

Astronomijos pradmenų konspektas

I dalis

Vieta, erdvė, laikas ir pradinės žinios apie tolimojo Kosmoso objektus

Autorius: GB

2025 m.

Redakcija 1.0

<https://github.com/zodiakas/Astronomija>



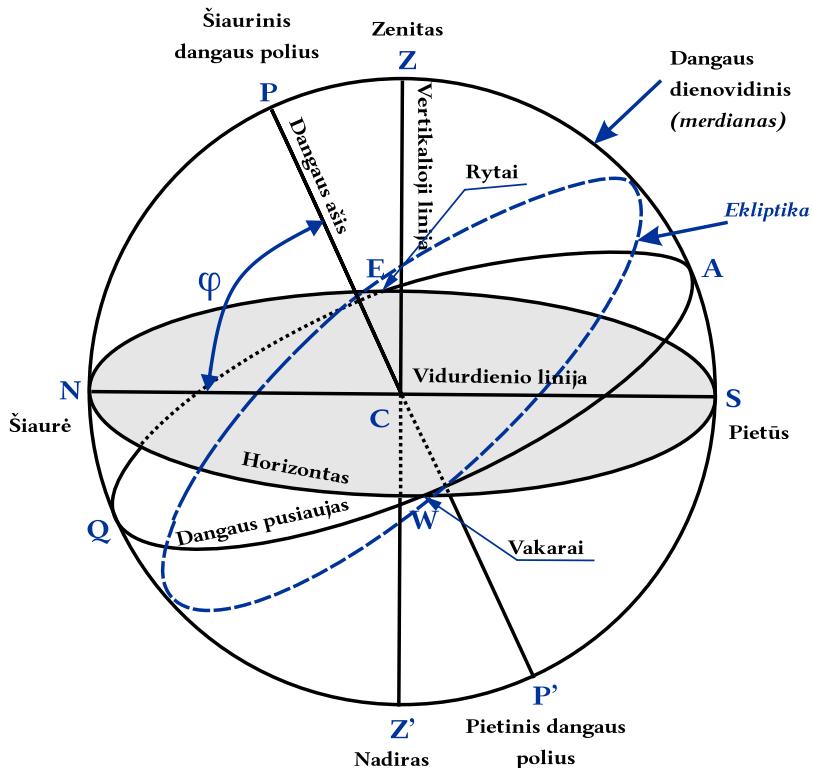
1 pav. Dažniausi naktinio dangaus reiškiniai. Autorius: GB, PD

1. Dangaus sferos pagrindiniai taškai ir linijos

1.1. Dangaus ašis, poliai, pusiaujas, horizontas, Zenitas ir Nadyras

Praktinėje astronomijoje yra labai svarbu apibrėžti stebėtojo vietą ir stebėjimo laiką, bei stebimo astronominio objekto ar reiškinio vietą dangaus skliaute atitinkamu laiko momentu. Tam yra naudojamos žemiškos ir dangiškosios koordinatės, sutartiniai dangaus sferos taškai ir linijos.

Pavaizduokime dangaus sferą brėžinyje (pav.). Siame brėžinyje C – dangaus sferos centras, kuriame yra stebėtojo akis, ZCZ' – vertikali linija, taškas Z – zenitas, Z' – nadiras (dangaus sferos taškas, priešingas zenitui). PP' – dangaus ašis, P – šiaurinis dangaus polius (ašigalis), P' – pietinis dangaus polius, $EAWQ$ – dangaus pusiaujas, kurio plokštuma statmena dangaus ašiai, $ESWN$ – horizontas, S – pietų taškas, N – šiaurės taškas, E – rytų taškas ir W – vakarų taškas.



2 pav. Dangaus sferos pagrindiniai taškai ir linijos. Autorius: GB, PD

Svarbiausi Dangaus sferos pagrindiniai taškai ir linijos yra šie:

- **Dangaus ašis (PP')** – tiesė, jungianti dangaus polius ir dangaus sferos centrą, aplink kurią sukasim regimasis šviesulių judėjimas.
- **Dangaus poliai (P ir P')** – taškai, kuriuose dangaus ašis kertasi su dangaus sfera. Šiaurinės polius yra netoli Šiaurinės žvaigždės, o pietinis yra Oktanto žvaigždyne.
- **Dangaus pusiaujas** – plokštuma, statmena dangaus ašiai, kertanti dangaus sferą per jos centrą ir kerta matematinį horizontą rytų (E) ir vakarų (W) taškuose.
- **Ekliptika** – yra išsilaikymo linija, kurią Saulė brėžia dangaus sfera per metus. Ji atspindi Žemės skriejimą aplink Saulę, nes ekliptika yra Žemės orbitos plokštumos ir dangaus sferos sankirta. Ekliptikos plokštuma sudaro apie $23^{\circ}27'$ kampą su dangaus pusiaujo plokštuma. Svarbu nepainioti ekliptikos su dangaus pusiauju (ekvatoriumi). Dangaus pusiaujas yra tiesiog Žemės pusiaujo projekcija į dangaus sferą. Ekliptika su dangaus ekvatoriumi susikerta dviejose vietose: pavasario lygiadienio ir rudens lygiadienio taškuose.
- **Matematinis horizontas** (plokštuma ESWN) – plokštuma, statmena vertikalajai linijai ir einanti per sferos centrą, dalijanti dangaus sferą į šiaurinį (regimąjį Lietuvos stebėtojui) ir pietinį (neregimąjį Lietuvos stebėtojui) pusrytulius.
- **Zenitas (Z)** – taškas dangaus sferoje, esantis tiesiai virš stebėtojo galvos.
- **Nadyras (Z')** – priešingas zenitui taškas, esantis po stebėtoju.
- **Dangaus dienovidinis** – didysis apskritimas, einantis per dangaus polius, zenitą ir nadyrą.

Taip pat svarbios linijos yra aukštis (kampus tarp šviesulio ir horizonto), azimutas (matematinio horizonto lanko kampus nuo šiaurės taško) ir kulminacijos taškai (kur šviesulys kerta dangaus dienovidinį). Šios taškai ir linijos padeda nusakyti regimąją šviesulių padėtį dangaus sferoje.

Dangaus poliai, ašis ir dangaus pusiaujas.

Dangaus ašis yra tiesė, ties kuria vyksta Žemės sukimosi judėjimas. Ji pratęsta begalybėn dangaus sferoje, kertasi su ja dangaus poliais. Dangaus poliai yra du įsivaizduojami taškai dangaus sferoje, kur Žemės sukimosi ašis kerta dangaus sferą. Šie taškai yra šiaurinis dangaus polius ir pietinis dangaus polius. Dangaus poliai yra nutolę 90° kampiniu atstumu nuo dangaus pusiaujo ir tai yra nejudantys taškai, aplink kuriuos atrodo, kad visos žvaigždės danguje sukasi. Poliarinės žvaigždės — tai žvaigždės, kurios yra arti dangaus polių, ypač šiauriniu dangaus poliumi (pvz., Šiaurinė žvaigždė). Jos yra svarbios, nes beveik nekinta jų padėtis danguje ir padeda orientuotis bei nustatyti tikrąjį šiaurę nakties metu. Pavyzdžiu, Šiaurinė žvaigždė yra naudojama kaip patikimas šiaurės krypties orientyras Šiaurės pusrutulyje. Pietų pusrutulyje naudojami žvaigždžių grupių, kaip Pietų Kryžius, orientyrai, norint surasti pietų dangaus polių.

Jeigu iš Šiaurės pusrutulyje iš Šiaurinės dangaus polių yra nukreipiamas fiksuotas fotoaparatas ir paliekamas su kelių valandų išlaikymu (ekspozicija), fotografijoje tamšaus dangaus fone bus matomi koncentriniai žvaigždžių pėdsakai (pav.). Linijiniai tų lankų ilgiai skirtinė, bet kampiniai jų dydžiai vienodi. Jų centre yra sukimosi centras – šiaurinis dangaus polius.



3 pav. Poliarinės dangaus sritys ilgo išlikymo fotografija.

Autorius: TedQuackenbush, CC BY-SA 3.0,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=20831312>

Dangaus pusiaujas yra didysis apskritimas įsivaizduojamoje dangaus sferoje, kuris atitinka Žemės pusiaują. Tai reiškia, kad tai yra Žemės pusiaujo plokštumos projekcija į begalinę dangaus

sferą. Dėl Žemės sukimosi ašies posvyrio ($\sim 23,5^\circ$) dangaus pusiaujas yra pasviręs maždaug $23,5^\circ$ kampu į ekliptikos plokštumą.

Stebėtojui, esančiam Žemės pusiaujuje, dangaus pusiaujas atrodo kaip didysis apskritimas, einantis per zenitą (dangaus taškas tiesiai virš galvos), nadyrą (dangaus taškas tiesiai žemėje), rytų ir vakarų taškus, ir yra statmenas horizontui.

Jeigu stebėtojas juda į šiaurę arba pietus, dangaus pusiaujas atitinkamai pasislenka link horizonto. Platuma (φ) yra lygi šiaurinio dangaus poliaus (Šiaurinės žvaigždės) aukščiui virš horizonto kampu. Tai reiškia, kad jei Šiaurinė žvaigždė yra 50° virš horizonto, reiškia, kad stebėtojo platumą yra 50° šiaurės platumos. Šis metodas veikia tik Šiaurės pusrutulyje. Esant ties Šiaurės ašigaliu (90° platumą), Šiaurinė žvaigždė būtų tiesiai virš galvos (zenite). Esant ties pusiauju (0° platumą), ji matoma ties horizontu.

Dangaus pusiaujas dalija dangaus sferą į šiaurinę ir pietinę dalis (hemisferas), ir nuo jo matuojama dangaus šviesulių koordinatė – deklinacija.

Taigi, dangaus pusiaujas yra savotiška Žemės pusiaujo tėsinį projekciją į dangų, kuris naudojamas astronomijoje kaip koordinatės pagrindas.

1.2. Dangaus dienovidinis ir vidurdienio linija.

Dangaus dienovidinis (meridianas) yra linija, kurią sudaro plokštuma, einanti per vertikalią liniją ir dangaus ašį. Kai ši plokštuma susikerta su dangaus sfera, ji sudaro dangaus dienovidinio liniją. Vertikali plokštuma, einanti per Šiaurinę žvaigždę ir per stebėtoją, bus apytikrė dienovidinio (meridiano) plokštuma.

Vidurdienio linija yra linija, kuria susikerta dienovidinio ir horizonto plokštumos. Tai yra horizontali linija.

Bet kurioje Žemės vietoje dangaus dienovidinio plokštuma sutampa su tos vienos geografinio dienovidinio plokštuma.

Horizontas susikerta su dangaus dienovidiniu šiaurės (**N**) ir pietų (**S**) taškuose, o su dangaus pusiauju – rytų (**E**) ir vakarų (**W**) taškuose. Jei atsistosime veidu į dangaus polių (iš Šiaurinę žvaigždę), tai tiesiai po juo horizonte turėsime šiaurės tašką, užnugaryje – pietų tašką, iš dešinės – rytų tašką, iš kairės – vakarų tašką. Tai atsimindami, visada galėsime orientuotis vietovėje.

Virš horizonto matyti lygiai pusė dangaus sferos ir pusė dangaus pusiaujo, taip pat ir tai, kad taškuose **E** ir **W** (esančiuose 90° atstume nuo taškų **N** ir **S**) ir horizontas, ir pusiaujas dalijasi pusiau.

Linija **SN** yra vidurdienio linija; ji taip vadinama todėl, kad vidurdienį daiktų šešeliai krinta kaip tik šia kryptimi. Lankas **NPZAS** – dangaus dienovidinis. Kampas **PCN** tarp dangaus ašies ir horizonto plokštumos priklauso nuo stebėtojo vienos Žemės rutulyje.

1.3. Ekliptika

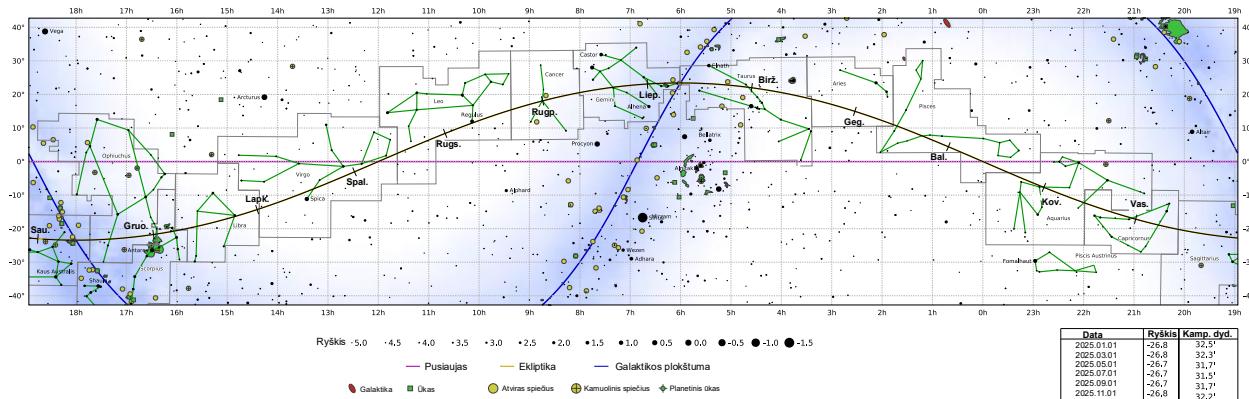
Ekliptika (graik. ἔκλιψις – užtemimas) – didysis apskritimas dangaus sferoje, kuriuo vyksta regimasis metinis Saulės centro judėjimas. Ekliptikos plokštuma yra plokštuma, kurioje guli minėtas apskritimas.

Kadangi jis atspindi Žemės skriejimą aplink Saulę, ekliptika yra Žemės orbitos plokštumos ir dangaus sferos sankirta. Ekliptikos plokštuma nesutampa su dangaus pusiaujo plokštuma ir sudaro $e = 23^{\circ}27'$ kampą. Jis nėra pastovus ir, laikui bėgant, labai lėtai kinta. Ekliptikos ir dangaus pusiaujo susikirtimo taškai yra vadinami lygiadieniu taškais.

Visos Saulės sistemos planetos skrieja beveik vienoje plokštumoje, dėl to dangaus sferoje visos jos stebimos ties ekliptika.

Ekliptikos pavadinimas kilęs iš to, kad Saulės ir Mėnulio užtemimai vyksta tik tada, kai Mėnulio orbita kerta ekliptiką.

12 žvaigždynų, kuriais juda Saulė yra vadinami Zodiako žvaigždynais, o ta juosta vadinama Zodiaku. Iš tiesų Saulė keliauja dar ir per 13-ąjį žvaigždyną – Gyvatnešio, išsidėsčiusio tarp Skorpiono ir Šaulio – tačiau istoriškai nejeinančio į Zodiaką.



4 pav. Ekliptika. Autorius: GB, PD

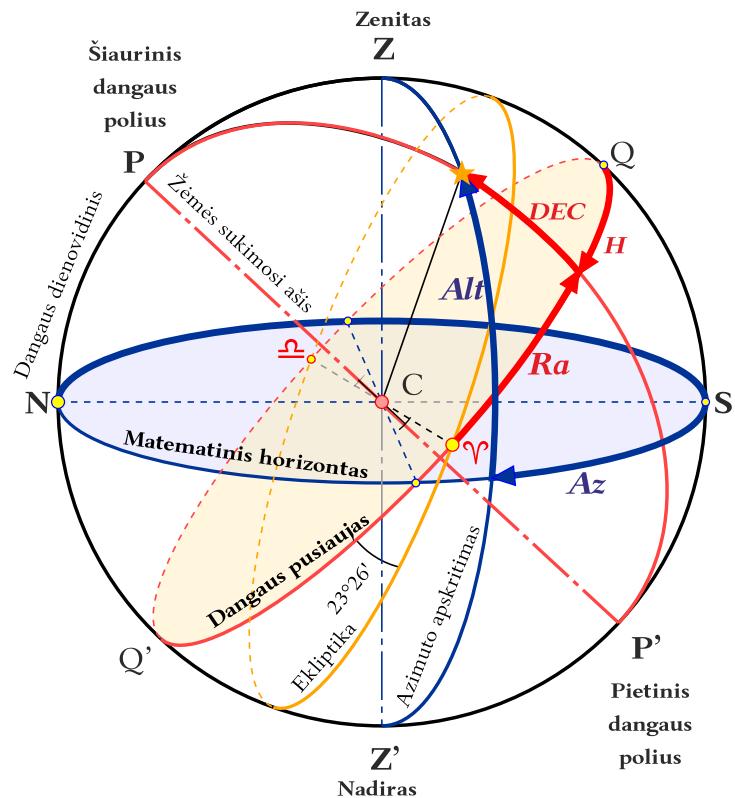
2. Astronominės koordinačių sistemos

Astronomijoje naudojamos kelios pagrindinės koordinačių sistemos, kuriomis nustatoma dangaus kūnų padėtis dangaus sferoje. Šios sistemos skiriasi pagal atskaitos plokštumą ar tašką, nuo kurio matuojami kampai. Pagrindinės astronominės koordinačių sistemos yra horizontinė, pusiaujinė, ekliptinė ir galaktinė.

1 lentelė. Pagrindinės astronominės koordinačių sistemos

Sistema	Pagrindinė plokštuma / taškas	Koordinatės	Priklausomybė nuo stebėtojo	Pagrindinis panaudojimas
Horizontinė	Vietinis horizontas	Aukštis, azimutas	Priklauso	Momentinė padėtis dangaus žiūréjimo taške
Pusiaujinė	Dangaus pusiaujo plokštuma	Rektascensija, deklinacija	Nepriklauso	Ilgalaikiai stebėjimai, žvaigždžių katalogai
Ekliptinė	Žemės orbitos (ekliptikos plokštuma)	Ekliptinė ilguma, ekliptinė platuma	Nepriklauso	Saulės sistemos kūnų judėjimas
Galaktinė	Paukščių Tako galaktikos plokštuma	Galaktinė ilguma, platuma	Nepriklauso	Galaktikos struktūros tyrimai

Horizontinė ir pusiaujinė koordinačių sistemos yra dvi pagrindinės praktinėje astronomijoje naudojamos sistemos, skirtos nustatyti dangaus kūnų padėtį.



5. pav. Horizontinė ir pusiaujinė koordinačių sistemos. Autorius: GB, PD

2.1. Horizontinė (Alt-Az) koordinacių sistema

Naudojama tiesioginiams dangaus stebėjimui, kai reikia nustatyti, kur danguje šiuo metu yra objektas. Pagrindas yra stebėtojo matematinis horizontas, kuris dalina dangaus sferą į du pusrutulius: viršutinį (matomą) ir apatinį. Ši sistema yra priklausoma nuo stebėtojo vietas ir laiko, *todėl objektų koordinatės keičiasi per parą* ir priklauso nuo stebėjimo taško Žemėje. **Koordinatės:**

Aukštis (Alt) – kampus nuo horizonto iki objekto, gali būti nuo -90° (nadiras) iki $+90^{\circ}$ (zenitas). Kai objekto aukštis yra 0° , jis yra horizonte. Jei tuo metu jo aukštis didėja, jis kyla, bet jei jo aukštis mažėja, jis leidžiasi.

Azimutas (Az) – kampus horizontaliame apskritime, dažniausiai nuo šiaurės krypties taško, pagal laikrodžio rodyklę iki objekto padėties taško nuo 0° iki 360° . Pagrindinės pasaulio kryptys horizonte turi konkrečias azimuto vertes, kurios yra naudingos orientacijai: Šiaurė – 0° , Rytai – 90° , Pietūs – 180° , Vakarai – 270° . Išimtys yra, pavyzdžiui, ESO FITS failo formato standarte, kai azimutas matuojamas iš pietų ir didėja į vakarus, arba Sloan Digital Sky Survey FITS standarte, kai jis matuojamas iš pietų ir didėja į rytus.

Kadangi visi dangaus sferos objektai yra juda danguje paros bėgyje, o judėjimas visada yra iš rytų į vakarus, šiaurės pusrutulyje esantis stebėtojas pagal dangaus objekto azimutą gali nustatyti, ar dangaus kūnas teka, ar leidžiasi. Jeigu dangaus kūno azimutas stebėjimo momentu yra nuo 0° iki 180° (šiaurė–rytai–pietūs), objektas teka, jeigu azimutas yra nuo 180° iki 360° (pietūs –vakarai–šiaurė), objektas leidžiasi.

2.2. Pusiaujinė (DEC-Ra) koordinacių sistema.

Kadangi priklauso tik nuo Žemės ašies orientacijos danguje, *koordinatės nesikeičia priklausomai nuo stebėtojo vietas ar laiko*, todėl labai tinkama ilgalaikiams žvaigždžių ir dangaus kūnų pozicijų aprašymams. Pusiaujinė sistema yra dažniausiai naudojama astronominėje kartografijoje ir žvaigždžių kataloguose.

Pagrindas yra dangaus pusiaujo plokštuma, kuri yra statmena Žemės sukimosi ašiai, todėl ši sistema nepriklauso nuo stebėtojo vietas. **Koordinatės:**

Deklinacija (δ arba DEC) – kampus nuo dangaus pusiaujo iki objekto, matuojamas nuo -90° iki $+90^{\circ}$, kur teigama į šiaurės pusę, neigama – į pietų. Pavyzdžiui, šiaurinio dangaus ašigalio deklinacija yra $+90^{\circ}$.

Rektascensija (α arba Ra) arba valandinis kampus – matuojamas išilgai dangaus pusiaujo nuo pavasario lygiadienio taško Υ , į rytus, iki objekto padėties, dažnai išreiškiamas laiko vienetais nuo 0 iki 24 valandų.

2.3. Pusiaujinė (DEC-H) koordinačių sistema.

Skiriasi nuo DEC-Ra pusiaujinės koordinačių sistemos, nes vietoje rektascensijos naudoja valandinį kampą. Šioje sistemoje šviesulių deklinacija paros bėgyje išlieka pastovi, o valandinis kampus paros bėgyje tolygiai kinta. Pirmojoje pusiaujinėje koordinačių sistemoje šviesulio koordinatės yra:

Deklinacija (δ arba DEC) – lankas išilgai deklinacijos apskritimo tarp šviesulio ir dangaus pusiaujo, išreikštas kampiniais vienetais. Deklinacija šiaurinėje dangaus dalyje matuojama nuo 0° iki 90° , pietinėje nuo 0° iki -90° .

Valandinis kampus (H) – dangaus pusiaujo lankas matuojamas nuo pietinio taško iki deklinacijų apskritimo, einančio per šviesulį (vakarų kryptimi), išreiškiamas laiko vienetais nuo 0h iki 24h. Skirtingai nuo rektasencijos, valandinis kampus visada didėja sukantis Žemei.

Valandinis kampus gali būti laikomas laiko matavimo priemone, kuri yra pagrīsta dangaus objekto kulminacija. Kulminacijos momentu žvaigždė stebėtojo dienovidiniame turi nulinę valandos kampą (0h). Po vienos siderinės valandos (maždaug 0,9973 saulės valandos) dėl Žemės sukimosi žvaigždė nuslinks į vakarus nuo dienovidinio, o jos valandos kampus bus 1 val.

3. Stebėtojo geografinės koordinatės

Geografinės koordinatės yra koordinačių sistema, naudojama nustatyti konkrečios vietas padėtį Žemės paviršiuje. Bet kurio nors taško padėtis Žemės rutulyje gali būti visiškai tiksliai apibrėžta dviem geografinėmis koordinatėmis – **geografine platuma (žymima raide ϕ) ir geografine ilguma (žymima raide λ)**.

Tam tikslui per Žemės ašigalius brėžiami didieji apskritimai, vadinami dienovidiniais. Vienas jų, einąs per Grinvičo observatoriją (netoli Londono), laikomas pradiniu. Be to, Žemėje, lygiagrečiai su pusiauju, brėžiami mažesni apskritimai, vadinami geografinėmis lygiagretėmis.

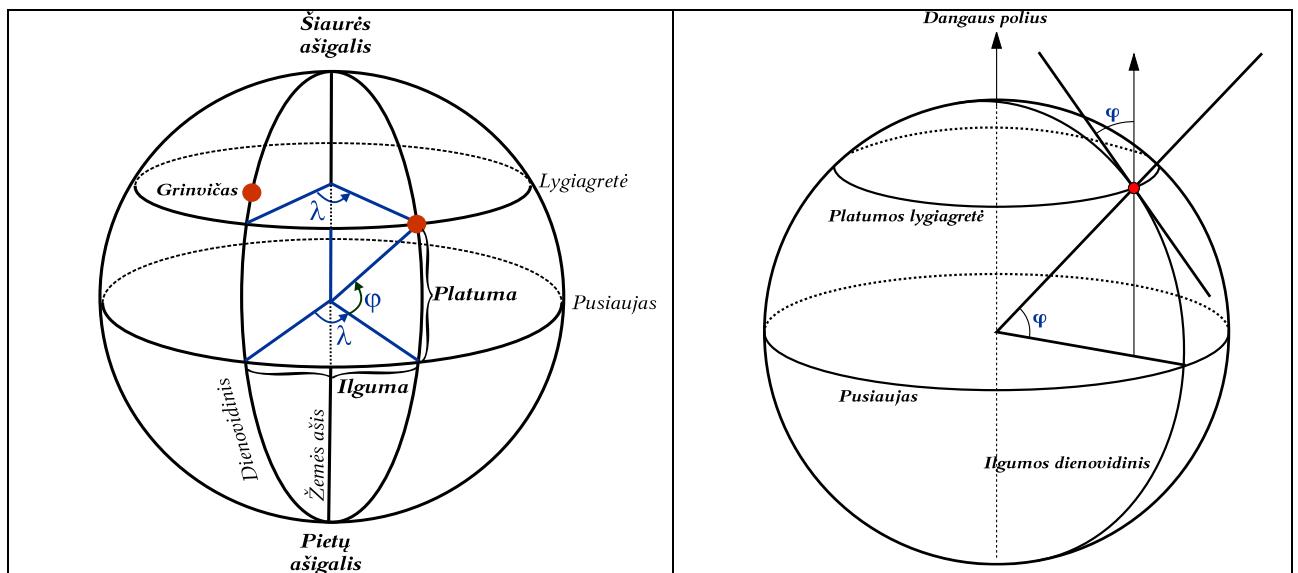
Geografinė platuma yra kampus tarp Žemės vietas ir pusiaujo, matuojama laipsniais nuo 0° (pusiaujo) iki 90° šiaurės arba pietų ašigalio. Geografinė ilguma yra kampus tarp pradinio (Grinvičo) dienovidinio ir vietas dienovidinio, matuojama nuo 0° iki 180° į rytus ar vakarus. Platuma ϕ gaunama matuojant dangaus ašigalio pakilimo kampinį aukštį. Dangaus ašigalį galima įsivaizduoti kaip tašką, esantį begaliniu atstumu Žemės sukimosi ašies kryptimi.

Platumos skaičiavimas. Geografinė platuma nusako vietas atstumą nuo pusiaujo (ekvatoriaus) į šiaurę arba pietus. Ji matuojama laipsniais nuo 0° (pusiaujo) iki 90° šiaurės arba pietų ašigalio. Teigiamą platuma reiškia šiaurinę platumą, o neigiamą – pietinę platumą. Pavyzdžiui, Vilniaus platumą yra $+54^\circ 53'$, o Melburno (Australija) platumą yra $-37^\circ 50'$. Kampus matuojamas tarp Žemės centro ir taško, išmatuoto prieš pusiaujo plokštumą.

Ilgumos skaičiavimas. Geografinė ilguma nusako vietos atstumą nuo pradinio dienovidinio (Grinvičo linijos). Ji matuojama laipsniais nuo 0° iki 180° į rytus ar vakarus. Ilguma į rytus žymima teigiamu ženklu, į vakarus – neigiamu. Tai kampus tarp pradinio dienovidinio ir vietos dienovidinio linijos.

Abi koordinatės svarbios nustatant tikslią vietą Žemės paviršiuje, matuojamos kampais nuo standartinių atskaitos linijų ir gali būti išreiškiamos laipsniais, minutėmis bei sekundėmis

Ilguma gali būti išreikšta laiku, kuris reikalingas Žemei pasiskuti aplink savo aši atitinkamu lanku. Ilgumą galima skaityti ir į vakarus, ir į rytus; atitinkamai ji ir vadinama – vakarų ilguma, rytų ilguma. Kadangi pilną apsisukimą (360°) Žemė padaro per 24 valandas, tai kiekvieni 15° ilgumos sudaro 1 valandą ilgumos ir, tuo būdu, $1^\circ=4$ min., 1 min. $=15'$ ir 1 sek. $=15''$.



6 pav. Geografinės koordinatės: platuma ir ilguma. Autorius: GB, PD

4. Laiko matavimas astronomijoje

Laiko samprata. Kaip jau minėta, praktinėje astronomijoje yra labai svarbu apibrėžti stebėtojo vietą ir stebėjimo laiką, bei stebimo astronominio objekto ar reiškinio vietą dangaus skliaute atitinkamu laiku. Žemiškų ir dangiškų koordinačių, sutartinių dangaus sferos taškų ir linijų naudojimas buvo aptartas ankstesniame skyriuje. Kitas, svarbus astronominio stebėjimo dėmuo yra laikas.

Visata yra nuolatinis pokytis, kurį apibrėžia procesai ir daugybė vietinių laikrodžių, o ne vienas bendras laikas. Žmonių suvokiamą laiko ir erdvės samprata, priklausanti nuo stebėtojo vietos ir judėjimo, yra esminis Alberto Einšteino suformuluotų reliatyvumo teorijų aspektas, ypač specialiosios reliatyvumo teorijos esmė.

Laiko dilatacija. Laikas (termodynaminiai ir biologiniai procesai) eina lėčiau greitai judančioje sistemoje, lyginant su lėtai judančia sistema. Miuonas, μ - ra nestabilios elementariosios dalelės, kurios susidaro Žemės atmosferos viršutiniuose sluoksniuose veikiamos kosminių spinduliu. Jų gyvavimo trukmė (pusamžis) yra labai trumpa. Mokslininkai patvirtino laiko dilataciją eksperimentiškai, pagreitindami miuonus, dalelių greitintuve. Šios dalelės, kurios „laisvėje“ suvera per maždaug šešias minutes, gyvena ilgiau, kai yra pagreitinamos. Jų suirimo laikas pailgėja tiksliai tiek, kiek prognozavo Einšteinas.

Laikas (termodynaminiai ir biologiniai procesai) eina lėčiau stipresniame gravitaciniame lauke. Stebėtojui, esančiam netoli didelės masės, laikas eina lėčiau nei stebėtojui, esančiam toliau – laikas Žemės paviršiuje eina šiek tiek lėčiau nei orbitoje esantiems GPS palydovams, o tai turi būti koreguojama, kad GPS sistema veiktų tiksliai. Palydovo atominis laikrodis sulėtėja -7,2 mikrosekundės dėl jo didelio greičio, bet pagreitėja +45,8 mikrosekundėmis dėl silpnesnio gravitacijos lauko. Bendrai palydovo atominis laikrodis greitėja apie +38,6 mikrosekundėmis per dieną. Tai atkoreguojama techninėmis priemonėmis.

Praktinėje astronomijoje ir kasdieniniame gyvenime yra būtina supaprastinti laiko sampratą ir nustatyti tokį laiko matavimą, kuris būtų praktiškas Žemės gyventojui, tiek atliekant astronominius stebėjimus, tiek vykdant praktinę veiklą Žemėje. Tam yra naudojami keli laiko vienetai bei kelios laiko matavimo sistemos.

4.1. Laiko matavimas

Para: pagrindinis laiko matavimo vienetas, susijęs su Žemės sukimusi apie savo aši. Para gali būti *saulinė* (laikas tarp dviejų Saulės kulminacijų tame pačiame dienovidinyje) arba *žvaigždinė* (laikas tarp dviejų pavasario lygiadienio taško kulminacijų tame pačiame dienovidinyje). Žvaigždinė para yra šiek tiek trumpesnė už saulinę dėl Žemės ašies precesijos.

Metai: laiko tarpas, per kurį Saulė sugrįžta į tą patį dangaus sferos tašką. Yra *tropiniai metai* (metai, susiję su metų laikų kaita, apie 365,2422 dienos) ir *žvaigždiniai metai* (remiasi žvaigždžių padėtimi, apie 365,2564 dienos).

Laikas taip pat dalijamas į *valandas, minutes ir sekundes*, o 1967 metais įvesta atominė sekundė tapo tarptautiniu laiko etalonu, nepriklausomu nuo astronominių reiškiniių.

Astronomijoje laiko matavimas istoriškai vadovavosi dangaus kūnų (Saulės, Mėnulio ar žvaigždžių) padėtimis ir judėjimu. Pavyzdžiui vertinama, kiek laiko praėjo nuo tam tikro orientyro dangaus sferoje kulminacijos stebėtojo geografinėje vietoje.

Žvaigždiniu laiku sutrumpintai vadinama laiko matavimo skalė, kurios pagrindą sudaro žvaigždinė para – tai laikas, per kurį Žemė apsisuka 360 laipsnių kampu savo ašimi Saulės atžvilgiu. Jos ilgis yra apie 23 valandos, 56 minutės ir 4,091 sekundės. Žvaigždinė para yra maždaug 4 minutėmis trumpesnė už Saulės parą, kuri yra 24 valandos.

Saulės paros matuojamos pagal Saulės padėti danguje, o žvaigždinės paros – pagal tolimumą žvaigždžių padėti. Praktikoje žvaigždinė para skaičiuojama matuojant konkretaus šviesulio, kurio rektascensija (dangaus koordinatė) yra tiksliai žinoma, valandinį kampą. Kadangi pavasario lygiadienio taškas dangaus sferoje nėra pažymėtas, žvaigždinių laikas tiesiogiai neišmatuojamas. Taigi pagrindinis būdas apskaičiuoti žvaigždinę parą yra sekti *laiką tarp dviejų tos pačios žvaigždės viršutinės kulminacijos (kai ji yra aukščiausiaiame taške danguje) tam pačiam geografiniam dienovidiniui*. Tai darome stebint žvaigždės judėjimą nakties danguje ir fiksujant momentą, kai žvaigždė kerta dangaus dienovidį (meridianą) – įsivažiuojamą lanką, einančią per dangų nuo pietų iki šiaurės taško horizonte.

Tikrasis saulinis laikas. Laiko tarpas tarp dviejų gretimų vienavardžių Saulės skritulio centro kulminacijų tame pačiame geografiniame dienovidinyje vadinamas *tikrąja sauline para*. Jos pradžia laikomas Saulės skritulio centro apatinės kulminacijos momentas (*tikrasis vidurnaktis*).

Ilgiausia tikroji saulinė para būna gruodžio 23 d. (Saulė yra arti žiemos saulėgrįžos taško ir, be to, greitai slenka), o trumpiausia – rugsėjo 16 d.; skirtumas tarp jų lygus 51 sekundei.

Dėl netolygaus Saulės skritulio centro valandinio kampo kitimo (tikrosios saulinės paros nepastovumo) tikrasis saulinis laikas netinka praktinei veiklai. Praktiniame gyvenime reikia susieto su Saule pastovaus laiko matavimo vieneto.

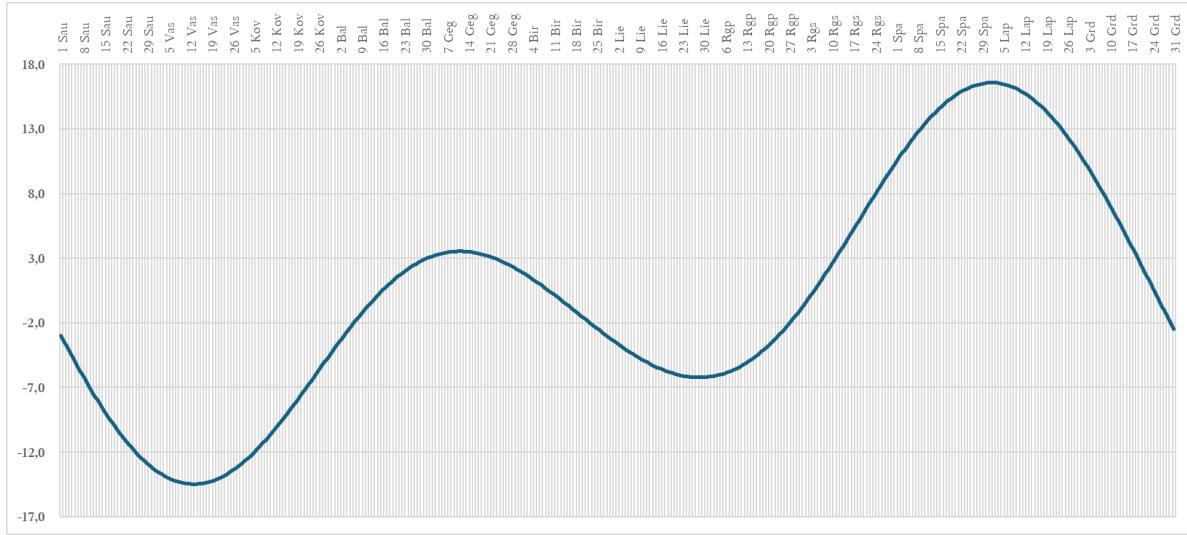
Vidutinis saulinis laikas. Vidutinis saulinis laikas yra laiko matavimo sistema, kurios pagrindas yra įsivaizduojamas taškas danguje – *vidutinė Saulė*, kuri juda tolygiai palei dangaus pusiaujo plokštumą. Jis atspindi vidutinį paros laiką, *apskaičiuotą kaip tikrujų Saulės parą metinį vidurkį*.

Vidutinis saulinis laikas yra pagrindas pasaulinio laiko skalių sudarymui ir dalijamas į valandas, minutes bei sekundes. Vidutinis saulinis laikas skiriasi nuo tikrojo saulinio laiko, kuris kinta dėl Žemės orbitos elipsės formos ir ekliptikos posvyrio, todėl tikroji saulinė para nėra pastovi – ilgiausia būna gruodžio 23 d., trumpiausia – rugsėjo 16 d.

Vidutinis saulinis laikas tarptautiniu mastu susiderina su koordinuotu pasauliniu laiku (UTC) ir sudaro kalendorinių dienų skaičiavimo pagrindą.

Laiko lygtis. Vidutinė pusiaujinė Saulė ir tikroji Saulė juda netoli viena kitos (valandiniai kampai skiriasi nedaug), tačiau jų tarpusavio padėtis nuolat kinta: tikroji Saulė tai truputį aplenkia vidutinę pusiaujinę Saulę, tai truputį atsilieka nuo jos. **Laiko lygtimi** yra vadinamas to paties momento vidutinio ir tikrojo saulinį laikų skirtumas:

Apie balandžio 15 d., birželio 14 d., rugsėjo 1 d. ir gruodžio 25 d. laiko lygtis būna lygi nuliui. Didžiausių teigiamą reikšmę (+14^m,3) ji turi apie vasario 12 d., o didžiausių neigiamą (-16^m,4) – apie lapkričio 3 d.



7 pav. Laiko lygtis. Vertikali ašis – vidutinio ir tikrojo saulinių laikų skirtumas minutėmis, horizontali ašis – data.

Žemės sukimosi netolygumas. Atominis laikas. Žemės sukimosi kampinis greitis kinta. Saulės ir Mėnulio trauka sukelia Žemę vandenynų potvynių ir atoslūgių bangas. Dėl to atsiranda papildomos jėgos, kurios nuolat lėtina Žemės sukimą apie savo ašį. Dėl šio efekto para per šimtą metų pailgėja maždaug $0^s,0017$. Taip pat reguliarai kasmet kartojausi Žemės sukimosi greičio kitimai. Greičiausiai Žemė suka rugpjūtį, lėčiausiai – kovo mėnesį, paros trukmės svyravimo amplitudė yra apie $0^s,001$. Periodinių kitimų priežastis – sezoniškės vandens ir oro masių cirkuliacija. Ta pati priežastis dar sukelia pusės metų periodo tik mažesnės amplitudės svyravimus. Potvynių ir atoslūgių reiškiniai Žemės paviršiuje lydi mėnesio, pusės mėnesio, paros ir pusės paros periodų Žemės sukimosi greičio kitimai.

Taigi ir vidutinė saulinė para nėra pastovus dydis ir negali būti laiko etalonas, kai reikia laiką matuoti dideliu tikslumu. XX amžiaus šeštajame dešimtmetyje buvo sukurti stabilūs laiko ir dažnio etalonai, pagrįsti atomų savybėmis, tiksliau – atomų virpesių dažniu. Atsirado iš esmės nauja nuo astronominių stebėjimų visiškai nepriklausoma laiko matavimo skale – **atominis laikas**. 1967 m. buvo įvestas atominio laiko vienetas – atominė sekundė. Dažniausiai naudojamas cezio-133 atomas. Viena sekundė apibrėžiama kaip 9 192 631 770 cezio atomo virpesių. Atomų virpesiai yra labai pastovūs ir nepriklauso nuo išorinių veiksnių (temperatūros, slėgio ir pan.). Atominė sekundė tapo laiko vienetu ir Tarptautinėje (SI) vienetų sistemoje. Tarptautinis laiko biuras lygina geriausius įvairių šalių laiko ir dažnio etalonus ir formuoja Tarptautinio atominio laiko TAI (*International Atomic Time*) skale.

4.2. Laiko sistemos

Vietinis laikas. Vietinis laikas yra laikas, kuris galioja tam tikrame Žemės dienovidinio taške, t. y. laikas, susijęs su vietiniu dangaus dienovidiniu, einančiu per stebėtojo vietą.

Skirtinguose dienovidiniuose vietinis laikas skiriasi, nes kai viename dienovidinyje yra vidurnaktis, kituose jis gali būti jau praėjęs arba dar neatėjęs. Vietinių laikų skirtumas tarp dviejų taškų lygiavertis jų geografinių ilgumų skirtumui išreikštam laiko vienetais. Astronominiu būdu (t. y. konkrečioje vietoje stebint dangaus kūnų judėjimą) visada nustatomas vietinis laikas. Saulės laikrodis rodo vietinį Saulės laiką.



(1)



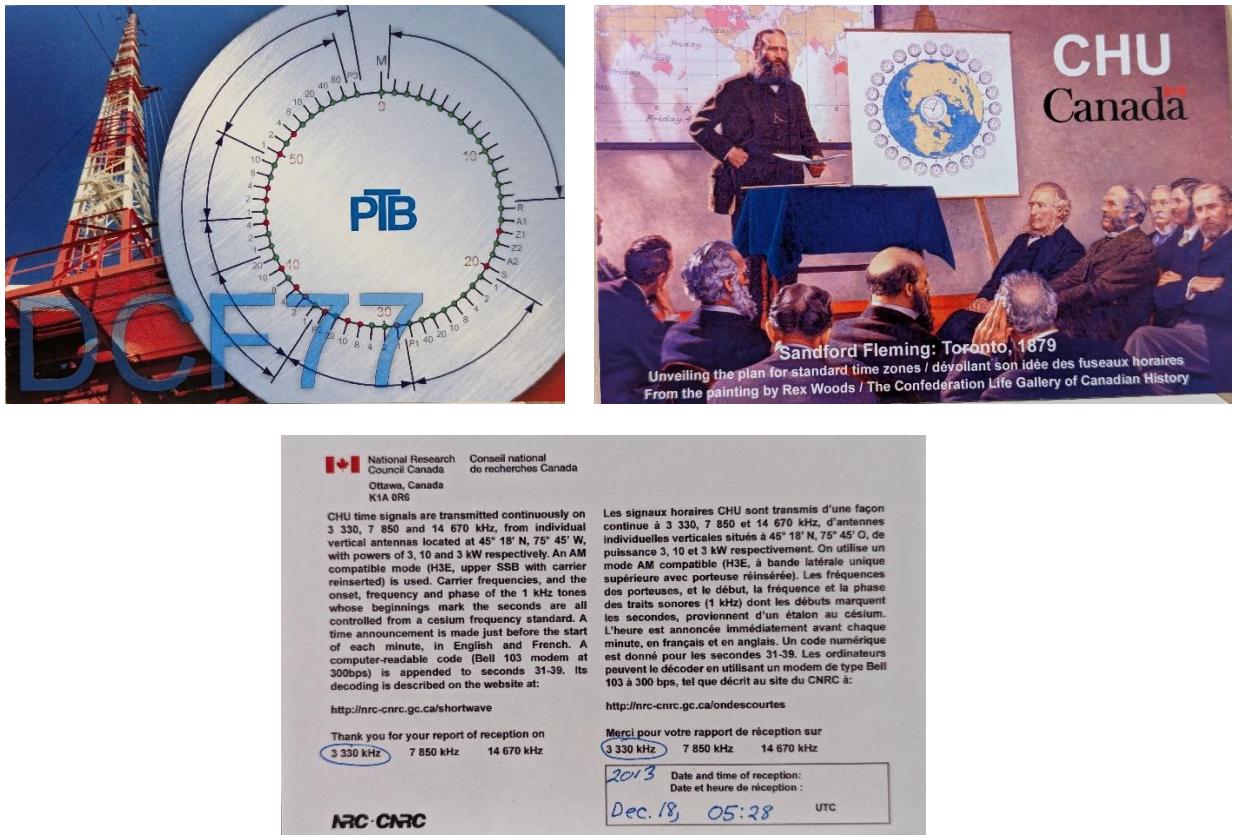
(2)

8 pav. Saulės laikrodžiai vietiniam laikui matuoti. 1) XVII a. Saulės laikrodis Vilniaus universiteto Didžiojo kiemo sienoje; 2) 2012 m. įrengtas Saulės laikrodis Valdovų rūmų sienoje (moto: „Visada Saulė šviečia Lietuvos širdyje“). Autorius: GB, PD

Pasaulinis laikas. Pasaulinis laikas (UT – Universal Time) yra vidutinis saulės laikas, skaičiuojamas pagal Grinvičo (nulinio) dienovidinį. Naudojamas daugelyje astronominių reiškinių ir kalendorių kaip visos Žemės standartinis laikas. Pasaulinis laikas atspindi Žemės sukimosi netolygumus ir yra netolygus, todėl negali sutapti su tolygiu Tarptautiniu atominiu laiku (TAI). TAI ir UT skalės sutapo 1958 m. sausio 1 d. 00 h00 m00 s.

Pasaulinis koordinuotas laikas (UTC). UTC yra tarptautinis laiko standartas, kuris labai artimas TAI ir suderintas su UT pagal atitinkamus pataisymus. UTC yra plačiai naudojamas, kaip pasaulinis laiko etalonas, palaikantis laiko koordinaciją visame pasaulyje. UTC standartu paremti tikslaus laiko signalai, kuriuos per radiją skelbia specializuotos laboratorijos – laiko tarnybos. Didesnio tikslumo (iki 10-4s) laiko signalus, skirtus mokslo tikslams, radijo bangomis

sinchronizuojamiems laikrodžiams ištisą parą siunčia specialios pasaulio radijo stotys. Šiuose signaluose dar yra užkoduojama informacija apie numatomą tuo momentu skirtumą tarp pasaulinio laiko UT ir pasaulinio koordinuotojo laiko UTC.



9 pav. Vokietijos ir Kanados laiko sinchronizavimo signalų radio stočių DCF77 ir CHU priėmimo patvirtinimo kortelės (QSL kortelė); Asmeninė kolekcija

Artimas UTC yra GPS laikas, kuris yra specialus laiko matavimo standartas, naudojamas Globalinėje pozicionavimo sistemoje (GPS). Jis pagrįstas atominiais laikrodžiais GPS palydovuose ir yra itin tikslus bei stabilus, bet nuo koordinuotojo pasaulinio laiko skiriasi keliomis sekundėmis (skirtumas yra susijęs su keliamųjų sekundžių įvedimu ir yra apie 18 sek. 2025 m.). GPS signaluose pateikiamas skirtumas tarp GPS laiko ir UTC, todėl GPS imtuvai gali atligli konversiją automatiškai ir gali būti naudojami UTC laiko sinchronizacijai. Pažymėtina, kad anksčiau aptarta laiko dilatacija (apie 38,6 mikro sek. per dieną) yra koreguojama realiu laiku GPS sistemoje ir neprisideda prie bendro 18 sekundžių skirtumo.

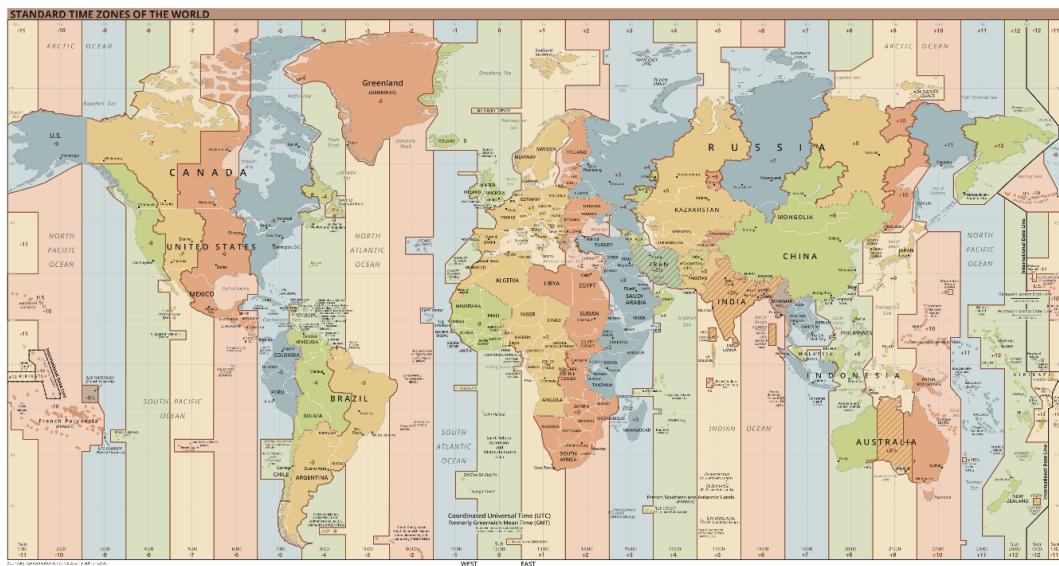
Nors kasdieninėje kalboje GMT (angl. Greenwich Mean Time) ir UTC dažnai vartojami kaip sinonimai, tik UTC yra tarptautinis laiko standartas, o GMT yra juostinis laikas, naudojamas Jungtinėje Karalystėje ir kai kuriose kitose šalyse. Pavadinimo kilmė susijusi su vidutiniu sauliniu laiku Grinvičo observatorijos vietovėje. Būtent todėl Grinvičo laiko zona oficialiai vadinama Grinvičo vidutiniu laiku (Greenwich Mean Time – GMT), kur žodis „Mean“ reiškia vidurkį.

Juostinis laikas. Iki XIX a. pabaigos buvo naudojamas vietiniai laikai. 1884 m. Vašingtono tarptautinė konferencija pasiūlė pereiti prie juostinio laiko skaičiavimo būdo, kuris veikiai paplito po daugelį šalių. Juostinis laikas ZT (Zone Time) apsaugo nuo palyginti artimų vietovių vietinių laikų gausumo ir kartu neleidžia per daug nutolti nuo vietinio laiko.

Juostinio laiko skaičiavimo būdas pagrįstas sutartiniu Žemės rutulio paviršiaus padalijimu į 24 valandines juostas. Centriniai valandinių juostų dienovidiniai yra nutolę vienas nuo kito tiksliai 15° , arba 1h, o juostų ribos išilgai dienovidinių eina tik negyvenamose vietose (vandenynuose, jūrose, dykumose), kitur jos vedamos palei valstybių ar administracinių sričių sienas, dideles upes, kalnagūbrius. Valandinių juostų centrinių dienovidinių geografinės ilgumos atitinka sveikajį valandų skaičių, o ta juosta, kurios centru eina Grinvičo dienovidinis, laikoma pagrindine (nuline).

Priimta, jog visoje tam tikros valandinės juostos teritorijoje laikas yra vienodas ir lygus pasaulinio koordinuotojo laiko UTC ir juostinės pataisos, priklausančios nuo juostos padėties, sumai, t.y.

Juostinio laiko porūšis yra vad. Vasaros laikas. Tai laiko reguliavimas, kai vasaros sezono laikrodis sukamas viena valanda į priekį, siekiant ilgiau naudotis dienos šviesa vakarais. Vasaros laikas nėra astronominis laikas.



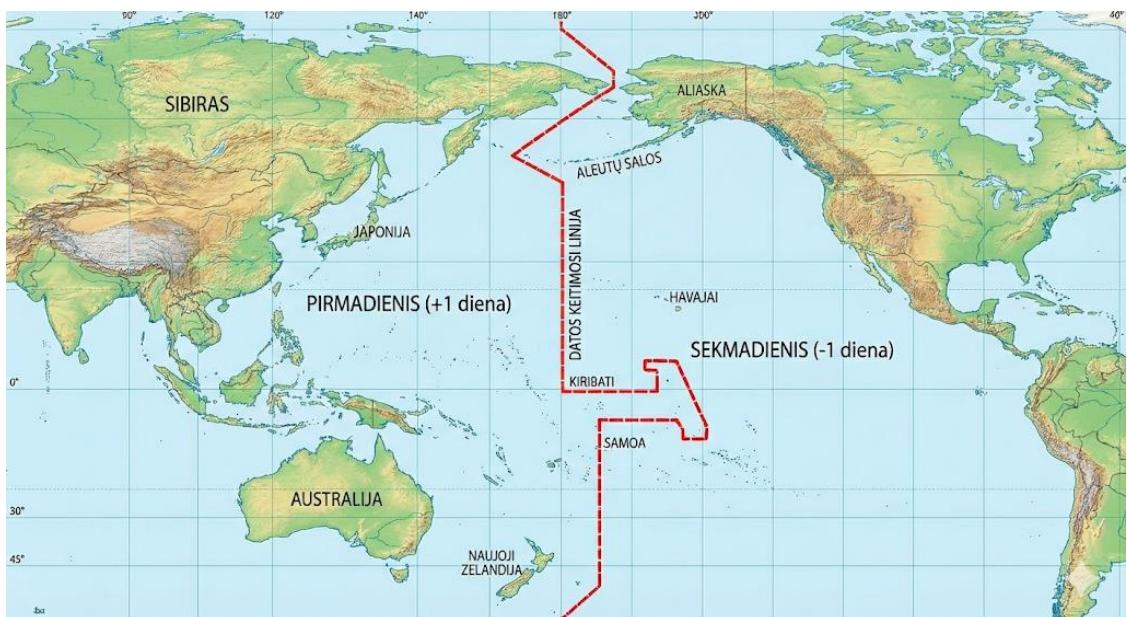
10 pav. Laiko juostos. Wikipedia, PD

Žemiškasis laikas. Žemiškasis laikas yra laikas, susietas su Žemės sukimusi apie savo aši, išreikštąs vidutinės dienos trukme arba žvaigždinio laiko skalėje. Naudojamas astronomijoje, kad būtų galima susieti laiko duomenis su Žemės pasukimu ir dangaus kūnų padėtimi.

Datos keitimosi linija. Tai įsivaizduojama linija, kur keliaujant iš vienos pusės į kitą keičiasi diena. Ji eina ištisai vandenimis maždaug 180° geografinės ilgumos dienovidiniu.

Abipus datos keitimosi linijos data skiriasi viena para: į rytus nuo jos data yra ankstesnė (senesnė) negu į vakarus. Pavyzdžiu, kai Čiučių pusiasalyje sausio 1 d., tai Aliaskoje (už Beringo sąsiaurio) dar tik gruodžio 31 d. Datos keitimosi linija padeda išvengti klaidų skaičiuojant dienas kelionėse aplink pasaulį. Jeigu pasauly apkeliaujamas rytų kryptimi (Žemės sukimosi kryptimi), tai padaromas papildomas apsisukimas apie Žemės aši ir keliautojas norėdamas prisitaikyti prie vietinio laiko, turi vis pasukti laikrodžio rodykles pirmyn. Šitaip jis aplenks laiko skaičiavime pasilikusius vietoje viena para. Apkeliauvus pasauly vakarų kryptimi, tarsi anuliuojamas vienas Žemės apsisukimas ir keliautojas, vis pavarydamas laikrodžio rodykles atgal, praras vieną parą palyginti su išvykimo vienos data. Kad taip neatsitiktų ir yra nustatyta datos keitimosi linija.

Kada laivas plaukia iš vakarų į rytus ir kerta datos keitimosi liniją, datą reikia keisti į ankstesnę (vakarykštę), o kai plaukia į vakarus – į vėlesnę (rytdienos). Praktiškai, perkirtus šią liniją, data nekeičiama iki ateinančio vidurnakčio, o po to paliekama ta pati (ta pati data tēsiasi dvi paros), jei plaukiama į rytus, ir praleidžiama viena data, jei plaukiama į vakarus (pavyzdžiu po sausio 1 d. eina sausio 3 d.).

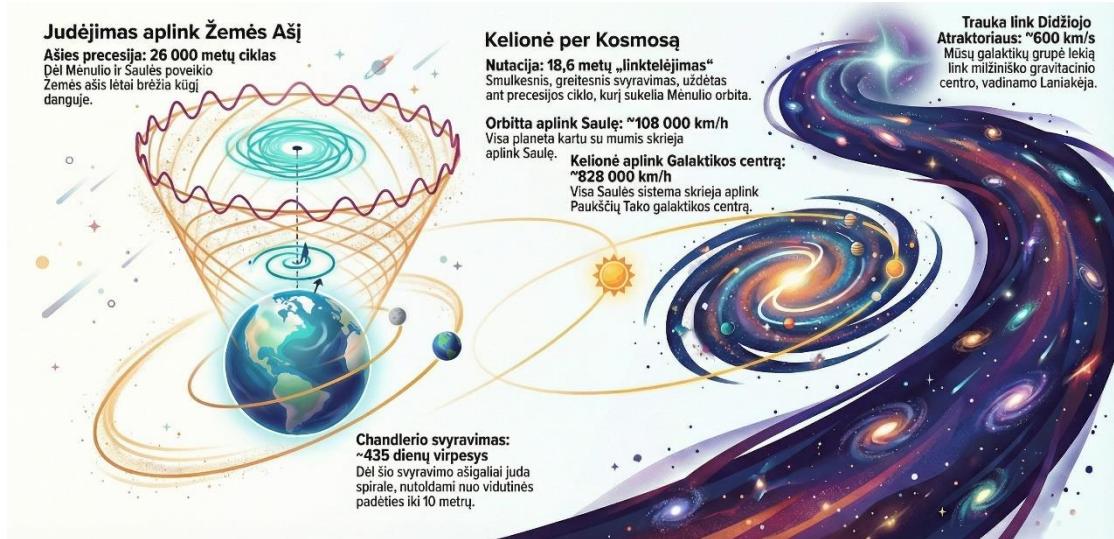


11 pav. Datos keitimosi linija. Ji eina maždaug per 180° ilgumos meridianą Ramiajame vandenyne, tačiau linija išlinksta aplink salas, kad jos liktų vienoje laiko zonoje. Autorius; GB; PD

5. Žemė ir Kosmosas: „Mobilis in mobili“

Nors jaučiamės tvirtai stovintys ant žemės, iš tiesų nuolat skriejame kosmoso platybėmis. Kalbėdami apie laiko ir vietas matavimą, aptarėme du pagrindinius Žemės judesius: paros sukimąsi aplink savo aši, kuris lemia dieną ir naktį, bei metinį skriejimą aplink Saulę, kuris lemia metų laikus.

Tačiau egzistuoja daug sudėtingesnių ir mažiau intuityvių jadesių, kurie kelia papildomus iššūkius mūsų laiko ir vietas sampratai, dangaus kūnų judėjimo dangaus skliautu sampratai.



12 pav. Žemė ir Kosmosas: „Mobilis in mobili“. Autorius: GB, PD

Dienos ir nakties trukmė keičiasi. Ilgalaikėje perspektyvoje dienos trukmė pamažu ilgėja. Dėl Mėnulio sukeliamų potvynių trinties Žemės sukimasis palaipsniui lėtėja. Pavyzdžiui, maždaug prieš 1,4 milijardo metų Žemės para truko vos 18,68 valandos. Atrodytų, tendencija aiški. Tačiau viskas kur kas sudėtingiau.

Pastaraisiais dešimtmiečiais stebimas priešingas, trumpalaikis efektas. Dėl sudėtingos sąveikos tarp planetos branduolio ir mantijos Žemė émė suktis greičiau. Šis pagreitėjimas pasiekė kulminaciją 2022 m. birželio 29 d., kai buvo užfiksuota trumpiausia para per visą stebėjimų istoriją.

Dabar ši pagreitėjimą stabdo klimato kaita. Dėl sparčiai tirpstančių ašigalių ledynų milžiniška masė vandens persiskirsto nuo ašigalių link pusiaujo. Laikantis kampinio momento tvermės dėsnio (panašiai kaip čiuožėjas, ištiesdamas rankas sulėtina sukimąsi), šis masės persiskirstymas veikia kaip stabdys ir lėtina Žemės sukimąsi. Šis poveikis yra toks reikšmingas, kad praktiškai paveikė pasaulinį laiko matavimą: poreikis pirmą kartą istorijoje pridėti „neigiamą keliamąją sekundę“ buvo atidėtas iš 2026 m. bent iki 2029 metų.

Žemės geografiniai ašigaliai „šokčioja“. Įsivaizduojame, kad geografiniai šiaurės ir pietų ašigaliai yra stabilūs taškai, tačiau iš tiesų jie nuolat juda kelių metrų diapazone.

Šis judėjimas yra vadinamas Chandlerio svyravimu (Chandler wobble). Galima sakyti, kad mūsų planeta sukdamsi nuolat šiek tiek „šokčioja“ a arba „vibruoja“. Chandlerio svyravimo periodas yra 14 mėnesių.

Žemės ašis svyruoja. Mūsų dabartinė Šiaurinė žvaigždė – Polaris – ne visada buvo ir ne visada bus kelrodė žvaigždė keliautojams. Taip yra dėl reiškinio, vadinamo ašine precesija. Kadangi Žemė dėl sukimosi yra šiek tiek paplokščia ir išgaubą ties pusiauju, Saulės ir Mėnulio gravitacinės jėgos netolygiai traukia šią išgaubą. Tai sukuria sukimimo momentą, dėl kurio Žemės ašis ima svyruti panašiai kaip besisukantis vilkelis: kai jis lėtėja, jo ašis pradedą brėžti kūgi. Žemės ašis daro tą patį, tik nepalyginamai lėčiau.

Visas šis svyravimo ciklas trunka apie 26 000 metų. Dėl precesijos nuolat keičiasi dangaus taškas, į kurį nukreipta Žemės šiaurės ašis. Tai reiškia, kad bėgant tūkstantmečiams Šiaurinės žvaigždės titulas atitenka vis kitai žvaigždei: dabar tai Šiaurinė žvaigždė (Polaris), prieš ~5000 metų (Senovės Egipto laikais) tai buvo Tūbanas (Thuban), žvaigždė Slibino žvaigždyne, Po ~12 000 metų Vega – viena ryškiausiu nakties dangaus žvaigždžių – taps naujaja Šiaurine žvaigžde.

Be to vyksta maži precesuojančios Žemės sukimosi ašies svyravimai, vadinami nutacija, kuriuos sukelia nuolat besikeičianti Mėnulio ir Saulės padėtis Žemės pusiaujo plokštumos atžvilgiu (lemia Žemės nesferišumas). Didžiausią nutaciją sukelia Mėnulio orbitos (periodas 18,61 m) plokštumos polinkio į Žemės pusiaujo plokštumą kitimas. Dėl bendro nutacijos ir precesijos poveikio dangaus ašigalis dangaus sfera juda banguota linija, kinta dangaus pusiaujo, pavasario lygiadienio taško padėtys ir kampas tarp dangaus pusiaujo ir ekliptikos plokštumų, dangaus šviesulių koordinatės ir kiti parametrai.

Skiejame link „Didžiojo atraktoriaus“. Be visų sukimusi ir svyravimų, visa mūsų Paukščių Tako galaktika, kartu su tūkstančiais kitų galaktikų, esančių Vietinė galaktikų grupėje, skrieja link milžiniškos gravitacinės anomalijos, vadinamos Didžiuoju atraktoriumi. Šis paslaptinges taškas yra už 150–250 milijonų šviesmečių, o mes lekiame jo link stulbinančiu greičiu – apie 600 kilometrų per sekundę.

Svarbu suprasti, kad Didysis atraktorius yra ne koks nors konkretus objektas ar „monstras“, pavyzdžiui, juodoji skylė, o veikiau vieta – tai Laniakėjos galaktikų superspiečiaus, milžiniškos struktūros, kuriai priklauso ir Paukščių Takas, centrinis gravitacijos taškas.

Didysis atraktorius atrastas 1986, tačiau jo sandara nėra žinoma, nes jį užstoja Galaktikos plokštumoje susitelkę dulkių ir dujų debesys. Netoli spėjamo Didžiojo atraktoriaus centro atrastas labai masyvus (apie 1015 Saulės masių) galaktikų spiečius Abell 3627 (l apie 325° , b apie 7° , atstumas nuo Saulės apie 220 mln. šm), tačiau jo masės nepakanka Didžiojo atraktoriaus traukai paaiškint. Viena hipotezių yra, kad Didysis atraktorius yra didelės masės astronominis objektas (Kentauro žvaigždyno kryptimi), kurio centro galaktinė ilguma l apie 320° , galaktinė platuma b apie 0° (astronominės koordinatės). Spėliojama, kad Didžiojo atraktoriaus masė apie 5×10^{16} Saulės masių..

Manoma, kad Didysis atraktorius yra galaktikų superspiečius, kuriam, be Abell 3627, gali priklausyti dar keletas kitų, kol kas neatrastų galaktikų spiečių arba tolimų galaktikų superspiečių visuma.

Skaičiavimai rodo, kad mes niekada nepasieksime Didžiojo atraktoriaus. Priežastis – tamsioji energija, kuri greitina Visatos plėtimąsi. Kadangi Laniakėjos galaktikų superspiečius yra pernelyg didelis, kad būtų susietas gravitacijos, tai reiškia, kad nors Didžiojo atraktoriaus trauka šiuo metu pakankamai stipri, kad temptų mūsų vietinę galaktikų grupę link savęs, kosminis plėtimasis tuo pačiu metu stumia patį Didžiųjį atraktorių dar toliau. Galiausiai plėtimasis nugalės, ir Didysis atraktorius nuo mūsų tols greičiau, nei mes keliausime jo link.

Apibendrinant, Žemė yra nepaprastai dinamiška ir nuolat judanti sistema, kuriai tinka Žiulio Verno knygų personažo, povandeninio laivo „Nautilus“ kapitono Nemo devizas „Mobilis in mobili“ – „Judantis judējime“. Aptartas judėjimas – nuo kasdienių paros ilgio pokyčių, kuriuos lemia tirpstantys ledynai, iki tūkstantmečius trunkančių ašies svyravimų ir kosminės kelionės link gravitacinio taško, kurio niekada nepasieksime – atskleidžia sudėtingą ir nuolat kintančią mūsų ir mūsų planetos padėti Kosmose.

6. Atstumų matavimas astronomijoje

Pagrindiniai atstumų matavimo metodai astronomijoje yra:

Radaro signalas – naudojamas artimiausiems kosminiams atstumams, pavyzdžiui, Saulės sistemos objektams, matuoti. Iš esmės, tai yra radaro signalo siuntimas į dangaus kūną (pvz., Venerą ar Mėnulį) ir laiko, per kurį signalas grįžta, fiksavimas. Žinant šviesos greitį ir signalo sklidimo laiką, apskaičiuojamas atstumas.

Paralaksas – kosminio kūno padėties dangaus sferoje regimasis pokytis, kuris atsiranda dėl stebėtojo vietas pasikeitimo erdvėje. Tai kampus, matujantys, kiek objekto padėtis atrodo pasislinkti, kai jis stebimas iš dviejų skirtinų taškų. Paralakso kampus yra didesnis artimesniems objektams ir mažesnis tolimiesiems, todėl šis reiškinys naudojamas atstumams matuoti astronomijoje. Pavyzdžiui, metinis paralaksas – tai žvaigždės regimasis padėties pasislinkimas, kuris matuojamas stebint ją iš Žemės skirtinų orbitos taškų.

Standartinės žvakės (angl. Standard Candle) – standartinėmis žvakėmis vadinami tam tikri astronominiai objektais, kurių absoliutusis ryškis (tikrasis šviesumas) yra žinomas. Išmatavus objekto regimąjį ryškį (kaip jis matomas iš Žemės), galima apskaičiuoti atstumą. Kuo objekto ryškis mažesnis, tuo jis toliau. Standartinių žvakų pavyzdžiai yra kintamosios žvaigždės Cefeidės, kurių ryškio kitimo periodas tiesiogiai priklauso nuo jų absoliučiojo ryškio – jų dėka galima matuoti atstumus iki greta esančių galaktikų. Supernovos, kurių sprogimai pasiekia beveik vienodą didžiausią absoliutųjį ryškį, nepriklausomai nuo jų vietas. Tai leidžia matuoti atstumus iki labai tolimų galaktikų.

Raudonasis poslinkis – naudojamas astronomijoje tolimų objektų atstumams nustatyti remiantis Visatos plėtimosi principu. Kai astronominis objektas tolsta nuo stebėtojo, jo spinduliuotės bangos ilgis pasislenka link raudonos spektro dalies, tai yra atsiranda raudonasis poslinkis. Remiantis Hablo dėsniu, galaktikos tolsta nuo mūsų greičiu, kuris yra proporcingas atstumui iki jų. Matujant galaktikos spektrinių linijų raudonąjį poslinkį (jos spalvos poslinkį į raudonąjį spektro dalį dėl tolimo greičio), galima nustatyti jos greitį ir taip apskaičiuoti atstumą. Šis metodas taikomas galaktikoms, kvazarams ir kitiems labai tolimiems Visatos objektams.

Kadangi nėra vieno metodo, tinkančio visų atstumų matavimui, šie metodai yra kombinuojami. Pradedama nuo artimiausių objektų ir einama prie vis tolimesnių, o kiekvienas

žingsnis paremtas ankstesniuoju. Tai lyg kopėčios, kurių kiekviena pakopa leidžia pasiekti toliau esančius objektus. Todėl šią metodą kombinacija (seka) dar yra vadinama „Kosminėmis atstumo kopėčiomis“ (angl. Cosmic Distance Ladder).

Pagrindiniai atstumų matavimo vienetai astronomijoje yra:

Astronominis vienetas (AU) – tai vidutinis atstumas tarp Saulės ir Žemės, apie 149,6 milijonų kilometrų. Šis vienetas dažniausiai taikomas Saulės sistemos kūnų atstumams matuoti.

Šviesmetis – atstumas, kurį šviesa nueina per vienerius Žemės metus, apie 9,5 trilijonų kilometrų. Tai populiarus atstumo matavimo vienetas tolimiems kosminiams objektams.

Parsekas (pc) – matavimo vienetas, lygus 3,26 šviesmečio. Jis apibrėžiamas kaip atstumas iki kūno, kurio metinis paralaksas yra lygus 1 lanko sekundę (1''), tai yra kampus, iš kurio Žemės orbitos didžioji pusašė matoma kaip 1'' lanko sekundė statmenai krypčiai Saulė-Žemė krypčiai. Terminas kilo iš žodžių „paralaksas“ ir „sekundė“. Parsekas dažnai naudojamas žvaigždžių, galaktikų ir kitų tolimų astronominių objektų atstumams išreikšti.. Artimiausia žinoma žvaigždė, esanti už Saulės sistemos ribų, Kentauro Proksima, yra už 1,3012 pc.

7. Dangaus skliautas ir žvaigždynai.

7.1. Žvaigždynai ir žvaigždėlapiai

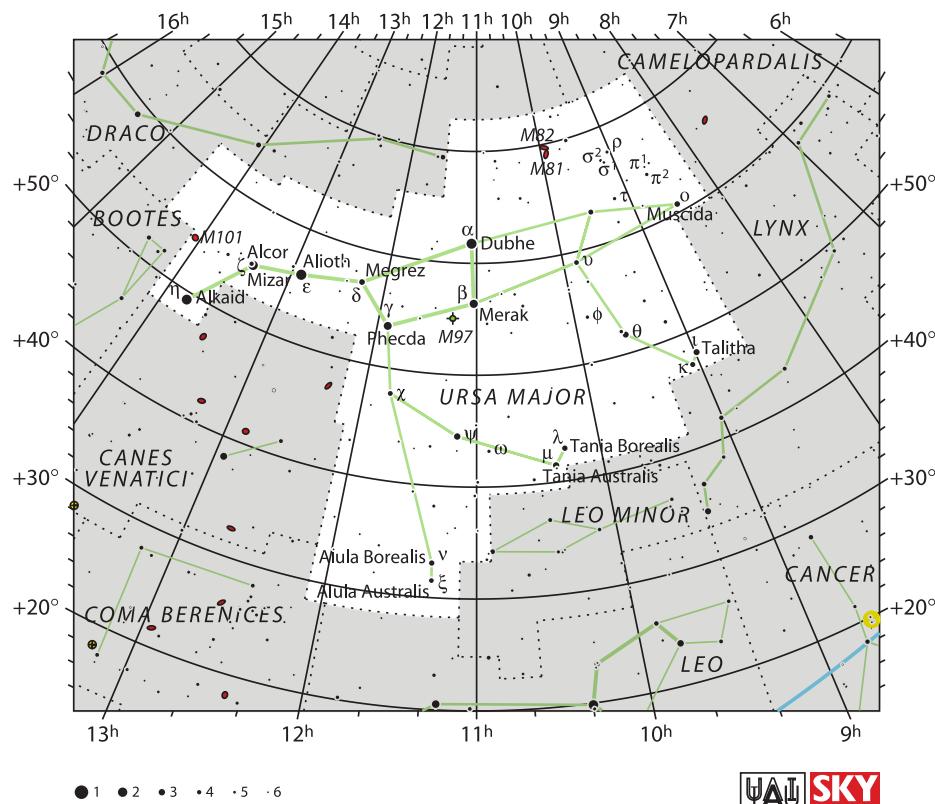
Dangaus skliautas yra mūsų regimas naktinis dangus, kurio forma primena didelę pusiau sferą virš stebėtojo galvos. Jis apgaubia Žemę tarsi kupolas ir apima visas žvaigždes, planetas bei kitus dangaus kūnus. Dangaus skliautas yra įsivaizduojama sfera, kurios centras yra stebėtojas, ir joje atrodo, kad visi žvaigždės yra išsidėsčiusios ant to paties kupolo paviršiaus. Dangaus skliautas juda, nes sukasi Žemė, o žvaigždės atrodo keliaujančios per dangų.

Žvaigždynai yra dangaus sferos dalys, kurių ribos apima žvaigždžių grupes, kurios buvo sujungtos pagal jų išsidėstymą tam tikrose istoriniuose mituose ar iš praktinių sumetimų (pvz., naudojama navigacijoje, kalendoriuose). Senovėje žvaigždynų ribos nebuvvo oficialiai apibrėžtos. Senovės civilizacijos (pvz., graikai, babiloniečiai) žvaigždynus suvokdavo kaip ryškesnių žvaigždžių grupes, kurias sujungdavo į mitologines figūras, tačiau jų ribos buvo gana laisvos ir nevienodos. Klaudijus Ptolemėjus (II a. pr. m. e.) senovės Graikijoje apraše 48 žvaigždynus, tačiau ribos nebuvvo tiksliai nustatytos.

Naujaisiais amžiais, po teleskopų išradimo ir astronomijos pažangos, žvaigždynų ribų poreikis tapo svarbus tiksliai dokumentacijai ir stebėjimų duomenų sisteminimui. 1922 m. Tarptautinė astronomų sąjunga (IAU) oficialiai patvirtino žvaigždynų sąrašą (88 žvaigždynai). Kiekvienam žvaigždynui priskiriamas lotyniškas pavadinimas ir trijų raidžių santrumpa, kurios plačiai naudojamos astronominiuose kataloguose ir programose. 1930 m. belgų astronomas Eugéjus Delporte nubrėžė oficialias tikslias ribas, kuriomis žvaigždynai dabar žymimi tiksliomis

astronominėmis koordinatėmis (rektascensija ir deklinacija). Žvaigždynų ribos apima ne tik matomas žvaigždes, bet ir galaktikas, žvaigždžių spiečius, ūkus. Šios ribos yra aiškiai nurodytos kaip daugiakampiai dangaus sferoje ir yra naudojamos iki šiol.

Tradiciškai graikiškos raidės naudojamos ryškiausioms žvaigždėms žymėti pagal vokiečių astronoomo Johanno Bayerio 1603 m. sukurtą sistemą (Bayer designation). Silpnesnėmis žvaigždėmis dažnai priskiriami "Flamsteed skaičiai" (kuriuos XVIII a. pradžioje pristatė anglų astronomas Johnas Flamsteedas), o neįprastos žvaigždės ir kiti dangaus objektai (dažnai vadinami "tolimojo kosmoso" objektais) turi skaičius ar raides iš įvairių kitų sistemų.

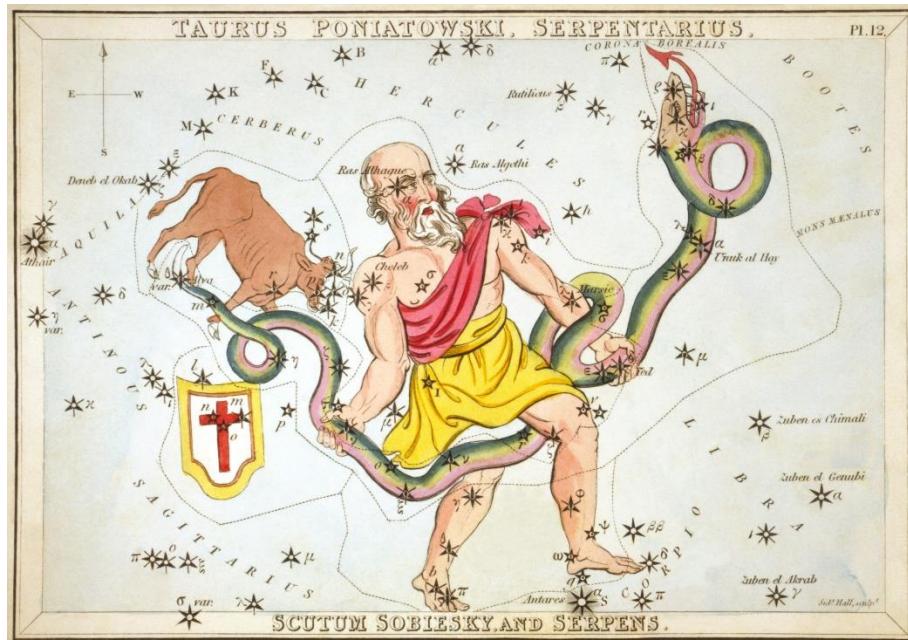


13 pav. Didžiųjų Gržulų Ratų žvaigždynas. By IAU and Sky & Telescope magazine (Roger Sinnott & Rick Fienberg) - <http://www.iau.org/public/themes/constellations/#uma>, CC BY 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15412501>

Daugumas žvaigždynų pavadinimų dabar mums atrodo keisti, nes daugeliu atvejų pavadinimai susiję su įvairiais mitais, istoriniais įvykiais ir tradicijomis. Žvaigždynų pavadinimai istorijos bėgyje atsirasdavo ir pranykdavo. Pavyzdžiu, Jautukas (Poniatovskio Jautukas, Taurus Poniatowski arba Vitellus Poniatovii) – šiuo metu oficialiai neegzistuojantis „vilnietiškos“ kilmės žvaigždynas, buvęs tarp Gyvatnešio ir Skydo žvaigždynų. Žvaigždyną 1773 m. į žvaigždėlapius įvedė Vilniaus universiteto matematikos ir astronomijos profesorius, Vilniaus universiteto astronomijos observatorijos vadovas Martynas Počobutas-Odlianickis ir pavadino tuometinio valdovo Stanislovo Poniatovskio garbei, atsidėkojant už valdovo paramą mokslui, Edukacinės komisijos, tapusios

pirmąja švietimo ministerija pasaulyje sukūrimą, jos žiniai perduotų mokslo įstaigų supasaulietinimą bei modernizavimą. 1778 m. žvaigždyno pavadinimą patvirtino Paryžiaus mokslų akademijos susirinkimas, jis buvo pavaizduotas Karališkosios Grinvičo observatorijos direktoriaus John Flamsteed parengto atlaso pakartotiniuose leidimuose. Žvaigždynas taip pat atvaizduotas ant Vilniaus senosios universiteto astronomijos observatorijos sienų (matomas iš observatorijos kiemo pusės). Vėliau, astronomams siekiant sumažinti žvaigždynų skaičių ir griežčiau nustatyti ribas tarp jų, Jautukas pašalintas iš oficialaus astronomų naudojamo sąrašo, jo žvaigždes prijungiant prie gretimų Gyvatnešio ir Erelie žvaigždynų (2A pav.).

Kitas su Lietuvos Didžiosios Kunigaikštysės istorija susijęs žvaigždynas – Skydas (Scutum). Žvaigždyną Sobieskio Skydu (Scutum Sobiescianum) 1684 m. pavadino Gdanske gyvenęs Bohemijos vokiečių kilmės lenkų astronomas Johannes Hevelius, tokiu būdu įamžindamas lenkų karaliaus ir Lietuvos didžiojo kunigaikščio Jono III Sobieskio pergalę prieš turkų armiją Vienos mūšyje. Vėliau žvaigždyno pavadinimas buvo sutrumpintas iki Skydo (Scutum), tačiau prancūzų kalba žvaigždynas vis dar vadinamas „L'Écu de Sobieski“ („Sobieskio skydas“).



14 pav. Poniatovskio jautukas, Gyvatnešis, Sobieskio Skydas, ir Gyvatė. „*Urania's Mirror*“, Jehoshaphat Aspin, Londonas, 1825. Šaltinis: JAV Kongreso biblioteka (ID cph.3g10061), Public domain (PD)

7.2. Žvaigždžių regimasis judėjimas dangaus skliautu

Žvaigždžių judėjimas paros bėgyje. Skirtingu paros metu ir skirtingais metų laikais kiekvienas žvaigždynas būna skirtingose padėtyse horizonto atžvilgiu. Žemės apsisukimo periodas yra maždaug 23 valandas, 56 minutes ir 4 sekundes – šis laikotarpis vadinamas siderine diena. Dėl

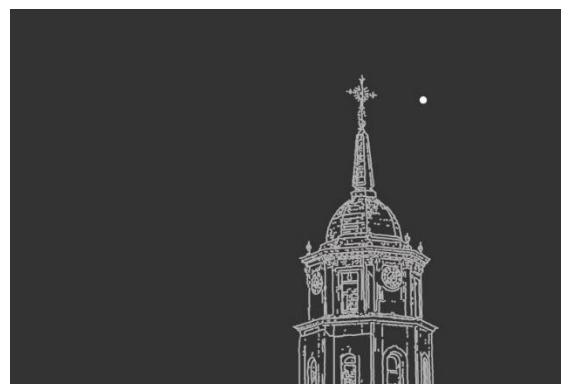
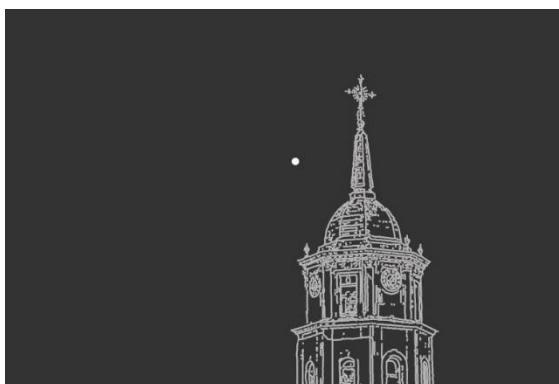
šio sukimosi beveik kiekviena žvaigždė juda dangumi keliu, kurio centre yra dangaus polius: Šiaurinis dangaus polius yra netoli Mažųjų grižulo ratų žvaigždės Poliaro (Šiaurės žvaigždės) o Pietų dangaus polius yra netoli Sigma Octantis.

Žvaigždės judėjimo kryptis priklauso nuo stebėtojo vienos. Šiaurės pusrutulyje cirkumpoliarinės žvaigždės (esančios šalia Poliaro) juda prieš laikrodžio rodyklę aplink Polaris. Pietų pusrutulyje cirkumpoliarinės žvaigždės juda pagal laikrodžio rodyklę aplink Sigma Octantis.

Vizualiai atrodo, kad nuo pusiaujo žvaigždės juda iš ryty į vakarus, kyla rytuose ir leidžiasi vakaruose, juda apskritais lankais, kurių centre yra horizonto taškai šiaurėje ir pietuose.

Šis kasdienis judėjimas yra Žemės sukimosi pasekmė. Kadangi Žemė taip pat skrieja aplink Saulę, tiksliai žvaigždžių padėtis kiekvieną sekančią naktį tuo pat metu šiek tiek pasikeičia.

Apibendrinant galima pasakyti, kad žvaigždės kyla rytuose, slenka lanku per dangų ir leidžiasi vakaruose dėl Žemės sukimosi, o regimasis slinkimo kelias ir kryptys skiriasi priklauso nuo stebėtojo platumos ir pusrutulio. Šio judėjimo supratimas yra labai svarbus, orientavimuisi danguje ir naktinio dangaus modelių supratimui.



15 pav. Žvaigždžių judėjimas paros bėgyje. Rytinėje dangaus pusėje žvaigždės nakties bėgyje slenka į dešinę ir į viršų. Autorius: GB, PD

Žvaigždžių judėjimas metu bėgyje. Žvaigždynų matomumas 54° šiaurės platumoje (Vilniuje) skiriasi pagal sezoniškumą, atitinkamai žiemos, vasaros, pavasario ir rudens naktimis matomi visiškai skirtinti žvaigždynai, o kai kurie artimi šiaurės žvaigždynai matomi visus metus. Žiemos naktimis ryškiausiai matomi žvaigždynai yra:

- Orionas (dar vadinamas Šienpjoviais) – su ryškiomis žvaigždėmis Betelgeize, Rigelis.
- Tauras – su Aldebaranu ir Plejadų žvaigždžių spiečiumi.
- Dvyniai.
- Didysis Šuo (Canis Major) – su ryškiausia žvaigžde Sirijumi.
- Mažasis Šuo (Canis Minor) – su Prokionu.
- Vežėjas (Auriga) – su Kapelos žvaigžde.

Šie žvaigždynai žiemos metu kulminuoja virš pietų horizonto ir yra gerai matomi.

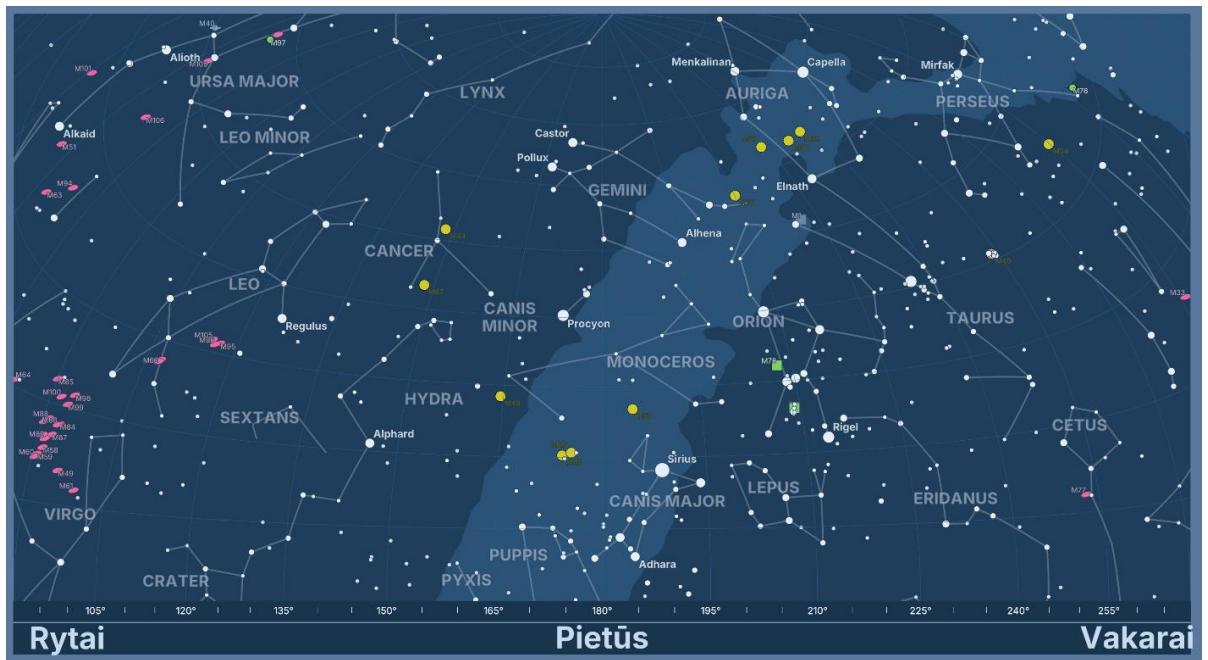
Vasaros viršuje danguje nuo vakarinės iki vidurnakčio dalies matomi:

- Liūtas, kurio ryškiausia žvaigždė yra Regulus.

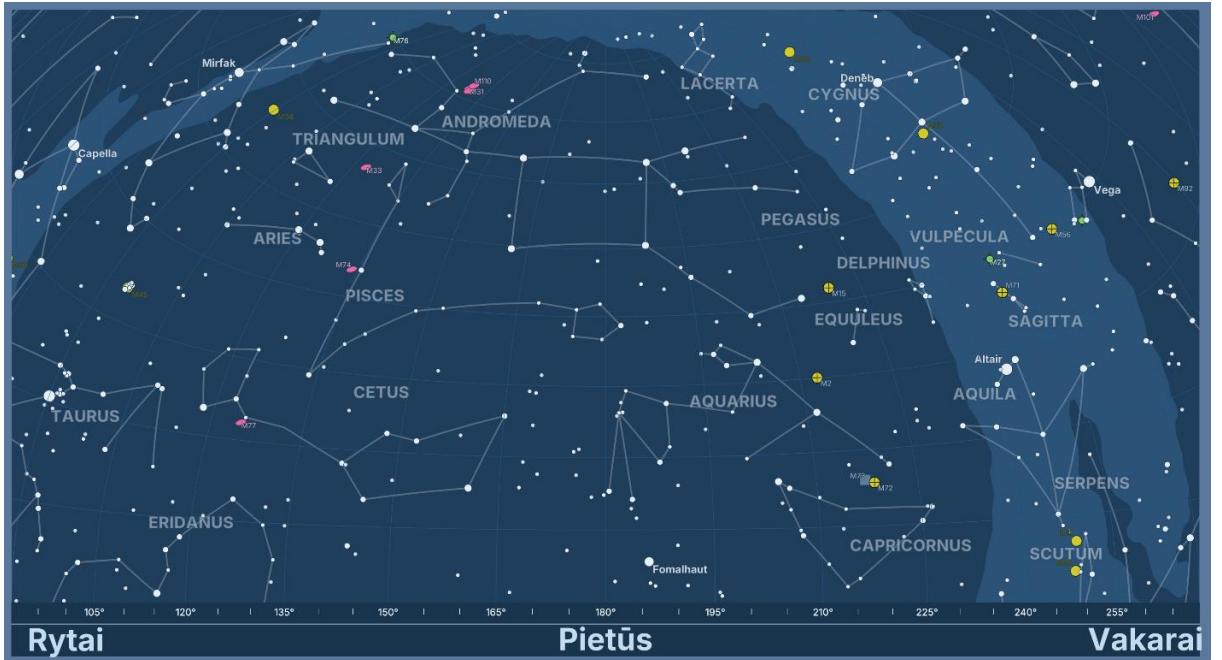
- Jaučiaganis (Boötes) su Arktūru – ryškia vasaros žvaigžde.
 - Vasaros trikampis, sudarytas iš žvaigždžių Vega (Lyra), Denebas (Swan), ir Altair (Aquila).
 - Šiaurės Vainikas (Corona Borealis) su Gemma žvaigžde.

Taip pat matoma Kasiopėja, nors jos pozicija keičiasi, ir dėl to vakarinė jos dalis vasarą būna žemai šiaurės horizonte.

Pavasarį matomi žvaigždynai kaip Žuvys, Andromeda, ir Dvyniai. Rudenį galima stebėti Ožiaragi, Vandenį ir Šaulį, kurie sugrižta į vakarinį horizontą.



16 pav. Pietinės dangaus pusės žvaigždynai lapkričio 1 d. apie 22 valandą (Vilnius). Autorius: GB, PD



17 pav. Pietinės dangaus pusės žvaigždynai kovo 1 d. apie 22 valandą (Vilnius). Autorius: GB, PD

7.3. Cirkumpoliarinės žvaigždės ir žvaigždynai

Cirkumpoliarinė žvaigždė yra žvaigždė, kuri, žiūrint iš tam tikros platumos Žemėje, niekada nenusileidžia žemiau horizonto dėl savo akivaizdaus artumo prie vieno iš dangaus polių. Todėl cirkumpoliarinės žvaigždės yra matomas iš minėtos vietas link artimiausio poliaus visą naktį kiekvieną metų naktį (ir būtų matomas ir visą dieną, jei jų neužgožtų saulės spindesys). Kitos žvaigždės vadinamos sezoniškais žvaigždėmis. Cirkumpoliariniai žvaigždynai yra žvaigždynai, kurie matomi visą naktį ir visus metus.

Nuolat matomi žvaigždynai (cirkumpoliariniai) šiaurės platumose:

- Mažieji Grįžulo Ratai (Ursa Minor) – matomas ištisus metus, nes yra arti dangaus Šiaurinio poliaus.
- Didieji Grįžulo Ratai (Ursa Major) ir Kasiopėja taip pat yra matomi ištisus metus, nors jų aukštis kinta pagal sezoniškumą.

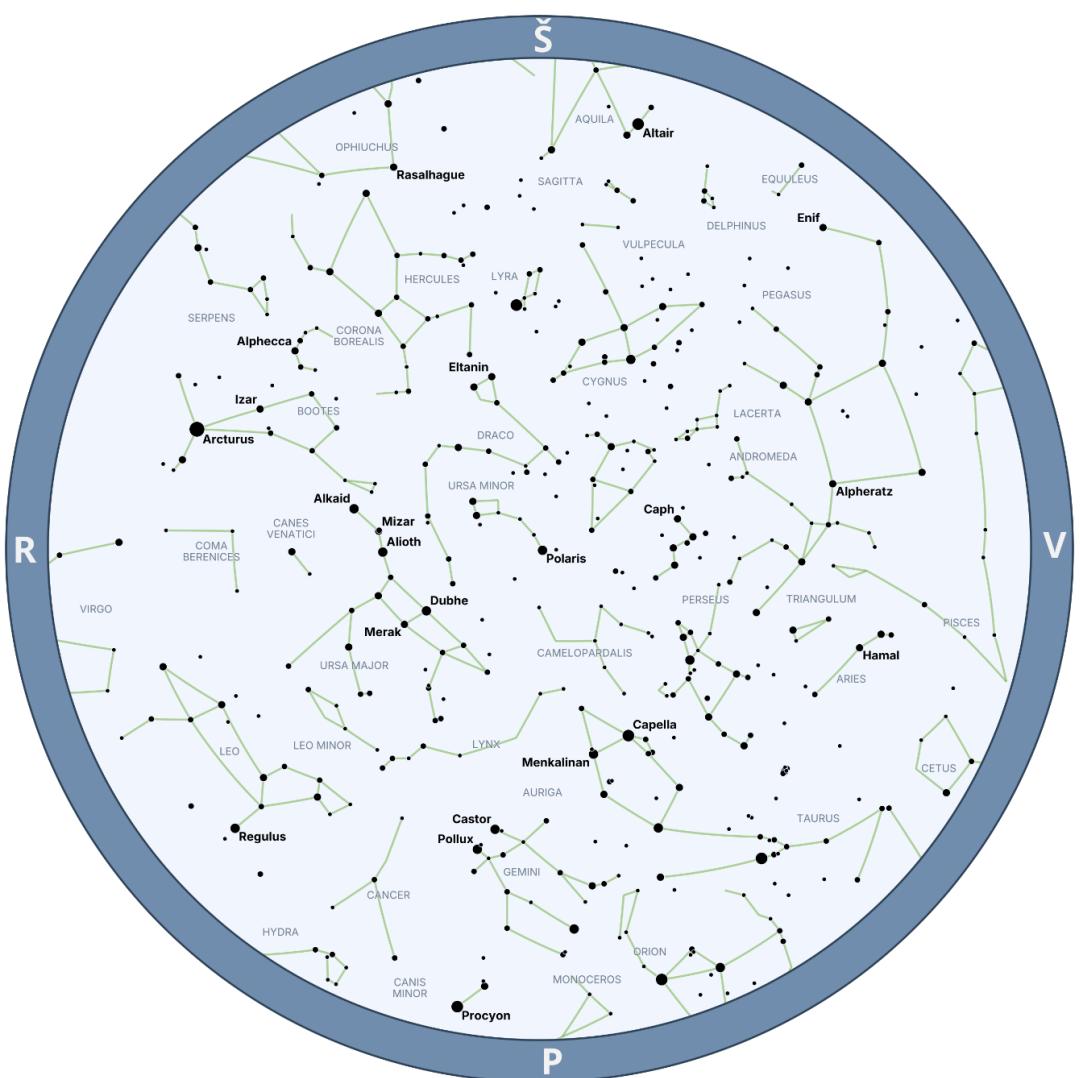
Visos cirkumpoliarinės žvaigždės yra apskritime apie dangaus polių, kurio dydis priklauso nuo stebėtojo platumos. Konkrečiai, šio apskritimo spindulio kampinis matmuo lygus stebėtojo platumai. Kuo stebėtojas yra arčiau Šiaurės ar Pietų ašigalio, tuo didesnis jo cirkumpoliarinis apskritimas. Kadangi šiaurinio arba pietinio dangaus poliaus (priklasomai nuo to, kuris matomas) aukštis lygus stebėtojo platumos absoliučiai vertei, bet kuri žvaigždė, kurios kampinis atstumas nuo matomo dangaus poliaus yra mažesnis už absoliučią platumą, bus cirkumpoliarinė.

Pavyzdžiui, jei stebėtojo platura yra 54° šiaurės platumos, bet kuri žvaigždė bus cirkumpoliarinė, jei ji yra mažiau nei 54° nuo šiaurinio dangaus poliaus. Jei stebėtojo platura yra

35° pietų platumos, tada visos žvaigždės, esančios 35° nuo pietinio dangaus poliaus, yra cirkumpolarinės.

Žvaigždynus lengviau rasti naktimis, kai nėra ryškios Mėnulio šviesos. Mokantis rasti žvaigždynus, rekomenduojama eiti palaipsniui nuo vieno, jau pažistamo, žvaigždyno prie kito, kurio dar nepažįstate. Reikia įsidėmėti, iš kurią pusė nuo pažistamo žvaigždyno yra ieškomas žvaigždynas. Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į žvaigždžių ryškumą; žvaigždėlapis parodo šią ryškumą įvairaus dydžio skrituliukais. Linijos, jungiančios žvaigždes, parodytos žvaigždėlapyje, tačiau šis dalykas yra grynai sąlyginis.

Nors dabar yra daug astronominių programelių, žvaigždynams lengviau surasti patogus yra su kamasis žvaigždėlapis (planisfera), nes jis yra didesnis, nei telefono ar planšetės ekranas, lengviau vertinti žvaigždynų išsidėstymą horizonto atžvilgiu.



18 pav. Žvaigždynai aplink Šiaurinę žvaigždę (Šiaurės ašigalis, kovo 1 d, 22 val.). Autorius: GB, PD

7.4. Dangaus objektų katalogai

Astronominis katalogas yra žvaigždžių, galaktikų, giliojo dangaus ir kitų astronominių objektų duomenų sąrašas, sudarytas tam tikra tvarka. Jie skirstomi pagal duomenų tipą į:

- **Astrometrinius** (koordinatės, paralaksai, judėjimai),
- **Fotometrinis** (šviesio duomenys),
- **Spektrinius** (spektro savybės),
- **Identifikacinis** (objektų identifikacija),
- **Bendruosius** (įvairūs duomenys).

Yra specializuoti katalogai, pvz., dvinarių, kintamųjų, artimųjų, šviesiausiuju žvaigždžių, taip pat gama, rentgeno, UV, infraraudonosios ir radijo spinduliuotés šaltinių.

Mégėjiškoje astronomijoje dažniausiai naudojami tokie katalogai:

- Žvaigždžių katalogai, pavyzdžiui, Hipparcos (ESA misija, maždaug 118 000 žvaigždžių su preciziškomis koordinatėmis), Tycho katalogas (apie 2,5 mln. žvaigždžių), Bright Star Catalogue (šviesiausios žvaigždės iki 6,5 ryškio) ir istoriniai Bonner Durchmusterung, Cordoba Durchmusterung bei Cape Photographic Durchmusterung katalogai.
- Katalogai giliojo dangaus objektams kaip Messier katalogas (110 objektų, plačiai žinomas mēgėjų astronomijoje), New General Catalogue (NGC) ir Index Catalogue (IC), kurie suteikia identifikaciją įvairiems galaktikų, žvaigždžių spiečių ir ūko tipams.
- Kintamųjų žvaigždžių katalogas GCVS (General Catalogue of Variable Stars) apima įvairius kintamus žvaigždžių tipus.

Istoriniai astronominiai katalogai – tai senieji žvaigždžių sąrašai, sudaryti dar prieš šiuolaikinių technologijų atsiradimą. Jie turėjo didelę reikšmę astronomijos raidai ir dažnai buvo naudojami navigacijai, laiko matavimui ir dangaus objektų stebėjimui. Turi išliekamąjį identifikacinię vertę, t. y. padeda susieti senus stebėjimus su šiuolaikiniais duomenimis. Nors jų tikslumas mažesnis nei dabartinių katalogų, jie svarbūs istoriniams ir ilgalaikiams dangaus objektų pokyčių tyrimams. Pagrindiniai istoriniai katalogai:

- Bonos katalogas (BD – Bonner Durchmusterung). Sudarytas 1859–1862 m. Bonos observatorijoje (Vokietija). Apima apie 324 000 žvaigždžių nuo -1° iki $+90^{\circ}$ deklinacijos. Naudotas identifikacijai ir fotometriniams tyrimams.
- Kordobos katalogas (CD – Cordoba Durchmusterung). Sudarytas Argentinoje XIX a. pab.–XX a. pr. Tęsia Bonos katalogą pietinėje dangaus dalyje (-22° iki -90° deklinacijos).

- Keipo katalogas (CPD – Cape Photographic Durchmusterung). Sudarytas Keipo observatorijoje Pietų Afrikoje. Apima pietinį dangų (-18° iki -90° deklinacijos). Naudotas kartu su BD ir CD kaip viso dangaus identifikacinė sistema.
- Ptolemėjaus katalogas. Vienas seniausių – sudarytas II a. Graikijoje. Apima 1022 žvaigždes. Pagrindas „Almagesto“ veikalui, naudotas viduramžiais.

Lietuvoje sudaryti astronominiai katalogai. Reikšmingas Lietuvos indėlis į pasaulinę astronomiją yra *Vilniaus astrofotometrinės sistemos katalogas*. Vilniaus astrofotometrinė sistema buvo sukurta 1963 m. vadovaujant Lietuvos astronomui Vytautui Straižiui. Tai septynių spalvų vidutinio pločio fotometrinė sistema (UPXYZVS), skirta žvaigždžių spektrinėms klasėms ir fizinėms savybėms nustatyti. Naudojama žvaigždžių klasifikavimui, tarpžvaigždinės medžiagos tyrimams, galaktikų spiečių analizėms. Be to, Lietuvoje buvo parengti astronominiai katalogai, kurie buvo naudoti tarptautiniuose projektuose (pvz., žvaigždžių spiečių tyrimuose Andromedos galaktikoje):

- 1993 m. sudarytas bendrasis Vilniaus astrofotometrinės sistemos matavimų katalogas, apimantis tūkstančius žvaigždžių su jų fotometriniais duomenimis.
- 1980–1999 m. sudaryti keli II populiacijos žvaigždžių katalogai, naudoti galaktikos struktūros ir evoliucijos tyrimams.

Baltic Astronomy, vol. 2, 1-169, 1993.

GENERAL PHOTOMETRIC CATALOGUE OF STARS
OBSERVED IN THE VILNIUS SYSTEM

V. Straižys and A. Kazlauskas

Institute of Theoretical Physics and Astronomy,
Goštauto 12, Vilnius 2600, Lithuania

Received July 5, 1993.

Abstract: A photometric catalogue of 7445 stars (8404 including the repeated measurements) observed in the Vilnius system *UPXYZVS* is compiled from 79 literature sources and unpublished data. The catalogue gives numbers of stars, their identification, right ascensions and declinations, magnitudes, $U-P$, $P-X$, $X-Y$, $Y-Z$, $Z-V$ and $V-S$ colour indices, spectral types and literature sources of the photometric and spectral data. For about 60 % of stars, spectral types and luminosity classes determined from the photometric data are given.

Key words: Vilnius photometric system – spectral classification – catalogues

1. Introduction

Since 1969, 79 catalogues of stars observed in the Vilnius photometric system (Straižys, 1992) have been published. They include field stars, stars in open and globular clusters and associations, dark clouds, galactic areas. To make easier finding the photometric data of a star, general photometric catalogues on magnetic tapes of the stars observed in the Vilnius system have been compiled. Their descriptions have been published by North (1980, 1984), Zdanavicius et al. (1983) and Straižys et al. (1989). The last catalogue contained the data of about 5000 stars. Since then, the number of stars

observed in the Vilnius system photoelectrically (including CCD observations) has reached 7445. The catalogue presented here is the first its printed version. In addition to original catalogues, the general catalogue contains better identification of stars since for all stars right ascensions and declinations are given. For about 60% of stars we give spectral and luminosity classes determined from the photometric data. In many cases these spectral types are more exact than those given in spectral catalogues, using the objective prism techniques. Only observations, obtained by the photoelectric and the CCD methods, have been included.

2. Identification

Identification number, given in the first column, is on the Strasbourg Astronomical Data Center code. It gives not only the number of a star but also the coded catalogue number, which can be identified in Appendix. The coding is described by Merrill (1978) who presented it in his catalogues. The asterisk, given at a code number, is the reference to Remarks at the end of the catalogue. The remarks give the information on duplicity and variability of a star, as well as Bayer's Greek letter names. The visual binary stars in the remarks are designated as VB. For the binaries, whose separation of components is $\leq 10''$, photometric data correspond usually to both components together. Variability types are coded in the same way as in the fourth edition of the General Catalogue of Variable Stars (Khlopov, 1985–1990). For convenience the code is given in Table I.

Right ascensions and declinations of stars are given in 1950.0 epoch with an accuracy of $1''$ in α and $0.1''$ in δ . For stars brighter than 9 mag they are taken from the SAO, AGK2 and AGK3 catalogues. For fainter stars, the coordinates, when available, are taken from the original papers. When coordinates in the original papers were not given, they have been measured by us with $1''$ and $0.1''$ accuracy from star maps with surrounding reference stars. For a few stars, the coordinates are of lower accuracy and are marked by a colon following the right ascension.

3. Photometric data

The V magnitude given in the catalogue is, as a rule, the medium-band magnitude measured in the Vilnius photometric

© Teorines fizikos ir astronomijos institutas • Provided by the NASA Astrophysics Data System

© Teorines fizikos ir astronomijos institutas • Provided by the NASA Astrophysics Data System

19 pav. 1993 m. sudaryto bendrojo Vilniaus astrofotometrinės sistemos matavimų katalogo puslapiai. Šaltinis: https://articles.adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-iarticle_query?1993BaltA...2....1S&defaultprint=YES&page_ind=0&filetype=.pdf

7.5. Dangaus kūnų ryškis

Astronomai dangaus objektų ryškumui išreikšti naudoja ryškio skalę (kartai svadinama žvaigždiniu dydžiu, magnitude). Šios skalės istorija siekia senovės graikų (ypač Hiparcho ir Platono), kurie matomas žvaigždes suskirstė į šešias ryškumo klases, iš kurių ryškiausios žvaigždės priskiriamos 1 klasei, o silpniausios - 6 klasei.

Astronomai pastebėjo, kad kiekvienos kitos ryškesnės klasės žvaigždės yra maždaug 2,5 kartą ryškesnės už ankstesnės klasės žvaigždes.

Astronomai standartizavo ryškumo matą ir pavadino jį **ryškiu**. **Kuo ryškesnė žvaigždė, tuo mažesnė jos ryškio skaitinė reikšmė**. Astronomai pastebėjo, kad kiekvienos kitos ryškesnės klasės žvaigždės yra maždaug 2,5 kartą ryškesnės už ankstesnės klasės žvaigždes, todėl žvaigždė, kurios ryškis yra vienetu didesnė už kitą žvaigždę, yra maždaug 2,512 kartą ryškesnė už tą kitą žvaigždę. Penkių ryškių skirtumas atitinka 100 kartų ryškumo santykį: 0 ryškio žvaigždė yra 100 kartų ryškesnė už 5 ryškio žvaigždę ir 10 000 kartų ryškesnė už 10 ryškio žvaigždę.

Ryškis, atitinkantis žmogaus akies spektrinį jautrumą (jautriausia geltoniesiems ir žaliesiems spinduliams), **vadinamas regimuoju (vizualiniu) ryškiu (m_v)**. Šviesulio ryškis nustatomas lyginant jo ir etalonu pasirinkto objekto spindesį. Mégėjiškoje astronomijoje ir žvaigždėlapiuose **dažniausiai naudojamas regimasis ryškis (toliau - ryškis)**.

Jei dangaus objektai yra labai ryškūs (šviesūs), jų ryškis yra neigiamas. Pavyzdžiui, Lyros žvaigždyne (Lyra) esanti žvaigždė Vega yra viena ryškiausių žvaigždžių ir jos ryškis yra 0. Žvaigždė Sirijus Didžiojo šuns (Canis Majoris) žvaigždyne yra beveik keturis kartus ryškesnė už Vagę ir jos ryškis yra -1,44. Pilnas Ménulis yra maždaug 70 000 kartų ryškesnis už Sirijų ir jo ryškis yra apie -13,6, o Saulė yra maždaug 177 000 kartų ryškesnė už pilną Ménulį ir jos ryškis yra apie -26,73.

2 Lentelė. Ryškiausios žvaigždės.

Reitingas	Regimasis ryškis	Bayer klasifikacija	Pavadinimas	Atstumas (šm)
0	-26,73	-	Saulė	0,000 016
1	-1,44	α CMa	Sirijus	8,61
2	-0,62	α Car	Kanopus	312,73
3	-0,29	α 1 Cen	Tolimanas, Kentauro Alfa A	4,4
4	-0,04 kint	α Boo	Arktūras	36,69
5	0,03	α Lyr	Vega	25,31
6	0,112	β Ori	Rigelis	772,91
7	0,34	α CMi	Prokionas	11,42
8	0,5	α Eri	Achernaras	140
9	0,58 kint	α Ori	Betelgeizė	430
10	0,6	β Cen	Hadaras (Agena)	530

Absoliutusis ryškis – šviesulio regimasis ryškis, kurį jis turėtų, jei būtų 10 pc (32,616 š.m.) nuotoliu nuo stebėtojo ir nebūtų tarpžvaigždinės absorbcijos (ekstinkcijos). Priklauso nuo šviesos bangos ilgio. Saulės absoliutusis ryškis žaliojoje spektro srityje $M_v = 4,79$.

Ryškiausių mūsų dangaus žvaigždžių ryškis yra 1 arba mažesnė; pagal Ryškių žvaigždžių katalogą tokį žvaigždžių yra tik 20. Silpniausių žvaigždžių, kurias galima pamatyti labai tamšią naktį sveika, prie tamsos prisitaikiusia akimi be papildomų optinių priemonių, tokį kaip žiūronai ar teleskopai, žvaigždės yra maždaug 6 ryškio; tokį žvaigždžių, vaovaujantis „Ryškių žvaigždžių katalogu“ („Bright Star Catalogue“, „Yale Bright Star Catalogue“ arba YBS), yra 5026.

Silpniausio plika akimi arba optiniu prietaisu matomo dangaus objekto ryškis yra vadinamas **ribiniu ryškiu**. Ribinis ryškis stebint dangų plika akimi yra apie 4,5, o naudojant 7x50 žiūronus – apie 8,8. Naudojant 4 colių (100 mm) teleskopą galima matyti 10 ryškio dangaus kūnus. Dideliuose miestuose, kur yra **didelė šviesos tarša**, plika akimi stebimų objektų ribinis ryškis gali būti vos 2 ar 3, todėl žvaigždžių, kurias galima ižiūrėti mieste, yra tik apie 170.

Šviesos tarša matuojama Bortle skale. Bortle tamsaus dangaus skalė (paprastai vadinama tiesiog Bortle skale) yra devynių lygių skaitmeninė skalė, matujanti tam tikros vienos naktinio dangaus ryškumą. Skalė prasideda nuo 1 klasės, kuris apibrėžia tamsiausią dangų, o baigiasi 9 klase, kuris apibrėžia labiausiai šviesa užteršto miesto centro dangų. Skalėje pateikiami keli kriterijai kiekvienam lygiui, pagal plika akimi matomą ribinį ryškį.

Skalė padeda kiekybiškai įvertinti dangaus objektų astronominių stebėjimų sąlygas ir šviesos taršos sukeltus trukdžius. Astronomas mėgėjas Johnas E. Bortle'as sukūrė šią skalę ir paskelbė ją žurnalo „Sky & Telescope“ 2001 m. vasario numeryje, kad padėtų dangaus stebėtojams įvertinti stebėjimo vienos tamsą.

3 lentelė. Bortle skalė.

Klasė	Pavadinimas	Kriterijai
1	Tamsus dangus	Jokios šviesos taršos, ryškus Paukščių Takas, matomi silpni objektai, tūkstančiai žvaigždžių
2	Kaimo dangus	Labai tamsu, Paukščių Takas ryškus, šviesos tarša vos pastebima horizonte
3	Pereinamasis užmiesčio dangus	Paukščių Takas matomas, bet ne toks ryškus, horizontuose matoma šviesos tarša
4	Užmiesčio dangus	Paukščių Takas praranda kontrastą, miesto šviesos pastebimos
5	Priemiesčio dangus	Paukščių Takas vos matomas, dangus šviesus
6	Ryškus priemiesčio dangus	Paukščių Takas beveik nematomas, dangus gelsvas/oranžinis nuo šviesos taršos
7	Miesto pakraščio dangus	Matomas tik ryškiausios žvaigždės, Paukščių Takas nematomas
8	Miesto dangus	Labai ryškus fonas, matomas tik kelios ryškios žvaigždės
9	Miesto centras	Dangus beveik visiškai šviesus, žvaigždės beveik nematomos

7.6. Ribinis ryškis ir optiniai prietaisai

Jei naudojate optinę priemonę, pavyzdžiui, žiūronus arba teleskopą, galite matyti silpnesnius objektus. Paprastai kuo didesnis prietaiso šviesą surenkantis paviršius (t. y. pirmas lėšis arba veidrodis, su kuriuo susiduria šviesa), tuo blankešnę (t. y. didesnio ryškio skaitinės vertės) objektą galite pamatyti. Optinės priemonės gebėjimą surinkti šviesą charakterizuoja apertūra (lot. apertura – atidarymas, plyšys). Apertūra – optinio prietaiso anga, kurios dydį lemia lėšių ar veidrodžių, per kuriuos į optinį prietaisą patenka šviesa, matmenys (lėšio ar veidrodžio skersmuo, foto objektyvo diafragmos skerspjūvis).

Pavyzdžiui, palyginus idealių 7x50 žiūronų, kurių apertūra yra 50mm, surenkamos šviesos kiekį su sveikos tamsoje prisitaikiusios akies, kurios skersmuo 7 mm, šviesos kiekių, žiūronais matomų ryškių skirtumas, lyginant su akimi, yra apie +4,3.

Jei be žiūronų matote žvaigždes, kurios yra 5,0 ryškio, tai su žiūronais galite matyti žvaigždes iki maždaug 9,3 ryškio, kurių yra maždaug 100 kartų daugiau nei žvaigždžių iki 5,0 ryškio.

Gana tamsią naktį, naudodamasis įprastais 7x50 žiūronais, lengvai įžiūrėsite žvaigždes iki maždaug 8,8 ryškio. Dažnai prie astronominio prietaiso charakteristikos yra nurodomas tuo prietaisu matomų blankiausiu dangaus objektų ribinis ryškis.

4 lentelė. Optinių prietaisų ribiniai ryškiai

Apertūra (mm)	Apertūra (col.)	Ribinis ryškis	Matomas žvaigždžių skaičius	Pastaba
7	0.3	~5*	~900	Plika akis
50	2.0	~8.8*	~98	7x50 žiūronai
100	3.9	~9.6	~226	4 colių teleskopas
150	5.9	~10.4	~509	6 colių teleskopas
500	19.7	~13.0	~6,3 mln.	
1 000	39.4	~14.6	~26 mln.	
2 400	94.5	~16.5	~124 mln.	Hubble kosminis teleskopas
10 000	393.7	~19.5	~1,004 mlrd.	Keck observatorijos teleskopas

Jei po skaičiaus yra žvaigždutė (*), reiškia, kad stebima dviem akimis, priešingu atveju – viena akimi. Ribinės žvaigždžių ryškio reikšmės yra tokios, kokios matomos iš Žemės. Pvz. Hubble'o kosminis teleskopas kosmose galėtų "matyti" papildomai +1,5 ryškio, nes jam netrukdo žemės atmosferą, kuri sugeria ir išsklaido dalį dangaus objektų šviesos.

Lentelėje pateiktoje lentelėje nurodytos ryškio reikšmės taikomos vizualiai žiūrint pro teleskopą. Jeigu teleskopu fotografujate ir galite gauti labai ilgus ekspozicijos laikus, užfiksuosite daug silpnesnius objektus. Pavyzdžiui, Hubble'o kosminio teleskopo WPC2 kamera (Wide Field and

Planetary Camera 2) užfiksavo galaktikas, kurių ryškis siekia 30, panaudojės apie 5,9 dienos ekspoziciją (1,4 dienos kiekvienai filtro praleidimo juostai). WPC2 kamera yra maždaug tokia pat jautri kaip 330 ISO 35mm sensorius, o žmogaus akis, esant fiksuotam efektyviam ekspozicijos laikui, kuris yra maždaug 0,1 sekundės, yra maždaug tokia pat jautri kaip 500 000 ISO sensorius.

Kiek laiko reikia, kad būtų užfiksotas labai silpnus objektus, priklauso nuo objekto didumo, prietaiso optinės kokybės, ekspozicijos trukmės, įrašymo įrenginio efektyvumo ir nuo to, ar objektas yra taškinis, ar ne.

8. Žvaigždės

8.1. Matomų žvaigždžių skaičius

Žvaigždžių, kurias galima pamatyti iš tam tikros Žemės vietas, skaičius priklauso ne tik nuo toje vietoje matomo ribinio žvaigždės ryškio, bet ir nuo tos vietas geografinės platumos.

Nuo geografinės platumos priklauso ir tai, kurias žvaigždes bet kuriuo metu laiku galima pamatyti. Ties ašigaliais galima pamatyti maždaug pusę viso žvaigždžių skaičiaus (per metus), kurį galima pamatyti ties ekvatoriumi, tačiau žvaigždės, matomas nuo ašigalių, visada yra virš horizonto, o žvaigždės, matomas nuo ekvatoriaus, virš horizonto būna tik pusę laiko. Tarp ašigalių ir ekvatoriaus esančiose vietose matomas vidutinis žvaigždžių skaičius: kai kurios jų visada yra virš horizonto, o kitos – tik dalį laiko.

Mūsų danguje yra daug daugiau silpnų žvaigždžių nei ryškių. Pavyzdžiu, yra tik viena žvaigždė (išskyrus Saulę), kurios regimoji žvaigždė yra lygi arba mažesnė nei -1,46. Yra dešimt žvaigždžių, kurių ryškis yra 0,50 arba ryškesnė. Yra šimtas žvaigždžių, kurių ryškis yra 2,59 arba ryškesnė, ir tūkstantis žvaigždžių, kurių ryškis yra 4,60 arba mažesnė (pagal „Ryškių žvaigždžių katalogą“). Kiekvienai didesnei ryškio vertei tenka maždaug tris kartus daugiau žvaigždžių, kurių ryškis yra mažesnis. yra 513 žvaigždžių, kurių ryškis yra iki 4,00, ir 15,5 mln. žvaigždžių, kurių ryškis yra iki 14,0. Šimto milijonų žvaigždžių ryškis yra apie 16,2.

8.2. Žvaigždžių spalvos ir jų spektrinės klasės

Žvaigždės matomą spalvą iš Žemės lemia jos paviršiaus temperatūra. Astronomijoje žvaigždžių spalvos ir jų spektrinės klasės naudojama žvaigždžių klasifikavimui pagal jų temperatūrą, chemines savybes ir evoliucijos stadija.

Spektrinė klasifikacija žvaigždes skirsto į pagrindines klasės pagal jų temperatūrą. Karštos žvaigždės yra melsvos arba mėlynai baltos (pvz., O ir B klasės), vidutinio karštumo žvaigždės – baltos arba gelsvos (A, F, G klasės), o vėsių paviršių turinčios žvaigždės yra oranžinės arba raudonos (K ir M klasės).

Pagrindinės spektrinės klasės ir savybės. Žvaigždės klasifikuojamos pagal Harvardo spektrinę sistemą į 7 pagrindines klases: O, B, A, F, G, K, M. Šios klasės atitinka temperatūros mažėjimą nuo labai karštų iki vėsių žvaigždžių:

- O klasė: temperatūra 30 000–60 000 K, žvaigždės yra mėlynos spalvos.
- B klasė: 10 000–30 000 K, mėlynai baltos.
- A klasė: 7 500–10 000 K, baltos.
- F klasė: 6 000–7 500 K, gelsvai baltos.
- G klasė: 5 000–6 000 K, geltonos (pavyzdžiui, Saulė yra G2 klasės).
- K klasė: 3 500–5 000 K, oranžinės.
- M klasė: 2 000–3 500 K, raudonos.

Papildomos spektrinės klasės. Kiekviena pagrindinė klasė dar skirstoma į poklases nuo 0 iki 9, kur 0 žymi karščiausią ir 9 šalčiausią tos klasės žvaigždę.

Be pagrindinių klasių, yra specialios klasės, pvz., L, T klasės žvaigždės. L klasės žvaigždės yra labai vėsios, maždaug 1300–2000 K temperatūros, dažnai tai yra rudieji nykštukai arba labai vėsūs žvaigždžių tipo objektais.

T klasės žvaigždės yra dar vėsesnės, apie 600–1300 K temperatūros, šios klasės objektai yra šaltieji rudieji nykštukai, kurie turi metano molekules savo spektruose. Šios klasės buvo įvestos neseniai, siekiant geriau apibrėžti spektrines savybes ir temperatūrą žvaigždžių, kurios yra vėsesnės už tradicines M klasės žvaigžde.

Be to dar išskiriamos C – anglingosios, S – cirkoningosios, bei baltosios nykštukės (D).

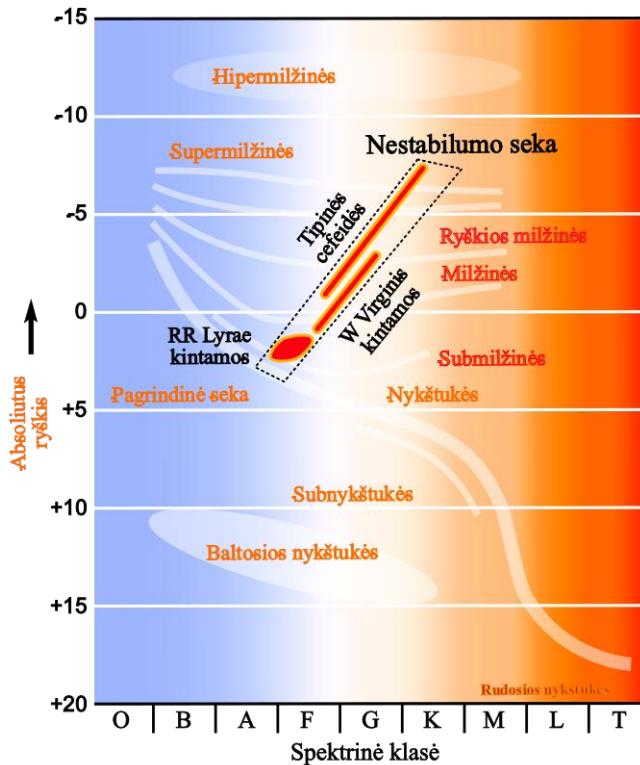
Spalvos ir evoliucijos stadija. Pagal evoliucijos stadiją O, B, A, F žvaigždės yra ankstyvosios evoliucijos stadijos, o G, K, M yra vėlyvosios evoliucijos stadijos žvaigždės.

Hertzsprungo-Russello (HR) diagrama. Tai dvimatė diagrama, kurioje X ašyje yra spektrinė klasė arba žvaigždės temperatūra (nuo karštų O iki vėsių M). Y ašyje uždedamas žvaigždės šviesis (ryšumas arba absolutusis ryškis).

Diagrama parodo žvaigždes pagrindinėje sekoje, milžinių ir supermilžinių grupes.

Saulė yra G klasės pagrindinės sekos žvaigždė šioje diagrama.

Taigi žvaigždžių spektrines klases ir jų ryšį su temperatūra, spalva ir ryškumu geriausiai vizualizuojant Harvardo klasifikacijos schema ir HR diagrama.



20 pav. Hertzsprungo-Russello (HR) diagrama. Šaltinis: HR-diag-instability-strip.svg, Wikimedia Commons contributors, CC BY-SA 3.0

Pagrindinės HR diagramos žvaigždžių grupės:

0 – Hipermilžinės – žvaigždės, turinčios milžinišką masę ir šviesi (šviesio klasė 0). Hipermilžinės žvaigždės yra masyvios kaip ir supermilžinės, kurių masė daugiau nei 100 kartų didesnė už Saulės. Žvaigždės hipermilžinės savo šviesiu lenkia Saulę tūkstančius ar milijonus kartų, o jų temperatūra yra labai įvairi: nuo 3500 iki 35000 K. Šios žvaigždės yra itin trumpaamžės (1–3 mln. metų) ir praėjusios šią seką sprogsta kaip supernovos arba hipernovos. Hipermilžines sunku tyrinėti, kadangi jų žinoma labai nedaug. Šiuo metu Paukščių Take žinomas 7 tokios žvaigždės (Pistolas, Gulbės P, Kasiopėjos q, Didžiojo Šuns VY ir kt.), dar kelios rastos Magelano Debesyje (S Doradus ir kt.).

I – Supermilžinės – labai masyvios ir ryškios žvaigždės, jau bebaigiančios savo gyvenimą. Tokios žvaigždės labai retos – maždaug viena iš milijono. Šitoks gigantas yra Betelgeizė.

II – Ryškios milžinės (irgi masyvios žvaigždės). Pavyzdžiai: Sargas, Alphard.

III – Milžinės. Skirtingai nuo ankstesnių grupių, čia atsiduria paprastos (Saulės dydžio) žvaigždės savo raidos pabaigoje. Ją kerta ir masyvių žvaigždžių vystymosi kreivės (pakeliui į supermilžinių kategoriją). Pavyzdys: Arktūras.

IV – Submilžinės – pagrindinę seką jau paliekančios žvaigždės, esančios pakeliui į milžinių kategoriją. Pavyzdys: Prokyonas.

V – Pagrindinė seka (kartais astronomų vadinama nykštukėmis). Didžiąją savo amžiaus dalį joje praleidžia dauguma žvaigždžių. Pavyzdžiai: Saulė, Vega, Sirijus.

Baltosios nykštukės nepriklauso nė vienai šių grupių ir išsidėsto žemai kairėje

Šioje diagramoje matoma, jog dauguma žvaigždžių išsidėstę išilgai kreivės, vadinamos pagrindine seka. Ši seka matematiškai aprašo įvairios masės tik vandenilio deginančių žvaigždžių šviesą ir temperatūrą. Kadangi didžiąją dalį žvaigždės raidos vyrauja būtent šis procesas, pagrindinėje sekoje atsiduria dauguma žvaigždžių. Pagrindinei Hertzsprungo – Russello diagramos sekai žvaigždė gali būti priskiriama beveik nuo susiformavimo iki egzistavimą užbaigiančių procesų atsiradimo (vandenilio žvaigždės centre sudegimo).

Nuo pagrindinės į dešinę atsišakoja milžinių seka, kuriai priklauso savo amžių baigiančios žvaigždės – milžinės. Milžinėse jau dega ir helis bei kiti sunkesni elementai. Savo amžių baigianti Saulė taip pat pasuks šiuo keliu, pakeliui kirsdamai ir submilžinių grupę.

Baltosios nykštukės užima visiškai kitą sritį žemai apačioje.

Dar viena įdomi diagramos ypatybė yra taip vadinama Hercsprungo spraga. Tai yra sritis su mažesne žvaigždžių koncentracija tarp A5 ir G0 spektrinės klasės ir tarp maždaug +1 ir -3 absolutinių ryškių srityje (t. y. tarp pagrindinės sekos viršaus ir milžinių horizontalioje sekoje). Hercsprungo spraga faktiškai yra nestabilumo juostos apatinėje dalyje. Joje randamos kintamosios žvaigždės (pvz., Cefeidės).

Nagrinėjant žvaigždžių amžių ir cheminę sudėtį, vartojamos **žvaigždžių populiacijų** sąvokos (skirstymas pagal **metališkumą** – sunkesnių nei helis elementų gausą). Metalškumas nusako žvaigždės amžių – kuo mažesnis metalškumas, tuo senesnė žvaigždė:

I populiacija. Metalų turtinos, jaunos žvaigždės, kurios paprastai randamos galaktikų diskuose. Jų metalškumas yra artimas ar didesnis už Saulės metalškumą, nes jos susiformavo iš dujų, jau praturtintų ankstesnių kartų žvaigždžių produktais (sunkesni, nei helis elementai susiformuoja žvaigždžių branduoliuose vykstančių termobranduolinių reakcijų metu).

II populiacija. Metalų neturtinos, senos žvaigždės, randamos haluose ir centriniuose telkiniuose. Jų metalškumas yra žymiai mažesnis (iki 1% Saulės metalškumo).

III populiacija. Teorinė ankstyviausių žvaigždžių karta, susiformavusi iš pirminių dujų (vien vandenilio ir helio). Šios žvaigždės neturėjo jokių metalų. Manoma, kad jos jau yra išnykusios¹, tačiau jų cheminiai pėdsakai aptinkami seniausių II populiacijos žvaigždžių sudėtyje.

¹ JWST yra užfiksavęs III populiacijos pėdsakai LAP1-B galaktikoje, bet rezultatai dar tikrinami. Daugiau: „LAP1-B is the First Observed System Consistent with Theoretical Predictions for Population III Stars“; <https://arxiv.org/abs/2508.03842>

8.3. Dvinarės žvaigždės

Dvinarė žvaigždė – tai dviejų žvaigždžių sistema, kurios nariai, veikiami tarpusavio gravitacijos, skrieja elipsinėmis orbitomis apie bendrą masės centrą pagal Keplerio dėsnius.

Kilmė: susidaro fragmentuojantis molekuliniams debesims, todėl nariai turi vienodą amžių ir cheminę sudėtį.

Skirstymas pagal atradimo metodą:

- Vizualinės – nariai matomi atskirai.
- Astrometrinės – nariai nematomi, bet jų judėjimas keičia sistemos padėti.
- Interferometrinės / speklinferometrinės – tiriamos specialiais optiniai metodais.
- Okultacinės – aptinkamos, kai Ménulis uždengia žvaigždę.
- Fotometrinės – aptinkamos pagal šviesio kitimą.
- Spektrinės – nustatomos pagal radialiojo greičio pokyčius.
- Užtemdomosios – nariai užtemdo vienas kitą, keisdami bendrą spindesį.
- Elipsoidinės – nariai arti vienas kito, jų forma elipsoidinė.

Taip pat yra optinės dvinarės, kurios matomas kaip pora dėl projekcijos, bet gravitacino ryšio neturi.

Evoliucija ir sąveika. Dvinarės žvaigždės dažnai susidaro fragmentuojantis molekuliniams debesims, todėl narių amžius ir cheminė sudėtis dažniausiai yra vienoda. Pagal masę skirtomos į pirminę (didesnės masės) ir antrinę (mažesnės masės) narę. Atsižvelgiant į narių atstumą, gali būti glaudžios arba tolimos poros. Glaudžiosios dvinarės sąveikauja ir veikia vienas kito evoliuciją.

Sąveikaujančios dvinarės apima Ia tipo supernovas, novas, simbiotines žvaigždes ir rentgeno dvinares. Jei nariai toli vienas nuo kito – evoliucionuoja kaip pavienės žvaigždės. Šios sistemos pasižymi įvairiais orbitiniaisiais periodais nuo kelionės minučių iki milijonų metų ir atitinkamai skirtingomis fizikinėmis ypatybėmis bei evoliucijos etapais.

Žymėjimas. Pagal žvaigždyną ir pavadinimą. Pvz., α Centauri – tai dvinarė (netgi trinarė) sistema, kur „ α “ reiškia ryškiausią žvaigždę Kentauro žvaigždyne.

Pagal katalogus. Vizualinės dvinarės dažnai žymimos Washington Double Star Catalog (WDS) numeriais. Spektrinės dvinarės – SB1 (vieno spektro linijos) arba SB2 (dviejų spektro linijų) tipo. Užtemdomosios dvinarės – dažnai įtraukiama į kintamųjų žvaigždžių katalogus, pvz., Algolis (β Persei).

Pagal komponentus. Dvinarės žvaigždės nariai žymimi kaip A ir B (pvz., Sirius A ir Sirius B). Jei sistema turi daugiau narių – naudojamos raidės C, D ir t. t.

Dvinarės žvaigždės leidžia tiesiogiai nustatyti žvaigždžių mases. Iki 2019 m. atrasta $>100\,000$ vizualinių dvinarių, bet tik ~ 1600 jų orbitos nustatytos. Istoriniai atradimai:

- Pirmoji vizualinė dvinarė – Micaras (1617).
- Pirmoji astrometrinė – Sirijus (1844).

- Pirmoji užtemdomojoji – Algolis (1669).
- Pirmosios spektrinės – aptiktos 1889 m.

8.4. Kintamosios žvaigždės

Kintamosios žvaigždės – tai žvaigždės, kurių spindesys kinta dėl įvairių priežasčių. Jos skirstomos į dvi pagrindines grupes:

1. Užtemdomosios kintamosios žvaigždės. Spindesio kitimas vyksta, kai viena žvaigždė uždengia kitą skriedama apie bendrą masės centrą (pvz., Algolis). Svarbu: jei spindesys kinta dėl planetos, tai žvaigždė nelaikoma kintamaja.

2. Fizinės kintamosios žvaigždės. Spindesys kinta dėl procesų žvaigždėje ar jos aplinkoje. Skirstomos į kelias grupes:

2.1. Pulsuojančiosios žvaigždės. Spindesys keičiasi dėl žvaigždės matmenų ir temperatūros pokyčių. Tipai:

- Skydo δ (δ Sct) – trumpaperiodės (0,5–6 h).
- Ceféjo β (β Cep) – trumpaperiodės (3–6 h), masyvios.
- Cefeidės – vidutinės masės supermilžinės (1–60 d).
- Tauro RV (RV Tau) – ilgaperiodės (30–150 d).
- Lyros RR (RR Lyr) – trumpaperiodės (0,2–2 d), būdingos kamuoliniams spiečiamams.
- Miridės – ilgaperiodės (25–400 d), netaisyklingos.
- Baltosios nykštukės – Banginio ZZ, Mergelės GW, Heraklio V777 tipai.

2.2. Sproginėjančiosios žvaigždės. Spindesys kinta dėl sprogimų ar akrecijos² procesų:

- Novos, kartotinės novos (sprogimai kartojasi kas keliasdešimt metų), nykštukinės novos – glaudžios dvinarės, medžiaga pernešama į baltąjį nykštukę.
- Supernovos – sprogimai baltosios nykštukės paviršiuje (I tipo) arba žvaigždės centre (II tipo).
- Tauro T (T Tau) – jaunos, besiformuojančios žvaigždės.

2.3. Kiti fiziniai tipai

- Banginio UV (UV Cet) – spindesys kinta dėl žybsnių chromosferoje.
- Slibino BY (BY Dra) – spindesys kinta dėl dėmių žvaigždės paviršiuje besisukant.

Žymėjimas. Kintamosios žvaigždės žymimos žvaigždyno, kuriame jos yra, pavadinimu ir viena (pradedant R), o kai kintamujų žvaigždžių skaičius didesnis – dviem (išskyrus J) lotyniškomis raidėmis atradimo eilės tvarka (R, S, ..., Z; RR, ..., RZ; SS, ..., SZ; ...; ZZ; AA, ..., AZ; BB, ..., BZ;

² Akrecija yra procesas, kurio metu žvaigžde arba kitas dangaus kūnas kaupiasi medžiagą iš savo aplinkos. Dažniausiai jis pasireiška artimose binarinėse sistemose, kur viena žvaigždė perkelia medžiagą kitai, formuodama akrecijos diską aplink žvaigždę.

...; QQ, ..., QZ), pvz. Tauro T (T Tau), Banginio UV (UV Cet). Jei kuriame nors žvaigždyne kintamųjų žvaigždžių yra daugiau negu galimų raidžių kombinacijų (334), toliau jos žymimos raide V ir eilės numeriu (pradedant V335) pvz., Heraklio V777 (V777 Her).

Istorija ir katalogai. Pirmoji kintamoji žvaigždė – Mira, atrasta 1596 m. Davido Fabriciaus. Jų katalogus įtraukta >46 000 kintamųjų žvaigždžių, bet jų yra daug daugiau.

8.5. Žvaigždžių mirgėjimas

Žvaigždės atrodo mirgančios dėl atmosferos turbulencijos. Kai žvaigždžių šviesa keliauja per Žemės atmosferą, ji praeina pro skirtinges temperatūros ir tankio oro sluoksnius. Šie sluoksniai nuolat juda ir maišosi, todėl veikia kaip netaisyklingi lėšiai. Dėl to žvaigždės spindulys nuolat lūžta ir keičia kryptį, sukeldamas mirgėjimo efektą. Pagrindiniai veiksniai

Atmosferos sluoksniai. Atmosfera sudaryta iš daugybės oro kišenių, kurios skiriasi temperatūra ir tankiu. Šilto ir šalto oro srautai nuolat maišosi.

Šviesos lūžimas (difrakcija). Kai žvaigždės šviesa pasiekia šiuos atmosferos sluoksnius, ji lūžta (keičia savo kryptį). Kadangi sluoksniai nuolat juda, šviesos lūžimo kampus taip pat nuolat kinta. Dėl nuolatinio šviesos lūžimo kampo pokyčio, mums atrodo, kad žvaigždės spindulys pasiekia mūsų akis tai stipresnis, tai silpnėsnis, sukeldamas mirgėjimo įspūdį.

Kodėl planetos nemirga? Planetos nemirga, nes jos yra daug arčiau Žemės nei žvaigždės, todėl mums jos atrodo didesnės. Planetos šviesa ateina ne kaip vienas taškas, o kaip diskelis. Nors skirtinges šviesos dalys, atkeliaujančios nuo planetos, taip pat lūžta, šis efektas néra toks ryškus, todėl mūsų akis mato bendrą, tolygesnį šviesos srautą. Dėl šios priežasties planetos atrodo tolygiai šviečiančios.

Astronomai naudoja įvairius metodus, kad sumažintų žvaigždžių ir gautų aiškesnius dangaus vaizdus:

1. Adaptyvi optika (angl. Adaptive Optics). Teleskope įmontuotas lankstus veidrodis, kuris labai greitai (šimtus ar tūkstančius kartų per sekundę) keičia savo formą pagal atmosferos iškraipymus. Sistema „kompensuoja“ atmosferos sukeliamą mirgėjimą, todėl žvaigždės vaizdas tampa daug ryškesnis ir aiškesnis. Naudoja dideli žemės teleskopai, pvz., Europos pietų observatorijoje (ESO), Kecko observatorijoje Havajuose.

2. Stebėjimai iš kosmoso. Kosminiai teleskopai (pvz., „Hubble“, „James Webb“) veikia už Žemės atmosferos ribų, todėl jų vaizdai visiškai nemirga – jie néra veikiами atmosferos.

3. Geriausią stebėjimo vietų pasirinkimas. Observatoriujos statomos aukštai kalnuose, kur oras retesnis ir stabilesnis (pvz. Atakamos dykuma Čilėje), kuo toliau nuo miestų (mažiau šviesos taršos ir oro turbulencijos).

4. Kompiuterinis apdorojimas. Iš daugybės trumpų ekspozicijų kompiuteriai atrenka geriausias ir sujungia jas į vieną aiškų vaizdą (angl. lucky imaging).

9. Tolimojo kosmoso objektais

Tolimojo kosmoso objektais (angl. Deep-Sky Objects, DSO) – tai bet kokie astronominiai objektais, esantys už Saulės sistemos ribų ir nesantys atskirose žvaigždėse (arba dvinarėse žvaigždėse).

Šis terminas dažniausiai naudojamas apibūdinti vizualiai stebimus blyškius, plika akimi sunkiai matomus ar stebimus tik per teleskopus objektus, tokius kaip žvaigždžių spiečiai, ūkai ir galaktikos. Pagrindinės giliojo dangaus objektų kategorijos, iš kurias jie skirstomi, yra šios:

1. Galaktikos (Galaxies). Tai milžiniškos žvaigždžių, žvaigždžių liekanų, tarpžvaigždinių dujų, dulkių ir nematomos tamsiosios medžiagos sistemos, sujungtos gravitacijos (išskyrus mūsų Paukščių Tako Galaktiką, kuri savaime nėra TKO, bet kitos galaktikos yra). Galaktikos dar skirstomos į kelias grupes:

1.1. Spiralinės galaktikos: Turi diską su spiralinėmis rankovėmis ir centriniu telkiniu (pvz., Andromedos galaktika M31).

1.2. Elipsinės galaktikos: Turi elipsės formą ir mažai tarpgalaktinės medžiagos ar jaunu žvaigždžių.

1.3. Netaisyklingosios galaktikos: Neturi aiškios spiralinės ar elipsinės formos.

2. Ūkai (Nebulae). Tai didžuliai tarpžvaigždiniai dujų (daugiausia vandenilio ir helio) ir dulkių debesys. Ūkai yra žvaigždžių gimimo ar mirties vietas. Ūkai dar skirstomi į kelias grupes:

2.1. Emisiniai ūkai: Švytintys dujų debesys, kuriuos įkaitina netoli esejančiu karštų jaunu žvaigždžių energija (pvz., Oriono ūkas M42).

2.1.1. [H II] sritis – tai specifinė emisinių ūkų kategorija, sudaryta iš švytinčių dujų ir plazmos debesų, aptinkamų aktyvios žvaigždėdaros regionuose. Šios sritys paprastai siekia kelis šimtus šviesmečių skersmens. Jas sudaro jonizuoto atominio vandenilio dujos (elektronų netekęs vandenilis), kurias jonizuojantja jaunos, masyvios ir karštos OB tipo žvaigždės, intensyviai spinduliuojančios ultravioletinę spinduliuotę ([H I] sritys tai neutralaus atominio vandenilio sritys, o H₂ yra molekulinio vandenilio zonas). [H II] sritys egzistuoja kelis milijonus metų, kol žvaigždiniai vėjai ir supernovų sprogimai išsklaido jose esejančias dujas.

2.1.2. Planetiniai ūkai. Žiedinės, sferinės ar kitokios formos dujų apvalkalai, kuriuos išmeta mirštanti, panaši į Saulę, žvaigždė savo gyvenimo pabaigoje.

2.1.3. Supernovos liekanos. Besiplečiantys dujų ir dulkių debesys, likę po supernovos (masyvios žvaigždės sprogimo) (pvz., Krabo ūkas M1).

2.2. Atspindžio ūkai: Dulkių ir dujų debesys, kurie atspindi netoli esejančiu ryškiu žvaigždžių šviesą (dažniausiai atrodo melsvi).

2.3. Tamsieji ūkai: Tankūs dulkių ir dujų debesys, kurie užstoja už jų esejančią šviesą ar žvaigždes (pvz., Arklinio galvos ūkas).

3. Žvaigždžių Spiečiai (Star Clusters). Tai žvaigždžių grupės, kurios gravitaciškai susijusios ir susiformavo maždaug tuo pačiu metu. Spiečiai dar skirstomi į kelias grupes:

3.1. Padrikieji (arba atvirieji) spiečiai: Jaunos žvaigždžių grupės, esančios mūsų Galaktikos diske, sujungtos silpnesne gravitacija. Juose paprastai būna šimtai žvaigždžių (pvz., Sietynas, Hiados).

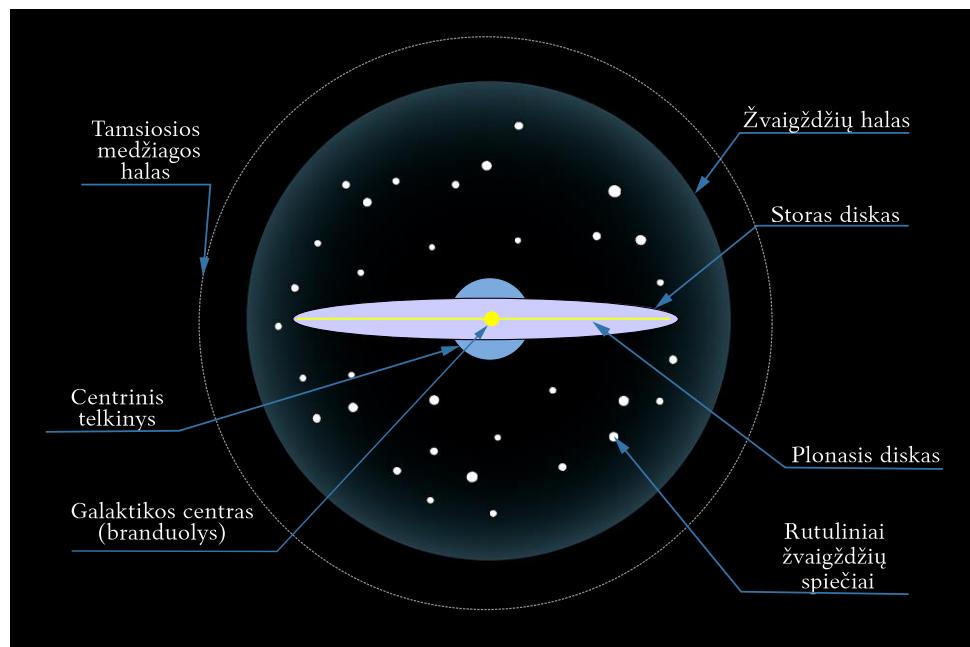
3.2. Kamuoliniai spiečiai: Labai seni, tankūs ir sferiškai susitelkę žvaigždžių spiečiai, skriejantys aplink galaktikos centrą. Juose gali būti šimtai tūkstančių ar net milijonai žvaigždžių (pvz., Heraklio spiečius M13).

9.1. Galaktikos

Galaktika – tai gravitacijos surišta žvaigždžių, tarpžvaigždinių dujų, dulkių ir tamsiosios medžiagos sistema. Skirtingos galaktikos labai skiriasi savo išvaizda, dydžiu, sudėtimi ir raida.

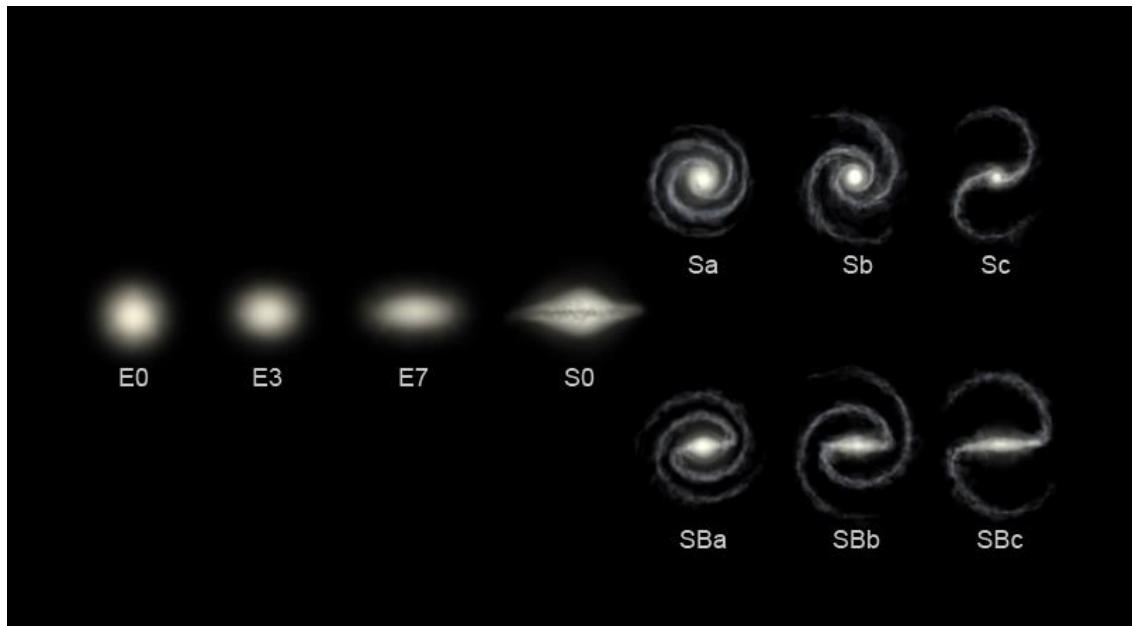
9.1.1. Galaktikų morfologija (struktūra ir forma)

Galaktikos tipiniai struktūriniai elementai pateikti sekančiame paveikslėlyje.



21 pav. Galaktikos struktūra. Autorius: GB; PD

Galaktikų struktūrų palyginimas. Žemiau pateiktoje lentelėje ir paveikslėlyje apibendrinti keli pagrindiniai morfologiniai parametrai skirtinį tipų galaktikoms.



22 pav. Galaktikų tipai. Autorius: GB; PD

5 lentelė. Galaktikų tipai.

Parametras	Spiralinės (S)	Elipsinės (E)	Lęšinės (S0)	Netaisyklingos (Irr)
Forma	Plokščias diskas su spiralėmis	Elipsoidas be struktūrų	Diskas be spiralės vijų	Be aiškios formos
Struktūra	Centrinis telkinys + spiralės vijos + diskas	Vienalytė žvaigždžių sankampa	Centrinis telkinys + diskas be vijų	Padrika struktūra
Žvaigždžių pasiskirstymas	Disko plokštumoje, tvarkingas sukimas	Atsitiktinė, laikoma gravitacijos, o ne dėl sukimosi	Tarpinė tarp spiralinės ir elipsinės	Netvarkinga, padrika
Tarpžvaigždinė medžiaga	Daug dujų ir dulkių	Labai mažai dujų ir dulkių	Beveik nėra dujų, gali būti dulkių	Gausu dujų ir dulkių
Žvaigždžių populiacija	Jaunos (I) ir senos (II)	Senos, raudonos, mažos masės žvaigždės (II)	Senos, raudonos, mažos masės žvaigždės (II)	Jaunos ir senos
Žvaigždėdara	Aktyvi	Nevyksta	Nevyksta	Labai aktyvi, epizodinė
Spalva	Melsva	Rausva	Gelsva	Melsva, netolygi
Tipinė aplinka	Laukas, grupės	Spiečių centrai	Spiečiai, grupės	Palydovai, laukas
Pavyzdžiai	Paukščių Takas, M31	M87, M32	M104, NGC 3115	LMC, SMC, IC 1613

Spiralinės galaktikos pasižymi sudėtine struktūra, kurią sudaro plokščias, slenkantis diskas ir ryškus centrinis telkinys (angl. bulge). Diską dalina viena ar kelios spiralinės vijos – šviesios, išlenktos juostos, besitęsančios nuo centrinio telkinio į išorę.

Šiose vijose koncentruojasi žvaigždės ir taržvaigždinės dujos, kuriose dėl sutankėjusios medžiagos vyksta intensyvi žvaigždėdara, formuojasi naujos žvaigždės. Branduolys paprastai sudarytas iš senesnių žvaigždžių ir neretai slepia supermasyvią juodąją skylę (pvz., Paukščių Tako centre esančią Šaulio A* juodąją skylę, kurios masė ~4 mln. M \odot).

Apie du trečdaliai spiralinių galaktikų turi skersinę juostą, vad. skersę – tiesią žvaigždžių sinkaupą, einančią per centrinį telkinį, iš kurios išeina spiralinės vijos. Tokios galaktikos žymimos SB. Manoma, kad Paukščių Takas yra SBbc tipo spiralinė galaktika – su nežymia juosta ir vidutinio atvirumo vijomis.

Tipiniai pavyzdžiai: Andromedos galaktika (M31) – artimiausia didelė spiralinė galaktika; Trikampio galaktika (M33) – mažesnė spiralinė galaktika Trikampio žvaigždyne; M51, M101, NGC 1300 ir daugybė kitų.

Spiralinės galaktikos dažniausiai yra didelės: jų skersmuo siekia dešimtis ar šimtus tūkstančių šviesmečių. Pavyzdžiu, Paukščių Tako skersmuo ~100 tūkst. šviesmečių, žvaigždžių ~300 mlrd.; Andromedos – ~220 tūkst. šviesmečių, žvaigždžių ~1 trilijonas.

Elipsinės galaktikos – tai žvaigždžių telkiniai, neturintys disco ar spiralinių vijų, o jų forma primena elipsoidą (pailgą rutulį). Pagal regimą suplotumą jos klasifikuojamos nuo E0 (beveik apvalios) iki E7 (labai pailgos). Vizualiai elipsinės galaktikos atrodo kaip tolygiai švytinti dėmė: ryškiausia centre ir palaipsniui blėstanti kraštams, be aiškių struktūrų (spiralinių, sruogų ir pan.), o žvaigždės jose pasiskirsčiusios apytikriai tolygiai.

Tarpžvaigždinės medžiagos elipsinėse galaktikose labai mažai – didžioji dalis dujų ir dulkių seniai pavirto žvaigždėmis arba buvo išstumta. Dėl to jose beveik nevyksta naujų žvaigždžių formavimasis. Populiaciją sudaro senos, blausios žvaigždės (daugiausia raudonos nykštukės ir oranžinės milžinės), todėl galaktikos turi rausvą atspalvį, priešingai nei mėlynėsnis spiralinių galaktikų diskas su jaunomis žvaigždėmis.

Elipsinės galaktikos pasižymi didžiule įvairove pagal masę ir dydį. Didžiausios žinomas galaktikos – cD tipo milžinai galaktikų spiečių centruose (pvz., M87 Mergelės spiečiuje, kurios masė $\sim 2 \times 10^{12}$ M \odot), o mažiausios – vos didesnės už žvaigždžių spiečius (nykštukinės elipsinės arba sferoidinės). Pavyzdžiu, M87 spindulys ~60 kpc, joje gali būti keli trilijonai žvaigždžių, tuo tarpu M32 – nykštukinė elipsinė galaktika, telpanti ~1 kpc spinduliu ir turinti vos keliasdešimt milijonų žvaigždžių. Dauguma elipsinių galaktikų yra senos (žvaigždžių amžius > 10 mlrd. metų) ir neturi aktyvios žvaigždėdaros.

Lęsinės (S0) galaktikos – tarpinis tipas tarp spiralinių ir elipsinių. Jos turi diską ir centrinių telkinį, kaip spiralės, tačiau neturi spiralės vijų. Iš šono lęsinė galaktika primena abipus išgaubtą lęšį arba „skraidaančią lekštę“, o žvelgiant iš priekio atrodo panaši į elipsinę – tolygiai šviečiantis ovalas.

Lėšinėse galaktikose vyrauja senos žvaigždės, o žvaigždėdara beveik nevyksta. Jos laikomos „užgesusiomis“ spiralėmis – išlaiko diskinę struktūrą, tačiau dauguma dujų jau išeikvota ar prarasta, todėl naujos žvaigždės nebesiformuoja. Dėl to lėšinės galaktikos spindi gelsvai, kaip elipsinės. Kartais jose matomas dulkių diskas (pvz., NGC5866 turi tamsų dulkių diską), tačiau žvaigždžių „kuro“ – vandenilio – ten beveik nėra.

Pagal sandarą S0 galaktika turi ryškų, išpūstą centrinių telkinijų (sferoidą), didesnį nei spiralinių galaktikų, ir blankų diską be vių. Daug lėšinių galaktikų taip pat turi skersinę juostą centre (SB0 tipas).

Manoma, kad lėšinės galaktikos susidaro, kai spiralinė galaktika netenka dujų – pavyzdžiu, galaktikų spiečiuose „nupūstos“ tarpžvaigždinio vėjo arba nustumtos dažnų gravitacinių „smūgių“. Pavyzdžiai: Sombrero galaktika (M104) – dažnai priskiriama S0 tipui (nors turi blankių vių požymių), NGC3115 (Verpstų galaktika) Sektanto žvaigždyne, NGC1023 Persėjo žvaigždyne, NGC404 – maža S0 galaktika Andromedos žvaigždyne.

Netaisyklingosios (Irr) galaktikos – tai žvaigždžių telkiniai be aiškios formos. Joms priskiriamos visos galaktikos, kurios nepatenka į spiralinių ar elipsinių galaktikų klasifikaciją. Dažnai tai mažos masės (nykštukinės) galaktikos, turinčios suardytą struktūrą. Jose gausu tarpžvaigždinių dujų ir dulkių, matomas aktyvios žvaigždėdaros sritys – ryškūs žvaigždžių spiečiai, [H II] regionai, naujų žvaigždžių židiniai.

Žvaigždės jose pasiskirsčiusios padrikai, be tvarkos: nėra nei plokščio disko, nei rutulinio centrinio telkinio – visa galaktika atrodo kaip netvarkingas šviesos lopinėlis. Daug netaisyklingų galaktikų yra Magelaniškojo tipo (Irr I) – tokios kaip Didysis ir Mažasis Magelano debesys, Paukščių Tako palydovės.

Šios galaktikos iš esmės turi nedidelius diskus su nežymia skersinės juostos struktūra ir daug jaunų žvaigždžių, tačiau neturi spiralinių vių. Kai kurios netaisyklingosios (Irr II) susidaro dėl galaktikų susidūrimų ar stiprios tarpusavio sąveikos – jų forma labai chaotiška.

Pavyzdžiu: M82 Didžiuosiuose Grįžulo Ratuose – netaisyklinga galaktika su intensyvia žvaigždėdara, kurią išprovokavo priartėjimas prie spiralės M81. NGC 1427A Kentauro spiečiuje – netvarkinga galaktika, veikiama aplinkinių galaktikų.

Nykštukinės netaisyklingosios, tokios kaip IC 1613 ar Vežėjo nykštukė, yra labai mažos (apie 10^6 – 10^8 žvaigždžių), tik šiek tiek didesnės už kamuolinius spiečius, ir laikomos primitiviasiomis, jauniausiomis Visatos galaktikomis. Netaisyklingos galaktikos dažnai spindi mėlynai – dėl gausių jaunų, masyvių žvaigždžių. Jų morfologijai apibūdinti dažnai pakanka pasakyti, kad tai „žvaigždžių debesys“ – be spiralės ar elipsės formos.

9.1.2. Galaktikų vieta Visatoje

Galaktikos Visatoje nėra išsiibarsčiusios chaotiškai – jos telkiasi į grupes, spiečius ir dar didesnes struktūras, vadinamas „super-spiečiais“. Izoliuota galaktika – retenybė; dauguma priklauso bent mažoms grupėms, sudarytoms iš kelių galaktikų, o dideli spiečiai gali jungti šimtus ar net tūkstančius galaktikų.

Pavyzdžiui, mūsų Vietinė galaktikų grupė, kuriai priklauso Paukščių Takas, susideda iš maždaug 50 galaktikų: dviejų didžiųjų spiralių (Paukščių Tako ir Andromedos), vienos mažesnės spiralinės (Trikampio) ir daugybės nykštukinių palydovių. Ši grupė yra Vietinio spiečiaus dalis, dar vadinamo Mergelės super-spiečiumi.

Galaktikų išsidėstymas erdvėje glaudžiai susijęs su jų tipu – tai padeda suprasti Visatos struktūrą ir evoliuciją.

Spiralinės galaktikos dažniau aptinkamos aplinkoje, kur tarpžvaigždinės medžiagos tankis yra mažas – jos būna pavienės arba telkiasi į mažas grupes. Pavienėmis vadiname galaktikas, kurios neturi artimų kaimynių spiralinių galaktikų. Galaktikų grupėse (tokiose kaip Vietinė galaktikų grupė) spiralinės galaktikos neretai sudaro grupės branduolių – pavyzdžiui, Andromeda ir Paukščių Takas dominuoja savo grupėje.

Dideliuose galaktikų spiečiuose (kur tūkstančiai galaktikų telkiasi į maždaug 3–10 Mpc plotą) spiralinės galaktikos vis dar randamos, bet dažniau spiečiaus pakraščiuose. Spiečių centruose vyrauja elipsoidinės galaktikos. Spiralinių galaktikų grupėse dažnai stebima ryški tarpusavio gravitacinė sąveika, kurios rezultatas – galaktikų susidūrimai. Prognozuojama, kad po maždaug 4–5 mlrd. metų Paukščių Tako galaktika susidurs su Andromedos galaktika. Šių dviejų spiralinių galaktikų susijungimo rezultatas, tikėtina, bus viena milžiniška elipsoidinė galaktika, vadina „Milkdromeda“. Taigi didelės spiralinių galaktikų poros laikui bėgant linkusios jungtis ir virsti masyviomis elipsoidinėmis galaktikomis.

Kol kas aplinkinėje Visatoje spiralinės galaktikos sudaro reikšmingą dalį ryškiausių galaktikų; jos dažnai turi palydovų – netaisyklingų nykštukinių galaktikų. Paukščių Takui priklauso keliolika tokų galaktikų, Andromedai – daugiau nei 20 mažų galaktikų, dauguma jų yra netaisyklingos arba sferoidinės.

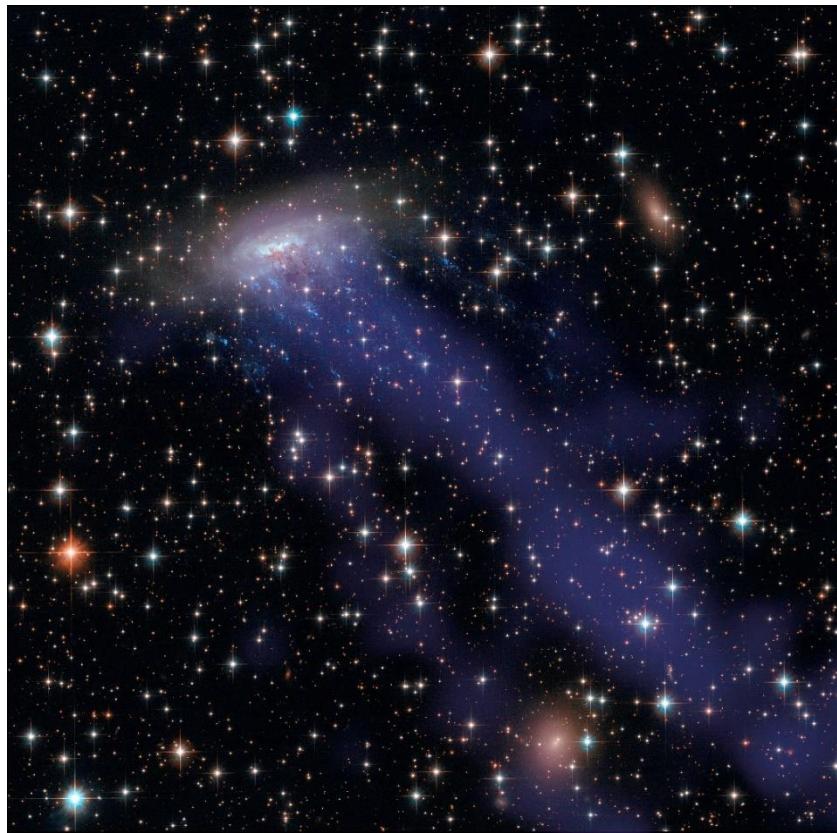
Elipsoidinės galaktikos dažniausiai aptinkamos didelėse galaktikų sankaupose. Ypač masyvios elipsoidinės galaktikos (cD tipo) randamos galaktikų spiečių centruose – pavyzdžiui, M87 užima Mergelės galaktikų spiečiaus centrą; NGC 1275 spindi Persejaus galaktikų spiečiaus šerdyje; o IC 1101, esanti Abell 2029 spiečiuje, yra viena didžiausių žinomų Visatoje (skersmuo viršija 1 mln. šviesmečių). Šios gigantės tikriausiai susiformavo susijungus daugybei kitų galaktikų spiečiaus viduje.

Apskritai galaktikų spiečiuose pastebima tendencija: spiečiaus branduolio srityje vyrauja elipsoidinės ir lęšinės galaktikos, o spiralinės galaktikos dažniau sutelktos pakraščiuose. Tai tarsi

patvirtina hipotezę, kad spiralinės galaktikos, patekusios į spiečių, palaipsniui netenka dujų ir transformuoja iš S0 arba susijungia tarpusavyje, sudarydamos elipsines galaktikas.

Mažesnės elipsinės galaktikos (pvz., masyvios nykštukinės elipsinės) taip pat būdingos spiečiams ir grupėms – jos gali būti suirusios didesnės galaktikos liekanos arba susidūrimo „nuolaužos“. Egzistuoja ir pavienių elipsinių galaktikų, bet tai retenybė – manoma, kad dauguma jų turėjo bent minimalią sąveiką su kitomis galaktikomis.

Lėšinės galaktikos savo pasiskirstymu panašios į elipsines. Jos neretai aptinkamos galaktikų spiečiuose, kur sudaro nemažą dalį „ankstyvojo tipo“ galaktikų kartu su elipsėmis. Pavyzdžiui, M32 – Paukščių Tako palydovė, nykštukinė S0 galaktika – galimai yra Andromedos disko likutis, yra pavyzdys, kaip didelė spiralinė galaktika galėjo prarasti dalį struktūros. Spiečiuose lėšinės galaktikos gali atsirasti, kai spiralinės galaktikos praranda dujas judėdamos per karštą spiečiaus dujų terpę. Tai liudija stebimos dujų uodegos kai kurių spiralinių galaktikų spiečiuose, pavyzdžiui, ESO 137-001 Pietų Trikampio spiečiuje turi galingą dujų uodegą, matomą rentgeno spektre. Lėšinės galaktikos aptinkamos ir mažesnėse grupėse, kur galėjo susiformuoti dėl ankstyvo žvaigždėdaros sulėtėjimo arba lokalinių susidūrimų. Spiečiuose jos dažnai „įsiterpia“ tarp elipsinių galaktikų, sudarydamos vientisą ankstyvojo tipo galaktikų grupę.



23 pav. Šiame ESO 137-001 galaktikos vaizde sujungti NASA/ESA Hubble kosminio teleskopo ir Chandra rentgeno observatorijos duomenys. Milžiniškas dujų srautas („uodega“), matomas tik rentgeno spektro dalyje. Šaltinis: NASA, ESA, CXC

Netaisyklingosios galaktikos paprastai yra nykštukinės ir dažnai aptinkamos kaip didesnių galaktikų palydovės. Klasikinis pavyzdys – Didysis ir Mažasis Magelano debesys (Irr I tipo), yra Paukščių Tako palydovai. Net ir Andromeda turi keletą netaisyklingų galaktikų palydovių, pavyzdžiu, IC 10 – aktyviai žvaigždes formuojanti nykštukinė netaisyklinga galaktika. Būdamos didesnių galaktikų palydovėmis, netaisyklingosios galaktikos gali patirti gravitacinius poveikius, dėl kurių jų forma iškraipoma (pavyzdžiu, Mažojo Magelano debesies diskas deformuotas Paukščių Tako traukos).

Mažesnės netaisyklingosios galaktikos dažnai aptinkamos atskirai tarp galaktikų spiečių arba tarp stambesnių galaktikų grupių. Dideliuose spiečiuose stambių netaisyklingų galaktikų beveik nėra, nes masivios galaktikos spiečiuose paprastai susiformuoja per susijungimus arba jau turi tvarkingesnę struktūrą. Tačiau galaktikų spiečių pakraščiuose aptinkama daug nykštukinių netaisyklingų galaktikų, kurios dar neįtrauktos į centrinius galaktikų spiečių regionus.

Manoma, kad ankstyvoje Visatoje dauguma jaunų galaktikų buvo netaisyklingos. Per kosminę laiko tėkmę daugelis jų suformavo diskus (virto spiralinėmis galaktikomis) arba jungėsi į didesnes galaktikas. Todėl šiandien stebimos netaisyklingos galaktikos daugiausia yra nykštukinės.

Apibendrinant, spiralinės galaktikos dominuoja mažo tarpžvaigždinės medžiagos tankio aplinkoje – jos būna pavienės arba mažuose grupėse, o elipsinės – tankiuose spiečiuose. Pastarosios dažnai užima dominuojančią padėtį, aplink turėdamos daugybę nykštukinių palydovių.

Galaktikų sąveikos ir susiliejimai yra esminis procesas. Jungiantis į grupes galaktikos keičiasi – spiralinės nyksta, daugėja S0 ir E tipo galaktikų. Manoma, kad platesniu mastu galaktikos išsidėsčiusios gijų pavidalu, tarp kurių plyti didžiulės tušumas (vad. Kosminis Tinklas). Gijų sankirtose – spiečiai, pilni elipsinių galaktikų; gijų atkarpose – mažesni spiečiai ir galaktikų grupės su spiralėmis; o atskirose gijoje ar tušumų pakraščiuose – pavienės mažos galaktikos.

9.1.3. Amžius, formavimasis, evoliucija ir dinamika

Galaktikų amžius suprantamas dvejopai:

1. kada susiformavo pati galaktika kaip sistema;
2. kokio amžiaus yra joje esančios žvaigždės.

Daugeliu atvejų šie du aspektai susiję: jei galaktika susidarė anksti ir vėliau neturėjo reikšmingos žvaigždėdaros, jos žvaigždės bus labai senos; jei formavimasis vyko ilgiau arba turėjo kelis etapus, žvaigždžių amžiai bus įvairūs.

Apibendrintai, elipsinės ir lęšinės galaktikos laikomos „senomis“ – jų žvaigždžių populiacijos amžius viršija 10 mlrd. metų. Tuo tarpu spiralėse ir netaisyklingose galaktikose yra daug jaunų komponentų: žvaigždžių amžius svyruoja nuo kelių milijonų iki kelių šimtų milijonų metų, nuolat

papildomas naujomis. Visatos amžius yra apie 13,8 mlrd. metų – elipsinės galaktikos susiformavo gana netrukus po Didžiojo sprogimo, o spiralinės galaktikos – vėliau.

Dabartinis Galaktikų formavimosis mokslinis supratimas vadovaujasi Λ CDM kosmologiniu modeliu (Lambda-Cold Dark Matter). Pagal jį pirmiausia susidarė tamsiosios medžiagos halai, vėliau jie užsipildė barionine medžiaga (dujomis), ir tik tada pradėjo formuotis žvaigždės. Procesas vyko hierarchiškai: pirmos susiformavo mažos protagalaktikos, kurios jungėsi į didesnes struktūras. Šis scenarijus vadinamas „iš apačios į viršų“ – daug smulkų elementų formavo stambius objektus.

Vienas iš pagrindinių klausimų, kurį astronomai bando įminti: kiek galaktikų yra stebimoje Visatoje? Ilgą laiką manyta, kad atsakymas žinomas apytiksliai, remiantis tolimojo kosmoso nuotraukomis. Tačiau 2016 m. tyrimas³, pagristas galaktikų masių pasiskirstymo analize per kosminj laiką, pateikė naują atsakymą, iš esmės pakeitusi mūsų supratimą apie Visatos mastą ir evoliuciją. Astronomai apskaičiavo, kad stebimojoje Visatoje yra mažiausiai 2 trilijonai (2×10^{12}) galaktikų.

Kad suvoktume šio skaičiaus mastą, palyginkime jį su ankstesniais vertinimais – apie 200 milijardų. Naujasis skaičius yra beveik dešimt kartų didesnis, nei galėtume suskaičiuoti hipotetinėje viso dangaus apžvalgoje, atliktoje tokiu gyliu kaip Habilo „Ultra Deep Field“ nuotrauka. Tai reiškia, kad daugiau nei 90 % Visatos galaktikų yra per blankios ir per tolimos, kad jas pamatybtume.

Tyrimas atskleidė, kad galaktikų tankis kosmose nuo ankstyvųjų laikų nuolat mažėjo. Matematiškai šis mažėjimas apytiksliai aprašomas kaip atvirkščiai proporcingas Visatos amžiui ($\phi T \sim t^{-1}$). Pagrindinė priežastis – galaktikų susijungimai. Per milijardus metų mažesnės galaktikos susilieja, sudarydamos didesnes struktūras. Kiekvienas toks susijungimas sumažina bendrą individualių galaktikų skaičių.

Tyrimas parodė esminę detalę: mažos masės galaktikų skaičius laikui bėgant mažėja, o didelės masės sistemų (masė $> 10^7$ Saulės masių) skaičius – didėja. Tai neginčijamas įrodymas, kad mažesnės galaktikos yra „suvalgomos“ ir paverčiamos didesnėmis. Pagrindiniai šio kosminio kanibalizmo dalyviai yra būtent tos mažos, nematomos galaktikos, kurios sudaro didžiąją Visatos dalį.

Šis procesas toks dominuojantis, kad jo poveikis nusveria naujų, matomų galaktikų atsiradimą dėl žvaigždėdaros. Iš tiesų, joks kitas žinomas procesas, išskyrus susijungimus ir akreciją (kai didesnė galaktika gravitaciškai pritraukia ir sugeria mažesnę), negali paaiškinti šio reiškinio.

Elipsinių galaktikų susidarymas ilgai buvo neaiškus. Klasikinis modelis teigė, kad pirmiausia susidaro galaktikų diskai, o vėliau jie suyra į elipsines galaktikas. Tačiau ALMA radioteleskopo stebėjimai rodo, kad milžiniškos elipsinės galaktikos galėjo susiformuoti iš karto. Ankstyvojoje Visatoje (prieš 10–12 mlrd. metų) daugelis intensyviai žvaigždes gaminančių galaktikų buvo ne plokštūs diskai, o kompaktiški sferoidai. Tai reiškia, kad vyko intensyvūs, bet labai trumpi

³ The Evolution of Galaxy Number Density at $z < 8$ and its Implications; Christopher J. Conselice, Aaron Wilkinson ir kiti; <https://arxiv.org/abs/1607.03909>

žvaigždėdaros protrūkiai (starburst) mažame tūryje, kurie nulėmė elipsinei galaktikai būdingą formą.

Sprendžiant iš kosminių dulkijų pasiskirstymo modelių, šias ankstyvas galaktikas dujų srautai ir galaktikų jungimasis sutraukdavo į didelio tankio centrinės sritis, kur žaibiškai gimdavo daugybė žvaigždžių. Toks mechanizmas leido per mažiau nei 1 mlrd. metų suformuoti elipsinių galaktikų branduolius. Dalis jų vėliau dar labiau išaugo susijungdamos tarpusavyje.

Spiralinį galaktikų formavimasis siejamas su laipsnišku diskų augimu. Kai tamsiosios medžiagos halo pritrauktos dujos turi netolygų jūdesio kiekio momentą, jos sukdamasis suformuoja besisukančią diską. Kol yra gausu dujinio „kuro“, galaktikos diske vyksta pastovi žvaigždėdara, formuojasi spiralinės galaktikos struktūra. Galaktika tolydžio auga pritraukdama aplinkinę medžiagą arba mažesnes kaimynes. Spiralinės galaktikos gali išsaugoti tvarkingą diską milijardus metų, jei nepatiria didelių trikdžių. Paukščių Takas – puikus pavyzdys: jis formavosi per daugelį epizodų, pritraukdamas nykštukines galaktikas (ko gero, jo halo žvaigždės yra senovinių prarytų nykštukų liekanos).

Galaktikos skersės (angl. bar) atsiradimas laikomas brandaus galaktinio disko požymiu. Skersės, kaip maišytuvas, „maišo“ galaktikos diską, traukdamos dujas link centro, kas ilgainiui gali suformuoti centrinį telkinį ar net paversti spiralinę galaktiką į lęšinę, kai diskas netenka struktūrinių vių.

Netaisyklingųjų galaktikų evoliucija gali vykti dviejų kryptimis. Mažos, izoliuotos netaisyklingosios galaktikos pamažu išeikvoja dujas per kelis žvaigždėdaros epizodus ir, jų nelikus, virsta nykštukinėmis elipsinėmis galaktikomis. Tuo tarpu tos, kurios patenka į didesnių galaktikų gravitacinių laukų, dažnai tampa jų dalimi (pvz., Magelano Debesys po ~2 mlrd. metų tikriausiai susilies su Paukščių Taku, papildydami jo diską).

Daugelis netaisyklingųjų galaktikų tiesiog atspindi pereinamąjį susiliejimo su kitomis galaktikomis būseną. Pavyzdžiui, dviejų spiralinių galaktikų susidūrimas iš pradžių atrodo kaip chaotiškas darinys (kaip šiuo metu stebimos Antenų galaktikos, NGC 4038/4039), o vėliau, jungimosi procesams nurimus, susiformuoja vientisas elipsinis objektas.

Taigi netaisyklingosios galaktikos dažnai žymi tarpinį etapą – tai arba „statybinė medžiaga“ (primityvios nykštukės, vėliau tapsiančios didesnio disko dalimi), arba galaktikų susidūrimo padarinys (pvz., spiralinėms galaktikoms jungiantis į elipsinę galaktiką).

Galaktikų dinamika: skirtiniems tipams būdingas savitas žvaigždžių judėjimo pobūdis.

Spiralinės galaktikos. Jų diske žvaigždės juda beveik apskritiminėmis orbitomis aplink centrą – visa galaktika sukasi tarsi milžiniškas sūkurys. Dėl šios rotacijos stebima specifinė sukimosi kreivė: toliau nuo centro esančios žvaigždės išlaiko panašų greitį (išorinės žvaigždės juda greičiau, nei turėtų vien dėl matomos masės traukos). Tai yra vienas pagrindinių tamsiosios materijos halo egzistavimo įrodymų. Disko viduje sukimasis yra tvarkingas ir vyksta vienoje plokštumoje, tuo tarpu centrinio telkinio (angl. bulge) žvaigždės juda labiau chaotiškomis orbitomis, primenančiomis

elipsinių galaktikų dinamiką. Aplink diską esančiame hale seni objektai (kamuoliniai spiečiai, senos žvaigždės) juda įvairiomis kryptimis.

Elipsinės galaktikos. Jose dominuoja vadinamoji „slėgio palaikoma“ dinamika – žvaigždės juda įvairiakrypčiai (anizotropiškai), panašiai kaip dujų molekulės inde. Iš esmės nėra vieningos sukimosi plokštumos. Nors daugelis elipsinių galaktikų (ypač mažesnės) turi nežymų bendrą sukimąsi, jis yra nepalyginamai lėtesnis nei spiralinių galaktikų. Dėl to elipsinių galaktikų formą lemia statistinis žvaigždžių orbitų pasiskirstymas.

Lėšinės galaktikos. Jos užima tarpinę poziciją tarp spiralinių ir elipsinių galaktikų. Kadangi šios galaktikos turi gerai išreikštą diską, sukimasis Jame yra tvarkingesnis nei elipsinėse galaktikose. Tačiau lėšinės galaktikos pasižymi dideliu centriniu telkiniu, kuriame vyrauja netvarkingas judėjimas.

Netaisyklingosios galaktikos. Jų dinamika labai priklauso nuo kilmės.

Mažos nykštukinės netaisyklingosios galaktikos dažnai neturi aiškios rotacinių struktūros, o žvaigždės bendrame gravitaciniam lauke (hale) juda chaotiškomis orbitomis. Visgi kai kurios jų turi diskų užuomazgų (pvz., Magelano Debesyse aptinkamas diskinis sukimasis, nors ir iškreiptas).

Stipriai saveikaujančiose galaktikose (kurių forma netaisyklinga dėl susidūrimų) matomi žvaigždžių srautai neįprastomis trajektorijomis. Pavyzdžiuui, galaktikos M82 („Cigar“) centre stebimi statmenai iš disco kylančių dujų ir jaunu žvaigždžių vėjo srautai.

9.1.4. Žvaigždžių evoliucija galaktikose

Galaktikų spalvos ir šviesis tiesiogiai priklauso nuo jose dominuojančių žvaigždžių masės bei amžiaus.

Spiralinės ir netaisyklingosios galaktikos. Jos pasižymi gausia masyvių, trumpaamžių žvaigždžių (O ir B spektrinių klasių) populiacija. Šios žvaigždės ryškiai šviečia mėlyna spalva, tačiau gyvena trumpai – vos kelis milijonus metų. Kad galaktika išliktų mėlyna ir šviesi, joje turi nenutrūkstamai vykti žvaigždėdara – būtent tai ir stebima spiralinių galaktikų vijose.

Elipsinės galaktikos. Jose beveik visos masyvios žvaigždės jau seniai sprogo kaip supernovos. Liko tik ilgaamžės, mažos ir vidutinės masės žvaigždės (geltonosios nykštukės, raudonosios milžinės). Kadangi šios žvaigždės yra vėsesnės ir ne tokios ryškios, elipsinės galaktikos bendras optinis vaizdas yra blankesnis ir raudonesnis, net jei joje yra labai daug žvaigždžių.

Spektrai ir cheminė sudėtis (metališkumas). Stebint galaktikų spektrus, išryškėja aiškūs skirtumai:

Spiralinių galaktikų spektre gausu ultravioletinės ir mėlynos spinduliuotės, kurių skleidžia jaunos žvaigždės. Jų diskuose esančios jaunos žvaigždės yra **metalingos** (cheminių elementų, sunkesnių už helį, gausa artima Saulei ar net didesnė), nes jos susiformavo iš dujų, praturtintų ankstesnių kartų žvaigždžių.

Elipsinių galaktikų spektras pasižymi stipriomis metalų sugerties linijomis, tačiau yra neryškus trumpųjų bangų (UV) srityje, nes trūksta karštų jaunų žvaigždžių.

Metaliskumo skirtumai. Čia situacija priklauso nuo galaktikos masės. Mažų elipsinių (nykštukinių) galaktikų žvaigždės dažnai yra senos ir neturtingos metalais (II populiacija, turinti tik ~1–10 % Saulės metalų kiekio). Tačiau didžiosios elipsinės galaktikos yra išimtis – jos evoliucijos pradžioje patyrė tokį intensyvų žvaigždėdaros sprogimą, kad jų centrinės dalys yra labai praturtintos metalais.

Nykštukinės netaisyklingosios galaktikos. Jų metaliskumas dažnai yra ypač žemas, nes dujos mažai perdirbtos. Pavyzdžiui, galaktikoje I Zw 18 metalų kiekis nesiekia nė 2 % Saulės kiekio.

Galaktikų evoliucija yra glaudžiai susijusi su jų tarpusavio sąveika. Susijungimas (angl. *merger*) – kai dvi ar daugiau galaktikų susilieja į vieną – yra laikomas vienu svarbiausių mechanizmų, transformuojančiu galaktikų formas ir žvaigždžių populiacijas.

Galaktikų evoliucijos metu susijungimas yra esminis mechanizmas, keičiantis galaktikų morfologiją (formą). Dažniausiai tikėtini šie susijungimo scenarijai:

Spiralinė galaktika + Spiralinė galaktika → Masyvi elipsinė galaktika. Dvi panašios masės spiralinės galaktikos susidūrusios iš esmės suardo savo diskus (orbitos sujaukiamas). Dujos sparčiai sunaudojamos intensyvioje žvaigždėdaroje, todėl galiausiai lieka sferinės formos sistema, kuriai trūksta dujų atsargų.

Spiralinė galaktika + Maža nykštukinė galaktika → Didesnė spiralinė galaktika. Šiuo atveju didesnioji spiralinė galaktika išlaiko savo disco formą, o mažesnioji yra praryjama (accretion). Didžioji galaktika pasipildo žvaigždėmis ir tamsiąja materija.

Elipsinė galaktika + Elipsinė galaktika → Dar masyvesnė elipsinė galaktika. Toks susijungimas sukuria dar masyvesnę, struktūrišką panašią elipsinę galaktiką.

Spiralinė galaktika + Spiralinė galaktika (sudētingos aplinkybės) → Lėšinė galaktika. Svarbu paminėti, kad sudētingos aplinkybės (pavyzdžiui, galaktikų spiečiaus tanki aplinka) leidžia dviem spiralinėms galaktikoms susijungti į lėšinę galaktiką (S0). Šis procesas padidina bendrą žvaigždžių masę ir suformuoja naują disco struktūrą, bet be spiralinių vijų. Naujoji sistema greitai suranda pusiausvyrą.

Praeities susijungimai: Mūsų Paukščių Tako galaktika per savo istoriją patyrė ne vieną susiliejimą. Kamuolinių spiečių cheminė sudėtis ir orbitos išduoda bent dvi didesnes prarytas nykštukines galaktikas: Šaulio nykštukinę elipsinę galaktiką ir Gaia–Enceladus galaktiką (pastarasis įvykis, nutikęs prieš maždaug 8–11 milijardų metų, laikomas didžiausiu žinomu galaktikų susiliejimu Paukščių Tako istorijoje).

Ateities susijungimas: Didžiausia ateities drama – Andromedos ir Paukščių Tako galaktikų susijungimas. Tikimybė, kad šis įvykis įvyks per artimiausius 10 mlrd. metų, yra apie 50% (anksčiau manyta, kad tai įvyks per 5 mlrd. metų su beveik 100% tikimybe). Jeigu susijungimas įvyks,

susiformuos viena milžiniška galaktika, greičiausiai elipsinė, kuriai nebebus būdingas galaktinis diskas.

9.1.5. Žvaigždžių sudėtis ir cheminės savybės

Nagrinėjant galaktikų žvaigždžių amžių ir cheminę sudėtį, vartoamos **žvaigždžių populiacijų** sąvokos (skirstymas pagal **metališkumą** – sunkesnių nei helis elementų gausą). Metalšumas nusako žvaigždės amžių – kuo mažesnis metalšumas, tuo senesnė žvaigždė. Detaliau apie tai rašoma skyriuje „Žvaigždės“.

Galaktikų tipai pasižymi skirtingu I ir II populiacijų santykiu.

6 lentelė. I ir II populiacijų santykis pagal galaktikų tipus

Galaktikos tipas	Dominuojanti populiacija	Būdingas metalšumas	Apibūdinimas
Spiralinės	I populacija	Aukštas	Didžioji masės dalis ir šviesis sukaupti jaunose, metalais turtingo disko žvaigždėse. II populacija sudaro halą ir centrinių telkinį.
Netaisyklingosios	I populacija	Vidutinis/Žemas	Nors vyrauja jaunos žvaigždės (I populacija), dėl mažos masės ir lėto evoliucijos tempo bendras metalšumo lygis dažnai būna žemas.
Elipsinės	II populacija	Vidutinis/Aukštas	Dominuoja senos žvaigždės (II populacija). Didelėse elipsinėse galaktikose, kur žvaigždėdara vyko intensyviai ir greitai, bendras metalšumas centre yra aukštas, nepaisant žvaigždžių amžiaus. Mažos elipsinės galaktikos yra aiškiai metalais neturtingos.
Lėšinės	I ir II populiacijos	Vidutinis	Turi ir I populacijos pėdsakų diske, ir ryškių senų, II populacijos žv. centriniame telkinyje bei hale.

Spiralinėse galaktikose gausu **I populacijos** žvaigždžių. Jų spiralės vijos nusėtos mėlynomis, masyviomis, metalų turtingomis žvaigždėmis (O, B spektrų) bei spindinčiomis emisijos ūko sritimis, kuriose ką tik susiformavo naujos žvaigždės. Pvz., Oriono žvaigždžių grupė Paukščių Take yra tipiška I populacijos dalis – labai jaunos, vos kelių mln. metų, spindinčios dujas ionizuojančia UV spinduliute. Spiralinio disko dujos yra praturtintos metalais daugelio ankstesnių supernovų. Saulės aplinkos tarpžvaigždinių dujų metalingumas yra beveik Saulės lygio ($Z \sim 1 Z_{\odot}$).

Disko pakraščiuose (toliau nuo centro) metalų kiekis mažėja – Paukščių Tako išorinėse srityse žvaigždžių metalšumas nukrenta iki $\sim 0,3$ Saulės. Spiralinės galaktikos centriniame telkinyje – vyrauja II populacijos žvaigždės: senos (~ 10 mlrd. m.) ir kiek mažesnio metalšumo (pvz., mūsų Galaktikos centrinio telkinio vidutinis $[Fe/H] \sim -0,2$, t. y. $\sim 60\%$ Saulės metalšumo Z_{\odot}).

Spiralinės galaktikos halo žvaigždės – gryna II populiacija: labai metalų neturtingos ($[Fe/H] \sim -1$ iki -2 ir mažiau) ir seniausios (>12 mlrd. m.) – jos susiformavo pačioje galaktikos aušroje.

Taigi spiralinės galaktikos turi dviejų populiacijų žvaigždžių: seną (Centrinis telkinys, halas) ir jauną (diskas). Galaktikų spalvą lemia diske esančios žvaigždės – vėlyvo tipo (mėlynesnės).

Netaisyklingose galaktikose dažnai matome **I populiacijos** dominavimą (jei aktyvi žvaigždėdara – stebima žvaigždžių spiečių ir OB grupių žvaigždžių gausa). Tačiau kai kurios netaisyklingos galaktikos gali beveik visai neturėti I populiacijos, nes ten nevyko žvaigždėdara (tada jos blankios, raudonos, panašios į nykštukines elipsines galaktikas). Bendrai, netaisyklingos nykštukinės galaktikos dažnai laikomos labai lėtos evoliucijos kosminiai objektais: jose supernovų mažai, tad metalų kiekiai itin maži (pvz., Mažojo Magelano Debesies galaktikos metališkumas $\sim 0,2 Z_{\odot}$, Didžojo Magelano Debesies galaktikos $\sim 0,5 Z_{\odot}$, o tokiose kaip I Zw 18 nykštukinė netaisyklinga galaktika – tik $\sim 0,02 Z_{\odot}$). Jos suteikia užuominą, kaip atrodė regimosios Visatos galaktikos pirmaisiai ~ 2 mlrd. metų.

Elipsinėse ir lęsinėse galaktikose beveik visos žvaigždės priklauso **II populiacijai**. Tai reiškia, kad jų cheminė sudėtis skurdoka metalais, ir jos visos labai senos. Tipinių elipsinių galaktikų žvaigždžių metališkumas $[Fe/H]$ apie $-0,5$ (30 % Saulės) su nemaža statistine skliauda; tačiau didelėse elipsinėse aptinkama dviejų žvaigždžių populiacijų – viena yra turtingesnė metalais (galbūt nuo intensyvaus žvaidždžių sprogimų centriniame telkinyje), o kita – neturtingesnė metalais (halo žvaigždės).

Pavyzdžiui, milžinė M87 turi “raudonųjų” žvaigždžių ($\sim Z_{\odot}$) centrą ir “mėlynųjų” silpnesnių žvaigždžių ($0,2\text{--}0,3 Z_{\odot}$) aureolę, bet visos jos yra senos žvaigždės.

Spalviškai elipsinės atrodo raudonos, tačiau iš tiesų jų integruotoje šviesoje net $\sim 10\text{--}20\%$ gali sudaryti melsvos žvaigždės – karštos helio deginimo stadijos senos žvaigždės, joms būdinga intensyvi UV spinduliuotė. Hubble tyrimai UV diapozone parodė, kad elipsinių galaktikų centrali spinduliuoja UV kaip tik dėl šių senų ir karštų žvaigždžių buvimo).

Lęsinės galaktikos labai artimos elipsinėms sudėtimi – jų spektrai nerodo jokių jaunu žvaigždžių požymių, tik raudonas milžines ir nykštukes. Pavyzdžiui, didžioji lęsinė galaktika NGC 3115 turi žvaigždžių, kurių amžius $\sim 10\text{--}12$ mlrd. metų ir $[Fe/H] \sim -0,3$ (50 % Saulės). Kartais lęsinėse galaktikos aptinkama truputis dujų, kurios gali sudaryti sąlygas menkų naujų žvaigždžių gamybai, bet tai labiau išimtis (pvz., NGC 404 turi šiek tiek [H I] dujų ir negausų jaunu žvaigždžių žiedą).

9.1.6. Tamsioji medžiaga ir juodosios skylės.

Visų tipų galaktikų didelę masės dalį sudaros tamsiosios medžiagos halai. Už optiškai matomo disco ar elipsės ribų, galaktiką gaubia nematomas tamsiosios medžiagos regionas, kurio masė dažnai 5–10 kartų virsija visų žvaigždžių masę.

Tamsioji medžiaga (kartais naudojamas terminas nematomoji medžiaga arba tamsioji materija) – hipotetinė nežinomas sudėties medžiaga (arba astronominiai objektai), kuri nespinduliuoja ar neatspindi elektromagnetinių bangų, tačiau jos buvimas yra atrandamas iš gravitacinio poveikio matomai (šviečiančiai arba sugeriančiai šviesą) medžiagai.

Pirmą kartą šią problemą paminėjo amerikiečių kilmės šveicarų astronomas Fritz Zwicky mėgindamas paaiškinti anomalias galaktikų sukimosi kreives.

Tamsiosios medžiagos sudėtis nežinoma, tačiau manoma, kad ji gali susidëti iš masyvių neutrinų, silpnai sąveikaujančių masyvių dalelių, aksionų, šaltų nykštukų, planetoidų arba nešviečiančių dujų. Tačiau dabartiniai stebéjimai ir naujausios Visatos evoliucijos teorijos labiausiai linksta link modelių, kuriuose pagrindinės tamsiosios medžiagos komponentės yra kažkokios nežinomas elementariosios dalelės, vadinamos bendru nebarioninės medžiagos pavadinimu.

Nykstukinėse galaktikose tamsiosios medžiagos dominavimas yra ypač didelis (jos gali turëti 100+ kartų daugiau tamsiosios medžiagos nei žvaigždžių masës), tuo tarpu milžinėse tamsiosios medžiagos tenka $\sim 5\times$ žvaigždžių masei. Šis halas neturi tiesioginės įtakos šviesai ir chemijai, bet įtakoja galaktikų dinamiką (pvz., palaiko didelius spiralinių išorinių sričių sukimosi greičius).

Be to, didžiųjų galaktikų centruose aptinkamos supermasyvios juodosios skylės (SMBH) – beveik kiekviena, masyvesnė nei $\sim 10^{10} M_\odot$ galaktika, savo centre turi supermasyvią juodąją skylę.

Mokslinė fantastika juodąsias skyles dažnai vaizduoja kaip pabaisas – kosminius siurblius, kurie be atrankos praryja viską, kas pasitaiko jų kelyje. Tačiau tokie astrofizikai, kaip Janna Levin⁴, tikslina vyraujančius populiarius mitus.

Juodosios skylės yra vietas visatoje, o ne „daiktai“. Dažniausiai juodoji skylė apibrëžiama kaip „objektas, toks tankus, kad net šviesa negali iš jo ištrūkti“. Nors tai iš dalies tiesa, pasak Jannos Levin, šis apibrëžimas yra klaidinantis. Esminė mintis, griaunanti mūsų intuiciją, yra ta, kad juodoji skylė – tai ne daiktas, o vieta.

Ivykių horizontas, riba, kurią peržengus kelio atgal nebéra, néra koks nors fizinis paviršius. Tai tiesiog taškas tuščioje erdvėje. Jei jį kirstumėte, neatsitrenktumėte į jokį paviršių ar materiją. Tiesą sakant, jūs galbūt net nepastebétumėte, kad vyksta kažkas blogo. Jūs tiesiog plauktumėte per tuščią erdvę. Šią idėją Janna Levin paaiškina stulbinančiai paprasta analogija: Tam tikra prasme tai nebūtų dramatiškiau, nei ižengti į medžio šešelį. Tai tiesiog šešelis.

Šis paprastas požiūrio pakeitimas – nuo „daikto“ prie „vietos“ – iš esmës keičia mūsų išivaizdavimą, kaip galëtume sąveikauti su juodąja skyle.

Mūsų Saulė yra pavojingesnė už tokios pat masës juodąją skylę. Tai gali skambeti neįtikėtinai, tačiau jūs būtumėte saugesnis šalia Saulės masës juodosios skylės, nei esate šalia mūsų pačių Saulės.

⁴ https://en.wikipedia.org/wiki/Janna_Levin

Jūs būtumėte sudegintas 1,5 milijono kilometrų atstumu nuo Saulės. Tuo tarpu aplink Saulės masės juodąją skylę galėtumėte saugiai skrieti orbita vos 30 kilometrų atstumu. Priežastis paprasta: Saulė pavojinga ne tik dėl savo gravitacijos, bet ir dėl savo agresyvaus paviršiaus – karščio ir spinduliuotės. O juodoji skylė tėra gravitacija tuščioje erdvėje. Tai paneigia mitą, kad juodosios skylės viską „išiurbia“. Jų gravitacija nėra stipresnė už tokios pat masės žvaigždės. Jei mūsų Saulė staiga pakeistų juodoji skylė, Žemės orbita išslyktų stabili.

Juodosios skylės viduje kryptis į centrą tampa laiko kryptimi. Peržengus įvykių horizontą, erdvė ir laikas, palyginti su išoriniu pasauliu, „išsikreipia“ arba „apsisuka“. Mūsų intuicijai įprasta kryptis į erdvės centrą (singularumą) stebėtojui, esančiam juodosios skylės viduje, tampa kryptimi pirmyn laike.

Būtent ši koncepcija paaiškina, kodėl pabėgti neįmanoma. Jūs negalite apsisukti ir palikti juodosios skylės dėl tos pačios fundamentalios priežasties, dėl kurios negalite keliauti atgal laiku. Judėjimas link singularumo tampa neišvengiamas, kaip ir judėjimas laiku į ateitį.

Susiduriančios juodosios skylės – galingiausi reiškiniai visatoje po Didžiojo sprogimo.

LIGO observatorijos (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)⁵ atradimas, užfiksavęs dviejų juodųjų skylių susidūrimą, atskleidė vieną galingiausių visatos reiškinių.

Galia buvo tiesiog stulbinanti: per vieną tokį susidūrimą energija, atitinkanti trijų Saulių masę, buvo paversta gravitacinėmis bangomis (pagal $E=mc^2$). Kad suvoktume mastą, šio įvykio galia buvo didesnė už bendrą visos šviesos, sklindančios iš visų žvaigždžių regimojoje visatoje, galią.

Svarbu pabrėžti, kad šios gravitacinės bangos susidaro virpant erdvei aplink juodąsias skyles, kai šios susilieja.

Juodosios skylės yra stebetinai paprastos – lyg fundamentaliosios dalelės. Egzistuoja teorema, teigianti, kad juodosios skylės neturi jokių unikalių, sudėtingų savybių – jokių iškilimų, kalnų ar randų. Juodąją skylę galima visiškai apibūdinti vos trimis savybėmis: mase, elektriniu krūviu ir sukiniu⁶.

Šis faktas yra nepaprastai svarbus. Skirtingai nuo unikalios planetos ar žvaigždės, dvi juodosios skylės, turinčios tas pačias tris savybes, yra visiškai identiškos, lygiai taip pat, kaip du elektronai yra identiški. Tai reiškia, kad juodosios skylės gali būti ne tik astrofizikos reiškiniai – mirusios žvaigždės – bet ir fundamentali visatos dalelė, kaip ir elektronai.

Šią gilią mintį Janna Levin apibendrina taip: ...jos yra artimesnės fundamentaliomis dalelėms nei astrofiziniam objektams. Šis suvokimas pakeičia juodąsias skyles iš kosminiu katastrofų liekanų į galbūt pačios visatos audinio dalį.

Spiralinės galaktikose (pvz., mūsų Galaktika, M31) supermasyvios juodosios skylės masė sudaro $\sim 10^6\text{--}10^8 \text{ M}_\odot$, elipsinėse gali siekti $\sim 10^9\text{--}10^{10} \text{ M}_\odot$ (M87 centre – $\sim 6,5 \text{ mlrd. M}_\odot$)

⁵ <https://en.wikipedia.org/wiki/LIGO>

⁶ <https://lt.wikipedia.org/wiki/Sukinys>

Supermasyvios juodosios skylės veikia galaktikose vykstančius procesus. Jų aktyvumo fazėje formuojasi kvazarai ir aktyvūs galaktikų branduoliai.

Kvazaras yra aktyvaus galaktikos branduolio tipas. Aktyvus galaktikos branduolys (AGN) yra ypač ryškus galaktikos centrinis regionas, kuriame dominuoja šviesa, skleidžiama dulkių ir dujų, patenkančių į supermasyvią juodąją skylę galaktikos centre. Šis akrecijos procesas verčia AGN skleisti intensyvią spinduliuotę visame elektromagnetiniame spektre – nuo radijo bangų iki gama spindulių – todėl jis yra daug ryškesnis nei visa likusi galaktika kartu sudėjus.

Galaktikos, kuriose yra tokie energetiniai centralai, vadinamos aktyviosiomis galaktikomis. AGN yra vieni iš ryškiausių nuolatinių elektromagnetinės spinduliuotės šaltinių visatoje, o jų spinduliuotė gali apimti srautus ir vėjus, kuriuos formuoja juodosios skylės veikla.

Ši energija kaitina galaktikoje esančias dujas, jų tankis mažėja, tai stabdo žvaigždėdaros procesus didelėse elipsinėse galaktikose.

Spiralinių galaktikų žvaigždėdaros procesų ciklai kartoja ir aktyvumas trunka ilgai, ten žvaigždėdaros procesai vyksta nuolatos, elipsinių galaktikų žvaigždėdaros procesai sustoja – arba vienu ciklu buvo išnaudotos žvaigždėdarai reikalingos medžiagos, arba žvaigždėdaros procesai sustoja jo dėl AGN poveikio.

9.1.7. Naujausių tyrimų rezultatų apžvalga

Pastaraisiais metais, ypač pradėjus veikti James Webb infraraudonujų spinduliuų kosminiam teleskopui (JWST) 2022 m., galaktikų tyrimuose įvyko tikra revoliucija. Keletas svarbiausių atradimų ir rezultatų:

Ankstyviausios Visatos galaktikos. JWST giliai pažvelgė į kosminę aušrą ir rado galaktikų, kurios susiformavo vos per pirmuosius 300–500 mln. metų po Didžiojo sprogimo. Pvz., galaktika GN-z11 dabar laikoma viena seniausių stebetų galaktikų – jos šviesa pasiekė mus iš $\sim 13,4$ mlrd. metų senumo Visatos. Be to, aptiktas didelis jonizuoto helio debesis galaktikos hale, kurį galėjo suformuoti hipoteticinės III populiacijos žvaigždės (pirmosios Visatos žvaigždės iš gryno vandenilio ir helio), kurių bendra masė siektų $\sim 600\,000$ Saulės masių ir spinduliuotų 20 trilijonų kartų stipriau už Saulę.⁷

Visatos „küdikystės“ galaktikos yra mažos, netvarkingos, bet nepaprastai ryškios ir masyvios kaip tokiam ankstyvam laikui. Pagal ankstesnius modelius, pirmosios galaktikos turėjo būti mažytės ir blankios, pamažu augančios tamsiosios medžiagos įtakoje. JWST parodė, kad kai kurios jau per pirmąjį pusmilijardį metų spėjo sukaupti daug masės ir tapti didelėmis. Faktas, kad pirmosios

⁷ „Webb Unlocks Secrets of One of the Most Distant Galaxies Ever Seen“;
<https://science.nasa.gov/missions/webb/webb-unlocks-secrets-of-one-of-the-most-distant-galaxies-ever-seen/>

galaktikos „užaugo“ labai greitai, galbūt dėl efektyvaus masinių žvaigždžių gimimo ir greito juodujų skylių augimo, kelia papildomus klausimus apie Visatos evoliuciją.

Tolima spiralinė galaktika „Zhúlóng“⁸. Ilgą laiką manyta, kad spiralinės galaktikos yra vėlyvesnės Visatos produktas; ankstyvų jų aptikta vos keletas.

Tačiau 2024 m. JWST duomenyse netikėtai rasta puiki tolimos spiralinės galaktikos pavyzdys: galaktika pavadinimu Zhúlóng. Mus pasiekia jos vaizdas, kai Visatai buvo ~1 mlrd. metų. Zhúlóng turi aiškias, tvarkingas spiralės vijas, didelį diską ir net branduolį – kaip jaunesnės didelės SA tipo galaktikos.

Jos masė panaši į Paukščių Tako, skersmuo ~62 tūkst. šviesmečių. Įdomu, kad šios galaktikos branduolys jau užgesęs (žvaigždėdara ten sustojusi, branduolys raudonas), o diskas vis dar formuoja žvaigždes. Tai atitinka vadinančią „iš vidaus į išorę“ galaktikos augimą: pirma susiformuoja centras, po to plečiasi diskas.

Zhúlóng atveju toks procesas vyko labai anksti. Ji laikoma tolimiausia žinoma spiraline galaktika iki šiol. Šis atradimas parodo, kad spiralinės struktūros atsirado anksčiau nei manyta – greičiausiai nedideli diskai ir net spiralinės vijos galėjo susiformuoti jau <1 mlrd. metų amžiaus Visatoje.

JWST spektroskopinė analizė rodo, kad Žúlóng jau turi palyginti aukštą metalų (sunkiųjų elementų) kiekį žvaigždėse, reiškiantį greitą cheminę evoliuciją per trumpą kosmologinį laiką, bei liudijantį greitą žvaigždžių ir galaktinio disko susiformavimą.

JWST rezultatai rodo, kad vidutiniškai net ~50% ankstyvųjų galaktikų turi diskinę ar spiralinę struktūrą, kas yra didesnė dalis, nei rodė ankstesni Hubble duomenys.

Tai keičia galaktikų evoliucijos modelius, kurie anksčiau teigė, kad ankstyvoje visatoje dominavo netaisyklingų galaktikų susijungimai – JWST rodo, kad galaktikų formavimasis buvo labai greitas, ir daugelis jaunų galaktikų labai anksti suformavo galaktinius diskus. Šis atradimas įrodo, kad galaktikos kai kuriais atvejais galėjo susiformuoti ir stabilizuotis greičiau, ir kelia klausimų apie ankstyvos Visatos sąlygas bei tamsiosios materijos vaidmenį galaktikų evoliucijoje.

Galaktikų spiečių anatomija (COSMOS-Web)⁹. COSMOS-Web yra didelis James Webb kosminio teleskopoo (JWST) tyrimas, skirtas tirti ankstyvą Visatą: rejonizacijos erą (200 000–1 mlrd. metų po Didžiojo sprogimo), masinę galaktikų evoliuciją pirmuosius 2 mlrd. metų ir tamsiosios materijos ryšį su žvaigždine mase. 2025 m. paskelbta, kad JWST programoje COSMOS-Web aptikta rekordiškai didelę tolimų galaktikų grupių ir spiečių imtis – 1 678 proto-spiečiai nuo ~12 mlrd. iki 1 mlrd. metų senumo Visatoje.

⁸ „PANORAMIC: Discovery of an Ultra-Massive Grand-Design Spiral Galaxy at z~5.2“; Mengyuan Xiao, Christina C. Williams ir kiti; <https://arxiv.org/abs/2412.13264>

⁹ „Mapping the Universe’s Earliest Structures with COSMOS-Web“; <https://science.nasa.gov/missions/webb/mapping-the-universes-earliest-structures-with-cosmos-webb/>

Tai leidžia tyrėjams sekti, kaip galaktikos formuoja grupes ir kaip aplinka veikia galaktikas 12 mlrd. metų eigoje. Pirminiai rezultatai patvirtino anksčiau žinotą tendenciją: tolimoje praeityje (≥ 10 mlrd. m.) galaktikos grupėse buvo daugiau netaisyklingos formos galaktikų, kurios gausiai formavo žvaigždes, o vėlesniais laikais (pavyzdžiu, prieš 5 mlrd. m.) žvaigždėdara daug kur sustojusi, galaktikos įgavo simetriškesnę formą (spiralės, elipsės)..

Tai padeda geriau suprasti, kada ir kaip spiralinės galaktikos virsta lėšinėmis galaktikomis (aptikti tarpiniai variantai skirtinguose Visatos formavimosi etapais) ir kaip auga galaktikų masė galaktikų grupėse.

Be to, detaliau suprantama taip vadinamo „kosminio tinklo“ sandara: kaip saveikauja galaktikų grupės, kaip jungiasi, formuodamos stambesnius darinius.

Milžiniškų elipsinių formavimosi mīslė. Viena iš ilgam intrigavusių problemų – kaip susiformuoja labai masyvios elipsinės (kokios aptinkamos galaktikų spiečių centruose).

2024 m. Nature žurnale paskelbt¹⁰ ALMA teleskopų rezultatai suteikė svarbių užuominų. Išnagrinėjus >100 galaktikų dulkių pasiskirstymą $\sim 3\text{--}6$ mlrd. metų po Didžiojo sprogimo laikotarpyje, nustatyta, kad aktyviai žvaigždes formuojančios tuometinės galaktikos buvo netikėtai kompaktiškos – dulkių (ir atitinkamai dujų) debesys susigrūdė mažame regione, primenančiam elipsės centrinių telkinį o ne išsidėstę diske. Šie centriniai telkiniai – tai intensyvios žvaigždėdaros židiniai.

Modeliai parodė, kad taip atsitinka, kai dujų srautai ir smulkios galaktikos sutraukiamos sferoidinės žvaigždėdaros srities centro (centrinio telkinio) link. Ten per trumpą laiką susidaro elipsinėms galaktikoms būdinga žvaigždžių sankarpa. Vėliau tokia galaktikos forma nesikeičia į diską, bet gali pritraukti kitų galaktikų likučius – tapti masyvią elipsine galaktika. Praėjus $\sim 3,3$ milijardų metų po Didžiojo sprogimo, susiformuoja kompaktiška pasyvi galaktika, jos evoliucija tēsiasi. Per ateinančius ~ 10 milijardų metų ji auga daugiausia dėl „susiliejimų su mažesnėmis galaktikomis. Šis procesas didina galaktikos dydį, bet nebeženkliai keičia jos žvaigždinę masę. Taip galiausiai susiformuoja milžiniškos elipsinės galaktikos, kurias stebime šiandienos Visatoje. Šis mechanizmas, pavadintas “sferoidinė žvaigždėdara”, papildo klasikinę didelių elipsinių galaktikų evoliucijos teoriją.

¹⁰ „In situ spheroid formation in distant submillimetre-bright galaxies“; Qing-Hua Tan, Emanuele Daddi ir kiti; <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08201-6>

9.2. Emisiniai ūkai

9.2.1. Apibrėžimas ir morfologija.

Emisiniai ūkai – tai tarpžvaigždinių jonizuotų dujų debesys, švytintys matomąja šviesa dėl šalia esančių ryškių žvaigždžių spinduliuotės. Emisiniams ūkams, be [H II] regionų yra priskiriamai planetiniai ūkai ir supernovų liekanos. Planetiniai ūkai švyti dėl centrinės žvaigždės, kuri nusimetė išorinius sluoksnius, branduolio virsmo į baltajį nykštuką, ultravioletinės spinduliuotės, kuri jonizuoją dujas. Supernovų liekanos švyti dėl didėlės energijos procesų, kurie kaitina ir jonizuoją aplinkines dujas. Planetiniai ūkai ir supernovų liekanos toliau bus aptarti atskirai. Emisino ūko spektras pasižymi ryškiomis emisijos linijomis, atitinkančiomis konkrečių elementų spinduliuavimą (užuot rodęs ištisinį žvaigždžių spektrą). Pavyzdžiui, ryškiausia vandenilio linija – jau minėta H-alfos linija – išduoda, kad ūke gausu vandenilio; pagal šios ir kitų linijų ryškumą sprendžiama apie ūką sudarančių dujų temperatūrą ir tankį. Spektroskopija leido atrasti ir neįprastus reiškinius: XX a. pradžioje Orono ūko spektre pastebėtos nežinomas žalias linijos privertė manyti atradus naują elementą „nebuliumą“ – vėliau paaikėjo, kad tai tiesiog dvigubai jonizuoto deguonies spinduliuotė ypatingai retoje ir karštoje ūko dalyje. Taip pat spektroskopiškai Orono ūke buvo aptiktos ir protoplanetinės sistemos – jaunų žvaigždžių diskai, kuriuos išduoda specifinės spektrinės ypatybės. Žinomų emisinių ūkų pavyzdžiai:

Didysis Orono ūkas (M42) – artimiausias ir bene garsiausias emisinis ūkas, esantis Orono žvaigždyne ~1500 šviesmečių atstumu nuo Žemės. Plika akimi ji galima ižiūrėti kaip neryškų „žvaigždutės“ pavidalo debesį po Orono juosta – iš tiesų tai milžiniška žvaigždžių formavimosi sritis. Orono ūke formuojasi šimtai naujų žvaigždžių; jo centre spiečiasi Trapecijos spiečius – keturių masyvių jaunų žvaigždžių grupė, kurios galinga spinduliuotė apšviečia ūką. Dėl palyginti nedidelio atstumo ir ryškumo šis ūkas yra puiki vieta stebeti žvaigždėdaros procesą iš arti – čia tiesiogiai fiksujami protoplanetiniai diskai ir besiformuojančios planetų sistemos.

Erelio ūkas (M16) – emisinis ūkas Gyvatės žvaigždyne (netoli Skydo), nutolęs apie 7000 šviesmečių. Šis ūkas išgarsėjo ikoniška nuotrauka, kurioje matomi vadinamieji „Kūrinijos stupai“ – milžiniški švytinčių dujų ir dulkių kolonos debesys. Tie tamsūs, šviesą sugeriantys stupai slepia viduje gimstančias žvaigždes, o aplinkinė ūko dalis švyti nuo netoliese esančio spiečiaus jaunų karštų žvaigždžių. Erelio ūkas astronomams svarbus kaip aktyvios žvaigždėdaros regionas, kuriame galima stebeti ankstyvuosius masyvių žvaigždžių formavimosi etapus ir tai, kaip šių žvaigždžių spinduliuotė bei žvaigždžių plazmos srautai („vėjai“) veikia aplinkinę medžiagą.

Lagūnos ūkas (M8) – didelis raudonai švytintis ūkas Šaulio žvaigždyne, nutolęs ~5200 šviesmečių ties Paukščių Tako centrine sritimi. Jis matomas kaip blanki ūkanota dėmelė netoli Galaktikos centro (aiškiau ižiūrimas per žiūronus ar teleskopą). Lagūnos ūkas yra žvaigždžių gimimo regionas, kuriame gausu dujų ir dulkių – čia susiformavęs žvaigždžių spiečius NGC 6530 savo jaunų žvaigždžių ultravioletine spinduliuote jonizuoją aplinkinį debesį, todėl šis ryškiai švyti. Nuotraukose

Lagūnos ūke matomas tamsios „properšos“ – tai tankesni dulkių debesys, metantys šešėli, ir šviesūs dujų sūkuriai; visa tai byloja apie intensyvų žvaigždžių susidarymo procesą.

Karinos ūkas (NGC 3372) – milžiniškas emisinis ūkas Karinos žvaigždyne (matomas Pietų pusrutulyje), esantis maždaug už 7500 šviesmečių nuo mūsų. Tai vienas didžiausių ir šviesiausių Paukščių Tako ūkų, savo dydžiu kelis kartus pranokstantis Oriono ūką. Karinos ūkas išsiskiria sudėtinga struktūra – Jame matyti ir švytinčių dujų „sienos“, ir tamsios dulkių juostos, o viena centrinė ūko dalis vadinama Rakto skylės ūku dėl savitos formos. Šiame ūke susitelkės labai masyvių žvaigždžių spiečius (pvz., žvaigždžių grupės Trumpler 14 ir Trumpler 16) apšviečia visą ūką. Čia taip pat randama viena masyviausių Galaktikos žvaigždžių – Eta Carinae, kurios milžiniški spinduliuotės kiekiai ir prieš ~150 metų įvykės didysis sprogimas (žiūrint iš Žemės, Eta Karinos žvaigždė tuomet trumpam tapo antra pagal ryškumą danguje) suformavo unikalius ūko bruožus. Dėl savo mastelio ir aktyvumo Karinos ūkas laikomas svarbiu objektu tyrinėti, kaip formuojasi ir evoliucionuoja labai masyvios žvaigždės, bei stebeti jų poveikį aplinkinėms dujomis (smūgines bangas, „burbulus“ ūko viduje ir pan.).

Tarantulo ūkas (30 Doradus) – gigantiška [H II] sritis Didžiajame Magelano Debesyje (gretimoje nykštukinėje galaktikoje), matoma Auksinės Žuvies žvaigždyne pietinio pusrutulio danguje. Šis ūkas yra nutolęs net apie 160 000 šviesmečių, tačiau yra toks šviesus, kad būtų plika akimi matomas, jei būtų Paukščių Tako galaktikoje. Tarantulo ūkas gavo savo vardą dėl vaizdų nuotraukose primenančios voro formos. Jis pasižymi ekstremalia žvaigždėdara – tai aktyviausias žvaigždžių „židinys“ visoje Vietinėje galaktikų Grupėje. Ūko centre spiečiasi itin masyvių karštų žvaigždžių spiečius (R136), kurio skleidžiama energija tokia didelė, kad jeigu Tarantulo ūkas būtų tiek pat arti kaip Oriono ūkas, nakties danguje jis švestu taip ryškiai, kad formuotų žemėje esančių objektų šešėli. Šiame ūke 1987 m. sprogo naujausia žinoma pastarujujų šimtmečių supernova (SN 1987A), patvirtindama, kad Tarantulo ūke gimsta daug masyvių žvaigždžių, kurios gyvena trumpai ir dramatiškai žūva. Dėl savo atstumo ir intensyvumo Tarantulo ūkas leidžia mokslininkams pažvelgti tarsi į ankstyvosios Visatos žvaigždėdaros epochas, kai galaktikose vyko audringi žvaigždžių formavimosi procesai.

9.2.2. [H II] sritys.

Labai karštos jaunos žvaigždės (dažniausiai O arba B spektrinės klasės) skleidžia intensyvią ultravioletinę spinduliuotę, kuri jonizuoją ūko dujas – išplėšia elektronus iš atomų. Vėliau šiemis laisviems elektronams rekombinuojant (vėl prisijungiant) prie protonų, atominis vandenilis grįžta į neutralų būvę ir išspinduliuoja regimosios šviesos fotonus – taip dujų debesis ima švytėti. Tokie švytintys ūkai paprastai žymi aktyvios žvaigždėdaros zonas, dar vadinas **[H II] sritimis** ([H I] sritis tai neutralaus atominio vandenilio sritys, o H₂ yra molekulinio vandenilio zonas).

[H II] srityse jaunos masyvios žvaigždės savo ultravioletine spinduliuote sukuria aplink save didžiulus jonizuoto vandenilio regionus. Tipinė tokį ūko dujų temperatūra siekia ~ 10000 K ($\sim 9700^\circ\text{C}$), o pagrindinė sudedamoji dalis – vandenilis (apie 90% dujų). Vandenilio atomo elektronui grįztant į pagrindinę energijos lygmenį, emisiniuose ūkuose itin stipri H-alfa (Hydrogen-alpha) spektro linijos spinduliuotė (656 nm bangos ilgio), kuri suteikia ūko dujoms būdingą ryškiai raudoną spalvą. Dėl to dauguma emisinių ūkų plika akimi ar teleskopo nuotraukose matomi rausvi.

Jei jonizuojančios žvaigždės yra ypač karštos (skleidžia itin energingus fotonus), ūkuose gali būti jonizuoti ir sunkesni elementai – pavyzdžiui, deguonies jonai O³ (dvigubai jonizuotas deguonis) spinduliuoja žalsvai, helio jonai – melsvai. Dėl šių procesų emisiniai ūkai neretai nusidažo įvairiais atspalviais: vyrauja raudona, bet išimaišo ir žalsvos ar melsvos sritys priklausomai nuo dujų sudėties bei žvaigždžių spinduliuotės intensyvumo.

9.2.3. *Planetiniai ūkai*

9.2.4. *Apibrėžimas ir morfologija*

Planetinis ūkas – tai **išsiplečiantis jonizuotų dujų apvalkalas**, susiformavęs, kai mirštanti vidutinės masės žvaigždė (0.8–8 M \odot) nusimeta savo išorinius sluoksnius ir tampa baltuoju nykštuku. Pavadinimas „*planetinis*“ yra istorinė klaidinanti nuoroda: senieji astronomai per teleskopus matė juos kaip diskus, primenančius planetų skritulius, bet su planetomis jie neturi nieko bendra. Tipinis planetinis ūkas atrodo kaip švytintis žiedas arba burbulas aplink blankią žvaigždele centre. Iš tiesų centrinė žvaigždė yra žūstanti žvaigždė (būsimas baltasis nykštukas), kurios intensyvi UV spinduliuotė priverčia spindėti aplink ją besiplečiančius dujų apvalkalus.

Morfologinė įvairovė. Planetiniai ūkai garsėja *gausybė formų*. Klasikinis pavyzdys – žiedo formos ūkas (pvz., Žiedo ūkas Lyroje, M57) – beveik apskritas, su ryškesniais kraštais. Tačiau dauguma planetinių ūkų nėra tobulai sferiniai: maždaug 80% turi asimetrišką arba daugiapolę struktūrą. Pavyzdžiui, bipoliniai ūkai turi dvi priešingas skiltis (primena smėlio laikrodį – pvz., *Drugelio ūkas NGC 6302*), elipsiniai – ištęstą ovalą (pvz. *Sraigės ūkas*), o *netaisyklingi* gali būti su keistais mazgais ir sruogomis (pvz., *Katės Akies ūkas* turi sudėtingą skiautinių raštą).

Kompleksiškumas. Hubble teleskopo stebėjimai (nuo ~ 1990 m.) parodė, kad daugelis planetinių ūkų turi koncentrinių žiedų, spindulių, bangų formos struktūras. Pvz., Pietų Krabo ūkas turi kryžmines struktūras, Katės akies ūkas (NGC 6543) – koncentrinius dujų sluoksnius, dujų čiurkšles, mazgus. *Planetinių ūkų formų priežastys* yra svarbi kosminių tyrimų sritis: manoma, kad dvinarės žvaigždės, žvaigždiniai vėjai ir magnetiniai laukai lemia šių ūkų neįprastas formas. Naujausi JWST stebėjimai tiesiogiai tai patvirtino – paaiškėjo, kad net atrodytu tvarkingi žiediniai ūkai (pvz., Pietinis Žiedas, NGC 3132) slepia sudėtingas struktūras, susiformavusias esant kelioms sąveikaujančioms žvaigždėms. Apibendrinant: planetinio ūko „portretas“ – tai *švytinti tuščiavidurė*

apvalkalo struktūra, kuri gali būti simetriška žiedo pavidalo, arba turi kompleksines struktūras. Vidurys dažnai atrodo tuščias, nes Jame spindi tik karštas mažas branduolys.

Dydis. Planetinio ūko tipinis skersmuo ~0.5–1 šviesmečio (pvz., dauguma yra kelių trilijonų kilometrų dydžio). Senesni ūkai gali išsiplėsti iki kelių šviesmečių, bet tada tampa labai blankūs. Sraigės ūkas (NGC 7293) yra vienas artimiausiu — ~2.5 šviesmečio skersmens.

Spalvos. Dažnai planetiniai ūkai nuotraukose atrodo spalvingi: tai dėl įvairių jonizuotų dujų spinduliuavimo. Žalias/cyano atspalvis paprastai nuo dvigubai jonizuoto deguonies [O III] linijos (~500 nm), raudonas – nuo vandenilio H α (656 nm) ir N II linijų, mėlynas – He II ir O III. Žmogaus akimi pro teleskopą dauguma atrodo blankiai pilkšvi/žalsvi.

9.2.4.1. *Vieita Visatoje*

Planetiniai ūkai randami **galaktikų diskuose ir haluose**, ypač ten, kur yra senesnių žvaigždžių populiacijų. Mūsų Galaktikoje jų pasiskirstymas gana vienodas diske – jie priklauso plonajam diskui (kai kurių kilmės vieta yra galaktikų halai, pvz., aptinkami nykštukinių sferoidinių galaktikų pakraščiuose). Kadangi motininės žvaigždės – nuo ~1 iki 8 M \odot (vidutinės masės žvaigždės, panašios į Saulę, arba kiek masyvesnės), jos būdingos tiek galaktikos disko, tiek iš dalies galaktiko halų populiacijai (pvz., planetinių ūkų rasta kamuoliniuose spiečiuose, bet retai).

Planetinių ūkų skaičius Paukščių Take siekia kelis tūkstančius – nuolat atrandami nauji. Kitose galaktikose aptinkami **ekstragalaktiniai planetiniai ūkai** padeda nustatyti tolimų galaktikų cheminę sudėtį. Pvz., stebint planetinių ūkų populiacijas Andromedos galaktikoje, planetiniai ūkai aptiki nutolusiouose galaktikos haluose. Mūsų galaktikoje daug planetinių ūkų koncentruota netoli galaktikos centro (centrinis telkinys – branduolų gaubiantis sferoidinis regionas), taip pat disko plokštumoje.

Planetiniai ūkai paprastai egzistuoja pavieniai (ne grupėse), nes jų motininės žvaigždės nustumia aplinkinę medžiagą. Tačiau kai kurie gali persidengti su tamsiaisiais ūkais.

9.2.4.2. *Formavimasis, amžius ir evoliucija*

Planetinio ūko formavimasis – tai žvaigždės mirties procesas. Kai maždaug 1–8 Saulės masių žvaigždė pasiekia velyvą raudonojo milžino stadiją (asimptotinės milžinės šaką, *AGB*), ji pradeda intensyviai mesti išorinius sluoksnius. Per dešimtis tūkstančių metų žvaigždė netenka iki ~50–80% savo masės, sudarydama aplink save dulkių ir dujų debesis. Kai branduolyje baigiasi kuras (helis virsta anglimi, deguonimi), žvaigždė susitraukia į karštą branduolį. Kai jo temperatūra pasiekia >30 000 K, jis pradeda skleisti intensyvų ultravioletinį spinduliuavimą, kuris jonizuoja anksčiau išmestą dujų apvalkalą. Tuomet tas apvalkalas nušvinta kaip planetinis ūkas – matome jį švytinčią įvairiuose spektro dalyse.

Planetinis ūkas – gan trumpa žvaigždės gyvenimo fazė. Skaičiuojama, kad ūkas ryškiai spindi vos $\sim 10\ 000\text{--}50\ 000$ metų, kol išsiplečia ir atvėsta tiek, kad dujos nebéra pakankamai jonizuotos. Vėliau, kai centrinis branduolys (vadinamas planetinio ūko branduoliu) atvėsta iki tokio lygio, kad nebeišskiria pakankamai UV, ūkas pradeda blėsti ir tampa nematomas (dujos išsisklaido).

Evoliuciniai etapai. 1) *Priešplanetinis ūkas*: kol centrinė žvaigždė dar nepakankamai karšta, mes matome tik atspindžio ar infra raudonųjų spektro spinduliuotės ūką, sudarytą iš išmestų dulkių. 2) *Jaunas planetinis ūkas*: centrinis branduolys <100000 K, ūkas kompaktiškas. 3) *Brandus planetinis ūkas*: centrinis branduolys ypač karštas (100–150 tūkst. K), ūkas $\sim 0.1\text{--}0.3$ pc spindulio, ryškiausias ($H\alpha$ ir [O III] spinduliuose). 4) *Išsiskaidantis ūkas*: kai branduolys tampa baltuoju nykštuku (<30 tūkst. K), apvalkalo dujų atomai sparčiai rekombinuoja, ūkas plečiasi $\sim 0.5\text{--}1$ pc, blanksta. 5) *Liekanos / dispersija*: Dujos ūke juda į išorę. Tipinis apvalkalo plėtimosi greitis yra apie 10–40 km/s, tačiau žvaigždės „vėjas“ iš centrinės baltosios nykštukės gali pasiekti iki 1000 km/s greitį.

Ūkui plečiantis, dujų tankis žymiai sumažėja. Ūko išmesta medžiaga susimaišo su esama tarpžvaigždine medžiaga, taip prisdėdama prie galaktikos cheminės evoliucijos ir suteikdama žaliavų ateities kartų žvaigždėms bei planetoms formuotis, paliekant tik karštą baltąjį nykštuką.

Visas matomo, švytinčio ūko dispersijos procesas yra trumpalaikis, trunkantis tik kosmologiškai trumpą laiką, kol dujos tampa pernelyg išsiskaidžiusios ir blankios, kad būtų galima stebėti jų švytėjimą.

Dažnai planetiniame ūke matomi keli plėtimosi epizodai: pvz., JWST NIRCam vaizde NGC 3132 Pietinio Žiedo ūko pakraščiuose aptikta daugybinių koncentrinių žiedų struktūra, tartum medžio rievės. Tai rodo, kad mirštanti žvaigždė turėjo periodišką masės netekimą. Tokie žiedai atspindi pulsacijas ar orbitinius ciklus praeityje.

Dinamika. Planetinio ūko dujų plėtimosi tipinis greitis $\sim 20\text{--}30$ km/s, bet srautai gali skrieti ir >100 km/s. Pradinė fazė (dar nejonizuotos dujos) – išmetamas lėtesnis ir didesnio tankio dujų srautas („vėjas“), vėliau jį pasiveja greitas, karštas ir mažesnio tankio „vėjas“ iš atidengto branduolio, sukeldamas smūginį frontą, kuris gali suformuoti apie žvaigždę vidinę tuštumą ir aplink ją ryškų anksčiau išmestų tankesnių dujų ir dulkių žiedą. Tai vadinamasis „dvitankių vėjų“ modelis: lėtas tankus „vėjas“ iš asymptotinės milžinės šakos žvaigždės (arba AGB¹¹), o paskui greitas, bet mažesnio tankio „vėjas“ iš branduolio, kuris sukuria koncentrišką, sluoksniuotą dujų ir dulkių struktūrą.

Dėl šių procesų planetiniuose ūkuose aptinkamos „mazgų“ formos struktūros ir koncentrinės dujų ir dulkių sankupos (pvz., Sraigės ūko „kometiniai mazgeliai“ – dujų mazgai su dulkių uodegomis, galbūt suformuotomis smūginės bangos). Galiausiai, ūko dujos sklaidosi, integruojaasi į tarpžvaigždinę medžiagą, praturtindamos ją įvairiais cheminiais elementais.

¹¹ Asymptotic giant branch



24 pav. Sraigės ūko „kometiniai mazgeliai“

Šaltinis: NASA, NOAO, ESA, the Hubble Helix Nebula Team, M. Meixner (STScI), and T.A. Rector (NRAO) - <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2003/11/image/f/>; PD.

9.2.4.3. Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis

Planetinį ūką suformuoja vidutinės masės žvaigždė, panaši į Saulę (arba kiek masyvesnė, iki $\sim 8 M\odot$). Šios žvaigždės prieš ūko stadiją buvo raudonoji milžinė (AGB), o ūko formavimosi metu tampa planetinio ūko branduoliu – besiformuojančiu baltuoju nykštuku. Branduolys yra labai karštas (50–150 tūkst. K) ir labai kompaktiškas (spindulys $\sim 0.01 R\odot$), spinduliuoja intensyvų UV spektrą. Jo šviesis paprastai keliais tūkstančius kartų viršija Saulės.

Daugelis branduolių spinduliuoja rentgeno spindulius. Esminis dalykas – *daugelio planetinių ūkų centre yra ne vienišos žvaigždės, o dvinarės arba net kelių žvaigždžių sistemos*. Ilgai tai buvo hipotezė, bet JWST patvirtino, kad, tarkime, Pietinio Žiedo ūke identifikuota net keturių ar penkių žvaigždžių sistema. Būtent dvinarės ar daugianarės žvaigždės paaiškina, *kodėl* ūkas formuojas ne kaip paprastas sferinis kevalas, o su sluoksniais ir žiedais: kompanionė žvaigždė „suardo“ simetriją, nukreipdama masės netekimą tam tikromis kryptimis.

Planetinių ūkų, turinčių vienišą centrą, formos linkusios būti sferiškesnės (bet tokiai planetinių ūkų yra mažuma $\sim 20\%$).

Cheminė sudėtis. Planetiniai ūkai yra branduolinės sintezės sukurtų medžiagų sankaupos. Mirštančios žvaigždės branduolyje susiformavo daug anglies, azoto, neonu, sieros ir kitų elementų,

kurių dalį žvaigždėje vykstanti konvekcija iškélė į žvaigždės paviršių. Todėl ūko dujos yra labiau praturtintos elementais sunkesniais už helį, lyginant su tarpžvaigždine medžiaga.

Pavyzdžiui, AGB žvaigždės pagamina didelius kiekius anglies (jei tai vad. anglies žvaigždė – jos C ir O sudėties proporcija tampa $C/O > 1$).

Planetiniame ūke randame spektrines linijas: [He] II 4686 Å (helis), [O III] 5007 Å (deguonis), [N II] 6584 Å (azotas), [S II] (siera), [Ne III], [Ar III] ir t. t. – tai rodo, kad ūko dujos prisotintos šių elementų. JWST stebėjimai aptiko, kad kai kuriuose ūkuose, pvz., NGC 6302, tarpinėse zonose gausu policiklinių aromatinių angliavandenilių (PAH) – spėjama, kad PAH susiformuoja dėl įkaitusių dujų smūginių bangų. Be to, randama inertinių dujų neonu, argono. Ūkų cheminės sudėties ir pasiskirstymas yra svarbus rodiklis, kurį astrofizikai naudoja žvaigždės pirminio metališkumo nustatymui ir žvaigždės evoliucijos modeliui nustatyti.

Planetiniai ūkai atlieka didžiulį vaidmenį Galaktikos cheminėje evoliucijoje, praturtindami tarpžvaigždinę medžiagą elementais, kuriuos sukuria vidutinės masės žvaigždės. Manoma, kad didžioji dalis anglies ir azoto, esančio Galaktikoje, susidarė planetiniuose ūkuose.

9.2.4.4. Naujausių tyrimų apžvalga

Pietinio Žiedo ūko (NGC 3132) tyrimas (2022–2025 m.): James Webb kosminis teleskopas (JWST) jau per pirmuosius veiklos metus pateikė įspūdingų duomenų apie keletą planetinių ūkų. Vienas jų – Pietinio Žiedo ūkas (NGC 3132).

2022 m. liepos 12 d. tarp pirmųjų JWST atskleistų vaizdų buvo NGC 3132 ūko nuotraukos NIRCam ir MIRI kameromis. Nors INIRCam instrumentas (Near Infrared Camera, spektrinė sritis: artimoji infraraudonoji sritis, 0,6–5 mikrometrai) vaizde ūkas atrodė panašiai kaip anksčiau – elipsė su koncentriškais žiedais, – MIRI instrumentas (Mid-Infrared Instrument, spektrinė sritis: vidutinė infraraudonoji sritis, 5–28 mikrometrai) rodė ryškų raudoną tašką centre, atitinkantį mirštančią žvaigždę, kuri būdama $\sim 130\,000$ K temperatūros neturėtų spinduliuoti IR.

Greitai paaiškėjo, kad IR spinduliuotę skleidžia ne pati mirštanti karšta žvaigždė (ji turėtų spinduliuoti UV/mėlynai), o įkaitusios dulkės aplink ją. Iškilo klausimas, iš kur dulkės aplink tokią karštą žvaigždę? Paaiškėjo, kad tai spinduliuoja kita žvaigždė, kuri randasi šalia centrinės, dulkių diskas susiformavo dėl šių žvaigždžių tarpusavio sąveikos apvalkalo numetimo metu¹².

Išanalizavus duomenis, Pietiniame Žiede identifikuotos net kelios žvaigždės: be matomos žvaigždės (UV spinduliuotės šaltinis), yra artima, bet nematoma palydovė, dėl kurios sąveikos atsirado dulkių diskas (ir stebima IR spinduliuotė). Be to, dar yra ir trečia žvaigždė, dėl kurios

¹² The Binary and the Disk: The Beauty is Found within NGC3132 with JWST; Raghvendra Sahai¹, Valentin Bujarrabal², Guillermo Quintana-Lacaci ir kiti; <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aca7ba/pdf>

poveikio susiformavo koncentriškos ūko struktūros. Yra spėjama, kad dar galimai egzistuoja ir 4-a, ir 5-a žvaigždės, kurios yra nematomos JWST instrumentų.

Šis atradimas svarbus, nes tiesiogiai, su konkretais įrodymais buvo įsitikinta, jog planetinį ūką dažnai formuoja kelių žvaigždžių sąveika.

NGC 6302 (Drugelio ūkas) ir NGC 7027 tyrimai (2023–2024 m.): JWST atskirai tyrė du sudėtingus ūkus – bipolinį NGC 6302 ir NGC 7027. Rezultatai, pristatyti 2023 m., parodė, kad NGC 6302 viduje JWST MIRI instrumentas aptiko dulkių žiedą aplink ūko centrą¹³.

2025 m. liepos NASA paskelbė JWST planetinio ūko NGC 6072 vaizdą ir analizę¹⁴. Šis ūkas pasirodė esantis daugiapolis, t. y. turintis sluoksnines struktūras keliomis skirtingomis kryptimis. Tai rodo, jog ūko evoliucijos eigoje įvyko bent du žvaigždžių apvalkalo numetimai, skirtingomis kryptimis. Tai liudija ir dviejų žvaigždžių buvimą –astronomai mano, kad NGC 6072 centre yra dvinarė žvaigždė, kur dvi žvaigždės sąveikauja paskutinėse savo evoliucijos stadijose.

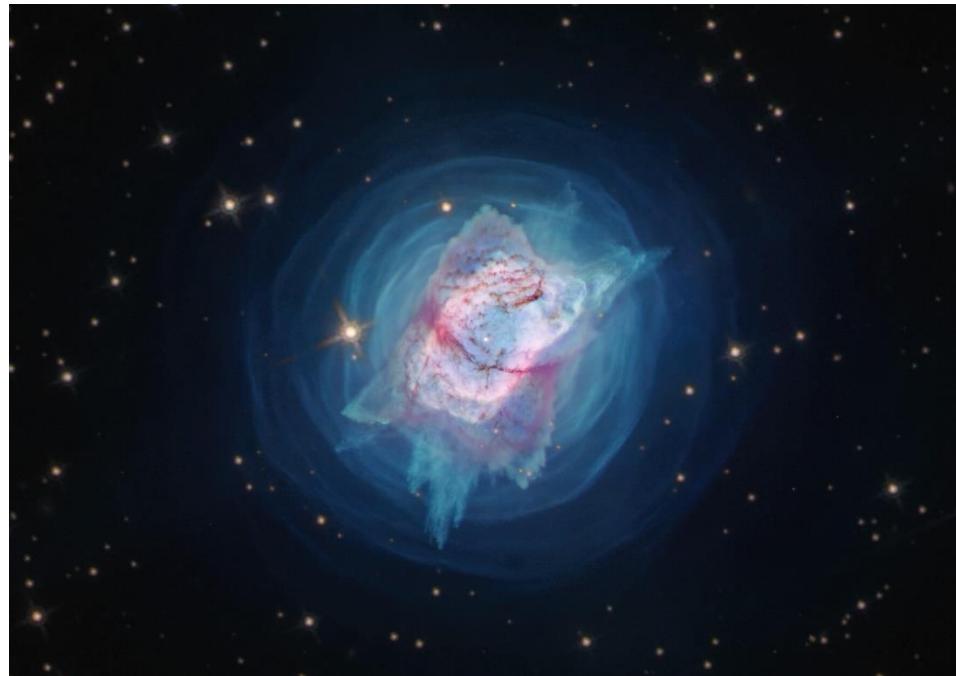
NIRCam instrumento duomenyse matyti tamsiai oranžiniai dulkių debesys (šaltesnės dujos), susitelkę į luitus, galbūt suformuotus ten, kur tankūs debesys sugebėjo išvengti intensyvios UV spinduliuotės.

MIRI instrumento nuotrauka parodė koncentrinius žiedus, išsidėsčiusius už ūko sluoksnį ribų – aiškiai matomas vienas žiedas ties dujų kevalo kraštais, kiti išsidėstę dar toliau nuo centro.

Šie žiedai interpretuojami kaip kartotinių masės netekimo epizodų atspindys. Kai pagrindinėje žvaigždėje vyko apvalkalo numetimas, dėl antrinės žvaigždės poveikio, susiformavo „jaučio akies“ formos struktūra. Ši „jaučio akies“ struktūra – tiesioginis dvinarės žvaigždės tarpusavio sąveikos pėdsakas.

¹³ The JWST/MIRI view of the planetary nebula NGC 6302 I.: a UV irradiated torus and a hot bubble triggering PAH formation; Mikako Matsuura, Kevin Volk, Patrick Kavanagh ir kiti; <https://arxiv.org/pdf/2508.19332.pdf>

¹⁴ James Webb Telescope Reveals Intricate Beauty of Planetary Nebula NGC 6072; <https://www.jameswebbdiscovery.com/discoveries/james-webb-telescope-reveals-intricate-beauty-of-planetary-nebula-ngc-6072>



25 pav. Šis vaizdas iš NASA/ESA Habilo kosminio teleskopio vaizduoja NGC 7027 ūką;

Autorius: NASA, ESA, and J. Kastner (RIT);

<https://cdn.esahubble.org/archives/images/screen/heic2011c.jpg>; CC BY4.0



26 pav. Drugelio ūkas NGC 6302 (optinis Habilo vaizdas); Autorius: ESA/Webb, NASA &

CSA, K. Noll, J. Kastner, M. Zamani (ESA/Webb);

<https://cdn.esawebb.org/archives/images/screen/weic2517d.jpg> ; CC BY4.0

9.2.5. Supernovų liekanos

9.2.5.1. Apibrėžimas ir morfologija

Supernovos liekana – tai iš sprogusios masyvios žvaigždės ($>8 M\odot$, t. y. masyvesnės, nei planetinio ūko atveju), likęs besiplečiantis dujų ir plazmos apvalkalas, apsuptas smūginės bangos fronto. Kai masyvi žvaigždė sužimba supernova arba sprogsta baltoji nykštukė (Ia supernova), didžioji dalis žvaigždės medžiagos išsviedžiama į aplinką milžinišku greičiu.

Srautų greičiai ir spinduliuotės energija būna ženkliai didesnė, negu planetinio ūko formavimosi metu. Ši medžiaga, skrisdama, stumia ir smūgiuoja tarpžvaigždines dujas – taip susidaro išorinė smūginė banga, apibrėžianti liekanos ribą.

Kitaip tariant, **Supernovos liekanos = audringa masyvios žvaigždės mirtis, Planetiniai ūkai = santykinai ramus mažesnės žvaigždės išorinių sluoksnių išmetimas.**

Supernovos liekanos (SNR), skirtingai nuo planetinių ūkų, **paprastai būna netaisyklingos, nesimetriškos formos** (dažnai išvagotos gijų, mazgų ir banguotų debesų raštu). Pavyzdžiui, garsusis Krabo ūkas (Supernovos 1054 liekana) – tai netvarkingas švytinčių gijų kamuolys, Gulbės kilpa (W78 arba Sharpless 103) – didelis žiedas iš įvarių struktūrų.

Yra kelios morfologinės SNR klasės:

Kriaukliškos liekanos (shell-like) – atrodo kaip žiedo/apskritimo formos plonas kevalas (pvz., Tycho Supernovos 1572 liekana, Kasiopejos A; jos panašios į tušciaividurių burbulą su ryškesniais kraštais);

Plerionai – tai specifinė supernovos liekanos rūšis, dar vadinama pulsaro vėjo ūku. Plerionas susidaro, kai po supernovos sprogimo lieka pulsaras (labai greitai besisukantis neutroninė žvaigždė). Pulsaras skleidžia stiprų magnetinį lauką ir įelektrintų dalelių vėją, kuris sąveikauja su aplink esančia medžiaga. Ši sąveika sukuria ryškų, dažnai netaisyklingos formos ūką, kuris šviečia dėl sinchrotroninės spinduliuotės (aukštos energijos elektronai juda magnetiniame lauke);

Mišrios (kompozitinės) liekanos – turi tiek kevalo bruožų, tiek centrinį pulsarų apšvestą ūką.

Išvaizdos ypatumai. Supernovos liekana plačiai spinduliuoja nuo radio iki gama spindulių. Optiniame diapazone dažnai matyti sruoginės struktūros – ilgos plonos gijos, kurios yra smūgio bangos paveiktos vandenilio ir kitų elementų sankuopos. Rentgeno spinduliuose Supernovos liekana rodo karštos plazmos spinduliuotę už smūginio fronto. Pvz., Gulbės kilpos ūko (W78 arba Sharpless 103) rentgeno nuotraukose atrodo kaip ištisinis besiplečiantis halas, o optiškai – kaip smulkų gijų nérinys.

Dydžiai. Jaunų Supernovos liekanų (kaip Kas A, 340 m.) skersmuo ~10 šviesmečių; vidutinio amžiaus (Kepler, Tycho – keli šimtmečiai) ~20–30 šviesmečių; senesni (pvz., Gulbės kilpa (W78

arba Sharpless 103), ~10 tūkst. m.) gali būti >100 šviesmečių. Spalvos: optinėse nuotraukose SNR dažnai matomi *raudoni H α* filaments (emocinio vandenilio), žalsvos [O III] sruogos (ypač smūgio frontuose), mėlynai žalsvi [O II] ir kiti.

9.2.5.2. Vieta Visatoje

Supernovų liekanos pasiskirstę galaktikoje, kur savo laiku koncentravosi atitinkamo tipo žvaigždės ir vyko supernovos žybsniai. Branduolio kolapso supernovos (masyvių žvaigždžių sprogimai) dažniausiai stebimos intensyvios žvaigždėdaros regionuose – taigi jų liekanos koncentruotos spiralinių galaktikų diskuose (gana arti spiralinių vių, [H II] regionų).

Ia tipo supernovos stebimos senesnėse kelių žvaigždžių sistemose (baltųjų nykštukų dvinarėse) – jos gali įvykti tiek galaktikos disko regione, tiek galaktikų haluose.

Supernovos liekanos susidarymo eiga daug priklauso nuo aplinkos tankio. Jeigu sprogimas vyksta molekuliniame debesuje – smūginė banga greitai paveikia aplinkinę medžiagą, spinduliuotė būna intensyvesnė. Rentgeno/gama spinduliuotę spinduliuojančios Supernovos liekanos aptinkamos kaip tik molekulinių debesų kaimynystėje. Galaktikų centriniuose regionuose aptinkamos Supernovos liekanos būna netaisyklingos formos dėl nehomogeniškos aplinkos. Galaktikos halo srityse Supernovos liekanos būna labiau sferoidiški, nes aplinka labiau homogeniška.

Mūsų Paukščių Take dabartinis žinomų Supernovos liekanų skaičius ~300 (manoma, kad esama gerokai daugiau). Žinomiausios Supernovos liekanos: Kasiopejos A Supernovos liekana (apie ~340 m. amžiaus liekana, ~11 tūkst. šviesmečių atstumu), Burių Supernovos liekana (apie 11 tūkst. metų amžiaus, ~800 šviesmečių atstumu), Krabo ūkas (1054 m. supernovos, ~6500 šviesmečių atstumu). Jauniausia aptikta Paukščių tako supernovos liekana – G1.9+0.3 Supernovos liekana (Šaulio žvaigždyne) randasi galaktikos centre, ~100 metų amžiaus.

Daug Supernovos liekanų atrasta netolimuosiuose Magelano Debesyse (Supernova 1987A Didžiajame Magelano Debesyje – 1987m. stebėtos supernovos liekana). Kitose galaktikose, ypač M33 ir M31 spiralinėse galaktikose, yra surasta dešimtys Supernovos liekanų.



27 pav. Cas A (NIRCam image); Autorius: NASA, ESA, CSA, STScI, D. Milisavljevic (Purdue University), T. Temim (Princeton University), I. De Looze (University of Gent); Šaltinis: <https://cdn.esawebb.org/archives/images/screen/weic2330a.jpg> ; CC BY4.0

9.2.5.3. *Formavimasis, amžius ir evoliucija*

Supernovos liekana gimsta tą akimirką, kai įvyksta supernovos sprogimas. Yra dvi pagrindinės supernovų rūšys:

Branduolio kolapso Supernova (II, Ib/c tipai) – masyvi žvaigždė kolapsuoja į neutroninę žvaigždę arba juodąją skylę;

Ia tipas – baltosios nykštukės termobranduolinis sprogimas medžiagai viršijus Čandrasekaro ribą – didžiausią nesisukančios žvaigždės baltosios nykštukės masę.

Abiem atvejais staiga išmetama milžiniška energija (10^{44} J) ir medžiagos masė (kelios $M\odot$) didžiuliais greičiais (iki $\sim 0.1 c$ arba $\sim 30,000$ km/s).

Iškart po sprogimo prasideda laisvojo plėtimosi fazė: išmesta medžiaga skrieja beveik nestabdoma, kol nesutinka savo masės tarpžvaigždinių dujų. Tai trunka dešimtmečius – šimtmečius (priklasomai nuo aplinkos tankio). Pvz., Kas A laisvai plėtési ~200 metų. Per tą laiką formuojasi pradinė smūginė banga.

Po to Supernovos liekanos formavimasis įžengia į adiabatinę fazę: Supernovos liekanos dujos yra tokios karštos, kad energijos nuostoliai dėl spinduliuavimo yra labai maži (visi atomai yra jonizuoti, nėra rekombinacijos). Žvaigždės sprogimo metu vyksta greitas ir intensyvus medžiagos plėtimasis be šilumos mainų išorinėje aplinkoje, kas lemia šviesio staigų padidėjimą. Staigus spinduliuotės intensyvumo padidėjimas ir greitas šviesos kreivės pakilimas, atspindi medžiagos staigų išsiplėtimą be šilumos mainų.

Po adiabatinės fazės Supernovos liekanos evoliucijoje dažniausiai seka radiacinė fazė, kai supernovos medžiaga toliau plečiasi, bet jau vyksta intensyvūs šilumos mainai su aplinka. Šioje fazėje didelė dalis energijos virsta spinduliuotės energija, o temperatūra ir slėgis krinta ne tik dėl plėtimosi, bet ir dėl energijos atidavimo į aplinką.

Po radiacinės fazės seka supernovos liekanos susiformavimo baigiamasis etapas, kurio metu vyksta išsiplėtusios medžiagos sąveiką su aplinkiniu intergalaktine ar tarpžvaigždine medžiaga ir supernovos branduolio transformaciją į kompaktišką objektą, pvz., neutroninę žvaigždę arba juodąją skyle.

9.3. Atspindžio ūkai

9.3.1. Apibrėžimas ir morfologija.

Atspindžio ūkai – tai kosminiai dulkių debesys, kurie patys nešvyti, bet yra apšviečiami netoliese esančių žvaigždžių šviesos. Kadangi žvaigždžių spinduliuotės neužtenka jonizuoti ūko dujų (skirtingai nei emisiniuose ūkuose), ūkas matomas tik dėl šviesos atspindžio ir sklaidos. Tokie ūkai dažniausiai įgauna mėlyną spalvą, nes dulkių dalelės efektyviau išsklaido trumpesnio bangos ilgio (mėlyną) šviesą nei raudoną. Tai tas pats šviesos sklaidos procesas, dėl kurio Žemės dangus dieną yra mėlynas (vad. Rayleigh efektas).

Atspindžio ūkas paprastai matomas, kaip silpnai žérintis difuzinis debesis aplink ryškias žvaigždes. Pavyzdžiui, Plejadžių žvaigždžių spiečiuje esantys ūkai žiba mėlynai, atspindėdami karštų B spektrinės klasės žvaigždžių šviesą. Kartais, jei apšviečianti žvaigždė yra raudona supermilžinė (pvz., Antaresas), ūkas gali spindėti gelsvai ar raudonai.

Tokių ūkų forma netaisyklinga, dažnai yra sruogų ar šluotelii pavidalo – dulkių debesys gali sudaryti keistus, „raižytus“ raštus. Atspindžio ūkai neretai pasitaiko kartu su emisiniais ūkais, sudarydami **mišrius difuzinius ūkus** (pvz., garsusis Trilypis ūkas (M20) turi ir emisijos (rausvą [H II] sritį), ir mėlyną atspindžio komponentą).

9.3.2. Vieta Visatoje

Atspindžio ūkai **glūdi galaktikų diskuose**, ypač žvaigždėdaros regionuose. Mūsų Paukščių Tako galaktikoje jie dažnai aptinkami molekulinių debesų pakraščiuose, šalia jaunų žvaigždžių spiečių ar karštų masyvių žvaigždžių. Pavyzdžiui, Oriono molekuliniame debesyje, greta ryškių žvaigždžių, esančios dulkių sankaupose matomi žinomi ūkai – Meropes ūkas (NGC 1435) Plejadėse (M45) ar Raganos Galvos ūkė (NGC 1909) prie Rigelio (β Ori).

Neretai atspindžio ūkas žymi **aktyvų žvaigždžių formavimosi regioną**: dulkių debesis ne tik atspindi šviesą, bet ir slepia viduje besiformuojančias žvaigždes.

Šiuo metu Paukščių Take žinoma apie 500 atspindžio ūkų, tačiau tikrieji skaičiai gali būti didesni, nes daugelis silpnų ūkų gali būti dar neidentifikuoti. Šie ūkai dažniau randami spiralinių galaktikų spiralinėse vijose, kur gausu dujų ir dulkių. Neaktyviose galaktikų dalyse ar elipsinėse galaktikose atspindžio ūkų reta, kadangi ten mažiau šaltojo tarpžvaigždinės medžiagos ir jaunų žvaigždžių.

9.3.3. Formavimasis, amžius ir evoliucija

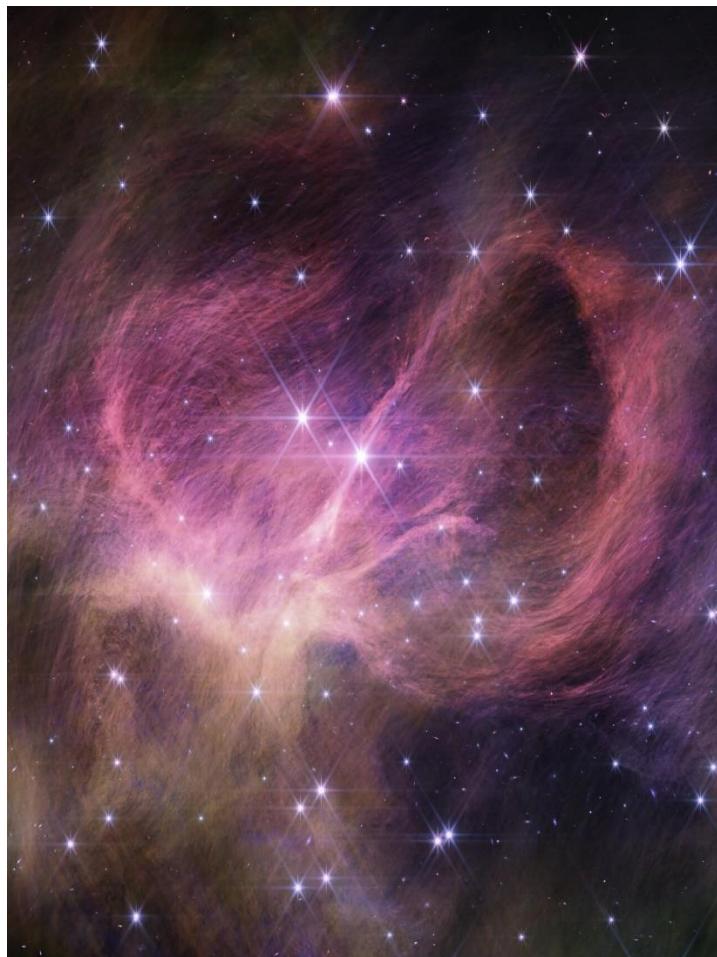
Atspindžio ūkas susidaro, kai dulkių debesį apšviečia netoli ese esanti ryški žvaigždė. Dažnai tai vyksta jaunų žvaigždžių formavimosi srityse, kur gimsta karštos žvaigždės: jų spinduliuotė prasiskverbia į aplinkinius dulkių plotus ir juos „paryškina“ šviesa. Pats dulkių debesis gali būti žvaigždės gimimo „šalutinis produktas“ – pavyzdžiui, jaunos žvaigždės gimsta molekuliniame debesyje, o kol kas neįsisavinta ar išsklaidyta dulkių dalis aplink jas lieka kaip atspindžio ūkas.

Atspindžio ūkas neturi griežtai apibrėžto gyvenimo trukmės: jo ryškumas priklauso nuo apšviečiančios žvaigždės spindesio ir debesies dulkių kiekio. Jei žvaigždė evoliucionuodama praranda šviesę arba dulkių debesis išsklaido (pvz., dėl žvaigždžių vėjų ar supernovos bangos), ūkas gali išnykti.

Daug atspindžio ūkų yra jauni kosminiai objektai (susiję su \geq milijono metų amžiaus žvaigždėmis), bet pats dulkių debesis galėjo egzistuoti ir anksčiau kaip didesnio molekulinio debesies dalis. Evoliuciškai, atspindžio ūkas gali peraugti į emisijos ūką, jei į jį patekusios žvaigždės vėliau ima jonizuoti dujas (pavyzdžiui, didėjant žvaigždžių temperatūrai). Tačiau dažnai atspindžio ūkas tiesiog išnyksta išsklaidytas žvaigždžių spinduliuotės arba susijungia su kitu dujų ir dulkių debesių.

Viduje esantys procesai – žvaigždžių vėjai, srautai – paprastai nėra tokie stiprūs kaip emisiniuose ūkuose, nes čia dujos nejonizuotos. Vis dėlto, atspindžio ūkuose vyksta fotogaravimas – intensyvi spinduliuotė gali pamažu garinti dulkių daleles (ypač mažesnes) ir plėsti ūko tuštumas. Nauji stebėjimai rodo, kad aplink jaunas žvaigždes atspindžio ūkuose formuojasi srautai ir čiurkšlės

(protožvaigždiniai¹⁵ srautai), leidžiantys mums pamatyti ūko judėjimą. Pavyzdžiui, JWST nuotraukose Gyvatės ūke pastebėtos pailgos smūginės srovės, išsviestos tik ką susidariusių žvaigždžių. Šios srovės sukuria švytinčias gijs ūke ir liudija aktyvią žvaigždžių vėjų ir dulkių sąveiką. Paprastai atspindžio ūkas yra ramus, difuzinis palyginti su audringais supernovų likučiais ar [H II] regionais.



28 pav. Atspindžio ūkas Perséjaus žvaigždyne. Centrinė žvaigždžių spiečiaus IC 348 dalis su tarpžvaigždinės medžiagos gijomis, atspindinti spiečiaus žvaigždžių šviesą – atspindžio ūkas; Autorius: NASA, ESA, CSA, STScI, and K. Luhman (Penn State University) and C. Alves de Oliveira (European Space Agency); <https://cdn.esawebb.org/archives/images/screen/weic2331a.jpg>; CC BY4.0

¹⁵ Prožvaigždė – masyvus duju debesis, esantis gravitacinio traukimosi būsenoje, skendintis tankiame duju ir dulkių apvalkale, pradinė žvaigždės formavimosi stadija. Prožvaigždės susidaro dideliuose molekuliniuose debesyse, esančiuose tarpžvaigždinėje terpéje.

9.3.4. Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis

Apšviečiančios atspindžio ūkų žvaigždės dažniausiai yra karštos, jaunų spektrinių klasių O, B arba A žvaigždės, kadangi jos pakankamai šviesios apšvesti dulkes. Pavyzdžiui, Oriono Meropes ūkas (NGC 1435) apšvestas B2 tipo žvaigždės. Tokios žvaigždės skleidžia intensyvią mėlyną ir UV šviesą, kuri puikiai išsklaidoma smulkių dulkių dalelių. Jei netoliese ūko yra tik vėsesnės žvaigždės, ūkas gali būti nepastebimas – arba spindėti blankiai rausvai (kaip Antareso (α Scorpii) atveju, kur raudona supermilžinė suformavo gelsvą ūką).

Cheminė sudėtis: atspindžio ūkai sudaryti iš kosminių dulkių dalelių ir šiek tiek dujų. Pagrindinė medžiaga – anglies junginių turinčios dulkės, silikatinės dulkės ir įvairūs šalti aerosolai. Wikipedia šaltinis mini, kad tarp sklaidą lemiančių mikrodalelių yra anglies junginiai (net „deimantų dulkės“) bei geležies ir nikelio junginiai.

Šie dulkių grūdeliai neretai būna išsidėstę galaktikos magnetinio lauko kryptimi, todėl sklinda poliarizuota šviesa (užfiksuota poliarimetrijos stebėjimų). Pačios dulkių dalelės dažnai padengtos kondensatų „šerkšnu“ – pavyzdžiui, tamsesnėse ūko dalyse ant dulkių yra užšalusio anglies monoksido, vandens ledo.

Anglies turintys aromatiniai junginiai (PAH – policikliniai aromatiniai angliavandeniliai) aptiki infraraudonuosiuose atspindžio ūkuose. Dujos atspindžio ūkuose daugiausia neutralios (H_2 , He, CO ir kt.), kadangi jos nejonizuotos – jų spektrai panašūs į žvaigždžių spektro atspindį. Tačiau atspindžio ūkuose aptinkami ir ypatinga spinduliuotė, pvz., fluorescuojančio vandenilio (H_2) infraraudonoji spinduliuotė netoli apšviečiančios žvaigždės, rodantys, kad žvaigždės UV spinduliai sužadina molekules.

9.3.5. Naujausių tyrimų apžvalga

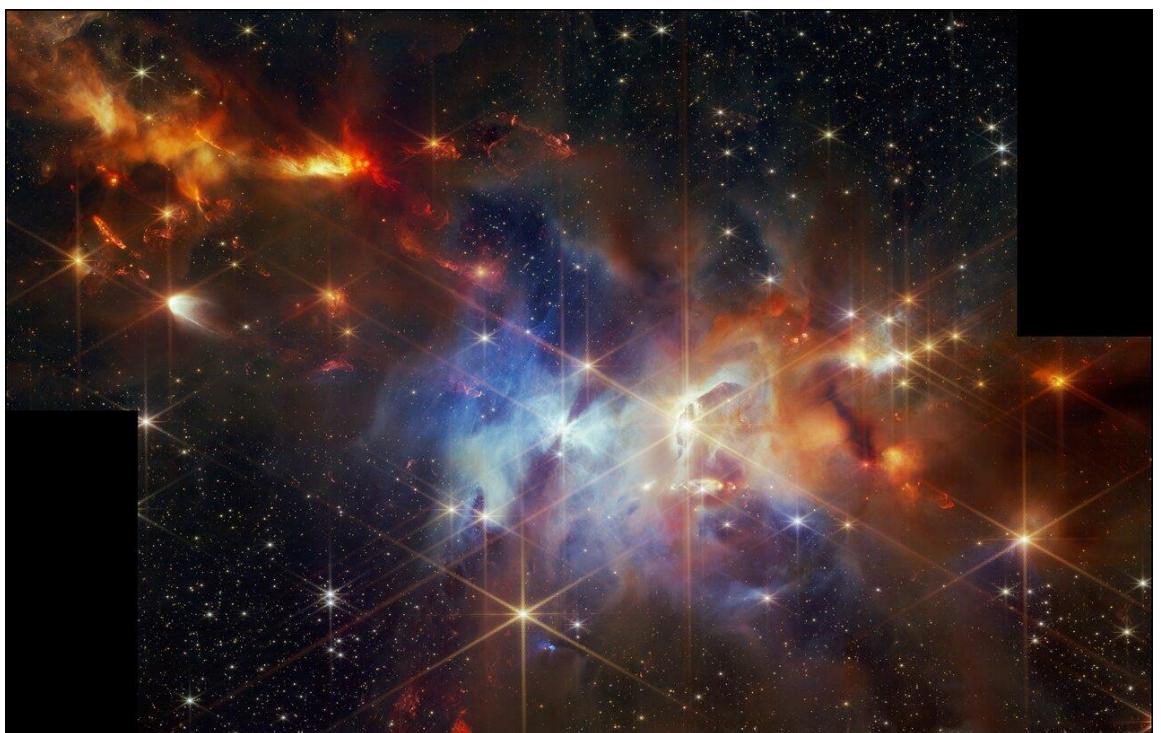
Per pastaruosius penkerius metus atspindžio ūkų tyrimai smarkiai pasistumėjo dėl naujų infraraudonųjų teleskopų, tokų kaip NASA James Webb kosminis teleskopas (JWST), ir tobulėjančių tolimųjų infraraudonųjų stebėjimų (pvz., stratosferinio observatorijos SOFIA duomenų). Keletas reikšmingų naujienų ir atradimų:

JWST atradimas Gyvatės ūke¹⁶. JWST didelės skyros nuotraukoje, skirtoje Gyvatės atspindžio ūko regionui (apie 1300 šv. m. nuo Žemės), astronomai pirmą kartą tiesiogiai pamatė retą reiškinį: sutampančius, lygiagrečiai orientuotus protožvaigždinius išmetimus (dujų čiurkšles) viename ūko regione. Šiauriniame Gyvatės ūko kampe pastebėta grupė jaunų žvaigždžių išmetamų reaktyvinų srautų, kurie visi pakrypę ta pačia kryptimi, tarytum „lietaus lašai pasvirus“. Tai neįprasta, nes paprastai tokie protožvaigždiniai srautai skrieja atsitiktinėmis kryptimis. Šis atradimas suteikia tiesioginių įrodymų, kad besiformuojančios žvaigždės debesyje gali turėti bendrą sukimąsi

¹⁶ First-of-Its-Kind Detection Made in Striking New Webb Image;
<https://science.nasa.gov/missions/webb/first-of-its-kind-detection-made-in-striking-new-webb-image/>; Serpens Nebula (NIRCam image); <https://esawebb.org/images/weic2415a/>

kryptį (greičiausiai paveldėtą iš pirminio debesies sukimosi), dėl ko jų išmetami materijos srautai sklinda kryptingai. Šis pastebėjimas padeda geriau suprasti žvaigždžių gimimo fiziką: jeigu visos jaunos žvaigždės viename debesuje sukasi panašiai, tai patvirtina teorijas, kad molekulinis debesis kolapsuodamas suteikia naujoms žvaigždėms paveldėtą kampinį momentą.

Gyatės ūko JWST nuotraukoje taip pat matyti įvairiaspalviai ūko elementai: „siūlai“ ir „sruogos“, kurie yra žvaigždžių šviesa pro dulkių sebesis. Oranžiškai rusva migla žymi tuos ūko plotus, kuriuose priešais šviesą yra daugiau dulkių, gesinančių mėlyną spinduliuotęs dalį (todėl likęs atspindys tampa gelsvas). JWST jautrumas leido aptikti net anksčiau nematytus objektus (pvz., vadinamąjį „Šikšnosparnio šešėlį“) šiame regione. Ateityje planuojama JWST spektroskopu NIRSpec detaliai ištirti Gyatės ūko cheminę sandarą – ypač lakių junginių (pvz., vandens, CO) likučius formuojanties žvaigždėms. Šie tyrimai padės atsakyti, kaip protžvaigždės aplinkoje išlieka gyvybei svarbūs elementai, ir leis palyginti jų kiekius su protoplanetiniuose diskuose randamais kiekiais.



29 pav. Gyatės ūkas (NIRCam vaizdas); Autorius: NASA, ESA, CSA, STScI, K. Pontoppidan (NASA's Jet Propulsion Laboratory), J. Green (Space Telescope Science Institute); Šaltinis:

<https://cdn.esawebb.org/archives/images/screen/weic2415a.jpg>; CC BY4.0

SOFIA tyrimas NGC 2023 ūke (2023 m.)¹⁷: NGC 2023 – vienas didžiausių dangaus atspindžio ūkų Oriono molekuliniame debesuje. 2023 m. paskelbtame darbe, naudojant SOFIA (stratosferinį infraraudonųjų spindulių teleskopą) aplink 63 ir 145 μm bangas, buvo analizuojama šio ūko [O I] ir [C II] spinduliuotė. Tyrimas atskleidė, kad NGC 2023 ūke yra netikėtai daug žemo sužadinimo lygio atominio deguonies (atominio deguonies atomai, kurie yra žemo energetinio sužadinimo būsenoje), kuris yra reikšmingas elementas medžiagų sąveikai su kitomis erdvėje esančiomis medžiagomis ir sugeria dalį ūko spinduliuotės. Taip pat spektre aptikta [C II] ir [O I] linijų, rodančių fotogaravimo srautus ūko pakraščiuose – ūko pietinėse dalyse C⁺ regionas plečiasi ir transformuojasi į tankų molekulinių debesų. Tai reiškia, kad dėl žvaigždžių UV spinduliuotės, atspindžio ūko viduje vyksta aktyvus dujų srautų judėjimas ir garavimas.

Polarimetrijos¹⁸ tyrimai: Pastaraisiais metais patobulėjus polarimetriniams stebėjimams (pvz., naudojant VLT teleskopus) atspindžio ūkuose buvo detaliau ištirtas magnetinių laukų vaidmuo ūkuose. Dulkių polarizuotos šviesos analizė patvirtino, kad atspindžio ūkų dalelės yra orientuotos magnetiškai, sukeldamos atspindimos šviesos polarizaciją. Tai suteikia ižvalgą apie tarpžvaigždinio magnetinio lauko struktūrą ūko viduje ir rodo, kad magnetiniai laukai gali paveikti dulkių judėjimą bei galbūt net protožvaigždinių diskų formavimąsi šiuose ūkuose.

Apibendrinant, stebėdami atspindžio ūkų spinduliuotę, galime aptikti pasislėpusias protožvaigždes, sužinoti dulkių savybes ir net išmatuoti magnetinius laukus ūko viduje. Naujausių misijų (JWST, SOFIA) rezultatai suteikė precedento neturinčių detalių apie šių ūkų struktūrą, cheminę sandarą ir dinamiką.

9.4. Tamsieji ūkai

9.4.1. Apibrėžimas ir morfologija

Tamsieji ūkai (dar vadinami **absorbciniai ūkai** arba tiesiog *tamsiai debesimis*) – tai **itin tankūs molekuliniai debesys**, kurie **neleidžia prasiskverbti matomajai šviesai** ir todėl matomi kaip tamsūs siluetai šviesniame fone. Kitaip tariant, jie neužsižiebia patys (kaip emisijos ūkai) ir neatspindi pakankamai šviesos (kaip atspindžio ūkai), todėl stebimi dėl **užtemdymo efekto**: žvaigždžių ir ūkų už jų šviesa užblokuojama debesies, palikkama tamsią dėmę danguje.

Tipiškas pavyzdys – Arklio Galvos ūkas (IC434, Barnard 33) Oriono ūko komplekse: tai juodas arklio galvos formos profilis raudonos emisijos fone. Tamsiųjų ūkų forma labai netaisyklinga:

¹⁷ Constraining the geometry of the reflection nebula NGC 2023 with [O I]: Emission & Absorption; Bhaswati Mookerjea (TIFR, Mumbai, India), Gooran Sandell (IofA, Univ of Hawaii), Rolf Guesten (MPIfR, Bonn) ir kiti; <https://arxiv.org/abs/2308.16872>

¹⁸ Medžiagos sandaros, savybių arba būsenos tyrimo metodas, kuriam naudojama polarizuotoji šviesa. Grindžiama optiškai aktyvių medžiagų savybe sukti šviesos polarizacijos plokštumą.

jie neturi aiškių ribų, dažnai driekiasi vinguotomis, siūliškos formos struktūromis, primenančiomis „kosminius dūmus“ arba gyvūnų figūras. Didžiausi tamsieji debesys (pvz., Anglies Maišo ūkas (Caldwell 99) Pietų kryžiaus srityje ar Didžioji Plyšio (angl. Great Rift) juosta Paukščių Take) plika akimi matomi kaip įspūdingi juodi plyšiai Šviesaus Paukščių Tako juostoje. Mažesni izoliuoti tamsieji ūkai vadinami **Boko globulėmis** – tai nedideli (paprastai < 1 parseko skersmens) tamsūs rutuliški debesys, atrodantys kaip juodi taškai; juos pirmasis katalogavo astronomas E. E. Barnardas (jo Barnard kataloge sužymėti šimtai tamsių dėmių danguje).

Struktūra. Tamsieji ūkai iš prigimties yra labai netolygūs ir grūdėti: jų tankis didėja į centrą, kur gali susidaryti tankūs branduoliai. Išorės dalys blankesnės, ištirpsta palaipsniui į aplinkinį foną, todėl ūkas neturi aiškios ribos – tik difuzinis perėjimas nuo visiško tamsumo centre iki permatomos periferijos. Daugelis tamsių ūkų atrodo kaip gyvatės ar čiuptuvų juostos (astronomai net turi terminą „tamsių ūkų debesų žvaigždynai“ – sujungdami dideles tamsių debesų figūras. Senovės kultūros matė tamsių ūkų siluetuose gyvūnus, pvz., Aborigenų „Emu danguje“ siluetas).

9.4.2. Vieta Visatoje

Tamsių ūkų daugiausia yra **spiralinėse galaktikose**, ypač spiralių vijuose, kur gausu dujų. Mūsų Paukščių Take jie labiausiai pastebimi ties **Galaktikos plokštuma** – ten kur fono žvaigždžių laukas tankus, tamsūs debesys labiausiai išryškėja kaip spragos žvaigždžių juostoje. Dideli tamsieji ūkų kompleksai, tokie kaip jau minėti Didysis Plyšys (juodų ūkų grandinė, kuri einanti per Paukščių Tako centrą nuo Denebo (α Cyg) iki Šaulio) ar Anglies Maišo ūkas netoli Pietų Kryžiaus, rodo didžiulių molekulinių debesų buvimą. Šie debesys gali driektis šimtus šviesmečių. Pavyzdžiu, Vakarų Skriestuvo (angl. Circinus West) tamsus ūkas, tėsiasi apie 180 šviesmečių. Tamsių ūkų randama molekulinių debesų kompleksuose – tai didžiuliai regionai, kur dalis debesies išlieka neįjonizuota. Mūsų galaktikoje žinomi tokie kompleksai kaip Tauro, Gyvatnešio žvaigždynų tamsių debesų kompleksai, kuriuose gausu mažų tamsių ūkų.

Elipsinėse galaktikose tamsių ūkų debesų beveik nėra. Tačiau spiralinėse, ypač turinčiose daug dujų (pvz., M33, M83), aptikta tamsių ūkų debesų net ir toli nuo centrų. Įdomu, kad 2024 m. atliktas M83 galaktikos pakraščių tyrimas (ALMA Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, VLA Karl G. Jansky Very Large Array) aptiko netikėtai jaunų žvaigždžių tolimuose rajonuose, nesimatant aiškių didelių molekulinių debesų – paaiškėjo, kad ten buvo labai maži tamsūs molekuliniai debesys, kuriuose tiesiogiai matési tik pačios tankiausios šerdys (vadinamos „širdys“) formuojančios žvaigždes¹⁹.

¹⁹<https://www.almaobservatory.org/en/press-releases/mystery-of-star-formation-revealed-by-hearts-of-molecular-clouds/>

9.4.3. Formavimasis, amžius ir evoliucija

Tamsieji ūkai susiformuoja kaip **tarpžvaigždinės medžiagos (daugiausia vandenilio dujų ir dulkį) sankaupos** regionuose, kur temperatūra labai žema ir medžiaga gali egzistuoti molekulinėje formoje. Manoma, kad difuziniai vandenilio debesys galaktikos diske, veikiant gravitaciniam nestabilumui (Džinso (Jeans) nestabilumas)²⁰, suaižėja į milžiniškus molekulinius debesis (GMC). GMC viduje labiausiai atšalę ir tankūs vidiniai regionai tampa optiškai neskaidrūs – tai ir yra tamsieji ūkai.

Chemiškai tuose regionuose vandenilis yra molekulinės formos (H_2), temperatūra $\sim 10\text{--}20$ K, tankiai $\sim 10^4\text{--}10^6$ dalelių/cm³ – pakanka, kad šviesa būtų visiškai absorbuota.

Amžius. Didieji molekuliniai debesys gyvuoja $\sim 10\text{--}30$ mln. metų, tad tamsieji ūkai (jų dalys) taip pat gali išlikti panašiai ilgai, nebent juose prasideda žvaigždėdara, kuri pradeda debesį „ardyti“. Kai tamsiajame ūke susiformuoja pakankamai masyvių žvaigždžių, jų spinduliuotė ir vėjai pamažu išsklaido ūką ar paverčia ji [H II] regionu. Pvz., Oriono ūko šaltinis – anksčiau buvęs Gyvatnešio žvaigždyno tamsaus ūko branduolys, dabar tapo ryškiai spindinčia [H II] sritimi.

Mažesnės Boko globulės gali suirkti, kai viduje gimusios žvaigždės „išpūs“ dujas, palikdamos pavienę jauną žvaigždę.

Jeigu per tam tikrą laiką tamsiame ūke neprasideda žvaigždėdaros procesai ir nepatiria išorinių trikdymų (pvz., kaimyninės supernovos smūgio), ūkas gali išlikti ilgai, tol kol ji pamažu išskaido bendras galaktikos spinduliuotės ir gravitacinių jėgų fonas. Tačiau tipinis scenarijus – tamsus ūkas yra žvaigždžių gimimo lopšys.

Žvaigždžių formavimasis. Tamsiųjų ūkų viduje esantys sutankėjimai (šerdys) gali kolapsuoti į prototžvaigždes, evoliucionuoti į naujas žvaigždes. Būtent tamsiuosiuose ūkuose vyksta pirmos žvaigždės formavimosi stadijos: Boko globulėje ar branduolyje aptinkama infraraudonųjų šaltinių (jaunos išižiebusios protožvaigždės) ir mazeriai²¹, kurie signalizuoja didelį slėgi.

Evoliucijos eigoje, atsiradus naujoms žvaigždėms, tamsus ūkas linkęs virsti mišriu ūku: dalis jo tampa atspindžio ar emisijos ūku (aplink naujas žvaigždes), o likusi dalis lieka tamsi. Galiausiai, per kelis milijonus metų, galingesnė spinduliuotė suardys ir likusias tamsias dalis. Kita vertus, jeigu tamsus ūkas yra labai masyvus, žvaigždėdara gali vykti fragmentiškai – vienur ūkas tampa skaidrus, kitur lieka tamsus.

Dinamika. Tamsieji ūkai nejuda kaip vienetas – jie paprastai dalyvauja bendrame galaktikos judėjime, su \sim keletu dešimčių km/s greičiais orbitoje aplink galaktiką. Viduje – labai rami, stabili

²⁰ Džinso nestabilumas – tarpžvaigždinių debesų kolapso (susitraukimo) ir žvaigždėdaros priežastis. Traukimasis prasideda, kuomet debesį sudarančios medžiagos gravitaciniés traukos jėgos viršija debesies dujų slėgi. Kai medžiagos sankaupa pasiekia tam tikrą masę, gnužulo viduje gravitacijos jėga viršija dujų slėgio sukeliamą pasipriešinimą. Tokie gnužulai tampa naujų žvaigždžių susidarymo centrais.

²¹ Intensyvus 1665 ir 1667 MHz (bangos ilgis apie 18 cm) dažnio radio spinduliuotės šaltinis.

aplinka dėl žemos temperatūros. Tačiau pradedant formuotis žvaigždėms, atsiranda vidiniai judėjimai: formuojasi dujų srautai, protožvaigždžių čiurkšlės. Šiuo čiurkšliu poveikis tampa matomas, kai jos prasiveržia pro ūko tankmes ir pasiekia ūko paviršių. Tada tamsiame ūke pasirodo **Herbig-Haro (HH) objektai** – švytinčios dėmelės ten, kur dujų ar dulkių srautas – čiurkšlė, ištekanti iš besiformuojančios naujos žvaigždės, susiduria su tarpžvaigždine medžiaga (iš esmės tai emisiniai ūkai, sužadinti smūginių bangų). HH objektai sufleruoja, kur „paslėptos“ protožvaigždės. Pavyzdžiui, minėtame Vakarinio Skriestuvu (angl. Circinus West) ūke DECam²² kamera aptiko kelis HH objektus (HH 76, HH 77), prasišviečiančius per tamsų debesę. Tai liudija, kad viduje dešimtys protožvaigždžių aktyviai generuoja srautus. Taip pat aptiktos išpūstos ertmės tamsiame debesye – vietos, kur jaunos žvaigždės savo spinduliuote arba čiurkšlėmis „išvalė“ aplinkinę erdvę. Tad nors tamsus ūkas iš išorės atrodo ramus, jo viduje verda lėta žvaigždžių formavimosi „virtuvė“.

9.4.4. Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis

Skirtingai nuo kitų ūkų, tamsiajame ūke nėra ryškios apšviečiančios žvaigždės – tai esminis bruožas, dėl kurio jis ir lieka tamsus. Kitaip sakant, jeigu tankiame debesye būtų bent viena pakankamai šviesi žvaigždė, tas debesis taptų atspindžio arba emisijos ūku. Todėl tamsiuose ūkuose žvaigždės dar tik formuojasi arba yra labai jaunas ir blankios (pvz., T Tau tipo žvaigždutės, kurios spindi beveik vien IR diapazone). Tamsiųjų ūkų „gyventojos“ – protožvaigždės – yra pasislėpusios giliai viduje, supamos dulkių kokonų, todėl optiškai nematomos. Jų egzistavimą išduoda netiesioginiai signalai: HH objektai, mazerio spinduliuotė, ilgųjų bangų infraraudonieji šaltiniai.

Cheminė sudėtis. tamsus ūkas atspindi pirminę tarpžvaigždinės medžiagos sudėti molekuliniame debesye. Pagrindas – vandenilis (H_2) molekuliniu pavidalu (~70% masės) ir helis (~28% masės). Likę ~1–2% masės tenka dulkėms bei sunkesnėms molekulėms. Dulkių grūdeliai tamsiuose ūkuose turi ypač svarbų vaidmenį – būtent jie sukelia šviesos sugėrimą.

Kaip nurodo įvairūs šaltiniai, dulkių dalelės čia yra nanometrų–mikrometrų dydžio ir padengtos užšalusiomis dujomis: pvz., anglies monoksido (CO) ir azoto ledo sluoksniu. Tokios „purvino ledo“ dalelės nepaprastai gerai sugeria matomą šviesą, paversdamos ją šiluma.

Be H_2 , tamsiajame ūke gausu kitų molekulių: CO, NH_3 (amoniako), formaldehido (H_2CO), CS, $c-C_3H_2$ (ciklopropenilideno), N_2H^+ ir t.t..

Šios molekulės aptinkamos radijo spinduliuotės stebėjimo ir spektroskopijos priemonėmi, yra savykiniai „skaidrios“ optiškai (jų pačios nematome, bet stebimos radijų bangų spektre). Pavyzdžiui, O_2 izotopo CO ($C^{18}O$) spinduliuotė padeda išmatuoti tankius regionus, amoniakas – temperatūrą.

²² Tamsos energijos tyrimui (DES) sukurta tamsiosios energijos kamera (DECam). Projektą finansavo JAV Energetikos departamentas, vadovavo Fermi nacionalinės greitintuvų laboratorijos mokslininkai.

Tamsiojo ūko viduje dulkės sukelia šviesos absorbciją/sugėrimą (ekstinkciją): pagal apibrėžimą, tamsus ūkas turi tokią dulkių koncentraciją, kad už jo esantys objektai nematomi regimojoje šviesoje. Verta pažymėti, kad netgi itin tankiuose branduoliuose vandenilio dujos lieka neutralios (nejonuotos), tad jokios vidinės spinduliuotės nėra. Todėl tamsius ūkus tyrinėti tenka radio ir infraraudonųjų bangų diapazonuose – tik taip prasiskverbia informacija iš ūko vidaus.

Apibendrinant, Tamsieji ūkai – tai neperregima uždanga, gaubianti žvaigždžių gimimą. Jie paslepija nuo mūsų žvilgsnio ankstyviausias žvaigždžių formavimosi stadijas, bet su šiuolaikiniais teleskopais mokomės žvilgtelėti į jų vidų. Tamsūs ūkai dalyvauja Galaktikos evoliucijos cikle: iš jų gimsta žvaigždės, kurios vėliau savo spinduliuote tuos debesis išsklaido, paskleisdamos juose susikaupusią materiją – molekules, dulkes – atgal į tarpžvaigždinę aplinką. Jei ne tamsieji ūkai, neturėtume nei žvaigždžių spiečių, nei planetinių sistemų, juose suformuojami tankios materijos sankapus, būtinos žvaigždėdarai.

9.4.5. Naujausių tyrimų apžvalga

Vakarinio Skriestuvo (angl. Circinus West) tamsaus ūko atradimai (2025 m.): 2025 m. pranešta apie intensyvius tyrimus Vakarinio Skriestuvo (angl. Circinus West) molekuliniame debesuje – tai vienas didžiausių žinomų tamsiųjų ūkų, esantis už ~2500 šviesmečių Skriestuvo (Circinus) žvaigždyne. Naudojant 4 m Blanco teleskopo DECam kamerą, nustatyta, kad ūko gelmėse yra daug jaunų žvaigždžių – gausu tik ką susiformavusių žvaigždžių. Vakarinio Skriestuvo molekulinis debesis yra milžiniškas: ~180 šviesmečių ilgio, masė ~250 000 M \odot . DECam nuotraukose prasišviečia šviesos dėmės – jau minėtieji Herbig-Haro objektais ir ertmių švytėjimas.

Tai rodo, kad ten aktyviai formuoja žvaigždės: protožvaigždžių čiurkštės sukuria smūginius frontus, kurie šyti raudonai (vandenilio alfa linijose). Aptikta, kad kelios ertmės debesuje (vadinami Cir-MMS regionai) yra susidariusios dėl jaunų žvaigždžių spinduliuotės – tai tarsi tuščumos, išpučiamos apie protožvaigždes.

Vakarinio Skriestuvo debesies projekcijoje aptikta net planetinis ūkas (nors tai atrodo paradoksalu, mat planetiniai ūkai paprastai siejami su sena žvaigžde). Tai reikštų, kad tamsioje molekuliniu debesies struktūroje „šviečia“ mirštančių senų žvaigždžių liekanos.

Taigi, Vakarinio Skriestuvo molekuliniame debesuje esama ne tik gimstančių žvaigždžių, bet ir mirštančių žvaigždžių liekanų – galbūt taip yra todėl, kad instrumento regėjimo laukas užgriebia tolimate fone esantį planetinį ūką, projekciškai sutampantį su tamsiu ūku.

Šitaip viename regėjimo lauke matome visą žvaigždžių „gyvavimo ciklą“: nuo protožvaigždės HH objekto iki seno raudonojo milžino išmestų dujų.

ALMA radijo stebėjimai (2024 m.): Paprastai naujos žvaigždės formuoja galaktikų vidinėje dalyje. Procesas prasideda, kai difuzinės atominės dujos susitraukia į koncentruotas molekulines dujas, vadinamas molekuliniu debesimis. Būtent šių debesų didelio tankio šerdys

(angl. high-density cores), esančios jų centre, sukelia žvaigždžių formavimąsi. Manoma, kad galaktikų pakraščiuose šis procesas tampa vis retesnis.

Vis dėlto, netikėtai didelis kiekis labai jaunų žvaigždžių egzistuoja daugelio galaktikų tolimuose pakraščiuose, tačiau mokslininkai 18 metų negalėjo nustatyti, kaip ir kodėl jos ten susidarė, nes negalėjo tiksliai nustatyti jų formavimosi vietų.

Nors tai susiję su galaktikos M83 pakraščiais, aptikti labai maži tamsūs debesys su itin tankiomis šerdimis, kurios spinduliuoja tik, kai jose formuojasi žvaigždės. Atrasta net 23 tokios „nematomos“ (optiškai tamsios) šerdys, kur tik pačios šerdys matomas, bet aplink nėra didelio švytinčio debesies. Tai padėjo suprasti seniai pastebėtą reiškinį – jaunų žvaigždžių buvimą galaktikų pakraščiuose, kur, atrodė, neturėtų vykti žvaigždėdara.

Paaškėjo, kad tiesiog tokios sritys neturėjo matomų didelių molekulinių debesų: jų molekuliniai debesys buvo per maži ir optiškai nesimatė, bet viduje visgi susidarė tankios sritys, pakankamos žvaigždėdarai.

Ilgojo bangos ilgio UV fluorescencija (2025 m.): 2025 m. „Physics“ žurnalo straipsnyje pranešta, kad rasta nauja galimybė aptikti tamsiuosius ūkus – per jų UV fluorescenciją. Pastebėta, kad netoli ese esančio Eos molekulino debesies pakraščiai šyti ilgojo bangos ilgio ultravioletiniai spinduliai (FUV). Ši efektą sukuria Laimano (Lyman) serijos spinduliai²³, sužadinantys debesis, ir gali padėti identifikuoti šiaip visiškai nematomus tamsius debesis, stebint UV diapazonu. Jie šyti blankiai FUV diapazone, net kai visiškai nematomi optiniame diapozone. Šis metodas suteikia naują įrankį tiriant tamsiuosius ūkus.

Barnard 68 cheminės sudėties tyrimai (2019–2023 m.): Pastaruoju metu gilintasi ir į tamsią ūkų chemiją: pavyzdžiui, stebėtas molekulių pasiskirstymas Barnard 68 tamsiajame ūke²⁴. Paaškėjo, kad molekulių santykiai (kaip NH₃/CO, HC₃N ir kt.) tamsaus ūko centre skiriasi nuo jo pakraščių. Tamsūs ūkai yra vietas, kur radio bangomis aptinkami net tokie kompleksiniai junginiai kaip organinės molekulės. Šių organinių medžiagų aptikima²⁵s kelia hipotezę, kad gyvybės statybiniai blokai (kaip aminorūgščių pirmtakai) gali formuotis dar prieš susidarančius žvaigždėms, pačiuose tamsiuosiuose debesese, ant dulkių grūdelių paviršių.

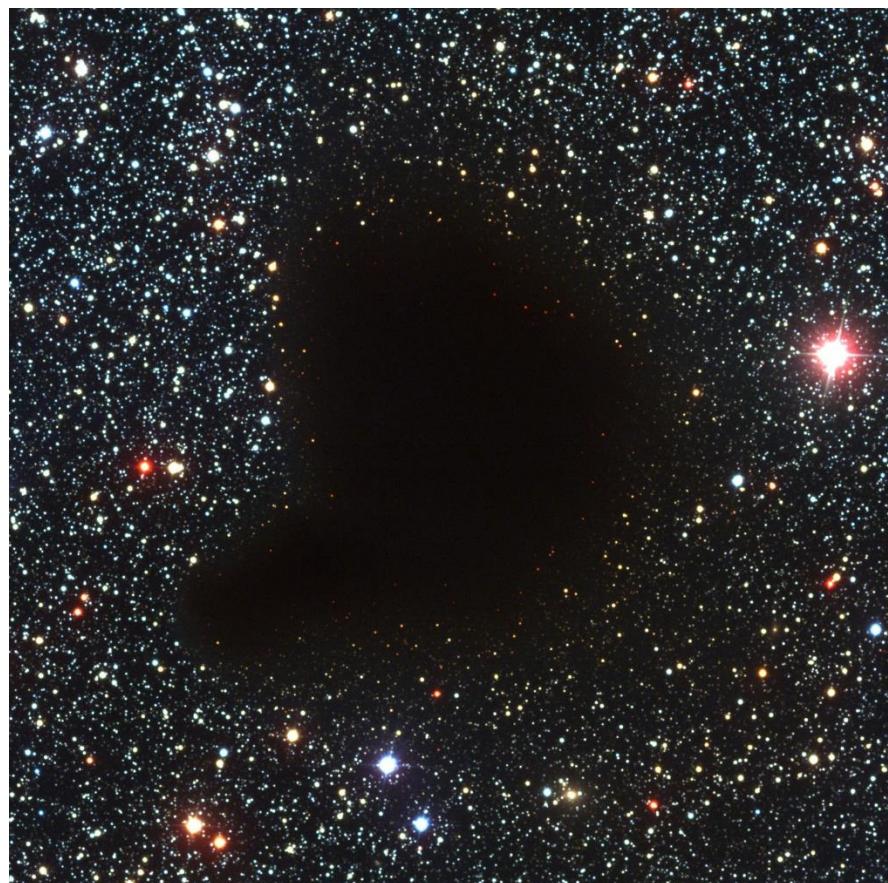
²³ Laimano serija – vandenilio spektro linijų grupė, vykstant kvantinams šuoliams.

²⁴ Abundances of Molecular Species in Barnard 68; James Di Francesco (UC Berkeley), Michiel R. Hogerheijde (UC Berkeley) ir kiti; <https://arxiv.org/abs/astro-ph/0208298>

²⁵ B68, the black cloud ; <https://www.eso.org/public/images/eso9924a/>



30 pav. Habo nuotraukoje pavaizduota IRAS 14568-6304, užgimusi jauna žvaigždė Circinus tamsiame ūke. Autorius: ESA/Hubble & NASA;
<https://cdn.esahubble.org/archives/images/screen/potw1421a.jpg>; CC BY 4.0



31 pav. Barnard 68 tamsusis ūkas, Autorius: ESO; Šaltinis:
<https://www.eso.org/public/images/eso9924a/>; CC BY 4.0

9.5. Žvaigždžių spiečiai

Žvaigždžių spiecius – tai gravitaciškai susijusi žvaigždžių grupė, susiformavusi kartu toje pačioje kosminėje debesyje beveik tuo pačiu metu. Spiečiaus žvaigždės jada kartu erdvėje ir būna susietos tarpusavio gravitacija ištisus milijonus ar net milijardus metų. Pagrindinės spiečių rūšys yra **atvirieji (padrikieji) spiečiai ir rutuliniai spiečiai**, kurie smarkiai skiriasi savo sandara, dydžiu, amžiumi, žvaigždžių sudėtimi bei pasiskirstymu galaktikose. Pastarųjų metų misijos – tokios kaip ESA teleskopas **Gaia**, NASA/ESA **Hubble** ir **James Webb** kosminiai teleskopai – suteikė naujų, išsamių duomenų apie žvaigždžių spiecius. Šiuolaikiniai tyrimai atskleidė tūkstančius naujų spiečių mūsų Galaktikoje, detaliau suskaičiavo milžiniškų spiečių šerdžių žvaigždes, ir net užfiksavo pačius pirmuosius spiecius Visatoje, susiformavusius vos po 460 mln. metų nuo Didžiojo sprogimo.

9.5.1. Žvaigždžių spiečių apibrėžimas ir morfologija

6 lentelė. Padrikųjų ir rutulinių spiečių bruožai.

Savybė	Atvirieji spiečiai (padrikieji)	Rutuliniai spiečiai
Tipinė struktūra	Laisva, netaisyklinga, žvaigždės nesutankintos centre.	Kompaktiška, apytiksliai sferinė, tankiausia centre.
Žvaigždžių skaičius	Nuo kelių dešimčių iki kelių tūkstančių žvaigždžių	Dešimtys tūkstančių – milijonai žvaigždžių
Tipinis skersmuo	~5–30 šviesmečių (branduolys ~1–5 šviesm., išorinis plotas iki ~30)	~50–300 šviesmečių (didesni gali siekti 400+).
Amžiaus intervalas	Labai jauni iki vidutinio amžiaus: dažniausiai $< 0,5$ mlrd. metų (retai iki ~5 mlrd.)	Labai seni: ~8–13 mlrd. metų [science.nasa.gov] (Visatos „senoliai“).
Lokalizacija galaktikoje	Galaktikų diskai (spiralinėse vijoje, netaisyklingų galaktikų žvaigždėdaros regionuose)	Galaktikų halai ir centrinės dalys (aplink branduolį, toli nuo diskų)
Cheminė sudėtis	Metalų turtingos (I populiacija); sudėtis artima Saulės, jaunose – net praturtinta.	Metalų stokojančios (II populiacija); ~10–100 kartų mažiau sunkiųjų elementų nei Saulėje
Dominuojantys žvaigždžių tipai	Jaunuose – karštos O, B, A žvaigždės; senesniuose – F, G nykštukės, raudonos milžinės.	Raudonosios milžinės, geltonos nykštukės, horizontaliosios šakos žvaigždės; be jaunų masyvių žvaigždžių
Gyvavimo trukmė	Trumpalaikiai – linkę išsisklaidyti per kelias dešimtis – šimtus mln. metų	Ilgalaikiai – stabilūs milijardus metų (išlieka iki galaktikos amžiaus).
Pavyzdžiai	Sietynas (M45), Hiadės, Dvynių spiečius (M44), NGC 3603 (Karina).	Omega Centauri, 47 Tucanae, Heraklio spiečius (M13), M15.

Atvirieji spiečiai (padrikieji) – tai nedidelės ir padrikos žvaigždžių grupės. Jų forma netaisyklinga, žvaigždės pasiskirsčiusios palyginti retai. Tipiškame atvirajame spiečiuje gali būti nuo keliasdešimt iki kelių tūkstančių žvaigždžių. Centrinėje dalyje paprastai telkiasi tankesnė žvaigždžių koncentracija (~keleto šviesmečių skersmens branduolys), o aplink jį driekiasi retesnė „karūna“ (išsibarstęs išorinis regionas, siekiantis kelias dešimtis šviesmečių). Dėl nedidelės masės ir silpnnesnės gravitacijos atvirieji spiečiai neturi aiškiai apibrėžtos sferinės formos – žvaigždės išsidėsčiusios padrikai, tarp jų yra nemaži tarpai. Pavyzdžiui, Sietyno (Pleiadžių) spiečius Tauro žvaigždyne yra atvirasis spiečius, sudarytas iš kelių šimtų jaunų žvaigždžių, išsibarsčiusių ~13 šviesmečių plotėje. Dėl tokios laisvos struktūros Sietynas danguje matomas ne kaip vientisas švytintis ūkas, o kaip atskirų žvaigždžių sankaupa. Kitas pavyzdys – Hiadžių spiečius, esantis ~153 šviesmečių atstumu Jaučio žvaigždyne; tai artimiausias Žemei atvirasis spiečius, kurio žvaigždės išsidėsčiusios plačiai, ~18 šviesmečių skersmens erdvėje.

Rutuliniai spiečiai – visiška priešingybė. Tai labai masyvios, gravitacijos stipriai suspaustos žvaigždžių sankaupos, pasižyminčios apytikriai rutulio forma. Šiuose spiečiuose žvaigždės sutelktos tūkstančius kartų tankiau nei atviruosiuose spiečiuose, ypač branduolio srityje. Rutulinio spiečiaus skersmuo gali siekti nuo ~15 iki ~140 parsekų (apie 50–450 šviesmečių). Viduje gali būti dešimtys tūkstančių, šimtai tūkstančių ar net milijonai žvaigždžių, sutelktų viename „rutulyje“. Dėl tokios masyvios struktūros rutuliniai spiečiai visuomet atrodo kompaktiški ir apvalūs – teleskopu ar nuotraukose jie pasireiškia kaip ryškesnis centrinis šviesos rutulys su palaipsniui blėstančiais kraštais.

Omega Centauri – didžiausias Paukščių Tako rutulinis spiečius – puikiai iliustruoja šią morfologiją. Omega Centauri turi bent dešimt milijonų žvaigždžių, o bendroji masė siekia ~4 milijonus Saulės masių. Jo išvaizda per teleskopą primena ūkanotą švytintį kamuoli.

Net ir mažesni rutuliniai spiečiai, tokie kaip M13 Heraklio žvaigždyne ar 47 Tukano spiečius (NGC 104) Pietų danguje, akivaizdžiai sferiški – šiose senų žvaigždžių sankaupose ~50–100 šviesmečių erdvėje sutelpa šimtai tūkstančių žvaigždžių. Didelio rutulinio spiečiaus branduolyje žvaigždės gali būti vos kelias dešimtias šviesmečio nutolusios viena nuo kitos; palyginimui, artimiausia Saulei žvaigždė Kentauro Proksima (Proxima Centauri) yra ~4,2 šviesmečių atstumu. Tad rutulinio spiečiaus centre naktiniame danguje žvaigždės būtų tūkstančius kartų tankiau nei mūsų aplinkoje.

Pažymėtina, jog spiečiai nėra vien tik Paukščių Tako reiškinys – juos aptinkame ir kitose galaktikose. Didžiajame Magelano debesye (DMD) ir Mažajame Magelano debesye (MMD) (dvejose palydovinėse Paukščių Tako galaktikose) egzistuoja įvairių tipų spiečiai: nuo jaunų padrikų žvaigždžių grupių iki senų rutulinių spiečių. Pavyzdžiui, Didžiajame Magelano debesye, Tarantulo ūko regione esančiame ypač masyviame ir jauname spiečiuje R136, telkiasi tūkstančiai masyvių žvaigždžių – tai savotiškas „super spiečius“, galintis būtī būsimo rutulinio spiečiaus užuomazga.

Kitose galaktikose, ypač didelėse elipsinėse, rutulinių spiečių skaičius stulbina. Milžiniška M87 elipsinė galaktika Mergelės spiečiuje turi apie 15 000 rutulinių spiečių – ištisą spiečių „šeimą“. Paukščių Take žinomų rutulinių spiečių yra tik apie ~150. Taigi galaktikų mastu žvaigždžių spiečių morfologija apima platų spektrą: nuo mažų palaidų grupelių iki milžiniškų žvaigždžių rutulių, kurie savo dydžiu neretai prilygsta mažoms galaktikoms.

9.5.2. Žvaigždžių spiečių vieta galaktikose ir Visatoje

Galaktikos diskas vs. halas. Atvirieji spiečiai dažniausiai randami spiralinių ir netaisyklingų galaktikų diskuose, ypač spiralinių vijų srityse. Kadangi jie formuoja iš dujų debesų, jų būvimo vietos siejasi su aktyviomis žvaigždėdaros zonomis – pavyzdžiui, Paukščių Take atvirieji spiečiai koncentruojasi mūsų Galaktikos plokštumoje, tarp spiralinių vijų. Tūkstančiai atvirųjų spiečių aptikta Paukščių Tako diske; mokslininkai mano, jog jų gali būti daug daugiau, tiesiog dalis kol kas pasislėpę dulkių debesyse arba išsisklaidę ir nebepastebimi. Naujų technologijų dėka jų atrandama vis daugiau – pavyzdžiui, Gaia observatorija identifikavo nemažai anksčiau nežinotų spiečių net už Paukščių Tako plokštumos ribų (didesniame nei $\pm 20^\circ$ Galaktinio platumo intervale). Klasiniai Paukščių Tako atvirųjų spiečių pavyzdžiai – minėtieji Sietynas ir Hiadės Tauro žvaigždyne, Dvynių spiečius (Praesepe, M44) Vėžio žvaigždyno kryptimi, M11 Skydo žvaigždyne ir t.t. Visi jie yra Galaktikos diske, maždaug Saulės aplinkoje ar Galaktikos spiralinėse vijose.

Skirtingai nei padrikieji spiečiai, rutuliniai spiečiai reziduoja galaktikų haluose – erdvėje aplink galaktikų centrus, gerokai virš ar po disco plokštumos. Paukščių Tako atveju rutuliniai spiečiai pasiskirstę plačiai aplink Galaktikos centrą, sudarydami beveik sferinį apvalkalą (halą). Dauguma ~150 žinomų mūsų Galaktikos rutulinių spiečių skrieja ekscentrinėmis orbitomis apie Galaktikos centrą, neretai nuskriedami toli už disco ribų. Kai kurie net juda retrogradiškai (priešinga kryptimi nei Galaktikos diskas sukasi), tai leidžia spėti, kad jie gali būti iš kitų nykstančių galaktikų įtraukti spiečiai – mūsų Galaktika galbūt juos prisijungė praeityje, suardžiusi mažesnes palydovines galaktikas. Iš tiesų, dalis Paukščių Tako rutulinių spiečių (pvz., Omega Centauri ar M54) įtariamia esant buvusių nykštukinių galaktikų branduoliais, likusiais po tų galaktikų absorbcijos.

Rutuliniai spiečiai aptinkami visų tipų didesnėse galaktikose: spiralinėse (pvz., Andromedos galaktika turi per 500 rutulinių spiečių), elipsinėse (jos itin turtingos spiečių – minėta galaktika M87 su 15 tūkst. spiečių), net nykštukinėse (nors mažos galaktikos gali turėti vos kelis spiečius arba neturėti nė vieno).

Vietinės galaktikų grupės kontekstas. Vietinė galaktikų grupė, gravitacijos jėgomis susietų galaktikų sistema, kuriai priklauso ir mūsų Galaktika – Paukščių Takas. Vietinė galaktikų grupė apima daugiau kaip 50 galaktikų (didžiausios – Andromedos galaktiką, spiralinę Trikampio galaktiką ir Didysis Magelano Debesis), esančių apie 3 mln. šviesmečių spindulio sferoje.

Magelano debesyse taip pat randame įvairių spiečių. Didysis Magelano debesis turi nemažai jaunu atvirųjų spiečių (tokius kaip NGC 1850 ar NGC 1866) ir keletą senesnių (pvz., NGC 121 – ~10 mlrd. metų senumo rutulinis spiečius MMD galaktikoje). Mažasis Magelano debesis turtingas jaunu spiečių, tokį kaip NGC 330 (jaunas ryškus padrikas spiečius) bei keliais senaisiais rutuliniais spiečiais.

Šie spiečiai mažų galaktikų haluose liudija, kad net nykštukinės galaktikos ankstyvoje istorijoje galėjo formuoti rutulinius spiečius arba juos mainytis per galaktikų sąveikas.

Taigi, atviruosius spiečius rasime galaktikų diskuose – ten, kur gimsta žvaigždės, o rutulinius – galaktikų išorėje (haluose) arba galaktikų centrinėse dalyse. Dėl to neretai rutuliniai spiečiai matomi aplink galaktikų centrus kaip žérinčių taškų aureolę. Pavyzdžiu, jei žiūrėtume iš toli į Paukščių Taką, išvystume blyškų diską (žvaigždžių ir dulkių plokštumą) ir apgaubiančią difuzinę sferą, kurioje žiba šimtai rutulinių spiečių. Šis pasiskirstymo skirtumas – atvirieji spiečiai Galaktikos diske, rutuliniai Galaktikos aureolėje – susijęs su jų kilme ir amžiumi, ką aptarsime toliau.

9.5.3. Amžius, formavimasis, evoliucija ir dinamika

Žvaigždžių spiečiai gimsta ten, kur formuoja žvaigždės – milžiniškuose molekuliniuose debesyse. Jei dujų debesyje vienu metu susidaro ne viena, o daug protžvaigždžių, iš to paties debesies medžiagos susiformuoja žvaigždžių sankauptą. Kitaip tariant, kai sąlygos palankios vienai žvaigždei, paprastai aplink atsiranda ir daugiau – gimsta ištisa grupė. Pradžioje jaunas spiečius dar glūdi ji pagimdžiusiame dujų debesyje, tačiau naujų žvaigždžių energingi vėjai, ultravioletinė spinduliuotė ir vėliau supernovų sprogimai ištumia dujas iš spiečiaus aplinkos. Netekęs dujų, spiečius nebesiformuoja toliau – lieka tik gimusios žvaigždės. Toks gimimo scenarijus bendras ir atviriesiems, ir rutuliniams spiečiams, tačiau mastelis ir sąlygos skiriasi.

Atvirųjų spiečių formavimasis. tai dažnas dabartinėje Visatoje vykstantis procesas. Didžiulėse tamsiose ūko struktūrose (pvz., Erelio ūkas, Orono ūkas) formuoja galybė žvaigždžių, iš kurių dauguma sudaro laisvas grupes. Jei grupė turi pakankamai masės, kad gravitacija nugalėtų polinkį išsisklaidyti, ji taps *atviruoju spiečiumi*. Daug atvirųjų spiečių tebeglūdi netoli gimimo vietas – pavyzdžiu, Erelio ūko širdyje esantis spiečius NGC 6611 (jaunas ~2 mln. m. spiečius, siejamas su „Kūrinijos stulpais“) arba Orono ūko žvaigždžių spiečius (Trapecijos spiečius) – tai jauni spiečiai, vis dar apgaubti likutinėmis dujomis. Aplinkui juos matome gimimo „lopši“ – dujų ir dulkių ūką. Atvirieji spiečiai formuoja ir nykštukinėse galaktikose (Magelano debesyse), ir didesnių galaktikų spiralinėse vijose iki šiol, tad laikomi santykinai jaunais galaktikų komponentais.

Rutulinių spiečių formavimasis. Rutulinių spiečių formavimasis vyko ankstyvoje Visatoje. Šių spiečių amžius rodo, kad jie susidarė ~ prieš 8–13 mlrd. metų, t. y. netrukus po galaktikų susiformavimo. Manoma, kad rutuliniai spiečiai susidarė iš ypatingai masyvių, tankių dujų debesų arba protogalaktinių fragmentų. Sąlygos turėjo būti tokios, kad susiformotų šimtai

tūkstančių žvaigždžių beveik vienu metu nedideliamė tūryje – tai yra kur kas intensyvesnė žvaigždėdaros banga nei tipiniame šiuolaikiniame spiečiuje. Be to, rutulinis spiečius po susidarymo visiškai neteko dujų (gal pirma sprogus masyvioms žvaigždėms, arba visa dujinė terpė buvo išnaudota susidarant žvaigždėms), todėl naujų žvaigždžių tame nebeatsirado. Dalis mokslininkų kelia hipotezę, kad rutuliniam spiečiam formuotis galėjo padėti ir labai masyvios „superžvaigždės“ – trumpaamžės milžiniškos pirmos kartos žvaigždės, kurios greitai praturtino likusias dujas tam tikrais elementais ir mirė, palikdamos tik netiesioginius pėdsakus. Akivaizdu, kad tokio masto spiečių formavimasis šiandieninėje Visatoje beveik nebevyksta – tai senas procesas, susijęs su pirmųjų galaktikų evoliucija. JWST teleskopas stebėjimai parodė masyvius jaunus spiečius 13 mlrd. metų senumo Visatoje, galbūt atitinkančius būsimas rutulinį spiečių populiacijas.

Atvirieji spiečiai yra jauni – daugumai mažiau nei 500 mln. metų, dažnai tik dešimtys milijonų metų. Tiesa, pasitaiko ir senesnių atvirųjų spiečių: pvz., M67 spiečius Vėžio žvaigždyne skaičiuoja ~4 milijardus metų. Tačiau tai išimtis – atvirieji spiečiai paprastai ilgai neišlieka.

Rutuliniai spiečiai – vieni seniausių objektų galaktikose, jų amžius dažniausiai 10–13 mlrd. metų. Jie menkai jaunesni už regimąją Visatą (Visatos amžius ~13,8 mlrd. m.), todėl laikomi ankstyvųjų Visatos formavimosi epochų reliktais. Pavyzdžiu, 47 Tukano rutulinio spiečiaus amžius ~12 mlrd. metų, M13 – ~11,7 mlrd. m., Omega Centauri – apie 11 mlrd. m. Šie spiečiai susiformavo, kai Paukščių Tako pirmtakė dar tik kūrėsi. Tuo tarpu Sietyno amžius ~115 mln. metų, Hiadžių – ~625 mln. metų: palyginti su rutuliniais, tai visai „kūdikiai“. Magelano debesėse yra atvirųjų spiečių, kurių amžius matuojamas keliais milijonais metų (labai jauni), ir yra kelių miliardų senumo spiečių – tokie vadinami „vidutinio amžiaus spiečiai“.

Atvirieji spiečiai – trumpaamžiai kosminiai dariniai. Dėl palyginti mažos masės jų gravitacija ne visada pajęgi išlaikyti visas žvaigždes ilgą laiką. Jau spiečiaus formavimosi metu ivairios sąveikos jėgos gali išblaškyti dalį žvaigždžių. Vėliau, sper gravitaciniu proceso, masyvesnės žvaigždės linkusios lėtėti ir slinkti centro link, o lengvesnės – įgyja didesnį greitį ir gali pabėgti iš spiečiaus. Laikui spiečius retėja – lėtai netenka žvaigždžių. Be to, išorinės jėgos – pavyzdžiu, Galaktikos gravitacinių jėgų, prasilenkimai su dideliais molekulinių debesimis galaktikos diske – veikia spiečių iš išorės. Todėl būdinga, kad atvirasis spiečius galiausiai išsisklaido: žvaigždės išsiskirsto ir įsilieja į bendrą galaktikos pavienių žvaigždžių populiaciją. Vidutinė atvirojo spiečiaus „gyvenimo trukmė“ – kelios dešimtys ar šimtai milijonų metų (neretai po kelių milijonų metų pradeda irti). Tai paaiškina, kodėl Paukščių Take nėra itin senų atvirųjų spiečių – dauguma tiesiog neišgyvena daugiau nei ~1–2 mlrd. metų. Didžiausi ir tankiausi atvirieji spiečiai (kartais vadinami jaunaisiais masyviais spiečiais) gali išlikti ilgiau.

Rutuliniai spiečiai yra daug stabilesni. Jų milžiniška masė ir gravitacija tvirtai laiko žvaigždes. Nors per milijardus metų ir rutuliniai spiečiai praranda dalį narių (ypač išorinių regionų žvaigždės gali būti pamažu išplėšiamos Galaktikos gravitacinių jėgų), pati spiečiaus struktūra paprastai išlieka. Kai kurie rutuliniai spiečiai, priartėję labai arti Galaktikos centro, galėjo būti

suardyti per stiprius sąveikas – manoma, kad Paukščių Takas praeityje turėjo daugiau nei 150 rutulinių spiečių, bet dalis buvo sunaikinti. Vis dėlto daugelis rutulinių spiečių egzistuoja nuo galaktikos susidarymo. Jų viduje vyksta dinaminiai procesai: dėl didelio žvaigždžių tankio neretai nutinka artima žvaigždžių sąveika, kurios gali sukurti įdomius fenomenus. Vienas fenomenas – „mėlynieji atsilikėliai“ (angl. *blue stragglers*), žvaigždės, kurios spiečiuje atrodo neįprastai karštos ir jaunos. Jos iš tiesų yra senų žvaigždžių susiliejimo arba masės perėmimo produktas – tarsi „žvaigždžių vampyrų“, pasisavinę medžiagą iš kaimyninių žvaigždžių ir „atjaunėję“. Rutulinio spiečiaus branduolyje laikui bėgant gali įvykti branduolio kolapsas – žvaigždės taip susispiečia centre, kad suformuoja ypač tankų branduoli (tai nutiko, pavyzdžiui, M15 spiečiuje Pegaso žvaigždyne).

9.5.4. Žvaigždžių evoliucija spiečiuose

Kadangi spiečiuje visos žvaigždės gimė vienu metu, jos evoliucionuoja sinchroniškai pagal savo mases. Tai reiškia, kad masyviausios spiečiaus žvaigždės pirmos išeikvoja kurą ir sprogsta (jei pakankamai masyvios) per kelis milijonus metų, mažesnės gyvena ilgiau.

Dėl to jaunuose atviruosiuose spiečiuose (iki ~ 100 mln. m.) matome ir labai ryškių mėlynų O/B tipo žvaigždžių – jos dar „gyvos“. Per $\sim 10\text{--}100$ mln. metų šios sunkiasvorės žvaigždės sunyksta, pavirsdamos neutronines žvaigždes ar juodąsias skyles, o spiečiuje lieka tik mažesnės masės, ilgaamžės žvaigždės. Tarkime, ~ 500 mln. metų amžiaus spiečiuje nerasime nei vienos trumpo gyvenimo O tipo supermilžinės – jos visos jau seniai sprogo.

Senyuose rutuliniuose spiečiuose ($10+$ mlrd. metų) išlikusios tik mažos ir vidutinės masės žvaigždės (maždaug Saulės masės ar mažesnės), nes visos didesnės (virš $\sim 2\text{--}3$ Saulės masių) seniai evoliucionavo į supernovas ar baltąsias nykštukes. Dėl to rutuliniuose spiečiuose nematome mėlynųjų grynų O/B žvaigždžių (nebent minėtus „mėlynuosis atsilikėlius“) – ten dominuoja raudonosios milžinės ir geltonos nykštukės. Išnagrinėjus, iki kokios spektrinės klasės žvaigždės spėjo pasitraukti iš pagrindinės sekos (vadinamas posūkio taškas H-R diagramoje), galima spręsti, kiek laiko spiečius egzistuoja. Pavyzdžiui, jauname spiečiuje vis dar bus pagrindinėje sekoje karštų žvaigždžių, o labai sename – net Saulės tipo žvaigždės bus jau pavirtusios į milžines.

Apibendrinant, **atvirasis spiečius** – tarsi *jauna šeima*, kuri ilgainiui išskirsto, o **rutulinis spiečius** – *kosminių senolių bendruomenė*, ilgai gyvenanti kartu, nors ir retėjanti. Šios savybės atsispindi ir žvaigždžių tipų bei cheminės sudėties skirtumuose.

9.5.5. Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis spiečiuose

Žvaigždžių spiečiaus žvaigždės gimsta iš to paties dujų debesies, todėl jų cheminė sudėtis (procentinis vandenilio, helio ir sunkesnių elementų kiekis) pradžioje būna labai panaši. Astronomai tai vadina *metališkumu* – elementų sunkesnių už helį gausa, lyginant su Saulė. Metališkumas astronomijoje reiškia žvaigždės sudėtyje esančių elementų, sunkesnių už vandenilį ir helį, gausą. Jis matuojamas lyginant geležies ir vandenilio santykį su Saulės etalonu, naudojant [Fe/H] skalę.

Pagal metališkumą žvaigždės skirstomos į tris populiacijas: I (jaunos, metalų turtingos), II (senos, metalų stokojančios) ir III (hipotetinės pirmynkštės, be metalų). Metališkumas daro įtaką žvaigždės spalvai, spektrui, evoliucijai ir planetų formavimosi galimybėms – kuo daugiau metalų, tuo didesnė tikimybė, kad žvaigždė turės planetų.

Pavyzdžiui, Saulė turi $[Fe/H] = 0$, Arktūras: $-0,5$, o kamuolinis spiečius M13: $-1,33$. Hipotetinės III populiacijos žvaigždės turėjo $[Fe/H] < -6$, t. y. milijoną kartų mažiau geležies nei Saulė. Metališkumas yra svarbus parametras, leidžiantis suprasti žvaigždžių kilmę, amžių ir galaktikos evoliuciją. Atvirieji spiečiai paprastai priklauso populiacijai I, o rutuliniai – populiacijai II.

Atvirujų spiečių žvaigždės yra *metališkos*, nes formuoja galaktikos diske iš jau keliskart perdirbtos medžiagos. Jų sudėtyje santykinai daug elementų, tokų kaip deguonis, geležis, silicis ir kt., kuriuos prieš tai Visatos istorijoje prigamino ankstesnės kartos supernovos.

Tipiškas atvirasis spiečius turi beveik Saulės metališkumą (pvz., Sietyno žvaigždžių cheminė sudėtis labai artima Saulės, nes jos susidarė iš to paties Galaktikos spiralinio vijos debesies).

Kai kurie atvirieji spiečiai, ypač esantys toliau nuo Galaktikos centro, gali turėti kiek mažesnį metališkumą, bet vis tiek jie turtingi metalų lyginant su rutuliniais spiečiais.

Spektriskai atviruosiuose spiečiuose dažnai randame karštų, jaunų žvaigždžių: O, B, A spektrinių klasių (jei spiečius labai jaunas). Pvz., Sietyno pagrindinės žvaigždės – B tipo (mėlynos, karštos). Kiek vėliau, spiečiui senstant, ryškiausiomis tampa mėlynos ir baltos nykštukės (pvz., ~ 100 mln. m. spiečiuje) ir rausvos milžinės (~ 1 mlrd. m. spiečiuje, kai pradeda evoliucionuoti vidutinės masės žvaigždės). Kadangi atvirieji spiečiai neturi griežtos tvarkos ar masės segregacijos, įvairių tipų žvaigždės pasiskirsto gana tolygiai. Taip pat, būdami vienos „kartos“ objektai, atvirieji spiečiai paprastai neturi kelių kartų populiacijų savyje – visos jų žvaigždės susiformavo vienu metu, todėl turi vienodas pradinio cheminio sudėties charakteristikas.

Rutulinių spiečių žvaigždės – klasikinių II populiacijos žvaigždžių pavyzdys. Tai labai mažo metališkumo žvaigždės, sudarytos beveik vien iš vandenilio ir helio, tik su sunkesnių elementų pėdsaku (paprastai 5–100 kartų mažiau „metalų“ nei Saulėje). Šios žvaigždės gimė Visatai esant ankstyvoje stadijoje, kai dar nedaug anksstyvųjų žvaigždžių buvo spėjė praturtinti tarpžvaigždinę aplinką sunkesniais elementais. Dėl to rutulinių spiečių šviesoje dominuoja **geltonai raudonos spalvos** (šaltesnių žvaigždžių) atspalviai. Ryškiausios žvaigždės tokioje sankaupoje – raudonosios

milžinės (supermilžinės): senos, masyvesnės žvaigždės, evoliucionavusios nuo pagrindinės sekos ir pasiekusios šaltą, išsiplėtusią būseną. Pavyzdžiui, stebint teleskopu rutulinį spiečių M72, akivaizdu, kad šviesiausios jo žvaigždės yra raudonos milžinės, o blankios – blankūs geltoni nykštukai. Spektriskai rutuliniuose spiečiuose vyrauja F, G, K, M spektrų žvaigždės (nuo baltais gelsvų iki raudonų). Mėlynų O/B nykštukų juose beveik nėra – tokios egzistuoja tik ypatingų aplinkybių deka (minėti „mėlynieji atsilikėlia“ i, atsiradę dvinarėms žvaigždėms susijungus; jie sudaro mažumą).

Idomu, kad priešingai nei atvirųjų spiečių atveju, daugelis rutulinių spiečių rodo kelių „žvaigždžių kartų“ požymius: nors visos žvaigždės gimė beveik vienu metu, aptinkama elementų gausų skirtumų tarp skirtingu žvaigždžių grupių. Pavyzdžiui, to paties spiečiaus vienose žvaigždėse daugiau natrio ar azoto, kitose – daugiau deguonies. Tai liudija, kad spiečiaus viduje galėjo būti kelios formavimosi bangos arba kad dalis žvaigždžių gavo „papildymą“ iš pirmųjų spiečiau supernovų. Mokslininkai intensyviai tiria ši reiškinį – manoma, kad jauno rutulinio spiečiaus masyvios žvaigždės (ar net hipotetinės superžvaigždės) praturtino aplinkinius žvaigždžių formavimosi likučius tam tikrais cheminiais elementais, sukurdamos antrinę žvaigždžių populiaciją siek tiek kitokios sudėties. Visgi visų tų spiečiaus žvaigždžių bendras metališkumas išlieka labai žemas, ženkliai mažesnis už Saulės.

Be to, rutuliniuose spiečiuose yra daug dvinių žvaigždžių sistemų (dėl didelio tankio dalis žvaigždžių susiporuoja gravitaciškai). Dvinarės žvaigždės irgi veikia spiečiaus chemiją bei evoliuciją – pavyzdžiui, masės mainais dvinarėse žvaigždės sukuria „mėlynuosius atsilikėlius“, taip pat neretai aptinkama rentgeno dvinarės (neutroninių žvaigždžių ar juodųjų skylių poros).

9.5.6. Naujausi žvaigždžių spiečių tyrimų rezultatai

Per pastaruosius kelerius metus pažangūs teleskopai suteikė naujų įžvalgų apie žvaigždžių spiečius – nuo mūsų Galaktikos tyrimų iki tolimiausią Visatos epizodų.

Gaia misija ir atvirųjų spiečių paieška. 2013 m. pradėjusi darbą ESA misija Gaia (tiksliai matuojanti milijardų žvaigždžių padėtis ir judėjimą) sukėlė proveržį identifikuojant spiečius Paukščių Take. Iki Gaia misijos astronomai buvo katalogavę apie 1200 atvirųjų spiečių mūsų Galaktikoje.

Gaia duomenys dramatiškai padidino šį skaičių – vien antrasis duomenų leidimas (2018 m.) papildomai nurodė apie 4000 naujai atrastų spiečių, o preliminarūs trečiojo leidimo tyrimai papildė dar ~1600.

2023 m., Kinijos Guangdžou universiteto tyrėjų grupė, išnagrinėjusi Gaia DR3 katalogą²⁶ toliau nuo Galaktikos plokštumos, rado dar 1 179 iki tol nežinomus spiečius. Šis tyrimas padidino žinomų Paukščių Tako atvirųjų spiečių skaičių iki maždaug ~7000.

²⁶ Blind Search of The Solar Neighborhood Galactic Disk within 5kpc: 1,179 new Star clusters found in Gaia DR3; Huanbin Chi, Feng Wang ir kiti.; <https://arxiv.org/abs/2303.10380>

Gaia taip pat aptiko, kad daugelis atvirųjų spiečių nyksta – pavyzdžiui, identifikavo aplink spiečius besidriekiančias žvaigždžių uodegas, rodančias spiečių irimo procesą²⁷.

Omega Centauri spiečiaus žvaigždžių inventorizacija²⁸. 2023 m. spalį Gaia komanda išleido specialų „Focused Product Release“ duomenų rinkinį. Vienas įspūdingiausių rezultatų – Omega Centauri spiečiaus šerdies žvaigždžių inventoriacijos. Gaia, pritaikiusi specialų stebėjimo režimą, nuodugniai peržvelgė Omega Centauro spiečiaus centrą ir aptiko net 526 587 naujas žvaigždes šiame spiečiuje, kurių anksčiau nematė. Tai yra 10 kartų daugiau žvaigždžių, nei buvo fiksuota anksčiau – faktiškai per vieną spiečių Gaia „pridėjo“ pusę milijono žvaigždžių. Šios papildomos žvaigždės – blakesnės ir randasi spiečiaus šerdyje – dabar leido sudaryti kur kas pilnesnį Omega Centauri (ir kitų panašių spiečių) vaizdą. Gauti duomenys padės atsakyti į klausimus, ar Omega Centauri turi tankų branduolių, ar Jame slypi masyvi juodoji skylė, kaip žvaigždės Jame migruoja.

Netikėtai didelis Sietynas²⁹. Nors Sietyno (Pleiadžių) spiečius žinomas nuo senovės, tyrimas atskleidė, kad jis gerokai didesnis, nei manyta. 2025 m. lapkritį pranešta, jog pasitelkus NASA TESS kosminį teleskopą ir Gaia duomenis, identifikuota daugybė nutolusių Sietyno narių. Pasirodo, Sietynas – tai ne tik garsiosios „Septynios Seserys“; jis turi tūkstančius blakesnių „pusbrolių“, išsibarsčiusių dideliame dangaus plote. Skaičiuojama, kad Sietyno žvaigždžių skaičius gali būti 20 kartų didesnis už anksčiau žinotą. Kitaip tariant, vietoje kelių šimtų narių, šis spiečius iš tiesų apima kelis tūkstančius žvaigždžių, kurios per ~100 mln. metų nuo susiformavimo jau spėjo gerokai nutolti viena nuo kitos. Šis atradimas keičia supratimą apie atvirųjų spiečių sklaidos procesą: matome, kad spiečiaus „šeima“ gali likti susijusi gravitaciškai ar kinematiškai net ir plačiai išsisklaidžius. Tyrėjai pažymi, kad panašiai gali būti su daugeliu kitų spiečių – tai, ką laikėme atskirais spiečiais, galbūt tėra didesnių žvaigždžių „šeimų“ centrinės dalys. Ateityje, matuojant žvaigždžių sukimąsi ir judėjimą, galima bus identifikuoti tokias pasislėpusias spiečių dalis ir net mėginti surasti giminiškas Saulės sistemos kilmės žvaigždes.

Spiečių UV tyrimai. 2025 m., minint 35-ąsias Hubble kosminio teleskopo metines, ESA/Hubble išleido atnaujintas keleto spiečių nuotraukas ultravioletinėje spektro dalyje. Viena iš jų – rutulinio spiečiaus M72 (Vandenio žvaigždyne) vaizdas³⁰, kuris gautas sujungus vaizdus UV ir

²⁷ Improved Hard Example Mining by Discovering Attribute-based Hard Person Identity; Xiao Wang, Ziliang Chen ir kiti; <https://arxiv.org/abs/1905.02102>

²⁸ 2023-10-10 Omega Centauri, a globular cluster bursting with stars;
https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/iow-2023/-/asset_publisher/5wEq7ZUa5aBz/content/2023-10-10-omega-centauri-a-globular-cluster-bursting-with-stars#

²⁹ „Lost Sisters Found: TESS and Gaia Reveal a Dissolving Pleiades Complex“; Andrew W. Boyle, Luke G. Bouma, Andrew W. Mann; <https://arxiv.org/abs/2511.07533> ir „NASA’s TESS Spacecraft Triples Size of Pleiades Star Cluster“; <https://science.nasa.gov/missions/tess/nasas-tess-spacecraft-triples-size-of-pleiades-star-cluster/>

³⁰ Hubble Visits Glittering Cluster, Capturing Its Ultraviolet Light;
<https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-visits-glittering-cluster-capturing-its-ultraviolet-light/>

matomos šviesos spektro dalyse. Ultravioletinė šviesa leidžia išryškinti karštesnes žvaigždes, todėl tokiamoje kombinuotame M72 atvaizde pastebimai išsiskyrė mėlsvų žvaigždžių pogrupis tarp įprastų raudonų milžinių. Mėlynos spalvos žvaigždės čia atitinka H-R diagramos horizontaliosios šakos žvaigždes – tai vidutinės masės senos žvaigždės, pasiekusios helio deginimo fazę, kurios yra karštesnės už raudonas milžines (bet ne tokios masyvios kaip „mėlynieji atsilikėliai“). Tuo tarpu ryškiai raudonos – tipinės raudonosios milžinės, didesnės masės senbuvės. Šis spalvinis skirtumas labai informatyvus: jis rodo spiečiaus sudėtinių žvaigždžių pasiskirstymą pagal masę ir evoliucijos stadiją.

Tyrinėdami tokius duomenis, astronomai geriau supranta, kaip rutuliniai spiečiai formavosi ir kaip vyksta jų vidinė evoliucija. Pvz., lygindami skirtingo amžiaus rutulinių spiečių UV-vaizdus, jie gali aptikti, ar spiečiuje esama netipinių jaunų objektų (pvz., minėtų „mėlynųjų atsilikėlių“) arba koks yra helio gausumas (nes horizontaliosios šakos žvaigždžių padėtis H-R diagramoje labai priklausoma nuo helio kiekio žvaigždėje).

Hubble taip pat neseniai fotografavo jaunus spiečius kituose ūkuose – pvz., NGC 346 spiečių Mažojo Magelano debesies galaktikoje³¹ – padėdamas atskleisti žvaigždėdaros procesus kitose galaktikose.

Nors JWST dabar perėmė dalį darbų, Hubble unikalus tuo, kad gali stebeti ultravioletinę spinduliuotę, kurios JWST negali stebeti – taigi klasikinių spiečių tyrimuose Hubble vis dar nepakeičiamas.

Apibendrinant, atvirieji spiečiai dabar nagrinėjami kaip dinamiškos žvaigždėdaros sistemos, kurių evoliuciją regime tiesiogiai (Sietyno pavyzdys), o rutuliniai spiečiai – kaip kosminiai archeologijos objektais, liudijantys pirmykštės Visatos sąlygas ir evoliuciją. Žvaigždžių spiečių tyrimai išlieka itin aktyvi sritis, jungianti žvaigždžių formavimosi, galaktikų evoliucijos ir cheminių elementų kilmės Visatoje temas.

³¹ Hubble Spots Stellar Sculptors in Nearby Galaxy; <https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-spots-stellar-sculptors-in-nearby-galaxy/>



32 pav. Rutulinio spiečiaus M72 vaizdas, sujungus vaizdus UV ir matomos šviesos spektro dalyse. UV leidžia išryškinti karštesnes žvaigždes – melsvų žvaigždžių pogrupis tarp įprastų raudonų milžinių. Autorius:

ESA/Hubble & NASA, A. Sarajedini, G. Piotto, M. Libralato;

https://assets.science.nasa.gov/dynamicimage/assets/science/missions/hubble/stars/globular-clusters/Hubble_M72_potw2516a.tif; CC BY4.0



33 pav. Žvaigždėdaros sritis padrikame žvaigždžių spiečiuje NGC 346 Mažojo Magelano debesies galaktikoje. Matoma spiečių sudarančių žvaigždžių vėjo ir sprogimų bangų suformuota tuštuma, gaubianti nustumtų dujų ir dulkių. Autorius: ESA/Hubble & NASA, A. Nota, P. Massey, E. Sabbi, C. Murray, M. Zamani (ESA/Hubble); Šaltinis:

https://assets.science.nasa.gov/dynamicimage/assets/science/missions/hubble/nebulae/emission/Hubble_NGC_346_heic2502a.tif, CC BY4.0

10. Turinys

1.	Dangaus sferos pagrindiniai taškai ir linijos	2
1.1.	Dangaus ašis, poliai, pusiaujas, horizontas, Zenitas ir Nadyras	2
1.2.	Dangaus dienovidinis ir vidurdienio linija.....	5
1.3.	Eqliptika	6
2.	Astronominės koordinačių sistemos	6
2.1.	Horizontinė (Alt-Az) koordinačių sistema.....	8
2.2.	Pusiaujinė (DEC-Ra) koordinačių sistema.....	8
2.3.	Pusiaujinė (DEC-H) koordinačių sistema.....	9
3.	Stebėtojo geografinės koordinatės	9
4.	Laiko matavimas astronomijoje	10
4.1.	Laiko matavimas.....	11
4.2.	Laiko sistemos	14
5.	Žemė ir Kosmosas: „Mobilis in mobili“	17
6.	Atstumų matavimas astronomijoje	20
7.	Dangaus skliautas ir žvaigždynai.....	21
7.1.	Žvaigždynai ir žvaigždėlapiai	21
7.2.	Žvaigždžių regimasis judėjimas dangaus skliautu	23
7.3.	Cirkumpolarinės žvaigždės ir žvaigždynai	26
7.4.	Dangaus objektų katalogai	28
7.5.	Dangaus kūnų ryškis.....	30
7.6.	Ribinis ryškis ir optiniai prietaisai	32
8.	Žvaigždės	33
8.1.	Matomų žvaigždžių skaičius	33
8.2.	Žvaigždžių spalvos ir jų spektrinės klasės	33
8.3.	Dvinarės žvaigždės	37
8.4.	Kintamosios žvaigždės	38
8.5.	Žvaigždžių mirgėjimas.....	39

9.	Tolimojo kosmoso objektai	40
9.1.	Galaktikos.....	41
9.1.1.	Galaktikų morfologija (struktūra ir forma)	41
9.1.2.	Galaktikų vieta Visatoje	45
9.1.3.	Amžius, formavimasis, evoliucija ir dinamika	47
9.1.4.	Žvaigždžių evoliucija galaktikose.....	50
9.1.5.	Žvaigždžių sudėtis ir cheminės savybės	52
9.1.6.	Tamsioji medžiaga ir juodosios skylės.....	53
9.1.7.	Naujausių tyrimų rezultatų apžvalga	56
9.2.	Emisiniai ūkai.....	59
9.2.1.	Apibrėžimas ir morfologija.	59
9.2.2.	[H II] sritys.	60
9.2.3.	Planetiniai ūkai	61
9.2.5.	Supernovų liekanos.....	68
9.3.	Atspindžio ūkai.....	71
9.3.1.	Apibrėžimas ir morfologija.	71
9.3.2.	Vieta Visatoje.....	72
9.3.3.	Formavimasis, amžius ir evoliucija	72
9.3.4.	Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis.....	74
9.3.5.	Naujausių tyrimų apžvalga	74
9.4.	Tamsieji ūkai	76
9.4.1.	Apibrėžimas ir morfologija	76
9.4.2.	Vieta Visatoje.....	77
9.4.3.	Formavimasis, amžius ir evoliucija	78
9.4.4.	Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis.....	79
9.4.5.	Naujausių tyrimų apžvalga	80
9.5.	Žvaigždžių spiečiai	83
9.5.1.	Žvaigždžių spiečių apibrėžimas ir morfologija	83
9.5.2.	Žvaigždžių spiečių vieta galaktikose ir Visatoje	85

9.5.3.	Amžius, formavimasis, evoliucija ir dinamika	86
9.5.4.	Žvaigždžių evoliucija spiečiuose	88
9.5.5.	Žvaigždžių tipai ir cheminė sudėtis spiečiuose.....	89
9.5.6.	Naujausi žvaigždžių spiečių tyrimų rezultatai.....	90

