

Zahvala

Sprva bi se rada zahvalila za vso pomoč, ki sva je bila deležna pri opravljanju raziskovalnega dela in ustvarjanju te raziskovalne naloge.

Posebej se zahvaljujema najinima mentorja, dr. Juretu Japlju, ki nama je dal predlog za raziskovalno nalogo ter naju usmerjal pri njeni izdelavi in profesorju Lojzetu Vrankarju, ki naju je skozi celotno raziskovanje vodil in podpiral.

Povzetek

S teleskopom GoChile sva fotografirala supernove tipa 1a v oddaljenih galaksijah. Hkrati sva pri raziskovanju uporabljala tudi fotografije, ki so bile na tem teleskopu posnete že v preteklosti.

Na vsaki fotografiji sva identificirala matično galaksijo in njej pripadajočo supernovo ter izmerila njeno oddaljenost do središča matične galaksije. Izmerjene oddaljenosti sva normalizirala glede na površinsko svetlost galaktičnega diska. S primerjavo te oddaljenosti in izmerjenega polmera galaksije sva določila ali se je supernova sprožila v zunanjem delu galaksije z relativno mlajšo populacijo zvezd ali v notranjem delu z gostejšo populacijo starejših zvezd. Rezultati merjenja oddaljenosti so pokazali, da je povprečna porazdelitev supernov tipa Ia v galaksijah gostiteljicah, v bližini njihovega roba. Najine izmerjene podatke oddaljenosti sva primerjala tudi z zunanjim vzorcem s katerim so se dobro ujemali.

Raziskala sva tudi spreminjanje oddaljenosti supernov od središča galaksije skozi čas z najinim ter večjim zunanjim vzorcem, ki je vseboval bližnje in bolj oddaljene galaksije. Rezultati primerjave kažejo, da je povprečna razporeditev supernov tipa Ia v starejših galaksijah znatno premaknjena proti njihovem jedru.

Abstract

We imaged type Ia supernovae in distant galaxies using GoChile telescope. In addition to that, we used already existing imagery that was taken using the same telescope in the past to increase our sample size.

On each image, we identified the supernova and its host galaxy. We then measured the distance of supernova from the centre of its host galaxy. The measured distances are then normalised relatively to the surface brightness of the galactic disk. By comparing the distance of supernova from the centre and the measured radius of its galaxy, we determined if the supernova exploded in the outer more active region or in the inner older and denser region of the galaxy. The results of the distance measurements showed that the average distribution of type Ia supernovae closely follows the edge of their host galaxies. We then compared our data to the already existing larger sample size, which showed good matching.

With our and external data, which included nearby and distant galaxies, we also explored the shifting distance of supernovae from the centre of their host galaxies with time. The results show that the average distribution of type Ia supernovae is noticeably closer to the galactic centre in older galaxies.

Kazalo vsebine

1. Uvod	1
1.1 Namen naloge	1
1.2 Metode	1
1.3 Hipoteze	2
2. Teoretični del.....	3
2.1 Uvod in kratka zgodovina	3
2.2 Življenje zvezd	4
2.2.1 Rojstvo	4
2.2.2 Zvezde na glavni veji	5
2.2.3 Staranje zvezd po masah	7
2.2.3.1 Zvezde od 0,08 do 0,25 mase Sonca (M)	7
2.2.3.2 Zvezde od 0,25 do 0,8 mase Sonca (M, K)	7
2.2.3.3 Zvezde od 0,8 do 8 mas Sonc (G, F, A, B).....	7
2.3.1 Bela pritlikavka	9
2.3 Supernove.....	10
2.2.1 Supernove tipa Ia.....	10
2.4 Pomen supernove tipa Ia v kozmologiji.....	13
2.4.1 Magnituda.....	13
2.4.2 Rdeči premik	15
2.4.3 Težave s Hubblovo konstanto	16
2.5 Galaksije.....	17
3 Oprema in programi.....	19
3.1 Oprema	19
3.2 Programi	20
4 Merjenje in obdelava podatkov	21
4.1 Iskanje aktivnih supernov	21

4.2 Opazovanje supernov	21
4.3 Kalibracija in zložitev posnetkov.....	25
4.4 Analiza supernov	26
5 Analiza in ovrednotenje hipotez	32
5.1 Hipoteza 1	32
5.2 Hipoteza 2	33
5.3 Hipoteza 3	35
5.4 Hipoteza 4	37
6 Napake	40
7 Zaključek	42
8 Viri.....	43

Kazalo slik

Slika 1: Vgravirana slika na kamen v Kašmirju, Indija (2100 - 4100 pr. n. št).	
Prikazuje nenavadno svetel objekt v bližini Sonca..	3
Slika 2: Simulacija pogleda na akrecijski disk v času nastajanja planetov	5
Slika 3: Hertzsprung-Russlov diagram	6
Slika 4: Notranjost zvezde v fazi fuzije helija	8
Slika 5: Primer planetarne meglice M97 – Sova	8
Slika 6: Primerjava velikosti Zemlje, Van Maanenove zvezde in 40 Eridana B – tipični bele pritlikavki z 0,7 in 0,6 Sončeve mase.	9
Slika 7: Diagram sistema bele pritlikavke, ki akumulira material zunanje ovojnice sosednje zvezde, katera leži znotraj njene Rocheve meje	11
Slika 8: Primerjava svetlobnih krivulj različnih tipov supernov	12
Slika 9: Ostanek Ia supernove SN 1006.	13
Slika 10: Gostota svetlobnega toka se manjša s kvadratom razdalje.	14
Slika 11: Rdeči premik	15
Slika 12: Primerjava vrednosti Hubblove konstante pridobljene z merjenjem prasevanja ter opazovanjem kefeid in supernov tipa Ia.	16
Slika 13: Hubblova klasifikacija galaksij	17
Slika 15: Primer poti svetlobnih žarkov skozi teleskop tipa Ritchey-Chretien. Svetloba se najprej odbije od primarnega zrcala (M1) in nato od sekundarnega (M2)	19
Slika 14: GoChile-GoT1 teleskopa	19
Slika 16: Observatorij v Čilu	19
Slika 17: Viking program.	21
Slika 18: Voyager.	22
Slika 19: Voyager sekvenca	22
Slika 20: Posnetki supernov in njihovih galaksij gostiteljic. Supernove so označene z rdečim krogom.	24
Slika 21: Astropixel	25
Slika 22: DeepSkystacker	26
Slika 23: Določanje koordinat supernove in središča galaksije, označenima z rdečima krogoma.	26
Slika 24: Računanje razdalje supernove od središča galaksije	27

Slika 25: Merjenje vrednosti ozadja.....	28
Slika 26: Merjenje svetlobnega profila galaksije.	29

Kazalo grafov

Graf 1: Porazdelitve svetlobe od središča do roba galaksije (AstroImageJ)	29
Graf 2: Svetlobni profil iz dveh pravokotnih smeri (Excel).....	30
Graf 3: Kumulativni graf porazdelitve svetlobe od središča do roba galaksije (Excel)	31
Graf 4: Primerjava d_{norm50} in d_{norm90} . Opazi se prekomerno odstopanje d_{norm50}	33
Graf 5: Število supernov tipa Ia v odvisnosti od razreda razdalje.....	33
Graf 6: Supernove tipa Ia porazdeljene glede na oddaljenost od središča galaksije, kjer 1,00 predstavlja d_{norm90}	34
Graf 7: Primerjalni kumulativni graf normalizirane razdalje večjega vzorca in najinega vzorca (Python).....	35
Graf 8: Povprečja normalizirane razdalje z padcem rdečega premika (starejše galaksije)(Excel).....	37
Graf 9: Normalizirane razdalje in povprečne razdalje z padcem rdečega premika pri mlajših galaksijah (Excel)	38
Graf 10: Normalizirane razdalje in povprečne razdalje z padcem rdečega premika pri starejših galaksijah (Excel).....	38
Graf 11: Primerjalni kumulativni graf normalizirane razdalje starejših (oddaljene) in mlajših (bližnje) galaksij (Python)	39
Graf 12: Primer ocene napake velikosti galaksije	40

Kazalo tabel

Tabela 1: Koordinati supernov, datumi opazovanj in število posnetkov	23
Tabela 2: Tipi galaksij gostiteljic	32
Tabela 5: Prikaz napake(Excel).....	41
Tabela 3: Prikaz napake(Excel).....	41
Tabela 4: Prikaz napake(Excel).....	41

1. Uvod

1.1 Namen naloge

Supernove tipa Ia so izjemno pomembni dogodki, prek katerih lahko merimo osnovne lastnosti vesolja, kot je hitrost njegovega širjenja. V zadnjem desetletju so astronomi ugotovili, da merjenje hitrosti širjenja s pomočjo supernov da različne rezultate kot merjenje širjenja prek drugih metod. Je težava v tem, da lastnosti supernov tipa Ia ne poznamo dovolj dobro?

Namen raziskovalne naloge je opazovanje supernov tipa Ia in njihovih galaksij gostiteljic. Prek analize opazovanj sva raziskovala lastnosti galaksij, v katerih se pojavljajo supernove, ter položaje supernov v galaksijah. Takšni podatki nam namreč lahko posredno nekaj povejo o supernovah samih. Raziskavo sva opravila s pomočjo teleskopa GoChile, slovenskega teleskopa, ki stoji na observatoriju El Sauce v Čilu.

1.2 Metode

- Fotografiranje novih supernov tipa Ia in njihovih galaksij gostiteljic.
- Geometrijsko merjenje oddaljenosti supernov tipa Ia od središča galaksije gostiteljice.
- Merjenje velikosti galaksij s pomočjo njihovega svetlobnega profila.
- Primerjava normaliziranih oddaljenosti z večjim vzorcem iz literature.
- Primerjava povprečnih vrednosti normaliziranih oddaljenosti supernov v matičnih galaksijah na različnih oddaljenostih od nas.
- Računanje ter obdelava podatkov.

1.3 Hipoteze

1. Supernove tipa Ia se pojavljajo v spiralnih in eliptičnih galaksijah.
2. Supernove tipa Ia se povprečno pojavljajo bližje roba galaksije kot v središčih galaksij.
3. Razdalje supernov tipa Ia od središč galaksij gostiteljic izmerjene s teleskopom GoChile se ujemajo z večjimi vzorci meritev iz literature.
4. Razdalje supernov tipa Ia od središč galaksij se s staranjem galaksije gostiteljice (oziroma s starostjo vesolja) spreminjajo.

2. Teoretični del

2.1 Uvod in kratka zgodovina



Slika 1: Vgravirana slika na kamen v Kašmirju, Indija (2100 - 4100 pr. n. št.). Prikazuje nenavadno svetel objekt v bližini Sonca. [vir: <https://www.cnet.com/science/india-supernova-rock-drawing/>]

Človeštvo je skozi svojo celotno zgodovino na nočnem nebu lahko opazovalo izjemno svetle nove zvezde, ki so ugasnile tako hitro kakor so se pojavile. Njihovega nastanka si niso mogli razložiti, miti o »ugaslih« zvezdah pa so za seboj pustili številne pripovedi v ljudskem izročilu ter upodobitve na številnih prazgodovinskih umetnostnih delih. Prvi, ki so opazovanja teh zvezd zapisali, so bili Kitajci v starem veku, v srednjem veku pa so o njih začeli poročati tudi Arabci in evropski menihi.

Za razliko od svetlih kometov, ki se približajo Zemlji večkrat na stoletje so supernove nepredvidljive in so s prostim očesom vidne le nekajkrat na tisočletje. V prejšnjem tisočletju naj bi prišlo do štirih supernov, ki so po svetlosti presegale Sirij, trenutno najsvetlejšo zvezdo na nočnem nebu. Supernova, ki se je na nebu pojavila leta 1006, naj bi bila tako svetla, da jo je bilo možno opazovati podnevi, ponoči pa naj bi bila po poročanju tedanjih opazovalcev »moč« njene svetlobe primerljiva mesečini ob Luninem kraju (Murdin in Murdin, 1985).

V novem veku so jih začeli imenovati *stellae novae* oz. nove zvezde iz česar je nastal izraz *nova*. Z dodajanjem predpone *super-* so navadne nove ločili od svetlejših *supernov* (tudi mehanizem nastanka nov in supernov je drugačen). V tistem času sta dve izjemno

svetli supernovi v naši galaksiji leta 1572 in 1604 zamajali temelje Aristotelovega pogleda na svet, ki je zagovarjal ne spreminjajoče se oz. statično vesolje zunaj lupin, po katerih naj bi krožili planeti v geocentričnem sistemu. V tistem času sta supernove preučevala astronoma Johannes **Kepler** in Tycho **Brahe**. Kepler je svoja opažanja zapisal v knjigi *De Stella Nova*, Brahe pa v delu *De nova stella*. Oba sta z opazovanjem ugotovila, da supernovam ne moreta izmeriti *paralakse* oz. spreminjanja položaja glede na oddaljene zvezde, ki je značilna za bližnje planete in asteroide. S tem sta dokazala, da so supernove od Zemlje oddaljene primerljivo kot zvezde. Izkazalo se je torej, da tudi zvezde niso nespremenljive.

2.2 Življenje zvezd

2.2.1 Rojstvo

Zvezde se rojevajo v hladnih medzvezdnih oblakih plina (večinoma vodik in helij) in prahu. Zaradi gravitacijske sile se molekule plina v oblaku medsebojno privlačijo s silo, ki jo opisuje *Newtonov gravitacijski zakon*:

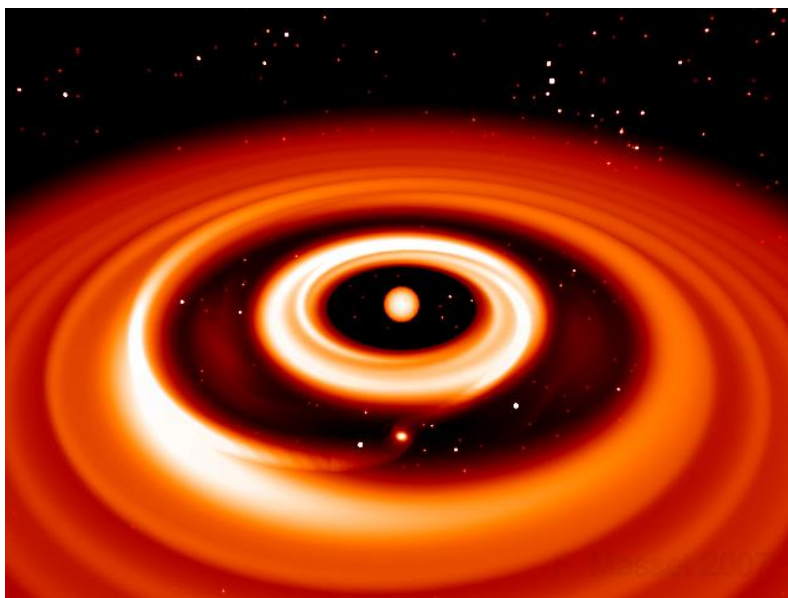
$$F = \frac{GMm}{r^2},$$

kjer je G gravitacijska konstanta, M masa prvega telesa, m masa drugega telesa in r njuna medsebojna razdalja. Vendar medsebojna gravitacijska sila delcev velikokrat ni dovolj velika, da bi povzročila sesedanje oblaka v zvezdo. Oblak je običajno v ravnovesju med gravitacijsko silo, ki poskuša pline zbrati skupaj in notranjo energijo, ki bi ga razpihnila.

Različni zunanji vplivi, kot so eksplozije supernov, ki v lokalnem plinu povzročijo motnje podobne zvočnim valovom, oblak na nekaterih delih razredčijo, druge pa ga lahko stisnejo na kritično gostoto. Notranja energija delcev plina in prahu ne mora več nasprotovati učinkom gravitacije, zato se oblak začne vedno hitreje izotermično krčiti.

Ko v središču sesedajoč se oblak doseže zadostno gostoto postane neprozoren za svetlobo. Ker jedro ne izgublja več toliko energije s sevanjem, se začne dodatno segrevati. Tako nastane vroče in gostejše jedro oz. *protozvezda* na katero pada material iz okoliške hladnejše ovojnice. V primeru, da masa protozvezde presega 0,08 mase Sonca v jedru doseže temperaturo 10 milijonov Kelvinov pri kateri se začne zlivanje oz. fuzija vodika v helij.

Z naraščanjem temperature v središču naraste tudi temperatura na površini protozvezde, zaradi česar se poveča moč zvezdnega vetra. Ta začne redčiti in »odpihovati« preostali plin v okolici protozvezde in tako počasi zmanjka snovi, ki jo je prej napajala. Rast protozvezde se ustavi, preostala plin in prah pa ustvarita akrecijski disk. Ko protozvezda preneha pridobivati maso iz okoliškega plina, preide na glavno vejo H-R diagrama.



Slika 2: Simulacija pogleda na akrecijski disk v času nastajanja planetov [vir:

<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>]

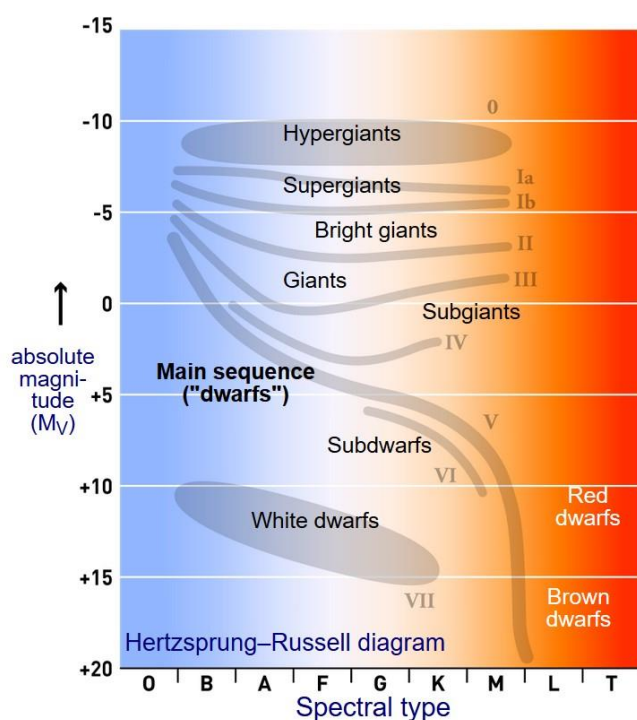
2.2.2 Zvezde na glavni veji

Zvezde se med seboj razlikujejo zaradi različne mase in starosti. Zvezda z določeno maso se bo predvidljivo »razvijala« in prehajala skozi mnoge razvojne faze. Na njen razvoj sicer vplivajo tudi količina in deleži kovin, ki jo sestavljajo in spremljevalne zvezde ali kompaktni objekti, kot sta nevtronska zvezda in črna luknja.

Hertzsprung-Russlov (H-R) diagram zvezde uredi po izsevu na ordinatni osi in po površinski temperaturi na abscisni osi. V njem se pokaže, da je večina zvezd na »diagonalni črti«, ki ji rečemo glavna veja. Na njej zvezde preživijo večino svojega življenja. Takrat v njihovih jedrih poteka zlivanje vodika v težja jedra.

Zvezde na diagramu poleg glavne veje tvorijo še druge skupine. Posebni skupini hladnih in svetlih zvezd so *orjakinje* in *nadorjakinje*. Na območju zvezd z višjo temperaturo in manjšim izsevom se nahajajo *bele pritlikavke*. Astronomi so jih glede na temperaturo razdelili v *spektralne tipe* M, K, G, F, A, B in O z mejami na približno 3700, 5200, 6000,

7500, 10.000 in 30.000 K. Vsak tip je še dodatno razdeljen v razrede od 0 do 9. Zvezde z oznako 0 imajo največjo temperaturo v svojem spektralnem tipu. Sonce je tipa G2 z efektivno temperaturo okoli 5778 K. Zvezde z višjo površinsko temperaturo so bolj modre barve, najhladnejše zvezde pa so oranžaste.



Ko se zvezde starajo prehajajo med razredi. Zvezde tipa 0, Ia, Ib, II, III in IV so že prešle z glavne vaje. Zvezde na glavni veji pripadajo razredu V. Razred VI so poseben tip zvezd imenovane podprtljakavke. Zaradi majhne vsebnosti kovin v zunanjih plasteh so bolj prosojne za svetlobo, zato imajo nenavadno visoko temperaturo v primerjavi s svojo maso. Razred VII na spodnjem levem robu diagrama vključuje bele prtljakavke.

Slika 3: Hertzsprung-Russlov diagram [vir: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HR-diag-no-text-2.svg>]

Procesi v jedru zvezde:

Glavni vir energije pri zvezdah glavne veje so jedrske reakcije, ki potekajo v njihovih jedrih. Zaradi ogromnega pritiska je v jedru tako visoka temperatura, da se delci oz. protoni po prostoru premikajo tako hitro, da lahko med seboj trčijo oz. se zlivajo kljub močni odbojni sili. Pravimo, da se vodik zлива v helij. Glede na maso zvezde lahko cikel poteka prek verige *p-p* ali *cikla-CNO*, če je zvezda masivnejša. Končen rezultat obeh verig je enak.

Po izteku enega cikla verige *p-p* iz štirih protonov dobimo helijevo jedro, dva pozitrona e^+ in dva nevtrina ν . Energija se sprosti v obliki gama sevanja γ in delce, ki jo s trki prenesejo na okoliško snov in jo pri tem segrevajo, kar omogoča nadaljnjo fuzijo. Produkti zlivanja imajo nekoliko manjšo maso kot snov iz katere so nastali. Razlika mase se pretvori v energijo, ki jo lahko izračunamo po Einsteinovi enačbi: $\Delta W = mc^2$.

2.2.3 Staranje zvezd po masah

2.2.3.1 Zvezde od 0,08 do 0,25 mase Sonca (M)

Najmanjše zvezde imajo v jedrih manjšo temperaturo in tako so jedrske reakcije v njih počasnejše, zato od vseh zvezd najdlje ostanejo na glavni veji. Zaradi velike gostote je njihova notranjost manj prosojna sevanju, zato se večino energije iz jedra do površja prenese s konvekcijo. Zaradi konvekcije v celotni zvezdi se nastali helij ne kopiči v jedru, zaradi česar zvezdi še kasneje zmanjka vodika. Zvezde na glavni veji preživijo tudi več milijonov let, veliko dlje od starosti vesolja.

Ko rdeča pritlikavka »porabi« večino zaloge vodika se jedro skrči in segreje. Zvezda naj bi potem še nekaj milijard let preživela kot *modra pritlikavka*, ki ima veliko višjo temperaturo in izsev kot njena predhodnica. Po tej fazi se zvezda sesede v belo pritlikavko.

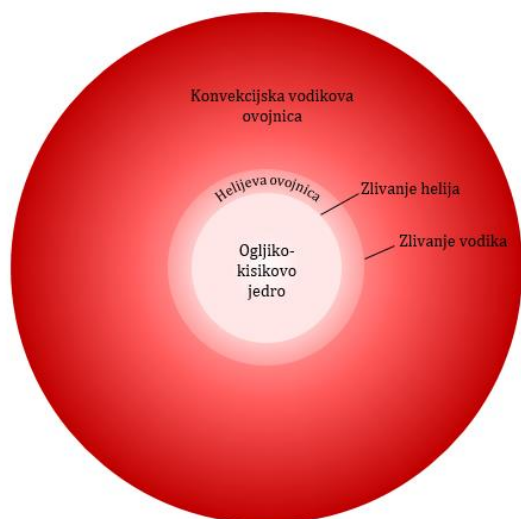
2.2.3.2 Zvezde od 0,25 do 0,8 mase Sonca (M, K)

V tej skupini zvezd zaradi prosojnejših notranjih plasti nastane sevalno območje med jedrom in zunanjim konvekcijskim pasom. Obstoj tega območja poveča zadrževanje helija v notranjosti zvezde ter omejuje porabo vodika iz zunanjih plasti. Zaradi tega imajo nekoliko krajšo življenjsko dobo. Zvezde v tej skupini združuje njihova evolucija po glavni veji. Ko izrabijo vodik v jedru se zvezda skrči in segreje, fuzija vodika pa se začne na ovojnici okoli jedra. Masa jedra se zaradi produktov fuzije večja in zato naraščata tudi tlak in temperatura, ki »napihmeta« zunanje plasti. Premer zvezde narašča, temperatura površja pa pada. Tej stopnji razvoja zvezde pravimo *rdeča orjakinja*.

Vodika v zunanjih plasteh jedra postopoma zmanjka, zato zunanje plasti padejo nazaj na zvezdo in nastane bela pritlikavka.

2.2.3.3 Zvezde od 0,8 do 8 mas Sonc (G, F, A, B)

Za razliko od prejšnje skupine se zlivanje jeder v teh zvezdah ne zaključi po fazi rdeče orjakinje. Masivnejše jedro bo s časom v sredici doseglo tolikšen tlak, da se bo začelo zlivanje helija v ogljik in kisik. Temu pravimo *helijev blišč*. Zunanje plasti se prenehajo širiti ter padejo nazaj na manjšo in bolj vročo zvezdo, ki vstopi na t.i. *horizontalno vrsto*. Ime izhaja iz razporeditve te skupine zvezd na H-R diagramu.



Slika 4: Notranjost zvezde v fazi fuzije helija

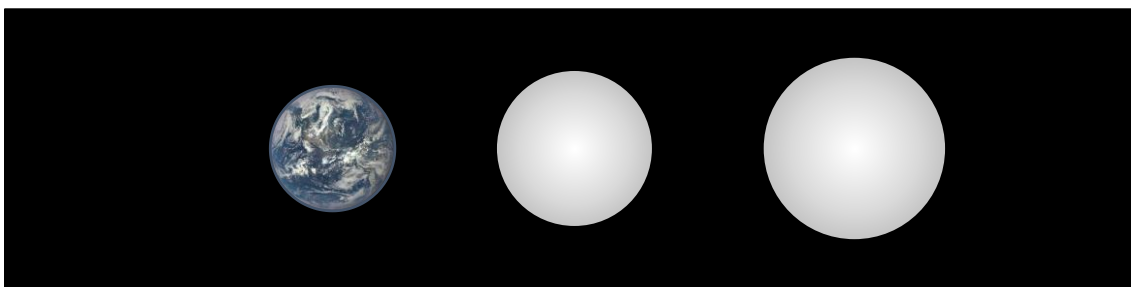


Slika 5: Primer planetarne meglice M97 – Sova
[vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:M97-stargazer-obs_2.jpg]

Za razliko od prejšnje skupine se zlivanje jeder v teh zvezdah ne zaključi po fazi rdeče orjakinje. Masivnejše jedro bo s časom v sredici doseglo tolikšen tlak, da se bo začelo zlivanje helija v ogljik in kisik. Temu pravimo *helijev blišč*. Zunanje plasti se prenehajo širiti ter padejo nazaj na manjšo in bolj vročo zvezdo, ki vstopi na t.i. *horizontalno vrsto*. Ime izhaja iz razporeditve te skupine zvezd na H-R diagramu. Po nekaj sto milijonih let je helij v jedru izrabljen in zvezda vstopi v fazo na *veji asimptotske velikanke* (AGB). Fuzija je zdaj spet omejena na zunanji del ogljikovo-kisikovega jedra, kjer poteka gorenje helija, ter na zunanji del helijeve ovojnice, kjer poteka gorenje vodika. Zunanje plasti se zdaj spet začnejo »napihovati« in ohlajati ter se razširijo na večji premer kot prvotna rdeča orjakinja. Helijeva ovojnica svoje gorivo hitro porabi in preneha s fuzijo, vendar se na novo nastali helij iz vodikove ovojnice na vsake sto tisoč let nakopiči v takih količinah, da se znova vžge. Vsakič, ko se helijeva ovojnica znova vžge se hitro poveča izsev zvezde, nekaj zunanjih redkejših plasti pa odnese v vesolje v obliki zelo intenzivnega zvezdnega vetra.

Po nekaj milijonih let ima zvezda zgolj še polovico svoje prvotne mase. Kar je ostalo vodika v ovojnici je premalo za ohranjanje jedrskih reakcij v jedru. Sredica se sesede v belo pritlikavko, preostala zunanja ovojnica pa se počasi porazgubi po vesolju – vidimo jo kot *planetarno meglico*.

2.3.1 Bela pritlikavka



Slika 6: Primerjava velikosti Zemlje, Van Maanenove zvezde in 40 Eridana B – tipični bele pritlikavki z 0,7 in 0,6 Sončeve mase [vir fotografije Zemlje: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earth-DSCVR-20150706.png>]

Bele pritlikavke so nekdanje jedro zvezde (z maso do 8 Sončevih mas), v katerem se je ustavilo zlivanje. V glavnem je sestavljena iz *degeneriranega plina elektronov*. To je plazma nevezanih atomskih jeder in elektronov. Večino belih pritlikavk pretežno sestavljajo produkti fuzije helijevih jeder (jedra kisika in ogljika); imenujemo jih CO bele pritlikavke.

Potem, ko se v jedru zvezde ustavi zlivanje se temperatura plazme zniža. Zato se zmanjša tudi sevalni tlak, ki je prej v hidrostatičnem ravnovesju kljuboval gravitacijski sili. Gibalna količina fotona je premo sorazmerna z njegovo frekvenco. Gama žarki, ki nastanejo ob fuziji torej ustvarjajo veliko večji sevalni tlak kot fotoni vidnega spektra, ki jih bela pritlikavka odda največ. Namesto fuzije zvezdo podpira kinetična energija visoko energijskih elektronov. Po *Paulijevem izključitvenem načelu* več kot en elektron ne more zasedati enega energijskega nivoja. Zaradi tega bi tudi pri 0 K nekateri elektroni morali zasedati višji energijski nivo. Čim bolj se bela pritlikavka skrči, tem večja postane gostota elektronov in s tem njihova sila na okoliško snov.

Po nastanku se počasi ohladi na temperaturo kozmičnega sevanja ozadja in postane *črna pritlikavka*. Snov v beli pritlikavki medtem kristalizira in pri tem sprošča energijo, ki še podaljša čas ohlajanja.

2.3 Supernove

Supernove so visokoenergetske eksplozije zvezd, ki nastopijo v trenutku, ko notranji tlak zvezde ne uspe več kljubovati gravitacijski sili. Astronomi so v preteklosti supernove klasificirali po razredih glede na izsev in prevladujoče spektralne črte. Delimo jih na dva glavna tipa I in II (Cappellaro in Turatto, 2000). V tej raziskovalni nalogi sva se osredotočila na podtip Ia.

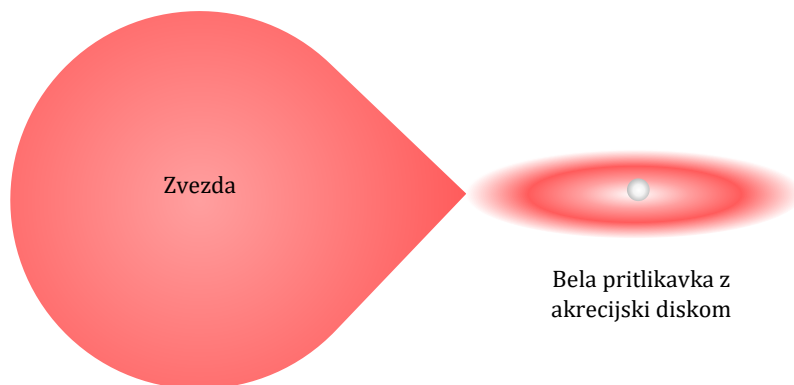
- Tip I (ne vsebuje vodikove črte)
 - Tip Ia (črta ioniziranega silicija)
 - Tip Ib/Ic (zelo šibka ali neprisotna črta ioniziranega silicija)
 - Tip Ib (črta ioniziranega helija)
 - Tip Ic (zelo šibka ali neprisotna črta ioniziranega helija)
- Tip II (v spektru prisotna vodikova črta)
 - Tip II-P, II-L ter IIn
 - Tip IIb

2.2.1 Supernove tipa Ia

Supernove tipa Ia nastanejo v *binarnih sistemih* oz. *dvojnih sistemih*, kjer zvezdi z različno maso krožita na relativno majhni medsebojni razdalji. Masa obeh zvezd mora biti večja od 0,25 Sončeve mase. Masivnejša zvezda bo zaradi hitrejših jedrskih reakcij v središču hitreje prešla z glavne veje in se razvila v belo pritlikavko. Medtem, ko oddaja svoje zunanje plasti se obe zvezdi premikata po skupnem oblaku plina. Masa sistema se manjša, hkrati pa se manjša vrtilna količina sistema. Zaradi tega sčasoma začneta krožiti na veliko manjši medsebojni razdalji. Ko iz glavne veje preide prvotno manj masivna zvezda, se v fazi rdeče orjakinje njene zunanje plasti razširijo in začnejo padati proti beli pritlikavki. V primeru, da sta zvezdi že prvotno krožili na zelo majhni razdalji se ta faza lahko začne, ko je prvotno manj masivna zvezda še zmeraj na glavni veji.

Okoli bele pritlikavke nastane akrecijski disk, ki se zaradi trenja močno segreje in poveča skupni izsev sistema. Vodik se akumulira na površju bele pritlikavke dokler ne doseže kritične mase pri kateri sta pritisk in temperatura na površju zadostna za vžig vodikove fuzije. Sproži se velika termonuklearna eksplozija oz. *nova*.

Sistem zvezd eksplozijo nove preživi, nova bela pritlikavka pa ima malenkost večjo maso kot prej. Z nadaljnjim padanjem snovi na belo pritlikavko se nove periodično sprožajo, hkrati pa raste njena masa.



Slika 7: Diagram sistema bele pritlikavke, ki akumulira material zunanje ovojnice sosednje zvezde, katera leži znotraj njene Rocheve meje

Okoli bele pritlikavke nastane akrecijski disk, ki se zaradi trenja močno segreje in poveča skupni izsev sistema. Vodik se akumulira na površju bele pritlikavke dokler ne doseže kritične mase pri kateri sta pritisk in temperatura na površju zadostna za vžig vodikove fuzije. Sproži se velika termonuklearna eksplozija oz. *nova*.

Sistem zvezd eksplozijo nove preživi, nova bela pritlikavka pa ima malenkost večjo maso kot prej. Z nadaljnjim padanjem snovi na belo pritlikavko se nove periodično sprožajo, hkrati pa raste njena masa.

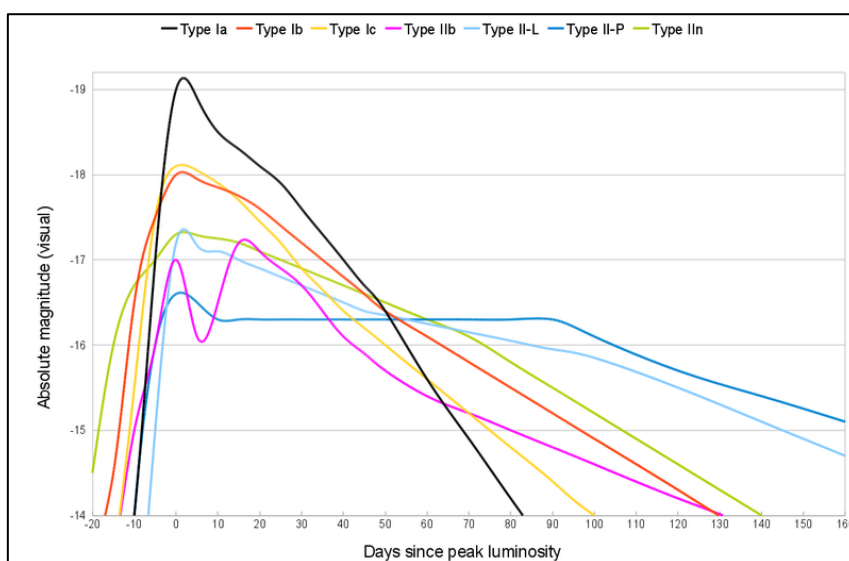
Bela pritlikavka se z akumuliranjem materiala sčasoma približa kritični masi oz. *Chandrasekharjevi meji*. To je največja masa, ki jo lahko doseže ne vrteča se bela pritlikavka, ne da bi se pri tem sesedla. Tlak degeneriranega plina elektronov takrat ne uspe več kljubovati gravitacijski sili, zato se zvezda sesede v majhno zelo gosto *nevtronsko zvezdo*.

Takšen scenarij je mogoč le v notranjosti masivnih zvezd ob koncu njihovega »življenja«, kjer sredico skupaj drži ogromen pritisk zunanjih plasti zvezde. Bele pritlikavke, ki maso akumulirajo počasi na površju še prej dosežejo *Chandrasekharjevo maso*, ki je približno 1,44 mase Sonca.

Ob tej masi sredica bele pritlikavke doseže kritično temperaturo in začne se zlivanje ogljika. Naenkrat se sprosti ogromna količina energije, ki belo pritlikavko raznese. Izjemno vroč plin se z veliko hitrostjo razširi v vesolje in skupen izsev sistema se izjemno poveča. Svetlost oblaka pada relativno počasi. Sprva so v spektru njegove svetlobe vidni elementi površja bele pritlikavke, ko pa se dovolj zredči postanejo vidni tudi elementi iz sredice.

Zaradi tega, ker se vse bele pritlikavke v takšnih sistemih sesedejo in eksplodirajo pri isti masi, imajo vse supernove tipa Ia tega nastanka enak višek izseva oz. največjo vrednost absolutne magnitude, ki jo dosežejo.

Druga redkejša možnost nastanka supernove je trk dveh belih pritlikavk v binarnem sistemu. V zelo gostih populacij zvezd kot so središča galaksij in kroglaste kopice obstaja veliko višja verjetnost trkov enojnih sistemov belih pritlikavk. Ob združitvi dosežeta večjo skupno maso zaradi česar je eksplozija močnejša in svetlejša.



Slika 8: Primerjava svetlobnih krivulj različnih tipov supernov [vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Comparative_supernova_type_light_curves.png]



Slika 9: Ostanek Ia supernove SN 1006 [vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SN_1006.jpg]

2.4 Pomen supernove tipa Ia v kozmologiji

2.4.1 Magnituda

Navidezni sij

Svetlost nebesnih teles, ki jih opazujemo na nočnem nebu izražamo z *navideznim sijem* (m). Podajamo ga v *navidezni magnitudi*, ki izvira iz starega sistema merjenja svetlosti starogrškega astronoma Hiparha. Zvezde na nočnem nebu je po svetlosti razdelil na 6 razredov. Kasneje je sistem magnitud izpopolnil Robert Pogson. Magnitude je definiral logaritemsko, vendar je pri tem še zmeraj ohranil staro mejo vidljivosti najšibkejših zvezd (v temni noči lahko povprečen človek vidi zvezde do 6. magnitude). Razmerje med različnima magnitudama glede na svetlobni tok nebesnih teles opisuje *Pogsonova enačba* (Guštin idr., 2024):

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{j_1}{j_2},$$

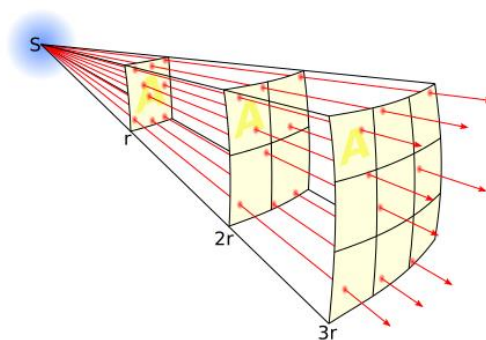
kjer sta m_1 in m_2 navidezni magnitudi nebesnih teles, j_1 in j_2 pa gostoti njunih svetlobnih tokov.

Svetlobni tok določenega nebesnega telesa, ki ga sprejemajo naše oči je odvisen od njegove temperature, velikosti in oddaljenosti. Po Stefanovem zakonu je gostota energijskega toka j , ki ga oddaja telo sorazmerna četrti potenci njegove temperature. Izsev nebesnega telesa lahko izrazimo kot

$$L = 4\pi r^2 \cdot \varepsilon \sigma T^4,$$

kjer je ε emisivnost telesa, ki je pri črnih telesih kakor je zvezda enak 1, r je polmer telesa in σ je Stefanova konstanta. Gostota svetlobnega toka, ki nas doseže na določeni razdalji d , je enaka

$$j = \frac{L}{4\pi d^2} = \frac{\varepsilon \sigma r^2 T^4}{d^2}.$$



Slika 10: Gostota svetlobnega toka se manjša s kvadratom razdalje [vir:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inverse_square_law.svg]

Absolutni sij

Izseve nebesnih teles primerjamo tudi z navidezno magnitudo, ki bi jo imeli na stalni oddaljenosti od opazovalca. Tej vrednosti pravimo *absolutni sij* (M), to je navidezni sij, ki bi ga neko telo imelo na oddaljenosti 10 parsekov. Navidezni in absolutni sij povezuje zveza

$$m - M = 5 \log \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right)$$

kjer je d oddaljenosti telesa. Supernove tipa Ia imajo vedno približno enak absolutni sij - 19,5. Oddaljenost supernove lahko torej izpeljemo kot

$$d = 10^{\frac{m-M+5}{5}}$$

Objektom, ki imajo poznan izsev pravimo *standardni svetilniki*. Supernove tipa Ia so tako daleč, da za merjenje njihovih razdalj ne moremo uporabiti drugih standardnih metod merjenja razdalj v vesolju (letna paralaksa, kefeide).

2.4.2 Rdeči premik

Telesu, ki oddaja valovanje z valovno dolžino λ_0 in se premika z relativno hitrostjo v , izmerimo drugačno valovno dolžino λ , kot če bi mirovalo. Tej spremembi pravimo *Dopplerjev pojav*.

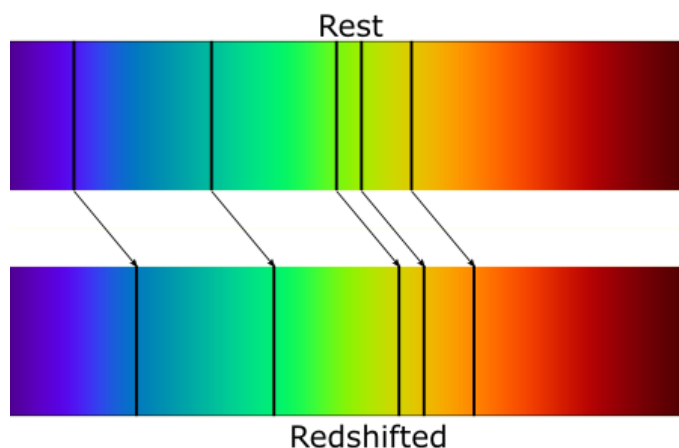
Če telo sveti in se nam približuje, izmerimo svetlobo s krajšo valovno dolžino. Temu pravimo *modri premik*. Če pa se telo od nas oddaljuje začne oddajati svetlobo, ki je premaknjena proti rdečemu delu spektra – *rdeči premik*. Izrazimo ga kot relativno spremembo valovne dolžine (Guštin idr., 2024):

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}.$$

Lahko pa ga izrazimo tudi z relativistično enačbo če poznamo njegovo hitrost v kot:

$$z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1,$$

kjer je c svetlobna hitrost v vakuumu.



Slika 11: Rdeči premik [vir: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Redshifted.png>]

Z merjenjem razdalj do galaksij s pomočjo supernov tipa Ia in merjenjem njihove svetlobe so astronomi ugotovili, da je svetloba oddaljenih galaksij tem bolj pomaknjena proti rdečemu del spektra, čim večja je njihova oddaljenost. Navidezno se bolj oddaljene galaksije od nas oddaljujejo veliko hitreje, iz česar lahko sklepamo, da se vesolje širi. Takemu premiku pravimo kozmološki rdeči premik, da ga ločimo od Dopplerjevega premika. Danes je znano, da se ne gibljejo galaksije temveč se širi prostor med njimi.

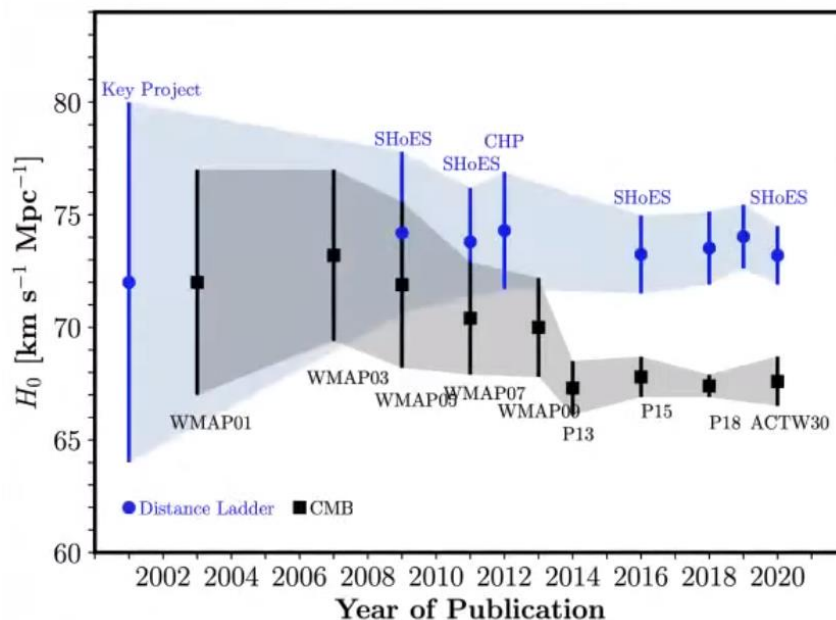
Zveza razdalje do galaksije in hitrosti njenega oddaljevanja je na relativno manjših razdaljah ($z < 0,2$) približno linearna. Sorazmernost razdalje d in hitrosti v zapišemo kot:

$$v = H_0 d,$$

kjer je $H_0 \approx 70$ (km/s) / Mpc *Hubbleova konstanta*. Zvezi pravimo *Hubble-Lemaîtrejev zakon*.

2.4.3 Težave s Hubblovo konstanto

Supernove tipa Ia imajo torej pomembno vlogo pri razumevanju širjenja vesolja in njegovega nadaljnega razvoja. V zadnjem desetletju se je z natančnim merjenjem lokalne Hubblove konstante s pomočjo merjenja oddaljenosti kefeid in supernov tipa Ia izkazalo, da se dobljena vrednost ne ujema s tisto, ki so jo izmerili z opazovanjem *prasevanja* vesolja (*Hubble tension*). Prasevanje oz. *kozmično mikrovalovno ozadje* (CMB) je mikrovalovno sevanje, ki prežema vesolje. Nastalo naj bi v obdobju okoli 380 000 let po velikem poku, ko je vesolje postalo prosojno za fotone.



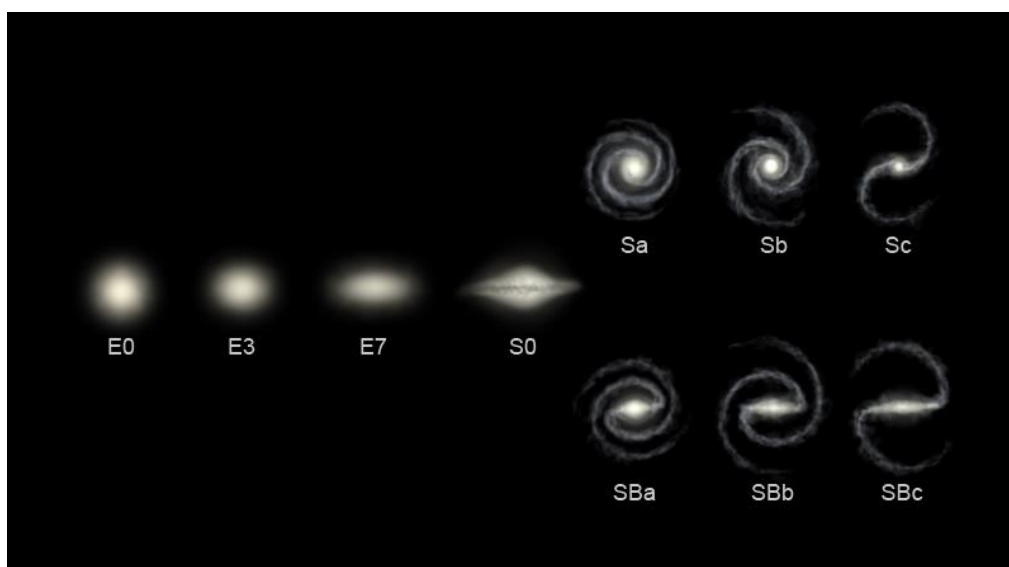
Slika 12: Primerjava vrednosti Hubblove konstante pridobljene z merjenjem prasevanja ter opazovanjem kefeid in supernov tipa Ia [vir: <https://mappingignorance.org/2022/04/04/the-hubble-tension-in-perspective-a-crisis-in-modern-cosmology/>]

Pojavilo se je več možnih razlag za razliko med tema vrednostima. Ena od možnih razlag je naše nezadostno poznavanje supernov tipa Ia. Vemo, da so okoliščine njihovega nastanka različne in niso zmeraj zanesljive kot standardni svetilniki. V preteklosti je bilo mogoče razmerje načinov nastanka supernov bistveno drugačno, kar bi se odražalo tudi pri merjenju razdalj do galaksij in s tem Hubblove konstante.

Supernove bi lahko bolje preučili tako, da bi opazovali okolja njihovega nastanka. Gostota zvezdne populacije, starost in sestava zvezd ter količina plina in prahu so samo nekateri izmed dejavnikov, ki bi lahko temeljito vplivali na značilnosti ter okoliščine nastanka eksplozije.

Sestava galaksije v katerih nastajajo supernove je bistveno drugačna glede na to na kakšni oddaljenosti od njenega jedra se nahajamo. Z merjenjem oddaljenosti supernov tipa Ia od jedra galaksije bi lahko o okoljih njihovega nastanka veliko izvedeli.

2.5 Galaksije



Slika 13: Hubbleova klasifikacija galaksij [vir: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hubble_seqnce_photo.png]

Galaksije so sistemi zvezd, plina, prahu in temne snovi, ki jih skupaj veže gravitacijska sila. Razlikujejo se po masi, izsevu, velikosti in obliki.

Klasifikacija:

Galaksije razvrščamo po sistemu *Hubbleove klasifikacije*, ki ga je utemeljil astronom Edwin Powell Hubble. Po njem jih delimo na tri glavne vrste (Guštin idr., 2024):

- *Eliptične galaksije* (Ei) – večinoma stare zvezde so enakomerno razporejene v obliki elipsoida, njihova gostota pa enakomerno pada z oddaljevanjem od središča. Vsebujejo malo plina in prahu ter nimajo izoblikovanih rokavov in ostalih notranjih struktur v katerih bi se množično rojevale nove zvezde.
- *Lečaste galaksije* (S0) – po starosti in nastajanju zvezd so podobne eliptičnim, vsebujejo pa veliko večjo količino prahu, ki lahko tvori prečke in obroče.
- *Spiralne galaksije* – delimo jih na *navadne* spiralne (Sa, Sb, Sc) ter spiralne s *prečko* (SBa, SBb, SBc). Sestavljene so iz središčne odebelitve s podobno starostno sestavo zvezd eliptičnim in lečastim galaksijam, ki jo obdajajo spiralni rokavi z večjo količino plina in mladih zvezd.

Poleg teh poznamo tudi manjše *nepravilne galaksije* (Irr), ki imajo neurejeno notranjo strukturo.

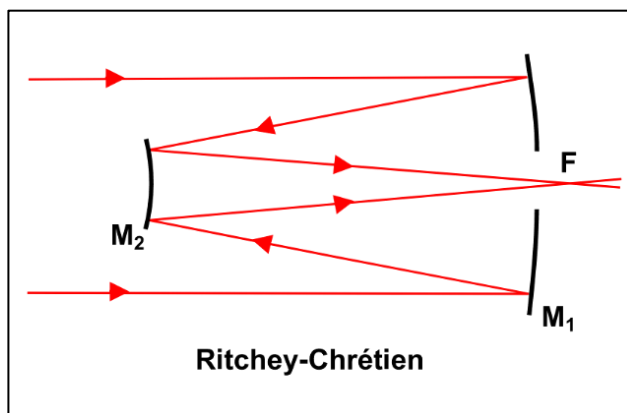
Z nastajanjem novih zvezd se zaloge plina v spiralnih galaksijah sčasoma manjšajo, zato se pretvorijo v lečaste oz. eliptične galaksije. V njih se lahko spremenijo hitreje, če doživijo trk z drugo galaksijo, ki povzroči veliko motenj v oblakih plina in s tem množično nastajanje novih zvezd.

3 Oprema in programi

3.1 Oprema



Slika 15: GoChile-GoT1 teleskopa [Vir :<https://gochile.si/teleskop-in-oprema>]



Slika 14: Primer poti svetlobnih žarkov skozi teleskop tipa Ritchey-Chrétien. Svetloba se najprej odbije od primarnega zrcala (M_1) in nato od sekundarnega (M_2)

Teleskop: Za opazovanje sva uporabljala slovenski teleskop GoChile-GoT1 v Čilu, ki ima optično cev premera 400 mm in goriščno razmerje $f/6,5$. Teleskop je reflektor tipa Ritchey-Chrétien. Ta tip teleskopa ima relativno veliko vidno polje in ima majhne optične napake, kar je posledica uporabe hiperboloidnega primarnega in sekundarnega zrcala. Oprema stoji na madžarski ONE50 montaži, ki se je izkazala kot dobra montaža tudi drugje po svetu.



Slika 16: Observatorij v Čilu [Vir: <https://astronomska-revija-spika.si/poletna-sola-astronomije-gochile-opazovanje-s-teleskopom-gochile/>]

Kamera: Kamera na teleskopu je ASI6200MM Pro. Teleskop je opremljen s filtri L, R, G, B, H α in O $_3$. Pri raziskovanju sva uporabljala L in R filtra. Snemanje v L filtru nama je omogočilo posneti posnetke v celotnem vidnem spektru svetlobe. Ker ta filter prepusti največ svetlobe, sva torej z njim lahko opazovala relativno temne galaksije. S filtrom R pa sva opazovala, ko je bila na nebu osvetljena Luna. Odbita svetloba od Lune namreč svetlobno onesnažuje predvsem v modri svetlobi in manj v rdeči.

Sistemska oprema: Glavni sistem za upravljanje teleskopa je Voyager, ki povezuje montažo teleskopa s kamero.

3.2 Programi

Pri načrtovanju in izvedbi opazovanj sva si pomagala s programi:

- Stellarium (<https://stellarium.org/>)
- Viking (<https://software.starkeeper.it/>)
- Voyager (<https://software.starkeeper.it/>)
- Phd2 guide (<https://openphdguiding.org/>)
- maximDL (<https://cdn.diffractionlimited.com/help/maximdl/MaxIm-DL.htm#t=Introduction.html>)

Za obdelavo posnetih slik sva uporabila:

- AstroPixelProcessor (<https://www.astropixelprocessor.com/>)
- DeepSkyStacker (<http://deepskystacker.free.fr/english/index.html>)

Za merjenje in analizo meritev sva uporabila:

- AstroImageJ (<https://www.astro.louisville.edu/software/astroimagej/>)
- Excel: (<https://www.microsoft.com/sl-si/microsoft-365/excel>)
- Python

4 Merjenje in obdelava podatkov

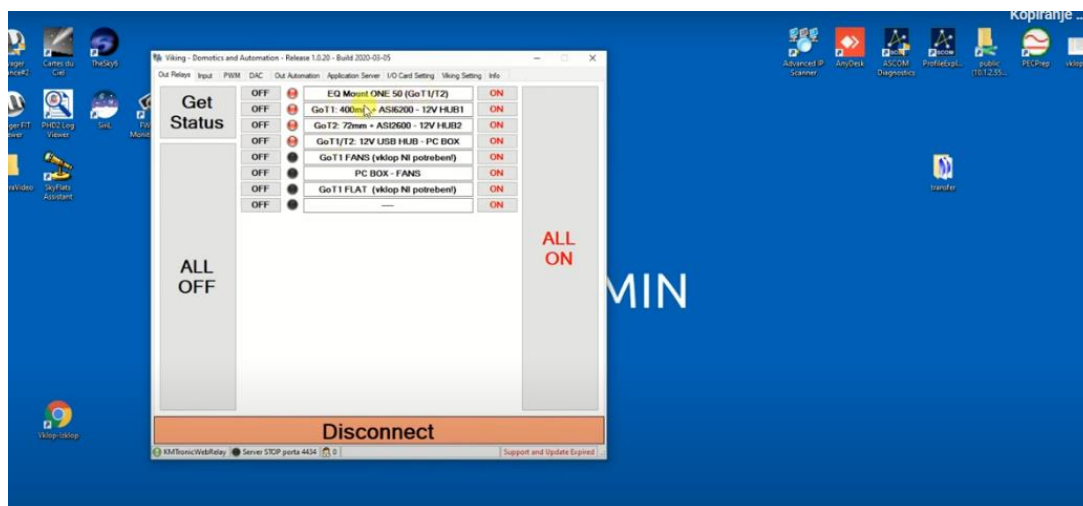
4.1 Iskanje aktivnih supernov

Za najino raziskovanje sva potrebovala supernove, ki so eksplodirale nedolgo nazaj, tako da so še vedno vidne. Obenem je morala biti zadnja znana vrednost navideznega sija supernove vsaj 18 mag, da bi bili najini posnetki zaradi omejene zmogljivosti opreme sploh uporabni. Aktivne supernove tipa Ia sva poiskala na seznamu svetlih supernov.

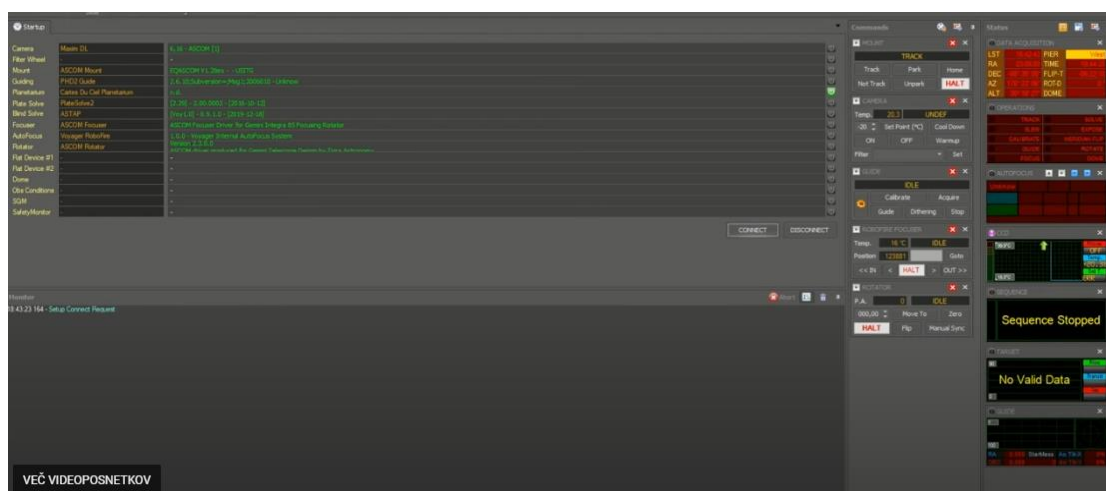
Po izbrani primerno svetli supernovi tipa Ia sva supernovo še dodatno preverila preko spletnega arhiva. Za določanje vzida in zaida supernove sva si pomagala s spletno stranjo: Telescopius ter z aplikacijo Stellarium.

4.2 Opazovanje supernov

Supernove sva opazovala preko računalnika v Čilu, s katerim upravljamo teleskop GoChile-GoT1. Opazovanje sva začela z vklopom opreme preko programa Viking.



Slika 17: Viking program [zajem zaslona]



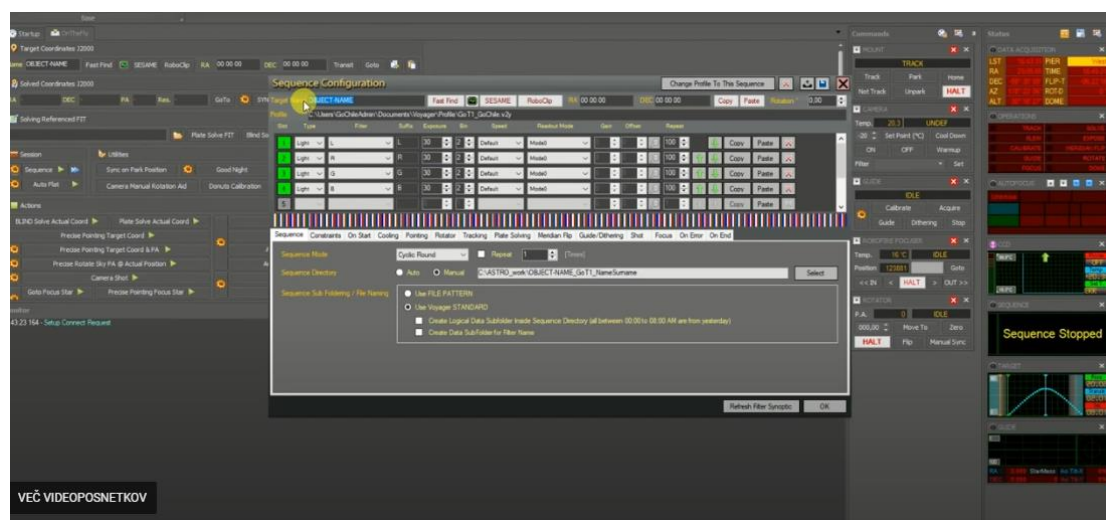
Slika 18: Voyager [zajem zaslona]

Drugi korak je bil zagon programa Voyager, glavnega programa za kontrolo teleskopa. V programu sva naprej povezala vse sisteme teleskopa in nato kamero ohladila na -10 stopinj Celzija. Kamero sva ohladilo, zato da sva zmanjšala količino šuma (slab, moteč signal), ki nastane zaradi segrevanje celotne opreme.

Sledila je priprava sekvence opazovanja, kamor sva podala koordinate opazovane supernove, čas osvetlitve, filtre, s katerimi bo narejen posnetek ter samo število posnetkov.

Nato sva zagnala sekvenco in začela z opazovanjem. Teleskop se je usmeril na zahtevane koordinate, izostril sliko ter začel slediti s pomočjo aplikacije phd2 guiding.

Po končanem opazovanju sva izključila sisteme in parkirala teleskop, da ob ponovnem zagonu ne bi prišlo do morebitnih poškodb.

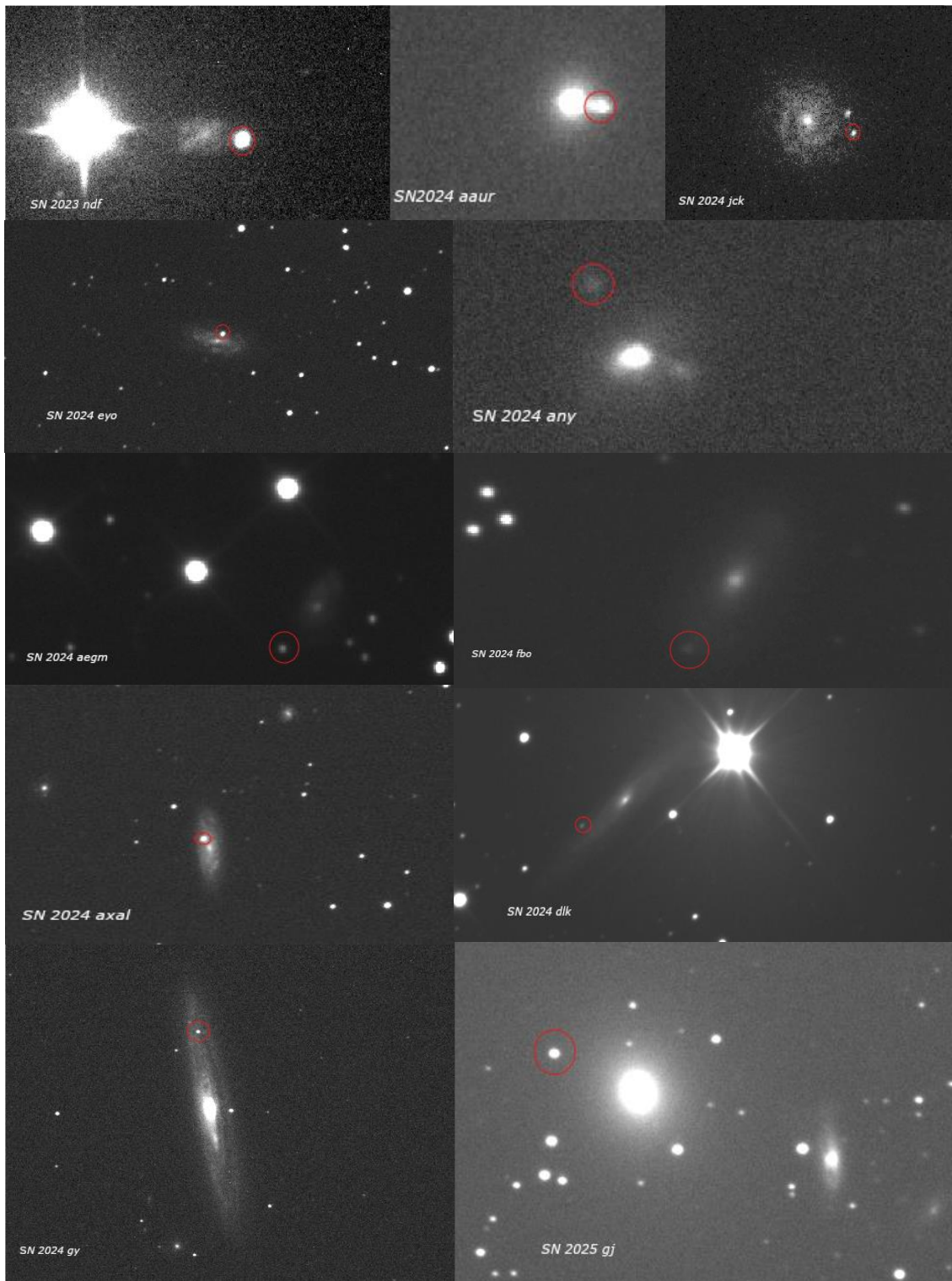


Slika 19: Voyager sekvenca [zajem zaslona]

Med opazovanji sva naletela na nekaj težav. Največ težav nama je povzročal program phd2 guiding, ki je zadolžen za natančno sledenje teleskopa. Program ni natančen in sledenje, če je delovalo, je bilo zelo površno, kar se je odražalo v kvaliteti posnetkov. Takrat sva uporabila program maximDL, ki namesto sledenja s programom phd2 guiding uporablja sledenje samega teleskopa. To sledenje ni dovolj natančno za daljše osvetlitve, zato sva večinoma uporabljala osvetlitve s trajanjem 30 sekund.

	Koordinati (RA/DEC)	datum	število posnetkov	Čas osvetlitve
2023 ndf	01:31:14.943 -17:42:13.66	2.8 - 31.7.2023	45	59400s
2024 gy	12:15:51.289 +13:06:56.13	11.4.2024	12	3600s
2024 jck	01:15:52.450 -32:28:52.46	12.9.2024	16	4080s
2024 axal	03:08:57.837 -02:56:45.82	28.10.2024	48	2880s
2024 any	03:08:57.840 -02:56:45.82	16.11.2024	71	4260s
2024 aaur	09:54:27.511 -06:57:10.65	17.11.2024	180	10800s
2024 eyo	20:44:37.595 -45:58:51.66	22.12.2024	103	6180s
2024 dlk	03:05:46.680 +36:46:34.93	21-23.12.2024	290	17400s
2024 fbo	13:06:13.289 -30:09:40.81	27.12.2024	316	9480s
2024 aegm	07:06:14.384 +23:35:10.49	27.12.2024	121	3630s
2025 gj	09:44:20.256 -21:16:22.40	6.2.2025	44	1320s

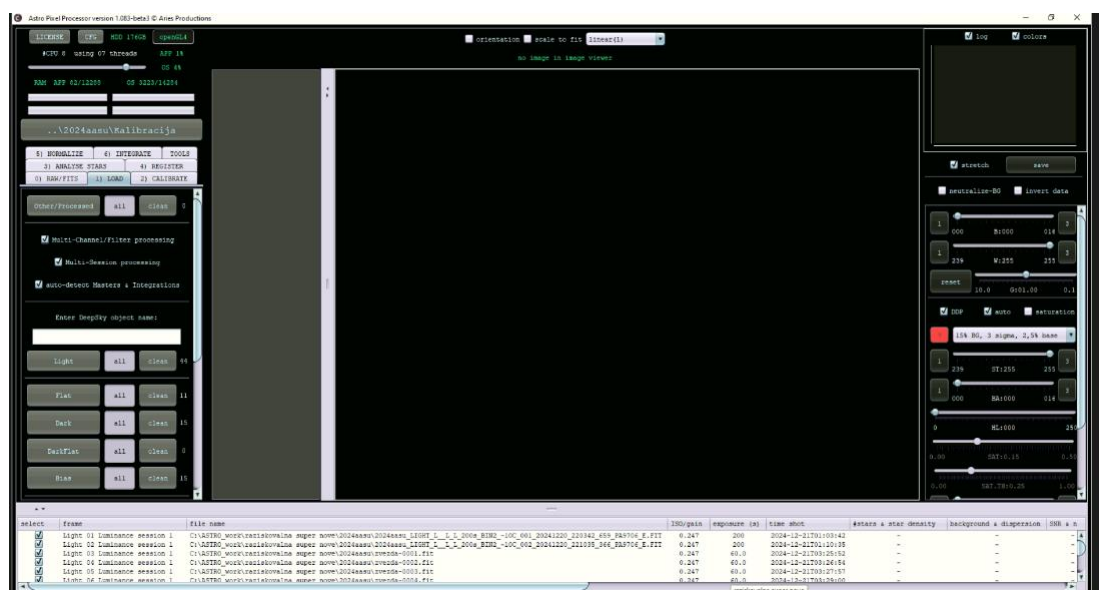
Tabela 1: Koordinati supernov, datumi opazovanj in število posnetkov



Slika 20: Posnetki supernov in njihovih galaksij gostiteljic. Supernove so označene z rdečim krogom

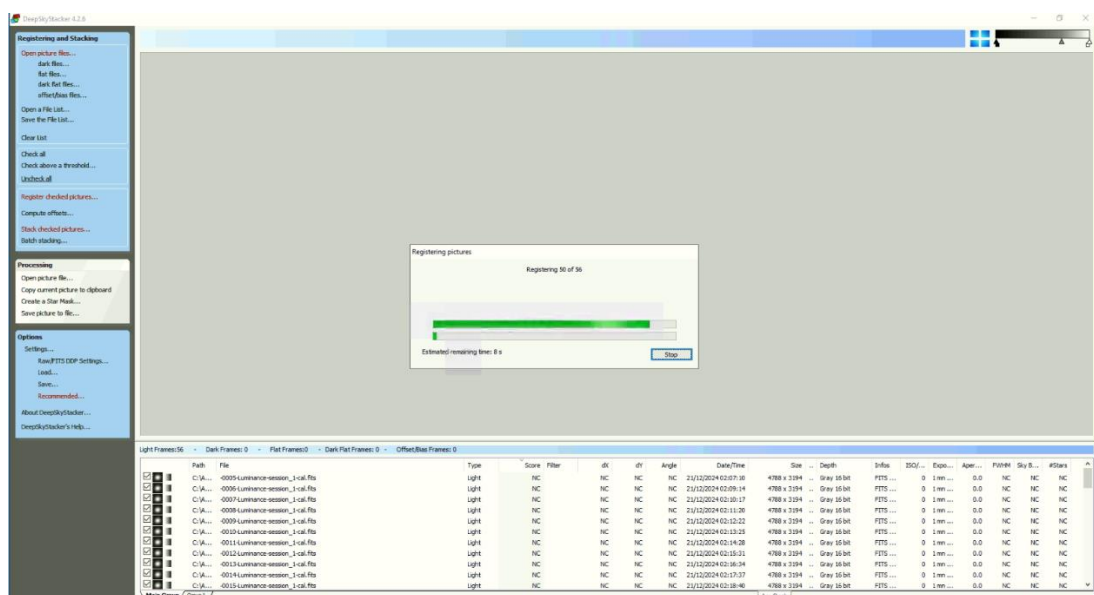
4.3 Kalibracija in zložitev posnetkov

Za samo kalibracijo sva uporabila arhivske posnetke *dark*, *flat* in *bias*, ki so se nahajali na računalniku. Posnetki *bias* nam povejo, koliko signala se nahaja na kameri preden začnemo s snemanjem (ta signal je različen od nič). Posnetek *bias* sva odštela od vseh drugih posnetkov. Posnetki tipa *dark* pokažejo, koliko signala se je pojavilo na kameri zaradi tega, ker delamo pri temperaturi, ki je različna od 0 K. Tudi posnetke *dark* odštejemo od ostalih posnetkov. Posnetki tipa *flat* pa nam razkrijejo neenakomerno osvetljenost kamere. Posnetke tega tipa sva normalizirala in z njimi delila slike galaksij. Posnetke galaksij sva kalibrirala v programu AstroPixelProcessor.



Slika 21: Astropixel [zajem zaslona]

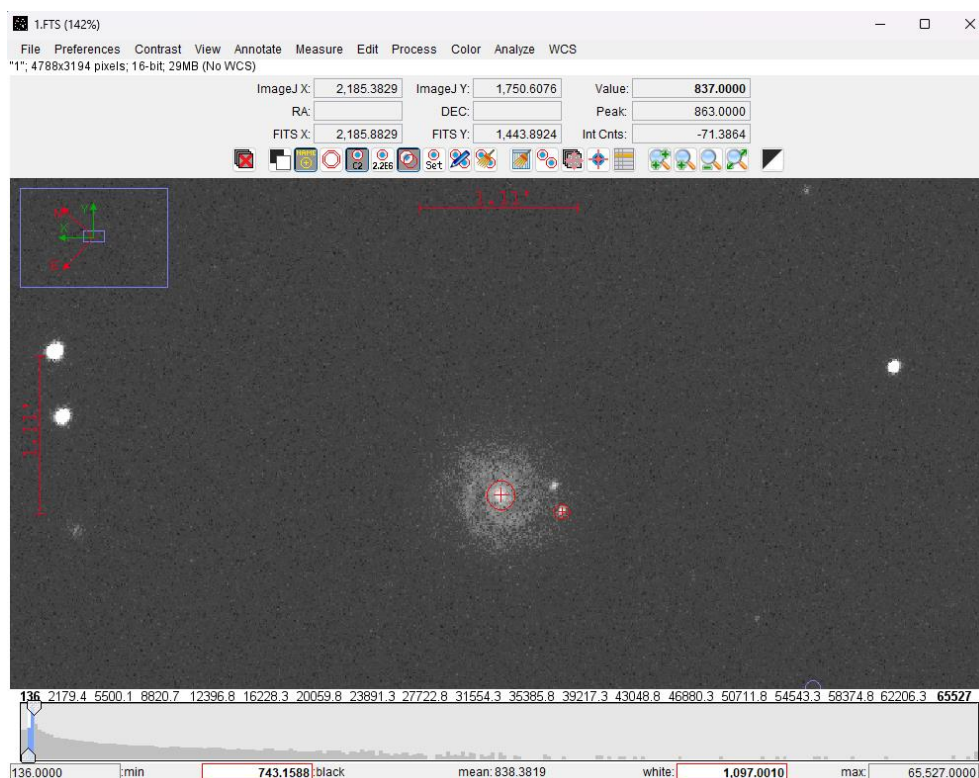
Vsako galaksijo s supernovo sva slikala večkrat. Pridobljene posnetke sva zložila v en sam posnetek (ekvivalenten posnetku z časom osvetlitve enakem vsoti časov osvetlitve posameznih posnetkov) s pomočjo programa DeepSkyStacker. Začela sva z vnosom posnetkov v program



Slika 22: DeepSkyStacker [zajem zaslona]

4.4 Analiza supernov

Način, na katerega sva analizirala vse posnete supernove, bova prikazala na primeru analize supernove SN2024jck. Naprej sva v programu AstroImageJ z merilno odprtino ki se standardno uporablja za fotometrijo, izmerila natančen položaj središča galaksije gostiteljice in supernove.



Slika 23: Določanje koordinat supernove in središča galaksije, označenima z rdečima krogoma [zajem zaslona]

Z uporabo Pitagorovega izreka in pridobljenimi koordinatami sva izračunala oddaljenost supernove od središča galaksije. Oddaljenost, izraženo s številom pikslov, sva množila z 0.592, da sva dobila razdaljo v kotnih sekundah.

Primer izračuna:

Koordinate supernove:

$$x = 2364.3$$

$$y = 1569.5$$

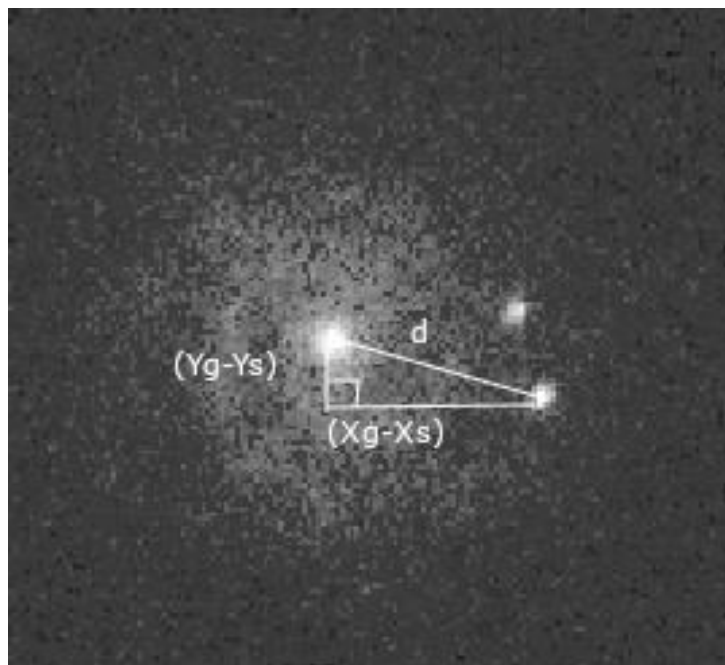
Koordinate središča galaksije:

$$x = 2407.9$$

$$y = 1581.1$$

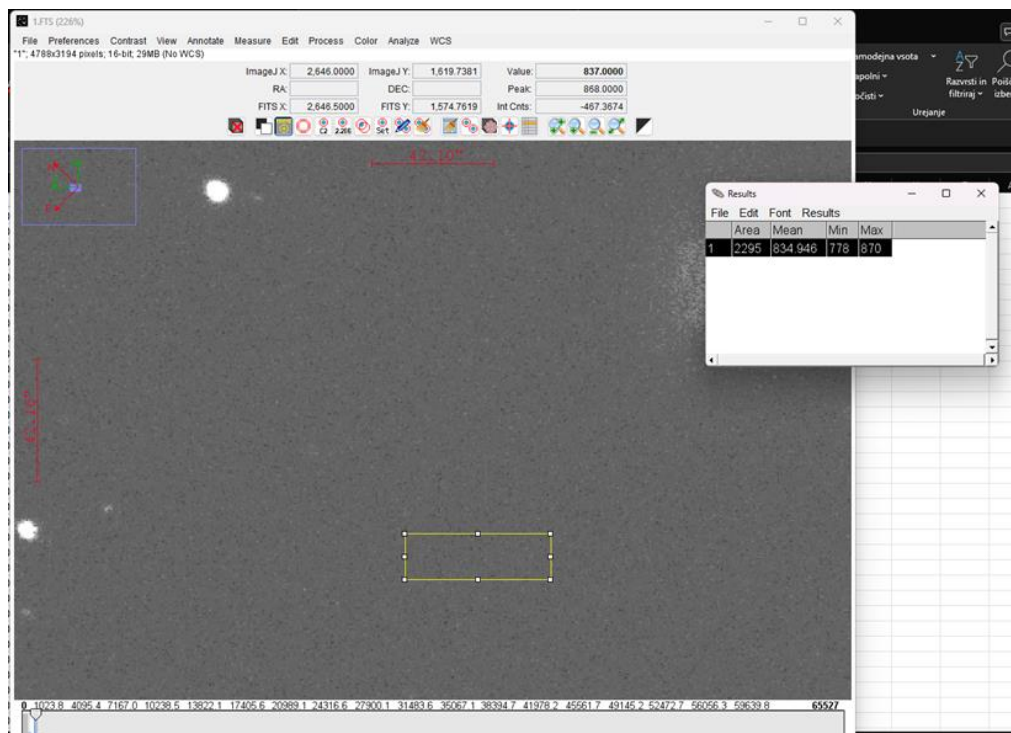
Oddaljenost supernove od središča

$$d = \sqrt{(x_g - x_s)^2 + (y_g - y_s)^2} = 45.1 \text{ px} = 26.7''$$



Slika 24: Računanje razdalje supernove od središča galaksije
[zajem zaslona]

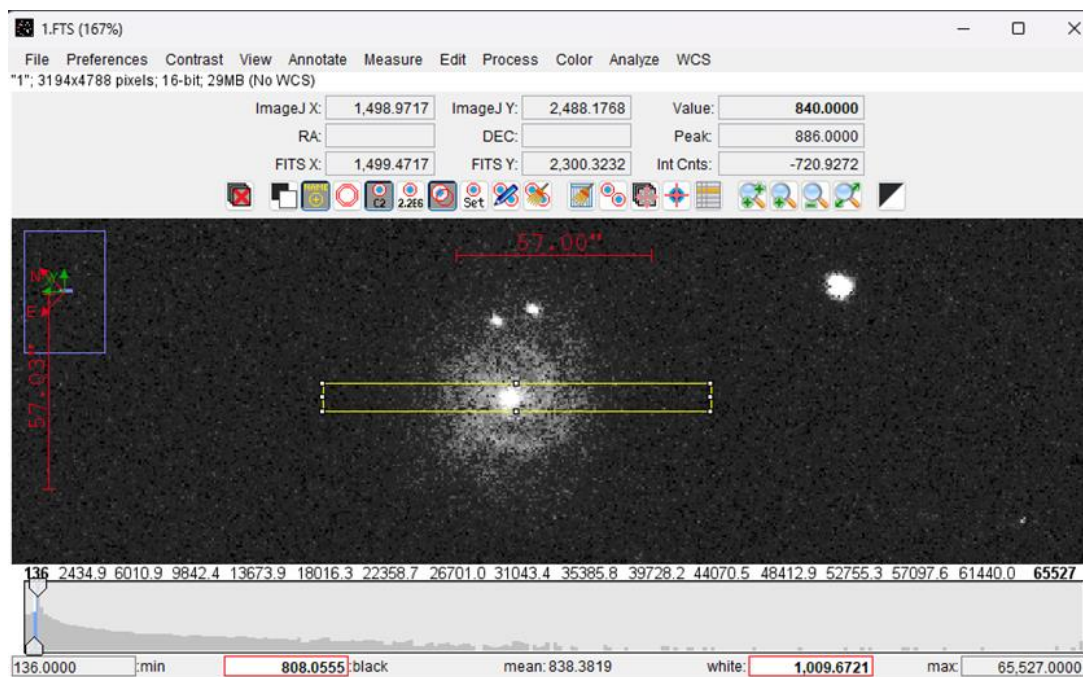
Tam, kjer ni zvezd ali galaksije, je še vedno nek od nič različen signal, ki ga dobimo zaradi sevanja ozračja. Temu signalu pravimo signal ozadja. Vrednost signala ozadja sva dobila tako, da sva v programu AstroImageJ na sliki narisala pravokotnik v območju, kjer ni zvezd in uporabila funkcijo »measure«.



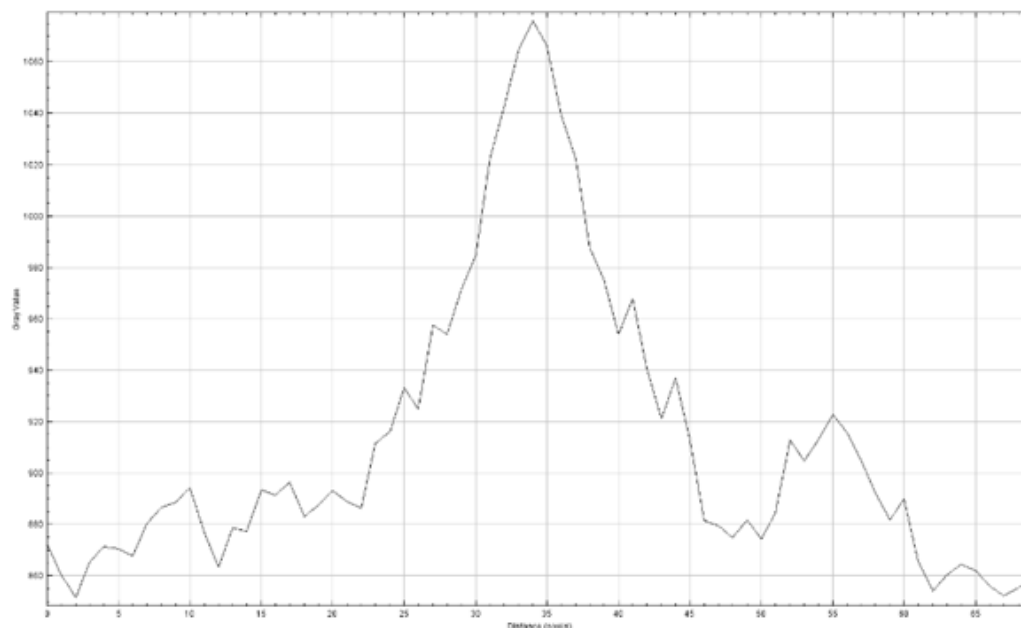
Slika 25: Merjenje vrednosti ozadja. [zajem zaslona]

Za dano območje prikazano na posnetku zaslona je vrednost ozadja 835 enot.

V naslednjem koraku sva poiskala svetlobni profil galaksije – porazdelitev množine izsevane svetlobe v odvisnosti od oddaljenosti od središča galaksije. Merjenje le-tega je odvisno od orientacije in položaja galaksije. V tem primeru je inklinacija galaksije praktično nič. Naprej sva prek galaksije narisala ozek pravokotnik skozi središče galaksije in kliknila na »analyse« in program je nato narisal ustrezen graf.



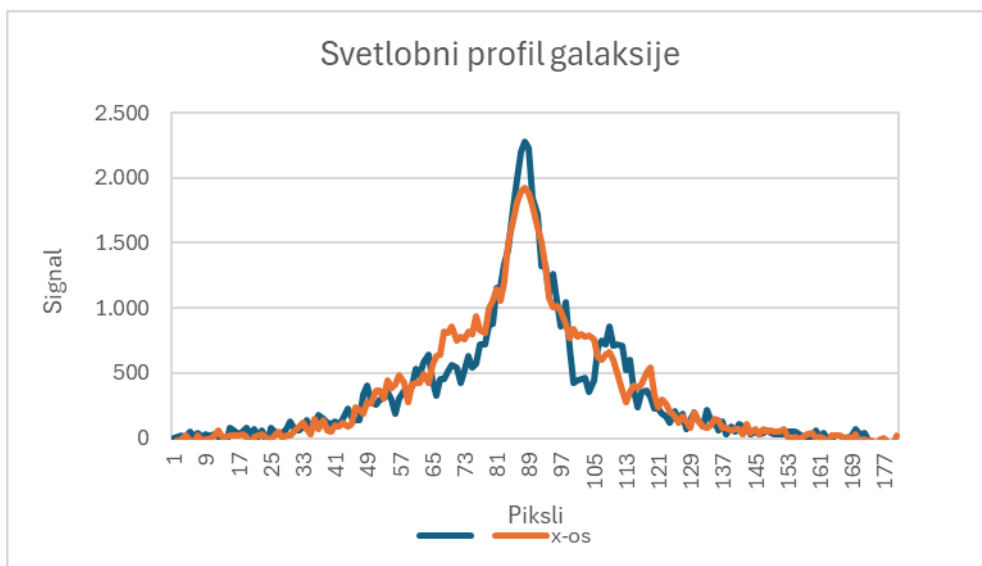
Slika 26: Merjenje svetlobnega profila galaksije. [zajem zaslona]



Graf 1: Porazdelitve svetlobe od središča do roba galaksije (AstroImageJ)

Galaksijo sva nato zasukala za 90 stopinj in ponovila postopek. Grafa sva shranila in podatke kopirala v Excel-ovo tabelo. Z meritvijo v pravokotnih smereh sva preverila, da je svetlobni profil galaksije simetričen.

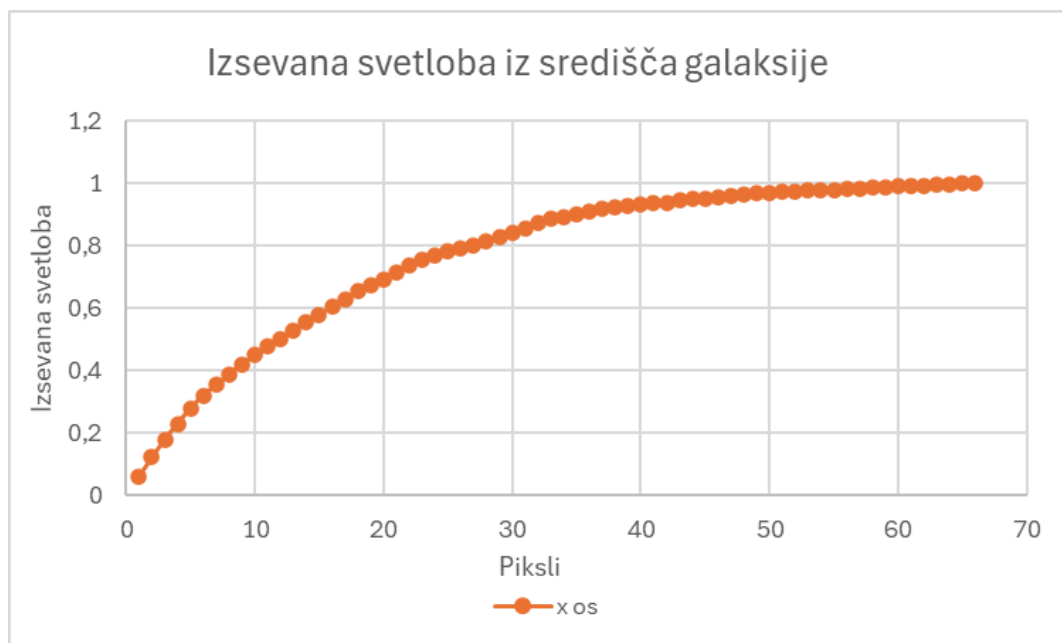
Od vseh podatkov v Excel-ovi tabeli sva odštela vrednost ozadja in tako dobila profil v dveh pravokotnih smereh. Profile sva primerjala s pomočjo grafa.



Graf 2: Svetlobni profil iz dveh pravokotnih smeri [Excel]

Uporabila sva desno polovico povprečnega svetlobnega profila. Velikost sva izrazila s polmerom galaksije, znotraj katerega je izsevana polovica vse svetlobe. Tega sva se lotila s preprostim trikom v Excelu tako, da sva porazdelitev radialnega signala pretvorila v kumulativno porazdelitev. Vzela sva vrednosti kot na primer A2, A3, A4, A5 ... in v vrstico A1 zapisala $= A2 + B1$, v vrstico B1 pa vrednost 0, s čimer sva dosegla seštevanje signala. Dobljene podatke sva delila z največjim številom, tako da sva dobila porazdelitev od 1 do 0. Podatke sva prikazala na kumulativnem grafu. signala.

Dobljene podatke sva delila z največjim številom, tako da sva dobila porazdelitev od 0 do 1. Podatke sva prikazala na kumulativnem grafu.



Graf 3: Kumulativni graf porazdelitve svetlobe od središča do roba galaksije [Excel]

Na y-osi je sedaj delež celotnega signala do posamezne razdalje od središča galaksije. Vrednost 0.5 pomeni, da je do tega polmera polovica vse izsevane svetlobe, vrednost 0.9 pa pomeni, da je do tam izsevane 90 odstotkov vse svetlobe.

Izpisala sva si vrednosti »pikslov«, pri katerih sva dobila vrednosti 0.5 in 0.9. Vrednosti sva pomnožila z velikostjo »piksla«, da sva dobila velikosti galaksije do teh razdalj v kotnih sekundah.

Primer izračuna:

$$r_{\text{galaksija90}} = (\text{oddaljenost v pikslih}) \times (\text{vrednost piksla}) = 25.5 \times 0.592 = 15.0''$$

$$r_{\text{galaksija50}} = (\text{oddaljenost v pikslih}) \times (\text{vrednost piksla}) = 8.5 \times 0.592 = 5.0''$$

S polmerom galaksije sva normalizirala razdaljo supernove od središča galaksije. To sva naredila zato, da lahko objektivno primerjava kako daleč od središča galaksij se supernove pojavljajo.

Primer izračuna:

$$d_{\text{norm50}} = d_{\text{supernova}} / r_{\text{galaksija50}} = 26.7 / 5.0 = 5.34$$

$$d_{\text{norm90}} = d_{\text{supernova}} / r_{\text{galaksija90}} = 26.7 / 15.0 = 1.8$$

Takšni razdalji pravimo tudi projicirana normalizirana razdalja, saj nismo upoštevali morebitne inklinacije galaksije.

5 Analiza in ovrednotenje hipotez

5.1 Hipoteza 1

SN Ia eksplodirajo v spiralnih in eliptičnih galaksijah.

Opazovan vzorec vsebuje devet spiralnih, eno lečasto in eliptično galaksijo. Iz slike bi lahko sklepali, da je supernova 2024any eksplodirala v eliptični galaksiji, ampak ta galaksija vsebuje zelo aktivno območje za nastajanje zvezd, kar je posledica tega, da je galaksija v procesu združevanja z dvema manjšima galaksijama.

Glede na zunanji vzorec je razmerje med spiralnimi in eliptičnimi galaksijami v bližnjem vesolju približno 4 proti 1. Z uporabo binomske porazdelitve smo izračunali, da je verjetnost, da je od deset galaksij (za eno nimamo podatka) ena eliptična, okoli 26 %.

Hipotezo lahko **potrdiva**.

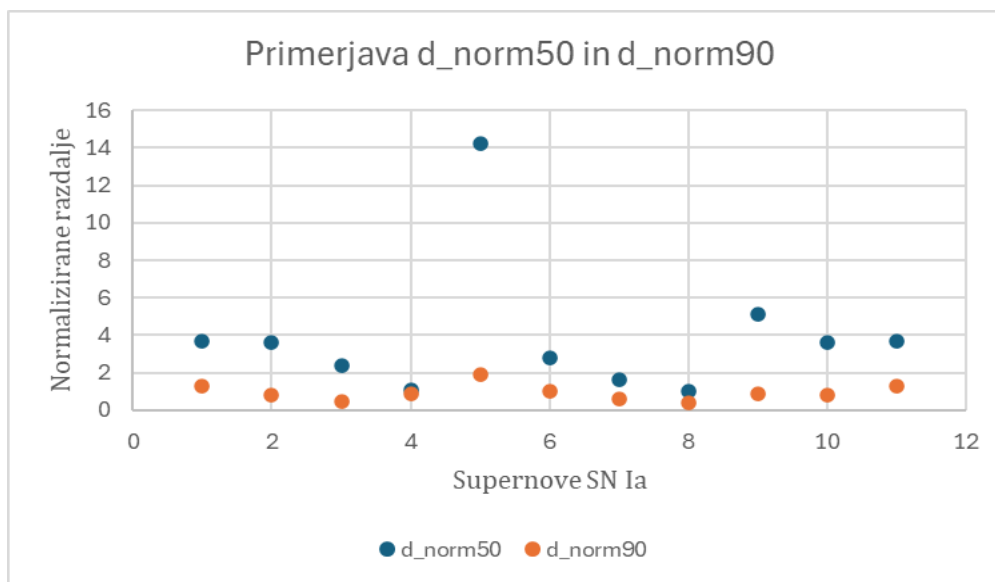
Supernove	Tipi galaksij
2023 ndf	Sbc
2024 aaur	SA0
2024 aegm	??
2024 any	S0–
2024 xal	SAB(s)
2024 dlk	Sb
2024 eyo	SB(s)
2024 fbo	SAB0
2024 gy	SAB(s)
2024 jck	SAB
2025 gj	E2

Tabela 2: Tipi galaksij gostiteljic

5.2 Hipoteza 2

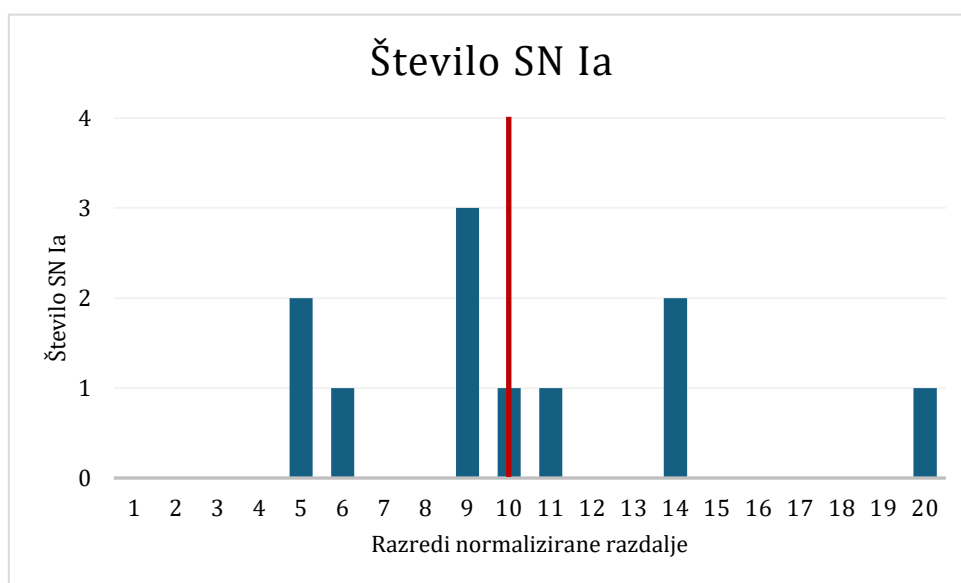
Supernove se pojavljajo na robu galaksije.

Drugo hipotezo sva testirala tako, da sva izračunala povprečje normalizirane razdalje d_{norm90} .



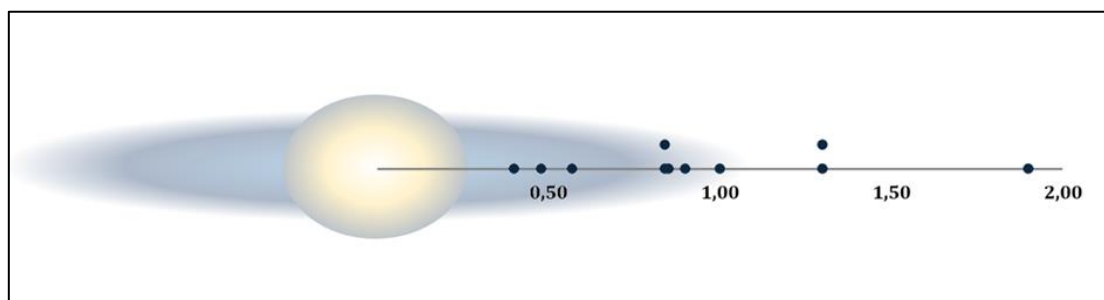
Graf 4: Primerjava d_{norm50} in d_{norm90} . Opazi se prekomerno odstopanje d_{norm50} [Excel]

Vrednost 1 pomeni razdaljo od središča matične galaksije znotraj katere galaktični disk in jedro oddajata 90% izseva galaksije. Vrednost 0 pomeni jedro galaksije. Za razdaljo supernov od središča galaksij sva dobila povprečno vrednost 0,94, kar pomeni, da se supernove v povprečju sprožajo bližje roba galaksije, ki sva ga določila.



Graf 5: Število supernov tipa Ia v odvisnosti od razreda razdalje [Excel]

Supernove sva razdelila po razredih oddaljenosti od določenega roba galaksije. Dvajset razredov sva razporedila od 0.00 do 1.99



Graf 6: Supernove tipa Ia porazdeljene glede na oddaljenost od središča galaksije, kjer 1,00 predstavlja d_{norm90}

Ugotovila sva, da se nobena supernova ni pojavila blizu središča. Po drugi strani je večina supernov blizu zunanjega roba galaksije. To lahko pojasnimo na dva načina. Oba sta povezana z opazovalnimi okoliščinami. Lažje je opaziti supernove, ki se pojavijo na robu galaksije. V središčih galaksij je praviloma več prahu, ki zastira svetlobo. Supernova, ki eksplodira v središču, bo zato (pri isti oddaljenosti od nas) izgledala temnejša in jo bo težje opaziti. Ker s teleskopom GoChile lahko opazimo le najbolj svetle dogodke, je pričakovano, da bodo ti večinoma na robovih galaksij. Študije pravijo (Timmes, Brown, & Truran, 2003), da so supernove tipa Ia, ki eksplodirajo v okolju z manjšo vsebnostjo težkih elementov, nekoliko svetlejše. Galaksije imajo v splošnem manjšo vsebnost težkih elementov na robovih. Možno je torej, da tudi zaradi tega takšne supernove lažje opazimo, ker so nekoliko svetlejše.

Študija (Wang, idr. 2013) je opazila, da obstajata dva razreda supernov tipa Ia glede na hitrost udarnega vala, ki nastane pri eksplozije. Ugotovili so, da se pogostejši tip z nižjimi hitrosti pojavlja pri večjih oddaljenostih od središča kot tip z višjimi hitrostmi. Še en dodaten razlog torej, da je bolj verjetno, da opazimo supernove na večjih oddaljenostih od središča. Populacije zvezd med razvojem galaksije migrirajo iz jedra proti zunanosti galaksije. Tako se jedro počasi prazni in »stara« obrobje galaksije pa postane bolj aktivno območje kjer nastajajo nove zvezde. Supernove tipa Ia se večinoma sprožajo v starejših sistemih binarnih zvezd, ki sledijo migraciji v zunanje predele galaksije. Z izračunom povprečne razdalje sva to potrdila.

Hipotezo lahko potrdi.

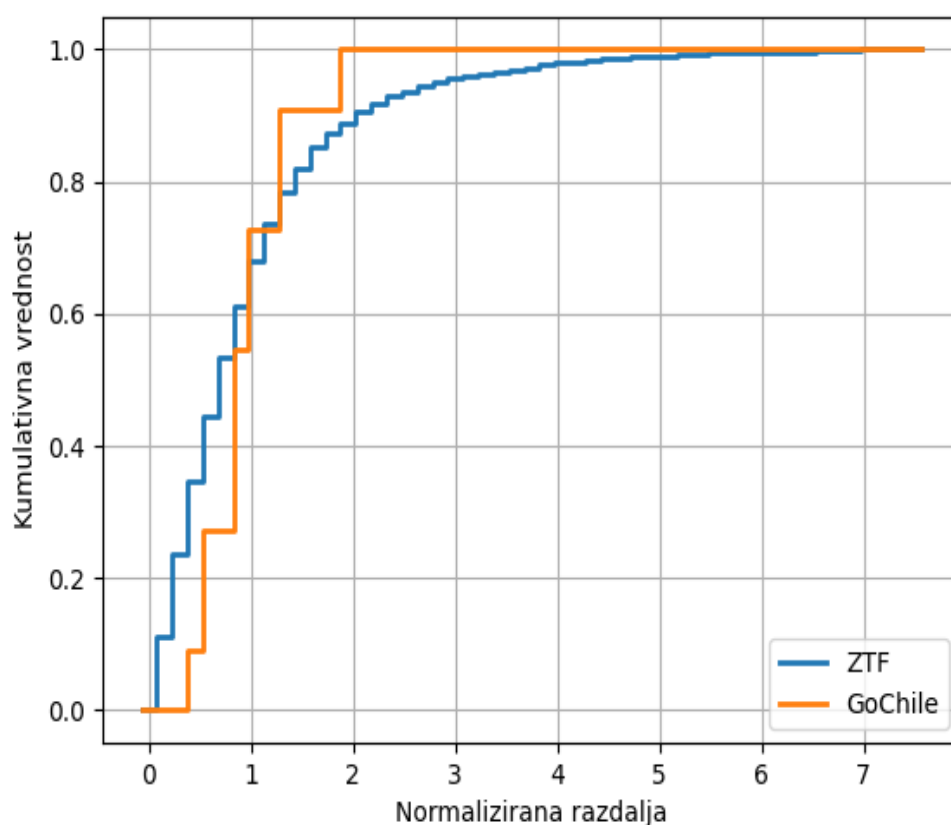
5.3 Hipoteza 3

Opazovan vzorec se ujema z vzorcem širšega razpona.

Kot primerjalni vzorec sva vzela podatke iz študije (Mickael Rigault, 2025) kjer so predstavili opazovanja in analizo več kot 3500 supernov tipa Ia. Med drugim navajajo tudi vrednosti rdečega premika posamezne supernove in normalizirane projicirane razdalje supernov od središča svojih galaksij.

Najin prvi korak je bil, da sva pretvorila podatke v primerno obliko za analizo. To sva naredila s pomočjo kodiranja v programerskem jeziku Pythonu, ki je spremenil podatke v zaželeno obliko.

Na grafu prikazujeva kumulativni porazdelitvi normaliziranih razdalj najinega vzorca (vzorec GoChile) in primerjalnega vzorca.



Graf 7: Primerjalni kumulativni graf normalizirane razdalje večjega vzorca in najinega vzorca [Python]

Porazdelitvi sta si podobni. V najinem vzorcu ni primerov z relativno veliko in relativno majhno normalizirano razdaljo. Za kvantitativno primerjavo vzorcev sva uporabila test Anderson-Darling. Test primerja največje razlike med vzorcema in na podlagi te vrednosti oceni, kolikšna je podobnost med vzorcema. V našem primeru je test pokazal, da obstaja 17% verjetnost da bi pri naključnem žrebanju vzorcev iz enega večjega vzorca dobili takšni porazdelitvi.

```
Microsoft Windows [Version 10.0.22631.4974]
(c) Microsoft Corporation. Vse pravice pridržane.

C:\Users\krist> cd C:\Users\krist\OneDrive\Dokumenti

C:\Users\krist\OneDrive\Dokumenti>python 7script.py
Primerjamo celoten primerjalni vzorec in gochile:

Anderson_ksampResult(statistic=np.float64(0.6547313143151959), critical_values=array([[0.325, 1.226, 1.961, 2.718, 3.752,
4.592, 6.546]]), pvalue=0.17726903121520418)
|
```

Slika 18: Rezultati Anderson-Darling testa [zajem zaslona]

Verjetnost je dovolj velika, da lahko rečemo, da sta si porazdelitvi podobni in da naš vzorec ni bistveno drugačen od vzorcev, ki so jih pridobile druge znanstvene študije.

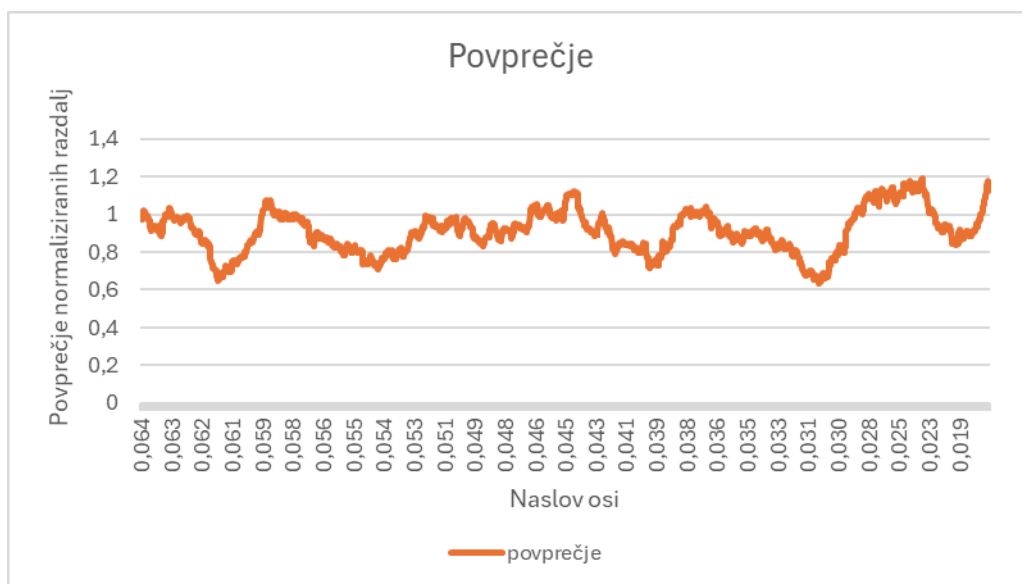
Hipotezo lahko potrdiva.

5.4 Hipoteza 4

Supernove se pojavljajo po galaksiji glede na starost galaksije.

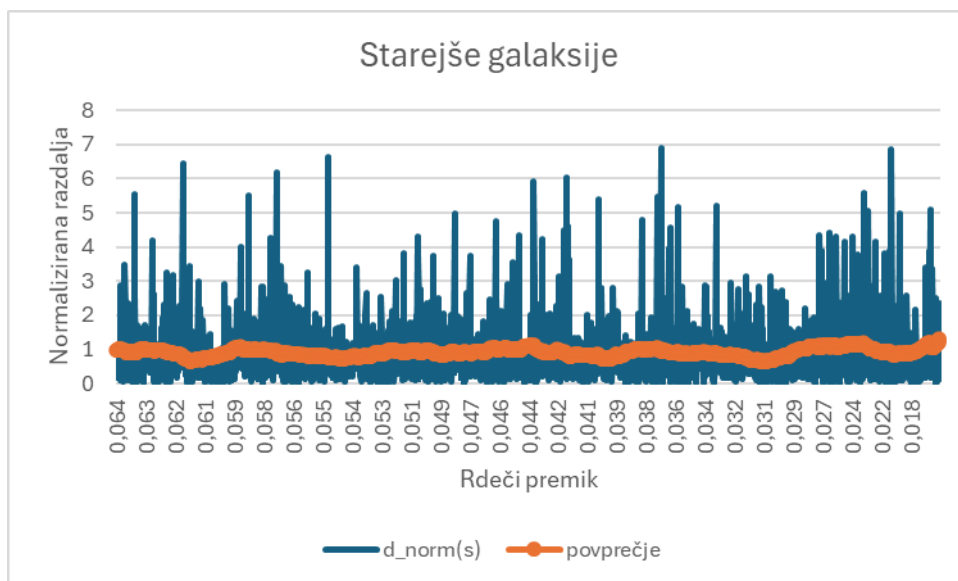
Primerjalni vzorec nama omogoča tudi, da lahko preveriva, če in kako se spreminja povprečna normalizirana razdalja z rdečim premikom (ali ekvivalentno, kako je razdalja odvisna od starosti galaksij).

Analize sva se lotila v Excelu. Naprej sva najine podatke uredila glede na velikost rdečega premika supernov oziroma galaksij. Naslednji korak je bil, da sva izračunala potujoče povprečje normalizirane razdalje na 100 vzorcev. Na ta način sva dobila podatek, kako se povprečna normalizirana razdalja spreminja z rdečim premikom, kar nama je pomagalo opaziti različne vzorce razporeditve normalizirane razdalje.

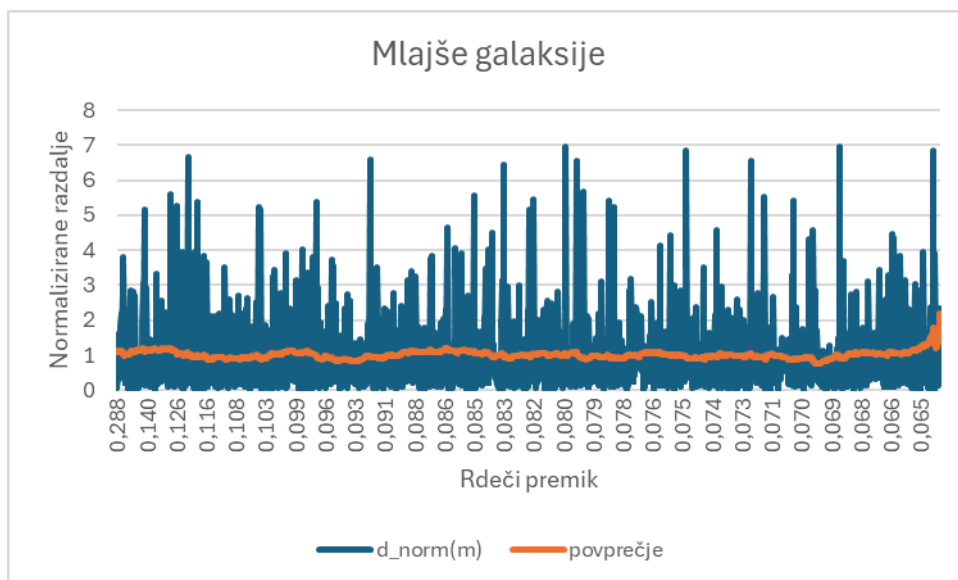


Graf 8: Povprečja normalizirane razdalje z padcem rdečega premika (starejše galaksije)
[Excel]

Vse vzorce sva razdelila na dva dela. Na starejše (manj oddaljene) in na mlajše (bolj oddaljene) in podatke posameznega pod vzorca predstavila na posameznih grafih.

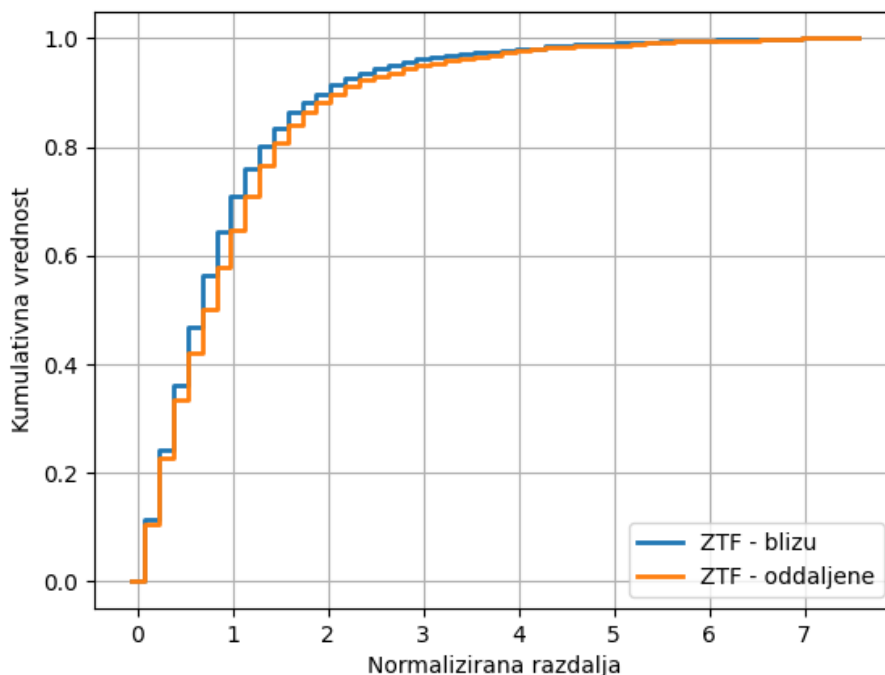


Graf 10: Normalizirane razdalje in povprečne razdalje z padcem rdečega premika pri starejših galaksijah [Excel]



Graf 9: Normalizirane razdalje in povprečne razdalje z padcem rdečega premika pri mlajših galaksijah [Excel]

Kumulativni porazdelitvi teh dveh vzorcev sva prikazala na spodnji sliki.



Graf 11: Primerjalni kumulativni graf normalizirane razdalje starejših (oddaljene) in mlajših (bližnje) galaksij [Python]

Ta graf sva zrisala z pomočjo kodiranja, kjer nama je kumulativna vrednost (kar pomeni seštevanje normaliziranih razdalj), omogočila opazovanje razlike v distribuciji supernov v mlajših in starejših matičnih galaksijah.

Kumulativni graf kaže, na manjšo razliko povprečne oddaljenosti supernov tipa Ia od jedra galaksij gostiteljic med mlajšimi (bolj oddaljenimi) in starejšimi (bližnjimi) populacijami galaksij. V bližnjih galaksijah se supernove tipa Ia v povprečju pojavljajo bližje jedra. Razlika je majhna vendar je po Anderson-Darlingovem možnost, da je ta razlika naključna le 0.1%. Ena od možnih razlag za odstopanje je to, da so bližnje galaksije bolj razločne in v njih lažje ločimo supernove od svetlega jedra galaksije.

Predvidevava, da se bo s staranjem zvezd v rokavih galaksij in njihovo migracijo iz jedra proti robu, trend v oddaljeni prihodnosti vesolja obrnil.

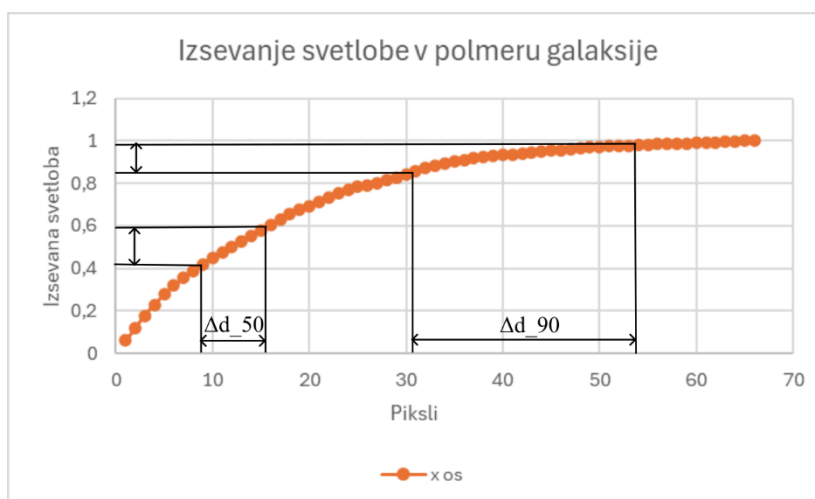
Hipotezo lahko potrdi.

6 Napake

Napako položaja supernove ocenimo na vrednost 1px. Napaka pride zaradi nekoliko nepopolne okrogle oblike točkastih virov svetlobe (manjša napaka pri sledenju teleskopa). Edino pri SN2024any je napaka večja (3 piksle), ker je supernova zelo temna in zato njen položaj manj zanesljiv.

Napaka položaja središča je odvisna od galaksije, torej kako svetla je galaksija oziroma kako poudarjeno je njeno središče. Za galaksije z "očitnim" središčem bomo privzeli kar napako 1px, tako kot pri položaju supernove. Za "razmazane" galaksije, kjer takšnega očitnega središča ni, pa 5px.

Napako meritve velikosti galaksije je težje oceniti. Pričakujemo, da bo napaka večja v primeru, da je kumulativna porazdelitev svetlosti (npr. graf ?) v bližini d_{50} in d_{90} položna. Avtomatično sledi, da bo relativna napaka manjša v primeru merjenja d_{50} .



Graf 12: Primer ocene napake velikosti galaksije [Excel]

Najprej smo ocenili, kako velika je napaka na y osi. Nato smo to oceno pretvorili na x os. Vse meritve z napakami so zbrane v spodnjih tabelah.

	d_SN [px]	Relativna napaka	d_SN [arcsec]	Relativna napaka
SN2023 ndf	35.9 +- 2.9	0,08	21.3 +- 1.7	0,07
SN2024 aaur	11.6 +- 1.5	0,12	6.9 +- 0.8	0,11
SN2024 aegm	41.5 +- 3.0	0,07	24.6 +- 1.8	0,07
SN2024 any	56.7 +- 3.2	0,06	33.6 +- 1.9	0,05
SN2024 axal	23.6 +- 1.5	0,06	13.9 +- 0.9	0,06
SN2024 dlk	72.7 +- 3.0	0,04	43.0 +- 1.8	0,04
SN2024 eyo	20.3 +- 3.0	0,14	12.0 +- 1.8	0,15
SN2024 fbo	40.8 +- 4.2	0,10	24.1 +- 2.5	0,10
SN2024 gy	218.8 +- 1.5	0,01	129.6 +- .9	0,00
SN2024 jck	45.1 +- 1.4	0,03	26.7 +- 0.8	0,03
SN2025 gj	103.9 +- 1.4	0,01	61.6 +- 0.9	0,01

Tabela 4: Prikaz napake [Excel]

	d_50 [px]	Relativna napaka	D_90 [px]	Relativna napaka
SN2023 ndf	19 +- 1	0,05	42 +- 3	0,07
SN2024 aaur	5 +- 1	0,20	24 +- 6	0,25
SN2024 aegm	36 +- 8	0,22	42 +- 8	0,19
SN2024 any	4 +- 0	-----	29 +- 8	0,27
SN2024 axal	8.5 +- 1	0,11	23 +- 2	0,09
SN2024 dlk	44 +- 5	0,11	90 +- 10	0,11
SN2024 eyo	19 +- 1	0,05	52 +- 5	0,10
SN2024 fbo	8 +- 1	0,13	48 +- 10	0,20
SN2024 gy	61 +- 6	0,10	261 +- 6	0,23
SN2024 jck	12 +- 2	0,16	35 +- 3	0,08
SN2025 gj	9 +- 0	-----	66 +- 15	0,23

Tabela 5: Prikaz napake [Excel]

	d_SN / d_50	Relativna napaka	d_SN / d_90	Relativna napaka
SN2023 ndf	1.9 +- 0.2	0,10	0.9 +- 0.1	0,11
SN2024 aaur	2.4 +- 0.6	0,25	0.5 +- 0.1	0,20
SN2024 aegm	1.2 +- 0.3	0,25	1.0 +- 0.2	0,20
SN2024 any	14.1 +- 0.8	0,05	1.9 +- 0.7	0,37
SN2024 axal	2.8 +- 0.4	0,14	1.0 +- 0.1	0,10
SN2024 dlk	1.7 +- 0.2	0,11	0.8 +- 0.1	0,13
SN2024 eyo	1.1 +- 0.2	0,18	0.4 +- 0.1	0,25
SN2024 fbo	5.1 +- 0.8	0,16	0.8 +- 0.2	0,25
SN2024 gy	3.6 +- 0.4	0,11	0.8 +- 0.1	0,13
SN2024 jck	3.8 +- 0.7	0,18	1.3 +- 0.1	0,07
SN2025 gj	11.5 +- 0.2	0,02	1.6 +- 0.4	0,25

Tabela 3: Prikaz napake [Excel]

7 Zaključek

Tote supernove tipa Ia so torej pomembne pri razumevanju razvoja vesolja in galaksij. Zaradi njihovega stalnega viška izseva, jih lahko uporabljamo kot standardne svetilnike pri merjenju oddaljenosti njihovih matičnih galaksij. V zadnjem desetletju se je z uporabo ostalih metod merjenja velikih oddaljenosti v vidnem vesolju med njimi pojavilo veliko neskladje, za katerega je mogoče odgovorno naše nepoznavanje točnega mehanizma nastanka supernov. Slednjega lahko bolje preučimo z opazovanjem okolij njihovega nastanka, ki se temeljito spreminjajo glede na to v katerem delu galaksije se nahajajo.

V najini raziskavi sva merila povprečno porazdelitev supernov v njihovih matičnih galaksijah v bližnjem vesolju ter na podlagi analize večjega vzorca ugotovila, da je povprečna porazdelitev supernov v mlajšem vesolju drugačna. S tem sva sklepala, da razlog za neskladnost merjenj Hubblove konstante mogoče res tiči v različnih okoljih nastanka supernov tipa Ia in s tem njihovi nezanesljivi vlogi standardnega svetilnika. Hkrati se porazdelitev supernov, ki sva jih pridobila iz najinih opazovanj ujema z večjimi zunanjimi vzorci. Tako sva dokazala, da je takšno raziskavo možno izvesti na relativno majhnem teleskopu, kakršen je GoChile.

Po zaključku najine raziskave se je pojavilo še mnogo vprašanj. Še zmeraj ne vemo kateri dejavniki točno vplivajo na možnosti različnih scenarijev nastanka supernov tipa Ia. Delež prahu, plina in gostota ter starost zvezdnih populacij je bil v mlajšem vesolju bistveno drugačen kot je sedaj. Če bi se izkazalo, da je porazdelitev vezana na specifične okoliščine, bi lahko sestavo in okolja oddaljenih šibkejših galaksij preučevali s pomočjo supernov.

V naslednji raziskavi bi lahko primerjali tudi razliko v porazdelitvi supernov v posameznih tipih galaksij. Z bolj rednimi opazovanji supernov bi lahko v nekaj letih s teleskopom GoChile zbrala dovolj velik vzorec za primerjavo. V primeru, da bi se pojavilo bistveno odstopanje, bi lahko sklepali, da so okolja različnih galaksij drugačna. Poleg supernov tipa Ia bi lahko opazovala tudi ostale tipe in za vsakega izračunala povprečno porazdelitev v njihovih matičnih galaksijah.

8 Viri

Avsec, F., Prosen, M., (2006). *Astronomija*. Ljubljana: DMFA-založništvo.

Guštin A., Fabjan D., Kavčič V., Bukovšek, S., (2024). *Zbirka nalog z astronomskih tekmovanj 2009-2024*. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko.

Kambič, B. (2014). *Raziskujmo ozvezdja z daljnogledom 10X50*. 2. popravljena in dopolnjena izd. Ljubljana: CAMBIO

Karrtunen, H., Kröger, P., Oja, H., Poutanen, M., Donner, K., J. (2017). *Fundamental Astronomy*. Springer Heidelberg New York Dordrecht London: © Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Kladnik, R. (2000). *Fizika za srednješolce. 2, Energija : toplota, zvok, svetloba*. 7. izd. Ljubljana: DZS

Kladnik, R. (2013). *Fizika za srednješolce. +1, Pot k maturi iz fizike*. Ljubljana: DZS

Snoj, R. (2023). *Astronomija za gimnazije: osnove astronomije z rešenimi nalogami*. Ljubljana: Zveza za tehnično kulturo Slovenije

Cappellaro, E., Turatto, M. (2000). *Supernova types and rates*. Padova: Osservatorio Astronomico di Padova vicolo dell'Osservatorio. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0012455> [5.3.2025]

Rigault, M., Brinnel, V., Aldering, G., Antilogus, P., Aragon, C., ... Thomas, R. C. (2018). *Strong Dependence of Type Ia Supernova Standardization on the Local Specific Star Formation Rate*. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/1806.03849> [17.3.2025]

Murdin, P., Murdin, L. (1985). *Supernovae*. Cambridge University Press. Dostopno na: <https://archive.org/details/supernovae00murd/page/n7/mode/2up> [2.2.2025]

Swinburne University. *Type Ia Supernova Progenitors*. Dostopno na: <https://astronomy.swin.edu.au/cosmos/T/Type+Ia+Supernova+Progenitors> [2.2.2025]

Timmes, F. X., Brown, E. F., Truran, J. W. (2003). *On Variations in the Peak Luminosity of Type Ia Supernovae*. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0305114> [22.2.2025]

Wang, X., Wang, L., Filippenko, A., Zhang, T., Zhao, X. (2013). *Evidence for Two Distinct Populations of Type Ia Supernovae*. Dostopno na: <https://arxiv.org/abs/1303.2601> [15.3.2025]

Viri slik so navedeni pod slikami. Slike, ki nimajo navedenega vira ali avtorja, sva izdelala sama.