

VILNIAUS UNIVERSITETAS  
FIZIKOS FAKULTETAS  
ASTRONOMIJOS OBSERVATORIJA

SUPERNOVŲ ĮTAKA GALAKTINEI GYVYBĖS ZONAI

Pagrindinių studijų baigiamasis darbas

ASTROFIZIKA

*Studentas*

*Darbo vadovas*

*Recenzentas*

*Katedros vedėjas*

Vilnius 2009

## Santrauka

### SUPERNOVŲ ĮTAKA GALAKTINEI GYVYBĖS ZONAI

Darbo metu tyrėme branduolio kolapso supernovų dažnio įtaką Galaktikos gyvybės zonai. Branduolio kolapso supernovos telkiasi spiralinėse vijose, todėl svarbu iširti, kaip santykinis Saulės judėjimas vijų atžvilgiu lemia artimų supernovų įvykių dažnį.

Tyrėme supernovų įvykių tikimybę per pastaruosius 500 mln. m. - tiek laiko Žemėje užtruko sudėtingos, daugialąstės gyvybės vystymasis. Darbo metu radome galaktinį branduolio kolapso supernovų įvykių dažnį, ištyrėme supernovų dažnio kitimą 6-10 kpc atstumu nuo Galaktikos centro. Įvertinome diferencialinio Galaktikos medžiagos sukimosi ir spiralinių vijų sukimosi greičių įtaką artimų supernovų įvykių tikimybei, taip pat šios tikimybės ryšį su žvaigždės padėtimi vijų atžvilgiu.

Nustatėme, kad Galaktikos gyvybės zona nėra vienalytė sritis. Artimos, pavojingos gyvybei supernovos tikimybė stipriai priklauso tiek nuo galaktocentrinio Saulės atstumo, tiek nuo jos padėties vijų atžvilgiu. Mažiausią netolimos branduolio kolapso supernovos pavojų per pastaruosius 500 mln. m. metų patyrė žvaigždės, kurios sukasi ties korotacijos spinduliu ir yra 55 - 90 laipsnių nutolusios nuo paskutinės praeitos vijos.

Artimo supernovos įvykio tiriamu laikotarpiu tikimybė Saulės aplinkoje, gaunama atsižvelgus į santykinį žvaigždžių ir vijų judėjimą, yra 8 kartų mažesnė, nei vertė, gauta neatsižvelgus į netolygų supernovų pasiskirstymą. (atitinkamai 0.048 ir 0.4 artimos supernovos per 500 mln. m.). Toks rezultatas leidžia daryti prielaidą, kad supernovų įtaka Fanerozojaus laikotarpio gyvybės evoliucijai buvo nereikšminga.

Gautą rezultatą galime paaiškinti tuo, kad, remiantis naujesniais tyrimais, Saulės atstumas iki korotacijos spindulio yra žymiai mažesnis, nei galvota anksčiau. Rezultatus galima patikrinti tiriant izotopų gausas nuosėdinėse uolienose bei tiriant izotopų anomalijų koreliaciją su masiniais gyvybės sunykimais.

## Summary

### SUPERNOVAE RATE CONSTRAINTS ON THE GALACTIC HABITABLE ZONE

We tried to evaluate the influence of the core collapse supernovae events on the Galactic habitable zone. Core collapse supernovae are concentrated in the spiral arms, therefore it is important to analyse how the relative Solar motion with respect to the spiral arms is related to the frequency of nearby supernova events.

Here we evaluated the probability of a nearby supernova explosion during the last 500 Myr - the approximate duration of evolution of complex multicellular life on Earth. We have determined the Galactic frequency of core-collapse supernovae explosions and analysed the probability distribution of nearby supernova events in the disk plane between 6 - 10 kpc from the Galactic center. We evaluated the influence of rotation velocities of differentially rotating disk and the spiral arms, which rotate as a rigid body, also elaborated on the relation of this probability and the star's position with respect to the spiral arms.

Our calculations indicate that the Galactic habitable zone is not a smooth, uniform region as it was previously thought. The possibility of a nearby supernova exploding strongly depends on the galactocentric distance and the star's location within the spiral pattern. The results show that the danger of a close core collapse supernova explosion during the last 500 Myr was minimal for the stars which are close to the co-rotation radius and are located between 55 - 90 degrees from the last crossed arm.

The obtained value of the possibility of a nearby supernova explosion in the Solar neighbourhood was 8 times smaller than the value obtained without consideration of non-uniform supernovae distribution (0.048 and 0.4 nearby supernovae during 500 Myr, respectively). This result implies that the biological influence of supernovae was fairly insignificant during the Phanerozoic.

The small value of nearby supernovae can be explained by consideration of Sun's close proximity to the co-rotation radius, based on recent research. The results can be put to test by analysis of isotope abundances in ocean bottom sediments and correlation between abnormal abundances and mass extinctions.

# Turinys

<b>1</b>	<b>Ižanga</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Supernovos Galaktikoje ir jų įtaka gyvybei</b>	<b>5</b>
2.1	Supernovų klasifikacija . . . . .	5
2.2	Biologiškai reikšmingas supernovų atstumas . . . . .	7
2.3	Masiniai gyvybės sunykimai . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Artimų supernovų sproginiai</b>	<b>12</b>
3.1	Artimų supernovų sproginio indikatoriai . . . . .	12
3.2	Supernovų skaičiaus kitimas tolstant nuo Galaktikos centro . . . . .	13
3.3	Radialinis supernovų skaičiaus kitimas Galaktikoje . . . . .	15
3.4	Supernovų dažnis ir spiralinių vijų sukimosi greitis . . . . .	19
3.5	Sukimosi kreivės įtaka . . . . .	21
3.6	Saulės judėjimas per pastaruosius 500 mln. metų . . . . .	24
3.7	Saulės perėjimai per vijas . . . . .	25
3.8	Artimų supernovų dažnio priklausomybė nuo vijose praleisto laiko . . . . .	29
3.9	Galaktikos gyvybės zona . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Modelio netikslumų įvertinimas</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Išvados</b>	<b>34</b>
	<b>Literatūra</b>	<b>36</b>

# 1 Įžanga

Gyvybės zonos žvaigždės sistemoje samprata jau yra visuotinai priimta - tai žiedo formos erdvės dalis aplink žvaigždę, kurioje esančiose planetose gali egzistuoti skystas vanduo, t.y. gali vykti tokie organiniai procesai, kokius stebime Žemėje. Galaktinė gyvybės zona - tai palyginti nesena sąvoka, kurios esmė - tai, kad ne visoje Galaktikoje egzistuoja žemiškai gyvybei atsirasti ir evoliucionuoti tinkamos sąlygos. Teigiama, kad galaktinė gyvybės zona - tai žiedo formos regionas Galaktikos diske, kuriame tarpžvaigždinės medžiagos metalingumas yra pakankamas Žemės tipo planetų susiformavimui ir pakankamai ilgą laiką tarpą nebūna trikdžių (supernovų sprogimų,  $\gamma$  žybsnių, susidūrimų su molekuliniais debesimis) sudėtingos gyvybės evoliucionavimui.

Manoma [1], jog išorinę galaktinės gyvybės zonos ribą lemia susidarančių žvaigždžių metalingumas. Pagrindiniai Žemės tipo planetos tinkamumą gyvybei lemiantys parametrai yra jos masė bei sudėtis. Nuo planetos masės priklauso jos prarandamas šilumos kiekis, vandenynų gylis, atmosferos praradimo sparta, o jos sudėtis lemia atmosferos sudėtį, reikalingų gyvybei mineralų susidarymą. Manoma, kad Žemės tipo planetos gali susidaryti prie žvaigždžių, kurių pradinis metalingumas ne mažesnis, nei pusė Saulės metalingumo. Žymiai didesnio metalingumo žvaigždės taip pat nėra palankios gyvybės vystymuisi - prie tokių žvaigždžių labiau linkusios susidaryti dujinės milžinės [2], kurių migracijos sukelti trikdžiai gali būti pražūtingi gyvybei.

Pati galaktinė gyvybės zona yra plonojo disko dalis, lėtai besiplečianti ir sudaryta iš 4-8 mlrd. metų senumo žvaigždžių. Jos ribos, anot kai kurių mokslininkų, yra tarp 7-9 kpc nuo Galaktikos centro [3].

Vien tinkamos masės bei sudėties planeta nėra pakankama sudėtingos gyvybės išlikimo sąlyga. Tokie procesai, kaip netolimos supernovos sprogimas, gama žybsnis, sąveika su masyviais molekuliniais debesimis gali sunaikinti gyvybę, todėl reikia atsižvelgti į tai, kad žvaigždės aplinka ilgą laiką turi būti palyginti rami nuo galaktinių trukdžių.

Kadangi aktyvi žvaigždėdara diske yra sutelkta spiralinėse vijose, natūralu, kad trumpai ( $\leq 10^7$  mln. metų) gyvuojančios masyvios žvaigždės aktyviau sproginėja šiose vijose, nes nespėja nuo jų atsilikti arba jų pralenkti. Nuo žvaigždės atstumo iki Galaktikos centro priklauso vijų perėjimo dažnumas bei trukmė, todėl galime daryti prielaidą, jog galaktinė gyvybės zona nėra vientisas žiedas - jį reikėtų ap-

rašyti kaip kintamo palankumo gyvybei funkciją, kurios maksimumas turėtų būti ties korotacijos spinduliu.

Darbe sieksime kiekybiškai įvertinti netolimos branduolio kolapso (II, Ib ir Ic tipo) supernovos sprogimo tikimybę per pastaruosius 500 mln. metų įvairiu galaktocentriniu atstumu. Aptarsime galimą žalą dėl netolimos supernovos, įvertinsime šios tikimybės kitimą dėl žvaigždės padėties vijų atžvilgiu.

## 2 Supernovos Galaktikoje ir jų įtaka gyvybei

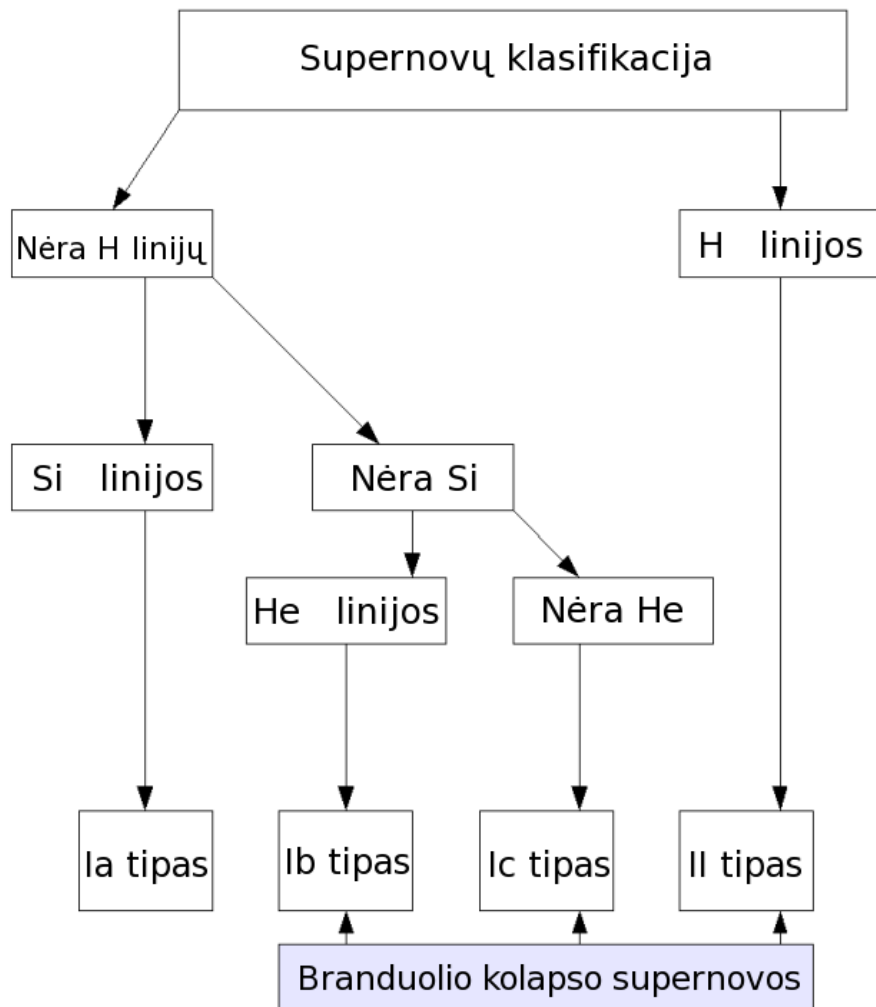
### 2.1 Supernovų klasifikacija

Kadangi supernovų klasifikacija dėl istorinių priežasčių priežasčių yra gana klaidinanti, verta ją trumpai apžvelgti. Istoriskai supernovos skirstomos į 4 tipus pagal spektro įpatybes: 1941 R. Minkowski suskirstė jas į I tipo (kurių spektruose nebuvo matyti H linijų) ir II tipo, kurių spektruose matomos vandenilio absorbcijos linijos. Vėliau I tipo supernovos buvo suklasifikuotos smulkiau - į Ia tipo supernovas, kurių spektruose yra ryškios Si absorbcijos linijos ties 610 nm, Ib tipo supernovas, kurių spektruose nėra Si linijų, tačiau matyti He emisija, ir Ic tipo, kurių spektruose nėra nei Si, nei He linijų (1 pav.)

Dabar manoma, kad trijų pastarųjų tipų supernovos atsiranda dėl masyvių žvaigždžių branduolio kolapso, o Ia tipo supernovos - tai termobranduoliniai baltųjų nykštukių sproginiai, dėl masės akrecijos iš kaimyninės žvaigždės viršijus ribinę Čandrasekaro masę ( $1.4 M_{\odot}$  [4]).

H linijų nebuvimas Ib ir Ic supernovų spektre aiškinamas tuo, kad šios žvaigždės iki sprogdamos prarado savo išorinį vandenilio sluoksnį, o Ic tipo supernovos neteko ir arčiau branduolio esančio helio apvalkalo. Kartu Ib, Ic ir II tipo supernovos vadinamos branduolio kolapso supernovomis, šiame darbe tirsime būtent šios grupės supernovų tikimybę. Šio tipo supernovos telkiasi nesenos žvaigždėdaros regionuose - spiralinėse vijose ir III regionuose [5].

Branduolio kolapso supernovų kilmė siejama masyvių ( $M > 8 M_{\odot}$ ) [6] žvaigždžių evoliucijos pabaiga. Tokių masių žvaigždžių branduoliuose temperatūra ir slėgis yra pakankami, kad prasidėtų termobranduolinis anglies, o vėliau Ne, O ir Si degimas. Šių procesų pabaigoje žvaigždės centre susidaro  $^{56}\text{Ni}$  (skylančio į  $^{56}\text{Fe}$ ) branduolys. Šių elementų ryšio energija, tenkanti vienam nukleonui, yra didžiausia - tai reiškia, kad šių branduolių jungimasis į sunkesnius pareikalaus daugiau



1 pav. Supernovų spektrinė klasifikacija.

energijos, nei jos išskirs. Fe-Ni branduolio masei peržengus Čandrasekaro ribą, degeneracinis slėgis nebegali jos išlaikyti - prasideda itin greitas kolapsas ir temperatūros kilimas. Dėl temperatūros didėjimą mažinančių endoterminių skilimo reakcijų (fotodezintegracijos) bei neutrinių išnešamos energijos kolapsas dar pagreitėja, tačiau jis sustoja, branduoliui tapus neskaidriam neutrinams. Išoriniams žvaigždės sluoksniams atsitrenkus į nustojusį trauktis branduolį, susiformuoja centrinė neutroninė žvaigždė, kurios tolesnį kolapsą sustabdo branduolinės jėgos, arba juodoji skylė. Daugumą žvaigždės medžiagos ištaško galinga smūginė banga, kurią, ko gero, sukelia gravitacinę centrinės žvaigždės liekanos energiją išnešantys neutriniai [7].

Tipiško branduolio kolapso supernovos sproginimo energija yra apie  $10^{44}$  erg [8], [9]. Kitame skyriuje aptarsime netolimos supernovos keliamą pavojų gyvybei.

## 2.2 Biologiškai reikšmingas supernovų atstumas

Aptarsime būdus, kuriais netolima branduolio kolapso supernova galėtų pakenkti biosferai. Jei neskaitysime tiesioginio susidūrimo su supernovos išmesta medžiaga galimybės, netolima supernova Žemės biosferai įtaką galėtų daryti šiais būdais:

**Optinis ir netolimų diapazonų spinduliavimas.** Manoma, kad optinio bei UV diapazono tiesioginis spinduliavimas neturėtų žymiai pakenkti Žemės biosferai, nebent supernovos sproginimas įvyktų labai arti [10]. Kita vertus, UV spinduliai galėtų sutrikdyti jūros gyvūnų mitybos grandines, kadangi kosminiai spinduliai bei Rentgeno ir  $\gamma$  spinduliuotė pakenktų Žemės ozono sluoksniui. Ilgalaikis UV srauto padidėjimas padarytų didelę žalą fitoplanktonui, o fotosintezės sutrikdymas jūroje atsiliptų tiek jūriniais, tiek sausumos organizmams.

**Kosminiai spinduliai.** Anot [10], supernovos sproginimo įgreitintos elektringos dalelės būtų išsklaidytos nehomogeniško Galaktikos magnetinio lauko, jie foninį kosminių spindulių srautą gebėtų padidinti tik 1-2 eilėmis (10 pc atstumu nuo sproginimo). Nemanoma, kad jie tiesiogiai galėtų smarkiai pakenkti ekosistemoms, tačiau jų ir didelių energijų elektromagnetinė spinduliuotė stipriai pakenktų ozono sluoksniui - kaip tik tai ir galėtų būti didžiausia netolimos supernovos padaryta žala.



**Neutrinai.** Yra nuomonių, kad neutrinai taip pat gali stipriai pakenkti biosferai. Jie "išsineša" didelę kolapsuojančio branduolio gravitacinės ryšio energijos dalį, apie  $10^{46} \text{ J s}^{-1}$  ([11] ir [9]). Nors neutrinių sąveikos su medžiaga skerspjūviai maži, stipraus jų srauto atveju sąveika su organinės medžiagos atomais sukelia nepataisomą žalą DNR - t.y. auglių susidarymą, mutacijas, vėžinių ląstelių dauginimąsi [12]. Jie giliai įsiskverbia, pasiekia jautrius radiacijai audinius (limfinę sistemą, kaulų čiulpus) bei nesunkiai pasiekia jūrinius organizmus (kurių aplinka apsaugota nuo kitų radiacijos šaltinių).

**Rentgeno ir gama spinduliai.** Rentgeno spinduliavimas sprogo metu ir po jo (iš smūginės bangos paveiktos tarpžvaigždinės medžiagos bei supernovos išmestos medžiagos),  $\gamma$  spinduliuotė. Manoma, kad tam, kad sprogo metu išspinduliuotų Rentgeno spindulių srautas prilygtų stipraus Saulės žybsnio energijai, supernova turėtų sprogti 2 - 20 pc atstumu nuo Saulės. Sprogo Rentgeno spinduliuotės galia būtų maždaug  $10^{32} - 10^{33} \text{ J/s}$  eilės ir truktų nuo kelių dienų iki keleto dešimtmečių. Rentgeno spinduliavimas iš smūginės bangos įkaitintos tarpžvaigždinės medžiagos truktų žymiai ilgiau, tačiau spinduliavimo energija nepalyginamai silpnesnė. II tipo supernovos  $\gamma$  diapazone spinduliuoja žymiai mažiau, nei Rentgeno (reikia pažymėti, kad Ia tipo supernovos  $\gamma$  spinduliuotės galia dėl  $^{56}\text{Ni}$  skilimo yra žymiai didesnė) [13]. Tačiau  $\gamma$  spinduliai ir kietieji Rentgeno spinduliai didžiausią pavojų kelia ne dėl tiesioginio paviršiaus sterilizavimo ir didelių radiacijos dozių, o dėl žalos ozono sluoksniui [14], [10], [15].

Kiekviena apie 0.5 GeV energijos dalelė atmosferoje sukuria apie  $10^7$  antrinių jonizuojančių dalelių. Ozono molekulės suardomos dėl eilės reakcijų su azoto oksidais ir kitais jo junginiais ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HO}_2\text{NO}_2$ ,  $\text{ClONO}_2$ ,  $\text{BrONO}_2$ ), pavyzdžiui, tokios reakcijos metu:

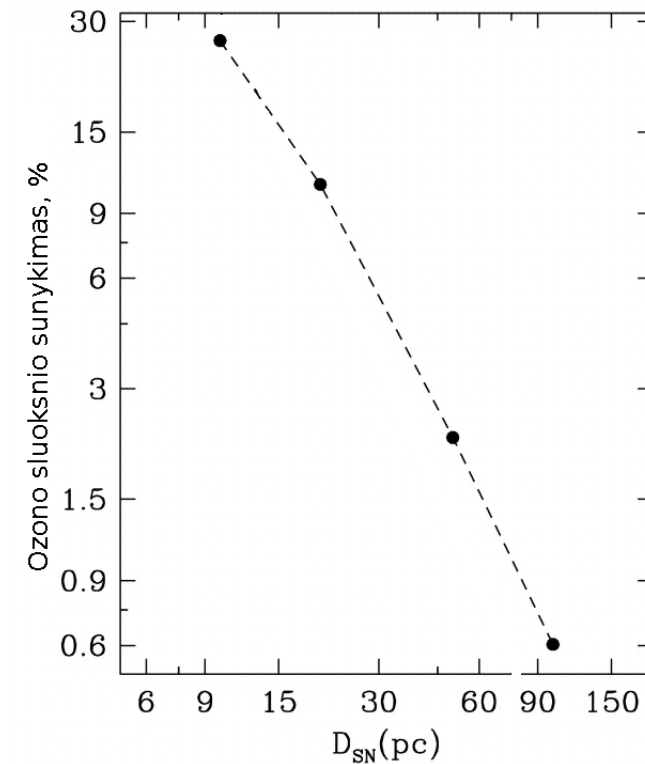


Manoma [10], kad  $\text{O}_3$  sumažėjimas dešimtadaliu 36 kartus padidintų Žemė pasiekiančių UV spindulių srauto intensyvumą, o žala ozono sluoksniui išliktų iki 300 metų.

Ozono sumažėjimas lemia biologiškai aktyvios ultravioletinės B (290-320 nm, UVB) spinduliuotės srauto, pasiekiančio Žemę, padidėjimą. Daugialąsčiams gyvūnams grėstų nudegimai bei onkologinės ligos, ypač melanoma, tačiau didžiausią ekologinę žalą UVB spinduliuotė padarytų fotosintetantiems organizmams. Ji

kenkia augalų vystymuisi ir jūros fitoplanktonui. Stiprus UVB srauto padidėjimas galėtų turėti didelių pasekmių visai biosferai.

Kiti fotocheminiai procesai atmosferoje taip pat gali turėti sunkių pasekmių - dėl padidėjusio azoto oksido kiekio ilgam padidėtų kritulių ir paviršinių vandens telkinių rūgštingumas [14].



2 pav. Vidutinio ozono kiekio sumažėjimo per metus priklausomybė nuo  $D_{SN}$ , pc (pagal [16]).

2 pav. pavaizduotas vidutinio ozono kiekio sumažėjimo per metus priklausomybė nuo supernovos atstumo (pagal [16]). Matyti, kad ties mažesnėmis  $D_{SN}$  vertėmis dėl įsisotinimo žalos ozonui pokytis mažėja.

Kaip matome, netolimos supernovos sprogo pasekmė, kuri galėtų pakenkti visai biosferai ir sukelti kažką panašaus į masinius Fanerozojaus rūšių išmirimus, tikriausiai būtų ozono sluoksnio sunaikinimas, fotosintezės sutrikdymas ir iš to sekti žala globalioms mitybos grandinėms. Remdamiesi tokia prielaida, gyvybiškai svarbiu atstumu iki supernovos laikysime literatūroje minimą 10 pc atstumą. Tikėtina, kad supernovos sprogo arčiau, nei 10 pc gali turėti sunkių pasekmių biosferai, nors reiktų detalesnių poveikio tyrimų.

## 2.3 Masiniai gyvybės sunykimai

Tiriamąjį 500 mln. m. laikotarpį pasirinkome, nes mus domina sąlygos, palankios sudėtingos, daugialąstės gyvybės evoliucijai. Kambro laikotarpiu atsirado daugumos šiuolaikinių organizmų protėviai.

Paleozojaus eros metu (prie 542-251 mln. metų) gyvybė išsivystė nuo paprastesnės Ediakaro laikotarpio faunos iki sudėtingų, triploblastinės sandaros reptilijų ir augalų. Silūro periodo metu atsirado pirmieji gausūs sausumos augalai, pirmieji tetrapodai atsirado devono periode. Paleozojaus pabaigą žymi pats stipriausias masinis gyvybės sunykimas - permo-triaso (P-T) sunykimas, kurio metu išnyko iki 96% visų rūšių.

Mezozojaus eros metu atsirado daug naujų taksonų, kadangi P-T sunykimas paliko daug tuščių ekologinių nišų. Tarp gyvūnų dominavo didelės reptilijos - dinozaurai ir pterozaurai sausumoje bei ichtiozaurai bei plezozaurai vandenyuose. Šio periodo metu atsirado paukščiai bei žinduoliai. Epochos pabaigoje įvyko kvartero paleogeno (K-Pg) išmirimas, kurio metu, kaip manoma, dėl susidūrimo su dangaus kūnu išmirė didieji archozaurai.

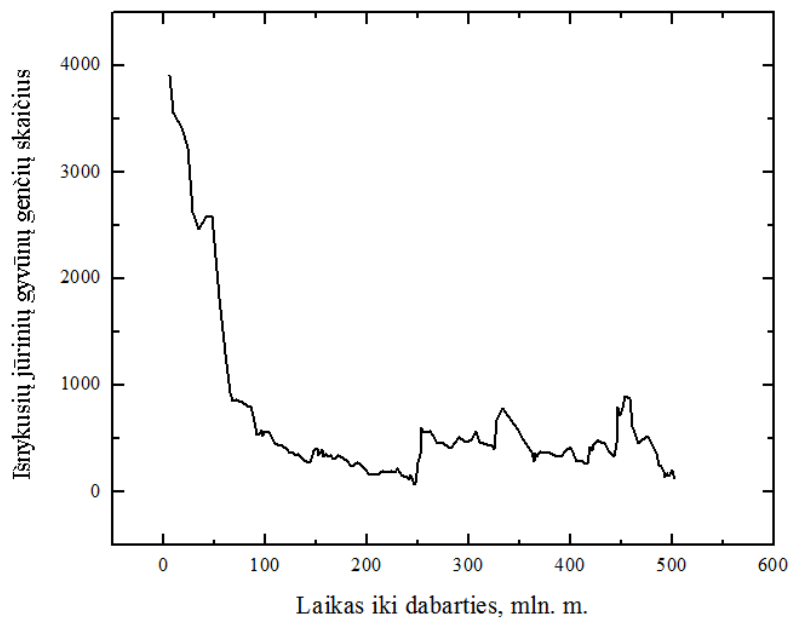
Kainozojaus eroje, kuri tesiasi iki dabar, suklestėjo žydintys augalai bei šiltkraujai žinduoliai.

Atsiradus dideliems ir prieinamiems fosilijų duomenų rinkiniams, paaiškėjo, kad Fanerozojaus metu gyvybės vystymasis ir įvairovės didėjimas nebuvo tolygūs procesai. Pasirodė, kad gyvybės vystymąsi ne kartą pertraukė įvairaus stiprumo masiniai sunykimai - t.y. padidėjusi rūšių išnykimo sparta arba sulėtėjęs naujų rūšių atsiradimas. 3 pav. pavaizduotas jūrinių bestuburių genčių įvairovės kitimas Fanerozojaus laikotarpiu, remiantis J. Sepkoskio jūrinių fosilijų duomenimis. Matome, kad įvairovės didėjimą ne kartą pertraukė sunykimai, iš kurių didžiausias - permo-triaso sandūroje vykęs išmirimas.

1 lentelėje pateikiami duomenys apie didžiausius gyvybės sunykimus, pagal M. Benton [17].

1 lentelė M. Benton sudarytos duomenų bazės *The Fossil Record 2* [17] duomenys, minimalios išnykimų vertės, \* žymi netikslas, mažų šeimų skaičiumi paremtas vertes.

Sunykimas	Išnykusių šeimų %		
	visos šeimos	žemyninės šeimos	vandenyno gyvūnų šeimos
ordoviko-silūro	22.5	0*	27.4
devono (viduriniojo)	31.7	43.6	27.8
devono (vėlyvojo)	20.0	27.4	1.2
permo-triaso	53.4	61.5	28.1
triaso	25.8	21.7	23.4
triaso-juros	15.2	10.6	12.7
karbono-paleogeno	11.5	6.3	14.7
eoceno-oligoceno	3.5	2.4	2.3



3 pav. Iš J. Sepkoski duomenų [18] gauta Fanerozojaus jūrinių bestuburių įvairovės kitimo kreivė.

## 3 Artimų supernovų sproginiai

### 3.1 Artimų supernovų sproginio indikatoriai

Netolima supernova galėtų būti 2.3 poskyryje aptartų masinių sunykimų priežastimi, tačiau, norint įrodyti ar atmesti tokį paaiškinimą, reikia geologinių arba astrofizikinių įrodymų. Vienas iš galimų būdų rasti netolimų supernovų sproginio pėdsakų - tai padidėjusi ilgai skylančių radioaktyvių izotopų gausa ledo ar vandenynų dugno nuosėdų grežiniuose [19].

Teigiama [19], kad netolima supernova anomalius izotopų kiekius uolienose galėjo palikti dviem būdais: tiesiogiai susidūrus su netolimos supernovos išmesta medžiaga, arba netiesiogiai, dėl kosminių spindulių įtakos (lengvi, trumpo skilimo pusamžio branduoliai, pvz.  $^{10}\text{Be}$ ).

Istoriniais laikais stebėtų supernovų pėdsakai ledo grežiniuose jau užregistruoti: SN 1006 (1006 m.), RX J0852.0 [20] ir Krabo Ūko supernovos (1054 m.) [21] įrodymai, remiantis  $\text{NO}_3$  pasiskirstymu.

Šimtų milijonų metų senumo supernovų įvykius galėtume atrasti tirdami ilgiau gyvenusių izotopų pėdsakus jūros dugno nuosėdose. Dėl mažos jūrinių nuosėdų susidarymo spartos dugno uolienose izotopų šuolius būtų žymiai lengviau nustatyti, nei ledo grežiniuose.

Randamų izotopų gausos stipriai priklauso nuo atstumo iki supernovos, todėl jų įverčiai galėtų leisti nustatyti atstumą iki supernovos, įvertinti galimą žalą ir koreliaciją su gyvybės sunykimais. Yra įrodymų [22], kad  $^{244}\text{Pu}$  gausa jūros dugno uolienose nepaaiškinama antropogenine veikla, taip pat teigiama [23], kad  $^{60}\text{Fe}$  gausa dugno uolienose suderinama su prieš keletą milijonų metų apie 30 pc atstumu sprogusia supernova. Jei šie rezultatai bus patvirtinti, bus galima kiekybiškai patikrinti darbo išvadas.

### 3.2 Supernovų skaičiaus kitimas tolstant nuo Galaktikos centro

Kadangi branduolio kolapso supernovos gyvuoja itin trumpai, skaičiuojant jų sproginėjimo spartą galime remtis šiuolaikine žvaigždėdaros spartos verte, juo labiau, kad ji, matyt, buvo gana vienoda visu tiriamu laikotarpiu [24]. Dabartinė galaktinė žvaigždėdaros sparta (SFR) =  $3.8 \pm 2.2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ , ši vertė gautą iš Al-26 skleidžiamų  $\gamma$  spindulių emisijos matavimų [25]. Naudodamiesi PEGASE [26] spektrinės galaktikų evoliucijos modeliu, apskaičiuojame galaktinę supernovų įvykių spartą  $\mathfrak{R}_{SN}$ .

Modeliuodami naudojame standartinę Miller-Scalo IMF (pradinę masės funkciją), [27]. Šios, Salpeterio ar P. Kroupos funkcijos pasirinkimas didelės įtakos gaunamai supernovų spartai neturi, kadangi masyvių žvaigždžių skaičių jos aproksimuoja gana panašiai.

Gautoji branduolio kolapso supernovų dažnio vertė  $\mathfrak{R}_{SN} = 2.4 \cdot 10^3 \cdot \text{Myr}^{-1}$  yra šiek tiek didesnė už R. Diehl [25] nustatytąją  $\mathfrak{R}_{SN} = (1.9 \pm 1.1) \cdot 10^3 \cdot \text{Myr}^{-1}$ , tačiau su ja sutampa paklaidų ribose.

Branduolio kolapso supernovų radialinį bei vertikalų tankio kitimą galime aproksimuoti dviguba eksponentine funkcija

$$\mathfrak{R}_{SN}(R, z) = \mathfrak{R}_C \cdot e^{(-R/h_r)} \cdot e^{(-|z|/h_z)}, \quad (2)$$

čia  $\mathfrak{R}_C$  - supernovų skaičius centre (t.y.,  $\mathfrak{R}_{SN}(0, 0)$ ),  $h_r$  - disko skalės ilgis,  $h_z$  - disko skalės aukštis,  $z$  - aukštis virš disko plokštumos,  $R$  - atstumas nuo Galaktikos centro iki taško disko plokštumoje.

Turėdami galaktinę supernovų spartą iš (2) išraiškos galime rasti jų pasiskirstymą tiriamame intervale tarp  $6 \leq R \leq 10$  kpc.

Supernovų dažnis tarp galaktocentrinių atstumų  $R_1$  ir  $R_2$  esančiame Galaktikos žiede, kurio aukštis virš disko plokštumos -  $z$ , bus lygus

$$\mathfrak{R}_{SN} = \int_0^{2\pi} \int_{-z}^z \int_{R_1}^{R_2} R_C e^{\frac{-R}{h_r}} \cdot e^{-\frac{|z|}{h_z}} dR dz d\theta, \quad (3)$$

t.y., kadangi laikome diską simetrišku vertikalia kryptimi,

$$\mathfrak{R}_{SN} = 2 \cdot \int_0^{2\pi} \int_0^z \int_0^R R_C e^{\frac{-R}{h_r}} \cdot e^{-\frac{|z|}{h_z}} dR dz d\theta, \quad (4)$$

čia  $R, \theta, z$  - cilindrinės galaktocentrinės koordinatės sistemos koordinatės.

Konstantų  $h_r$ ,  $h_z$  vertės iki šiol nėra labai tiksliai nustatytos. Manoma, kad disko skalės ilgis  $h_r$  yra tarp 2.5 - 4.5 kpc. Šiame darbe naudojau 2MASS duomenimis nustatytą vertę  $h_r = 2.8 \pm 0.3$  kpc [28]. Vertikalus branduolio kolapso supernovų skalės aukštis  $h_z$  literatūroje nurodomas kaip 100 pc [29].

Kadangi Saulė nesisuka disko plokštumoje, o maždaug 60 Myr periodu svyruoja plokštumos atžvilgiu, pakildama iki 35 pc [29], akivaizdu, jog jos orbitoje pasitaikys mažiau supernovų, nei jai visą laiką judant disko plokštumoje. Disko plokštumos kirtimo koreliacija su gyvybės sunykimais yra abejotina [29], todėl netirsime jo poveikio gyvybei, o vietoje to naudosime supernovų vertikalaus pasiskirstymo vidurkio  $z$  atžvilgiu nusakomą vertę  $\bar{z}$ , kurioje skrisdama Saulė sutiktų tiek pat supernovų, kiek ir sinusoidiškai svyruodama disko plokštumos atžvilgiu. Suintegravę pasiskirstymo funkciją gauname, kad supernovų vidutinė vertė  $z$  krypties atžvilgiu,  $\bar{\mathfrak{R}}_{SN}$  bus ties

$$\bar{z} = 0.84 \cdot R_C \cdot e^{\frac{-R}{h_r}} \quad (5)$$

Konstantą  $\mathfrak{R}_C$  galime rasti, turėdami bendrą galaktinį mus dominančių tipų supernovų dažnį ( $\mathfrak{R}_{SN} = 2.4 \cdot 10^5 \text{Myr}^{-1}$ ) bei supernovų dažnio kitimo dėsnį (4).

$$\mathfrak{R}_C = \frac{\mathfrak{R}_{SN}}{\left( 2 \cdot \int_0^z \int_0^R R_C e^{\frac{-R}{h_r}} \cdot e^{-\frac{|z|}{h_z}} dR dh d\theta \right)} \quad (6)$$

Suintegravę bei atlikę skaičiavimus, gauname

$$\frac{\mathfrak{R}_C}{\mathfrak{R}_{SN}} = 0.136, \mathfrak{R}_C = 32640 \text{Myr}^{-1}.$$

Žinodami  $\mathfrak{R}_C$ , galime rasti  $\bar{z}$  vertę. Suskaičiuojame vidurkinį supernovų dažnį vertikalia kryptimi, laikydami, kad maksimali  $z$  vertė lygi 35 pc:

$$\mathfrak{R}_{SN} = \frac{1}{35} e^{\frac{-R}{h_r}} \cdot \int e^{\frac{\bar{z}}{h_z}} = 0.84 \cdot \mathfrak{R}_C \cdot e^{(-R/h_r)} = 27417.6 e^{\frac{-R}{h_r}} \quad (7)$$

Iš (2) lygties,

$$27417.6 \cdot e^{\frac{-R}{h_r}} = \mathfrak{R}_C \cdot e^{\frac{-R}{h_r}} \cdot e^{\frac{\bar{z}}{h_z}}, \quad (8)$$

tuomet

$$e^{(-\bar{z}/100)} = 0.84, \quad (9)$$

$\bar{z} = 17.4$  pc.

Suradę  $\bar{z}$  vertę, galime apskaičiuoti supernovų sprogimo dažnio  $\mathfrak{R}_{SN}$  priklaus-

somybę nuo galaktocentrinio atstumo  $R$ .

### 3.3 Radialinis supernovų skaičiaus kitimas Galaktikoje

Suskaičiuotos supernovų dažnio vertės yra vidurkinės - jos neatspindi to, kad branduolio kolapso supernovos nėra tolygiai pasiskirsčiusios diske, o koncentruojasi spiralinėse vijose. Norėdami detaliau iširti vijų perėjimo dažnio įtaką biosferai, turime suskaičiuoti tikimybę, kad mažesniu nei anksčiau aprašytas  $r_l$  atstumu nuo Saulės sprogs supernova.

Laikysime, kad Galaktikos vijos yra taisyklingos logaritminės spiralės formos, pastovaus 1 kpc pločio bei pastovaus tankio. Dekarto koordinatėse spiralinių vijų padėtis pagal J. Valee [30] statistinėje Galaktikos vijų struktūros metaanalizėje pateiktą spiralinių vijų lygtį aprašoma taip:

$$\begin{aligned} r &= r_0 e^{k\theta}, \\ r &= -2.3e^{0.2126\theta}, \\ x &= r \cdot \cos(\theta), \\ x &= r \cdot \sin(\theta), \end{aligned}$$

Vijų plotis yra pastovus ir maždaug atitinka anksčiau naudotą vertę (1 kpc). Parametrai  $r_0$  ir  $k$  paimti iš [30].

Kur kas paprasčiau naudotis polinėmis galaktocentrinėmis koordinatėmis, kurias pasirenkame taip, kad Saulės koordinatės būtų  $\theta = 0^\circ$ ,  $R = 8$  kpc. Galaktikos modelis pavaizduotas 4 pav.

Saulės judėjimą laikysime apskritiminiu, neatsižvelgsime į jos greičio sumažėjimą praeinant vijas ir į perturbacijas dėl molekulinų debesų [29]. Skaičiuosime tokią tikimybę 20 pc pločio ir 35 pc aukščio žieduose, esančiuose tarp 6 ir 10 kpc nuo Galaktikos centro.

Supernovų dažnis 20 pc pločio ir 35 pc aukščio žiede, kurio centro atstumas  $R$ , lygus

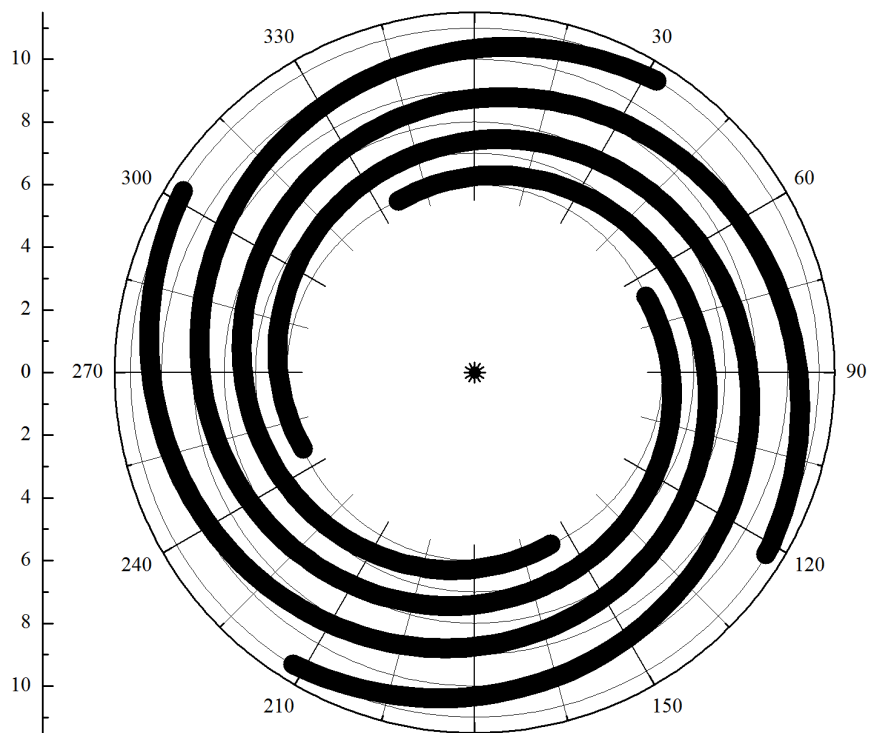
$$\mathfrak{R}_{SN} = \int_0^{2\pi} \mathfrak{R}_C \int_{z_1}^{z_2} \int_{R_1}^{R_2} e^{-\frac{R}{h_r}} \cdot e^{-\frac{|z|}{h_z}} dR dz d\theta Myr^{-1} \quad (10)$$

Suintegravę gauname

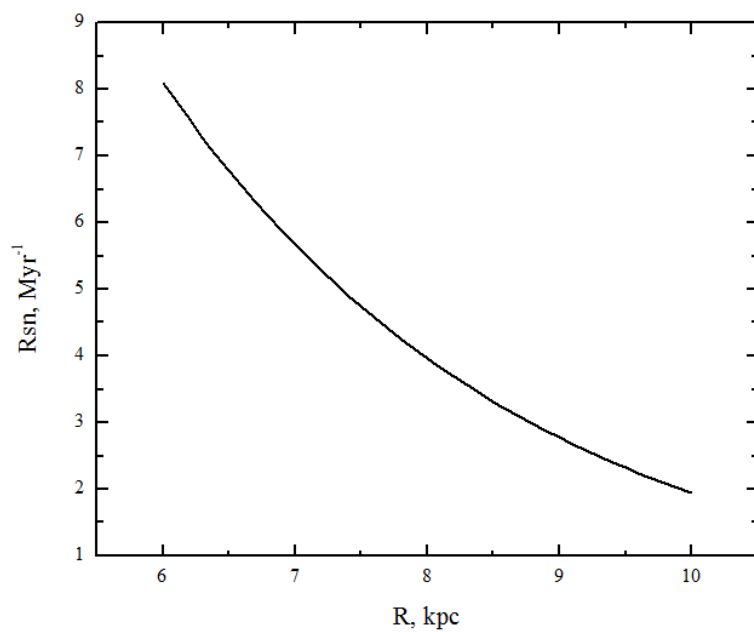
$$\mathfrak{R}_{SN} = 2\pi \mathfrak{R}_C \cdot (-h_z) \cdot (-h_r) \left| e^{-\frac{z_2}{h_z}} - e^{-\frac{z_1}{h_z}} \right| \cdot \left| e^{-\frac{R_2}{h_r}} - e^{-\frac{R_1}{h_r}} \right| Myr^{-1} \quad (11)$$

Norėdami apskaičiuoti vidutinį pavojingai arti sproguosiu supernovų skaičių per vienerius galaktinius metus įvairiuose galaktocentriniuose atstumuose, nustatysime





4 pav. Supaprastintas Galaktikos modelis, pagal [30].



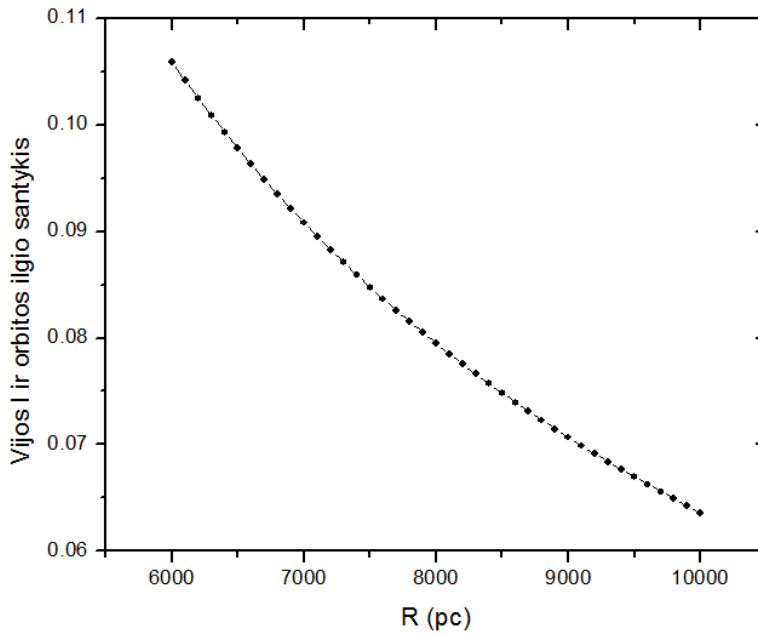
5 pav. Supernovų dažnis žiede, kurio plotis -  $2 r_k$ , o centro atstumas -  $R$ .

tikimybę, kad Saulei esant vijoje, joje sprogs supernova.

Akivaizdu, kad tai būtų paprastas vijos pločio (1 kpc) ir visos Saulės orbitos kelio ilgio santykis

$$\frac{l_{vij}}{l_o}, \quad (12)$$

kur  $l_o$  - Saulės kelio aplink Galaktikos centrą ilgis žiedo centre, o  $l_{vij}$  - vijos plotis (1 kpc). Šio santykio mažėjimą matome 6 pav.



6 pav. Laiko, kurį Saulė praleidžia vijoje ir tarp vijų, santykis.

Akivaizdu, kad žvaigždės atstumui nuo Galaktikos centro didėjant, tikimybė, kad ji bus vijoje, kuriose telkiasi supernovos, mažėja.

Mūsų suskaičiuotas supernovų dažnis yra vidurkinis, t.y. turime vidutinį supernovų skaičių per 1 Myr, vienodą visoje žvaigždės orbitoje. Laikydami, kad branduolio kolapso supernovos telkiasi išimtinai vijoje, galime suskaičiuoti supernovų dažnį vijoje, kurioje tuo metu bus žvaigždė.

$$n_{vij} = 4, \mathfrak{R}_{SN_{vij}} = \frac{\mathfrak{R}_{SN}}{n_{vij}} Myr^{-1} \quad (13)$$

Tariame, kad supernovos yra tolygiai pasiskirstę visame vijos plotyje. Norėda-

mi surasti supernovų dažnį mažesniu atstumu, nei biologiškai reikšmingas atstumas  $r_k$ , turime surasti  $r_k$  spindulio sferos tūrio santykį su vijų tūriu, bei padauginti jį iš (12) išraiškos vertės. Tai ekvivalentu

$$\mathfrak{R}_{SN_k} = \mathfrak{R}_{SN_{vij}} \cdot \frac{V_{\odot}}{V_{tot}} Myr^{-1}, \quad (14)$$

čia  $V_{tot}$  - viso žiedo tūris.

Laikome, kad šios sferos viduje sprogsi supernova gali padaryti didelę žalą gyvybei, o žinodami supernovų dažnį vijoje iš (13) išraiškos galime nustatyti artimų supernovų skaičių tiriamu laikotarpiu (500 mln.m.)

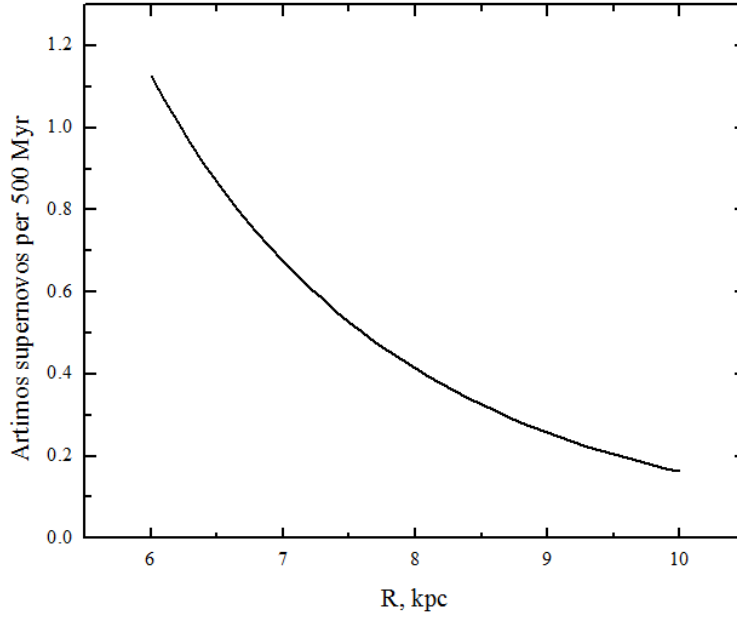
Sferos tūris  $V_{\odot}$  lygus

$$V_{\odot} = \frac{4}{3} \pi r_k^3 \quad (15)$$

Per 500 mln. m. arti sprogsių supernovų skaičius bus lygus

$$N_{SN} = 550 \cdot \mathfrak{R}_{SN_k} \cdot 4, \quad (16)$$

Iš 7 pav. matome, kad Saulei sukantis 8 kpc atstumu nuo Galaktikos centro, per pastaruosius 500 Myr mažesniu, nei  $r_k$  atstumu galėjo sprogti  $\approx 0.4$  supernovos. Taip pat iš šių duomenų matome, kad netolimos supernovos tikimybė per 500 mln. metų 6 ir 10 kpc atstumu skiriasi 7.1 karto.



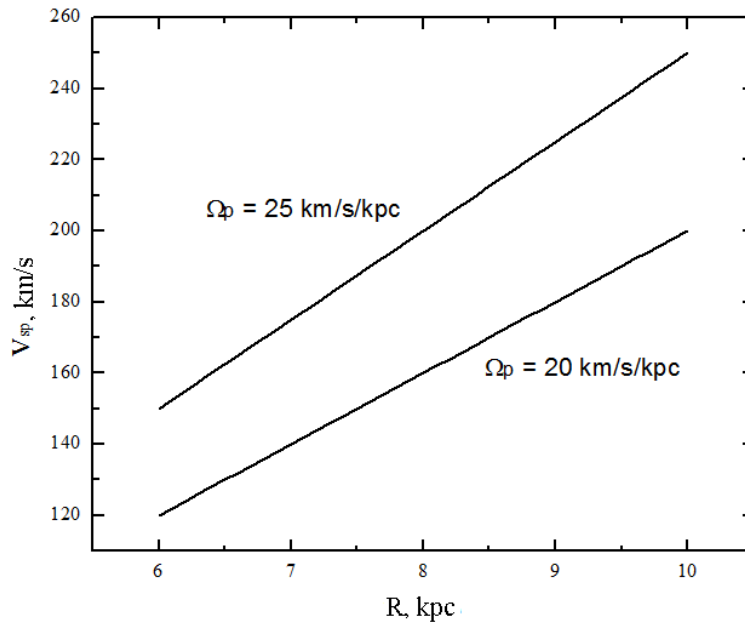
7 pav. Artimos supernovos įvykio per 500 mln. metų tikimybė.

### 3.4 Supernovų dažnis ir spiralinių vijų sukimosi greitis

Praeitame skyriuje skaičiuodami supernovų dažnį nekreipėme dėmesio į tai, kad spiralinės Galaktikos vijos nestovi vietoje, o sukasi pastoviu kampiniu greičiu  $\Omega_p$ . Taip pat neatsižvelgėme į Galaktikos žvaigždžių diferencialinio sukimosi greičio kintimą, t.y. į sukimosi kreivės formą tiriamame intervale. Tai, koku greičiu žvaigždės lenkia spiralines vijas arba nuo jų atsilieka, lemia laiką, praleistą vijos viduje - tuo pačiu ir didesnį ar mažesnį netolimų supernovų dažnį.

Galaktikos spiralinės vijos sukasi kaip kietas kūnas, t.y. jų kampinis sukimosi greitis  $\Omega_p$  yra pastovus, o orbitinis greitis  $v_{sp}$  didėja, didėjant atstumui nuo galaktikos centro. Žvaigždžių bei dujų judėjimas Galaktikoje yra diferencialinis - kampinis greitis kinta, kintant atstumui nuo centro  $R$ . Dėl šios priežasties vijų sukimosi greitis skiriasi nuo žvaigždžių bei dujų sukimosi greičio ir yra jam lygus tik tam tikru korotacijos atstumu  $R_{corot}$ .

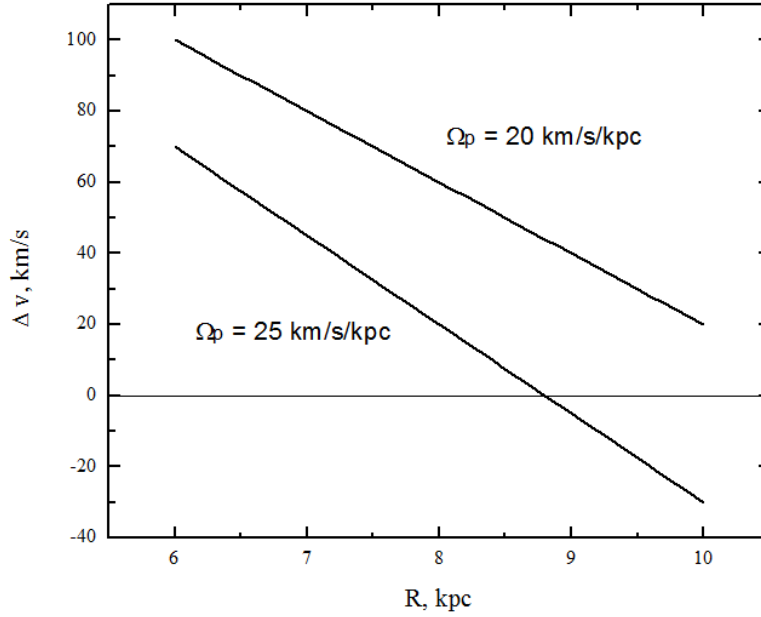
Konkrečius  $\Omega_p$  įverčius nustatyti gana sunku. Remiantis jaunų padrikųjų spiečių tyrimais, buvo nustatyta [31], kad  $\Omega_p = 25 \pm 1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ . Dujų judėjimo SPH modeliai pateikia mažesnę vertę  $\Omega_p = 20 \pm 1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  [32].



8 pav. Orbitinio spiralinių vijų sukimosi greičio priklausomybė nuo R.

8 pav. matome orbitinio spiralinių vijų sukimosi greičio priklausomybę nuo R. Laikydami, kad tiriamame intervale Galaktikos medžiagos sukimosi greivė yra plokščia, o vidutinis orbitinis medžiagos greitis yra  $220 \text{ km s}^{-1}$ , galime rasti korotacijos spindulį  $R_{corot}$ . Jei  $\Omega_p = 25 \pm 1 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ,  $R_{corot} = 8.8 \text{ kpc}$ . Laikant, kad  $\Omega_p = 20 \pm 1 \text{ km/s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ ,  $R_{corot} = 11 \text{ kpc}$ .

Galime apskaičiuoti santykinį žvaigždės greitį vijų atžvilgiu (9 pav.). Kol  $R < R_{corot}$ , jis bus mažesnis už 0, kai  $R > R_{corot}$ , didesnis - t.y. žvaigždės atsiliks nuo spiralinių vijų. Ties  $R = R_{corot}$  besisukančios žvaigždės padėtis spiralinių vijų atžvilgiu išlieka pastovi.



9 pav. Santykinio žvaigždės greičio vijų atžvilgiu priklausomybė nuo atstumo R.

### 3.5 Sukimosi kreivės įtaka

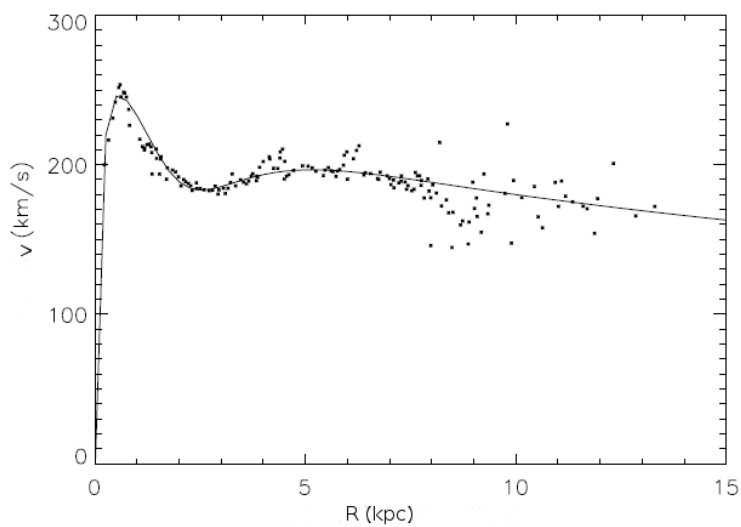
Manome, kad tikslinga įvertinti Galaktikos sukimosi kreivės įtaką - galvojama, kad ties Saulės atstumu nuo centro sukimosi greitis lėtai mažėja [33]. Dias ir Lepine nurodo [31] empirinę Galaktikos sukimosi kreivės aproksimavimo formulę:

$$v = 228e^{(-r/50 - (3.6/r)^2)} + 350e^{(-r/3.25 - 0.1/r)} \quad (17)$$

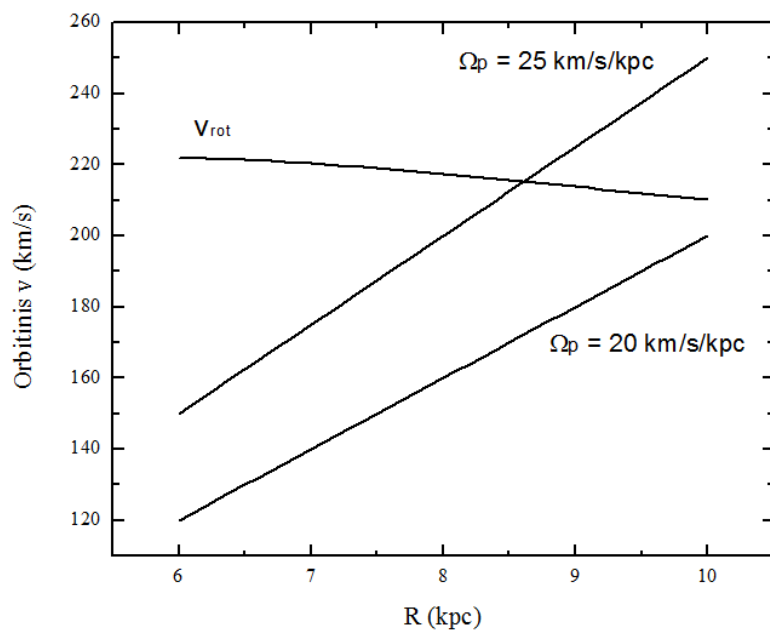
10 pav. matome šia kreive aproksimuotą iš CO stebėjimų gautą Galaktikos sukimosi kreivę. Kadangi Saulės greitis  $v_{\odot}$  laikytas lygiu 190 km/s [31], norėdami šią kreivę naudoti skaičiavimuose, ją pataisysime taip, kad  $v_{\odot} = 220 \text{ km s}^{-1}$ .

11 pav. pavaizduota Galaktikos sukimosi kreivė, apskaičiuota pagal 17 išraišką. Laikome, kad Saulės aplinkoje orbitinis žvaigždžių greitis yra lygus  $220 \text{ km s}^{-1}$ . Taip pat pavaizduoti orbitiniai spiralinių vijų sukimosi greičiai, kuomet  $\Omega_p = 20 \text{ km s}^{-1}$  ir  $25 \text{ km s}^{-1}$ .

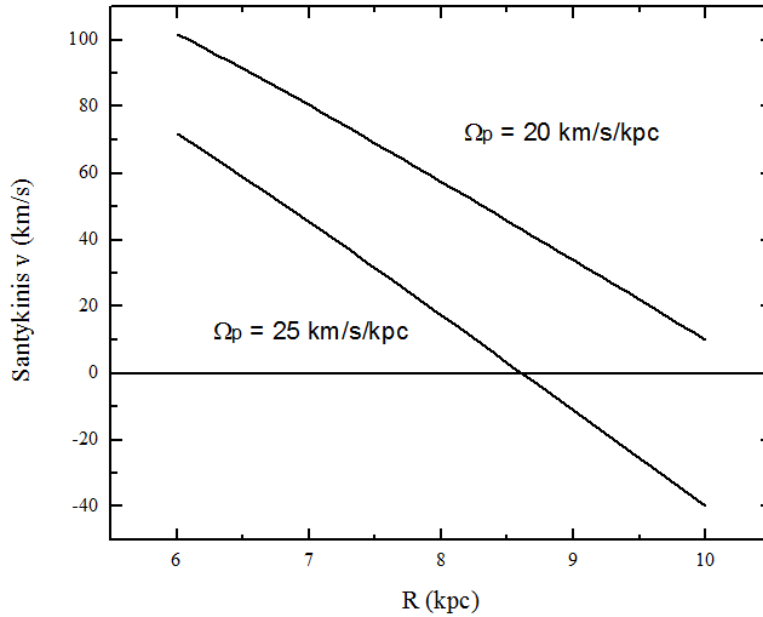
12 pav. parodyta santykinio žvaigždės greičio vijų atžvilgiu priklausomybė nuo galaktocentrinio atstumo, įskaičiuavus neplokščios Galaktikos sukimosi kreivės



10 pav. Galaktikos sukimosi kreivė pagal Dias ir Lepine, [31].



11 pav. Sukimosi kreivė tiriamame intervale bei vijų sukimosi greičio priklausomybė nuo  $R$ , kuomet  $\Omega_p = 20 \text{ km s}^{-1}$  ir  $25 \text{ km s}^{-1}$ .



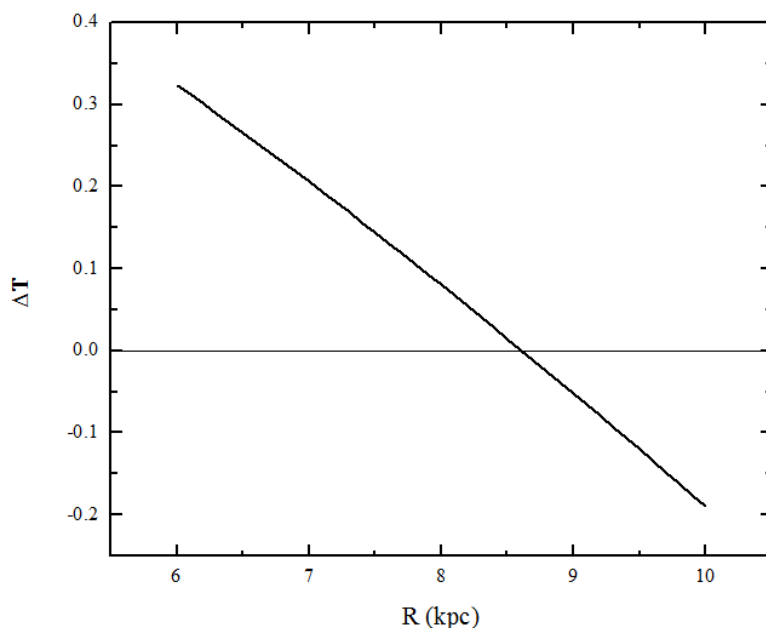
12 pav. Santykinio žvaigždės greičio vijų atžvilgiu priklausomybė nuo  $R$ , naudojant skirtingas  $\Omega_p$  vertes.

įtaką tiriamame atstumų intervale. Jei  $\Omega_p$  laikysime esant lygiu  $25 \text{ km s}^{-1}$ ,  $R_{corot}$  bus ties 8.6 kpc. Mažesnio  $\Omega_p$  atveju korotacijos spindulys bus ties 11 kpc, kur kas toliau, nei literatūroje dažnai nurodoma vertė  $R_{corot} = 9 \text{ kpc}$  [34]. Toliau darbe tirsime atvejį, kai  $R_{corot} = 8.6 \text{ kpc}$ , nesudėtinga skaičiavimus pakartoti su kitokia  $\Omega_p$  verte.

Žinodami orbitinį greitį, galime rasti, kiek kartų per vieną galaktinį periodą žvaigždė aplenks visas spirales vijas. Akivaizdu, kad apsisukimo periodas priklauso nuo atstumo iki centro, žinodami sukimosi greičio įverčius bei orbitos ilgį (laikome, kad jos apskritiminės), randame galaktinių metų ilgio priklausomybę nuo  $R$  (??).

Turėdami šiuos duomenis, galime apskaičiuoti, kiek kartų (t.y., kuria pilno apsisukimo periodo dalimi) žvaigždės lenks ( $R < R_{corot}$ ) arba atsiliks ( $R > R_{corot}$ ) nuo spiralinio rašto sukimosi.





13 pav. Pavaizduotas  $R$  ir  $\Delta T$  - periodo dalis, kuria žvaigždžių judėjimas skirsis nuo spiralinio rašto judėjimo.

### 3.6 Saulės judėjimas per pastaruosius 500 mln. metų

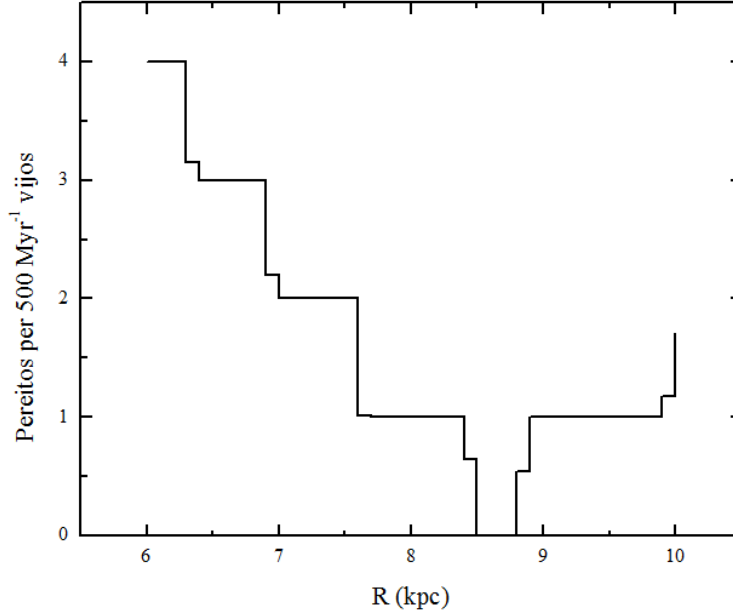
Iš 13 pav. matome, kad žvaigždė, esanti erdvėje tarp vijų arti korotacijos spindulio, gali pilnai apsisukti aplink Galaktikos centrą ir nė karto nekirsti vijos. Analogiškai, ji gali visą periodą praleisti vijos viduje, kur artimos supernovos tikimybė daug didesnė.

Žinodami, kokių kampiniu atstumu  $\phi$  Saulė nutolusi nuo artimiausios spiralinės vijos, galime rasti jos ir visų tiriamame intervale tokiu kampiniu atstumu nuo vijos esančių žvaigždžių vijų kirtimo dažnį - o tuo pačiu ir netoliese sprogusių supernovų dažnį.

Saulės atstumas iki artimiausios Persėjo spiralinės vijos yra 1.9 kpc [35], tai atitinka  $\phi = 41.7^\circ$ . Atstumas iki paskutinės jos kirstos Šaulio - Kilio vijos yra 2.2 kpc [36], t.y.  $\phi = 48.2^\circ$ .

Skaičiuojant pereinų vijų skaičių, reikia turėti omenyje, kad skirtingose korotacijos spindulio pusėse besisukančios žvaigždės kirto skirtingas vijas. Žvaigždės, kurių  $R < R_{corot}$ , paskutinį kartą perėjo Kilio viją, žvaigždės, kurios nuo vijų atsilieka, t.y.  $R > R_{corot}$ , paskutinę perėjo Persėjo viją. Žinodami vijų padėtį, galime

apskaičiuoti, kiek kartų tam tikru atstumu esanti žvaigždė kirs viją per 500 mln. metų (14 pav.).



14 pav. Žvaigždės per 500 mln. metų kirstų vijų skaičius. Matome, kad arti korotacijos spindulio  $R_{corot} \approx 8.6$  kpc esančios žvaigždės jų nė karto nekirto.

## 3.7 Saulės perėjimai per vijas

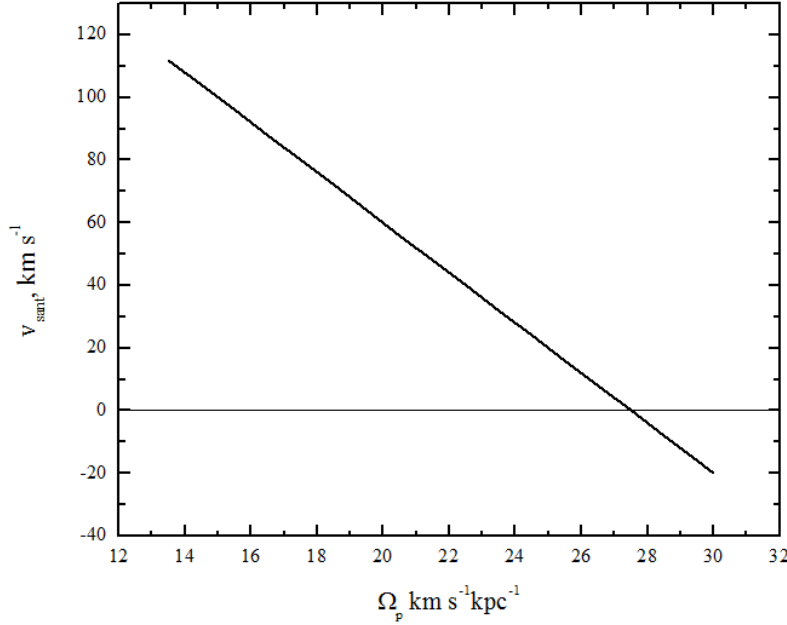
### 3.7.1 Kampinio vijų sukimosi greičio įtaka kirstų vijų skaičiui

Žinodami dabartinę Saulės padėtį vijų atžvilgiu, galime atsekti jos vijų kirtimo istoriją ir patyrinėti vijų kirtimo koreliaciją su masiniais gyvybės sunykimais. Iš 14 pav. matome, kad Saulė per pastaruosius 500 mln. metų kirto tik vieną viją. Toks rezultatas gana skiriasi nuo literatūroje sutinkamo dažnio (plg. [37] pateikiamas  $536 \pm 100$  Myr visų vijų kirtimo periodas, panašiai [38]).

Reikia atsižvelgti į tai, kad spiralinių vijų kirtimo dažnis jautriausiai priklauso nuo dviejų parametų - Saulės galaktocentrinio atstumo  $R_{\odot}$  bei spiralinių vijų rašto sukimosi greičio ir Saulės sukimosi greičio skirtumo  $\Omega_{\odot} - \Omega_p$ . Nuo pastarojo parametro priklauso ir korotacijos spindulio atstumas nuo Galaktikos centro.

$\Omega_p$  įvėrciai svyruoja tarp  $13.5 \text{ km s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$  ir  $30 \pm 7 \text{ km s}^{-1}\text{kpc}^{-1}$ , platesnė

apžvalga [37]. Norėdami nustatyti, kaip vijų kirtimo dažnis priklauso nuo  $\Omega_p$  vertės, pavaizduojame šią priklausomybę laikydami, kad  $R_\odot = 8$  kpc,  $v_\odot = 217$  km s<sup>-1</sup> (vertė, kurią gavome aproksimuodami sukimosi kreivę) (15 pav.).



15 pav. Santykinio Saulės greičio vijų atžvilgiu priklausomybė nuo kampinio spiralinių vijų sukimosi greičio.

Iš 15 pav. matome, kad kintant  $\Omega_p$  vertei, keičiasi ir Saulės pdėtis korotacijos spindulio atžvilgiu. Laikant, kad Saulės atstumas nuo Galaktikos centro yra 8 kpc, už korotacijos spindulio Saulė būtų, jei  $\Omega_p > 27.5$  km s<sup>-1</sup> kpc<sup>-1</sup>.

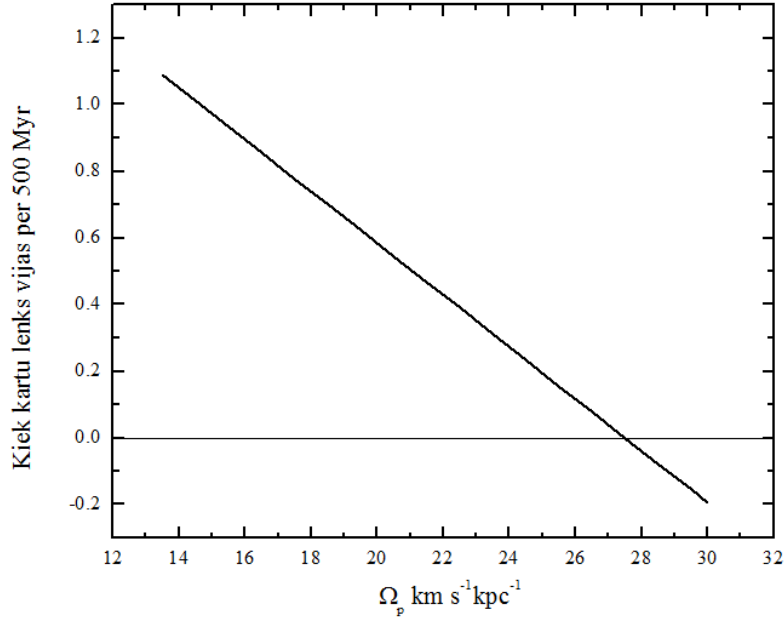
Norint įvertinti skaičiavimo tikslumą, naudinga ištirti korotacijos spindulio priklausomybę nuo  $\Omega_p$ . Pagal apibrėžimą,  $R_{corot}$  yra atstumas, kuriame santykinis žvaigždžių greitis vijų atžvilgiu lygus 0. Santykinis greitis išreiškiamas kaip

$$v_{sant} = v_{rot} - R \cdot \Omega_p, \quad (18)$$

tuomet ties  $R_{corot}$  galios sąlyga

$$v_{rot} - R_{corot} \cdot \Omega_p = 0, \quad (19)$$

o įsistatę konkrečią Saulės sukimosi greičio vertę, gauname



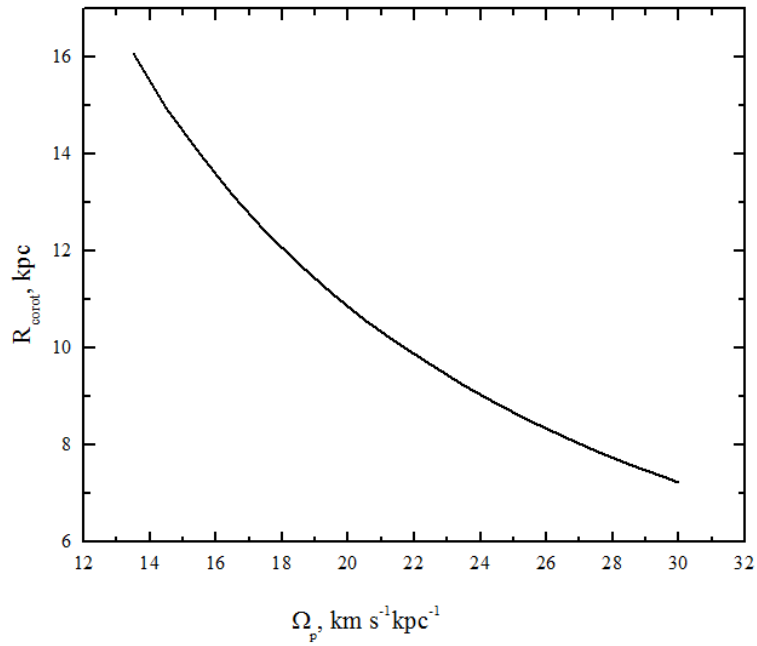
16 pav. Per 500 mln.m. apeita spiralinio rašto dalis.

$$R_{corot} = \frac{217}{\Omega_p}. \quad (20)$$

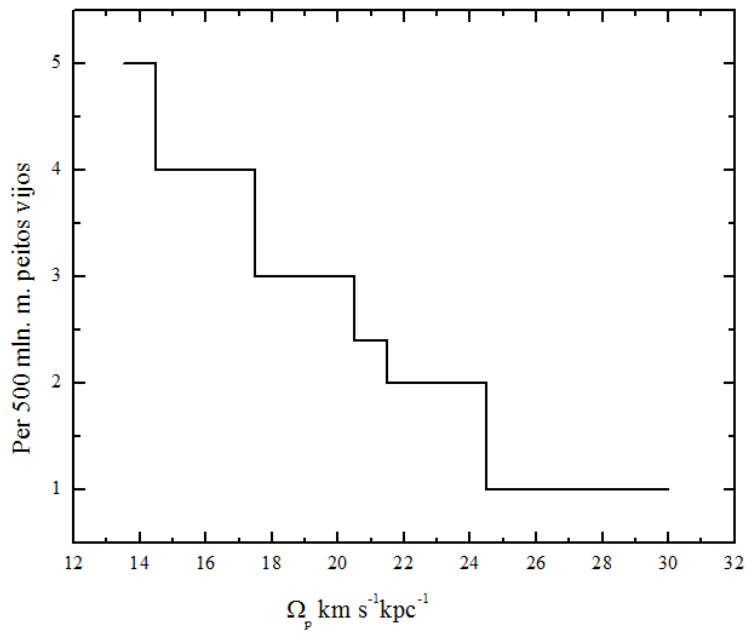
Iš 17 pav. matyti, kad  $R_{corot}$  labai stipriai priklauso nuo pasirinktos  $\Omega_p$  vertės. Šio parametro neapibrėžtumas lemia didžiausią kirstų vijų skaičiaus neapibrėžtumą.

Galime palyginti, kiek kartų Saulė kirs spiralines vijas per 500 mln. metų, remiantis skirtingomis  $\Omega_p$  vertėmis (18 pav.).

Matome, kad kirstų vijų skaičius labai priklauso nuo kol kas tiksliai nenustatytos  $\Omega_p$  vertės. Naudojantis mažomis  $\Omega_p$  vertėmis, matome, kad Saulė per 500 mln. m. kirto 5 vijas - t.y. apsisuko daugiau, nei vieną kartą spiralinio ornamento atžvilgiu. Didėjant  $\Omega_p$ , Saulė atsiranda vis arčiau korotacijos spindulio, o ties  $\Omega_p = 27.5 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$  pradeda atsilikti nuo spiralinių vijų. Jei pratęstume grafiką link dar didesnių  $\Omega_p$  verčių, Saulės pereinamųjų vijų skaičius vėl pradėtų didėti.



17 pav. Korotacijos atstumo  $R_{\text{corot}}$  priklausomybė nuo vijų sukimosi greičio.



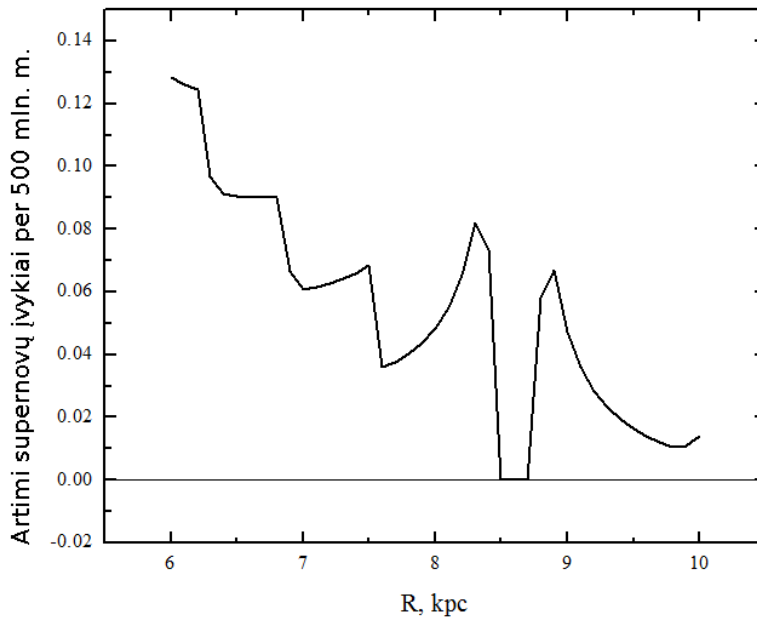
18 pav. Per pastaruosius 500 mln. metų Saulės pereitų vijų skaičiaus priklausomybė nuo  $\Omega_p$ .

### 3.8 Artimų supernovų dažnio priklausomybė nuo vijose praleisto laiko

Norint įvertinti netolimų supernovų keliamą grėsmę, reikia rasti laiką, kurį žvaigždė per pastaruosius 500 mln. m. praleido vijose. Pereitų vijų skaičius nebūtinai yra didelio supernovų pavojaus rodiklis - jei santykinis žvaigždės greitis spiralinių vijų atžvilgiu didelis, ji tiriamu laikotarpiu galėjo apeiti daug vijų, tačiau jose neužtrukti. Analogiškai, šalia korotacijos spindulio esanti žvaigždė galėjo pereiti tik vieną viją, tačiau joje praleisti daug laiko. Tokiu atveju tikimybė, kad netoli jos sprogs pražūtinga supernova, yra daug didesnė.

Žinodami, kurią viso vijų rašto dalį per 500 mln. m. apeina žvaigždė, kiek vijų ji perėjo ir koks kampinis vijos dydis konkrečiu atstumu, galime rasti artimų supernovų dažnio priklausomybę nuo  $R$ .

Suskaičiuojame, kokią viso vijų atžvilgiu nueito kelio dalį žvaigždė praleido vijose. Žinodami, kiek laiko žvaigždė buvo vijose ir artimų supernovų dažnį atstumu  $R$ , randame supernovų dažnio priklausomybę nuo  $R$ ,  $\Omega_p = 25 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ .



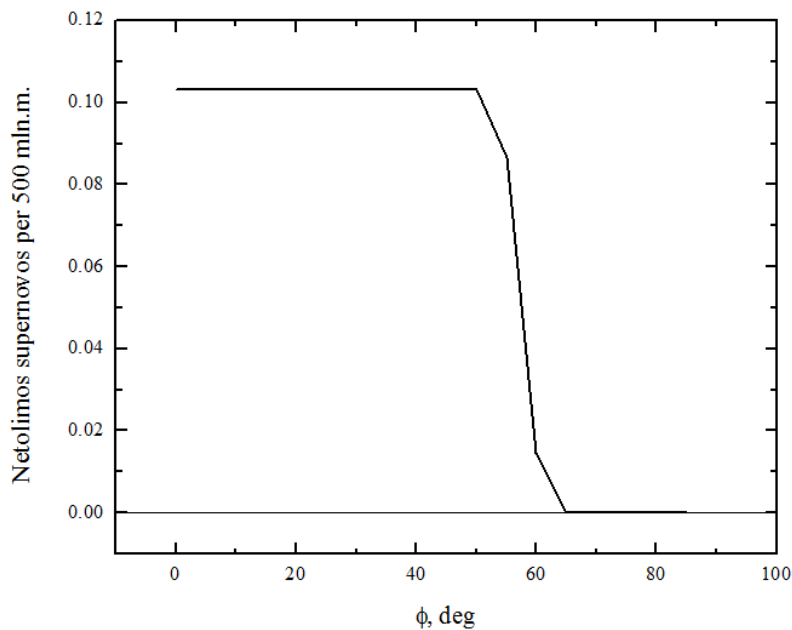
19 pav. Netoli nuo žvaigždės, esančios Saulės padėtyje spiralinių vijų atžvilgiu, esančios supernovos sprogo per 500 mln. m. tikimybės priklausomybė nuo Galaktikos centro.

Tarę, kad  $R_{\odot} = 8 \text{ kpc}$ , matome, kad netolimos supernovos tikimybė per pa-

staruosius 500 mln. m. lygi 0.048. Ji beveik 10 kartų mažesnė už 3.3 skyriuje nurodytą vertę ( $0.4 \text{ SN Myr}^{-1}$ ).

Praeituose skyriuose laikėme, kad supernovos tolygiai pasiskirsčiusios visame žvaigždės kelyje. Įskaičius žvaigždės santykinio judėjimo ir jos vietos spiralinių vijų atžvilgiu įtaką, matome, kad artimos supernovos tikimybė konkrečiu atstumu nuo vijos gali žymiai skirtis nuo vidutinės.

Šios supernovų tikimybės vertės galioja tik konkrečiu, tokiu pačiu kaip Saulės, kampiniu atstumu nuo spiralinių vijų esančioms žvaigždėms. Naudinga būtų pažiūrėti, kaip ši tikimybė priklauso nuo Saulės padėties tarp spiralinių vijų (20 pav.).



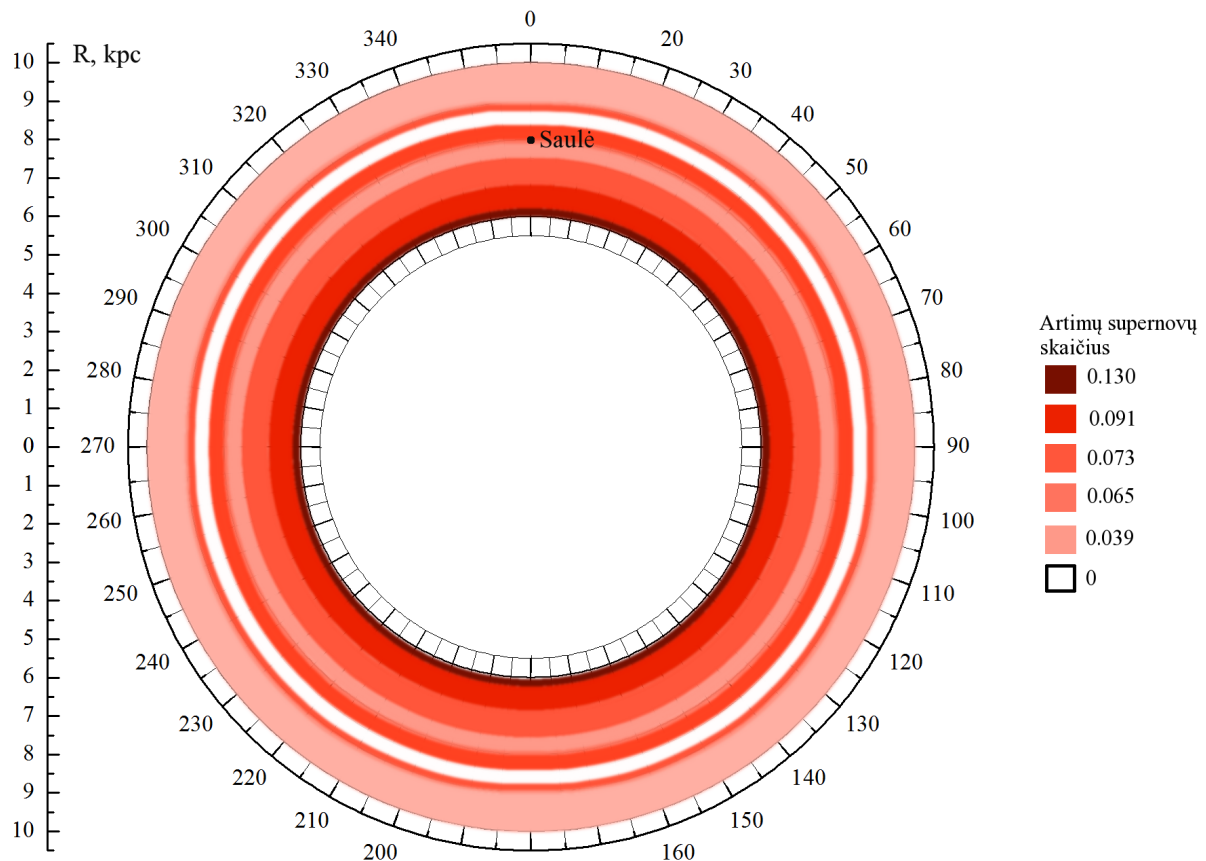
20 pav. Netolimo supernovos sproginimo tikimybės priklausomybė nuo kampinio atstumo tarp Saulės ir paskutinės praeitos vijos.

Matome, kad Saulė su šiomis  $\Omega_p$  ir  $R$  vertėmis kirs daugiausiai vieną viją.

### 3.9 Galaktikos gyvybės zona

3.8 skyriuje priėjome išvadą, kad pereinų vijų skaičius, o tuo pačiu ir netolimų supernovų pavojus smarkiai priklauso nuo žvaigždės padėties tarp vijų. Matome, kad supernovų keliamu pavojumi nusakoma galaktinė gyvybės zona nėra tiesiog

vientisas žiedas, kurio vidinę ribą nusako supernovų dažnis. Tikimybė, kad šalia žvaigždės sprogs supernova, labai stipriai priklauso tiek nuo žvaigždės greičio, tiek nuo jos padėties vijų atžvilgiu, tiek nuo jos atstumo iki Galaktikos centro, todėl kalbėti apie vientisą galaktinę gyvybės zoną, nusakomą supernovų sproginėjimo dažniu, negalime - ji nehomogeniška, priklauso nuo keleto parametrų ir kintanti laike.

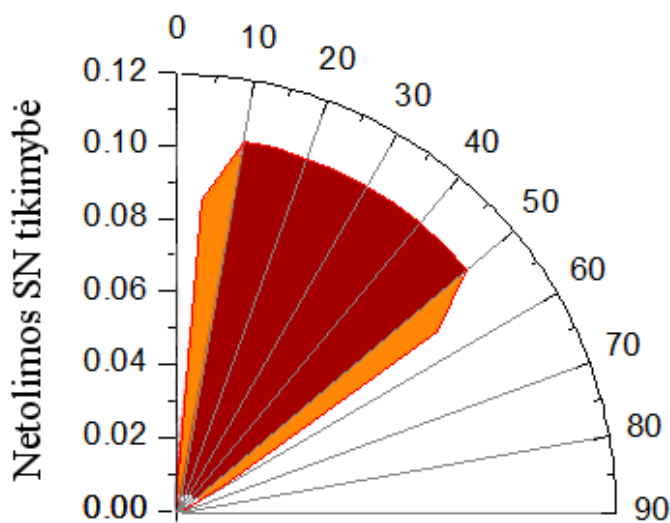


21 pav. Netolimos supernovos tikimybės per pastaruosius 500 mln. m. priklausomybė nuo atstumo, laikant, kad kampinis atstumas iki sekančios vijos - toks pat, kaip Saulės.

21 pav. skirtingomis spalvomis pažymėta netolimos supernovos tikimybė tiriamame intervale. Matome, kad, nors supernovų skaičius, tolstant nuo centro, mažėja eksponentiškai, dėl žvaigždės santykinio sukimosi vijų atžvilgiu ši tikimybė pakinta. Tačiau ši priklausomybė nevienamatė - atstumas, kuriuo žvaigždė yra nuo spiralinės vijos, taip pat lemia netoliese per tiriamą laikotarpį sprogsių supernovų tikimybė.

22 pav., vaizduodami artimos supernovos tikimybę, laikėme, kad žvaigždė sukasi Saulės atstumu nuo centro. Matyti, kad žvaigždėms, kurios šiuo metu yra





22 pav. Netolimos supernovos priklausomybė nuo žvaigždės padėties vijų atžvilgiu: 0 deg reiškia, kad ji šiuo metu yra vijoje, 90 - kad žvaigždė yra prie sekančios vijos pradžios.

neseniai perėjusios arba dar tebekerta viją, artimos supernovos tikimybė per pastaruosius 500 mln. m. žymiai didesnė, o toms, kurios baigia prisivyti sekančią viją - praktiškai lygi nuliui (čia, kaip ir kitur, nekreipiame dėmesio į tarp vijų pasitaikiusias supernovas).

Galime daryti išvadą, kad bent spiralinėse galaktikose gyvybei palanki zona yra kur kas sudėtingesnis reiškinys, nei gali pasirodyti. Įskaičius santykinį žvaigždžių judėjimą vijų atžvilgiu, nebegalime kalbėti apie galaktinę gyvybės zoną kaip apie homogenišką sritį. Tikslesnis palankumo gyvybei įvertis būtų gaunamas, atsižvelgus į konkrečius žvaigždės judėjimo parametrus - orbitos formą, sukimosi greitį, galaktocentrinį atstumą bei padėtį tarp vijų.

## 4 Modelio netikslumų įvertinimas

Norint įvertinti darbo metu gautų rezultatų tikslumą, reikia aptarti padarytas prielaidas bei galimus paklaidų šaltinius.

Visų pirma, mūsų naudotas idealizuotas galaktikos vijų modelis, t.y. logaritmė spirālė, neatspindi to, kad Galaktika nėra simetriška. Saulė šiuo metu yra vidinėje nedidelės Oriono vijos, esančios tarp Persėjo ir Šaulio vijų, pusėje. Tokios struktūros galėtų dramatiškai pakeisti šalia tam tikru kampu ar atstumu esančios žvaigždės sproguosios supernovos tikimybę. Taip pat neatsižvelgėme į galimai skirtingą vijų plotį bei jo kitimą, tostant nuo Galaktikos centro, tai, kad vijos nebūtinai yra simetriškai išsidėsčiusios viena kitos atžvilgiu, netolygų supernovų pasiskirstymą vijų plotyje, taip pat į skirtingus kampus, kuriais žvaigždės pereina viją - tai galėtų žymiai pakeisti vijų perėjimo trukmę.

Neatsižvelgėme į Saulės greičio pakitimus dėl Galaktikos potencialo pakitimo šalia masyvių spiralinių vijų, taip pat nekreipėme dėmesio į galimas perturbacijas dėl susidūrimų su dideliais molekuliniais debesimis - nors manoma [38], kad tai neturėtų įtakoti žvaigždžių greičio daugiau, nei 4 procentais per 500 mln. m. Laikome, kad Saulės orbita apskritinė, o atstumas nuo Galaktikos centro nekinta, nors jos atstumas iki centro nuo susidarymo galėjo pakisti iki 2 kpc [39].

Nemažai sisteminių paklaidų įneša ir kai kurie kol kas neaiškūs Galaktikos parametrai. Šiuo metu laikoma, kad Saulės atstumas nuo Galaktikos centro yra  $8.0 \pm 0.5$  kpc [40], disko skalės ilgio vertė, kurią naudoju šiame darbe, yra  $h_r = 2.8 \pm 0.3$  kpc [28], tačiau naujesni tyrimai ją dar turėtų patikslinti. Vien  $R_\odot$  ir  $h_r$  paklaidos lemia tai, kad netolimų Saulei supernovų tikimybė žinoma geriausiu atveju 12 procentų tikslumu.

Ypatingai daug problemų kelia neapibrėžta  $\Omega_p$  vertė - jos įtaką korotacijos spindulio vietai, žvaigždės pereinų vijų skaičiui ir netolimos supernovos dažniui aptarėme 3.7.1 skyriuje. Kiti parametrai, kurie galėtų žymiai pakoreguoti gautas tikimybės vertes, yra galaktinė žvaigždėdaros sparta bei tikslesni branduolio kolapso supernovų žalos žemiškai gyvybei įverčiai. Kiekybiškai nusakyti supernovų keliamus apribojimus galaktinei gyvybės zonai trukdo ir tai, kad negalime įvertinti supernovų dažnio įtakos biosferos raidai. Nėra duomenų apie daugialąsčių organizmų atsparumą ilgam ir intensyviai apšvitinimui bei globaliems klimato sutrikimams. Taip pat netolimos supernovos įtaka stipriai priklauso nuo atmosferos sudėties, planetų sistemą gaubiančios heliosferos būklės, netgi nuo metų laiko ir geografinės platumos planetoje [16].

## 5 Išvados

Atsižvelgdami į praeitame skyriuje aptartus paklaidų šaltinius, galime aptarti ir įvertinti darbo rezultatus bei jų patikimumą.

Darbo metu, naudodamiesi literatūroje rasta žvaigždėdaros spartos verte ir galaktinės evoliucijos modeliu PEGASE, radome galaktinį branduolio kolapso supernovų dažnį. Remdamiesi juo, ištyrėme eksponentinį supernovų dažnio kitimą 6-10 kpc intervale. Tyrėme artimos supernovos tikimybės kitimą įvairiu galaktocentriniu atstumu, atsižvelgdami į tai, kad supernovos koncentruojasi spiralinėse vijose, o žvaigždės, esančios skirtingais atstumais, vijose praleidžia skirtingą laiko kiekį.

Kadangi spiralinis raštas sukasi, įvertinome šio sukimosi bei Galaktikos sukimosi kreivės įtaką artimų supernovų dažniui. Manome, kad tikimybės pasiskirstymas Saulės padėtyje tarp vijų yra funkcija, kurios minimumas yra ties korotacijos spinduliu. Kadangi  $\Omega_p$  vertė yra parametras, turintis didžiausią įtaką korotacijos spindulio vietai, ištyrėme Saulės pereinų vijų skaičiaus bei korotacijos spindulio priklausomybę nuo  $\Omega_p$ . Taip pat įvertinome žvaigždės kampo paskutinės praeitos vijos atžvilgiu įtaką, kuri irgi lemia žvaigždės pereinų vijų skaičių.

Nepaisant didelių Galaktikos parametrų neapibrėžtumų sąlygotų paklaidų, galime apibendrinti gautus rezultatus.

Galaktikos gyvybės zona siūloma laikyti žiedo formo sritį, kurios vidinę ribą nusako tankiai sproginėjančios supernovos [3]. Šiame darbe gautos išvados verčia manyti, kad supernovos tikimybė priklauso ne tik nuo galaktocentrinio atstumo, o ir nuo žvaigždės sukimosi, padėties vijų atžvilgiu, atstumo iki galaktocentrinio radiuso. Galaktinė gyvybės zona yra kur kas sudėtingesnis, nehomogeniškas, laike kintantis darinys ir netolimos supernovos tikimybės turėtų būti įvertinamos kiekvienu atveju.

Matyti, kad mažiausią netolimos branduolio kolapso supernovos pavojų per pastaruosius 500 mln. m. metų patyrė žvaigždės, kurios sukasi ties korotacijos spinduliu ir yra  $55^\circ - 90^\circ$  kampu nuo vėliausiai praeitos vijos.

Supernovų tikimybė Saulės aplinkoje, gautas neatsižvelgiant į santykinį žvaigždžių ir vijų judėjimą, yra beveik 10 kartų didesnė (0.4 artimos supernovos per 500 mln.m.). Toks rezultatas yra palyginamas su [16] nurodoma verte (1 SN per 1.5 mlrd. m.) ar [10] gauta panašia verte. Laikydami, kad  $\Omega_p = 25 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$ , o  $R_\odot = 8 \text{ kpc}$ , gauname, kad artimos Saulei supernovos tikimybė per praeitus 500

mln. m. yra lygi 0.048 - t.y. daugiau nei 8 kartus mažesnė, nei aukščiau cituojamuose darbuose gautos vertės. To priežastys - buvo manoma, kad korotacijos spindulys yra žymiai toliau nuo Saulės padėties, nei šiame darbe priimta vertė. Tiriant izotopų gausas nuosėdinėse uolienose, galima patikrinti šią vertę bei paieškoti kosminės kilmės izotopų gausos sąsajos su masiniais gyvybės sunykimais, nors itin maža artimos supernovos tikimybė leidžia manyti, kad supernovų įtaka gyvybės raidai Žemei turėtų būti maža.

## Literatūra

- [1] G. Gonzalez, D. Brownlee, P. Ward. The Galactic Habitable Zone I: Galactic Chemical Evolution. *Icarus*, 152(1):185–200, 2001.
- [2] G. Marcy, R. P. Butler, D. A. Fischer, S. S. Vogt, J. T. Wright, C. G. Tinney, H. R. A. Jones. Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 158:24–42, 2005.
- [3] C. H. Lineweaver, Y. Fenner, B. K. Gibson. The galactic habitable zone and the age distribution of complex life in the Milky Way. *Science*, 303(5654):59–62, 2004.
- [4] B. F. Schutz. *Gravity from the ground up*. Cambridge Univ Pr, 2003.
- [5] O. S. Bartunov, D. Y. Tsvetkov, I. V. Filimonova. Distribution of supernovae relative to spiral arms and H II regions. *Astronomical Society of the Pacific*, 106:1276–1284, December 1994.
- [6] M. Hashimoto, K. Iwamoto, K. Nomoto. Type II supernovae from 8-10 solar mass asymptotic giant branch stars. , 414:L105–L108, September 1993.
- [7] F. K. Thielemann, K. Nomoto, M. A. Hashimoto. Core-collapse supernovae and their ejecta. *The Astrophysical Journal*, 460:408, 1996.
- [8] N. Ohyama. On the Explosion of Type II Supernova. *Progress of Theoretical Physics*, 30:170–190, August 1963.
- [9] S. Woosley, T. Janka. The physics of core-collapse supernovae. *Nature Physics*, 1(3):147–154, 2005.
- [10] J. Ellis, D. N. Schramm. Could a nearby supernova explosion have caused a mass extinction? *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(1):235–238, 1995.
- [11] J. Gava, C. Volpe. Collective neutrino oscillations in matter and CP violation. *Physical Review D*, 78(8), 2008.
- [12] JI Collar. Biological effects of stellar collapse neutrinos. *Physical review letters*, 76(6):999–1002, 1996.

- [13] M. Richmond. Mass extinctions and supernova explosions. Prieiga per internetą: <http://stupendous.rit.edu/richmond/sne/sne.html>, 1998.
- [14] S. E. Thorsett. Terrestrial implications of cosmological gamma-ray burst models. *Journal reference: Astrophys. J*, 444:L53, 1995.
- [15] P. J. Crutzen, C. Bruhl. Mass extinctions and supernova explosions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(4):1582–1584, 1996.
- [16] N. Gehrels, C.M. Laird, C.H. Jackman, J.K. Cannizzo, B.J. Mattson, W. Chen. Ozone depletion from nearby supernovae. *The Astrophysical Journal*, 585(2):1169–1176, 2003.
- [17] M. Benton. Diversification and extinction in the history of life. *Science*, 268(5207):52–58, 1995.
- [18] J. Sepkoski, D. Jablonski, M. Foote. *A Compendium of Fossil Marine Animal Genera*. Paleontological Research Institution, 2002., 2002.
- [19] J. Ellis, B.D. Fields, D.N. Schramm. Geological isotope anomalies as signatures of nearby supernovae. *Journal reference: Astrophys. J*, 470:1227–1236, 1996.
- [20] CP Burgess, K. Zuber. Footprints of the newly discovered Vela supernova in Antarctic ice cores? *Astroparticle Physics*, 14(1):1–6, 2000.
- [21] Y. Motizuki, K. Takahashi, K. Makishima, A. Bamba, Y. Nakai, Y. Yano, M. Igarashi, H. Motoyama, K. Kamiyama, K. Suzuki et al. An Antarctic ice core recording both supernovae and solar cycles. *Imprint*, 2009.
- [22] C. Wallner, T. Faestermann, U. Gerstmann, K. Knie, G. Korschinek, C. Lierse, G. Rugel. Supernova produced and anthropogenic  $^{244}\text{Pu}$  in deep sea manganese encrustations. *New Astronomy Reviews*, 48(1-4):145–150, 2004.
- [23] B. D. Fields, J. Ellis. On deep-ocean Fe-60 as a fossil of a near-earth supernova. *Journal reference: New Astron*, 4:419–430, 1999.
- [24] M. Haywood, A. C. Robin, M. Creze. The evolution of the Milky Way disc. II. Constraints from star counts at the galactic poles. *Astronomy and Astrophysics*, 320:440–459, 1997.

- [25] R. Diehl, H. Halloin, K. Kretschmer, G. G. Lichti, V. Schönfelder, A.W. Strong, A. Von Kienlin, W. Wang, P. Jean, J. Knödlseider et al. Radioactive  $^{26}\text{Al}$  from massive stars in the Galaxy. *Nature*, 439(7072):45–47, 2006.
- [26] M. Fioc, B. Rocca-Volmerange. PEGASE. 2, a metallicity-consistent spectral evolution model of galaxies: the documentation and the code. *Arxiv preprint astro-ph/9912179*, 1999.
- [27] G. E. Miller, J. M. Scalo. The initial mass function and stellar birthrate in the solar neighborhood. *Astrophysical Journal Supplement Series*, 41, 1979.
- [28] D. K. Ojha. Radial scalelengths of the galactic thin and thick disc with 2MASS data. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 322(2):426–432, 2001.
- [29] E. M. Leitch, G. Vasisht. Mass extinctions and the sun’s encounters with spiral arms. *New Astronomy-Print*, 3(1):51, 1998.
- [30] J.P. Vallee. Metastudy of the spiral structure of our home galaxy. *The Astrophysical Journal*, 566(1):261–266, 2002.
- [31] W. S. Dias, J. R. D. Lepine. Direct determination of the spiral pattern rotation speed of the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 629(2):825–831, 2005.
- [32] N. Bissantz, P. Englmaier, O. Gerhard. Gas dynamics in the Milky Way: second pattern speed and large-scale morphology. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 340:949, 2003.
- [33] J. Binney, S. Tremaine. *Galactic dynamics*. Princeton University Press, 1987.
- [34] L. H. Amaral, J. R. D. Lepine. A self-consistent model of the spiral structure of the Galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 286:885–894, 1997.
- [35] J. P. Vallee. The spiral arms and interarm separation of the Milky Way: an updated statistical study. *The Astronomical Journal*, 130(2):569–575, 2005.
- [36] S. V. Molkov, A. M. Cherepashchuk, A. A. Lutovinov, M. G. Revnivtsev<sup>1</sup>, K. A. Postnov, R. A. Sunyaev. A hard X-ray survey of the Sagittarius Arm tangent with the IBIS telescope of the INTEGRAL observatory: A catalog of sources. *Astronomy Letters*, 30(8):534–539, 2004.

- [37] N. J. Shaviv. The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth. *New Astronomy*, 8(1):39–77, 2003.
- [38] D. R Gies, J .W. Helsel. Ice Age epochs and the Sun’s path through the Galaxy. *The Astrophysical Journal*, 626(2):844–848, 2005.
- [39] S. Portegies Zwart. The lost siblings of the Sun. *eprint arXiv: 0903.0237*, 2009.
- [40] F. Eisenhauer, R. Schodel, R. Genzel, T. Ott, M. Tecza, R. Abuter, A. Eckart, T. Alexander. A Geometric Determination of the Distance to the Galactic Center 1. *The Astrophysical Journal Letters*, 597(2):121–124, 2003.