

Audrius Dubietis

NUOSTABUSIS ŠVYTĖJIMAS

PADANGIŲ FIZIKA *be* FORMULIŲ



Audrius Dubietis

NUOSTABUSIS ŠVYTĖJIMAS

PADANGIŲ FIZIKA *be* FORMULIŲ

Autorius nuoširdžiai dėkoja dangaus stebėjimo entuziastams ir nuostabių gamtos reiškinių nuotraukų autoriams Ričardui Balčiūnui, Tadui Janušoniui, Gintarui Tamošauskui, Justinui Galiniui, Arūnui Varanavičiui, Sigitui Jurkevičiui, Donatui Majui, Rugilei Kraulaidytei, Juliiui Paštukui, kolegoms iš užsienio Peteriui Dalinui, Danieliui Fačijui ir Paului Polesanai.

Be galo dėkingas profesoriui Paului Di Trapaniui iš Insubrijos universiteto Italijoje už turiningus pokalbius ir kitą žvilgsnį į mus supantį pasaulį, Justinui Griciui už puikias iliustracijas, kalbos redaktorei Auksej Gasperavičienei, knygos dailininkei Onai Liugailienei ir leidėjui Petriui Jonušiui, be kurio entuziazmo ši knyga nebūtų išvydusi dienos šviesos.

Audrius Dubietis

NUOSTABUSIS ŠVYTĖJIMAS

PADANGIŲ FIZIKA *be* FORMULIŲ

Versmė

VILNIUS | 2014

UDK 535

Du21

ISBN 978-609-8148-02-2

© Audrius Dubietis, 2014

© Dizainas, Ona Liugailienė, 2014

© „Versmės“ leidykla, 2014

Pratarmė 7

1. Žemės atmosfera

- 1.1 Cheminė atmosferos sudėtis 10
- 1.2 Atmosferos sluoksniai 12
- 1.3 Kur karščiau – rojuje ar pragare? 15
- 1.4 Optiniai reiškiniai atmosferoje 17
- 1.5 Sutemos ir nakties dangus 19
- 1.6 Šviesos tarša 22

2. Šviesos spinduliai atmosferoje

- 2.1 Atmosferos refrakcija 26
- 2.2 Atmosferos dispersija 30
- 2.3 Horizontai ir mirażai 31
- 2.4 Apatiniai mirażai 32
- 2.5 Viršutiniai mirażai 35
- 2.6 Žalioji žybsnis 36
- 2.7 Mėnulio iliuzija 38

3. Debesys

- 3.1 Debesų susidarymas 42
- 3.2 Debesų klasifikacija 43
- 3.3 Žemieji debesys 44
- 3.4 Viduriniojo aukšto debesys 46
- 3.5 Vertikalios raidos debesys 47
- 3.6 Aukštieji debesys 49
- 3.7 Kondensacijos pėdsakai 53
- 3.8 Rūkas 54
- 3.9 Debesų keistenybės 55
- 3.10 Debesys kitose planetose 62

4. Dangaus spalvos ir šešėliai

- 4.1 Giedro dangaus spalva 66
- 4.2 Apsiniaukusio dangaus spalva 70
- 4.3 Oro švytėjimas 71

- 4.4 Ryto ir vakaro dangaus spalvos 72
- 4.5 Purpurinės sutemos 74
- 4.6 Prieblandos spinduliai ir debesų šešėliai 76
- 4.7 Žemės šešėlis 78
- 4.8 Pelenų šviesa 79

5. Vaivorykštė ir vandens lašų optika

- 5.1 Kaip susidaro vaivorykštės? 84
- 5.2 Antrinė ir aukštesnių eilių vaivorykštės 88
- 5.3 Interferenciniai vaivorykštės lankai 89
- 5.4 Vaivorykštės spalvos 91
- 5.5 Rūko juosta 93
- 5.6 Glorija 96
- 5.7 Aura 102

6. Ledo kristalų halai

- 6.1 Nuostabioji dangaus geometrija 106
- 6.2 Ledo kristalai debesyse 107
- 6.3 Šviesos lūžis ledo kristaluose 108
- 6.4 Halų morfologija 111
- 6.5 Apskriti halai 115
- 6.6 Tangentiniai mažojo halo lankai 116
- 6.7 Menamos saulės (parheliai) 116
- 6.8 Zenitinis lankas 118
- 6.9 Atspindžio halai 118
- 6.10 Ledo kristalai ant žemės 123
- 6.11 Deimantų dulkės 124
- 6.12 Ar viskas halų pasaulyje jau atrasta? 128

7. Vainikai, aureolės ir vaivorykštiniai debesys

- 7.1 Spalvoti ratilai aplink šviesulius 132
- 7.2 Šviesos bangų difrakcija 133
- 7.3 Vainikai ir aureolės 137

7.4 Vaivorykštiniai debesys 139

7.5 Žiedadulkių vainikai 144

7.6 Voratinklių spalvų pasaulis 144

8. Žaibai ir atmosferos elektra

8.1 Žaibai: gražu ir pavojinga 150

8.2 Globali elektrinė Žemės grandinė 152

8.3 Kaip atsiranda žaibas? 155

8.4 Elektros išlydžiai

aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose 160

8.5 Dirbtiniai žaibai 161

9. Perlamutriniai debesys

9.1 Stratosferos debesys 167

9.2 Perlamutrinųjų debesų sandara 168

9.3 Perlamutriniai debesys ir ozono skylė 170

9.4 Perlamutriniai debesys vidutinėse platumose 172

9.5 Kas nutiks ozono skylei ateityje? 174

10. Sidabriškieji debesys

10.1 Naktį švytintys debesys 178

10.2 Sidabriškieji debesys –

naujausias šių laikų optinis atmosferos reiškinys 181

10.3 Sidabriškųjų debesų susidarymas 182

10.4 Sidabriškųjų debesų morfologija 187

10.5 Sidabriškieji debesys Lietuvos padangėje 192

10.6 Šiuolaikiniai sidabriškųjų debesų

tyrimai pasaulyje 195

10.7 Sidabriškieji debesys ir klimato kaita 197

11. Šiaurės pašvaistės

11.1 Nuo mistikos iki mokslinio supratimo 202

11.2 Žemės magnetinis laukas 203

11.3 Saulės vėjas 204

11.4 Pašvaisčių spalvos 207

11.5 Šiaurės pašvaistės Lietuvos padangėje 212

11.6 Atmosferos švytėjimas 215

11.7 Kosminiai orai 216

12. Meteorai ir jų srautai

12.1 Krintančios žvaigždės 222

12.2 Meteorų srautai ir kometos 223

12.3 Meteoroidai – mažiausi

Saulės sistemos kūnai 227

12.4 Meteorų stebėjimai 230

12.5 Meteorų srautai 232

12.6 Zodiako šviesa 239

12.7 Kosminės katastrofos 240

Žodynėlis

Priedai

I. Dideli ir maži dydžiai 254

II. Regimosios šviesos spalvos 254

Pratarmė

Mus supa neišpasakytai gražus ir nuolat besikeičiantis šviesos ir spalvų pasaulis. Nepaprastą jo grožį galime pajusti bent trumpam stabtelėję, pakėlę akis į dangų ar apsižvalgę aplinkui. Nuo neatmenamų laikų žmonės grožėjosi ir stebėjosi šiuo pasauliu, o kartu siekė jį pažinti, suprasti ir paaiškinti. 1831 metais ant Karališkosios astronomų draugijos antspaudo buvo įrašytas devizas „Quicquid nitet notandum“ („Viskas, kas švyti, turi būti ištirta“). Nuo to laiko prabėgus net ir daugiau nei 180 metų, šis devizas neprarado aktualumo. Įvairiausi švytintys reiškiniai mūsų atmosferoje traukia akį ir kelia pasigėrėjimą. Dauguma jų šiuolaikinio mokslo požiūriu gerai suprasti, tačiau yra ir tokių, kuriuos iki šiol gaubia paslapties skraistė. XX a. pradžioje žymus prancūzų matematikas, fizikas ir mokslo filosofas Henris Puankarė (*Henri Poincaré*) yra pasakęs: „Mokslininkas tiria gamtą ne todėl, kai tai yra naudinga, o todėl, jog jis ja gėrisi. O jis gėrisi ja todėl, kad gamta yra nuostabi.“

Tačiau daugybė nuostabių dalykų praslysta pro mūsų akis nepastebėti, nes apie juos nieko nežinome, ir atvirkščiai, dėl to, kad nežinome, jų nepastebime. Kaip yra rašęs garsus olandų mokslo populiarintojas Marselis Minartas (*Marcel Minnaert*), žinios yra kaip burtų lazdelė, kurios prilietimas plačiai atveria mums akis. Tuomet staiga atsiduriame iki tol nepastebėtame, kupiname įstabaus grožio ir paslapčių šviesos ir spalvų pasaulyje, kurį išvydus visuomet apima malonus mažyčio atradimo jausmas.

Ši knyga skirta visiems tiems, kurie norėtų daugiau sužinoti, geriau suprasti ar tiesiog savo akimis išvysti ir pasigrožėti nuostabiais optiniais gamtos reiškinais. Vienus jų prieš akis galime matyti kasdien, kitus – rečiau, o kai kuriuos gali pasisėkti išvysti tik kartą ar kelis per visą gyvenimą. Ir norint pamatyti tai, apie ką rašoma šioje knygoje, nebūtina vykti į tolimus ir egzotiškus kraštus. Visa tai vyksta čia ir dabar – Lietuvos padangėje.

1. Žemės atmosfera



Žemės atmosfera – tai mūsų planetą gaubiantis plonytis perregimas dujų sluoksnis. Palyginti su Žemės rutulio matmenimis (vidutinis Žemės planetos spindulys yra apie 6 370 km, o skersmuo – 12 740 km), atmosferos sluoksnis yra labai plonas. Paprastai laikoma, kad regimoji atmosfera driekiasi iki 100 km aukštyje (1 pav.), o labai išretėjusią atmosferos dujų pėdsakai moksliniais prietaisais aptinkami iki 1 000 km aukštyje. Atmosferos dujas prie Žemės paviršiaus išlaiko tik Žemės traukos jėga. Šiame plonyčiame dujų sluoksnyje formuojasi visos Žemės klimatas, tinkamas gyvybei atsirasti, vystytis ir jos egzistavimui palaikyti. Atmosferos oras – tai bespalvė ir bekvapė dujos, kurių savo kasdieniame gyvenime mes nei matome, nei jaučiame. Tačiau oras yra pats svarbiausias gyvybę palaikantis elementas: be maisto žmogus gali išgyventi keletą savaičių, be vandens – keletą dienų, o be oro gali išbūti ne ilgiau nei keletą minučių. Jei Žemės nejuostų ši plonytė nematoma dujų skraistė, jos paviršius būtų netinkamas gyventi. Naktį Žemės paviršių kaustytų stingdantis šaltis, o dieną kepintų nepakeliama kaitra. Be atmosferos nebūtų nei vandenynų, nei debesų. Negalėtume net susikalbėti, nes garso bangos negalėtų sklusti tuščioje beorėje erdvėje. Mūsų dangus būtų visiškai juodas net ir spindint akinančiai saulei, o nuostabus šviesos ir spalvų pasaulis, apie kurį bus kalbama šioje knygoje, tiesiog neegzistuotų.

Tolimoje praeityje Žemės atmosferos cheminė sudėtis smarkiai skyrėsi nuo dabartinės [1]. Manoma, kad formuojantis Žemės planetai, maždaug prieš 4,5 milijardo

metų, pirminė jaunos ir karštos Žemės planetos atmosfera buvo sudaryta iš žvaigždinės medžiagos – vandenilio ir helio dujų. Šios dujos labai lengvos, tad Žemės trauka buvo nepajėgi jas ilgainiui išlaikyti. Vėstant Žemei, susidarė uolienos, dėl ugnikalnių veiklos atmosferą papildė kitokios dujos, todėl Žemės atmosferos sudėtis palaipsniui ėmė keistis. Vadinamąją antrinę Žemės atmosferą sudarė vandens garai ir kiti vandenilio junginiai, anglies dioksidas ir azotas. Dar labiau atvėsus, vandens garai kondensavosi, suformuodami pasaulinį vandenyną, kuriame ištirpo dideli anglies dioksido kiekiai. Apytikriai prieš 2,8 milijardo metų pasaulinio vandenyno platybėse užgimė pirmoji gyvybė – bakterijos. Jos mito anglimi, fotosintezės reakcijų metu iš vandens išskirdamos deguonį. Šimtus milijonų metų trukusi šių bakterijų veikla lėmė, kad Žemės atmosferoje palaipsniui ėmė daugėti deguonies dujų. Manoma, kad deguonies koncentracija dabartinį lygį pasiekė maždaug prieš 0,5 milijardo metų. Nuo to laiko atmosferos dujų sudėtis mažai tepakito.

1.1 Cheminė atmosferos sudėtis

Oras, kuriuo kvėpuojame, – tai daugelio dujų mišinys (1 lentelė). Pagrindiniai šio mišinio komponentai yra dviatomės azoto (N_2) ir deguonies (O_2) molekulės. Šias svarbiausias oro sudėtinės dalis pirmasis XVIII a. pabaigoje identifikavo britų mokslininkas Henris Kavendišas (*Henry Cavendish*). Azotas ir deguonis kartu sudaro 99 % viso atmosferos oro tūrio. Likusį 1 % oro tūrio sudaro įvairūs cheminiai elementai ir junginiai. Didžioji šio likusio tūrio dalis (daugiau nei 0,9 %) tenka inertinėms dujoms: argonui, neonui, heliui, kriptonui ir ksenonui (pastarojo kiekiai itin maži). Inertinės dujos nedalyvauja jokiuose atmosferoje vykstančiuose cheminiuose procesuose, jų atomai nesijungia tarpusavyje ir nesudaro junginių su kitais cheminiais elementais. Azotas,

← 1 pav.

Taip po Saulės laidos atrodo Žemės atmosfera iš maždaug 350 km aukštyje skriejančios Tarptautinės kosminės stoties (International Space Station, ISS). Gelsvai rausvas sluoksnis – troposfera, joje matomi tamsūs šešėliai yra debesys. Melsva juosta – stratosfera, o vos įžiūrima tamsiai mėlyna, susilieję su juoda kosmine erdve juosta, – mezosfera

Elementas ar junginys	Cheminė formulė	Koncentracija
Azotas	N ₂	78,08 %
Deguonis	O ₂	20,95 %
Argonas	Ar	0,93 %
Neonas	Ne	18,2 ppmv ¹
Helis	He	5,2 ppmv
Kriptonas	Kr	1,1 ppmv
Vandenilis	H ₂	0,6 ppmv
Diazoto monoksidas	N ₂ O	0,3 ppmv
Anglies dioksidas**	CO ₂	385 ppmv
Metanas**	CH ₄	1,7 ppmv
Anglies monoksidas*	CO	iki 0,2 ppmv
Ozonas	O ₃	0,04 ppmv
Vandens garai*	H ₂ O	iki 0,1–3 %

→ 1 lentelė.

Pagrindiniai orą sudarantys cheminiai komponentai [2]. Koncentracija nurodyta tūrio dalimis (žvaigždute pažymėti kintamieji atmosferos komponentai, dviem žvaigždutėmis pažymėtų komponentų kiekis nuolat didėja dėl žmogaus ūkinės ir pramoninės veiklos)

deguonis ir inertinės dujos kartu sudaro daugiau nei 99,9 % viso atmosferos oro tūrio ir vadinami pastoviais atmosferos komponentais. Jų tūrio dalys yra pastovios visoje atmosferoje iki pat 100 km aukščio.

Labai nedidelė, tačiau svarbi oro tūrio dalis tenka molekulinėms dujoms, kurios kuria šiltnamio efektą ir taip reguliuoja Žemės paviršiaus temperatūrą bei visą klimato sistemą (plačiau apie tai 1.3 posk.). Tai vadinamosios šiltnamio dujos – anglies dioksidas, metanas ir, žinoma, vandens garai. Nustatyta, kad anglies dioksido ir metano kiekiai nuo XIX a.

pabaigos nuolat didėja. Šį didėjimą lemia sparčiai intensyvėjanti žmogaus ūkinė ir pramoninė veikla, kurią savo ruožtu spartina greitai augantis Žemės gyventojų skaičius. Įvertinta, kad nuo pramoninės revoliucijos pradžios (t. y. maždaug nuo XIX a. vidurio) į atmosferą išmesto anglies dioksido kiekiai išaugo 1,5 karto, o metano – 2 kartus. Tai kelia vis didesnę susirūpinimą, kadangi šių dujų kiekiai daro didelę įtaką Žemės klimato formavimuisi. Iš tiesų jau kurį laiką pastebimas klimato šiltėjimas, kurio pasekmės gali būti labai skaudžios ar net pragaištingos. Vandens garai taip pat yra šiltnamio efektą sukeliančios dujos. Vandens garų kiekis atmosferoje kinta labai plačiose – 0,1–3 % – ribose. Ši kitimą lemia hidrologinis ciklas: vandenynų ir dirvožemio garavimas, vandens garų kondensacija (debesų susidarymas) ir krituliai, o vanduo atmosferoje egzistuoja visų trijų fizinių būvių – dujinis, skystas ir kietas [3]. 99 % viso vandens garų kiekio yra troposferoje, o beveik pusė vandens garų sukonzentruota priežeminiame oro sluoksnyje, ten, kur aktyviausiai vyksta hidrologinis

¹ Labai mažą cheminių junginių koncentraciją paprastai patogiau išreikšti ne procentais, o milijoninėmis tūrio dalimis, kurios žymimos ppmv (angl. *parts per million of volume*). Jei junginio tūrio dalis yra 1 ppmv, vadinasi, 1 m³ oro junginys užima milijoninę dalį šio tūrio, t. y. 1 cm³. Nesunku pastebėti, kad 0,1 % = 100 ppmv.

Dar mažesni kiekiai vertinami milijardinėmis tūrio dalimis ppbv (angl. *parts per billion of volume*), 1 ppmv = 1000 ppbv.

ciklas. Šalta tropopauzė praktiškai užkerta kelią vandens garams (kurie, beje, lengvesni už orą) patekti į aukštesnius atmosferos sluoksnius. Stratosferoje ir mezosferoje vandens garai tėra pėdsakinis komponentas, pavyzdžiui, mezosferoje vandens garų koncentracija tesiekia vos 3–6 ppmv.

Todėl vandens garai, anglies dioksidas ir metanas vadinami kintamaisiais atmosferos komponentais. Jų koncentracija kinta ne tik laikui bėgant, bet ir keičiantis aukščiui. Kitų komponentų, pavyzdžiui, ozono, didžioji dalis sukonzentruota stratosferoje, kurioje plyti vadinamasis ozono sluoksnis. Vidutinė ozono koncentracija atmosferoje yra labai maža, vos 0,04 ppmv, tačiau 11–50 km aukštyje ji yra šimtus kartų didesnė ir siekia 5–12 ppmv. Stratosferoje taip pat aptinkamos kur kas gausesnės nei ties Žemės paviršiumi azoto, sieros, vandenilio, chloro, fluoro, bromo ir anglies junginių koncentracijos (jų kiekiai visos atmosferos mastu tesiekia kelis ppbv ar mažiau). Šie komponentai paprastai vadinami pėdsakiniais (angl. *trace gases*). Nemaža dalis šių junginių į stratosferą patenka išsiveržus ugnikalniams, o likusi dalis pakliūva su antropogeninės kilmės teršalais ar susidaro čia pat vykstant cheminėms reakcijoms.

Maždaug 90 km aukštyje atmosferos cheminė sudėtis ir komponentų proporcijos ima keistis [4]. To priežastis – ultravioletinė ir rentgeno Saulės spinduliuotė, kuri jonizuoja ir suardo molekules (šis reiškinys vadinamas fotodisociacija). Yrant vandens molekulėms, atsiranda chemiškai aktyvūs hidroksilo (OH) radikalai, o azoto ir deguonies molekulės skyla į atskirus atomus. Maždaug 95 km aukštyje aptinkama nemaža lengvojo metalo – natrio atomų – koncentracija. Šiame aukštyje plyti vadinamasis natrio garų sluoksnis. Natrias į atmosferą patenka joje sudegiant iš kosmoso atskriejusiems meteoroidams. Kadangi atmosferos tankis dideliame aukštyje labai mažas, cheminiai elementai ima sluoksniuotis pagal masę: dėl Žemės traukos žemiau atsideria sunkesnieji, o aukščiau – lengvesnieji. Dėl to neatpažįstamai pasikeičia

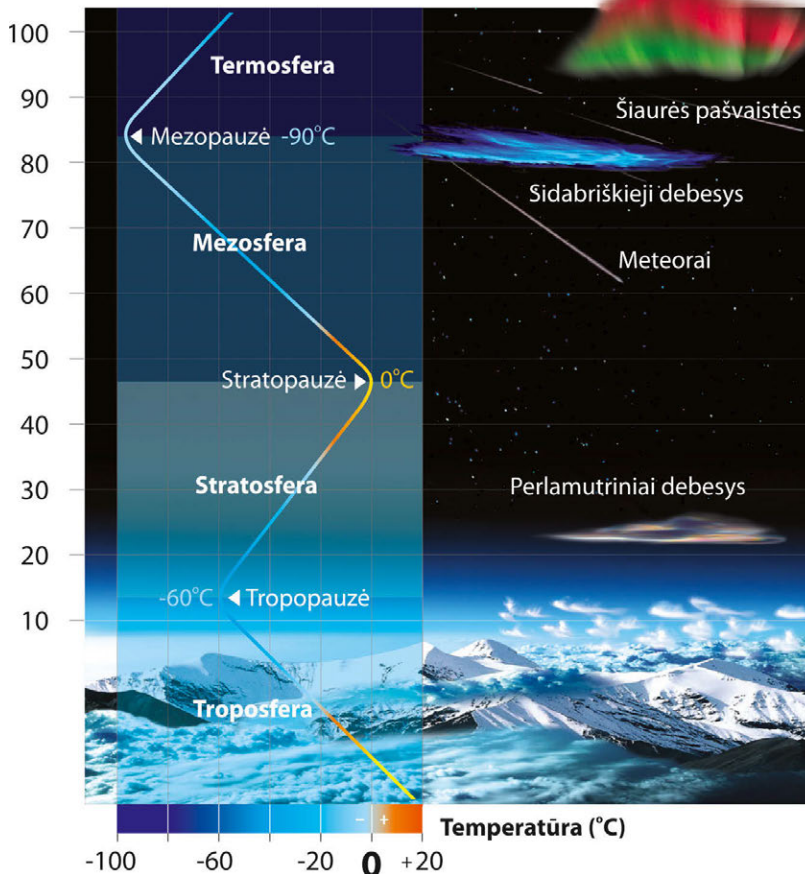
atmosferos sudėtis: 350 km aukštyje azoto beveik nebelyka, o pagrindiniu komponentu tampa atominis deguonis. Kylant dar aukščiau (apie 750 km aukštyje) jau vyrauja helis, o didesniame nei 1 000 km aukštyje – pats lengviausias elementas vandenilis. Beje, atmosfera nuolat praranda lengviausius savo cheminius elementus – vandenilį ir helį, kuriuos menkai veikia Žemės trauka ir kurie įgiję energijos lengvai išlekia į kosminę erdvę. Dėl to sakoma, kad mūsų atmosfera „kiaura“. Tokios pat kiauros yra visų kitų planetų atmosferos. Kuo mažesnė planetos trauka, kuri proporcinga masei, tuo jos atmosfera kiauresnė.

1.2 Atmosferos sluoksniai

Atmosferą ir jos fizines savybes tiksliai apibūdina du pagrindiniai parametrai – slėgis ir temperatūra. Atmosferos slėgis – tai jėga, kuria vertikalus oro stulpas slekia Žemės paviršiaus ploto vienetą. Vidutinis atmosferos slėgis ties Žemės paviršiumi yra 1 atm (atmosfera) arba 760 mm Hg (gyvsidabrio) stulpelio arba 1013,25 hektopaskalio (hPa). Tokia atmosfera vadinama standartine. Atslinkus ciklonams, paviršinis atmosferos slėgis sumažėja, o atslinkus anticiklonams – padidėja. Lietuvoje paviršinis atmosferos slėgis paprastai svyruoja 970–1030 hPa ribose. Kylant aukštyn, atmosferos slėgis mažėja eksponentiškai², t. y. labai sparčiai: 10 km aukštyje jis keturis kartus mažesnis, 50 km aukštyje –

² Atmosferos slėgio p priklausomybė nuo aukščio h aprašoma barometrine formule $p = p_0 \exp \frac{h}{H}$, čia p_0 yra slėgis ties Žemės paviršiumi, o dydis $H = 7.3$ km ir vadinamas vienalytės atmosferos aukščiu, t. y. atmosferos aukštis, laikant, kad atmosferos oras yra nespūdas, atmosferos slėgis yra 1013,25 hPa, o vidutinė temperatūra siekia -24°C .

Aukštis (km)



→ 2 pav.

Atmosferos temperatūros kitimas priklausomai nuo aukščio, šiluminiai sluoksniai ir juose vykstantys atmosferos reiškiniai. J. Gričiaus pieš.

apie tūkstantį kartų mažesnis, o 90 km aukštyje – net milijoną kartų mažesnis nei slėgis ties Žemės paviršiumi.

Jei atmosferos slėgis didėjant aukščiui sparčiai mažėja, tai atmosferos temperatūros kitimo kreivė yra kur kas sudėtingesnė (2 pav.). Būtent pagal temperatūros kitimą atmosfera skirstoma į 4 (šiluminius) sluoksnius: troposferą, stratosferą, mezosferą ir termosferą. Šiuos sluoksnius skiria temperatūros kreivės linkio taškai, vadinamosios pauzės: tropopauzė, stratopauzė ir mezopauzė.

Žemiausias atmosferos sluoksnis yra troposfera, kuri

driekiasi nuo Žemės paviršiaus iki 10–15 km aukščio. „Tropos“ graikiškai reiškia maišymąsi, ir tai iš tiesų puikiai atspindi pagrindinę troposferos savybę: dėl to, kad ties Žemės paviršiumi įkaitęs oras kyla aukštyn, troposferoje vyksta labai stiprūs konvekciniai ir oro masių maišymosi procesai. Didėjant aukščiui troposferoje, temperatūra mažėja vidutiniškai 6,5 °C/km sparta. Troposfera baigiasi šalta tropopauze, vieta, kurioje temperatūra nukrinta vidutiniškai iki -60 °C. Tokią žemą tropopauzės temperatūrą lemia adiabatinis aukštyn kylancio išsilusio oro plėtimasis; staiga padidėjus dujų tūriui,

jos smarkiai atvėsta. Šalta tropopauzė neleidžia troposferoje esantiems vandens garams pakilti aukščiau ir patekti į aukštesnius atmosferos sluoksnius: (beveik) visi vandens garai kondensuojasi troposferoje, sudarydami debesis ir anksčiau ar vėliau iškrisdami kritulių pavidalu. Troposfera yra kartu ir tankiausias atmosferos sluoksniu, kuriame sukongcentruota beveik 80 % visos Žemės atmosferos masės ir beveik visa drėgmė, tad čia formuojasi debesis, orai ir didžiaja dalimi visos Žemės klimatas. Nenuostabu, jog troposferoje gimsta ir dauguma optinių atmosferos reiškinių.

Kylant aukštyn, virš tropopauzės prasideda antrasis atmosferos sluoksniu – stratosfera. „Stratum“ lotyniškai reiškia sluoksniu. Stratosferoje yra sukaupia apie 20 % visos atmosferos masės. Stratosferoje plyti gyvybiškai svarbus, gana keisto junginio – triatomio deguonies (O_3), vadinamo ozonu, sluoksniu, kuris sugeria gyvybei pragaištingą ultravioletinę Saulės spinduliuotę. Ozono sluoksniu buvo atrastas 1925 m. Nuo tada vykdomi nuolatiniai jo stebėjimai ir tankio matavimai [5]. Ozonas susidaro ultravioletinės Saulės šviesos poveikyje skylant mums įprasto diatomio deguonies (O_2) molekulėms. Atsiradęs vienatomis (arba atominis) deguonis yra labai reaktyvus cheminis elementas, jis jungiasi su dviatome deguonies molekule, sudarydamas nestabilią triatomį junginį – ozoną. Sugerdamas ultravioletinę Saulės spinduliuotę ozonas skyla į atominį ir molekulinį deguonį ir čia pat vėl atsigamina. Nuolatinę ozono gamybą lemiančių cheminių reakcijų visuma vadinama Čapmano (*Chapman*) ciklu. Šių reakcijų metu išsiskiria daug šilumos, tad, stratosferoje didėjant aukščiui, temperatūra kyla. Kadangi šiltesnis (taigi lengvesnis) oras yra viršuje, o šaltesnis (taigi sunkesnis) – apačioje, vertikalusis oro maišymasis stratosferoje nevyksta, oro masių judėjimas čia yra horizontalus. Taigi stratosfera sąlyginai yra labai „ramus“ atmosferos sluoksniu. Didžiausia ozono koncentracija aptinkama 25–30 km aukštyje, o temperatūra pasiekia maksimalią $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ vertę maždaug 50 km

aukštyje. Tai – stratopauzė. Pastarųjų keleto dešimtmečių stratosferos tyrinėjimai atskleidė daug įdomaus apie stratosferos dinamiką, buvo atrasti tokie reiškiniai kaip ozono skylė virš Antarktidos (žr. 9.3 posk.), staigūs Arktinės stratosferos atšilimai, stratosferos vėjų krypties priklausomybė nuo metų laiko ir pan. [6]. Įdomu tai, kad stratosferoje palyginti gausu tiek gamtinės, tiek antropogeninės (žmogaus veiklos sąlygojamos) kilmės cheminių junginių – aerolių. Dėl mažo stratosferos tankio optiniai reiškiniai čia subtilūs. Išsiveržus dideliems ugnikalniams, po Saulės laidos galima išvysti vadinamąsias purpurines sutemas – šviesos sklaidą aerolių dalelėmis, o labai retais atvejais, kai žiemą poliariinėse platumose smarkiai nukrinta stratosferos temperatūra, formuojasi paslaptieji perlamutriniai debesis.

Virš šiltos stratopauzės atmosferos temperatūra vėl ima kristi. Čia prasideda trečiasis atmosferos sluoksniu – mezosfera. „Mesos“ graikiškai reiškia vidurį, tad šia prasme mezosfera simbolizuoja vidurį tarp dviejų aukštųjų atmosferos sluoksnių – stratosferos ir termosferos. Mezosferoje, kaip ir troposferoje, vyksta intensyvus vertikalusis oro masių maišymasis. Mezosfera baigiasi šalta mezopauze, kuri yra maždaug 85 km aukštyje. Vidutinė mezopauzės temperatūra yra apie $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai pati šalčiausia vieta Žemėje. Netikėta yra tai, kad aukščiausia mezopauzės temperatūra registruojama ties Žemės poliais žiemą, kai tvyro poliariinė naktis, o žemiausia temperatūra – vasarą, kai poliariinės sritys visą parą maudosi saulės spinduliuose! (žr. 10 sk. 4 pav.). Vasarą ties Žemės poliais mezopauzės temperatūra gali nukristi žemiau $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Šis temperatūrų paradoksas paaiškintas tik 1982 m. [7], kai parodyta, kad mezopauzės sritis nėra radiacinės (t. y. spindulinės) pusiausvyros būsenos. Šią būseną pažeidžia vertikalus didelių oro masių judėjimas, vadinamas atmosferos sunkio (arba plūdumo) bangomis [8]. Atmosferos sunkio bangos užgimsta troposferoje dėl ciklonų ar panašių didelio masto meteorologinių reiškinių

ir užgęsta ties mezopauze, taip ją adiabiatiškai atvėsindamos. Smarkiai nukritus temperatūrai, vandens garai (kurių koncentracija mezosferoje, kaip jau minėta, yra labai maža, vos 3–6 ppmv) kondensuojasi ir užšąla. Taip atsiranda gražus šviesių vasaros naktų reiškinys – sidabriškieji debesys. Taip pat mezosferoje užsižiebia ir sudega iš tarpplanetinės erdvės atskrieję maži kosminiai kūnai – meteoroidai, kuriuos naktį matome kaip be paliovos Žemės atmosferą raižančius šviesos žybsnius – meteorus.

Virš mezopauzės prasideda ketvirtasis atmosferos sluoksnis – termosfera. Kaip galima spręsti iš paties pavadinimo, šiame sluoksnyje temperatūra sparčiai kyla: ultravioletinė ir rentgeno Saulės spinduliuotė pradeda jonizuoti, o po to ir ardyti deguonies, azoto ir kitas molekules, o jų sugerta Saulės energija virsta šiluma. Jau 400 km aukštyje temperatūra pasiekia 1500 °C. Šioje vietoje verta pastebėti, kad termosferos temperatūros vertinimas nesiremia mums įprastais termometro rodmenimis, o apibrėžiamas pagal vidutinį atomų ir molekulių judėjimo greitį. Iš tiesų termosferoje slėgis yra toks žemas, kad atitinka gilų vakuumą, kurį ties Žemės paviršiumi galima sukurti tik labai moderniose mokslinėse laboratorijose. Tokiomis sąlygomis įgavusios didelę energiją dalelės tarpusavyje susiduria labai retai, tad ir gali judėti milžiniškais greičiais, kurie savo ruožtu ir atitinka labai aukštą temperatūrą. Termosferos „klimatą“ didžiąja dalimi formuoja jau nebe žemiškieji, o kosminiai veiksniai, vadinamieji kosminiai orai, kurių pagrindinis šaltinis yra Saulė. Saulės aktyvumas, kaip žinoma, kinta apytikriai 11 metų ciklu. Saulės ciklo metu regimajame diapazone Saulės

spinduliuotės pokyčiai yra praktiškai nepastebimi [9], tačiau jie labai ryškūs trumpabangėje (ultravioletinėje ir rentgeno) bei radijo dažnių spektro srityje. Esant dideliame Saulės aktyvumui, ultravioletinės Saulės spinduliuotės srautas išauga 8 %, o rentgeno spindulių, kurie gimsta Saulės vainiko aplinkoje, intensyvumas išauga net 10 kartų [10]. Dėl trumpabangės spinduliuotės srauto variacijų Saulės ciklo metu smarkiai keičiasi termosferos temperatūra. 500 km aukštyje temperatūrų skirtumas ramios ir aktyvios Saulės laikotarpiais siekia beveik 500 °C. Tuo tarpu žemiau, ties mezopauze (85 km), šis skirtumas tėra apie 5 °C, ties stratopauze (50 km) – 1 °C, o ties Žemės paviršiumi – vos 0,1 °C. Dėl Saulės vėjo, kosminių spindulių ir Saulės ultravioletinės spinduliuotės termosferoje nemaža dalis atomų ir molekulių yra jonizuotos (netekusios vieno ar keleto elektronų). 100 km aukštyje jonizuotas vidutiniškai vienas atomas ar molekulė iš milijono, o 300 km aukštyje tokių yra jau keletas procentų, todėl, pabrėžiant šį aspektą, termosfera dažnai vadinama jonosfera. Laisvieji elektronai ir jonai sąveikauja su Žemės magnetiniu lauku. Tuomet susidaro galingos elektros srovės, juosiančios visą mūsų planetą. Elektrai laidų jonosfera yra neatsiejama Žemės elektrinės grandinės dalis [11]. Termosferoje (jonosferoje) švyti nepakartojamos šiaurės pašvaistės, kurios yra tiesioginis nuolatinės kosminių orų kaitos įrodymas.

1.3 Kur karščiau – rojuje ar pragare?

Iš esmės visi Žemės atmosferos sluoksniai yra tiesiogiai ir netiesiogiai tarpusavyje susiję [12], o juose nusistovėjusį temperatūrų režimą lemia dviejų veiksnių balansas – Saulės spinduliavimas ir atmosferos cheminė sudėtis. Saulės regimojo paviršiaus (fotosferos) temperatūra yra 5 770 K³, o vidutinė Saulės spinduliuotės galia, tenkanti 1 m² plotui

³ Absoliutinė temperatūra matuojama Kelvino laipsniais (K).

1 Kelvino laipsnis atitinka 1 Celsijaus laipsnį,

o Kelvino ir Celsijaus temperatūrų skalės susijusios

kaip $T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,16^{\circ} \approx T(\text{K}) - 273^{\circ}$.



↑ **3 pav.**
Šiltnamio efektas miške – sniego duobės aplink medžių kamienus. A. Dubiečio nuotr.

ties viršutiniais Žemės atmosferos sluoksniais, yra apie 1340 W. Apie trečdalį (30 %) šio kiekio atgal į kosminę erdvę atspindi pati Žemės atmosfera, joje esantys debesys ir Žemės paviršius [13]. 19 % kritusios Saulės spinduliuotės sugeriama pačioje atmosferoje ir debesyse, o 51 % – Žemės paviršiuje. Didžiausią galią Saulė spinduliuoja regimojoje ir greta esančiose ultravioletinėje bei artimojoje infraraudonojoje elektromagnetinių bangų spektro srityse (žr. Saulės spinduliavimo spektrą 4 sk. **1 pav.**). Didelę dalį sugertos spinduliuotės Žemės paviršius išspinduliuoja atgal šiluminės (infraraudonosios) spinduliuotės pavidalu. Apskaičiuota, kad jei šiluminis balansas būtų tik toks, Žemės paviršius išiltų iki $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ vidutinės temperatūros. Tačiau šiluminę paviršiaus spinduliuotę stipriai sugeria atmosferos dujos: vandens garai, anglies dioksidas ir kiti junginiai, kurie didžiąją sugertos energijos dalį perspinduliuoja ir grąžina atgal. Taip sukuriamas vadinamasis šiltnamio efektas, kuris sušildo Žemės paviršių iki malonios ir gyvybei vystytis tinkamos vidutinės $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros. Panašus

reiškinys vyksta tikrame šiltnamyje: stiklas ar polietileno plėvelė gerai praleidžia regimąją Saulės spinduliuotę, kuri įšildo dirvą, tačiau sulaiko šiluminę dirvos spinduliuotę ir neleidžia dirvai atvėsti naktį. Beje, efektyviausiai šiltnamio efektą atmosferoje kuria vandens garai (net visai giedru oru ir nesusidarant debesims perspinduliuodami apie 60 % šiluminės spinduliuotės), anglies dioksidas (~25 %) ir ozonas (~8 %). Nedidelė likusi (~7 %) perspinduliuotos energijos dalis tenka pėdsakinėms dujoms, tokioms kaip metanas, azoto oksidas ir pan. [14] Būtent anglies dioksido ir metano, taip pat kai kurių pėdsakinių dujų kiekių nuolatinis didėjimas dėl žmogaus veiklos gali pažeisti nusistovėjusį šiluminį atmosferos balansą, kuris formuoja Žemės klimatą ir todėl šiuo metu kelia didžiausią susirūpinimą [15].

Nedidelio šiltnamio efekto rezultatai galima išvysti žiemą miške. Prasidėjus atodrekiui, aplink pusnyse esančius medžių kamienus susidaro „duobės“ (**3 pav.**). Tamsūs medžių kamienai sugeria regimąją Saulės šviesą, o gautą energiją perspinduliuoja šiluminės spinduliuotės pavidalu. Sniegas regimosios šviesos nesugeria, o ją tik atspindi (todėl jis baltas), tačiau gerai sugeria medžių kamienų skleidžiamą šiluminę spinduliuotę ir dėl to ima tirpti. Milžiniško šiltnamio efekto pavyzdys galėtų būti mūsų artimiausios kaimynės Veneros klimatas. Veneros atmosfera labai tanki, o didesnė nei 97 % jos tūrio sudaro anglies dioksido dujos. Dėl jų kuriamo šiltnamio efekto Veneros paviršius įkaista iki $462\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros!

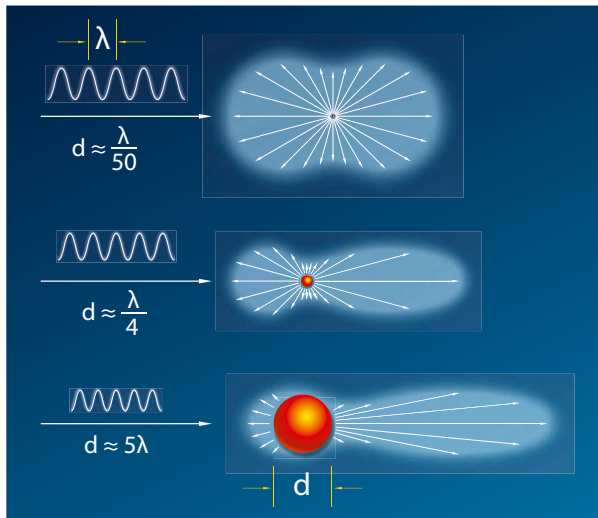
Tik 1,5 % Saulės spinduliuojamos galios tenka gyvybei pavojingai ultravioletinei ir rentgeno spinduliuotei. Ši spinduliuotė sugeriama toli nuo Žemės paviršiaus ir šildo stratosferą, mezosferą ir termosferą. Termosferoje sugeriama visa iš Saulės sklindanti rentgeno ir ultravioletinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis yra nuo keleto iki 170 nm. Ši spinduliuotė jonizuoja azoto molekules, suardo deguonies molekules ir jonizuoja deguonies atomus, taip kaitindama

termosferą. Beje, deguonis atmosferoje atlieka labai svarbų vaidmenį ne tik todėl, kad visi gyvi organizmai, ir mes taip pat, juo kvėpuoja. Mezosferoje ir stratosferoje esančios deguonies molekulės sugeria visą ultravioletinę Saulės spinduliuotę, kurios bangos ilgis mažesnis nei 240 nm, o stratosferoje esantis ozonas sugeria likusią ultravioletinės spinduliuotės dalį, kurios nesugeria deguonis.

Juoko dėlei, remiantis Biblijoje išdėstytais teiginiais, buvo pabandyta moksliskai įvertinti, kur yra karščiau – rojuje ar pragare [16]. Biblijoje minima, kad pragare telkšo karštos sieros ežerai. Remiantis šiuo teiginiu ir tuo, kad sieros lydymosi temperatūra yra 115 °C, o virimo temperatūra 445 °C, nesunku apytiksliai įvertinti, kad pragare temperatūra yra ne aukštesnė kaip 445 °C. Aukštesnėje temperatūroje siera išgaruotų ir jos ežerų tiesiog nebelyktų. Šiek tiek kebliau įvertinti rojaus temperatūrą, kadangi Biblijoje nenurodoma, kurioje vietoje jis galėtų būti. Ten tėra labai neaiškus teiginys apie Saulės ir Mėnulio šviesą rojuje. Viena šio teiginio interpretacijų netiesiogiai nurodo, kad rojus gauna 50 kartų daugiau Saulės šviesos (taigi ir šilumos) nei Žemės paviršius. Visai tikėtina, kad rojus ir pragaras paklūsta universaliems fizikos dėsniams ir ten turi būti nusistovėjusi nekintama tvarka. Darant tokią prielaidą, galima teigti, kad rojus – tai vieta, kurioje nusistovėjusi termodinaminė pusiausvyra tarp iš Saulės gauto ir dėl šiluminio spinduliavimo prarasto energijos (šilumos) kiekių. Termodinaminės pusiausvyros atveju galima taikyti Stefano-Boltzmano dėsnių rojaus temperatūrai apskaičiuoti. Šis dėsnis teigia, kad objekto gaunama (ar prarandama) šiluminė energija yra proporcinga jo absoliučios temperatūros ketvirtajam laipsniui. Taigi laikant, kad temperatūra ties Žemės paviršiumi yra 27 °C, gautume, kad rojaus temperatūra lygi 525 °C. Atsakymas paradoksalus – rojuje karščiau nei pragare! Yra ir daugiau šios temos interpretacijų, tačiau visa tai tėra smagi nesąmonė ir iki šiol gana populiarus teologinė-termodinaminė parodija.

1.4 Optiniai reiškiniai atmosferoje

Atmosferos fizinės ir cheminės savybės apibūdina aplinką, kurioje gimsta nepaprastai turtinga optinių atmosferos reiškinų įvairovė. Saulės, Mėnulio ar dirbtinių šaltinių šviesai sklindant atmosferoje, šviesos bangos sąveikauja su atmosferos dalelėmis: atmosferos dujų atomais, vandens lašeliais ir ledo kristalais debesyse, taip pat ore sklindančiomis dulkelėmis ir aerozoliais. Šią sąveiką sąlygoja skirtingi fizikiniai reiškiniai: šviesos sklaida, atspindys, lūžis, difrakcija (šviesos bangų užlinkimas už mažų kliūčių), interferencija (šviesos bangų mūša) ir šviesos sugertis. Visus atmosferoje matomus optinius reiškinius galima suskirstyti pagal jų fizikinę prigimtį, t. y. pagal tai, koks fizikinis reiškinys juos lemia [17]. Visos atmosferos dujos, išskyrus ozoną, kuris gerai sugeria raudoną šviesą (plačiau apie tai 4.4 posk.), yra skaidrios regimajai šviesai, todėl baltos Saulės šviesos jos nesugeria, tik sklaido. Šviesos sklaida – universalus reiškinys, kai šviesos banga dėl sąveikos su aplinkos dalelėmis pakeičia sklaidimo kryptį ir dėl to nebesiekia stebėtojo arba pasiekia jį nebe originali šaltinio paties šaltinio šviesa, o išsklaidyta ir atsklidusi iš visai kitur. Oro molekulės šviesą sklaido labai nevienodai (t. y. selektyviai): labiausiai sklaidoma mėlyna šviesa, mažiausiai – raudona, o sklaidos efektyvumas yra atvirkščiai proporcingas šviesos bangos ilgio ketvirtajam laipsniui ($\sim \lambda^{-4}$). Tai – Relėjaus sklaida, pavadinta jos atradėjo vardu. Dėl šios priežasties mūsų dangus yra žydras (plačiau apie tai 4 sk.). Šviesos sklaidos pobūdis smarkiai pasikeičia, kai ją sklaido nebe oro molekulės, o ore sklindančios dulkės, dūmų, aerozolių dalelės ar mikroskopiniai vandens lašeliai. Visos šios dalelės yra kur kas didesnės už oro molekules, be to, jų forma ir fizinės savybės, pvz., skaidrumas, gali būti labai įvairios. Dėl to šviesos sklaidos tokiomis dalelėmis selektyvumas šviesos bangos ilgiui yra labai įvairus. Pavyzdžiui, smulkiausi



↑ 4 pav.
Šviesos sklaidos kampų priklausomybė nuo sklaidančių dalelių dydžio. J. Gričiaus pieš.

vandens lašeliai visų spalvų šviesą sklaido vienodai efektyviai; dėl šios priežasties Saulės apšviesti debesys yra balti. Panašiai šviesą sklaido ir įvairios dulkelės, nors šviesai jos nėra skaidrios. O štai miesto smogas, teršalai, įvairūs degimo produktai ar ugnikalnių dulkelės raudoną šviesą sklaido labiau nei mėlyną [18]. Tokia šviesos sklaida vadinama Mi sklaida.

Kampai, kuriais šviesos banga yra išsklaidoma (atlenkiama nuo jos pradinės sklaidimo krypties), smarkiai priklauso nuo sklaidančių dalelių dydžio (skersmens d) ir šviesos bangos ilgio λ santykio [19] (4 pav.). Relėjaus sklaidos atveju sklaidančios dalelės (oro molekulės) yra daug mažesnės už sklaidomos šviesos bangos ilgį, tad jos šviesą sklaido beveik vienodai efektyviai visomis kryptimis. Dalelės, kurių skersmuo tampa palyginamas su šviesos bangos ilgiu (aerozoliai, smulkiausias dulkelės ir pan.), šviesą sklaido kitaip – efektyviausiai sklaida vyksta šviesos kritimo kryptimi, o kitomis kryptimis – kur kas mažiau efektyviai. Toliau didėjant dale-

lių matmenims, sklaidos kampų asimetrija tik stiprėja, t. y. Mi sklaida efektyviausia žvelgiant šviesos šaltinio kryptimi.

Dar kitaip šviesa sąveikauja su didesnėmis dalelėmis – rūke ir debesyse esančiais mažyčiais vandens lašeliais, didesniais lietaus lašais ar ledo kristalais. Debesų ir rūko lašeliai tampa rimtomis kliūtimis šviesos spinduliams, dėl ko jie užlinksta. Šis reiškinys vadinamas šviesos difrakcija. Dėl šio reiškinio spalvinasi debesų kraštai, atsiranda aureolės aplink šviesulius, o kai kada ir spalvingi šviesulį supantys ratilai – vainikai. Lietaus lašai dar didesni. Juose šviesos spinduliai lūžta ir atsispindi, o lūžio ir atspindžio kampai įvairiems bangos ilgiams (šviesos spalvoms) skiriasi, todėl balta Saulės šviesa išskaidoma į spalvas. Taip atsiranda pats gražiausias ir spalvingiausias reiškinys – vaivorykštė.

Aukščiausieji troposferos debesys – plunksniniai – sudaryti iš ledo kristalų. Jei šiuos debesis sudarantys ledo kristalai yra taisyklingų formų, šviesos spinduliai juose lūžta kaip mažytėse prizmėse, priklausomai nuo ledo kristalų formos bei orientacijos erdvėje, sukurdami nepakartojamą halų įvairovę.

Optinių atmosferos reiškinų šviesumas ir kontrastas priklauso nuo šviesos kelyje esančių dalelių dydžio, formos, skaidrumo ir tankio (koncentracijos). Debesų ir pačios atmosferos tankumui apibūdinti naudojamas tam tikras parametras, vadinamas optiniu tankiu. Optinis tankis – tai dydis, nusakantis kritusios (pradinės) ir praėjusios (pasiekusios stebėtoją) pro optinę terpę (atmosferą, debesį, rūką ar dulkių stulpą) šviesos kiekio, pvz., intensyvumo, santykį⁴. Seniai

⁴ Optinis tankis τ apibrėžiamas kaip kritusios šviesos intensyvumo I_0 ir praėjusios šviesos intensyvumo I santykio natūrinis logaritmas: $\tau = \ln(I_0/I)$. Tai reiškia, kad kai $\tau = 1$, praėjusi šviesa susilpnėja 2,7 karto, o likusi dalis yra sugerama arba išsklaidoma kitomis kryptimis ir nepasiekia stebėtojo.

pastebėta, kad, pavyzdžiui, patys kontrastingiausi halai ir vainikai matomi tam tikro tankio debesyse, o nustatytas optimalus optinis tankis apytikriai lygus 1. Tai galima suprasti remiantis gana paprastais samprotavimais. Jei debesys labai ploni (optinis tankis gerokai mažesnis už 1), juose yra per mažas optinį reiškinį kuriančių dalelių kiekis. Ir atvirkščiai, jei debesys labai stori, pati stebimo optinio reiškinio šviesa papildomai smarkiai sklaidoma, dėl ko spalvos išblunka ir susilieja, o regimasis kontrastas sumažėja. Pačios atmosferos regimasis optinis tankis taip pat smarkiai kinta nuo zenito iki horizonto. Tuo nesunku įsitikinti stebint, kaip nurausta ir vertikalčiai susiploja besileidžiančios Saulės diskas.

Dalis optinių reiškinų atmosferoje švyti savaime, o jų švytėjimas atsiranda dėl įvairiais būdais sužadintų atmosferos dujų atomų ar molekulių spinduliavimo. Dėl nesubalansuoto elektros krūvio debesyse atsirandantys stiprūs elektros laukai sukelia savaiminį elektros išlydį – žaibą. Žaibo žybsnis – tai jonizuotų dujų ir plazmos švytėjimas. Dėl Saulės vėjo ir Žemės magnetinio lauko sąveikos gimsta nuostabus nakties reiškinys – šiaurės pašvaistė. Pašvaistės švytėjimą kuria iš Saulės atskriejančių elektringųjų dalelių sužadintų jonosferoje esančių atomų ir molekulių spinduliavimas. O milžiniškais greičiais į mūsų atmosferą įskriejantys mažyčiai kosminiai kūnai, vadinami meteoroidais, sukelia trumpus šviesos žybsnius – meteorus, kurių pėdsakai kasnakt raižo žvaigždėtą dangų.

1.5 Sutemos ir nakties dangus

Troposferoje vykstantys optiniai reiškiniai gali būti matomi tiek dieną (Saulės šviesoje), tiek naktį (Mėnulio šviesoje ar esant dirbtiniam apšvietimui). Tačiau optinių reiškinų įvairovė neapsiriboja reiškiniais, vykstančiais troposferoje. Ne mažiau įdomūs, o kartais ir egzotiški optiniai

reiškiniai vyksta aukštesniuose atmosferos sluoksniuose: stratosferoje, mezosferoje ir termosferoje (jonosferoje). Šiuose atmosferos sluoksniuose oras yra labai išretėjęs, tad juose vykstančių reiškinų šviesumas labai menkas ir juos galima stebėti tik po Saulės laidos, esant sutemoms arba jau naktį.

Sutemos klasifikuojamos pagal jau nusileidusios Saulės disko kampinę padėtį horizonto atžvilgiu. Laikotarpis, kai Saulė (tiksliau, jos disko centras) panirusi žemiau horizonto tarp 0° ir 6°, vadinamas pilietine sutema (angl. *civil twilight*). Pilietinės sutemos metu dangus dar labai šviesus, nes nusileidusios Saulės spinduliai vis dar apšviečia troposferą. Tai puikus metas stebėti dangaus ir debesų spalvų kaitą, pamatyti ilgus, per dangų besidriekiančius prieblandos spindulius ar Žemės šešėlį, krintantį jos pačios atmosferoje. Pilietinė sutema Lietuvos platumoje trunka apie 40 minučių. Besibaigiant jai, visa troposfera panyra į šešėlį, dangaus skliaute sušvinta planetos ir ima ryškėti pirmosios žvaigždės, nors pats dangus tebėra sąlyginai šviesus. Pilietinės sutemos pabaiga – tai palankus metas stebėti retus ir subtilius optinius reiškinius, vykstančius stratosferoje, – purpurines sutemas ar perlamutrinius debesis. Saulės diskui nusileidus 6° žemiau horizonto, prasideda navigacinė sutema (angl. *nautical twilight*). Tuomet tiesioginiai Saulės spinduliai apšviečia tik pačius viršutinius stratosferos sluoksnius ir mezosferą. Dangaus šviesumas priešingoje Saulei pusėje smarkiai sumažėja, o Saulės pusėje aiškiai matoma didelė šviesesnio dangaus skliauto sritis – vadinamasis sutemų segmentas (angl. *twilight arch*).

Vidurvarų sutemų segmentas yra beveik tiesiai šiaurėje. Kaip tik ten gali būti matomi sidabriškieji debesys. Navigacinė sutema baigiasi, kai Saulė panyra daugiau kaip 12° žemiau horizonto. Tuomet prasideda astronominė sutema (angl. *astronomical twilight*). Jos metu dangus vis labiau temsta: vis ryškiau spindi žvaigždės, mezosfera palaipsniui patenka į šešėlį, dangus tampa tamsiai mėlynas, jį apšviečia



↑ 5 pav.
Astronominė sutema. A. Dubiečio nuotr.

tik pačiame aukščiausiam atmosferos sluoksnyje – termosferoje silpnai išsklaidyta Saulės šviesa. Sutemų segmentas susitraukia iki nedidelio šviesesnio dangaus rėželio, vis labiau tamsėja ir glaudžiasi prie horizonto (5 pav.). Baigiantis astronominėi sutemai ima ryškėti Paukščių Takas – į balzganai švytinčią plačią juostą susiliejanči daugybės tolimų mūsų galaktikos žvaigždžių šviesa. Tai laikas, kai jau galima pradėti stebėti meteorus, matyti šiaurės pašvaisčių švytėjimą ir kitus subtilius naktinio dangaus reiškinius. Astronominė sutema baigiasi Saulei panirus 16° žemiau horizonto, kai akiai dangus tampa visiškai juodas, visu grožiu sušvinta Paukščių Takas (6 pav.) – prasideda naktis.

Laiko tarpas po Saulės laidos, kada įsivyrąja naktis (arba kiek trunka sutemos), priklauso nuo vietovės geografinės platumos. Ant pusiaujo visiškai sutemsta prabėgus vos pusvalandžiui po Saulės laidos, kadangi Saulė į horizontą leidžiasi stačiu kampu. Lietuvos platumoje sutemos trunka apie dvi valandas po Saulės laidos ir tiek pat prieš Saulei patekant. Vasarą Lietuvoje tikrosios nakties nebūna: nuo gegužės vidurio iki rugpjūčio pradžios netgi pačiu tamsiausiu paros metu tvyro astronominė sutema, o apie vasaros saulėgrąžą (birželio antroje pusėje) – tik navigacinė sutema. Dar šiauriau vidurvasarį net vidury nakties tvyro tik pilietinė sutema. Šis romantiškas laikotarpis vadinamas baltosiomis naktimis. O tuo metu už poliarinio rato sutemų išvis nebūna, ten Saulė nenusileidžia, ir kiaurą parą trunka poliarinė diena.



● 6 pav.

Astronominė naktis: Paukščių Tako, nusidriekusio per Cefėjo, Gulbės, Erelio ir Gyvatnešio žvaigždynus, fragmentas.

A. Dubiečio nuotr.



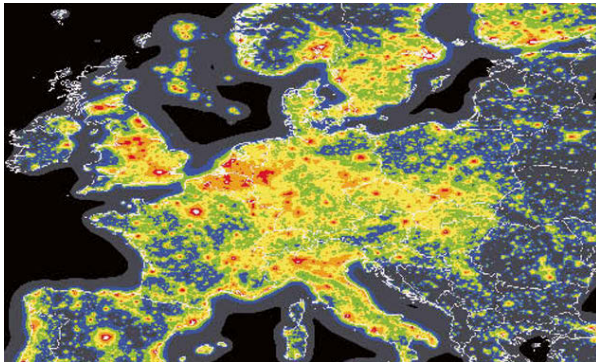
↑ 8 pav.
Šviesos tarša mieste. A. Dubiečio nuotr.

1.6 Šviesos tarša

Vis didesne mūsų laikų problema tampa vadinamoji šviesos tarša (angl. *light pollution*). Tai – atmosferoje išsklaidyta miesto žiburių šviesa, kurios intensyvumas dėl miestų plėtros kasmet tolydžio didėja. Šia prasme visi žengiamo į „šviesų rytojū“. Šviesos tarša stipriausia tankiausiame priežeminiame oro sluoksnyje, ji užgožia silpnų dangaus objektų šviesą, nors toli nuo miesto žiburių šie objektai būna lengvai įžiūrimi plika akimi. Pavyzdžiui, netgi esant, atrodytų, labai skaidriam orui, miesto danguje pamatyti Paukščių Tako ar artimiausios kaimyninės galaktikos Andromedos

ūko beveik neįmanoma. Šviesos taršos problema aktuali visame pasaulyje, o ypač išsivysčiusiose šalyse. 2001 m. sudarytas pirmasis išsamus pasaulio šviesos taršos atlasas (7 pav.) [20]. Paaiškėjo, kad du trečdaliai JAV ir daugiau nei pusė Europos Sąjungos gyventojų gyvena smarkiai padidintos šviesos taršos sąlygomis ir savo gyvenamojoje vietovėje negali matyti Paukščių Tako. Gali būti, kad veikiai išaugs karta, kuri tamsaus žvaigždėto dangaus iš viso nebus nė karto mačiusi. Kol kas galima pasidžiaugti, kad šviesos taršos požiūriu Lietuva yra viena „švariausių“ Europos Sąjungos valstybių. Tačiau ir Lietuvoje didmiesčių gyventojai gyvena padidintos šviesos taršos sąlygomis, o naktį didžiųjų šalies miestų pašvaistės gali būti matomos net iš 50 km atstumo.

Šviesos tarša užgožia daugybę subtilių naktinio



↑ 7 pav.
Europos šviesos taršos žemėlapis.
JAV karinių oro pajėgų meteorologinių palydovų
programos duomenys [20]

dangaus optinių reiškinių – atmosferos švytėjimą, zodiako šviesą ir net šiaurės pašvaistes, kurios Lietuvos padangėje dideliu šviesumu ir taip nepasizymi. Dangų teršiančiuose dirbtinių šviesos šaltinių spinduliuose pranyksta neryškūs meteorai (o tokių yra dauguma), naktinis dangus jau nebeatrodo juodas, o tampa purvinai raudonas [21] (8 pav.). Raudona spalva ypač išryškėja esant debesuotam dangui, padidėjusiai oro taršai ar tvyrant kad ir nedideliam rūkui.

Anksčiau laikyta, kad šviesos tarša yra tik astronomų problema. Tačiau pastaruoju metu daugėja duomenų, kad stipri šviesos tarša neigiamai veikia žmonių psichiką, trikdo miegą. Jautriausiai į šviesos taršą reaguoja gyvūnijos pasaulis, kai naktį smarkiai padidėjęs šviesos kiekis pažeidžia per ilgą evoliucijos laikotarpį nusistovėjusias vabzdžių ir gyvūnų gyvenimo normas [22]. Pasaulyje jau pradėta galvoti, kaip būtų galima sumažinti šviesos taršą. Kartais tam tereikia supratimo: 1997 m. pavasarį Komo mieste Italijoje, kai danguje švytėjo Heilio-Bopo kometa (12 sk. 4 pav.), miesto valdžia sutemus kelioms valandoms išjungdavo gatvių apšvietimą, kad žmonės, būdami tiesiog gatvėje, galėtų pasigrožėti šia reta ir puikia dangaus viešnia.

Bibliografija

1. J. F. Kasting, *Earth's early atmosphere*, *Science* **259**, 1993, 920–926.
2. S. Armalis, *Atmosferos chemija*, Vilnius: Vilniaus universiteto leidykla, 2009.
3. B. Stevens, S. Bony, *Water in the atmosphere*, *Physics Today* **66**(6), 2013, 29–34.
4. J. T. Emmert, *A physicist's tour of the upper atmosphere*, *Physics Today* **61**(12), 2008, 70–71.
5. G. M. B. Dobson, *Forty years' research on atmospheric ozone at Oxford: a history*, *Applied Optics* **7**, 1968, 387–405.
6. T. G. Shepherd, *The middle atmosphere*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 2000, 1587–1601.
7. J. R. Holton, *The role of gravity wave induced drag and diffusion in the momentum budget of the mesosphere*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **39**, 1982, 791–799.
8. D. C. Fritts, M. J. Alexander, *Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere*, *Reviews of Geophysics* **41**, 2003, 1003.
9. J. Paganan, M. Weber, M. T. DeLand, L. E. Floyd, J. P. Burrows, *Solar irradiance variations in 240–1600 nm during the recent solar cycles 21–23*, *Solar Physics* **272**, 2011, 159–188.
10. J. Lean, *Living with a variable Sun*, *Physics Today* **58**(6), 2005, 32–38.
11. A. S. Rodger, M. J. Jarvis, *Ionospheric research 50 years ago, today and tomorrow*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 2000, 1629–1645.
12. M. J. Jarvis, *Bridging the atmospheric divide*, *Science* **293**, 2001, 2218–2219.
13. V. Ramanathan, B. R. Barkström, E. F. Harrison, *Climate and the Earth's radiation budget*, *Physics Today* **52**(5), 1989, 22–32.
14. J. T. Kiehl, K. E. Trenberth, *Earth's annual global mean energy budget*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **78**, 1997, 197–208.
15. T. R. Karl, K. E. Trenberth, *Modern global climate change*, *Science* **302**, 2003, 1719–1723.
16. J. M. Pérez, J. Viña, *Bible used to reexamine if Heaven is hotter than Hell*, *Physics Today* **51**(7), 1998, 96.
17. U. Fantz, *Optical phenomena in the open air*, *Contemporary Physics* **45**, 2004, 93–108.
18. S. D. Gedzelman, M. Vollmer, *Atmospheric optical phenomena and radiative transfer*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**, 2008, 471–485.
19. U. Platt, K. Pfeilsticker, M. Vollmer, *Radiation and optics in the atmosphere*, *Springer Handbook of Lasers and Optics*, F. Träger ed., Springer, 2007.
20. P. Cinzano, F. Falchi, C. D. Elvidge, *The first World Atlas of the artificial night sky brightness*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **328**, 2001, 689–707.
21. C. C. M. Kyba, T. Rutz, J. Fisher, F. Hölker, *Red is the new black: how the colour of urban skyglow varies with cloud cover*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **425**, 2012, 701–708.
22. P. Daukantas, *Light pollution. The problem and the possible solutions*, *Optics and Photonics News* **23**(8), 2012, 30–35.

2. Šviesos spinduliai atmosferoje



• A. Dubiečio nuotr.

Dar senovės graikai pastebėjo, kad arti horizonto esantį šviesulį matome šiek tiek aukščiau, nei jis yra iš tikrųjų. To priežastis yra šviesos spindulių lūžis atmosferoje, vadinamas atmosferos refrakcija – Žemės atmosfera šiek tiek pakeičia iš labai toli atkeliaujančių (esančių už atmosferos ribų) Saulės, Mėnulio, planetų ir žvaigždžių šviesos spindulių kryptį. Atmosferos refrakcijos efektą gerai žino astronomai, kurie vartoja „astronominės refrakcijos“ ir „refrakcijos kampo“ terminus, kad įvertintų skirtumą tarp regimosios ir tikrosios šviesulio padėčių dangaus skliaute [7]. Bendresne prasme atmosferos refrakcijos sąvoka yra kur kas platesnė. Su atmosferos refrakcija siejama daug įdomių optinių reiškinių, pradedant Saulės ir Mėnulio diskų iškraipymais ir baigiant mirażais.

2.1 Atmosferos refrakcija

II mūsų eros amžiuje graikų filosofas Ptolemėjas pirmasis pabandė paaiškinti atmosferos refrakcijos reiškinį. Anuomet buvo manoma, kad Žemę supa vienodo tankio atmosfera (t. y. didėjant aukščiui, oro tankis išlieka pastovus), gaubiamą kur kas retesnio eterio – paslaptingojo penktojo elemento, kurio buvimą dar IV a. prieš mūsų erą postulavo žymūs graikų filosofai Anaksagoras ir Aristotelis. Ptolemėjas manė, kad šviesos spinduliai lūžta tankesnio oro ir retesnio eterio sandūroje, todėl šviesulio regimoji padėtis dangaus skliaute pasikeičia, panašiai kaip žiūrėdami nuo kranto po vandeniu esantį objektą matome šiek tiek kitoje vietoje. Ptolemėjo aiškinimas, nors ir buvo gerokai supaprastintas, gana tiksliai atskleidė atmosferos refrakcijos reiškinio esmę, o Ptolemėjo atmosferos modeliu ir jo pasiūlyta atmosferos refrakcijos samprata buvo remiamasi beveik 1500 metų [2]. Įdomu tai, kad patį šviesos lūžio dėsnį⁵ šiuolaikiškai suformulavo olandų astronomas ir

matematikas Vilebrordas Snelijus (*Willebrord Snellius*) tik 1621 m. Tobulėjant astronominiams instrumentams ir išradus teleskopą, XVI a. danų astronomas Tychas Brahė (*Tycho Brahe*) atliko daugybę šviesulių padėčių matavimų ir sudarė tikslias astronominės refrakcijos lenteles, kuriomis ilgą laiką buvo vadovaujama vykdant įvairius astronominius stebėjimus. T. Brahė išmatavo, kad šviesulio regimoji ir tikroji padėtys skiriasi tuo labiau, kuo šviesulys yra arčiau horizonto, ir nustatė, jog prie pat horizonto vidutinis regimosios ir tikrosios šviesulio padėčių skirtumas (refrakcijos kampas) siekia 35 kampo minutes⁶.

Jau vėliau, paaiškėjus, kad paslaptingoji, užpildanti kosminę erdvę substancija – eteris neegzistuoja, ir nustatčius atmosferos sluoksnių struktūrą bei tankį, buvo patikslintos ir fizikinės šviesos lūžio (refrakcijos) atmosferoje priežastys, kurios pasirodė sudėtingesnės. Šviesos refrakcija atmosferoje atsiranda dėl regimojo oro tankio kitimo išilgai žvilgsnio linijos: žvelgiant horizonto kryptimi, oras yra kur kas tankesnis, nei žvelgiant tiesiai virš galvos – į zenitą, taigi oro, kaip ir bet kokių kitų dujų, lūžio rodiklis

⁵ Šviesos lūžio dėsnis nusako, kiek pasikeičia šviesos spindulio kryptis jam sklindant iš vienos medžiagos į kitą: $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_1}{n_2}$, čia θ_1 ir θ_2 yra kritusio ir lūžusio spindulių kampai (matuojami nuo statmens paviršiui), o n_1 ir n_2 yra atitinkami medžiagų lūžio rodikliai. Sakoma, kad medžiaga yra tankesnė, jei jos lūžio rodiklis yra didesnis. Taigi lūžio rodiklis charakterizuoja medžiagos laužiamąją galią šviesai, o dydis $n-1$ vadinamas medžiagos laužiamąja geba. Pavyzdžiui, vakuumo lūžio rodiklis yra 1, taigi jo laužiamoji geba yra 0; oro laužiamoji geba yra apie 0,0003 (žr. 4 pav.), vandens ir ledo – apie 0,33 (žr. 5 skyriaus 1 pav. ir 6 skyriaus 2 pav.), o stiklo – 0,45.

⁶ 1 kampo laipsnis lygus 60 kampo minučių ($1^\circ = 60'$). 35' yra šiek tiek daugiau nei 0,5°.

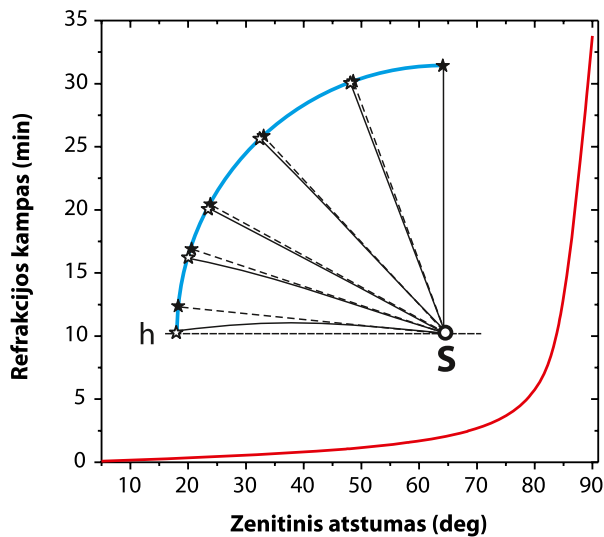


← **1 pav.**
Dėl atmosferos refrakcijos prie horizonto esančios Saulės diskas visuomet atrodo vertikalčiai suplotas.
G. Tamošausko nuotr.

↑ **2 pav.**
Taip susiploja prie horizonto esančių Saulės ar Mėnulio diskai. Išsistinės kreivės žymi šviesos spindulių trajektorijas, punktyrais pažymėta žvilgsnio linija. *J. Griciaus pieš.*

smarkiai priklauso nuo jo tankio, tad ir nuo žiūrėjimo krypties. Be to, dideliu kampu į atmosferą kritusiems ir palei horizontą sklindantiems šviesos spinduliams atmosfera tampa panaši į gradientinę terpę – sklisdamas stebėtojo link, šviesos spindulys kerta vis tankesnę ir tankesnę orą. Tokioje aplinkoje dėl nuolatinio lūžio rodiklio kitimo išilgai žvilgsnio linijos šviesos spindulių kelias yra iškreivinamas: šviesos spinduliai ima sklįsti nebe tiesiomis, bet kreivomis trajektorijomis, o stebėtojas objektą mato kreivo šviesos spindulio liestinės kryptimi. Atsižvelgus ir į tai, jog Žemė apvali, už atmosferos ribų esančio objekto šviesos spinduliai savo kelyje kerta labai įvairaus tankio atmosferos sluoksnius, tad šviesos spindulių kreivumas tampa netolygus. Kuo arčiau horizonto yra šviesulys, tuo labiau iš jo sklindančių šviesos spindulių kelias iškreivinamas, todėl žiūrint kaip tik šia kryptimi atmosferos refrakcijos efektai pasireiškia labiausiai. Taigi, kalbant apie labai mažų matmenų objektus – žvaigždes ar planetas, dėl atmosferos refrakcijos skiriasi regimoji ir tikroji jų padėtis [3]. Aišku, žvelgiant plika akimi ir neturint atskaitos taško, pastebėti minėtą skirtumą nėra lengva, o kad jį įvertintume, kartu reikia tiksliai žinoti šviesulių patekėjimo ar laidos laiką.

Tačiau atmosferos refrakcija sąlygoja ir daugybę kitų įdomių reiškinių, kuriuos galima matyti plika akimi. T. Brahės amžininkas garsus vokiečių astronomas Johanesas Kepleris (*Johannes Kepler*) pirmasis atkreipė dėmesį į tai, kad, Saulei tekant ar leidžiantis, jos diskas visuomet atrodo šiek tiek vertikalčiai suplotas (**1 pav.**). Savo pastebėjimą J. Kepleris paaiškino atmosferos refrakcija: Saulei esant prie horizonto, šviesos spinduliai, mus pasiekiantys iš apatinio Saulės disko krašto, atmosferoje lūžta (užlenkiami) labiau nei tie šviesos spinduliai, kurie mus pasiekia iš viršutinio Saulės disko krašto (**2 pav.**). Tas spindulių lūžio kampų skirtumas tesudaro nepilnas 7', tačiau žinant, kad Saulės disko kampinis skersmuo yra 32', Saulės diskas susiploja bemaž penktadaliu. Jei tik Saulės spinduliai neakina, šį efektą nesunku pamatyti ir plika akimi kiekvieno saulėlydžio ar saulėtekio metu. J. Kepleris kartu pastebėjo, kad tekant ir leidžiantis lygiai taip pat susiploja ir Mėnulio diskas. Beje, iš dirbtinių Žemės palydovų kiurairai per Žemės atmosferą matomas Mėnulio diskas dėl dvigubai didesnės refrakcijos susiploja beveik dvigubai smarkiau.

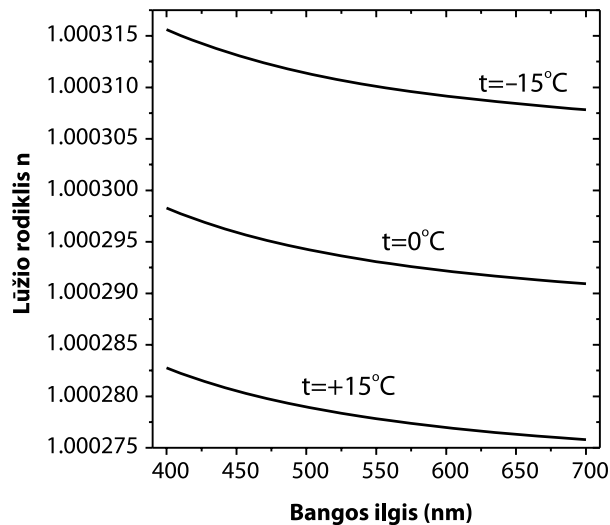


↑ 3 pav.

Refrakcijos kampo priklausomybė nuo šviesulio zenitinio atstumo modifikuotoje standartinėje atmosferoje. Paveiklo intarpe pavaizduota, kaip dėl šviesos spindulių išlinkimo atmosferoje skiriasi tikroji (tuščiaidurės žvaigždės) ir regimoji (pilnavidurės žvaigždės) šviesulio padėtys

↗ 4 pav.

Oro lūžio rodiklio priklausomybė nuo temperatūros ir šviesos bangos ilgio



Vertinant vidutinę atmosferos refrakciją, remiamasi „modifikuotos standartinės atmosferos“ (angl. *modified US1976 atmosphere*) modeliu. Jis apibūdina atmosferos refrakciją įprastinėmis sąlygomis: esant atmosferos slėgiui 1013,25 hPa (t. y. 1 atmosferai arba 760 mm Hg) ir temperatūros gradientui $-6.5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (t. y. didėjant aukščiui, temperatūra krinta tokia sparta), kai šviesos bangos ilgis yra 574 nm (geltona šviesa), o stebėtojas yra jūros lygyje, kur oro temperatūra siekia $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir santykinė drėgmė yra 80 % [4]. Refrakcijos kampo priklausomybė nuo šviesulio zenitinio atstumo tokioje modifikuotoje standartinėje atmosferoje pavaizduota 3 pav. Matyti, kad objekto tikroji ir regimoji padėtys tiksliai sutampa tik jam esant pačiame

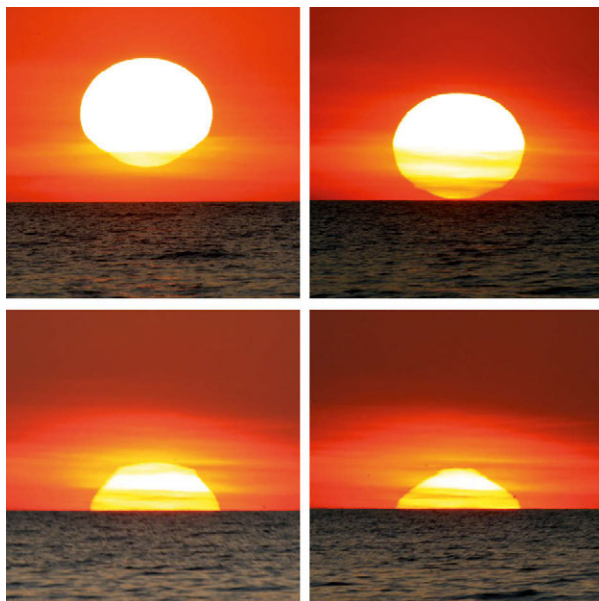
zenite. Objektui tolstant nuo zenito, refrakcijos kampas dėl šviesos spindulių išlinkimo ima nežymiai didėti (3 pav. intarpas). Vienok tikrosios ir regimosios padėčių skirtumas objektams, kurie pakilę daugiau nei 10° virš horizonto, yra labai mažas, mažesnis nei $5'$. Tik dar arčiau horizonto refrakcijos efektas jau tampa pastebimesnis ir ties pat horizontu kampinis šviesulio padėčių skirtumas pasiekia $34'$. Beje, tai beveik visiškai tiksliai atitinka prieš beveik 350 m. T. Brahės atliktų refrakcijos kampo matavimų rezultatą.

Akivaizdu, kad didžiausią įtaką atmosferos refrakcijai turi tik tankiausias ir žemiausias atmosferos sluoksnis – troposfera, o ypač arčiausiai Žemės paviršiaus esantis (priežeminis) oro sluoksnis. Oro lūžio rodiklis (4 pav.), taigi ir atmosferos refrakcijos mastas, smarkiai priklauso nuo lokalių sąlygų – oro slėgio, temperatūros ir santykinės drėgmės [5], kurios laikui bėgant gali gerokai keistis. Neseniai atlikti išsamūs, net kelerius metus trukę tyrimai atskleidė, kad atmosferos refrakcija yra labai nepastovi. Jos mastas kinta priklausomai nuo paros ir metų laiko [6]. Vėstant (šylant) orui, jo tankis didėja (mažėja), taigi didėja (mažėja)

ir oro lūžio rodiklis bei refrakcijos kampas. Paros bėgyje refrakcijos kampo kitimas nėra didelis ir paprastai neviršija keleto kampo minučių. Vienok sezoninė refrakcijos kaita gali būti kur kas didesnė: nustatyta, kad metų bėgyje maksimalus atmosferos refrakcijos kampas paprastai svyruoja tarp $0,5^\circ$ ir 1° , tačiau kai kada šaltuoju metų laiku jis gali siekti net 2° ar daugiau.

Kartais pasitaiko, kad priežeminio oro sluoksnio temperatūros ir tankio priklausomybė nuo aukščio yra netolygi. Taip nutinka, kai skirtingame aukštyje susidaro atskiri, visai nedaug besiskiriančių temperatūrų oro sluoksniai. Žvilgsnio linijai kertant tokius oro sluoksnius, tekančios ar besileidžiančios Saulės disko vaizdas iškraipomas netolygiai. Skirtingos temperatūros oro sluoksnių kiekis bei temperatūros gradientas kiekvienąkart būna vis kitoks, tad šia prasme kiekvienas saulėlydis yra unikalus. Jei tik Saulės spinduliai neakina, netgi to paties saulėlydžio metu galima išvysti įstabią keistų Saulės disko formų įvairovę (5 pav.). Dar didesni tekančios ar besileidžiančios Saulės disko iškraipymai gali būti matomi šaltuoju metų laiku.

Kadangi Saulės disko kampinis skersmuo ($32'$) yra beveik toks pats, kaip ir maksimalus atmosferos refrakcijos kampas ($34'$), susiduriame su gana paradoksalia situacija: palydint Saulę, kai jos diskas priliečia horizontą, iš tikrųjų Saulė jau būna nusileidusi, o besigrožint pirmaisiais ryto Saulės spinduliais, ji dar nebūna patekėjusi! Kitaip tariant, dėl atmosferos refrakcijos Saulės ir Mėnulio tekėjimo ir laidos laikas bei dienos ilgumas skiriasi nuo tų, kurie nurodomi kalendoriuje. Lietuvos platumoje šie skirtumai nėra dideli; dienos trukmė vidutiniškai ilgesnė tik keliomis, paprastai 5–8, minutėmis. Kitaip yra šiaurinėse platumose, kur regimoji Saulės judėjimo trajektorija dangaus skliaute sudaro labai mažą kampą su horizontu. Dėl atmosferos refrakcijos poliarinė diena ašigaliuose visada



↑ 5 pav.
Besileidžiančios Saulės disko iškraipymai šviesai sklindant pro skirtingos temperatūros oro sluoksnius. A. Dubiečio nuotr.

būna ilgesnė už poliarinę naktį. Saulė ten paprastai pateka net keliomis dienomis anksčiau, o nusileidžia keliomis dienomis vėliau.

Su atmosferos refrakcija yra susijęs dar vienas labai įdomus reiškinys. Per Mėnulio užtemimus galima pastebėti, kad Žemės šešėlio užtemdyta Mėnulio disko dalis nėra nei visiškai tamsi, nei juoda, tačiau silpnai švyti tamsiai raudona spalva (6 pav.). Tai Žemės šešėlyje esančią Mėnulio disko dalį apšviečia dėl refrakcijos Žemės atmosferoje užlinkę Saulės spinduliai. Šiems spinduliams pakeliui tenka įveikti dvigubai tankesnę atmosferos sluoksnį, palyginti su tuo, pro kurį besileidžiančią Saulę mato ant Žemės paviršiaus esantis stebėtojas. Taigi visą Žemės atmosferą perėję Saulės spinduliai užlinksta dvigubai didesniu kampu. Negana to, dėl šviesos sklaidos storą Žemės atmosferos sluoksnį



6 pav.
Dalinis Mėnulio užtemimas: Žemės šešėlyje esanti Mėnulio disko dalis yra tamsiai raudona, kadangi ją apšviečia Žemės atmosferoje užlinkę Saulės spinduliai. *R. Balčiūno nuotr.*

pereina tik mažiausiai sklaidoma – raudona Saulės šviesa, kuri ir apšviečia Žemės šešėlyje esantį Mėnulio diską. Galima sakyti, kad dėl šių priežasčių Žemės šešėlis niekada nebūna juodas. Netgi Mėnuliui visiškai užtemus, jo diskas tebėra gerai įžiūrimas tamsaus dangaus fone. Esant dalinei užtemimo fazei, pastebėti užtemusios Mėnulio disko dalies spalvą ne visada pavyksta, kadangi akiai sunku adaptuotis prie milžiniško apšviestos ir užtemdytos Mėnulio disko dalių kontrasto. Įdomu ir tai, kad užtemusio Mėnulio disko šviesumas ir atspalvis skiriasi kiekvieno užtemimo metu: vieną kartą jis silpnai švyti vario, o kitą kartą – baugia kraujo raudonio spalva, priklausomai nuo tuo metu Žemės atmosferoje esančių dulkių, aerozolių ir debesų kiekio, kurie papildomai išsklaido ir nuslopina pro Žemės atmosferą

praeinančią Saulės šviesą. Galima tik įsivaizduoti, kaip žvelgiant iš užtemusio Mėnulio galėtų atrodyti pati Žemė – didžiulis tamsus rutulys, apgaubtas nedidelės rausvos ir perregimos aureolės – atmosferos.

2.2 Atmosferos dispersija

Žemės atmosfera, kaip ir bet kuri kita optinė terpė, pasižymi dar viena savybe. Oro lūžio rodiklis, nors ir labai mažai, tačiau skiriasi skirtingo bangos ilgio (spalvos) šviesai (**4 pav.**). Lūžio rodiklio priklausomybė nuo bangos ilgio vadinama dispersija. Oro lūžio rodiklis yra labai mažas (1,0003), o lūžio rodiklių skirtumas pačioms kraštinėms regimojo Saulės spektro spalvoms mėlynai ir raudonai tėra vos 1/20 000, tačiau to pakanka, kad refrakcijos kampai įvairių spalvų šviesos spinduliams šiek tiek skirtingi ir ši skirtumą jau būtų galima kažkaip užfiksuoti. Dėl dispersijos mėlyni ir žali šviesos spinduliai, kuriems oro lūžio rodiklis yra didesnis, lūžta didesniu kampu nei geltoni ar raudoni, kuriems oro lūžio rodiklis mažesnis. Paprastai atmosferos dispersijos efektas yra toks menkas, kad plika akimi jo įžiūrėti neįmanoma. Tačiau, pažvelgus į žemai prie horizonto esančią Saulę pro teleskopą, galima pastebėti, kad viršutinis Saulės disko kraštas turi žalią (retkarčiais, esant labai skaidriam orui, žydrą ar net mėlyną), o apatinis – raudoną apvadą. Į šį reiškinį pirmą kartą atkreipė dėmesį ir 1873 m. jį pirmą kartą aprašė anglų astronomas D. Vinstenlis (*D. Winstanley*). Spalvotų Saulės disko apvadų storis tesiekia vos keliolika kampo sekundžių. Tačiau jei stebimo objekto kampiniai matmenys yra maži ir palyginami su atmosferos dispersijos mastu, atmosferos dispersijos efektas pasireiškia nuostabia spalvų gama. Tokie objektai kaip tik yra planetų diskai, kurių kampiniai matmenys siekia vos keliolika ar keliasdešimt kampo sekundžių. Taip siauras prie

horizonto esančios Veneros pjautuvus, žvelgiant pro teleskopą, nusidažo visomis vaivorykštės spalvomis (7 pav.).

Vis dėlto atmosferos dispersijos efektą kartais galima matyti ir plika akimi, tačiau jis pasireiškia kiek kitaip. Tai – žvaigždžių mirgėjimas. Galima dažnai matyti, kad kartais neaukštai virš horizonto esančios ryškios žvaigždės mirga ir greitai kaitalioja spalvą, sužibdamos tai geltona, tai žalia, tai mėlyna šviesa. Šios greitos spalvų kaitos priežastis yra didelis atmosferos turbulentiškumas. Maišantis kylančioms šilto ir besileidžiančioms šalto oro masėms, labai greitai keičiasi oro tankis, o su juo ir šviesos refrakcijos kampas. Kadangi žvaigždės nuo mūsų nutolusios milijinišku atstumu ir tėra taškiniai, neturintys kampinių matmenų šviesos šaltiniai, atmosferos dispersijai išskaidžius baltą žvaigždės šviesą į spalvas, kiekvienu laiko momentu į žvilgsnio liniją pakliūva vis kitos spalvos žvaigždės šviesa ir žvaigždė ima mirgėti [7]. Tai pat sakoma, kad netgi gerai nepažįstant dangaus šviesulių, planetas lengva atskirti nuo žvaigždžių, kadangi planetos nemirga. Tame yra daug tiesos. Planetos turi kampinius matmenis, o pro teleskopą galima įžiūrėti jų diskus, kurių skersmuo paprastai yra palyginamas ar didesnis už refrakcijos kampų skirtumą skirtingų spalvų šviesos spinduliams. Skirtingų spalvų spinduliams dėl atmosferos dispersijos net ir šiek tiek pakeitus sklaidimo kryptį, į žvilgsnio liniją vis tiek patenka skirtingų spalvų spinduliai iš skirtingų planetos disko vietų, spalvos persikloja, ir stebėtojas mato baltą, nemirgančią planetos šviesą. O jei oro turbulentiškumas labai didelis, aišku, mirga ir planetos, ir net tolimos miesto šviesos.

⁶ Neskaitant atmosferos refrakcijos, atstumą iki horizonto

d_H galima apskaičiuoti remiantis Pitagoro teorema:

$$d_H = \sqrt{(R+h)^2 - R^2} \approx \sqrt{2Rh}, \text{ laikant kad } h \ll R, \text{ čia } h \text{ yra stebėtojo}$$

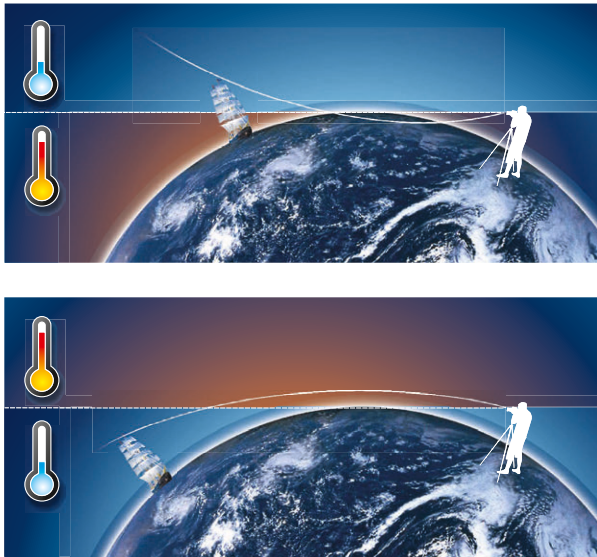
aukštis virš jūros lygio, o $R = 6370 \text{ km}$ yra Žemės rutulio spindulys.



↑ 7 pav.
Spalvotas prie horizonto esančios Veneros pjautuvus – atmosferos refrakcijos ir dispersijos rezultatas. R. Balčiūno nuotr.

2.3 Horizontai ir miražai

Įprastinėmis sąlygomis, kurias nusako modifikuota standartinė atmosfera, žemiausiame atmosferos sluoksnyje – troposferoje temperatūra didėjant aukščiui krinta $6,5 \text{ }^\circ\text{C/km}$ sparta. Tačiau kartais temperatūros kitimo dėsnis kelių dešimčių ar šimtų metrų aukštyje gali būti visiškai kitoks. Tuomet atmosferos refrakcijos mastas smarkiai pasikeičia, o esant neįprastai atmosferos refrakcijai, atsiranda miražai [8]. Miražas – tai dėl atmosferos refrakcijos smarkiai, o kartais ir neatpažįstamai iškraipytas objekto vaizdas. Miražai paprastai susidaro ties horizontu, o jų matumas glaudžiai susijęs su atstumu iki regimojo horizonto (vaizdžiai tariant, riba tarp žemės ir dangaus). Dėl to, kad Žemė apvali, atstumas iki regimojo horizonto nėra begalinis [9]. Šis atstumas priklauso nuo stebėtojo aukščio virš jūros lygio: kuo aukščiau pakilęs stebėtojas, tuo labiau nutolusi regimojo horizonto linija⁶. Stovint ant jūros kranto ir žvelgiant iš 2 m aukščio (faktiškai tokiaame aukštyje yra



↑ 8 pav.
Kaip susidaro mirażai: viršuje – apatinis mirażas, apačioje – viršutinis mirażas. Kreivos linijos žymi šviesos spindulio trajektoriją, tiesios – horizonto liniją esant įprastinėms sąlygoms. J. Griciaus pieš.

stebėtojo akys), regimasis horizontas yra nutolęs 5 km atstumu, o žvelgiant iš 50 m aukščio – 25 km atstumu. Galima vertinti ir atvirkščiai: jei stebėtojas yra jūros lygyje, jis gali matyti 50 m aukščio objekto, nutolusio 25 km atstumu, viršūnę ir pan. Atstumą iki regimojo horizonto smarkiai lemia ir šviesos sklaidai. Esant didelei šviesos sklaidai (pavyzdžiui, dėl taršos ar drėgmės), regimoji horizonto linija gali apskritai išnykti.

Neįprastą atmosferos refrakciją lemia nedideliame aukštyje susidarantys dideli (kelių ar net keliolikos laipsnių) oro temperatūrų skirtumai, o tai savo ruožtu gali gerokai pakoreguoti atstumą iki regimojo horizonto. Tokie mirażai, kai objektas matomas žemiau nei jis yra iš tikrųjų, vadinami apatiniais (angl. *inferior mirage*), o jei aukščiau – viršutiniais (angl. *superior mirage*). Susidarant apatiniais

miražams, šviesos spinduliai atmosferoje išlinksta taip, kad netoli horizonto esantys objektai ar atskiri jų fragmentai tarsi išnyksta už horizonto ir tampa nebeatomi, o susidarant viršutiniams miražams, esantys už horizonto ir įprastinėmis sąlygomis nematomi objektai tampa matomi, kaip pavaizduota 8 pav., kur Žemės rutulio ir šviesos spindulių kreivumai dėl vaizdumo yra smarkiai padidinti. Kartu galima sakyti, kad apatinio miražo atveju regimasis horizontas priartėja, o viršutinio miražo atveju – nutolsta. Susidarant miražams, objektų vaizdai taip pat smarkiai iškraipomi – padidinami, sumažinami, apverčiami aukštyn kojomis ir pan. Kai susidaro kad ir nedideli miražai, atstumas iki regimojo horizonto tampa nepaprastai jautrus net labai mažiems stebėtojo aukščio pokyčiams (9 pav.).

2.4 Apatiniai mirażai

Vidutinių platumų kraštuose, tarp jų ir Lietuvoje, dažniausiai matomi apatiniai mirażai. Jie atsiranda tuomet, kai smarkiai įkaista ir išretėja nedidelis priežeminis oro sluoksnis, į kurį dideliu kampu (matuojant nuo statmens jo paviršiumi) kritę šviesos spinduliai yra išlenkiami nuo stebėtojo, kaip pavaizduota 8 pav. Tokiu atveju regimasis horizontas staiga priartėja, ir stebėtojas nebegali įžvelgti horizonte esančio objekto, kuris įprastinėmis sąlygomis yra gerai matomas. Susidarant apatiniam miražui, palei horizontą visuomet atsiranda vadinamasis aklasis ruožas (angl. *blind strip*), kuris ypač išryškėja, kai horizonte yra ir gana didelių objektų. Nedidelį apatinį miražą galima nesusunkiai pastebėti vos ne kiekvieną karštą vasaros dieną virš įkaitusio asfalto – toli esanti lygi kelio atkarpa ima blizgėti, lyg ant asfalto telkšotų didžiulė bala. Ši „bala“ – tai aklasis ruožas, kuriame atsispindi čia pat už jo esantys automobiliai ar kiti objektai, o jei kelias tuščias – tik dangaus žydrynė



↑↖ 9 pav.
Horizonto linija stebėtojų esant 2 m (viršuje) ir 3 m (apačioje) aukštyje virš kranto. Pastaruoju atveju iš už horizonto išnyra nedidelis tolimojo kranto mirażas.
A. Dubiečio nuotr.



↑ **10 pav.**
 Apatinis mirażas Kuršių mariose. Tolimas marių
 krantas atrodo tarsi pakibęs ore. *A. Dubiečio nuotr.*

ir pati kelio atkarpa tarsi pranyksta už horizonto. Toks mirażas dažnai vadinamas kelių mirażu [10]. Įvertinta, kad saulėtą dieną prie pat asfalto dangos esančio oro temperatūra yra vidutiniškai 20 °C aukštesnė nei oro, esančio viso labo pusės metro aukštyje virš kelio. Dėl didelio temperatūrų skirtumo kelių mirażai matomi vos kelių šimtų metrų atstumu. Dramatiškiau apatiniai mirażai atrodo dykumoje, kur temperatūros skirtumai gali būti dar didesni. Apatiniai dykumų mirażai atrodo tarsi smėlynuose telkšantys didžiuliai, tačiau niekada nepasiekiami ežerai, iš kelio viliojantys troškulio kankinamus keliautojus.

Apatinius mirażus, susidarančius dėl įkaitusio oro sluoksnio virš vandens telkinių, išduoda tarsi ore pakibę tolimi krantai (**10 pav.**). Siaura šviesi linija tarp vandens paviršiaus ir horizonte esančių objektų yra aklasis ruožas, kuris ir sukuria pakibusių krantų reginį. Skiriamasis šių mirażų bruožas – vandens ir aklojo ruožo riboje grėsmingai atrodančios didžiulės bangų keteros (**9 pav.**). Šios bangos nėra realios, tai – plevenantis mirażo kraštas, o „milžiniškos“ bangų keteros matomos dėl vertikalaus didinimo efekto (angl. *looming*). Įdomu ir tai, kad nors aklajame ruože negalima matyti vandens paviršiaus, jame gerai matomi tolumo kranto ar netoli jo esančių objektų atspindžiai. Aklajame ruože atspindintys objektų atvaizdai kartais taip smarkiai iškraipomi, kad net būna sunku suprasti, kokį



objektą iš tiesų matome (11 pav.). Be to, miražo vaizdas retai kada būna ryškus – jis nuolat mirguliuoja dėl įkaitusio oro tankio fliuktuacijų ir turbulentiškumo.

2.5 Viršutiniai miražai

Viršutiniams miražams susidaryti ir jiems stebėti reikalingos specifiskesnės sąlygos. Šie miražai atsiranda atmosferoje formuojantis vadinamiesiems inversijos sluoksniams, kai oro temperatūra tam tikrame (keliolikos ar keliasdešimties metrų) aukštyje gerokai (keletu ar išskirtiniais atvejais net keliolika laipsnių) viršija žemiau esančio oro sluoksnio temperatūrą. Tokioje aplinkoje, mažu kampų kritusių šviesos spindulių kelias iškreivinamas taip, kad šviesos spinduliai išlinksta pagal Žemės kreivumo spindulį, tuomet regimasis horizontas smarkiai nutolsta, ir galima matyti net už šimtų kilometrų esančių objektų vaizdus, kaip schemiškai pavaizduota 8 pav.

Vienas plačiausiai žinomų viršutinių miražų – Naujosios Žemės efektas, kurį 1597 m. pirmą kartą stebėjo ir detalai aprašė olandų keliautojas Geritas de Vėras (*Ger-*

11 pav.
Tolimi objektai ir iškraipyti jų atspindžiai
aklajame ruože. A. Dubiečio nuotr.

rit de Veer) kapitono Vilemo Barenco (*Willem Barents*) vadovaujamos ekspedicijos po Arktį metu. Ekspedicijai žiemojant Naujosios Žemės saloje, sausio 27 d., tebetvyrant poliarinei nakčiai, G. de Vėras pastebėjo, kaip virš užšalusios jūros staiga išniro Saulės disko kraštelis, kai pagal astronominius skaičiavimus Saulė turėjo būti net 5.5° žemiau horizonto! [11] Vėliau, tačiau jau kiek mažesnio masto panašūs reiškiniai buvo daug kartų stebėti įvairiose arktinėse ir antarktinėse ekspedicijose ir pavadinti Naujosios Žemės efektu. Iki pat šių dienų laikoma, kad G. de Vėro aprašytas atvejis iliustruoja pačią ekstremaliausią atmosferos refrakciją, kuri kada nors buvo stebėta. G. de Vėrai labai pasisekė – jis atsidūrė reikiamoje vietoje ir reikiamu laiku, kadangi tokiam miražui stebėti reikalingos labai specifinės sąlygos – ne tik inversijos sluoksnio susidarymas, tačiau ir jo padėtis stebėtojo atžvilgiu [12]. Kad matytų viršutinį miražą, stebėtojas turi būti virš inversijos sluoksnio ir žvelgti pro jį horizonto link. Tik tuomet žemiau horizonto esančios Saulės spinduliai, atsispindėję nuo retesnio inversijos



↑ **12 pav.**
Saulėlydžio mirażas virš žemiško Vilniaus.
A. Dubiečio nuotr.

sluoksnio, gali pasiekti stebėtoją. Panašiai šviesa sklinda šviesolaidyje: atsispindėdama nuo mažesnio lūžio rodiklio (retesnio) šviesolaidžio apvarkalo, ji koncentruojama ir sklinda didesnio lūžio rodiklio (tankesnėje) šviesolaidžio šerdyje. Tai vadinama visišku vidaus atspindžiu. Beje, pirmasis, kuris paaikšino Naujosios Žemės efektą kaip visišką šviesos vidaus atspindį tarp skirtingos temperatūros oro sluoksnių, buvo minėtas vokiečių astronomas J. Kepleris. Įdomumo dėlei apskaičiuota, kad jei virš viso Žemės rutulio susidarytų inversijos sluoksnis, kuriame temperatūra didėjant aukščiui didėtų $11\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ sparta, nedideliu kampu paleistas lazerio spindulys, atsispindėdamas nuo tokio inversijos sluoksnio, išlinktų tiksliai pagal Žemės kreivumo spindulį ir, apsukęs visą Žemės rutulį, sugrįžtų atgal iš kitos pusės. Aišku, nerealu tikėtis, kad toks ekstremalus inversijos sluoksnis galėtų kada nors susidaryti natūraliomis sąlygomis.

Viršutinio mirażo objektas gali būti ne tik Saulė ar kitas šviesulys, tačiau ir bet kuri peizažo detalė ar objektas,

kuris įprastinėmis sąlygomis yra pasislėpęs už horizonto. Dėl viršutinio mirażo jūrose staiga tampa matomi toluomoje praplaukiantys laivai, iš už horizonto staiga išnyra kalnai ar ledkalniai, kurie išnyksta be jokio pėdsako vos tik pasikeičia atmosferos sąlygos. Jūrininkystės istorijoje žinoma nemažai atvejų, kai žemėlapiuose būdavo pažymimos neegzistuojančios salos ar net ištisi salynai, kurie viso labo tebūdavo už horizonto stūksančių ledkalnių mirażai. Pažymėtina, kad Naujosios Žemės efektas buvo naudingas ir geografiniams atradimams. Mokliškai įrodyta, kad XI a. norvegų vikingai, plaukiodami palei Islandijos krantus, pastebėjo tolimo, esančio už 240 km, kranto mirażą ir taip atrado Grenlandiją [13]. Esant dideliam atmosferos turbulentiškumui, plevenantys ir greitai besikeičiantys viršutiniai mirażai vadinami oro pilimis arba Fata Morgana.

Viršutiniai mirażai dažniausiai matomi žiemą ar ankstyvą pavasarį, kai priežeminis oro sluoksnis dar šaltas, o aukščiau esantis sluoksnis jau išilęs. Tokios sąlygos dažniausiai pasitaiko poliarinėse srityse, dėl to viršutiniai mirażai dažnai vadinami poliariniais, nors retkarčiais juos gali pasisekti pamatyti ir vidutinėse platumose. Lietuvoje viršutiniai mirażai matomi labai retai (12 pav.). Ryškus ruožas virš besileidžiančios Saulės disko yra ne kas kita, kaip inversijos sluoksnyje atsispindėjęs ir smarkiai iškraipytas (vertikaliai suplotas) Saulės disko atvaizdas.

2.6 Žalioji žybsnis

Ypatingas mirażas yra žalioji Saulės žybsnis (angl. *green flash*), kai pati viršutinė besileidžiančios Saulės disko dalis trumpam sužimba žaliai. Žalioji žybsnis žinomas nuo neatmenamų laikų ir yra apipintas neįtikėtinais jūrininkų pasakojimais bei legendomis. Įdomu tai, kad pirmasis, kuris XIX a. antroje pusėje į žaliojo žybsnio reiškinį pažvelgė

moksliskai, buvo garsus anglų mokslininkas Džeimsas Džaulis (*James Preston Joule*), pelnęs pasaulinę šlovę kaip termodinamikos mokslo pradininkas. Vienok po to moksliniai žaliojo žybsnio pažinimo keliai ir klystkeliai dar vinguriavo daugiau nei 100 metų, kol pagaliau buvo atskleista šio įdomaus reiškinio paslaptis. Dabar žinoma, kad žaliasis žybsnis yra ne kas kita, kaip besileidžiančios Saulės disko mirażas, kai kartu pasireiškia ir stiprus atmosferos dispersijos efektas.

Nelygu, kuris mirażas, apatinis ar viršutinis, susidaro saulėlydžio metu, skiriami dviejų (beje, labai skirtingų) tipų žalieji žybsniai [14]. Pirmuoju atveju (susidarant apatiniam mirażui) žaliasis žybsnis matomas kaip smarkiai vertikaliai padidintas žaliojo Saulės disko apvado vaizdas (panašiu būdu formuojasi ir milžiniškų bangų vaizdas aklojo ruožo riboje). Įprastu atveju, kai mirażo nėra, žaliojo Saulės disko apvado storis tesiekia 20" (žr. 2.2 posk.), tad plika akimi jo įžiūrėti neįmanoma. Jei saulėlydžio metu formuojasi apatinis mirażas, žaliojo apvado matmenys gali būti dešimteriopai vertikaliai padidinti. Šis padidintas žaliojo apvado vaizdas matosi dar kelias sekundes po to, kai viršutinis Saulės disko kraštelis pranyksta aklajame mirażo ruože. Šiuo atveju apie galimą žaliąjį žybsnį dažniausiai iš anksto „praneša“ besileidžiančios Saulės disko forma: jos diskas (ar paskutinis dar matomas segmentas) prie pat horizonto įgauna didžiosios graikiškos raidės omega (Ω) pavidalą. Akivaizdu, kad pastebėti pirmojo tipo žaliąjį žybsnį daugiausia galimybių yra jūroje, ten, kur atviras, niekieno neužstojamas horizontas. Patyrę stebėtojai teigia, kad pirmojo tipo žaliąjį žybsnį plika akimi galima pastebėti bent pe vieną iš 6 saulėlydžių.

Antrojo tipo žaliasis žybsnis atsiranda susidarant viršutiniam mirażui ir gali būti matomas Saulės diskui dar nespėjus pasislėpti už horizonto. Kaip jau buvo minėta, viršutiniai mirażai formuojasi atmosferoje susidarant stabi-



↑ **13 pav.**
Antrojo tipo žaliasis žybsnis. A. Dubiečio nuotr.

liems inversijos sluoksniams ir gali būti matomi stebėtojai atsidūrus inversijos sluoksnio aukštyje arba šiek tiek virš jo. Tuomet žvelgiant tiesiai pro inversijos sluoksnį, formuojasi Saulės disko mirażas – smarkiai vertikaliai suspaustas žemiau esančios Saulės disko atvaizdas, kuris matomas kaip nuo Saulės disko viršaus „atitrūkęs“ švytintis horizontalus rėželis (12 pav.). Saulei nyrant žemyn, šis rėželis greitai traukiasi ir galiausiai prieš pat išnykdamas trumpam sušvinta žaliai (13 pav.). Taip atsitinka dėl to, kad žalios spalvos Saulės spinduliai dėl atmosferos dispersijos yra atlenkiami didesniu kampu ir mirażo vaizde matomi ilgiau nei raudoni ar geltoni, kurie atlenkiami mažesniais kampais. Taigi pastariesiems jau išnykus, mirażo vaizdą formuoja tik žalia Saulės šviesa. Be kita ko, antrojo tipo žaliasis žybsnis gali pasirodyti Saulės diskui dar net nespėjus paliesti horizonto, ir jo atsiradimo laiką, skirtingai nei pirmojo tipo žaliojo žybsnio atveju, iš anksto prognozuoti sunkiau. Tuomet, kai atmosfera labai skaidri (mažai sklaidanti), žaliasis žybsnis gali virsti žydruoju ar net mėlynuoju. Antrojo tipo žaliasis žybsnis matomas retai ir dažniausiai, kaip ir visi viršutiniai



↑ 14 pav.

Mėnulio iliuzija: Mėnulio pilnatis diskas yra vienodo kampinio skersmens, nepriklausomai nuo jo aukščio virš horizonto, nors taip ir neatrodo.
A. Dubiečio nuotr.

miražai, poliariniuose rajonuose. Tačiau žiemą, į mūsų platumas atplūdus šaltam arktiniam orui, šiuo įdomiu ir retu reiškiniu gali pasisekti pasigrožėti ir Lietuvoje.

Netgi palankiai susiklosčius visoms minėtoms aplinkybėms, pamatyti žaliąjį žybsnį plika akimi nėra lengva. Viena vertus, akiai sunku adaptuotis prie intensyvios Saulės šviesos, kuri neretai akina net Saulei esant prie pat horizonto [15]. Kita vertus, šis retas reiškinys trunka labai neilgai – vos kelias ar (išskirtiniais atvejais) keliolika sekundžių, tad jis lengvai gali likti paprasčiausiai nepastebėtas. Žaliojo žybsnio trukmė priklauso net tik nuo miražo masto, bet ir nuo to, koku kampu į horizontą leidžiasi Saulė. Tropicuose, esančiuose palei ekvatorių, Saulė leidžiasi labai stačiu kampu, todėl žaliasis žybsnis, kaip ir visi su šviesuliais susiję miražai apskritai, ten matomi labai trumpai. Ir atvirkščiai, šiaurėje Saulės trajektorijos kampas su horizontu labai mažas (smailus), tad tuose kraštuose miražų trukmė kur kas ilgesnė. Yra žinomas ir išskirtinis

atvejis, kai vienos ekspedicijos Antarktidoje dalyviai, prieš pat prasidedant poliarinei naktčiai, stebėjo tai išnykstantį, tai vėl išsibebiantį žaliąjį žybsnį net 45 minutes! [16]

Visų miražų mastas priklauso ne tiek nuo absoliutaus temperatūrų skirtumo tarp besiribojančių oro sluoksnių, kiek nuo temperatūros gradiento, t. y. kaip greitai oro sluoksnių sandūroje kyla ar krinta temperatūra. Kompiuteriu modeliuojant miražų optinį vaizdą, galima detalčiai atkurti temperatūros kitimo kreivę išilgai žvilgsnio linijos, neatliekant jokių kitų papildomų matavimų [17]. Esant sudėtingam temperatūros kitimui išilgai žvilgsnio linijos, miražai tampa sudėtingi, jų objektai gali būti matomi apversti, padidinti ar sumažinti. Kuo tolimesnis miražas, tuo daugiau optinių efektų jo vaizde slypi [18]. Kaip žinoma, dauguma miražų matomi labai arti horizonto, jų vertikalūs kampiniai matmenys retai kada viršija $1\text{--}2^\circ$, taigi miražams stebėti reikia ne tik palankiai susiklosčiusių atmosferos sąlygų, bet ir aštrios akies.

2.7 Mėnulio iliuzija

Iliuzija yra tai, ko iš tikrųjų nėra – mus tiesiog apgaulina mūsų regėjimas. Viena geriausiai žinomų ir lengviausiai pastebimų optinių iliuzijų yra vadinamoji Mėnulio iliuzija. Per pilnatį ką tik patekėjusio Mėnulio diskas atrodo kur kas didesnis nei tuomet, kai Mėnulis būna pakilęs aukštai virš horizonto. Šie Mėnulio disko dydžio skirtumai išryškėja ir skirtingu metų laiku: vasarą pilnas Mėnulis atrodo tarsi didžiulis apelsinas, visą trumpą naktį besiridinėjantis palei pietinį horizontą (14 pav.), o žiemą Mėnulio pilnatis pakyla aukštai, ir pats Mėnulis atrodo kur kas mažesnis. Tas pats pasakytina ir apie tekančios ar besileidžiančios Saulės diską. Mėnulio iliuziją pastebėjo dar senovės graikai, tačiau iki pat šių dienų nėra visiškai aišku, kokios šios iliuzijos

atsiradimo priežastys. Mėnulio disko kampiniai matavimai parodė, kad jo kampiniai matmenys nesikeičia (arti horizonto dėl atmosferos refrakcijos jo diskas susiploja vertikaliai, tačiau jo horizontalus regimasis matmuo nepakinta), taigi šiuo atveju mus apgauna regėjimas. Yra manoma, kad Mėnulio iliuziją kuria mūsų regėjimo ir atstumo iki objekto suvokimo bei įvertinimo ypatumai [19]. Akis objekto dydį geba įvertinti tik tuomet, kai yra koks nors atstumo atskaitos taškas. Kol Mėnulis žemai, mes kartu matome ir horizontą, kuris (iš anksto) žinome, kad yra toli, tačiau ne be galo toli. Mėnuliui pakilus aukštyn, horizontas, kaip atstumo atskaitos taškas, išnyksta, o praradus atskaitos sistemą, akis nebesugeba teisingai įvertinti jo disko dydžio. Tad šia prasme teisingiau būtų klausti, ne kodėl Mėnulis atrodo didelis prie horizonto, o kodėl jis atrodo mažas, kai yra aukštai danguje.

Bibliografija

1. A. T. Young, *Understanding astronomical refraction, The Observatory* **126**, 2006, 82–115.
2. W. H. Lehn, S. van der Werf, *Atmospheric refraction: a history, Applied Optics* **44**, 2005, 5624–5636.
3. A. T. Young, *The sunset science. IV. Low altitude refraction, The Astronomical Journal* **127**, 2004, 3622–3637.
4. S. van der Werf, *Ray tracing and refraction in the modified US1976 atmosphere, Applied Optics* **42**, 2003, 354–366.
5. R. Penndorf, *Tables of the refractive index for standard air and the Rayleigh scattering coefficient for the spectral region between 0.2 and 20.0 μm and their application to atmospheric optics, Journal of the Optical Society of America* **47**, 1957, 176–182.
6. R. D. Sampson, E. P. Lozowski, A. E. Peterson, D. P. Hube, *Variability in the astronomical refraction of the rising and setting Sun, Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **115**, 2003, 1256–1261.
7. D. Dravins, L. Lindegren, E. Mezey, A. T. Young, *Atmospheric intensity scintillation of stars. I. Statistical distributions and temporal properties, Publications of the Astronomical Society of the Pacific* **109**, 1997, 173–207.
8. M. Vollmer, *Mirrors in the air: mirages in nature and in the laboratory, Physics Education* **44**, 2009, 165–174.
9. A. P. French, *How far away is the horizon, American Journal of Physics* **50**, 1982, 795–799.
10. S. Y. van der Werf, *Noninverted images in inferior mirages, Applied Optics* **50**, 2011, F12–F15.
11. S. van der Werf, G. P. Können, W. H. Lehn, F. Steenhuisen, W. P. S. Davidson, *Gerrit de Veer's true and perfect description of the Novaya Zemlya effect, 24–27 January 1597, Applied Optics* **42**, 2003, 379–389.
12. W. H. Lehn, *The Novaya Zemlya effect: an arctic mirage, Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 776–781.
13. W. H. Lehn, *Skerrylike mirages and the discovery of Greenland, Applied Optics* **39**, 2000, 3612–3619.
14. A. T. Young, *Green flashes and mirages, Optics and Photonics News* **10**(3), 1999, 31–37.
15. A. T. Young, *Sunset science. III. Visual adaptation and green flashes, Journal of the Optical Society of America A* **17**, 2000, 2129–2139.
16. W. C. Haines, *The green flash observed October 16, 1929, at Little America by members of the Byrd Antarctic expedition, Monthly Weather Review* **59**, 1931, 117–118.
17. A. B. Fraser, *Simple solution for obtaining a temperature profile from the inferior mirage, Applied Optics* **18**, 1979, 1724–1731.
18. W. H. Lehn, T. L. Legal, *Long-range superior mirages, Applied Optics* **37**, 1998, 1489–1494.
19. G. R. Lockhead, M. L. Wolbarsht, *Toying with the moon illusion, Applied Optics* **30**, 1991, 3504–3507.

3. Debesys



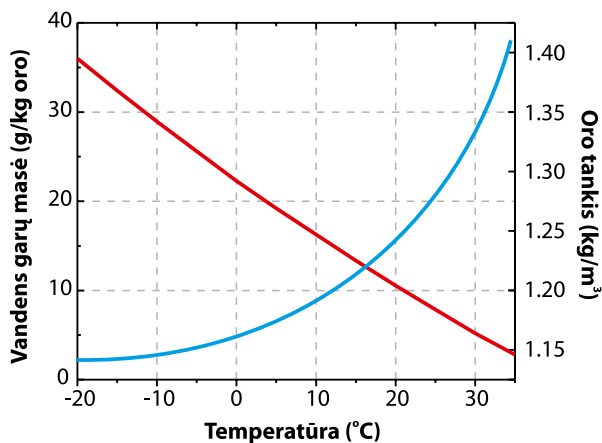
● *A. Dubiečio nuotr.*

Debesys yra be galo svarbūs mūsų atmosferos dariniai. Be debesų nebūtų nei lietaus, nei sniego, o dangus visą laiką būtų nuobodžiai žydras. Nebūtų ir daugybės įstabių atmosferos reiškinių: vaivorykščių, vainikų, halų ar žaibų. Nuo senų senovės debesys buvo filosofų, mąstytojų, menininkų, mokslininkų ir šiaip gamtos mylėtojų įkvėpimo šaltinis (A. Kunčius, *Debesų knyga*, Vilnius: Alma littera, 2006). Senovės graikai manė, kad jei būtų įmanoma racionaliai paaiškinti nuolat besikeičiančius debesis, visa gamta taptų pažini. Viduramžiais angelai ir šventieji buvo tapomi debesų fone, o patys debesys simbolizavo jų poilsio vietą. Dėl debesų mūsų dangus yra nepakartojamai gražus ir kaskart vis kitoks.

3.1 Debesų susidarymas

Debesys yra neatsiejama hidrologinio (vandens) ciklo dalis ir atlieka svarbų vaidmenį formuojant lokalius orus ir visą Žemės klimatą. Pagrindinis debesų komponentas yra vanduo (skysčio ar ledo būsenos), o vandens garai, kaip žinoma, yra dujos, kurios sąveikaudamos su Saulės spinduliuote kuria stiprų šiltnamio efektą. Be to, debesys praleidžia, atspindi ar sugeria Saulės spinduliuotę, taip pat sulauko ir grąžina atgal šiluminę žemės paviršiaus spinduliuotę. Tuo įsitikinti labai lengva netgi labai lokaliame mastelyje: giedros ir sausos naktys paprastai esti šaltos, o kai dangų dengia storas debesų sluoksnis, nakties temperatūra aukštesnė, temperatūros svyravimai per parą būna labai nedideli.

Debesys – tai atmosferoje sklindančios regimos įvairaus dydžio vandens lašelių ar ledo kristalų sankaupos. Debesų formavimasis susijęs su oro savybe sukaupti tam tikrą drėgmės (vandens garų) kiekį (1 pav.). Kuo šiltesnis oras, tuo daugiau drėgmės jis gali sukaupti. 1 m³



↑ 1 pav.
Vandens garų kiekio ore (mėlyna kreivė) ir oro tankio (raudona kreivė) priklausomybė nuo temperatūros, esant 1 atm slėgiui

išilusio iki 25 °C oro gali sukaupti iki 23 g vandens garų, tačiau, orui atvėsus iki 0 °C, vandens garų kiekis sumažėja iki 5 g. Tačiau šiltesnis oras kartu yra ir lengvesnis. Drėgmės prisotintam šiltam orui kylant aukštyn ir vėstant, perteklinė drėgmė kondensuojasi vandens lašelių, o temperatūrai nukritus dar labiau – ir ledo kristalų pavidalu, o ore sklindančios dulkelės atlieka kondensacijos centrų vaidmenį. Panašiai formuojasi rūkas, rasa ir šerkšnas. Dėl šių priežasčių kvėptelėjus į šaltą stiklą, jis iškart aprasoja. Debesys išnyksta, kai lokalus vandens garų slėgis nutolsta nuo prisotinimo būsenos, tuomet vandens lašeliai ar ledo kristalai išgaruoja.

Debesis sudarančių dalelių dydžiai gali būti labai įvairūs: vandens lašelių skersmuo kinta nuo keleto iki keliasdešimties mikrometrų, o ledo kristalai debesyse užauga net iki 100 μm ir dar didesni. Veikiamos sunkio jėgos, šios dalelės krinta žemyn, tačiau jų kritimą stabdo aerodinaminis pasipriešinimas ar šiluminis oro masių judėjimas.

Vandens lašelių kritimo greitis priklauso nuo jų dydžio: 1 μm dydžio vandens lašeliai krinta žemyn vidutiniu 1 mm/s greičiu, o 100 μm dydžio lašai – jau beveik 30 cm/s greičiu. Ledo kristalai, nors ir būdami didesni, krinta gerokai lėčiau dėl jų įgyjamos tam tikros orientacijos erdvėje ir aerodinaminio pasipriešinimo (žr. 6.4 posk.). Kai debesis sudarančios vandens lašai tampa gana dideli, jie įveikia oro pasipriešinimo jėgą ir pasiekia žemės paviršių kaip krituliai. Debesų šviesumas ir matomumas labai priklauso nuo to, kaip juos apšviečia Saulė, taip pat nuo juos sudarančių dalelių dydžio ir tankio. Netgi didingiausiai atrodantys kamuoliniai debesis yra labai efemeriški – dalelių tankis juose retai kada viršija 1000 vandens lašelių į cm^3 , o vanduo tokiaame debesyje teuzima vieną milijardinę (10^{-9}) dalį viso tūrio.

Debesų sandaros ypatumus, tankį ir išvaizdą lemia aukštis, kuriame jie susidaro. Aukštieji debesis sudaryti tik iš ledo kristalų, tuo tarpu pagrindinis viduriniojo aukšto ir žemųjų debesų sandaros komponentas yra vandens lašai, nors šiuose debesyse kartais aptinkama ir didelių ledo kristalų – dendritų (snaigių) ar ledokšnių. Išskirtiniai yra kamuoliniai lietaus debesis, kurių didžioji dalis sudaryta iš vandens lašelių, o aukštai iškylančios viršūnės – iš ledo kristalų, lygiai taip pat, kaip ir aukštieji debesis. Debesų tankis ir jų sandaros ypatumai lemia regimąją debesų spalvą, kuri taip pat gali padėti identifikuoti debesų tipą. Vis dėlto verta pastebėti, kad visi debesis dieną, kaip žinoma, yra balti (žr. 4.2 posk.), nors dėl skirtingo debesų apšviestumo ir kontrasto galime įžvelgti melsvus ir pilkus atspalvius. Debesis sudarančių dalelių dydis bei fizinė būseną (vanduo ar ledas) lemia jų optines savybes [1] ir optinių reiškinių, kurie gali būti juose matomi, įvairovę. Saulei ar Mėnuliui prašviečiant iš vandens lašelių sudarytus pusiau skaidrius debesis, galima pamatyti aureoles ir vainikus aplink šviesulius, pastebėti, kad arti šviesulių esantys debesų kraštai

ar net ištisi fragmentai netikėtai nusidažo ryškiomis spalvomis, o ledo kristalų dydis ir forma aukštuosiuose debesyse sukuria nuostabią halų įvairovę. Pažįstant debesis ir stebint jų kaitą, galima nesunkiai prognozuoti rytdienos orus. Apie tai byloja ir senovės lietuvių išmintis.

3.2 Debesų klasifikacija

Astronomai davė pavadinimus žvaigždynams beveik prieš du tūkstančius metų. XVIII a. viduryje garsus švedų gamtininkas Karlas Linėjus (*Carl Linnaeus*) sukūrė gyvosios gamtos klasifikacijos sistemą, kuri tapo šiuolaikinio gamtos pažinimo pagrindu, o štai debesis iki pat XIX a. pradžios net neturėjo visuotinai priimtų pavadinimų, nors jie buvo dažnai ir detalai vaizduojami meno kūriniuose [2]. Nuolatinė debesų formų ir dydžių kaita buvo pagrindinė priežastis, kodėl vyravo nuomonė, kad debesų neįmanoma nei kaip nors klasifikuoti, nei tiksliai mokslškai aprašyti.

1802 m. prancūzų gamtininkas Žanas Lamarkas (*Jean Baptiste Lamarck*) sugalvojo ir pasiūlė pirmąją debesų klasifikacijos sistemą. Tačiau ši sistema nesulaukė visuotinio pripažinimo, kadangi buvo paskelbta mažai žinomame mokslo leidinyje prancūzų kalba ir juolab kad Lamarko siūlomi debesų pavadinimai buvo prancūziški. Metais vėliau, 1803-iaisiais, anglų gamtininkas Lukas Hovardas (*Luke Howard*) sukūrė naują debesų klasifikacijos sistemą, kuri iš esmės buvo gana panaši į Ž. B. Lamarko. L. Hovardas išskyrė 4 pagrindines debesų morfologines formas, tačiau, remdamasis Linėjaus klasifikacijos principais, joms suteikė lotyniškus pavadinimus [3]. Sluoksninius debesis Hovardas pavadino *stratus* (lot. „sluoksnis“), kamuolinius debesis – *cumulus* (lot. „krūva“), lengvus debesis – *cirrus* (lot. „garbana“), o lietaus debesis –

Debesų grupė	Aukštis (km)	Debesų tipas	Lot. pavadinimas	Trumpinys
Apatiniojo aukšto	0–2	Sluoksniniai	Stratus	St
		Sluoksniniai kamuoliniai	Stratocumulus	Sc
		Sluoksniniai lietaus	Nimbostratus	Ns
Viduriniojo aukšto	2–7	Aukštieji sluoksniniai	Altostratus	As
		Aukštieji kamuoliniai	Alto cumulus	Ac
Vertikalios raidos	0,5–13	Kamuoliniai	Cumulus	Cu
		Kamuoliniai lietaus	Cumulonimbus	Cb
Viršutiniojo aukšto	5–13	Plunksniniai	Cirrus	Ci
		Plunksniniai sluoksniniai	Cirrostratus	Cs
		Plunksniniai kamuoliniai	Cirrocumulus	Cc

← 1 lentelė.
Debesų klasifikacija

nimbus (lot. „liūtis“). Bet kurie kiti debesys galėjo būti pavadinti apjungiant ar suderinant pagrindinių formų pavadinimus, pvz., *nimbostratus* reikštų sluoksninius lietaus debesis, o *cumulonimbus* – kamuolinius lietaus debesis ir t. t. L. Hovardo schemeje iš viso buvo 7 debesų tipai [4]. L. Hovardo debesų klasifikacijos schemą 1887 m. šiek tiek išplėtė ir patobulino meteorologai Hugas Aberkrombis (*Hugo Abercromby*) ir Ralfas Hildebrandsonas (*Ralph Hildebrandsson*). Jie sudarė Tarptautinį debesų atlasą su debesų nuotraukomis (anuomet tai buvo nepaprastai modernu), suskirstydami debesis į 4 grupes pagal aukštį: viršutiniojo aukšto (aukštuosius), viduriniojo aukšto, apatiniojo aukšto (žemuosius) ir vertikalios raidos. Ši debesų klasifikacijos sistema su labai nedideliais pakeitimais naudojama ir šiuo metu. Keturios pagrindinės debesų grupės vienija 10 pagrindinių debesų tipų, kurie apibendrinti 1 lentelėje.

Vis dėlto debesys būna tokie įvairūs, jog dažnai vien jų tipo nepakanka, kad būtų galima tiksliai apibūdinti debesį ar jų grupę. Todėl skiriama dar daugybė debesų rūšių, porūšių ir atmainų, patikslinančių jų morfologines formas ir išryškinančių ypatumus [5].

Šiuo metu skiriamos dar dvi ypatingos, aukštųjų, ne troposferoje susidarantių debesų grupės – poliariniai stratosferos (perlamutriniai) debesys ir poliariniai mezoferos (sidabriškieji) debesys, kurie atskirai plačiau aprašyti šios knygos 9 ir 10 skyriuose.

Debesų klasifikacija tapo pagrindu atsirasti meteorologijos mokslui. Šiek tiek ironiška, tačiau pačių debesų studijos šiuo metu tėra labai siaura disciplina tarp visų šiuolaikinės meteorologijos mokslo tyrinėjimo sričių. Vis dėlto stebėti debesis yra neparastai smagus užsiėmimas, kuris dažnai suteikia malonų mažyčio atradimo jausmą. Pažįstant debesis ir skiriant jų tipus, galima iš anksto numatyti, kokių optinių reiškinių danguje galima tikėtis, ir juos aptikti.

3.3 Žemieji debesys

Sluoksniniai (*stratus*) debesys sudaro žemą, tamsiai pilką vienalyčių debesų sluoksnį, kuris tarsi storas nepermatomas apklotas dengia visą dangų. Atsižvelgiant į oro temperatūrą (iš esmės į metų laiką), sluoksniniai debesys



gali būti sudaryti iš vandens lašelių arba ledo polikristalų. Šie debesys dažniausiai formuojasi garuojant priežeminiam rūko sluoksniui, todėl jie panašūs į kelių šimtų metrų aukštyje pakibusį rūką. Paprastai iš šių debesų krituliai nekrinta, nors retykais gali purkšti silpna dulksna ar iškristi kelios retos snagės. Lietuvoje ištisas dienas neišsisklaidantys sluoksniniai debesys labai dažni rudenį ir žiemą ir yra neatsiejama pilko peizažo detalė (2 pav.). Jie atneša niūrias ir tamsias dienas. Ir taip trumpos dienos tuomet rodosi dar trumpesnės.

Sluoksniniai kamuoliniai (*stratocumulus*) debesys – tai žemi balkšvos ar pilkos spalvos debesys, sudaryti iš viename sluoksnyje išsidėsčiusių pailgų ar beveik apvalių elementų. Sluoksninių kamuolinių debesų sluoksnis paprastai esti gana plonas, jo storis neviršija kelių šimtų metrų. Paprastai sluoksniniai kamuoliniai debesys sudaryti iš vandens lašelių, tačiau žiemą, esant labai šaltam orui, pagrindinis jų komponentas gali būti ir netaisyklingi ledo polikristalai. Trūkinėjant ištisiniam sluoksninių kamuolinių debesų sluoksniui, neretai atskiri jų elementai išsiriškia į tvarkingai išdėstytas juostas, o pro tarpus tarp jų matyti giedras dangus (3 pav.). Šių debesų elementai kur kas



↖ **2 pav.**

Neatsiejama vėlyvo rudens peizažo detalė – žemi ir niūrus sluoksniniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

↗ **3 pav.**

Sluoksniniai kamuoliniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

didesni nei sudarantys aukštuosius kamuolinius debesis. Sluoksniniai kamuoliniai debesys formuojasi labai įvairiai: žemėjant aukštiesiems kamuoliniams debesims, sklaidantis kamuoliniams lietaus debesims, artėjant ar tolstant atmosferos frontams. Stebint iš palydovų, nustatyta, kad šie debesys dengia pačius didžiausius Žemės paviršiaus plotus, todėl sluoksniniai kamuoliniai debesys atlieka labai svarbų vaidmenį formuojant šiluminę pusiausvyrą tarp Žemės paviršiaus ir atmosferos [6].

Sluoksniniai lietaus (*nimbostratus*) debesys – tai stori, beformiai, tolygiai pilki debesys, paprastai susidarantys storėjant aukštiesiems sluoksniniams debesims. Sluoksninių lietaus debesų storis gali siekti iki 2 km. Šiltesniu metu laiku šie debesys atneša įkryrų lietų, o žiemą – sniegą ar šlapdribą. Sluoksniniai lietaus debesys paprastai būna labai tankūs, neperšviečiami Saulės. Atslinkus jiems, dienos šviesa smarkiai nusilpsta, o naktys būna itin tamsios. Po sluoksniniais lietaus debesimis labai dažnai formuojasi greitai



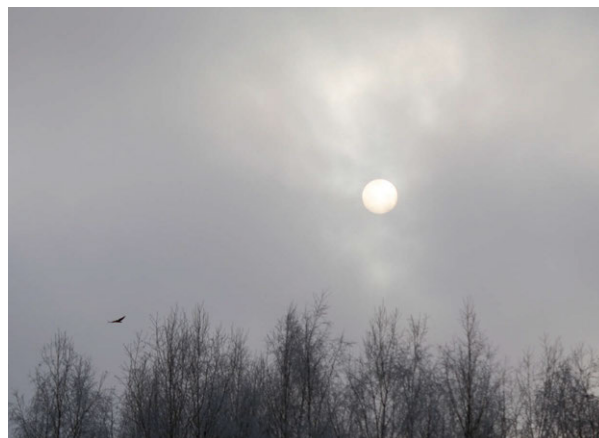
↑ 4 pav.

Sluoksniniai lietaus debesys. A. Dubiečio nuotr.

↗ 5 pav.

Pro nestorus sluoksninius debesis visada matomas Saulės diskas ryškiais kraštais.

A. Dubiečio nuotr.



slenkantis nedideli draikytieji sluoksniniai debesys (*stratus fractus*) – atskiri sluoksninių debesų fragmentai (4 pav.).

Apatiniojo aukšto debesys yra patys skurdžiausi optinių reiškinių požiūriu. Skiriamasis plonesnių ir skaidresnių apatiniojo aukšto sluoksninių debesų bruožas – pro juos šviečiant Saulei ar Mėnuliui, gerai matyti šviesulių diskai ryškiais kraštais [7] (5 pav.).

3.4 Viduriniojo aukšto debesys

Viduriniojo aukšto debesys formuojasi 2–7 km aukštyje ir paprastai yra sudaryti iš vandens lašų, o kai temperatūra labai žema, dalis lašų virsta netaisyklingais ledo kristalais. Aukštieji kamuoliniai (*altocumulus*) debesys – tai balti arba melsvai pilkšvi debesys, sudaryti iš nedidelių apskritų fragmentų (dažnai vadinamų dribsniais), neretai

nusidriekiančių juostomis ar bangomis [8] (6 pav.). Tankesnių aukštųjų kamuolinių debesų fragmentų apačia yra šiek tiek tamsesnė, o patys fragmentai kur kas didesni nei plunksninių kamuolinių debesų, bet mažesni nei atskirų kamuolinių ar sluoksninių kamuolinių debesų fragmentai. Kai aukštieji kamuoliniai debesys sudaryti iš labai mažų (paprastai mažesnių nei 20 μm skersmens) vandens lašelių, juose matoma irisacija (spalvinimasis), o jei visų vandens lašelių matmenys beveik vienodi, susidaro vainikai ir aureolės (žr. 7.1, 7.3, 7.4 posk.). Pastarosios ypač dažnai ir gerai matomos naktį, tokiems debesims supant Mėnulio diską per pilnatį. Kai kuriais atvejais aukštųjų kamuolinių debesų fragmentai ištįsta vertikaliai. Kaip žinoma, vertikali debesų raida byloja apie atsiradusią labai stiprią šiluminę konvekciją. Tokie aukštieji kamuoliniai debesys vadinami bokštiškaisiais (*altocumulus castellanus*). Atsiradę rytais, jie neretai yra po pusiaudienio atsirasiančių kamuolinių ar kamuolinių lietaus debesų su griaustiniu pranašai.

Aukštieji sluoksniniai (*altostratus*) debesys yra pilki ar melsvai pilki, palaipsniui ištisiniu šydu aptraukiantys visą dangų [9]. Aukštųjų sluoksninių debesų masyvai paprastai esti labai dideli, uždengiantys šimtų kvadratinių



kilometrų plotą. Vienas skiriamųjų aukštųjų sluoksnių debesų bruožų – pro juos dažnai matoma blausi (sakoma, pavandenijusi) Saulė (7 pav.). Kai Saulė žemai, pro tokius debesis matomas jos vaizdas išsilieja, virsdamas keistomis, tarsi akvarele nutapytomis juostomis. Šie debesis gali būti sudaryti tiek iš palyginti didelių (>20 μm skersmens) vandens lašų, tiek iš dar didesnių, netaisyklingų, žvaigždės formos ledo polikristalų (ypač viršutinė debesų dalis). Saulei prašviečiant pusiau skaidrius aukštuosius sluoksnius debesis, nesimato šešėlių. Tuomet, kai aukštųjų sluoksnių debesų sluoksnis yra plonas, o patys debesis sudaryti iš vienodo ar beveik vienodo dydžio mažų vandens lašelių (o tai nutinka retai), juose matomi spalvoti šviesulį supantys ratilai – vainikai. Storesniuose sluoksniuose debesyse matomos tik neryškios aureolės. Aukštųjų sluoksnių debesų storis gali siekti net kelis kilometrus. Šie debesis formuojasi artėjant atmosferos frontams, tad vasarą jie perspėja apie artėjantį lietu, o žiemą – apie sniegą. Žemėdami šie debesis patys neretai palaipsniui virsta sluoksniuais lietaus debesimis.

Kartais plonus aukštuosius sluoksnius debesis būna nesunku supainioti su storais plunksniniais sluoks-



6 pav.

Aukštieji kamuoliniai debesis. A. Dubiečio nuotr.

7 pav.

Aukštieji sluoksniuai debesis, pro kuriuos prasišviečia blausi Saulė. A. Dubiečio nuotr.

niniais debesimis. Skiriamasis pastarųjų debesų bruožas – juose dažnai matomas halas, ir jie yra kur kas skaidresni ir švieseni. Aukštieji kamuoliniai ir nedideli aukštieji sluoksniuai debesis Saulei tekant ar leidžiantis nusidažo pačiomis ryškiausiomis spalvomis (4 sk. 9 pav.).

3.5 Vertikalios raidos debesis

Vertikalios raidos debesis skiriasi nuo visų kitų tuo, kad jų vertikalūs matmuo yra palyginamas, o kartais ir didesnis už horizontalųjį. Vertikalios raidos debesis yra visiškai sluoksnių debesų priešingybė.

Kamuoliniai (*cumulus*) debesis – tai įvairaus dydžio debesis, išvaizda panašūs į dangumi plaukiančius vatos gumulus ar nemažus, kartais netaisyklingos formos dribsnius. Šiltuoju metų laiku kamuolinių debesų kraštai yra ryškiai apibrėžti, o jų pagrindas plokščias.



↑ **8 pav.**
Plokštieji kamuoliniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

↗ **9 pav.**
Storieji kamuoliniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

Rudenėjant kamuoliniai debesys žemėja ir tampa labiau draikyti. Žiemą kamuoliniai debesys yra gana reti svečiai mūsų padangėje. Saulės apšviesti kamuoliniai debesys yra balti ir kontrastingi giedro dangaus fone, o šešėlyje esantis jų pagrindas atrodo melšvas ar pilkas. Kamuoliniai debesys susidaro šilto ir drėgno oro masėms kylant aukštyn dėl šiluminės konvekcijos, todėl kartais jie vadinami konvekciniiais debesimis. Maždaug 1 km aukštyje oro temperatūrai nukritus žemiau rasos taško, vandens garai kondensuojasi į lašelius, iš kurių ir sudaryti kamuoliniai debesys. Apatinę rasos taško aukščio ribą žymi debesies pagrindas, o viršutinę – debesies viršūnė, kuri yra ties inversijos sluoksniu. Šios dvi sąlygos lemia debesies dydį ir tolesnį jo evoliucijos scenarijų.

Plokštieji kamuoliniai debesys (*cumulus humilis*, **8 pav.**) dažnai vadinami gero oro debesimis. Jie atsiranda danguje vėlyvą rytmetį ir išnyksta Saulei artėjant prie laidos, kai rimsta konvekciniai procesai. Plokščiųjų kamuolinių debesų vertikali raida nedidelė, o jų plotis paprastai



didesnis nei aukštis. Tačiau jei konvekcija labai stipri, o šiluminiai srautai dienos bėgyje aktyvėja, taikiai atrodantys plokštieji kamuoliniai debesys ima greitai didėti ir vertikaliai plėsdamiesi tampa panašūs į didžiules žiedinių kopūstų galvas. Tokie debesys vadinami storaisiais kamuoliniais debesimis (*cumulus congestus*, **9 pav.**).

Esant ypač stipriai vertikaliai raidai, formuojasi bokštiškieji kamuoliniai debesys (*cumulus castellanus*). Šių debesų viršūnės gali pasiekti 6 km aukštį. Nepaprastai įdomu stebėti greitą šių debesų evoliuciją. Juose galima išvėlgėti, kaip kyla tolimų įsivaizduojamų pilių bokštai, virsdami milžiniškais gyvūnais ar vaikystės pasakų herojais. Dažnai tokie debesys toliau augdami transformuojasi į didžiulius kamuolinius lietaus debesis.

Kamuoliniai lietaus (*cumulonimbus*) debesys (**10 pav.**) turi pačią didžiausią vertikalią raidą. Tai milžiniško dydžio debesys, kurių viršūnės iškyla į didesnę nei 10 km aukštį, beveik įsiremdamos į tropopauzę. Pagrindinis skiriamasis kamuolinių lietaus debesų bruožas yra jų viršūnė, kuri, kaip žinoma, būna sudaryta iš ledo kristalų ir panėšėja į gana storus plunksninius debesis. Šiose ledinėse kamuolinių lietaus debesų viršūnėse retkarčiais galima pamatyti net halų



↑ 10 pav.
Kamuoliniai lietaus debesys. A. Dubiečio nuotr.

fragmentus. Stiprūs troposferos vėjai ledinei viršūnei neretai suteikia priekalo formą. Tuomet šie debesys vadinami priekališkaisiais kamuoliniais lietaus debesimis (*cumulonimbus incus*). Žvelgiant iš toli, tokie debesys atrodo ištis didingai ir grėsmingai. Stipri konvekcija lemia greitą oro masių, vandens lašų ir ledo kristalų judėjimą, todėl atsiranda dideli nesubalansuoti elektros krūviai ir debesys įsielektrina. Žaibai ir perkūnija yra neatsiejamas kamuolinių lietaus debesų palydovas (plačiau apie tai 8 sk.). Tolstant kamuoliniams lietaus debesims ir dar nesibaigus lietaui, jau ima žvilgčioti saulė. Tuomet matomas vienas spalvingiausių optinių reiškinių – vaivorykštė.

3.6 Aukštieji debesys

Plunksniniai debesys yra aukščiausieji troposferos debesys. Dažnai danguje jie slenka visiškai kita kryptimi nei žemesni debesys. Ties pusiauju aukštieji debesys iškyla net į 12–15 km aukštį, o vidutinėse platumose jų aukštis svyruoja tarp 8 iki 13 km ir šiek tiek priklauso nuo metų laiko: žiemą plunksniniai debesys susidaro žemiau, o vasarą – aukščiau. Aukštieji debesys, skirtingai nei visi kiti, sudaryti tik iš ledo kristalų, todėl šie debesys yra labai šviesūs ir skaidrūs. Ledo kristaluose kaip mažose prizmėse baltos saulės šviesos spinduliai lūžta ir išskaidomi į spalvas, todėl juose matomi halai [10] (žr. 6 sk.). Kad šie aukšti ir skaidrūs debesys sudaryti iš ledo, dar prieš 2500 m. tai numatė



↑ **11 pav.**

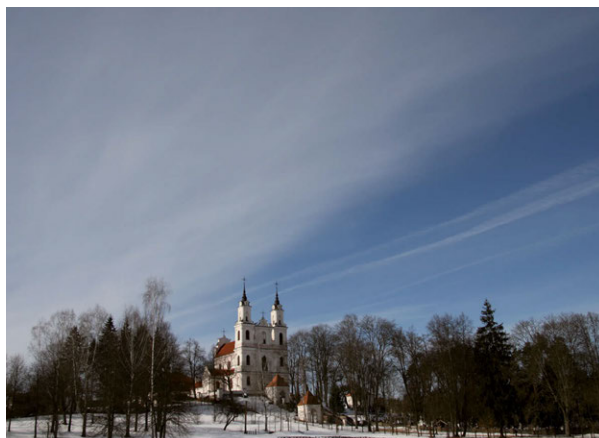
Plunksniniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

↗ **12 pav.**

Plunksniniai sluoksniniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

senovės graikų filosofas Anaksagoras, nors iš kuklių išlikusių jo užrašų nėra visiškai aišku, ar jis išskyrė tik plunksninius debesis, ar taip manė apie visus apskritai. Tačiau tiksliai aukštųjų debesų sandara buvo nustatyta tik XX a. antrojoje pusėje. Įvairiais vertinimais nustatyta, kad plunksniniai debesys dengia iki 20 % Žemės rutulio. Nors plunksninių debesų sluoksnis yra plonas, jie atlieka svarbų vaidmenį globalioje atmosferos cirkuliacijos sekoje, o plunksninių debesų sąlygojamas šiltnamio efektas iki šiol yra vienas mažiausiai ištirtų veiksnių, darančių įtaką visam Žemės klimatui [11].

Plunksniniai (*cirrus*) debesys – tai ploni, padriki debesys, savo išvaizda panašūs į lengvas plunksnas su dažnai nutįstančiomis ilgomis gijomis ar juostomis (**11 pav.**). Nutįsusios gijos – tai krituliai (žemyn krintantys ledo kristalai), kuriuos tolyn neša vėjas. Šie krituliai niekada nepasiekia žemės – ledo kristalai lydosi ir išgaruoja dideliame aukštyje. Plunksniniai debesys yra vieni gražiausių. Jų formos, tekstūra ir išsidėstymas danguje sukuria nuostabius, nie-



kada neatsikartojančius paveikslus [12]. Pavieniai dangumi praplaukiantys plunksniniai debesys simbolizuoja gerus ir malonius orus, o tankėjantys ir storėjantys – artėjančią orų kaitą.

Plunksniniai sluoksniniai (*cirrostratus*) debesys – tai ploni ir permatomi debesys, dažnai vientisu šydu užtraukiantys visą dangų (**12 pav.**). Kartais jie esti tokie ploni ir skaidrūs, kad tik juose susidarantis halas gali išduoti jų buvimą (**6 sk. 6 ir 9 pav.**). Storėjant plunksniniams sluoksniniams debesiems, jie vis labiau sklaido šviesą, todėl dangus tampa balzganas. Kai šie debesys pasirodo kartu su viduriniojo aukšto debesimis, tai dažnai iš anksto įspėja apie artėjančius atmosferos (dažniausiai šiltuosius) frontus ir greitą orų pasikeitimą. Plunksniniai sluoksniniai debesys paprastai formuojasi 5–6 km aukštyje, todėl juose dažnai gerai matomi aukščiau praskrendančių lėktuvų kondensacijos pėdsakų šešėliai (**4 sk. 16 pav.**).

Plunksniniai kamuoliniai (*cirrocumulus*) debesys – tai labai dinamiški smulkių, pusiau skaidrių (baltų) mažųjų apvalių elementų masyvai (**13 pav.**), pasižymintys greita ir įstabia formų kaita. Šie masyvai paprastai užima tik nedidelę dangaus skliauto dalį, neretai grupuojasi į juostas



13 pav.
Plunksniškai kamuoliniai debesys A. Dubiečio nuotr.



● 14 pav.

Stabilūs kondensacijos pėdsakai palaipsniui virsta plunksniniais debesimis. *A. Dubiečio nuotr.*

ar bangas. Tuo šie debesys labai panašūs į sidabriškuosius. Tik labai retais atvejais plunksniniai kamuoliniai debesys dengia visą dangų. Jie sudaryti iš labai greitai augančių ledo kristalų, o labai retais atvejais – iš peršaldytų vandens lašelių. Šiuose debesyse ledo kristalai auga labai greitai, jie įgyja netaisyklingas formas, todėl šiuose debesyse halai niekada nestebimi. Tačiau jaunuose, tik atsiradusiuose plunksniuose kamuoliniuose debesyse gerai matomi vainikai ar ryški irisacija (7 sk. 8 pav.). Nedideli plunksniniai kamuoliniai debesys kartais atsiranda ir pranyksta tiesiog akyse, o didesni ir tankesni žemėja ir palaipsniui virsta aukštaisiais kamuoliniais debesimis. Vakare atsirandantys plunksniniai kamuoliniai debesys dažniausiai gerų ir ramių orų nežada.



↑ 15 pav.
Kondensacijos pėdsako iškraipymai, esant dideliam viršutinės troposferos turbulentiškumui.
A. Dubiečio nuotr.

3.7 Kondensacijos pėdsakai

Aukštai skrendantys lėktuvai dažnai palieka danguje gerai matomus kondensacijos pėdsakus (angl. *condensation trail*, sutrumpintai *contrail*). Šie pėdsakai paprastai formuojasi ne žemesniame kaip 8 km aukštyje, kur oro temperatūra nukrinta žemiau $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kondensacijos pėdsakų gali atsirasti dėl dviejų priežasčių. Pirma, aviacinio kuro degimo produktuose esantiems karšties vandens garams maišantis su šaltu oru, jie ima kondensuotis ir tuoj pat užšąla, suformuodami lėktuvui iš paskos nusidriekiantį ledo kristalų šleifą. Antra, kondensacijos pėdsakų atsiranda dėl greitai skrendančio lėktuvo (ypač jo sparnų ar propelerio) sukeltų staigių slėgio pokyčių [13]. Už lėktuvo oras staiga išretėja, o sumažėjus slėgiui, staiga nukrinta temperatūra, ir vandens garai akimirksniu užšąla virsdami ledo kristalais. Jei aplinkinio oro drėgmė maža, atsiradę ledo kristalai labai greitai išgaruoja, o kondensacijos pėdsakai per keletą ar keliolika sekundžių išsisklaido. Tačiau jei aplinkinio oro drėgmė didelė, kondensacijos pėdsakai neišnyksta.

Tokie stabilūs kondensacijos pėdsakai palaipsniui virsta plunksniniais debesimis (14 pav.). Vietovėse, virš kurių vyksta intensyvus oro transporto eismas, daugybė stabilių kondensacijos pėdsakų išraižo visą dangų, dirbtiniais plunksniniais debesimis uždengdami didelius dangaus plotus. Pagrįstai manoma, kad stabilūs kondensacijos pėdsakai gali turėti nemenkos lokalsios įtakos vietos orams [14].

Kondensacijos pėdsakų judėjimas ir kaita daug pasako apie orų sąlygas viršutiniuose troposferos sluoksniuose. Stiprus turbulentiškumas lemia labai smarkius kondensacijos pėdsakų iškraipymus: tiesus pradinis kondensacijos pėdsakas neatpažįstamai transformuojasi per keliolika, o kartais net ir per keletą sekundžių, išpiešdamas danguje fantastines figūras (15 pav.). Kondensacijos pėdsakus sudarantys ledo kristalai dėl labai staigių temperatūros ir slėgio pokyčių auga labai greitai, todėl dažniausiai jie būna dideli ir netaisyklingų formų. Tačiau vis dėlto retsykiais ir kondensacijos pėdsakuose galima pastebėti halų fragmentus, silpną irisaciją ir pan. [15].



↑ **16 pav.**
Spinduliuotinis rūkas – giedrų ir vėsių vasaros
ir rudens naktų palydovas. A. Dubiečio nuotr.

3.8 Rūkas

Rūkas susidaro dėl tų pačių priežasčių kaip ir debesys, t. y. nukritus oro temperatūrai žemiau rasos taško. Šiltame ore sukaupia oro drėgmė jam vėstant kondensuojasi ant mažyčių ore sklندانčių dulkelių (kondensacijos centrų), virsdama mažais rūko lašeliais.

Rūko lašeliai yra kur kas mažesni už lietaus lašus. Vidutiniai rūko lašelių matmenys kinta nuo keleto iki kelių dešimčių mikrometrų, t. y. visai tokie pat, kaip ir sudarančių debesis vandens lašelių. Dėl mažų matmenų rūko

lašeliai neskuba kristi ant žemės ir ilgai sklendo ore.

Skiriami keli rūko tipai, kurie klasifikuojami pagal rūko susidarymo mechanizmą. Dažniausiai susidaro priežeminis arba vadinamasis spinduliuotinis (radiacinis) rūkas (angl. *radiation fog*), kuris formuojasi giedru oru vėlai vakare, naktį ar paryčiais, smarkiai atvėsus dirvos paviršiui, o kartu ir priežeminiam oro sluoksniui (**16 pav.**). Kadangi atvėsęs oras yra sunkesnis, spinduliuotinis rūkas formuojasi žemesnėse vietose ir slėniuose. Apšviestas tekančios Saulės spindulių, toks rūkas greitai kyla, garuoja ir išnyksta arba palaipsniui virsta žemų debesų sluoksniu (taip dažniausiai nutinka vėlyvą rudenį).

Kai šilto ir drėgno oro masė užslenka ant šalto (pvz., vėsaus vandens ar sausumos) paviršiaus, plonas ribinis

oro sluoksnis staiga atvėsta, o drėgmė kondensuojasi. Taip formuojasi vadinamasis advekcinis rūkas (angl. *advection fog*). Tokio tipo rūkas kyla virš šalto vandenynų paviršiaus, atslinkus įšilusioms oro masėms nuo sausumos. Advekcinis rūkas susidaro ir šaltų bei šiltų vandenyno srovių sankirtoje. Garsus vadinamasis angliškas rūkas taip pat yra advekcinis ir susidaro, kai Golfo srovės įšildytas oras patenka į daug vėsesnę pakrantę. Nedidelis advekcinis rūkas formuojasi ir ankstyvą pavasarį ant pavėsyje esančių dar nenutirpusių sniego plotų užslinkus Saulės įšildytam orui.

Tirštas rūkas smarkiai riboja matomumą ir yra vienas svarbiausių oro uostų darbą trikdančių veiksnių. Tačiau permatomas rūkas dovanoja daugybę puikių optinių reiškinių – žvelgiant pro jį į šviesulius ar dirbtinius šviesos šaltinius, matomos aureolės, o kartais ir spalvingi vanikai. Šviesos šaltinį užstojančių medžių šešėliai formuoja kontrastingus rūko spindulius. Saulės spinduliams apšviečiant rūką, sušvinta blyški rūko vaivorykštė – rūko juosta, o stebėtojo šešėlį apjuosia spalvoti ratilai – gloriija (5 sk. 11, 12 ir 13 pav.). Priežeminiam orui sluoksniui atvėsus žemiau 0 °C, rūko lašeliai nusėda ant paviršių ir užšąla, suformuodami šerkšną (6 sk. 18 pav.). Pats gražiausias šerkšnas susidaro šalia dar neužšalusių vandens telkinių, smarkiai atvėsus orui. Ypatingas rūkas formuojasi labai šaltu oru. Jis sudarytas iš smulkučių ledo kristalų, kurie žėri ir tviska sklaidydami ore. Ledinis rūkas kartais vadinamas deimantų dulkėmis (angl. *diamond dust*). Jose matomi patys ryškiausi, spalvingiausi ir įspūdingiausi halai (6.11 sk.).

3.9 Debesų keistenybės

Pažįstant debesų pasaulį, galima pastebėti ir atrasti daug įdomybių. Apskritai debesų formų įvairovė yra tokia



↑ 17 pav.
Šluotiškieji kamuoliniai debesys.
A. Dubiečio nuotr.

didžiulė, kad turbūt niekada nepavyktų pamatyti dviejų visiškai vienodų debesų. Dėl įvairiausių priežasčių debesys kartais įgauna keistus, stebėtinus ar net neįtikėtinus pavidalus. Pavyzdžiui, krituliai gali kristi iš visų debesų, netgi plunksninių. Tačiau dažniausiai iš aukštųjų debesų iškritę krituliai išgaruoja taip ir nepasiekę žemės paviršiaus (11 pav.). Iš bet kurių debesų nusidriekusios kritulių juostos vadinamos šluotomis, o patys debesys – šluotiškaisiais (*virga*, 17 pav.). Teko matyti, kaip šitaip per keliolika minučių išnyksta netgi gana dideli viduriniojo aukšto debesys.

Vieni įspūdingiausių yra lęšiškiosios (*lenticularis*) rūšies debesys. Aptakias lęšio formas dažniausiai įgauna aukštieji kamuoliniai (*altocumulus lenticularis*) arba plunksniniai kamuoliniai (*cirrocumulus lenticularis*) debesys



● 18 pav.
Lęšiškėji plunksniniai kamuoliniai debesys
virš Vilniaus. A. Dubiečio nuotr.



↑→ **19 pav.**
Padengtieji debesys.
A. Dubiečio nuotr.



Paprastai lėšiškieji aukštieji kamuoliniai debesys formuojasi ties kalnų viršūnėmis arba pavėjinėje kalnų pusėje, susidarius stovinčioms šiltesnio ir šaltesnio oro bangoms, vadinamoms Ly bangomis (angl. *Lee waves*).

Šie debesys susidaro ties nematomos oro bangos ketera, kur temperatūra yra žemiausia. Atsiradę šie debesys gana ilgai gali išbūti vienoje vietoje beveik nejudėdami. Lėšiškujų debesų forma yra tokia keista, jog nenuostabu, kad dažnai nedideli pavieniai lėšiškieji aukštieji kamuoliniai debesys gali būti palaikomi neatpažintais skraidančiais objektais. Lėšiškujų pavidalą gali įgauti ir kiti debesys, pvz., nedideli sluoksniniai kamuoliniai ar tiesiog atskiri kamuoliniai.

Nors Lietuvoje kalnų nėra, retkarčiais keisti lėšiškieji debesys gali papuošti ir mūsų padangę (**18 pav.**). Mūsų krašte tokie debesys formuojasi esant gana specifinėms atmosferos sąlygoms, dažniausiai ties didelių ciklonų frontais, 4–6 km aukštyje pučiant stipriems vėjams ir susidarant greitai bėgančioms lokalioms slėgio ir temperatūros ban-

goms. Arti Saulės esantys lėšiškieji debesys pasidabina neįtikėtinais ryškiomis spalvomis (**7 sk. 8 pav.**).

Į lėšiškuosius debesis savo išvaizda labai panašūs padengtieji (*pileus*) debesys, susidarantys ties greitai augančių storųjų ar bokštiškųjų kamuolinių debesų viršūnėmis (**19 pav.**). Šiai gražiai debesų atmainai būdinga labai greita dinamika – padengtieji debesys atsiranda ir išnyksta vos per kelias minutes. Jie atsiranda tuomet, kai ties kamuolinio debesies apačia vykstanti intensyvi oro srautų konvekcija įtraukia greta esančio santykinai sausesnio oro masę, kuri greitai kildama aukštyn atvėsta, drėgmė kondensuojasi ir įgauna plokščios, tarsi ant debesies viršūnės užmautos kepurės pavidalą. Kai oro srautų konvekciniai reiškiniai itin intensyvūs, susiformuoja net kelios viena virš kitos išsidėsčiusios kepurės (**19 pav.**).

Dauguma debesų formuojasi kylant šiltam orui į viršų ir kondensuojantis jame esančiai drėgmei, tačiau yra



↑ **20 pav.**
Tešmeniškieji debesys. A. Dubiečio nuotr.

debesų (tiksliau, jų atmaina), kurie susidaro visiškai atvirkščiai – leidžiantis drėgmės pritvinkusioms oro masėms. Šie debesys panašūs į didžiulį išsipūtusį karvės tešmenį ir vadinami tešmeniškaisiais (*mammatus*, **20 pav.**). Dažniausiai tešmeniškoji debesų atmaina formuojasi ties kamuolinių lietaus debesų šlaitais, jau praūžus lietuvi ir rimstant konvekciniam reiškiniams. Šių debesų atsiradimo priežastys yra sudėtingos, o detalūs jų formavimosi mechanizmai nėra iki galo žinomi [16]. Be to, labai keista ir ne visai aišku, kodėl tokie drėgmės pritvinkę „tešmenys“ nenukrinta žemyn. Apskritai tešmeniškoji debesų atmaina būdinga daugeliui debesų tipų, netgi plunksniniams.

Tačiau bene patys įspūdingiausi yra besileidžiančios Saulės apšviesti aukštieji kamuoliniai tešmeniškieji debesys (*altocumulus mammatus*), sukuriantys nepaprasto grožio peizažą ir paliekantys iš tiesų gilų įspūdį (**21 pav.**).

Vieni paslaptiniausių ir rečiausių yra ritininiai debesys (angl. *roll clouds*). Nors tokie debesys buvo registruoti įvairiose pasaulio vietose, dažniausiai jie susidaro virš tarp Australiją ir Papua Naująją Gvinėją skiriančios Karpentarijos įlankos [17]. Dėl savito oro masių judėjimo ten susidaro milžiniško dydžio – 1–2 km pločio, iki 1 km aukščio ir iki 100 km ilgio – ritininiai debesys. Ten šie debesys formuojasi dažniausiai brėkstant rytui, todėl šių debesų susidarymo reiškinys angliškai vadinamas Morning Glory ir galėtų būti verčiamas kaip ryto gloriija. Ritininiai debesys



● 21 pav.
Aukštieji kamuoliniai tešmeniškieji debesys.
R. Balčiūno nuotr.



↑ **22 pav.**
Ritininiai debesys Lietuvos padangėje.
T. Janušonio nuotr.

formuojasi susiduriant judančioms didelėms šilto ir šalto oro masėms, panašiai kaip susidaro priešpriešinė potvynio banga į vandenyną įtekančios didelės upės žiotyse. Judėdami šie debesys tarsi didžiulis ritinys rieda dangumi sukdamiesi apie horizontaliąją (ilgąją) ašį. Ištyrus ritininių debesų susidarymo ir judėjimo ypatumus paaiškėjo, kad šie debesys formuojasi dėl milžiniško slėgio šuolio oro masių susidūrimo riboje, o jų judėjimas yra identiškas negestančių paviršinių vandens bangų – solitonų, judėjimui [18]. Solitonai yra netiesinės bangos, o netiesiškumą galima suprasti kaip neadekvatų (smarkiai padidintą) aplinkos,

kurioje sklinda banga, atsaką į pačios bangos poveikį. Netiesiškumo dėka banga ir aplinka tampa tarpusavyje susijusios, taigi keisdama aplinką, kuria ji sklinda, banga kartu keičia ir save. Taip elgiasi ir ritininiai debesys, kurie yra puikus netiesinių bangų atmosferoje pavyzdys.

Pasirodo, kad, norint pamatyti ritininius debesys, nebūtina vykti į egzotiškus kraštus. Jie gali atsirasti artėjant dideliems audros debesims, kai susidaro stiprus slėgio ir temperatūros gradientai. Šiuo atveju ritininiai debesys formuojasi ant priekinio kamuolinių lietaus debesų fronto, po priekališkąją šių debesų dalimi (**22 pav.**). Tokių ritininių debesų matmenys nėra labai dideli, tačiau 10–15 m/s greičiu dangumi besiritantys debesys prieš artėjančią audrą yra ne mažiau įspūdingi ir net kelia pagarbą baimę.



← **23 pav.**
Kiaurieji debesys. A. Dubiečio nuotr.

↑ **24 pav.**
Didžiulė lėktuvo pramušta skylė ploname
aukštųjų kamuolinių debesų sluoksnyje.
G. Tamošausko nuotr.

Savotiškai įdomus debesų porūšis yra kiaurieji (*lacunosus*) debesys. Skylių debesyse gali atsirasti dėl įvairių priežasčių, bet dažniausiai tai nutinka dėl nedidelių aplinkos temperatūros trikdžių. Vieni gražiausių, įdomiausių ir dinamiškiausių kiaurųjų debesų yra sluoksniskosios rūšies (*stratiformis*) plunksniniai kamuoliniai debesys (*cirrocumulus stratiformis lacunosus*, **23 pav.**). Nedidelės netaisyklingų formų skylės šiuose debesyse atsiveria per minutę kitą. Kartais daugybė skylių atsiranda vienu metu. Tuomet toks debesis atrodo tarsi suvarpytas kulkų. Plečiantis skylėms debesis galiausiai tampa panašus į nudriskusią skraistę. Beje, panašių skylių pastebėta ir sidabriškųjų debesų masyve.

Labai retais atvejais debesyse gali atsiverti milžiniškos – kelių kilometrų skersmens skylės, gyvuojančios iki kelių valandų (**24 pav.**). Tokie debesys taip pat galėtų būti vadinami kiauraisiais, tačiau jie turi ir specialų pavadinimą –

pramuštųjų skylių arba kanalų debesys (angl. *hole punch* arba *canal clouds*) [19]. Iš esmės žodis „pramuštųjų“ reiškia, kad tas skylės debesyse kažkas pramuša. Tas kažkas – tai kylantys arba besileidžiantys lėktuvai. Kildami ar leiddamiesi lėktuvai dažnai kerta įvairius debesis ar jų sluoksnius, tačiau ilgai išliekančias dideles skylės jie pramuša tik esant specifinėms sąlygoms [20].

Skylių gali atsirasti tik viduriniojo aukšto debesyse, kurie sudaryti iš mažyčių peršaldyto vandens lašelių. Kai oras labai švarus, jame beveik nėra dulkių ar aerozolių dalelių, kurios atlieka kondensacijos centro vaidmenį. Susiklosčius tokioms sąlygoms, viduriniojo aukšto debesyse vandens lašeliai net ir esant gana žemai temperatūrai negali užšalti ir virsti ledo kristalais. Maždaug 5 km aukštyje peršaldytas vanduo užšąla tik temperatūrai nukritus žemiau $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Per tokį debesį praskridęs lėktuvas dėl iškart už jo susidarancios išretinto oro duobės papildomai

atšaldo nedidelį debesies tūrį, o lėktuvo sukeltas lokalus temperatūros sumažėjimas siekia 20–30 °C. Tarus, kad peršaldytų vandens lašelių temperatūra buvo apie -20 °C, lėktuvo sukulto temperatūros pokyčio visiškai pakanka, kad staiga atsirastų ledo kristalų. Tuomet jie patys tampa kondensacijos centrais. Prasideda griūtinis peršaldyto vandens užšalimo procesas. Susidarantys ledo kristalai labai greitai didėja ir veikiami sunkio jėgos pradeda sparčiai kristi žemyn palikdami debesyje didelę skylę. Žemyn krantinčių ledo kristalų šleifas kartais matomas kaip nedidelis sutankėjimas, nutišęs į apačią nuo skylės.

3.10 Debesys kitose planetose

Visos Saulės sistemos planetos, išskyrus Merkurijų, turi atmosferas. Planetų atmosferų ir jose susidarančių debesų cheminė sudėtis labai skiriasi, o palyginti su žemiškaisiais debesimis, yra egzotiška. Veneros atmosfera labai tanki, joje 97,5 % sudaro anglies dvideginis, o beveik 3,5 % azotas. Likusią nedidelę Veneros atmosferos tūrio dalį sudaro sieros dioksidas (SO_2), vandens garai ir dar keli kiti junginiai. Veneros paviršių nuolat dengia storas ir nepermatomas iš sieros dioksido kondensato sudarytų debesų sluoksnis. Sieros dioksidui reaguojant su vandens garais, susidaro sieros rūgštis (H_2SO_4). Tad Veneroje lyja sieros rūgšties lašais, kurie išgaruoja nepasiekę iki 460 °C įkaitusio paviršiaus. Vargu ar kas nors norėtų ir galėtų gyventi tokioje planetoje.

Iš anglies dvideginio sudaryta ir Marso atmosfera, tačiau ji pernelyg reta, kad ten susidarytų debesys⁷. Vienok Marse atrasta kitų įdomybių. Praėjusio amžiaus aštuntajame dešimtmetyje link Marso buvo pasiūsti kosminiai zondai „Viking 1“ ir „Viking 2“, kurie atliko pirmuosius išsamius mūsų kaimyninės planetos tyrimus. Iš zondu ant

Marso paviršiaus buvo nuleisti tyrimų moduliai, kurie, be daugybės kitų atradimų, virš jo paviršiaus aptiko susidariusį rūką. Visai neseniai, jau naujos misijos į Marsą metu, atrasta, kad rūkas sudarytas iš ledo, o ne iš užšalusio anglies dvideginio (CO_2) kristalų, kaip buvo manyta iki šiol [27].

Didžiųjų Saulės sistemos planetų atmosferose susidarantys debesys storu ir nepermatomu sluoksniu dengia šių planetų paviršių, o jų cheminė sudėtis yra egzotiška. Iš vandenilio ir helio sudarytoje Jupiterio atmosferoje susidaro amoniako, amoniako sulfido ir vandens garų debesys. Garsioji didžioji Jupiterio raudonoji dėmė, kuri yra maždaug Žemės planetos dydžio, – tai milžiniškas debesų sūkurys, kitaip tariant, ciklonas, kuris nenurimsta nuo pat atradimo XVII a. viduryje. Panašūs debesys susidaro ir pagal cheminę sudėtį panašioje Saturno atmosferoje. Ten taip pat siaučia milžiniški, tačiau daug trumpiau gyvuojantys ciklonai. Palyginti neseniai sužinota, kad Urano ir Neptūno debesys labiau panašūs į žemiškuosius. Jie sudaryti iš vandens lašų ar ledo, taip pat užšalusio metano.

Nepaprastai įdomus pasaulis visai neseniai atrastas didžiausiame Saturno palydove Titane, kuris yra pusantro karto didesnis už Mėnulį. 2005 m. kosminis zondas „Huygens“ nusileido ant Titano paviršiaus ir atrado, kad iš azoto sudarytoje jo atmosferoje vykstantys meteorologiniai ir hidrologiniai ciklai yra panašūs į vykstančius Žemėje [22]. Skirtumas tik tas, kad vandens vaidmenį Titane atlieka metanas. Ten plyti užšalusio metano ledynai, teka skysto metano upės ir tyvuliuoja ežerai, o atmosferoje, maždaug 10 km aukštyje, kondensuojantis metano garams, susidaro kamuoliniai debesys, iš kurių lyja metano lietus. Metano dujų kiekis Titano atmosferoje kinta 1,5–5 % ribose –

⁷ Tenka pastebėti, kad akiai nematomi debesys, sudaryti iš CO_2 kristalų, Marso atmosferoje atrasti visai neseniai (10.3 sk.).

beveik tiek pat, kiek ir Žemės atmosferoje esančių vandens garų kiekis (1 sk. **1 lentelė**). Titane metano ciklą lemia tai, kad jo paviršiaus temperatūra yra labai artima metano vadinamajam trigubam taškui, t. y. būsenai, kai cheminis junginys vienu metu gali egzistuoti dujų, skysčio ir ledo pavidalu. Vandens trigubas taškas yra 0 °C temperatūroje, tuo tarpu metano – net -179 °C. Taigi galima sakyti, kad Titane yra labai „šalta“ hidrologinio Žemės ciklo versija.

Kasmet atrandama vis daugiau besisukančių aplink tolimas žvaigždes planetų, kurios potencialiai tinkamos gyvybei atsirasti ir taip pat turi atmosferas, kuriose turėtų susidaryti debesys. Kaip atrodo tie nežemiški debesys, ar jie panašūs į mūsų, o gal gražesni ar keistesni, kol kas niekas nežino.

Bibliografija

1. A. A. Kokhanovsky, *Optical properties of terrestrial clouds*, *Earth-Science Reviews* **64**, 2004, 189–241.
2. S. D. Gedzelman, *Cloud classification before Luke Howard*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **70**, 1989, 381–395.

3. G. L. Stephens, *The useful pursuit of shadows*, *American Scientist* **91**, 2003, 442–449.
4. S. D. Gedzelman, *A cloud by any other name*, *Weatherwise* **56**(6), 2003, 24–28.
5. C. D. Ahrens, *Meteorology today*, Brooks/Cole, Cengage Learning, 2009.
6. R. Wood, *Stratocumulus clouds*, *Monthly Weather Review* **140**, 2012, 2373–2423.
7. J. R. Linsens and C. F. Bohren, *Appearance of the Sun and the Moon seen through clouds*, *Applied Optics* **33**, 1994, 4733–4740.
8. S. D. Gedzelman, *In praise of altocumulus*, *Weatherwise* **41**(3), 1998, 143–149.
9. S. D. Gedzelman, *Beautifying altostratus*, *Weatherwise* **64**(5), 2011, 32–41.
10. D. K. Lynch, *Cirrus, ice crystals and halos*, *Optics and Photonics News* **11**(1) 33–35, 2000.
11. K. N. Liou, *Influence of cirrus clouds on weather and climate processes: a global perspective*, *Monthly Weather Review* **114**, 1986, 1167–1199.
12. S. D. Gedzelman, *Angel hair cirrus*, *Weatherwise* **53**(4), 2000, 20–27.
13. A. Heymsfeld, D. Baumgardner, P. DeMott, P. Forster, K. Gierens, B. Kärcher, *Contrail microphysics*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **91**, 2010, 465–472.
14. B. Strauss, R. Meerkötter, B. Wissinger, P. Wendling, M. Hess, *On the regional climatic impact of contrails: microphysical and radiative properties of contrails and natural cirrus clouds*, *Annales Geophysicae* **15**, 1997, 1457–1467.
15. R. Sussmann, *Optical properties of contrail-induced cirrus: discussion of unusual halo phenomena*, *Applied Optics* **36**, 1997, 4195–4201.
16. D. M. Schultz, K. M. Kanak, J. M. Straka, R. J. Trapp, B. A. Gordon, D. S. Zrnić, G. H. Bryan, A. J. Durant, T. J. Garrett, P. M. Klein, D. K. Lilly, *The mysteries of Mammatus clouds: observations and formation mechanisms*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **63**, 2006, 2409–2435.
17. H. Clarke, R. K. Smith, D. G. Reid, *The Morning Glory of the Gulf of Carpentaria: an atmospheric undular bore*, *Monthly Weather Review* **109**, 1981, 1726–1750.
18. R. A. Goler, M. J. Reeder, *The generation of Morning Glory*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **61**, 2004, 1360–1376.
19. A. J. Heymsfeld, P. C. Kennedy, S. Massie, C. Schmitt, Z. Wang, S. Haimov, A. Rangno, *Aircraft-induced hole punch and canal clouds*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **91**, 2010, 753–766.
20. A. J. Heymsfeld, G. Thompson, H. Morrison, A. Bansemmer, R. M. Rasmussen, P. Minnis, Z. Wang, D. Zhang, *Formation and spread of aircraft-induced holes in clouds*, *Science* **333**, 2011, 77–81.
21. D. T. F. Möhlmann, M. Niemand V. Formisano, H. Savijärvi, P. Wolkenberg, *Fog phenomena on Mars*, *Planetary and Space Science* **57**, 2009, 1987–1992.
22. R. D. Lorenz, *The changing face of Titan*, *Physics Today* **61**(8), 2008, 34–39.

4. Dangaus spalvos ir šešėliai



• A. Dubiečio nuotr.

Klausimas, kodėl dangus yra žydras, nedavė žmoniui ramybės ištisus šimtmečius [1]. Neminint senovės graikų filosofų, pirmasis, kuris dangaus mėlynėje išžvelgė fundamentinę mokslinę problemą, buvo garsus italų menininkas, mokslininkas, mąstytojas ir išradėjas Leonardas da Vinčis (*Leonardo da Vinci*). Pro skvarbią menininko akį neprasprūdo, kaip, kopiant aukštin į kalnus, dangaus žydrinė darosi vis sodresnė ir tamsesnė, kaip melsvėja tolimi objektai, kaip jų spalvas bei šviesumą keičia rūkas ir galiausiai netoli horizonto esantis dangus tampa nebe žydras, o balkšvas. Apibendrinęs savo stebėjimus L. da Vinčis padarė išvadą, kad pats oras yra bespalvės dujos, o žydrą dangaus spalvą sąlygoja Saulės šviesos apšviesti mažyčiai ore sklindantys drėgmės lašeliai. Nors ši prielaida buvo klaidinga, vis dėlto ji turėjo tam tikrą fizikinį pagrindą.

Iki pat XIX a. pabaigos buvo manoma, kad žydra dangaus spalva atsiranda dėl atmosferoje esančių vandens garų. Iš tiesų nustatyta, kad vandens garai, vanduo ir ledas šiek tiek sugeria raudoną šviesą, bet yra visiškai skaidrūs mėlynai [2]. Deja, pastebėti šį selektyvios sugerties skirtumą galima tik esant gana storam vandens, ledo ar sniego sluoksniui. Pavyzdžiui, panirus keletą metrų po vandeniu, pasaulis iš tiesų tampa melsvas, saulės peršviečiami didžiuliai ledo luitai amžinuosiuose ledynuose nusidažo fantastiškais mėlynais atspalviais, o ryškiai šviečiant pavasario saulei, skaidrus ežerų vanduo atrodo tamsiai mėlynas. Tačiau pavertus visus atmosferoje esančius vandens garus vandeniu, tesusidarytų vos 1 cm storio vandens sluoksnis, kuris tikrai yra nepakankamas selektyviai sugerčiai pasireikšti.

Vis dėlto netgi vedami klaidingų prielaidų, to meto mokslininkai padarė daugybę atradimų, kurie buvo nudingi kuriant mus supančio pasaulio vaizdą ir aiškinant jo spalvas. XVI a. pradžioje Pjeras Bugeras (*Pierre Bouguer*) atrado šviesos silpimo atmosferoje dėsnį (dabar vadinamą Bugero-Lamberto-Byro dėsniumi), kuris padėjo pagrindus

šiuolaikinei atmosferos fotometrijai. P. Bugero amžininkas Horacijus de Sosuras (*Horace-Benedict de Saussure*) fotometrijos principus pritaikė dangaus spalvai įvertinti. Tam jis sukūrė specialų prietaisą cianometrą ir laipiodamas po kalnus išmatavo, kaip dangaus spalva keičiasi priklausomai nuo atmosferos slėgio. Prabėgus dar beveik šimtui metų, prancūzų mokslininkas, vėliau tapęs politiku Fransua Arago (*Francois Arago*) atrado, kad dangaus šviesa yra poliarizuota, o didžiausias jos poliarizacijos laipsnis stebimas 90° kampiniu atstumu nuo Saulės. Arčiausiai prie problemos sprendimo XIX a. viduryje priartėjo britų mokslininkas Džonas Tyndalis (*John Tyndall*), kuris, be kita ko, pirmasis eksperimentais įrodė, kad Žemės atmosfera išyla dėl šiltnamio efekto. Dž. Tyndalis atliko detalius šviesos sklaidos tyrimus, esant įvairiems sklaidančiųjų dalelių dydžiams, tačiau taip ir neaptiko tos paslaptingos substancijos, kuri nuspalvina dangų žydrai.

4.1 Giedro dangaus spalva

Raktą į ilgaamžės problemos sprendimą galiausiai surado Džonas Strutas (*John William Strutt*), žinomas kaip lordas Relėjus (*Rayleigh*), 1871 m. sukūręs matematinę elektromagnetinių bangų sklaidos teoriją [3]. Jis atrado, kad elektromagnetinės bangos (taigi ir šviesa), sklindamos bet kurioje skaidrioje medžiagoje, yra sklaidomos (t. y. pakeičia savo sklaidimo kryptį) dėl pačios medžiagos sandaros bei jos netolygumų. Atmosferoje šie netolygumai pasirodė esą oro molekulės, kurių dydis daug mažesnis už sklaidomos bangos ilgį. Įdomu tai, jog Relėjui pavyko gana tiksliai eksperimentiškai įvertinti ir pačių molekulių dydį. Tam jis ant vandens užlašino žinomą kiekį alyvos, kuri būdama lengvesnė tolygiai pasklido vandens paviršiuje. Tardamas, jog alyvos sluoksnio storis atitinka alyvos molekulės

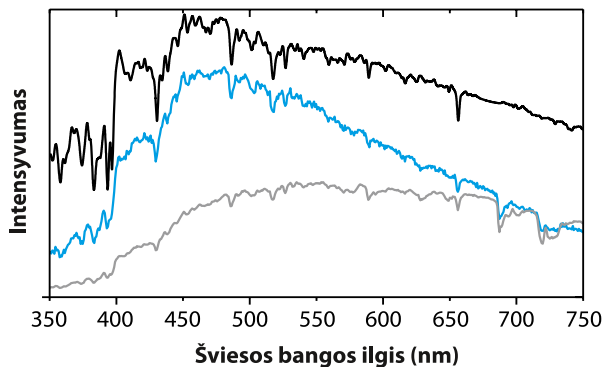
matmenis, ir žinodamas alyvos tūrį bei paviršiaus plotą, Relėjus apskaičiavo, kad alyvos molekulė yra šiek tiek didesnė nei 1 nm (10^{-9} m). O tai iš tiesų buvo labai arti tiesos. Relėjus taip pat atrado, kad įvairių spalvų šviesą atmosfera sklaido labai nevienodai: mėlyna šviesa sklaidoma kur kas smarkiau nei raudona, o sklaidos efektyvumas yra atvirkščiai proporcingas šviesos bangos ilgio ketvirtajam laipsniui⁸ [4]. Remiantis atvirkštine ketvirtojo laipsnio priklausomybe, nesunku apskaičiuoti, kad mėlyna (450 nm bangos ilgio) šviesa yra beveik 4 kartus stipriau sklaidoma nei raudona, kurios bangos ilgis yra 620 nm. Lygindami pačių kraštinių regimojo spektro spalvų, violetinės ($\lambda = 400$ nm) ir tamsiai raudonos ($\lambda = 650$ nm) šviesos sklaidos efektyvumą gautume, kad violetinė šviesa atmosferoje sklaidoma net 8 kartus stipriau.

Kaip ne kartą mokslo istorijoje yra nutikę, Relėjaus rezultatus mokslo visuomenė sutiko gana nepatikliai. Skaidrios dujos buvo laikomos „optiškai tuščiomis“, manant, kad jokia šviesos sklaida jose vykti negali. Paskutines abejonas 1913 m. išsklaidė prancūzų fizikas Žanas Kabanesas (*Jean Cabannes*), kuris eksperimentais įrodė, jog visiškai

grynų dujų molekulės iš tiesų sklaido šviesą. Už šiuos tyrimus jis buvo nominuotas Nobelio fizikos premijai, tačiau jos taip ir negavo. O lordas Relėjus 1904 m. pelnė Nobelio fizikos premiją, tačiau ne už dabar plačiai išgarsėjusius savo darbus, o už... argono dujų atradimą ir išgryninimą. Taigi galima sakyti, kad darbai, kuriais buvo atsakyta į tūkstančių metų senumo klausimą, taip ir nebuvo deramai įvertinti. Tačiau verta paminėti, kad lordo Relėjaus nuopelnai optikos srityje galiausiai buvo įamžinti atrastą sklaidą pavadinant jo vardu.

Vis dėlto gali kilti natūralus klausimas, kodėl giedras dangus yra žydras, o ne, pavyzdžiui, mėlynas ar violetinis? Juk mėlynos, juo labiau violetinės šviesos bangos ilgis yra dar mažesnis nei žydros, tad šių spalvų šviesa turėtų būti dar stipriau sklaidoma atmosferos. Atsakymas slypi pačios Saulės spinduliavimo spektre, kuris nėra vienodai intensyvus visiems matomos šviesos bangos ilgiams: žydros Saulės šviesos intensyvumas yra beveik du kartus didesnis nei mėlynos ar violetinės [5] (**1 pav.**). Saulės šviesos intensyvumo maksimumas yra tarp 450 nm ir 550 nm, taigi regimajame Saulės spektre vyrauja žydra ir žalia spalvos. Beje, dieną pati

⁸ Relėjaus sklaidos teorija yra labai sudėtinga, tačiau kodėl sklaida taip smarkiai priklauso nuo šviesos bangos ilgio, galima parodyti remiantis gana paprastais empiriniais samprotavimais. Tarkime, kad šviesą sklaido dalelė, kurios tūris V . Tuomet išsklaidytos šviesos intensyvumas I yra tam tikrų parametrų funkcija $I = f(V, r, \lambda, n_1, n_2, I_0)$, čia r yra atstumas iki sklaidančios dalelės, λ – bangos ilgis, n_1 ir n_2 yra atitinkamai dalelės ir aplinkos lūžio rodikliai, o I_0 – kritusios šviesos intensyvumas. Lūžio rodikliai, apibūrinantys šviesos greičio santykį vakuume ir medžiagoje, yra bedimensiniai dydžiai. Taigi galima laikyti, kad išsklaidytos šviesos intensyvumas yra keturių parametrų laipsnių funkcija: $I \sim V^x r^y \lambda^z I_0^t$. Kadangi tūris proporcingas ilgio kubui, jį galima užrašyti kaip $[L]^3$; r ir λ turi ilgio dimensijas, tad suprastinę intensyvumą abiejose pusėse ir sulyginę dimensijas gausime, kad $[L]^{3x}[L]^y[L]^z = [L]^0$. Belieka rasti laipsnių rodiklius x , y ir z . Išsklaidytos šviesos bangos amplitudė yra proporcinga sklaidančių dalelių skaičiui, taigi savo ruožtu ir jų užimamam tūriui. Kaip žinoma, intensyvumas lygus šviesos bangos amplitudės kvadratui, taigi $x = 2$. Kiekvieną molekulę galima laikyti dipoliu (teigiami ir neigiami krūviai erdvėje nesutampa), kuris spinduliuoja bangas visomis kryptimis. Paprasčiausiu atveju tokį dipolį galima laikyti taškiniu šaltiniu, spinduliuojančiu sferines bangas, kurių amplitudė tolstant nuo šaltinio mažėja kvadratiškai, taigi $y = -2$. Taigi liko vienas nežinomas z , kurį rasime įstatę gautas vertes: $6 - 2 + z = 0$, t. y. $z = -4$, arba $I \sim \lambda^{-4}$.



↑ 1 pav.
Saulės spinduliavimo už atmosferos ribų (juoda kreivė), giedro dangaus zenite (mėlyna kreivė) ir apsiniaukusio dangaus (pilka kreivė) spektrų palyginimas

Saulė mums atrodo šiek tiek gelsva kaip tik dėl žydrą šviesą stipriai sklaidančios Žemės atmosferos – baltos šviesos šaltinis pastebimai pagelsta nuslopinus (šiuo atveju pakeičiant išsklaidžius) mėlynuosius jo spektro komponentus. Taigi mūsų dangaus žydrinė yra ne kas kita, kaip Žemės atmosferos išsklaidyta balta Saulės šviesa, kurioje dėl Relėjaus sklaidos ryškiai dominuoja 450–480 nm bangos ilgio spektro komponentai (1 pav.). Žydras dangaus spalvos efektą papildomai sustiprina ir fotofizinis žmogaus akies jautrumas – ji yra daug jautresnė didesnio bangos ilgio matomai šviesai [6, 7].

Atidžiau patyrinėjus, tiek pačios Saulės, tiek dangaus (beje, ir giedro, ir apsiniaukusio) spektrus, juose galima išžvelgti daugybę siaurų sugerties linijų (nedidelių minimumų), kurias 1814 m. pirmasis aprašė vokiečių fizikas Jozefas Fraunhoferis (*Joseph von Fraunhofer*). Verta pažymėti, kad 12 metų anksčiau už J. Fraunhoferį tamsias linijas Saulės spektre pastebėjo anglų mokslininkas Viljamas Volastonas (*William Hyde Wollaston*), tačiau jis manė, kad linijos atsiranda dėl jo naudoto spektrinio prietaiso netobulumo. Šiuo

metu Saulės spinduliavimo spektre nustatyta tūkstančiai Fraunhoferio linijų, kurių pagalba tiksliai identifiukuota Saulės fotosferos (viršutinės atmosferos) cheminė sudėtis. Net mažos skyros spektruose, pateiktuose 1 pav., gerai matomos vandenilio Balmerio serijos H_{α} , H_{β} ir H_{γ} linijos atitinkamai ties 656 nm, 486 nm ir 434 nm bangos ilgiais, ir metalų – žalia geležies (527 nm) ir magnio (518 nm) bei geltona natrio (589 nm) linijos. Panašiu būdu išmatavus žvaigždžių spektrus, sužinoma šių tolimų saulių cheminė sudėtis. Atkreiptinas dėmesys, kad infraraudonojoje dangaus spektro dalyje matomos sugerties linijos, kurių nėra Saulės spinduliavimo spektre. Tai – Žemės atmosferoje esančių deguonies molekulių (680 nm) ir vandens garų (720–730 nm) sugerties.

Tariant, kad kiekviena šviesos banga atmosferoje išsklaidoma tik vieną kartą (tai vadinama vienkartinė sklaida), dangus būtų tolygiai žydras tiek zenite, tiek prie pat horizonto. Tačiau nesunku pastebėti, kad taip nėra – horizonto link dangaus žydrinė palaipsniui blunka, kol galiausiai prie pat horizonto dangus tampa balkšvas ar net visiškai baltas (2 pav.). Tapydamas peizažus, šią dangaus spalvų gamos kaitą pastebėjo ir aprašė L. da Vinčis. Tokią dangaus spalvų kaitą galima paaiškinti remiantis daugkartine šviesos sklaida, t. y. laikant, kad šviesos banga storame atmosferos sluoksnyje gali būti išsklaidyta (pakeisti savo sklaidimo kryptį) ne vieną kartą [8]. Iš tiesų, artėjant prie horizonto, smarkiai keičiasi regimasis (į žvilgsnio liniją patenkantis) šviesą sklaidančios atmosferos stulpo storis: įvertinta, kad ties pat horizontu jis yra 38 kartus didesnis nei zenite. Tad netoli horizonto, nepaisant stiprios sklaidos priklausomybės nuo šviesos bangos ilgio, visų spalvų saulės šviesa bus bent kartą išsklaidyta, o matoma dangaus spalva palei horizontą bus balta. Kita vertus, kuo labiau šviesa sklaidoma, tuo dangus tampa šviesesnis. Dėl šios priežasties palei pat horizontą giedras dangus yra šviesiausias [9].

Kažkuria prasme mums labai pasisekė, kad Žemės



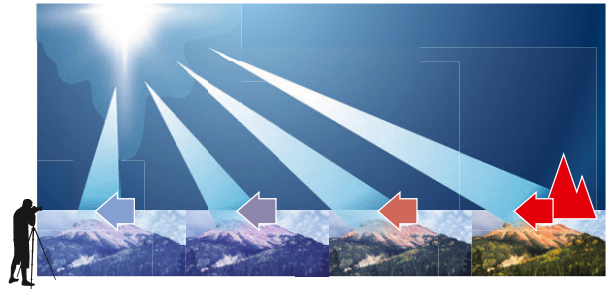
atmosferos tankis yra būtent toks, jog didžiojoje dangaus skliauto dalyje vyksta tik vienkartinė šviesos sklaida, todėl galime grožėtis dangaus žydryne. Yra įvertinta, kad jei Žemės atmosfera būtų 10 kartų tankesnė už esamą (tokia, pavyzdžiui, yra Saturno palydovo Titano atmosfera), zenite dangus dėl daugkartinės šviesos sklaidos būtų visiškai baltas ir bent triskart šviesesnis. Tuo nesunku įsitikinti ir esant tam tikroms oro sąlygoms – tvankiomis vasaros dienomis ar esant didelei oro taršai, šviesos sklaida smarkiai išauga, ir dangus tampa balzganas net pačiame zenite. Tik šiuo atveju padidėja ne atmosferos tankis, o šviesą papildomai sklaidančių dulkių, dūmų, vandens garų ar kitų aerozolių kiekiai. Jei Žemė iš viso neturėtų atmosferos (aišku, tada nebūtų ir mūsų), dangus būtų vienodai juodas

tiek dieną, tiek naktį. Toks dangus yra Mėnulyje. Ten tuo pat metu matosi ir Saulė, ir žvaigždės.

Baltą vidudienio saulės apšviestų debesų spalvą taip pat galima paaiškinti daugkartinė šviesos sklaida. Vidurdienį pavieniai debesys yra ne tik balti, bet ir daug šviesesni už jų fone esantį dangų (3 sk. 8 ir 9 pav.). Vykstant daugkartinėi šviesos sklaidai, šviesą sklaidančių dalelių savybės nebeturi didelės reikšmės, ir stebėtojas visada mato integrinę (suminę) šviesą, kurią sukuria daugelis šviesos sklaidos vyksmų. Kita vertus, vidutinis debesyse esančių vandens lašų

↑ 2 pav.

Dangaus spalva dieną. Vaizdumo dėlei, lyginant dangaus spalvą zenite ir prie horizonto, viršuje dešinėje pažymėtas kvadratas nuleistas žemyn. *A. Dubiečio nuotr.*



← **3 pav.**

Dėl oro švytėjimo vis toliau esančios kalnų keteros yra šviesesnės. *J. Galinio nuotr.*

↑ **4 pav.**

Tolimi objektai stebėtojui atrodo melsvesni ir šviesesni dėl oro švytėjimo, kuris užpildo žvilgsnio liniją tarp jo ir objekto. *J. Griciaus pieš.*

spindulys yra apie $10 \mu\text{m}$, t. y. kur kas didesnis už sklaidomos šviesos bangų ilgį. Relėjus teorija šviesos sklaidos nuo tokių objektų jau nebegali tinkamai aprašyti. Šiuo požiūriu šviesos sklaidos teoriją dar 1908 m. iš esmės išstobulino vokiečių fizikas Gustavas Mi (*Gustav Mie*), įskaitydamas šviesą sklaidančių dalelių fizines savybes – dydį, formą, skaidrumą ir pan. Jis parodė, kad jei sklaidančios dalelės yra didelės ir skaidrios, šviesa sklaidoma vienodai efektyviai, nepriklausomai nuo jos bangos ilgio, o didžiausias sklaidos efektyvumas yra žvelgiant šviesos šaltinio (šiuo atveju Saulės) kryptimi (1 sk. 4 pav.). Lengva pastebėti, kad palei Saulę esantys nestori debesys (ypač viduriniojo aukšto) akina beveik taip pat, kaip ir pati Saulė, o jai pasislėpus už storų kamuolinių debesų, jų kraštai pasipuošia akinamai ryškiais apvadais, kurie Saulei leidžiantis ima spindėti auksu.

4.2 Apsiniaukusio dangaus spalva

Dėl vienkartinės ir daugkartinės šviesos sklaidos atsirandančius spalvinius skirtumus gerai iliustruoja apsiniaukusio dangaus spalvos. Dažnai sakoma, kad apsiniau-

kęs dangus yra pilkas (3 sk. 2, 4 ir 7 pav.). Tačiau kas yra pilka spalva spalvinės gamos požiūriu ir ar iš tiesų apsiniaukęs dangus yra pilkas? Spektriniai matavimai atskleidė, kad apsiniaukusio dangaus, kuris mums gali atrodyti visą laiką vienodai pilkas, spektras gali šiek tiek keistis priklausomai nuo debesų tipo, jų sandaros ypatumų, aukščio bei sluoksnio storio, net nuo geofizinių vietovės ypatumų [10, 11].

Debesyse vykstanti šviesos sklaida yra daugkartinė, tad visų spalvų (balta) kritusi šviesa išsklaidoma vienodai, nepriklausomai iš ko – vandens lašų ar ledo kristalų – sudaryti debesys. Dėl to Saulės apšviesti pavieniai debesys giedrą dieną mums atrodo balti ir kontrastingi žydro dangaus fone (3 sk. 8 ir 9 pav.). Jei dangus visiškai apsiniaukęs ir jį dengia storas debesų sluoksnis, mus pasiekia tik daug kartų debesyse išsklaidyta ir dėl to smarkiai nusilpusi Saulės šviesa. Palyginus giedro ir apsiniaukusio dangaus spektrus, kurie pavaizduoti 1 pav., galima pastebėti, kad kai giedro dangaus spektre ryškiai dominuoja žydra (450–480 nm bangos ilgio) spalva, apsiniaukusio dangaus spektre dominuojančios spalvos nėra – visų spalvų spektrinis intensyvumas yra bemaž vienodas. Vadinasi, apsiniaukęs



dangus yra visiškai baltas, o pilkas jis mums atrodo dėl menko šviesumo. Tai patvirtina ir faktas, kad tiek pavienių Saulės apšviestų debesų, tiek visiškai apsiniaukusio dangaus spektrai yra beveik identiški.

4.3 Oro švytėjimas

Šviesos sklaidos efektai atmosferoje pasireiškia ir kitaip. Žvelgiant į tolį, galima pastebėti, kad netgi esant labai skaidriam orui ir geram matomumui, tolimi objektai atrodo kur kas šviesesni ir melsvesni nei esantys arčiau. To priežastis yra oro švytėjimas (angl. *airlight*), kuris ypač aiškiai matomas kalnuose, kur atstumai iki objektų gali būti labai dideli (3 pav.) [12]. Oro švytėjimas yra ne kas kita, o oro tarpo, esančio tarp stebėtojo ir objekto išsklaidyta Saulės šviesa ir kuri, patekusi į žvilgsnio liniją, sumuojasi su paties objekto atspindėta šviesa, kaip pavaizduota 4 pav.

Tad stebėtoją pasiekianti tolimo objekto šviesa turi du komponentus [13]. Pirmasis – tai paties objekto atspindėta šviesa. Atspindėtos šviesos intensyvumas tolydžiu mažėja objektui tolstant ir/arba didėjant tarp objekto ir stebėtojo



5 pav.

Oro švytėjimas vaivškia rudens dieną. A. Dubiečio nuotr.

6 pav.

Intensyvus oro švytėjimas mieste dėl oro taršos. A. Dubiečio nuotr.

esančios atmosferos storiui (optiniam tankiui). Intensyvumo nuostoliai dėl šviesos sugerties ar sklaidos apibūdinami kaip atmosferos skaidrumas ir vadinami atmosferos ekstinkcija. Taigi kuo toliau yra objektas ir kuo didesnė atmosferos ekstinkcija, tuo mažesnė tiesioginės objekto šviesos dalis pasiekia stebėtoją. Geriausias to pavyzdys – smarkai ribotas matomumas esant rūkui. Antrasis komponentas – tai oro švytėjimas. Skirtingai nei pirmuoju atveju, oro švytėjimo intensyvumas didėja didėjant atstumui iki objekto, nes vis daugiau išsklaidytos šviesos patenka į žvilgsnio liniją. Dėl oro švytėjimo toli esantys netgi tamsūs objektai ar peizažo detalės atrodo kur kas šviesesni (5 pav.).

Oro švytėjimą sustiprina ore sklindančių smulkių dulkelių, mažyčių vandens lašelių (rūko) ar mažyčių ledo kristalų (ramiomis ir saulėtomis žiemos dienomis), o mieste – ir įvairių teršalų bei aerozolių sąlygojama šviesos sklaida. Tačiau šiuo atveju sklaidančios dalelės yra didelės, tad jos, panašiai kaip ir debesys, sklaido visų spalvų



↑ 7 pav.
Besileidžiančios Saulės disko spalvų gradacija.
A. Dubiečio nuotr.

šviesą vienodai efektyviai, tad labiau nutolę objektai atrodo ne melsvesni, bet šviesesni ir pilkesni. Mieste dėl oro taršos, t. y. ore sklindančių aerozolių dalelių, oro švytėjimas yra ypač intensyvus žvelgiant Saulės kryptimi (6 pav.).

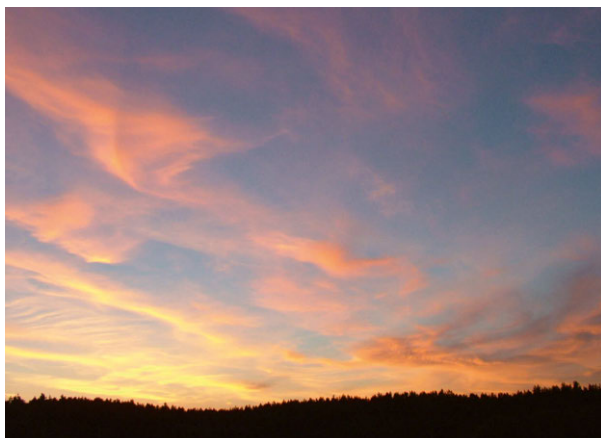
Oro švytėjimas smarkiai keičia ne tik objekto šviesumą, bet ir spalvą. Kaip jau aptarėme, atmosfera mėlyną šviesą sklaido kur kas stipriau nei raudoną, taigi dėl oro švytėjimo objektą matome kur kas mėlynesnį, nei jis yra iš tikrųjų. Šia prasme pati žydra dangaus spalva yra ne kas kita, kaip oro švytėjimas, kuris užpildo visą žvilgsnio liniją, kai žvelgiame į juodą kosminę erdvę. Tuo tarpu atmosferos ekstinkcija spalvas keičia priešingai – kuo didesnė ekstinkcija, tuo objektas mums atrodo raudonesnis, nes mėlynieji objekto šviesos komponentai išsklaidomi pakeliui. Tekančios ar besileidžiančios Saulės ar Mėnulio diskai mums atrodo rausvi ar net raudoni, nes būtent dėl didelės atmosferos ekstinkcijos ties horizontu visa mėlyna šviesa išsklaidoma nepasiekusi stebėtojo [14]. Prie pat horizonto regimojo oro stulpo storis keičiasi taip sparčiai, kad

galima stebėti, kaip keičiasi Saulės disko šviesumas ir jo spalva: viršutinė Saulės disko dalis yra labai šviesi ir balta, vidurinė – geltona, o apatinė, kur atmosferos ekstinkcija didžiausia, – raudona ir daug tamsesnė (7 pav.). Oro tarša smarkiai padidina atmosferos ekstinkciją: dūstančiuose nuo smogo didmiesčiuose patekanti ar besileidžianti tamsiai raudona Saulė yra kasdienis reiškinys. Tuo tarpu kai oras labai švarus ir skaidrus, netgi Saulei esant prie pat horizonto, jos šviesa tiesiog akina ir yra geltona.

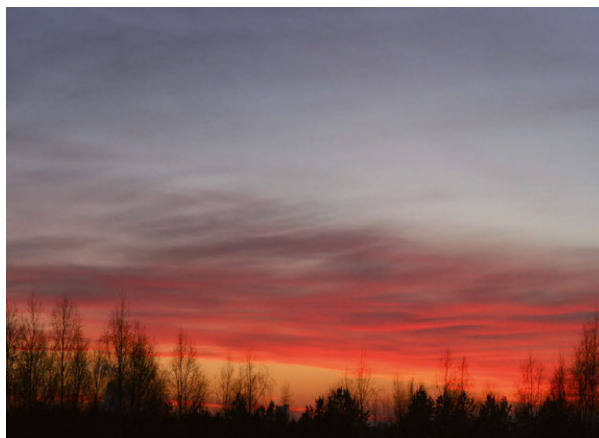
Antra vertus, Saulė pati yra šviesos šaltinis, todėl jos spindulių kelyje oro švytėjimo komponentas yra labai silpnas. Kitaip yra su tolimais objektais, kuriuos Saulė apšviečia. Kai oro švytėjimas nustelbia objekto atspindėtą Saulės šviesą, objektas (kad ir kokios spalvos jis būtų) įgauna melsvą atspalvį. Neseni eksperimentai parodė, kad žmogaus akis geba adaptuotis ir skirti spalvas netgi esant stipriam oro švytėjimui, kai tuo tarpu spektrometru registruojamas tolumo objekto atspalvis (spalvinis indeksas) yra vienareikšmiškai mėlynas [15]. Dėl to galima pajuokauti, kad dėl fiziologinių ypatumų žmogaus akis kartais mato tai, ko iš tikrųjų nėra.

4.4 Ryto ir vakaro dangaus spalvos

Kiekvienas saulėtekis ar saulėlydis yra unikalus spalvų gama ir jos kaita, tačiau šioje dinamiškoje spalvų kaitos paletėje galima išžvelgti ir tam tikrą dėsningumą. Tariant, kad šviesos sklaida yra vienintelė dangaus spalvų priežastis, Saulei leidžiantis ir po jos laidos dangaus spalva turėtų keistis. Saulei esant žemai prie horizonto ir mėlyną jos šviesą smarkiai išsklaidžius storam atmosferos stulpui, Saulės diskas nurausta (7 pav.). Tuo pat metu zenite (tiesiai virš galvos) esantis dangus iš žydrų turėtų tapti žalias, o jau Saulei



nusileidus, pagelsti ir galiausiai parausti. Tačiau lengva pastebėti, kad taip nėra. Tiek vidurdienį, tiek saulei leidžiantis, tiek ir nusileidus, dangus zenite visuomet išlieka žydras. Ši, atrodytu, paradoksali temstančio dangaus spalvos problema išspręsta tik praėjusio amžiaus viduryje, kai buvo atrasta, kad labai svarbų vaidmenį čia atlieka stratosferoje esantis ozono sluoksnis [16]. Tyrinėjant ozono dujų optines savybes, buvo atrasta, kad ozonas gerai sugeria raudoną šviesą. Kol Saulė dar gana aukštai, selektyvi ozono sugertis neatlieka jokio žymesnio vaidmens, kadangi Saulės šviesa praeina tik pro labai ploną ozono sluoksnį. Viskas pasikeičia Saulei artėjant prie laidos. Arti horizonto esančios Saulės spinduliai praeina ne tik pro storą regimąjį atmosferos sluoksnį, kuriame smarkiai sklaidoma mėlyna ir žydra šviesa, bet jau ir pro pastebimai storesnį ozono sluoksnį, kuriame sugeriama raudona šviesa. Kuo žemiau Saulė, tuo daugiau jos mėlynos šviesos išsklaido atmosfera, bet kartu tuo daugiau raudonos sugeria ozonas. Tad, žvelgiant į zenitą, išsklaidytos Saulės šviesos spektras yra tarsi „išlyginamas“, ir dangus virš galvos visą laiką išlieka žydras. Tuo tarpu dangus prie horizonto po saulėlydžio nurausta dėl šviesos sklaidos dulkelėse, aerozolių dalelėse ir molekulėse [17].



8 pav.

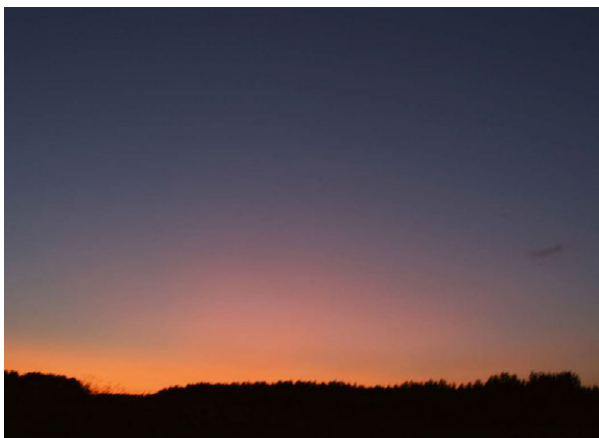
Dangaus ir debesų spalvos po Saulės laidos.
A. Dubiečio nuotr.

9 pav.

Viduriniojo aukšto debesys po Saulės laidos nusidažo ryškiu raudoniu. *A. Dubiečio nuotr.*

Skirtingai nei pats dangus, debesys, saulei tekant ar leidžiantis, smarkiai keičia spalvas (8 pav.). Saulei artėjant prie laidos, pirmiausia ima gelsti, po to ir rausti debesys, esantys priešingoje jos pusėje, nes būtent juos pirmuosius apšviečia pro vis storesnį atmosferos sluoksnį praeinanti ir dėl to vis labiau raustanti Saulės šviesa. Mėlyną ir žydrą Saulės šviesą pakeliui išsklaidžius atmosferai, iš pradžių debesys tampa gelsvi, po to oranžiniai ir raudoni, galiausiai, atsidūrę žemės šešėlyje, tampa pilkšvi. Stebint debesis Saulės pusėje, spalvų kaita vyksta labai panašiai, tačiau spalvų gama kur kas išpūdingesnė.

Pačiomis ryškiausiomis spalvomis po saulėlydžio švyti viduriniojo aukšto debesys - aukštieji kamuoliniai ir aukštieji sluoksniniai, kartais įgaudami bauginamą kraujo raudonio spalvą (9 pav.). Tuo tarpu žemi debesys labai greitai panryja į šešėlį, o patys aukščiausieji – plunksniniai debesys ima rausti vėliausiai, tačiau dažniausiai jie esti pernelyg



↑ 10 pav.

Intensyvios purpurinės sutemos Lietuvos padangėje po Saryčevo ugnikalnio išsiveržimo. A. Dubiečio nuotrauka, daryta 2009 m. liepos 27-osios vakare, 40 min. po Saulės laidos

reti, kad pasidabintų ryškiomis spalvomis. Saulei tekant, debesų spalvų kaita atsikartoja, tik jau atvirkštine tvarka.

4.5 Purpurinės sutemos

Labai retais atvejais po Saulės laidos galima išvysti neįprastos – purpurinės spalvos dangų. Tai vadinamosios purpurinės sutemos (angl. *purple light*). Purpurinę spalvą sudaro savotiškas raudonos ir žydros spalvų mišinys. Žydra spalva mus pasiekia išsklaidyta vis dar Saulės apšviečiamuose pačiuose aukščiausiuose atmosferos sluoksniuose, o raudona – dėl šviesos sklaidos stratosferoje [18]. Stratosfera yra reta, todėl įprastinėmis sąlygomis menkai sklaido šviesą, tad purpurinės saulėlydžio spalvos dažniausiai būna labai subtilios ir jas sunku pastebėti. Tačiau kai kada purpurinė spalva tampa labai ryški ir gerai matoma.

Ryškūs purpuriniai saulėlydžiai Lietuvoje gali būti

matomi po tolimų ugnikalnių išsiveržimų, kurie išmeta į stratosferą didelius dulkių, pelenų ir aerozolių (daugiausia sieros dioksido) kiekius. Tuomet šviesos sklaida stratosferoje smarkiai padidėja, ir po Saulės laidos giedras, jau temstantis dangus ima netikėtai švytėti. Purpurinės sutemos prasideda ryškiu gelsvu vakarinio dangaus skliauto švytėjimu, kuris ypač išryškėja prabėgus keliolikai minučių po Saulės laidos. Gelsvas švytėjimas gali būti toks intensyvus, kad kurį laiką peizažas atrodo tarsi užlietas nežemiškos matinės šviesos. Saulei vis giliau nyrant po horizontu, švytintis segmentas palaipsniui traukiasi, gelsva spalva virsta oranžine ir galiausiai purpurine, kuri gali būti matoma praėjus valandai ar net daugiau po Saulės laidos.

Pastarasis didelis ugnikalnio išsiveržimas įvyko 2009 m. birželio 12 d. Tuomet suaktyvėjo Saryčevo ugnikalnis tolimose Kurilų salose. Platus ugnikalnio išmestų dulkių, pelenų ir aerozolių šleifas pasklido stratosferoje ir nusidriekė virš viso šiaurinio pusrutulio. Ugnikalnio išsiveržimo aidas atsirito ir iki Lietuvos – dažną giedrą vakarą liepos–rugsėjo mėnesiais buvo galima grožėtis intensyviomis purpurinėmis sutemomis (10 pav.). Dėl to liepos 10-osios vakare buvo matomi ir labai aukšti plunksniniai debesys, kurie išryškėjo leidžiantis Saulei ir temstančio dangaus fone švytėjo beveik valandą laiko po jos laidos. Manoma, kad tokie plunksniniai debesys iškyla net iki 14 km aukščio ir susidaro vandens garams kristalizuojantis ant sieros rūgšties lašelių, kurie savo ruožtu atsiranda ugnikalnio išmestam sieros dioksidui reaguojant su vandens garais [19].

Tačiau ne visi dideli ugnikalnių išsiveržimai padovanoja gražias purpurines sutemas. To pavyzdys yra garsusis Eijafjalajokulio ugnikalnis Islandijoje, išsiveržęs 2010 m. kovo 20 d. Ugnikalnio išspjautos dulkės ir pelenai pasklido ir ilgai tvyrojo troposferoje (daugiausia 6–10 km aukštyje), o stratosferos taip ir nepasiekė. Ugnikalnio dulkių šleifas nusidriekė virš visos Europos, todėl beveik mėnesiui buvo



● 11 pav.
Prieblandos spinduliai. A. Dubiečio nuotr.



↑ **12 pav.**
Saulės spinduliai yra ne kas kita, kaip debesų
šešėliai danguje esant didelei sklaidai.
A. Dubiečio nuotr.

sutrikdytas lėktuvų eismas, atšaukta dauguma skrydžių, ir daugybė keliaujančių žmonių ilgam įstrigo oro uostuose. Šis dulkių debesis ilgokai kabojo ir virš Lietuvos, tačiau giedrais pavasario vakarais beveik nieko nepaprasto, išskyrus keletą kiek keistesnių nei įprasta spalvų saulėlydžių, nebuvo pastebėta.

Bene įspūdingiausias ir intensyviausias purpurines sutemas gali sukurti plonas retkarčiais stratosferoje susidaranti vadinamųjų perlamutrinių debesų šydas. Vienok Lietuvos padangėje šie debesis nesusidaro, o plačiau apie šiuos egzotiškus debesis skaitykite 9 skyriuje.

4.6 Prieblandos spinduliai ir debesų šešėliai

Šviesos sklaida atmosferoje sąlygoja ir dar vieną gražų reiškinį. Kai pro debesis švysčioja Saulė, neretai galima pasigrožėti šviesiais ir tamsiais dangaus fone išryškėjančiais spinduliais (**11 pav.**). Šie spinduliai paprastai vadinami tiesiog Saulės spinduliais, o Saulei besileidžiant ar jau nusileidus – prieblandos spinduliais (angl. *crepuscular rays*). Nuo senų senovės Saulės spinduliai buvo laikomi dieviškosios šviesos simboliu, įvairiose religijose vaizduojamų dievų galvas gaubė tokių spindulių vainikas. Panašiai vaizduojamas ir krikščionių dievas, o šventieji yra apšviesti šių spindulių šviesos. Tokie spinduliai pavaizduoti išeinantys



iš Dievo apvaizdos akies ant 1 JAV dolerio banknoto. Metaforiškai prieblandos spinduliai vadinami Budos pirštais arba vilties spinduliais. Saulės ir prieblandos spinduliai yra mėgstama detalė peizažų tapyboje, šiuolaikinėje fotografijoje ir kine. Šiuos spindulius labai mėgo tapyti ir garsus mūsų dailininkas M. K. Čiurlionis.

Saulei žvilgčiojant pro plyšius tarp debesų, matomi šviesūs spinduliai, o pavieniams debesims uždengus saulę, – tamsūs spinduliai. Tai danguje nutįsę debesų šešėliai. Ir vienu, ir kitu atveju, kad spinduliai ir šešėliai taptų matomi, atmosfera turi būti stipriai sklaidanti (pvz., prisotinta vandens garų, dulkių ar aerolių dalelių) [20]. Tuomet pats dangus dėl sklaidos tampa šviesesnis, jame smarkiai išryškėja šviesos ir šešėlių kontrastai. Saulės spinduliai yra ne kas kita, kaip debesų šešėliai danguje esant didelei sklaidai (12 pav.). Ir tamsūs, ir šviesūs spinduliai yra lygiagretūs, tačiau dėl perspektyvos efekto⁹ (12 sk. 1 ir 2 pav.) jie atrodo tarsi išeinantys iš vieno taško – Saulės.

⁹ Perspektyvos efektas atsiranda projektuojant trimatį erdvinį vaizdą ant kreivo dvimačio paviršiaus, šiuo atveju – dangaus sferos.

↖ **13 pav.**
Prieblandos antispinduliai priešingoje Saulei pusėje.
A. Dubiečio nuotr.

↑ **14 pav.**
Raudonas besileidžiančios Saulės spindulys,
besiskverbiantis pro plyšį debesų sluoksnyje.
A. Dubiečio nuotr.

Patys gražiausi ir efektingiausi prieblandos spinduliai sušvinta, kai Saulės šviesą užstoja kamuoliniai arba tankesni aukštieji kamuoliniai debesys. Atsižvelgiant į debesų išsidėstymą Saulės atžvilgiu, spinduliai gali būti nukreipti tiek į viršų, tiek į apačią [27]. Jei sklaida atmosferoje ištis didelė, o Saulė žemai, susiklosčius tinkamoms sąlygoms [22], prieblandos spinduliai gali nusidriekti per visą dangų ir būti matomi priešingoje nei Saulė pusėje (13 pav.). Tokie spinduliai vadinami prieblandos antispinduliais (angl. *antirepuscular rays*). Dėl perspektyvos efekto stebėtojui atrodo, kad prieblandos antispinduliai taip pat išeina iš vieno, priešingo Saulei (opozicinio) taško.

Įspūdingiausi yra pavieniai prieblandos spinduliai, Saulei tik nusileidus besiskverbiantys pro nedidelį plyšėlį dangų dengiančių debesų masyve. Tokie spinduliai sukuria fantastinį vaizdą, tarsi milžiniško nematomo švyturio spindulys, nušviečiantis tamsėjantį dangų (14 pav.).



↑ **15 pav.**
Rūko spinduliai. A. Dubiečio nuotr.

↗ **16 pav.**
Kondensacijos pėdsako šešėlis. A. Dubiečio nuotr.

Dar ryškesnius ir kontrastingesnius spindulius galima matyti Saulei, Mėnuliui ar net dirbtiniams šviesos šaltiniams šviečiant pro rūke skendinčių medžių lajas (**15 pav.**). Dėl artumo ir didelio kontrasto tokie spinduliai sukuria nepakartojamą šviesos ir šešėlių žaismą. Rūko spindulius dažnai imituoja filmų kūrėjai, norėdami suteikti filmuojamoms scenoms paslapties, dramatiškumo ar šiaip nekasdienio grožio.

Kai dangų dengia plonas permatomų plunksninių sluoksninių debesų šydas, ant jo krinta aukščiau praskrendančių lėktuvų kondensacijos pėdsakų šešėliai. Kadangi dangaus skliaute nėra jokio atskaitos taško, kad teisingai įvertintų atstumus iki objektų, ant žemės esančiam stebėtojuvi dažnai atrodo, kad kondensacijos pėdsakas yra kur kas arčiau žemės nei jo paties šešėlis. Iš tikrųjų yra priešingai – Saulė apšviečia aukštai esantį kondensacijos pėdsaką, kuris meta šešėlį ant žemiau esančio debesų sluoksnio. Retkarčiais pasitaiko, kad lėktuvo pėdsako šešėlis projektuojasi tiesiai ant lėktuvo skrydžio trajektorijos, tarsi milžiniška rodyklė žymėdamas lėktuvo kursą (**16 pav.**).

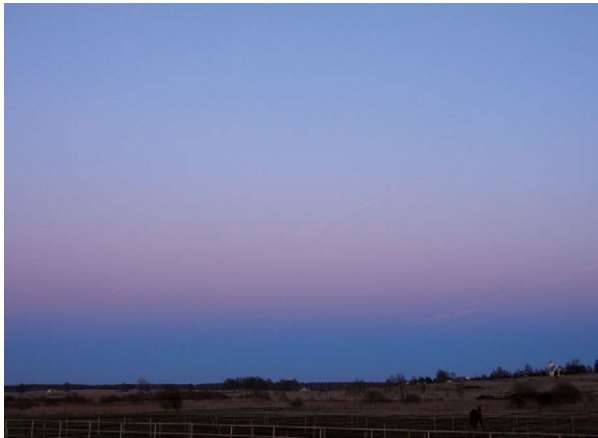


4.7 Žemės šešėlis

Giedrais vakarais, iškart po Saulės laidos, priešingoje pusėje, palei pat rytų horizontą, ima ryškėti tamsiai mėlyna juosta (**17 pav.**). Tai – Žemės šešėlis. Jis susidaro dėl to, kad ką tik nusileidusios Saulės spinduliai vis dar apšviečia didžiąją dangaus skliauto dalį, išskyrus patį rytinį horizontą, kuriuo Saulės šviesos užstoja Žemės rutulys.

Virš Žemės šešėlio nusidriekia plati rausva juosta, kartais vadinama Veneros juosta (angl. *belt of Venus*) ar antisutemų segmentu (angl. *anti-twilight arch*). Veneros juostos pavadinimas atkeliavo iš Viktorijos laikų Anglijos, tačiau ką jis reiškia, dabar sunku pasakyti, nes Venera toje dangaus pusėje po saulėlydžio niekada nematoma¹⁰. Tačiau vieną ar du vakarus per mėnesį kaip tik toje

¹⁰ Venera Vakarinė matoma po Saulės laidos pietvakarinėje dangaus pusėje, o Venera Aušrinė – prieš patekant Saulei pietrytinėje dangaus pusėje. Kadangi Venera yra vidinė planeta (arčiau Saulės nei Žemė), dangaus skliaute ji nenutolsta nuo Saulės daugiau kaip 48° kampiniu atstumu.



vietoje puikuojasi ką tik patekėjusi gelsvos ar net oranžinės spalvos Mėnulio pilnatis. Rausva Veneros juostos spalva atsiranda dėl to, kad jau nusileidusios Saulės šviesa, apšviečianti priešingoje pusėje esančią atmosferą, dėl sklaidos praeinanti storą atmosferos stulpą, smarkiai nurausta, t. y. visa mėlyna šviesa išsklaidoma iki tol. Saulei vis labiau nyrant už horizonto, rausva Veneros juostos spalva greitai, per 5–10 min., išblunka. Pats Žemės šešėlis greitai auga ir plečiasi, jo kontrastas mažėja, o pats kraštas tampa vis labiau neryškus. Galiausiai po keliolikos minučių Žemės šešėlis visiškai susilieja su temstančiu dangumi. Lygiai taip pat, tik atvirkštine chronologija Žemės šešėlis matomas ir vakarinėje dangaus pusėje prieš Saulei patekant. Žemės šešėlis geriausiai matomas esant giedram ir labai skaidriam orui, kai horizonto neužstoja miškai, kalnai ar statiniai. Esant didelei šviesos sklaidai, kai dangus balzganas ar padūmavęs arba Saulei leidžiantis į debesis, Žemės šešėlis būna sunkiai įžiūrimas, o rausva Veneros juosta

¹¹ Albedu vadinamas nelygių paviršių atspindžio koeficientas (santykis tarp kritusios ir atspindėtos šviesos kiekio).



17 pav.
Žemės šešėlis. A. Dubiečio nuotr.

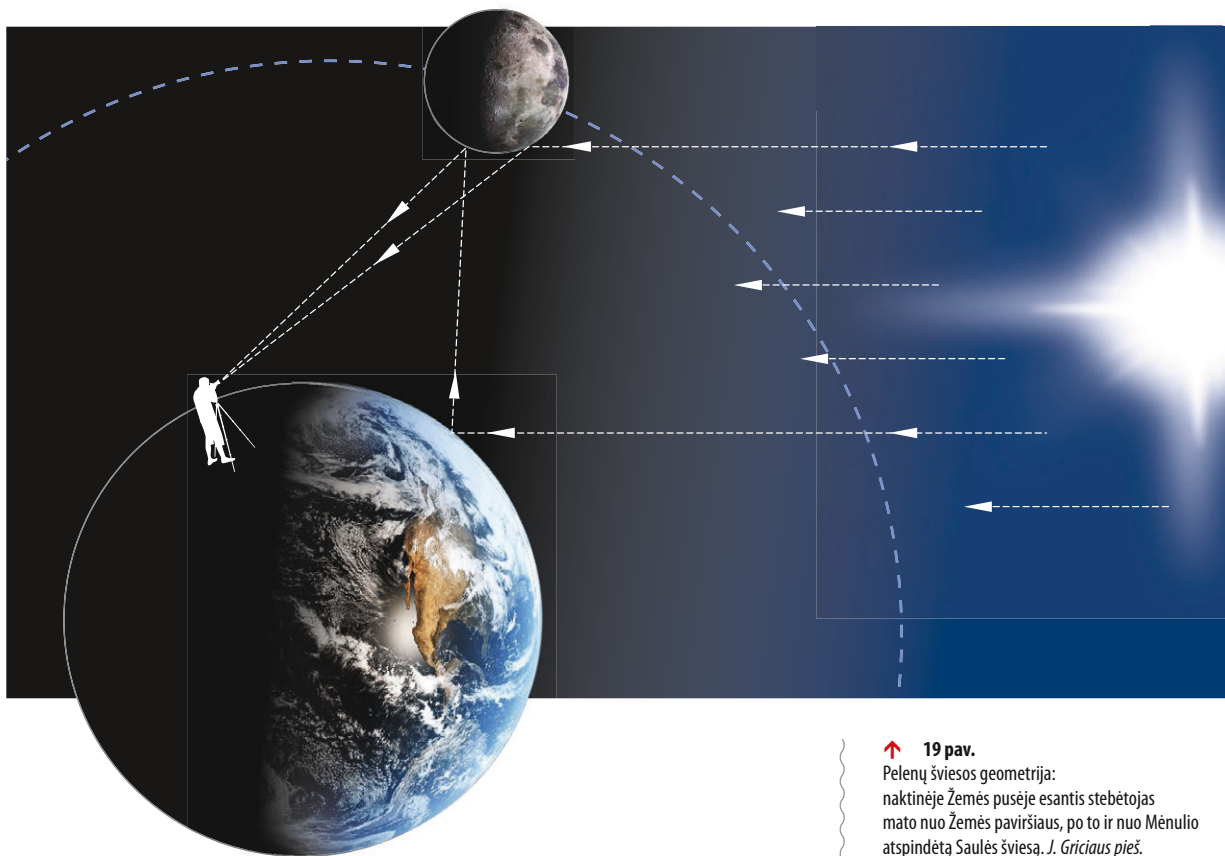
18 pav.
Pelenų šviesa. A. Dubiečio nuotr.

apskritai nematoma. Idealioms sąlygoms išvysti Žemės šešėlį yra aukštai kalnuose. Ten regimasis horizontas labai toli, oras labai retas ir skaidrus, tad Žemės šešėlio kraštas itin aštrus, o pats šešėlis – kontrastingas.

4.8 Pelenų šviesa

Žvelgiant į jauną Mėnulį, dažnai matyti, kad švyti ne tik pats Mėnulio pjautuvas, bet ir likusi Saulės neapšviesta Mėnulio disko dalis (**18 pav.**). Šis blyškus švytėjimas vadinamas pelenų šviesa (angl. *ash-grey light*). Jos priežastį dar 1508 m. teisingai nuspėjo jau ne kartą minėtas L. da Vincis. Savo užrašuose jis teigė, kad Mėnulio disko dalį, esančią Saulės šešėlyje, apšviečia nuo žemės paviršiaus atspindėta Saulės šviesa (**19 pav.**). Vėliau pats reiškiny buvo pavadintas Žemės švytėjimu (angl. *earthshine*).

Pelenų šviesos intensyvumas yra daugiau nei 1 000 kartų mažesnis nei paties Mėnulio pjautuvo spindesys,



↑ **19 pav.**

Pelenų šviesos geometrija: naktinėje Žemės pusėje esantis stebėtojas mato nuo Žemės paviršiaus, po to ir nuo Mėnulio atspindėtą Saulės šviesą. *J. Griciaus pieš.*

be to, jis gerokai kinta keičiantis Mėnulio fazei. Pelenų šviesa geriausiai matoma esant jaunam Mėnuliui, o jo fazei pilnėjant, pamažu ima blėsti, kol galiausiai tampa nebežiūrima. Viena priežasčių, kodėl taip yra, susijusi su akies adaptacija – tamsoje galima lengvai įžiūrėti ir labai silpną šviesos šaltinį, tačiau saulei tiesiogiai apšviečiant vis didesnę Mėnulio disko dalį, akinanti jo šviesa nebeleidžia akiai adaptuotis. Tačiau egzistuoja ir dvi fundamentinės pelenų šviesos (ar žemės švytėjimo) intensyvumo kitimo priežastys [23]. Pirmąją lemia besisukančios sistemos Saulė–Žemė–Mėnulis geometrija, kaip pavaizduota **19 pav.** Esant jaunam Mėnuliui, jį apšviečiantis Žemės paviršiaus

plotas yra didžiausias, tačiau Mėnulio fazei palaipsniui augant, jis mažėja, o kartu mažėja ir jo atspindėtos Žemės šviesos kiekis. Antrąją priežastį lemia geofiziniai ir klimato veiksniai, darantys įtaką Žemės paviršiaus atspindžiui (vadinamajam albedui)¹¹: debesuotumui, Saulės apšviečiamų vandenynų ir sausumos plotų santykiui, taip pat sausumos paviršiaus ypatumams. Akivaizdu, kad atspindys labai skirsis, jei dienos pusės Žemės paviršius bus padengtas sniegu arba ledu, vešlia augalija ar dykumos smėlynais. Apdorojus atspindėtą signalą fotometriškai, galima pastebėti, kad jo dydis smarkiai skirsis priklausomai nuo spektrinio diapazono, pavyzdžiui, augalija gerai

sugeria mėlyną šviesą, atspindėdama didelę dalį žalios, geltonos, raudonos ir net infraraudonosios šviesos, tuo tarpu sniegas ir ledas – atvirkščiai. Vandenynų atspindėta šviesa iš dalies poliarizuota, debesų ar dirvos atspindėta šviesa pasižymi dar kitomis optinėmis savybėmis ir t. t. Tad, registruojant pelenų šviesos intensyvumą, galima daug pasakyti apie atspindintį Žemės paviršių, o tam naudojant labai tikslus prietaisus, užregistruoti ir menkiausius šio atspindžio pokyčius. Įdomu tai, kad iš ilgalaikių pelenų šviesos pokyčių stebėjimų galima spręsti ir apie patį Žemės klimatą bei jo kaitą. Žemės klimatas ir jos albedas yra glaudžiai susiję tarpusavyje: kuo labiau Žemės paviršius atspindi saulės šviesą, tuo labiau jis vėsta, ir atvirkščiai, tad Žemės albedo matavimai globalių klimato pokyčių kontekste įgavo svarbią prasmę.

Pirmasis sisteminius pelenų šviesos intensyvumo matavimus 1920 m. pradėjo prancūzų astronomas André Danžonas (*Andre-Louis Danjon*), sukonstravęs specialų prietaisą, kuriuo buvo galima tuo pat metu registruoti šviesiosios ir tamsiosios Mėnulio disko dalies šviesumą. Būtent A. Danžonas pirmasis ir pastebėjo, kad pelenų šviesos intensyvumas kinta ne tik dėl geometrinių stebėjimo sąlygų, bet ir dėl geofizinių veiksnių. Šiuo metu praktinės žinios ir metodai, sukaupti tiriant pelenų šviesą, imti taikyti astrobiologijoje, ieškant gyvybės požymių tolimese ekzoplanetose, kurių kiekvienais metais atrandama vis daugiau.

Bibliografija

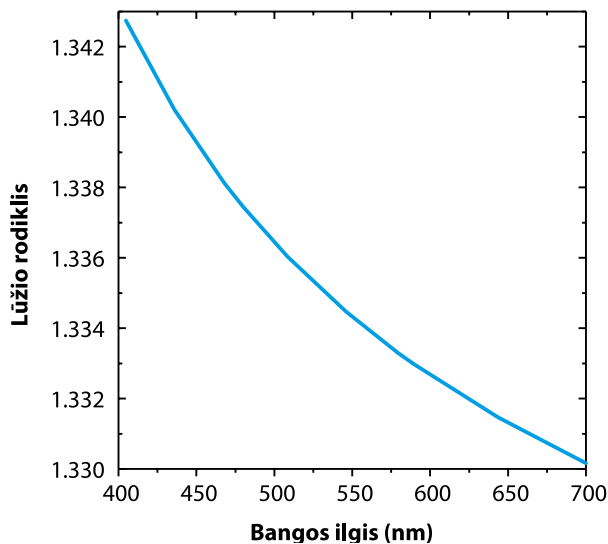
1. P. Lilienfeld, *A blue sky history*, *Optics and Photonics News* **15**(6), 2004, 32–39.
2. R. M. Pope, E. S. Fry, *Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements*, *Applied Optics* **36**, 1997, 8710–8723.

3. A. T. Young, *Rayleigh scattering*, *Physics Today* **35**(1), 1982, 42–48.
4. J. A. Adam, *A mathematical nature walk*, Princeton University Press, 2008.
5. G. Thuillier, M. Herse, P. C. Simon, D. Labs, H. Mandel, D. Gillotay, T. Foujols, *The visible solar spectral irradiance from 350 to 800 nm as measured by the SOLSPEC spectrometer during the ATLAS I mission*, *Solar Physics* **177**, 1998, 41–61.
6. G. S. Smith, *Human color vision and the unsaturated blue color of the daytime sky*, *American Journal of Physics* **73**, 2005, 590–597.
7. D. K. Lynch, B. H. Soffer, *On the solar spectrum and the color sensitivity of the eye*, *Optics and Photonics News* **10**(3), 1999, 28–30.
8. C. F. Bohren, *Multiple scattering and some of its observable consequences*, *American Journal of Physics* **55**, 1987, 524–533.
9. R. L. Lee Jr., *Horizon brightness revisited: measurements and a model of clear-sky radiances*, *Applied Optics* **33**, 1994, 4620–4628.
10. R. L. Lee Jr., J. Hernandez-Andrés, *Colors of the overcast sky*, *Applied Optics* **44**, 2005, 5712–5722.
11. R. L. Lee Jr., *Measuring overcast colors with all-sky imaging*, *Applied Optics* **47**, H106–H115, 2008.
12. D. K. Lynch, *On step brightness changes of distant mountain ridges and their perception*, *Applied Optics* **30**, 1991, 3508–3513.
13. D. K. Lynch, S. Mazuk, *On the colors of distant objects*, *Applied Optics* **44**, 2005, 5737–5745.
14. M. Vollmer, S. D. Gedzelman, *Colours of the Sun and Moon: the role of the optical air mass*, *European Journal of Physics* **27**, 2006, 299–309.
15. R. C. Henry, S. Mahadev, S. Urquijo, D. Chitwood, *Color perception through atmospheric haze*, *Journal of the Optical Society of America A* **17**, 2000, 831–835.
16. O. E. Hulburt, *Explanation of the brightness and color of the sky, particularly the twilight sky*, *Journal of the Optical Society of America* **43**, 1953, 113–118.
17. C. N. Adams, G. N. Plass, G. W. Kattawar, *The influence of ozone and aerosols on the brightness and color of the twilight sky*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **31**, 1974, 1662–1674.
18. R. L. Lee, Jr., J. Hernandez-Andrés, *Measuring and modeling twilight's purple light*, *Applied Optics* **42**, 2005, 445–457.
19. K. Sassen, G. G. Mace, J. Hallett, M. R. Poellot, *Corona-producing ice clouds: a case study of a cold mid-latitude cirrus layer*, *Applied Optics* **37**, 1998, 1477–1485.
20. D. K. Lynch, *Optics of sunbeams*, *Journal of the Optical Society of America A* **4**, 1987, 609–611.
21. S. D. Gedzelman, M. Vollmer, *Crepuscular rays: laboratory experiments and simulations*, *Applied Optics* **50**, 2011, F142–F151.
22. M. S. Van Den Broeke, W. H. Beasley, M. B. Richman, *The role of atmospheric conditions in determining intensity of crepuscular and anticrepuscular rays*, *Monthly Weather Review* **138**, 2010, 2883–2894.
23. P. Theill, C. Flynn, A. Mattingly, *Earthshine: not just for romantics*, *Astronomy & Geophysics* **49**, 2008, 3.15–3.20.

5. Vaivorykštė ir vandens lašų optika



● A. Dubiečio nuotr.



↑ 1 pav.
Vandens lūžio rodiklio priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio

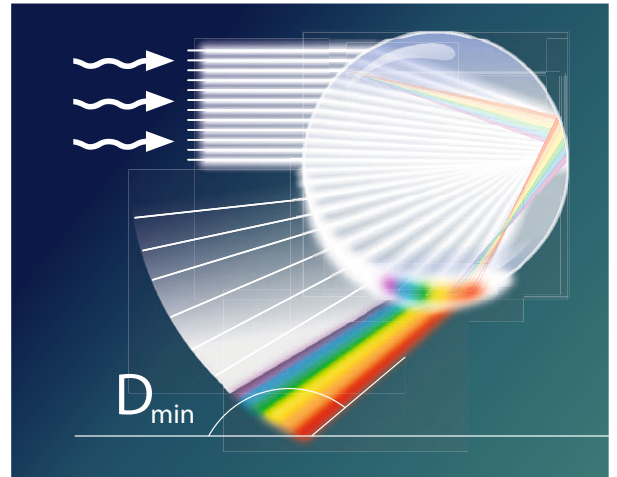
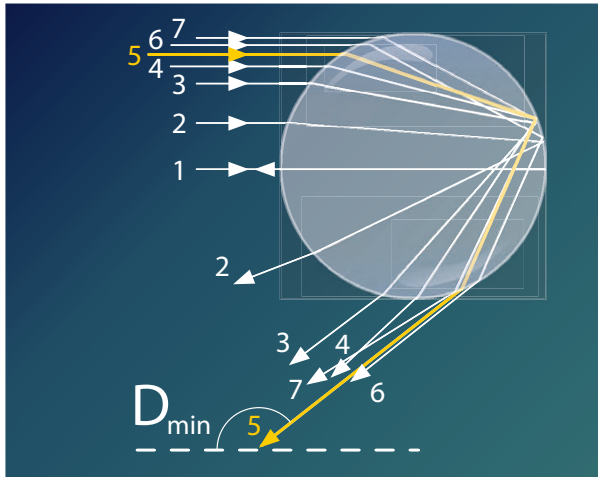
Vaivorykštė, be jokios abejonės, yra pats įspūdingiausias, spalvingiausias ir geriausiai žinomas optinis atmosferos reiškinys. Ji visuomet buvo laikoma geru dangaus ženklu, simbolizuojančiu grožį ir harmoniją. Nuo neatmenamų laikų vaivorykštė kėlė pasigėrėjimą ir žavėjo menininkus, mokslininkus, mistikus, dėmesingus aplinkos stebėtojus ar tiesiog atsitiktinius praeivius. Natūrali vaivorykštė yra gana retas optinis reiškinys. Būtina sąlyga jai atsirasti – lyjant lietuvi turi šviesti Saulė, o natūraliomis sąlygomis tai nutinka ne taip jau dažnai. Tik nedaug kas galėtų pasigirti matęs vaivorykštę daugiau nei 10 kartų per metus. Vaivorykštė greičiausiai buvo pirmasis žmogaus pastebėtas dangaus reiškinys, kuris paliko neišdildomą įspūdį: jos vaizdavimų aptinkama netgi priešistorinių kultūrų meniniame palikime – uolų ir akmens raiziniuose, kurių amžius siekia tūkstančius metų prieš Kristų [1]. XIX a. pradžioje, formuojantis natūralistinei vaizduojamojo meno kryptčiai, vaivorykštė

bei kiti optiniai atmosferos reiškiniai tapo neatsiejama realistinių peizažų dalimi. Anuomet menininkai, kaip ir mokslininkai, buvo atidūs, vieni kitus papildantys aplinkos stebėtojai, o jų bendradarbiavimas buvo nepaprastai vaisingas. Meno kūriniuose neretai slypėjo preciziškai tiksli mokslinė informacija, kuri iki šiol neprarado mokslinės vertės. Istoriškai vaivorykštė atliko bene svarbiausią vaidmenį tiesiant tiltą tarp meno ir mokslo. Gaila, kad mūsų laikais tiesioginis mokslo ir meno ryšys yra smarkiai sunykęs.

5.1 Kaip susidaro vaivorykštės?

Vienas moderniosios atmosferos fizikos ir optikos pradininkų Viljamas Hempfris (*William Jackson Humphreys*) beveik prieš 70 metų taikliai pastebėjo, kad įvairiose knygose pateikiami vaivorykštės aprašymai, kurie labai gerai paaiškina tai, ko iš tiesų joje nėra, tačiau dažniausiai nutyli tai, ką iš tikrųjų vaivorykštės šviesoje matome. Vaivorykštės mįslę, pradėdamas Aristotelium, bandė įminti daugelis šviesiausių savo laikotarpio protų. Galiausiai tai pavyko žymiam prancūzų mąstytojui ir mokslininkui Renė Dekartui (*René Descartes*), kuris 1637 m. pirmasis mokslininkai paaiškino, kaip atsiranda vaivorykštė. Manoma, kad anuomet R. Dekartas jau žinojo olandų mokslininko V. Snelijaus beveik tuo pat metu atrastą šviesos spindulių lūžio dėsnį (2.1 posk.) ir pirmasis teisingai atsakė į klausimą, kas yra vaivorykštė ir iš kur ji atsiranda. R. Dekartas atskleidė, kad vaivorykštė – tai lietaus lašų viduje atspindėta ir dėl lūžio pakeitusi savo kryptį Saulės šviesa. Nors R. Dekartui nepavyko paaiškinti, kaip atsiranda vaivorykštės spalvos (deja, Dekarto vaivorykštė buvo balta), būtent jam priskiriamas geometrinės vaivorykštės teorijos sukūrimo nuopelnas.

Vaivorykštės spalvų atsiradimo priežastį prabėgus dar beveik 30 metų atskleidė garsus anglų mokslininkas



2 pav.

Kairėje – lygiagretaus šviesos spindulių pluošto sklaidimas vandens laše. Paryškintas spindulys „5“, kuris sklinda mažiausio atlenkimo kampu D_{\min} .
Dešinėje – mažiausio atlenkimo kampai skirtingų spalvų spinduliams. J. Griciaus pieš.

Isakas Niutonas (*Isaac Newton*). Visi gerai žino Niutono atrastą visuotinės traukos dėsnį, tačiau ne mažiau vertingi yra jo darbai optikos srityje. Eksperimentuodamas su stiklo prizme, Niutonas baltą Saulės šviesą išskaidė į spalvas. Šiuo eksperimentu Niutonas ne tik pademonstravo, jog balta šviesa turi visas regimojo spektro spalvas, bet ir tai, kad bet kurios skaidrios medžiagos lūžio rodiklis priklauso nuo šviesos spalvos (bangos ilgio). Vandens lūžio rodiklio priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio, vadinama dispersija, pavaizduota **1 pav.** [2]. Ši priklausomybė reiškia, kad skirtingos spalvos šviesos spinduliai vandenyje, kaip ir bet kurioje kitoje skaidrioje medžiagoje, dėl skirtingo lūžio rodiklio lūžta šiek tiek skirtingais kampais. Apvalus vandens lašas, aišku, nėra panašus į prizmę, šviesa jame sklinda kiek kitaip – net tik lūžta, bet ir atsispindi, tačiau būtent šis fundamentinis atradimas padėjo Niutonui atskleisti vaivorykštės spalvų paslaptį. Kaip kažkas yra taikliai pastebėjęs, Dekartas „pakabino“ vaivorykštę reikiamoje dangaus skliauto vietoje, o Niutonas ją „nuspalvino“. Iš esmės Niutonas atsakė į visus tuo metu rūpėjusius klausimus. Jis paaiškino, kodėl vaivorykštėje spalvos keičiasi nuo

violetinės lanko viduje iki raudonos jo išorėje ir kodėl dangaus skliauto dalis, kurią juosia vaivorykštės lankas, yra labai šviesi. Taip buvo sukurta geometrinė vaivorykštės teorija, kuri iki šiol puikuoja visuose vadovėliuose.

Norėdami perprasti vaivorykštės susidarymo principus, iš pradžių panagrinėkime, kaip vandens laše sklinda vienspalvis šviesos spindulys. Pataikęs į vandens lašą, dėl šviesos lūžio, kuris apibrėžiamas Sneliiaus dėsniu (2.1 posk.) šviesos spindulys jame lūžta, t. y. pakeičia kryptį, po to atsispindi nuo galinio vandens lašo paviršiaus ir, išeidamas iš vandens lašo laukan, dar kartą lūžta, kaip pavaizduota **2 pav.** Kadangi vandens lašas yra apvalus (sferinis), šviesos spindulio optinis kelias bei atlenkimo kampas jame priklauso nuo kritusio spindulio padėties lašo centro atžvilgiu. „1“ spindulys krinta tiesiai į lašo centrą, todėl atlenkiamas 180° kampų, t. y. tiesiai atgal. „2“ spindulys bus jau atlenkiamas



↑ **3 pav.**
Vaivorykštė rasos lašelyje, žvelgiant nefokusuotu žvilgsniu. A. Dubiečio nuotr.

mažesniu nei 180° kampū, „3“ – dar mažesniu ir t. t. Taigi kuo kritęs spindulys bus toliau nuo lašo centro, tuo mažesnis bus jo atlenkimo kampas. Tačiau, pasirodo, egzistuoja tam tikras minimalus (mažiausias) spindulio atlenkimo kampas D_{\min} pradinės spindulio krypties atžvilgiu. Paveiksle yra paryškintas „5“ spindulys, kuris sklinda mažiausio atlenkimo kampū. Šis spindulys vadinamas vaivorykštės spinduliu. Dar arčiau lašo krašto kritę spinduliai („6“ ir „7“) vėl bus atlenkiami truputį didesniu už D_{\min} kampū.

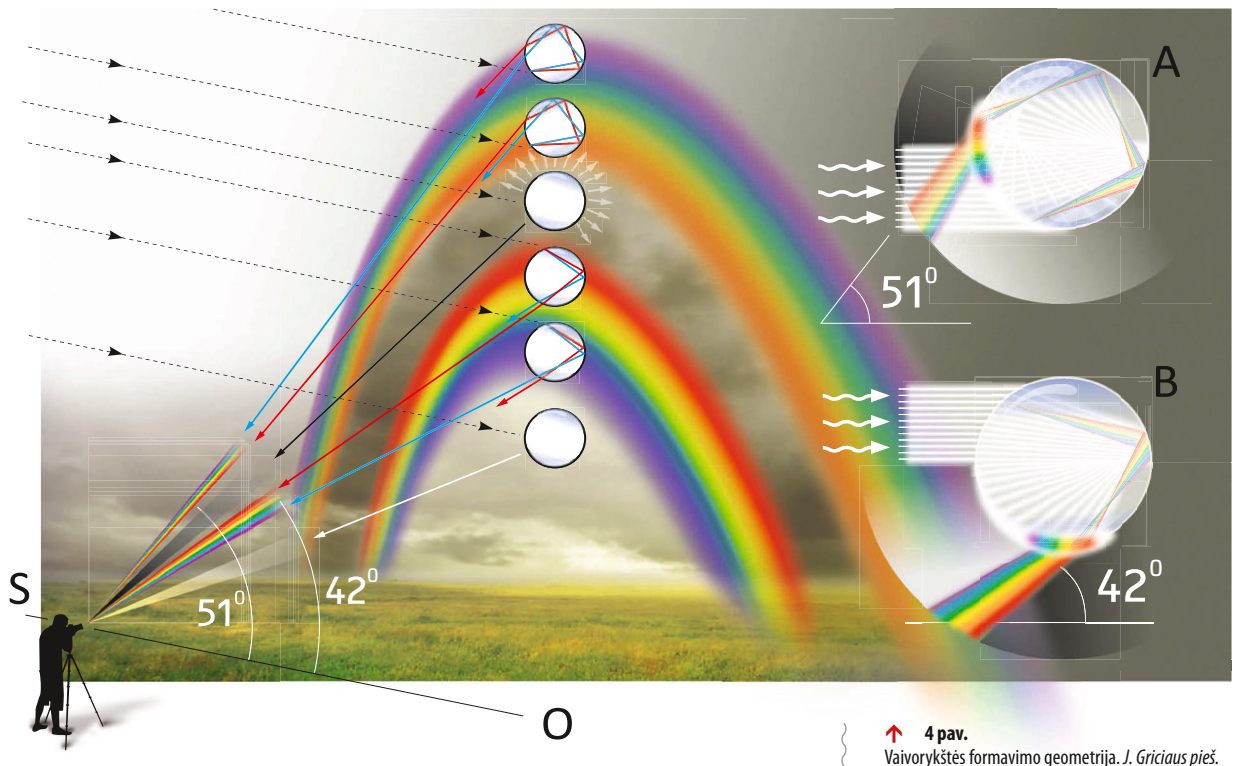
Kadangi Saulės spindulių pluoštas lygiagretus, vienu metu į lašą pataikys visi šviesos spinduliai iškart, tačiau vaivorykštės spalvas formuos tik tie šviesos spinduliai, kurie bus atlenkiami kampū D_{\min} . Minimalaus atlenkimo kampo dydį lemia tik vandens ir oro lūžio rodiklių santykis¹²[3]. Kadangi vandens lūžio rodiklis priklauso nuo šviesos bangos ilgio (1 pav.), skiriasi ir mažiausio atlenkimo kampas skirtingoms spalvoms (2 pav.). Į oro lūžio rodiklio, kuris artimas vienetai, priklausomybę nuo šviesos bangos ilgio (2 sk. 4 pav.), galima neatsižvelgti. Tad galima apskaičiuoti,

kad kraštinėms regimojo spektro spalvoms – raudonai (650 nm bangos ilgio) šviesai mažiausio atlenkimo kampas bus $137,7^\circ$, o violetinei (400 nm bangos ilgio) šviesai – $139,5^\circ$. Kadangi vandens laše šviesos spinduliai atlenkiami kampais, didesniais nei 90° , vadinasi, vaivorykštė matoma priešingoje pusėje nei Saulė. Dėl patogumo šiuos kampus galima perskaičiuoti priešingo Saulei (opozicinio) taško atžvilgiu: $180^\circ - 137,7^\circ = 42,3^\circ$ ir $180^\circ - 139,5^\circ = 40,5^\circ$. Visų kitų spalvų spindulių mažiausio atlenkimo kampai pakliūs į šį kampų intervalą, kuris ir lemia regimąjį kampinį vaivorykštės lanko plotį (t. y. kampinį atstumą tarp raudonojo ir violetinio vaivorykštės kraštų, kuris lygus $1,8^\circ$).

Kitas svarbus dalykas, lemiantis, kaip ir kodėl matome vaivorykštę, yra tai, kad akis mato tik tuos šviesos spindulius, kurie, išėję iš vandens lašo, pataiko tiesiai į ją. Dažnai sakoma, kad viename vandens laše galima išvysti galybę vaivorykščių [4]. Tame yra dalelė tiesos. Žvelgiant į Saulės apšviestą rasą tam tikru kampū, galima išvysti, kaip atskiri rasos lašeliai spindi ryškiais spalvomis, kurios keičiasi keičiant žiūrėjimo kryptį. Išfokusavus žvilgsnį, lašų spindesys pavirsta mažytėmis vaivorykštėmis (3 pav.). Taip yra todėl, kad nefokusuota akis geba surinkti ir tuos šviesos spindulius, kurie, esant fokusuotam žvilgsniui, į akį nepakliūva.

Tuo tarpu danguje matoma vaivorykštė atsiranda ne viename vandens laše. Tai reiškia, kad raudoną šviesą į stebėtojo akį nukreipia vieni lietaus lašai, geltoną – kiti, žalią – dar kiti ir t. t., taigi tie lašai, kurie atsiranda, kaip sakoma, reikiamoje vietoje ir reikiamu laiku. Apibendrinus gautą rezultatą daugybei vandens lašų ir daugybei

¹² Minimalaus atlenkimo kampą vandens lašuose galima apskaičiuoti pagal lygybę $\cos\left(\frac{D_{\min}}{2}\right) = \sqrt{\frac{1}{n^2} \left(\frac{4-n^2}{3}\right)}$, čia n – vandens lūžio rodiklis. Šį rezultatą pirmą kartą 1652 m. gavo vienas optikos mokslo pradininkų Ch. Huiugensas.



↑ 4 pav.
Vaivorykštės formavimo geometrija. J. Griciaus pieš.

į juos kritusių lygiagrečių baltos šviesos spindulių, vaivorykštė dangaus skliaute įgaus lanko, tiksliau – rato, kurio spindulys yra apytikriai 42° (skersmuo – 84°), pavidalą, o centras – priešingame Saulei (opoziciniame) taške (4 pav.). Tuo tarpu vandens lašai, atsidūrę žemiau vaivorykštės lanko, atlenkia šviesos spindulius didesniu nei minimaliu atlenkimo kampu. Taip jie įvairių spalvų spindulius atlenkia įvairiais kampais taip, kad iš daugybės tokių lašų atėjusių spindulių spalvos susimaišo, todėl žemiau spalvoto vaivorykštės lanko matome pašviesėjusį dangų. O šviesos spinduliai, kurie atlenkiami vandens lašuose, esančiuose virš vaivorykštės lanko, apskritai į stebėtojo akį nepakliūva, todėl iškart virš spalvingo vaivorykštės lanko matome tik tamsesnį dangų (4 pav.).

Taigi kiekvienas stebėtojas mato savo vaivorykštę, o jos regimasis kraštas, kad ir kaip arti jis atrodytų, niekada

nepasiekiamas. Visą vaivorykštės ratą galima pamatyti tik žvelgiant iš labai aukštai (pavyzdžiui, nuo aukšto kalno ar pro lėktuvo langą). Tuo tarpu ant Žemės esančiam stebėtojui didžiąją vaivorykštės rato dalį užstoja horizontas, tad geriausiu atveju matosi tik pusė jo ir tai tik tuomet, kai Saulė yra prie pat horizonto (jai tekant ar leidžiantis). Kuo aukščiau pakilusi Saulė, tuo mažesnė vaivorykštės lanko dalis matoma. Saulei pakilus daugiau nei 42° virš horizonto, visa vaivorykštė susidaro žemiau horizonto ir tampa nebeamatoma. Tad vasaros vidurdienį dairytis vaivorykštės nėra prasmės – ji visa bus pasislėpusi už horizonto.

Vaivorykštės šviesa yra poliarizuota [5], kadangi vandens laše vaivorykštės spalvas formuojantys šviesos spinduliai atspindimi kampu, kuris artimas vadinamajam



↑ 5 pav.
Dvigubos vaivorykštės fragmentas.
Dėl papildomo atspindžio vandens laše spalvos
antrinėje vaivorykštėje išsidėsto atvirkščia tvarka.
R. Kraulaidytės nuotr.

Briusterio (*Brewster*) kampui¹³. Tuo galima įsitikinti žvelgiant į vaivorykštę pro poliarizuoto stiklo saulės akinius: pasukus stiklą statmenai, vaivorykštė smarkiai nublinksta ar net visai išnyksta. Iš esmės bet kurio optinio atmosferos reiškinių švytėjimas poliarizuotas tuomet, kai vienas iš formuojančių veiksnių yra šviesos atspindys.

5.2 Antrinė ir aukštesnių eilių vaivorykštės

Ne visada, tačiau gana dažnai virš ryškaus vaivorykštės lanko galima pastebėti dar vieną, blankesnę, didesnio skersmens lanką (5 pav.). Tai – antrinė vaivorykštė. Ji susidaro šviesos spinduliui atspindėjus vandens lašo viduje du kartus, kaip pavaizduota 4 pav. Dėl papildomo antrojo atspindžio vandens lašo viduje mažiausio atlenkimo kampas sumažėja, o kartu apsiverčia spalvų išsidėstymo tvarka: an-

trinėje vaivorykštėje spalvos išsidėsto nuo raudonos lanko viduje iki violetinės išorėje. Mažiausio atlenkimo kampas esant papildomam atspindžiui yra $D_{\min} = 129^\circ$, todėl dangaus skliaute antrinės vaivorykštės lankas yra didesnis (jo kampinis spindulys yra $180^\circ - 129^\circ = 51^\circ$, o skersmuo – 102°) ir platesnis (kampinis plotis – $3,2^\circ$). Tačiau dėl papildomo atspindžio vandens lašo viduje antrinė vaivorykštė yra beveik 2,5 karto silpnesnė už pagrindinę.

Pagrindinę ir antrinę vaivorykštės skiria maždaug 9° pločio tamsesnio dangaus sritis. Tai intervalas kampų, kuriais šviesos spinduliai vandens lašuose iš viso negali būti atlenkiami. Tamsioji takoskyra tarp vaivorykščių buvo pavadinta „tamsiąja Aleksandro juosta“ (angl. *Alexander's dark band*) pirmąkart ją aprašiusio senovės graikų filosofo Aleksandro iš Afrodizijos, kuris, manoma, buvo Aristotelio mokinys, garbei.

Niutono amžininkas E. Halis numatė dar aukštesnių eilių vaivorykščių susidarymo galimybes. Pavyzdžiui, trečios eilės vaivorykštė, susidaranti tuomet, kai šviesos spindulys atsispindi vandens lašo viduje tris kartus, turėtų būti matoma kaip 85° skersmens ratas Saulės pusėje. Visai šalia trečios eilės vaivorykštės turėtų atsirasti ir ketvirtos eilės vaivorykštė, kuri yra dar silpnesnė. Kadangi trečios ir ketvirtos eilės vaivorykštės susidaro Saulės pusėje, o jų šviesumas labai menkas, ilgą laiką buvo manoma, kad šių vaivorykščių pamatyti praktiškai neįmanoma dėl akinančios Saulės šviesos [6]. Per visą vaivorykščių stebėjimo istoriją tai pavyko tik keletui laimingųjų, tačiau dažnai būdavo pagrįstai abejojama, ar tai nebuvo jų lakios vaizduotės vaisius. Tačiau visai neseniai natūraliomis sąlygomis susidaranti

¹³ Šiuo kampu atspindima tik tam tikros poliarizacijos šviesa.

Jei kritusi šviesa yra nepoliarizuota (tokia yra Saulės šviesa), atspindėta šviesa jau tampa poliarizuota.



↑ **6 pav.**
Papildomi vaivorykštės lankai (dirbtinai paryškinti).
A. Dubiečio nuotr.

trečios [7] ir ketvirtos [8] eilės vaivorykštės buvo nufotografuotos taikant astronomų dažnai naudojamą vaizdų užklojimo (angl. *image stacking*) metodą. Naudojant lazerinius šviesos šaltinius, ne tik trečios, bet ir kur kas aukštesnių eilių (net iki 200-osios!) dirbtinės vaivorykštės gali būti nesunkiai sukurtos laboratorijos sąlygomis [9].

5.3 Interferenciniai vaivorykštės lankai

Nors geometrinė Dekarto vaivorykštės teorija labai patogi ir ja gana paprastai geometriškai paaiškinti fizikinius vaivorykštės susidarymo principus, ji turi keletą esminių

trūkumų. Pirma, ji negali nusakyti, koks yra atskirų vaivorykštės spalvų intensyvumas ir nuo ko jis priklauso, antra, remiantis geometriniais (šviesos spindulių) artiniais, visos vaivorykštės turėtų būti panašios kaip du vandens lašai, tačiau taip nėra. Trečia, laikant, kad vaivorykštę formuoja šviesos spinduliai, neįmanoma paaiškinti, kaip atsiranda svarbi vaivorykštės detalė – vadinamieji papildomi (dar vadinami interferenciniais) vaivorykštės lankai (angl. *supernumerary bows*), kurie kartais būna matomi pagrindinės vaivorykštės lanko apačioje (6 pav.).

Pirmąsias dvi problemas XIX a. pirmojoje pusėje

ėmėsi spręsti anglų matematikas seras Džordžas Eiri (*George Biddell Airy*), kuris, tuomet būdamas dar ir karališkasis astronomas, įsiamžino kaip žmogus, įvedęs nulinį Grinvičo dienovidinį. Dž. Eiri pažvelgė į vaivorykštę kitaip. Remdamasis olandų fiziko Christiano Hiuiugenso (*Christiaan Huygens*) dar XVII a. suformuluotu principu apie šviesos bangų šaltinius ir frontus, jis aprašė vaivorykštę ne kaip šviesos spindulius, bet kaip šviesos bangas, kurių frontus iškraipo vandens lašai. Eiri vaivorykštės teorija buvo labai moderni, ji įskaitė bangines šviesos savybes, kurios lemia šviesos bangų interferencijos ir difrakcijos reiškinius [10]. Banginė vaivorykštės teorija buvo milžiniškas žingsnis į priekį – ji teisingai paaiškino visas stebimas vaivorykštės detales, taip pat jų kaitą, priklausomai nuo lietaus lašų dydžio. Eiri užrašė įžymųjį vaivorykštės integralą, kuris įgalino tiksliai apskaičiuoti vaivorykštės spalvų intensyvumą. Eiri teorijos šviesoje netruko paaiškėti, kad pati kompaktiškiausia vaivorykštė, kurios lanko plotis, t. y. regimasis kampinis atstumas tarp raudonojo ir violetinio kraštų tėra $1,8^\circ$, susidaro tuomet, kai vandens lašų dydis yra nuo 0,5 iki 1 mm. Iš esmės tokiai vaivorykštei idealiai tinka geometrinis Dekarto aprašymas.

Papildomų vaivorykštės lankų atsiradimo priežastį dar 1803 m. teisingai įvardijo garsus anglų mokslininkas Tomas Jungas (*Thomas Young*), paaiškindamas, kad jie atsiranda dėl šviesos bangų interferencijos reiškinio. Nors šie lankai vadinami papildomais vaivorykštės lankais, iš esmės jie yra neatsiejama pagrindinės vaivorykštės dalis. Dvi gretimos šviesos bangos vandens laše nusklinda šiek tiek skirtingą atstumą, todėl gauname bangų „mušimus“: jei išėjusių iš vandens lašo šviesos bangų fazės sutampa, matome šviesos paryškėjimą, o jei yra priešingos – bangos viena kitą užgesina ir matome tamsesnę sritį (**6 pav.**). Tokie bangų „mušimai“ optikoje vadinami šviesos bangų interferencija, todėl papildomi vaivorykštės lankai kartais dar vadinami interferenciniais lankais. Taigi papildomi vaivorykštės lan-

kai yra ne kas kita, kaip tam tikra kryptimi susidarantys interferenciniai maksimumai, o regimasis kampinis atstumas tarp jų yra atvirkščiai proporcingas vandens lašo dydžiui. Tai reikštų, kad kuo didesni lietaus lašai, tuo glaudesni interferenciniai maksimumai ir tuo arčiau pagrindinės vaivorykštės lanko jie matomi. Lietaus lašų dydžiui viršijus 0,5 mm, interferenciniai maksimumai užsikloja ant violetinės pagrindinio vaivorykštės lanko dalies. Kaip žinoma, lietaus stulpe esantys realūs vandens lašai dažniausiai būna gana įvairaus dydžio, tad visai logiška manyti, jog skirtingo dydžio vandens lašų formuojami interferenciniai maksimumai turėtų susilieti į vientisą silpną švytėjimą, o papildomi vaivorykštės lankai vargu ar iš viso galėtų būti matomi. Vienok taip nėra. Ryškūs papildomi vaivorykštės lankai matomi gana dažnai, nors vargu ar galima tikėtis, kad visi lietaus lašai būtų vienodo dydžio.

Šis paradoksalus papildomų vaivorykštės lankų galvosūkis buvo išnarpliotas tik visai neseniai [11]. Buvo apskaičiuota, kad, esant polidispersiniam (įvairių dydžių) vandens lašų dydžio pasiskirstymui, papildomus vaivorykštės lankus formuoja tik tie vandens lašai, kurių skersmuo patenka į labai siaurą 0,2–0,3 mm dydžio intervalą. Skaiciavimai atskleidė, kad būtent tokio dydžio vandens lašuose atsirandančių interferencinių juostų padėtis beveik nepriklauso nuo vandens lašo dydžio. Tačiau jei visi lietaus lašai yra didesni, papildomi vaivorykštės lankai gerai matomi tik ties pagrindinės vaivorykštės lanko viršūne ir visiškai pranyksta jos lanko apačioje. Tuo tarpu antrinėje vaivorykštėje natūraliomis sąlygomis papildomi interferenciniai lankai nėra matomi, kadangi esant papildomam šviesos atspindžiui, nepriklausomai nuo vandens lašo dydžio, jie visais atvejais susilieja į silpną tolygų švytėjimą, esantį aukščiau antrinės vaivorykštės lanko [12]. Juos galima įžiūrėti tik žvelgiant į vaivorykštę pro spalvotus siauro spektro šviesos filtrus.

5.4 Vaivorykštės spalvos

Dažnai žavimasi vaivorykštės spalvų sodrumu ir grynumu, tačiau, remiantis moksliniu spalvų apibrėžimu, vargu ar vaivorykštės spalvas galima būtų pavadinti grynomis. Iš tiesų kiekviename vaivorykštės lanko taške matome tam tikrą spalvų mišinį, kurį sudaro tiek pačios vaivorykštės spalvos, tiek pakeliui išsklaidyta bei atspindėta Saulės šviesa [13]. Be kita ko, Saulės spindulių pluoštas nėra visiškai lygiagretus dėl Saulės disko kampinio matmens, o tai irgi savo ruožtu sąlygoja papildomą spalvų susimaišymą. Spalvos grynumą galima apibrėžti kaip jos monochromatiškumą, t. y. grynąsias spalvas sudaro tik labai siauras šviesos dažnių ar bangos ilgių spektras. Žmogaus akis geba puikiai skirti grynas spalvas – įgudusi akis gali nesunkiai pastebėti net keleto nanometrų bangos ilgio grynųjų spalvų, kurias spinduliuoja lazeriniai šviesos šaltiniai, pokyčius. Tačiau gamtoje grynų spalvų neegzistuoja, o pagrindinis mūsų šviesos ir gyvybės šaltinis Saulė spinduliuoja visų bangos ilgių regimąją šviesą, kurią mūsų akis mato kaip baltą. Vienok vaivorykštės spalvos, nors ir nėra grynų (monochromatinės) siaurąja prasme, jos yra vienos gryniausių, kokias tik galima pamatyti gamtoje (7 pav.). Spalvų grynumu su vaivorykšte gali lygintis tik besileidžianti raudona Saulė, ir tai tik esant didelei atmosferos sklaidai.

Žvelgiant į vaivorykštę, galima pastebėti, kad net ir paties spalvingiausio vaivorykštės lanko ryškumas nėra vienodas – apatinė (esanti prie horizonto) vaivorykštės lanko dalis yra kur kas ryškesnė nei viršutinė (8 pav.). Šis efektas tuo ženklėsnis, kuo žemiau yra Saulė, t. y. kuo didesnė vaivorykštės lanko dalis iškilusi virš horizonto. Nevienodą vaivorykštės lanko ryškumą sąlygoja dvi priežastys. Pirmiausia dėl vandens lašo susiplojimo apatinę vaivorykštės lanko dalį formuoja santykinai didesni, o viršutinę – santykinai mažesni vandens lašai [14]. Papras-



↑ 7 pav.
Vaivorykštės spalvos. R. Balčiūno nuotr.

tai įsivaizduojama, kad vandens lašai yra idealiai apvalūs, t. y. sferoidai. Tačiau iš tikrųjų taip nėra. Krisdami žemyn, vandens lašai dėl sunkio ir oro pasipriešinimo jėgų sąveikos susiploja vertikaliai – iš sferoidų virsta elipsoidais. Tik pačių mažiausių vandens lašų, kurių skersmuo mažesnis nei 0,2 mm, forma išlieka nepakitusi. Kuo didesnis bus vandens lašas, tuo smarkiau krisdamas susiplos. Pavyzdžiui, labai dideli, keleto milimetrų skersmens vandens lašai krisdami susiploja dvigubai [15]. Tad vaivorykštės lanko viršutinę dalį formuoja santykinai mažesni, o apatinę – santykinai didesni vandens lašai. Beje, tik visai neseniai atskleista, kad didesni nei 6 mm skersmens vandens lašai krisdami ne tik susiploja, bet ir subyra į smulkesnius lašelius, kurių dydžiai priklauso nuo pradinio lašo kritimo greičio [16].



↑ 8 pav.

Pagrindinės ir antrinės vaivorykštės lankų ryškumas esant skirtingo šviesumo fonui. A. Dubiečio nuotr.

Nustatytas įdomus faktas, kad jei vandens lašai būtų ištįsę vertikaliai kaip kabantys lašai prieš pat atitrūkdami nuo paviršiaus, viršutinė vaivorykštės lanko dalis būtų kur kas ryškesnė nei apatinė [17]. Antra, regimasis vaivorykštės ryškumas ir spalvų sodrumas smarkiai priklauso nuo foninio dangaus apšvietimo [18]. Tai gerai matyti 8 pav. Kuo tamsesnis dangaus fonas, tuo ryškesnės ir kontrastingesnės mums atrodys vaivorykštės spalvos, ir atvirkščiai, šviesiame fone vaivorykštės spalvos išblanksta. Lietaus debesys, kaip žinoma, yra storiausi ir tamsiausi ties horizontu, tad minėtos vaivorykštės lanko ryškumo variaci-

jos labiausiai pasireiškia tolimo lietaus vaivorykštėse. Šie samprotavimai taip pat tinka ir antrinės vaivorykštės lanko šviesumui.

Dėl šviesos sklaidos apatinė vaivorykštės lanko dalis yra ne tik daug ryškesnė, bet ir raudonesnė, kadangi mėlyna ir violetinė spalvos yra stipriai sklaidomos atmosferoje. Kuo didesnis bus atstumas, kurį Saulės šviesa turės nukeliauti iki lietaus lašo ir grįžti iki stebėtojo, tuo mažiau violetinės ir mėlynos spalvos spindulių pasieks stebėtojo akį. Saulei esant prie pat horizonto, jos šviesai tenka prisiskverbti pro storą atmosferos stulpą, dėl to nurausta tiek pati Saulė, tiek ir vaivorykštė (9 pav.). Kai šviesos sklaida atmosferoje labai stipri (pvz., dėl dulkių ar oro taršos), vaivorykštėje jokių kitų spalvų, išskyrus raudoną, nebelieka.

Vaivorykštės lanko plotis ir spalvų ryškumas smarkiai priklauso nuo lietaus lašų dydžio. Pačios ryškiausios vaivorykštės, kaip ir galima tikėtis, matomos esant dideliems vandens lašams, kurių skersmuo didesnis nei 1 mm. Tokiu atveju viršutinis vaivorykštės lanko kraštas yra tamsiai raudonas, o ypač gerai matomos šiaip jau danguje retos žalia, mėlyna ir net violetinė spalvos. Kai lietaus lašų skersmuo sumažėja iki 0,5 mm, raudonasis vaivorykštės kraštas išblunka, o tamsiai raudona spalva iš viso pradingsta. 0,2–0,3 mm skersmens lietaus lašų kuriamos vaivorykštės spalvų gamoje raudonos spalvos iš viso nebematyti, išorinis jos kraštas tampa oranžinis, nors visos kitos spektro spalvos tebėra gerai matomos. Papildomi vaivorykštės lankai šiuo atveju labai ryškūs ir kontrastingi, juos skiria gerai įžiūrimos tamsios juostos. Lietaus lašų dydžiui sumažėjus iki 0,1 mm, vaivorykštės lankas pastebimai išplinta, o visos jo spalvos ima greitai blyksti. Taip atsitinka dėl šviesos difrakcijos reiškinio – maži vandens lašai papildomai iškreipia šviesos bangų frontus, dėl to atskiros vaivorykštės spalvos ima persikloti. Tokią vaivorykštę galima stebėti esant dulksnai.

Vaivorykštė gali nušvisti ir Mėnulio šviesoje. Tačiau natūrali Mėnulio vaivorykštė yra labai retas reiškinys, kadangi kamuolinių lietaus debesų susidarymą sąlygojanti oro masių konvekcija vyrauja dieną, o naktį paprastai rimsta. Antra vertus, Mėnulio šviesa yra tūkstančius kartų silpnesnė nei Saulės, taigi ir tą retą Mėnulio vaivorykštę visai nesunku pražiopsoti. Kas kita yra dirbtinės vaivorykštės, susidaranti fontanuose ar vandens čiurkšlėse, kurias galima susikurti ir stebėti bet kurią saulėtą dieną [19]. Vaivorykštės fragmentus saulėtais rudens rytais, tinkamai pasirinkus matymo kryptį ir kampą, galima pamatyti ant rasotos žolės ar mažyčiais rasos karoliukais apkibusių voratinklų (10 pav.). Tokios vaivorykštės nėra itin spalvingos, nes jas formuoja tik labai mažas vandens lašelių kiekis.

Vaivorykštės spalvų gamą sudaro ne tik akiai mato-



↑ 9 pav.
Saulėlydžio vaivorykštė. A. Dubiečio nuotr.

ma šviesa. Naudojant prietaisus, vaivorykštėje galima užregistruoti ultravioletinę ir infraraudonąją spalvas. Jų abiejų intensyvumas yra kur kas mažesnis nei regimojo spektro spalvų, tačiau to priežastys labai skirtingos. Infraraudonoji šviesa yra stipriai slopinama vandenyje dėl sugerties, tuo tarpu ultravioletinę šviesą smarkiai sklaido pati atmosfera, nors vanduo šioje spektro srityje kaip tik skaidriausias.

5.5 Rūko juosta

Esant palankioms apšvietimo sąlygoms, vaivorykštės gali susidaryti ir rūke. Tačiau rūko vaivorykštės yra kitokios, kadangi rūko lašelių skersmuo yra daug mažesnis nei lietaus lašų. Paprastai rūko lašelių skersmuo kinta nuo keleto iki keliasdešimties mikrometrų, tad juose smarkiai pasireiškia šviesos difrakcijos reiškinys. Dėl to rūko vaivorykštė yra plati ir balta (bespalvė, 11 pav.), nors retkarčiais dar galima įžvelgti vos rausvą viršutinę ir melsvą apatinę lanko dalis [20]. Blyški rūko vaivorykštė vadinama rūko



● 10 pav.

Vaivorykštės fragmentas rasotame voratinklyje.

A. Dubiečio nuotr.



↑ **11 pav.**
Rūko juosta. A. Dubiečio nuotr.

juosta (angl. *fogbow*). Kuo mažesnis rūko lašelių skersmuo, tuo platesnė ir blyškesnė rūko juosta. Pavyzdžiui, jei rūko lašelių skersmuo yra $10\ \mu\text{m}$, tai rūko juostos kampinis plotis siekia beveik 7° , t. y. daugiau nei 3 kartus platesnis už spalvingą vaivorykštės juostą.

Natūraliomis sąlygomis pamatyti rūko juostą pasiseka retai: tvyrant tirštam rūkui, pro jį neprasisiverbia Saulės spinduliai, o apšviestas Saulės, rūkas kyla aukštyne ir greitai sklaidosi. Tačiau rūko juostą galima nesunkiai sukurti naudojant dirbtinius šviesos šaltinius, pavyzdžiui, ilgąsias automobilio šviesas (**12 pav.**). Sėdint automobilyje, rūko juostos pamatyti neįmanoma, nes šviesos šaltinis turi būti stebėtoju už nugaros, kaip ir natūralių šviesos šaltinių – Saulės ar Mėnulio atveju.

Kai kuriais atvejais netgi baltose rūko juostose galima išvysti papildomų interferencinių lankų. Jie tampa gerai matomi tuomet, kai visi rūko lašeliai yra beveik identiško dydžio. Tačiau tokie rūkai susidaro retai, susiklosčius labai specifinėms sąlygoms, kokios retkarčiais pasitaiko kalnuose, o dažniausiai Arktyje ir Antarktidoje, kur dideli temperatūrų kontrastai. Na, o debesyse esančių vandens lašelių skersmuo yra toks mažas, kad jokia vaivorykštė juose susidaryti negali. Retais atvejais, paprastai žiūrint iš labai aukštai, debesyse gali būti matomi vadinamieji debesų kontrasto lankai (angl. *cloud contrast bow*) – blyškios rūko vaivorykštės atitikmuo.



↑ 12 pav.

Rūko juosta esant dirbtinei šviesai. Šviesi dėmė aplink stebėtojo šešėlį – glorijs, kurios spalvos atskirai paryškintos paveikslo intarpe. A. Dubiečio nuotr.

5.6 Glorija

Kartu su rūko juosta dažnai gali būti matomas ir dar vienas nepaprastai įdomus optinis reiškinys – glorijs (angl. *glory*). Glorija – tai koncentriniai spalvoti ratilai, susidarantys aplink rūke esantį stebėtojo šešėlį (12 ir 13 pav.). Glorija yra retas, gražus ir iki šiol tebegaubiamas paslapčių optinis reiškinys. Arti žemės paviršiaus glorijs susidaro tuomet, kai Saulės, Mėnulio ar net dirbtinio šviesos šaltinio spinduliai apšviečia tvyrantį rūką ar atskirus jo tumulus. Tarp šviesos šaltinio ir tiršto rūko atsidūręs stebėtojas rūke išvysta nutį-

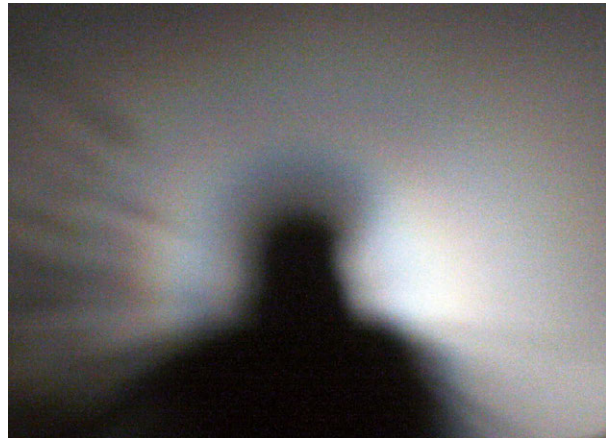
susį savo paties šešėlį, kurį supa kompaktiška besikeičiančių spalvų aureolė – glorijs. Susiklosčius palankioms sąlygoms, šešėlis ir glorijs rūko fone gali įgauti stulbinamą kontrastą, tad nenuostabu, kad glorijs ilgus šimtmečius buvo tapatinamos su mistiniais ar religiniais vaizdiniais, ypač šventųjų apreiskimais. Nuo senų laikų piligrimai, siekdami dvasinio apšvalymo ir nušvitimo, lankydavosi vienuolynuose, kurie neretai buvo statomi arčiau dievo – kalnuose. Būtent kalnuose, palankiai išsidėščius saulei, šešėliams ir kalnų tarpekliuose bei slėniuose tvyrančiam rūkui ar žemai plaukiantiems debesims, susidaro puikios sąlygos glorijsai atsirasti. Išvydę rūke pakibusį savo šešėlį, juosiamą spalvotų nimbų, keliautojai nesunkiai įtikėdavo, kad jiems apsiereiškia ir juos laimina aukštesniosios jėgos. Tikėtina, kad religiniame

mane vaizduojami šventųjų galvas supantys nimbai yra stilizuotas glorijos atvaizdas. Yra išlikę daug viduramžių pranešimų apie glorijas, stebėtas nuo Brokeno kalno Vidurio Vokietijoje (matyt, ten lankydavosi labai pastabūs žmonės), tad neretai ir dabar glorija vis dar vadinama Brokeno vaaiduokliu (angl. *Brocken spectre*).

Laikoma, kad pirmąjį mokslinį glorijos aprašymą 1752 m. pateikė ispanų mokslininkas ir keliautojas, vėliau tapęs generolu Antonijus de Uloja (*Antonio de Ulloa*). Keliaudamas po Peru plynaukštes (šios kelionės tikslas buvo nustatyti Žemės formą ir patikslinti jos dydį), vieną rytą jis stebėjo nepaprastai ryškią ir spalvingą gloriją ir dažną jos palydovą – rūko juostą [21]. Reginys iš tiesų turėjo būti labai įspūdingas, kadangi tolimajame plane tuo pat metu vyko ir ugnikalnio išsiveržimas. Žymus škotų mokslininkas Čarlzas Vilsonas (*Charles Thomson Rees Wilson*), 1927 m. pelnęs Nobelio premiją už prisotintų garų kameros išradimą, kurioje buvo galima stebėti jonizuojančios spinduliuotės pėdsakus – trekus, pripažino, kad jo mokslinio pažinimo siekį paskatino XIX a. pabaigoje lankantis kalnuose esančioje meteorologijos observatorijoje stebėta įspūdinga glorija.

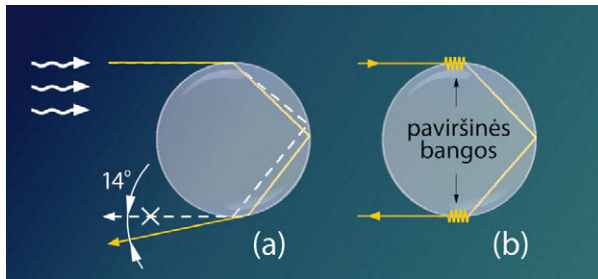
Išvaizda glorija panaši į vainiką – spalvotus koncentrinus ratilus, supančius šviesulį, kurie atsiranda dėl šviesos difrakcijos reiškinio mažyčiuose vandens lašeliuose (7 sk.). Nepaisant išorinio vainiko ir glorijos panašumo, jų atsiradimo priežastys ir ypatumai smarkiai skiriasi: glorija matoma priešingoje šviesuliui pusėje – opoziciniame taške, be to, jos, kaip ir vaivorykštės, šviesa yra poliarizuota, o vainiko – ne. Tai reiškia, kad viena glorijos susidarymo

¹⁴ Vienintelis šviesos spindulys, sugrįžtantis tiesiai atgal, yra spindulys, kritęs tiesiai į lašo centrą (spindulys „1“, **2 pav.**), tačiau jis negali formuoti glorijos.



13 pav.
Rūke matoma glorija. A. Dubiečio nuotr.

priežasčių yra šviesos atspindys. Tačiau geometrinės optikos dėsniai negali paprastai ir įtikimai paaiškinti, kaip susidaro glorija. Ši paradoksali geometrinė situacija pavaizduota **14(a) pav.**¹⁴ Kadangi glorija formuojasi priešingame (opoziciniame) šviesos šaltiniui taške, vandens laše lūžęs, atsispindėjęs ir dar kartą lūžęs šviesos spindulys turi grįžti tiesiai atgal į stebėtoją. Šis spindulio kelias pavaizduotas brūkšnine linija. Vienok, remiantis šviesos lūžio dėsniu, pasirodė, kad vandens laužiamoji galia (vandens lūžio rodiklis yra kiek didesnis nei 1.33, **1 pav.**) yra per maža, kad atlenktų spindulį reikiamu kampu, tad toks geometrinis spindulio kelias neįmanomas. Tikrasis šviesos spindulio kelias pavaizduotas raudona linija ir sudaro maždaug 14° skirtumą su reikiama kryptimi. Įdomu tai, kad šios geometrinės problemos nebūtų, jei vandens lūžio rodiklis būtų kiek didesnis, pvz., kaip stiklo ($n = 1,45$). Neseniai kompiuterinio glorijos modeliavimo rezultatai atskleidė ir gąnėtinais paradoksalų faktą, kad glorijos vaizdas išvis nepriklauso nuo vandens ar kito skysčio, kurio lašeliai formuoja gloriją, lūžio rodiklio [22].



↑ **14 pav.**
Geometrinis šviesos spindulių kelias vandens laše:
(a) punktyrine linija pažymėtas negalimas spindulio sklaidimas, (b) šviesos spindulių kelias, įskaitant paviršinės bangas

1947 m. Hendrikas van de Hulstas (*Hendrik Christoffel van de Hulst*), laikomas vienu moderniosios atmosferos fizikos ir optikos tėvų, pasiūlė geometrinį gloriijos paaiškinimą, kuris anuomet pasirodė bemaž fantastinis ir nenuostabu, kad mažai ką galėjo įtikinti. Jis teigė, kad 14° krypties deficitas išnyktų, jei laikysime, kad trūkstumą savo kelio dalį šviesa vandens lašo paviršiumi sklinda kaip paviršinė banga [23] (**14(b) pav.**). Paviršinės bangos sužadina tuomet, kai šviesos spindulys pataiko į patį vandens lašo kraštą. Vienok optines paviršines bangas gana sunku įsivaizduoti. Iki šiol nėra iki galo aišku, kaip šviesa pavirsta paviršine banga ir kaip paviršinė banga atvirsta atgal į šviesą. Dėl to kartais teigiama, kad dalį savo optinio kelio vandens laše šviesa tuneliuoja, t. y. trūkstumą kelio atkarpa įveikia tik jai vienai žinomu būdu [24]. Iš tiesų eksperimentiškai aptikti paviršinės bangos nėra paprasta – šviesos bangų dažnio diapazone šios bangos sklisdamos patiria didžiulių nuostolių (labai greitai gęsta) – jų intensyvumas eksponentiškai mažėja didėjant sklaidimo atstumui. Žinoma, kad paviršinės bangos gali gyvuoti ir būti detektuojamos tik labai mažame, vos $1 \mu\text{m}$, atstume, kuris atitinka tik keletą šviesos bangos ilgių. Dėl šios priežasties

vandens lašelių matmenys gloriijos susidaryme atlieka labai svarbų vaidmenį. Tik rūko lašeliai yra tokie maži (vidutinis jų skersmuo yra $10\text{--}50 \mu\text{m}$), kad trūkstumą kelio dalį šviesa iš tiesų galėtų sklirti kaip negęstanti paviršinė banga. Apskaičiuota, kad vandens lašeliuose, kurių skersmuo didesnis nei $60 \mu\text{m}$, gloriijos nebegali susidaryti. Pavyzdžiui, lietaus lašai yra kur kas didesni – jų skersmuo kinta nuo $100 \mu\text{m}$ iki keleto mm, – tad lyjant gloriijos niekada nėra matomos.

Spalvotų gloriijos ratilų susidarymą lemia ganėtinai sudėtingi reiškiniai. Pirmiausia skirtingų spalvų šviesos spinduliai vandens laše sklinda šiek tiek skirtingais kampais dėl vandens lūžio rodiklio priklausomybės nuo šviesos bangos ilgio (dispersijos). Gloriijos švytėjimą sukuria daugybė ore sklindančių rūko lašelių, jų atspindėtos šviesos bangos interferuoja. Spalvotus ratilus matome interferencijos maksimumų kryptimis, be to, ratilų kampinis skersmuo yra atvirkščiai proporcingas vandens lašo dydžiui. Manoma, kad interferuoja ir paviršinės bangos, kurios taip pat dalyvauja gloriijos vaizdo susidaryme. Gloriijos spalvų sodrumas, kontrastas ir spalvotų ratilų skaičius priklauso nuo to, kiek vienodi yra rūko lašelių dydžiai. Kaip ir vaivorykštės atveju, kiekvienas stebėtojas mato savą gloriją.

Natūraliomis sąlygomis mūsų šalyje pastebėti gloriją pavyksta itin retai, nes Lietuva – lygumų kraštas, o rūkas, Saulei patekęs, būna arba per tirštas (pati Saulė taip pat skendi rūke), arba per greitai išsisklaido. Taigi laiko tarpas, kai gloriija galėtų būti matoma, yra labai trumpas. Tačiau, pasitelkus dirbtinius šviesos šaltinius, gloriją visai nesunku susikurti nuosavame kieme. Visa gudrybė slypi tinkamos stebėjimo geometrijos pasirinkime: stebėtojas turi atsistoti tarp šviesos šaltinio ir rūko, tuomet aplink rūke krintanti stebėtojo šešėlį sušvinta spalvoti ratilai – gloriija (**12 ir 13 pav.**). Dar de Uloja pastebėjo, kad neatsiejamas gloriijos



palydovas yra plati ir blyški rūko juosta. Skirtingai nei glorijs atveju, rūko juostos susidarymas visiškai paaiškina-
mas iš geometrinės optikos pozicijų, tad iš tiesų nuostabu,
kaip du optiniai reiškiniai, gimstantys dėl skirtingų šviesos
sklidimo tuose pačiuose vandens lašeliuose aspektų, gali
būti matomi tuo pat metu.

Yra sukurtos kompiuterinės programos, kuriomis
galima modeliuoti rūko juostą ir gloriją (15 pav.). Parenkant
vandens lašelių matmenis ir jų dydžių skirstinį, įmanoma
iki smulkiausių detalių, t. y. rūko juostos lanko storio, tam-
sesnio vidinio žiedo ir šviesesnės dalies kampinių padėčių
bei glorijs ratilų skaičiaus ir skersmens, atkurti stebėtą
realų vaizdą. Šiuo atveju, sutapatinus kompiuterinio mo-
deliavimo vaizdą su realiu, pavyko nustatyti, kad vidutinis

rūko juostą ir gloriją formuojančių lašelių skersmuo buvo
18 μm , o jų dydžių nuokrypis nuo vidutinės vertės siekė
apie 20 %, o tai lėmė, kad buvo matomas tik vienas spalvotų
glorijs ratilų kaskadas.

Kažkada glorijs buvo laikoma iš tiesų labai retu opti-
niu reiškiniu. Dabar ją galima išvysti dažno skrydžio metu,
lėktuvui pakilus virš kamuolinių debesų. Pastebėsime, kad
vandens lašelių, iš kurių sudaryti kamuoliniai ar aukštieji
kamuoliniai debesys, matmenys yra beveik tokio pat dy-
džio kaip ir rūko, tad esant virš debesų, kur visuomet švie-
čia Saulė, sąlygos susidaryti glorijs yra idealios. Kiekvienas

↑ 15 pav.
Rūko juostos ir glorijs kompiuterinio modeliavimo
rezultato palyginimas su realiu vaizdu



● **16 pav.**

Iš lėktuvo matoma artima gloria. Pagal glorijos centro padėtį lėktuvo šesėlio atžvilgiu galima pasakyti, kurioje lėktuvo vietoje sėdėjo stebėtojas.
D. Faccio nuotr.

lėktuvo pilotas pasakytų, kad glorijs – tai kasdienis lėktuvo palydovas. Iš lėktuvo matomos glorijs skiriasi išvaizda. Ji priklauso nuo to, kaip arti ar toli nuo lėktuve esančio stebėtojo yra glorijs formuojančių debesų sluoksnis. Kai lėktuvas neaukštai virš debesų, glorijs centre gerai matomas ir paties lėktuvo šešėlis (16 pav.). Jei lėktuvas virš debesų pakilęs labai aukštai, jo šešėlis pranyksta, o lieka matoma tik pati glorijs (17 pav.). Skrendant virš didelių ir nelygių debesų masyvu kartais galima matyti, kaip keičiasi glorijs žiedų kampiniai matmenys. Ši kaita vyksta ne dėl to, kad glorijs susidaro toliau ar arčiau nuo stebėtojo, o dėl to, jog kinta debesų sudarančių vandens lašelių dydis. Dėl šios priežasties retesniais atvejais stebimos elipsinės ar netgi dar sudėtingesnių formų glorijs [25]. Įdomu ir tai, kad palyginti neseniai, 2003 m., glorijs pavyko nufotografuoti iš kosmoso tragiškai pasibaigusio erdvėlaivio „Columbia“ skrydžio metu [26]. Erdvėlaiviui skriejant 278 km aukštyje, jo vaizdo kameros užfiksavo glorijs, susidariusią ant debesų masyvo, dengiančio Pietų Atlanto vandenyną. Aišku, iš tokio didelio atstumo matoma glorijs nėra labai efektinga.

Pabaigoje pastebėsime, kad alternatyvūs glorijs paaiškinimai yra dar sudėtingesni. Jie arba perdėtai matematiniai [27], arba remiasi šviesos sklaidos teorija. Pastaruoju atveju glorijs traktuojama kaip atgalinė šviesos sklaida, kurios fizikinis mechanizmas, ypač paaiškinant spalvotų koncentrinų žiedų atsiradimą, yra gana painus [28]. Kompiuterinis modeliavimas geba labai tiksliai atkurti glorijs vaizdą, tačiau tai tėra rezultatas, kuris nepaiškina šio gražaus reiškinio fizikos. Net ir šiandien visuotinai pripažįstama, kad glorijs yra bene vienintelis optinis atmosferos reiškinys, neturintis paprasto ir akivaizdaus fizikinio paaiškinimo [29]. A. Einšteinas yra pasakęs, kad „viskas turi būti paaiškinama kiek įmanoma paprasčiau, tačiau ne pernelyg paprastai“. Šis jo posakis puikiai tinka glorijs atveju.



↑ 17 pav.
Iš lėktuvo matoma tolima glorijs.
D. Majaus nuotr.

Įdomu pastebėti, kad vaivorykštės ir glorijs teorijos kūrimas iki šiol nėra baigtas. Matematikai visai neseniai sukūrė kompleksinių kampinių momentų teoriją ir pažvelgė į vaivorykštę ir glorijs šviesos kvantų – fotonų lygiu [30]. Vaivorykštės modeliai, kurie matematiškai remiasi sudėtinga kampinių momentų teorija, gali būti taikomi ne tik optikoje, bet ir atomo, branduolio ir elementariųjų dalelių fizikoje, tiriant elektringųjų dalelių pluoštų sklaidimo ir sklaidos ypatumus. Mokslinė informacija, kurią suteikia vaivorykštės stebėjimai esant pačioms įvairiausioms sąlygoms, aktuali ir šiandien. Aišku, čia jau nekalbame apie vaivorykštės, susidarancias Saulės šviesoje. Vaivorykštei sukurti naudojami lazeriniai siauro spektro (vieno bangos ilgio ar, kitaip tariant, monochromatiniai) šviesos šaltiniai. Vienspalvių lazerinių vaivorykščių stebėjimai įgalina dideliu tikslumu nustatyti lietaus lašų dydį bei jo pasiskirstymą, lašų kritimo greitį, temperatūrą, formą ir jos iškraipymus. Visi šie parametrai svarbūs modeliuojant meteorologinius reiškinus.



↑ **18 pav.**
Auros švytėjimas krintant šešėliui ant rasotos vejos.
A. Dubiečio nuotr.

↗ **19 pav.**
Fotoaparato aura. J. Galinio nuotr.

5.7 Aura

Su šviesos sklidimu vandens lašuose susijęs dar vienas dažnas, tačiau retai kada pastebimas gražus reiškinys. Giedrais rytais žvelgiant į savo šešėlį, krintantį ant rasotos vejos, galima išvysti šešėlį supantį švytėjimą – aurą (**18 pav.**). Ji dažnai vadinama šventuoju švytėjimu (vok. *heiligschein*). *Heiligschein* vokiečių kalboje reiškia aureolę, o angliškai šis pavadinimas verčiamas kaip *holy shine*. Šis reiškinys yra vienas iš nedaugelio, kurio vokiškas pavadinimas vartojamas visoje, net ir angliškoje, literatūroje. Auros reiškinys buvo žinomas jau nuo viduramžių. Žinoma netgi istorija apie vieną talentingą italų aktorių,

kuris, pamatęs jo šešėlį supančią aurą, įtikėjo, jog tai nenuginčijamas jo talento įrodymas. Aišku, aplink šešėlį švytinti aura neturi nieko bendra su žmogaus talentais ar galiomis; ji atsiranda dėl atgaline kryptimi grįžtančios Saulės šviesos, kurios atspindžio kampas artimas 180° . Šio reiškinio paslaptis – Saulės šviesą atspindi ne patys rasos lašai, o žolės stiebeliai. Rasos lašai veikia kaip mažyčiai labai trumpo židinio lęšiai, kurie fokusuoja Saulės spindulius labai nedideliu atstumu už paties lašo. Tokio lašo-lęšio židinio atstumas, priklausomai nuo lašo dydžio, yra nuo keliasdešimties iki kelių šimtų mikrometrų [37]. Jei už lašo nieko nebūtų, už jo židinio šviesa labai greitai išsisklaidytų ir tuo viskas baigtųsi. Tačiau rasos lašeliai yra prilipę prie žolės stiebelių. Prie pačių stiebelių rasos lašeliai nesiliečia, bet yra prikibę prie mažyčių, akiai nematomų žolės plaušelių. Jei rasos lašo-lęšio židinio atstumas beveik sutampa su jo atstumu iki žolės stiebelio, stiebelio atspindėta šviesa

tokio lęšio surenkama ir pakliūva atgal į stebėtojo akį. Ši rasotų žolės stebelių atspindėta šviesa formuoja aurą. Auros švytėjimo intensyvumas labai smarkiai priklauso nuo rašos lašo atstumo iki žolės stiebelio: labai maži rasos lašeliai būna per toli, o labai dideli rasos lašai – per arti žolės stebelio, tad tokiais atvejais auros švytėjimas būna labai silpnas.

Kaip ir gloriijos ar vaivorykštės atveju, kiekvienas stebėtojas mato tik savo aurą, nes atgalinio atspindžio kampų diapazonas labai siauras (**19 pav.**). Beje, judant auros kontrastas visuomet didesnis. Tuo lengva įsitikinti žingsniuojant po Saulės nutviekstą rasotą veją ar tiesiog kraipant galvą į šalis. Be kita ko, aurą galima išvysti ant rasotų medžių, ypač spygliuočių, o žvelgiant iš labai aukštai, silpnas švytėjimas priešingame Saulei taške susidaro tiesiog ant pačių įvairiausių kraštovaizdžio detalių.

Bibliografija

1. K. Sassen, *Rainbows in the Indian rock art of desert western America*, *Applied Optics* **30**, 1991, 3523–3537.
2. X. Quan, E. S. Fry, *Empirical equation for the index of refraction of seawater*, *Applied Optics* **34**, 1995, 3477–3480.
3. J. A. Adam, *Geometric optics and rainbows: generalization of a result by Huygens*, *Applied Optics* **47**, 2008, H11–H13.
4. J. A. Lock, *Theory of the observations made of high-order rainbows from a single water droplet*, *Applied Optics* **26**, 1987, 5291–5298.
5. G. P. Können, J. H. De Boer, *Polarized rainbow*, *Applied Optics* **18**, 1979, 1961–1965.
6. R. L. Lee Jr., P. Laven, *Visibility of natural tertiary rainbows*, *Applied Optics* **50**, 2011, F152–F161.
7. M. Grossmann, E. Schmidt, A. Haussmann, *Photographic evidence for the third order rainbow*, *Applied Optics* **50**, 2011, F134–F141.

8. M. Theusner, *Photographic observation of a natural fourth-order rainbow*, *Applied Optics* **50**, 2011, F128–F133.
9. P. H. Ng, M. Y. Tse, W. K. Lee, *Observation of high-order rainbows formed by a pendant water drop*, *Journal of the Optical Society of America B* **15**, 1998, 2782–2787.
10. R. L. Lee, *Mie theory, Airy theory, and the natural rainbow*, *Applied Optics* **37**, 1998, 1506–1519.
11. A. B. Fraser, *Why can the supernumerary bows be seen in a rain shower?*, *Journal of the Optical Society of America* **73**, 1983, 1626–1628.
12. G. P. Können, *Appearance of supernumeraries of the secondary rainbow in rain showers*, *Journal of the Optical Society of America A* **4**, 1987, 810–816.
13. R. L. Lee, *What are all colors of the rainbow*, *Applied Optics* **30**, 1991, 3041–3047.
14. A. B. Fraser, *Inhomogeneities in the color and intensity of the rainbow*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **29**, 1972, 211–212.
15. A. W. Green, *An approximation for the shapes of large raindrops*, *Journal of Applied Meteorology* **14**, 1975, 1578–1583.
16. A. B. Kostinski, R. A. Shaw, *Raindrops large and small*, *Nature Physics* **5**, 2009, 624–625.
17. K. Sassen, *Angular scattering and rainbow formation in pendant drops*, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1083–1089.
18. S. D. Gedzelman, *Rainbow brightness*, *Applied Optics* **21**, 1982, 3032–3037.
19. S. D. Gedzelman, J. Hernandez-Andres, *Fountain rainbows*, *Applied Optics* **47**, 2008, H220–H224.
20. D. K. Lynch, P. Schwartz, *Rainbows and fogbows*, *Applied Optics* **30**, 1991, 3415–3420.
21. D. K. Lynch, S. N. Futterman, *Ulloa's observations of the glory, fogbow, and an unidentified phenomenon*, *Applied Optics* **30**, 1991, 3538–3541.
22. P. Laven, *Effects of refractive index on glories*, *Applied Optics* **47**, 2008, H133–H142.
23. H. C. van de Hulst, *A theory of the anti-coronae*, *Journal of the Optical Society of America* **37**, 1947, 16–22.
24. H. M. Nussenzveig, *Light tunneling in clouds*, *Applied Optics* **42**, 2003, 1588–1593.
25. C. Hinz, G. P. Können, *Unusual glories*, *Weather* **64**(3), 2009, 68–70.
26. P. L. Israelevich, J. H. Joseph, Z. Levin, Y. Yair, *First observation of glory from space*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**, 2009, 1772–1774.
27. V. Khare, H. M. Nussenzveig, *Theory of the glory*, *Physical Review Letters* **38**, 1977, 1279–1282.
28. P. Laven, *How are glories formed?*, *Applied Optics* **44**, 2005, 5675–5683.
29. H. M. Nussenzveig, *Does the glory has a simple explanation?*, *Optics Letters* **27**, 2002, 1379–1381.
30. J. A. Adam, *The mathematical physics of rainbows and glories*, *Physics Reports* **356**, 2002, 229–365.
31. J. O. Mattsson, L. Barring, *Heiligenschein and related phenomena in divergent light*, *Applied Optics* **40**, 2001, 4799–4806.

6. Ledo kristalų halai



● *A. Dubiečio nuotr.*

6.1 Nuostaboji dangaus geometrija

Žodis „halas“ kilęs iš graikų kalbos ir reiškia švytinį ratą aplink šviesulį. Tačiau tik nedidelė dalis atmosferos halų yra išties apskriti. Dažniausiai tai danguje sušvitusios spalvingos ar tiesiog baltos dėmės, juostos, lankai ar puslankiai. Halai žavi įvairove ir tobula geometrija. Jie yra kur kas dažnesnis atmosferos reiškinys, nei galėtų pasirodyti iš pirmo žvilgsnio. Akyliausi stebėtojai teigia, kad kai kuriose pasaulio vietose įvairūs halai gali būti matomi net iki 200 kartų per metus! Ryškūs halai neretai painiojami su vaivorykšte, klaidingai manant, kad tai – jos fragmentai. Pažymėtina, kad vaivorykštė visada matoma priešingoje pusėje nei Saulė, o halai su retomis išimtimis matomi tik žvelgiant Saulės kryptimi. Gaila, tačiau dauguma halų atsiranda ir išnyksta nepastebėti, kadangi instinktyviai kreipiame akis tolyn nuo akinančių Saulės spindulių.

Halai kaip atmosferos reiškinys buvo žinomi nuo senų senovės, jų piešinių aptinkama senovės Babilono ir graikų raštuose, net Šiaurės Amerikos indėnų uolų raižiniuose. Ilgą laiką halų atsiradimo priežastis buvo nežinoma, todėl pats reiškinys buvo apgaubtas paslapties ir mistikos. Dažniausiai halai buvo laikomi blogais dangaus ar Dievo siunčiamais ženklais ir išpėjimais. Esminis posūkis požiūryje į halus nuo misticismo iki mokslinio supratimo prasidėjo netrukus po to, kai Romoje 1629–1630 m. buvo pastebėti keli ypač ryškūs kompleksiniai halai [1]. Ryškūs kompleksiniai halai yra vienas nuostabiausių dangaus reiškinų, pribloškiančių dangiškosios geometrijos masteliais ir tobulu tikslumu. Vieną seniausių ir išsamiausių Romos halų mokslinių aprašymų dar 1630 m. pateikė jėzuitų kunigas ir astronomas Kristofas Šeineris (*Christoph Scheiner*). Jis kruopščiai aprašė aplink Saulę išsidėsčiusius švytinčius apskritimus, lankus ir dėmes. Jo aprašytas halas vėliau buvo

pavadintas jo vardu ir buvo toks retas ir neįprastas, kad kai kurios jo detalės paaiškintos tik daug vėliau – jau XX a. [2]. Bene didingiausių to laikotarpio kompleksinių halų 1661 m. vasario 20 d. Gdanske stebėjo ir aprašė Žečpospolitos laikų astronomas Johanesas Hevelijus (*Johannes Hevelius*). Reginys buvo toks įspūdingas, kad vėliau buvo pavadintas septyniomis Danzigo Saulėmis [3].

1637 m. garsus prancūzų mokslininkas ir filosofas Renė Dekartas (*Rene Descartes*) paskelbė vieną žymiausių to laikotarpio darbų „Diskursas apie Metodą, kaip teisingai suprasti priežastis ir ieškoti tiesos moksluose“. Veikalą sudaro trys dalys – dioptrika (arba optika, kaip dabar mes suprantame), geometrija ir meteorologija. Įdomu tai, kad būtent šie mokslai ir yra kertiniai akmenys, ant kurių buvo sukurta šiuolaikinė halų teorija. R. Dekartas pirmasis pritaikė šviesos lūžio dėsnius meteorologijoje ir atkreipė dėmesį, kad halai niekada nematomi lyjant lietui ar krintant rūkui, tad jie nieko bendra neturi su vandens lašais ir vaivorykštėmis. Dekartas susiejo halų matomumą su lengvais ir permatomais debesimis – anuomet tokie debesys dar nebuvo vadinami plunksniniais, o ir patys debesys apskritai dar nebuvo klasifikuoti (3 sk.). Jis teisingai spėjo, kad halų priežastis galėtų būti šviesos refrakcija (lūžis) mažuose cilindro formos ledokšniuose, iš kurių, jo manymu, ir buvo sudaryti šie debesys.

R. Dekarto idėjas netrukus išplėtojo žymus prancūzų fizikas Edmė Mariotas (*Edme Mariotte*), kuris įrašė savo vardą į istoriją nepriklausomai nuo Roberto Boilio (*Robert Boyle*) atrasdamas dujų plėtimosi dėsnį. 1681 m. E. Mariotas įrodė, kad paprasčiausius ir dažniausiai matomus halus išties sąlygoja šviesos spindulių lūžis, tačiau ne cilindro formos ledokšniuose, o taisyklinguose ledo kristaluose (mažytėse ledo prizmėse) ir tiksliai aprašė halų dėsningumus remdamasis geometrinės optikos dėsniais. R. Dekarto ir E. Marioto pasiūlyta metodologija

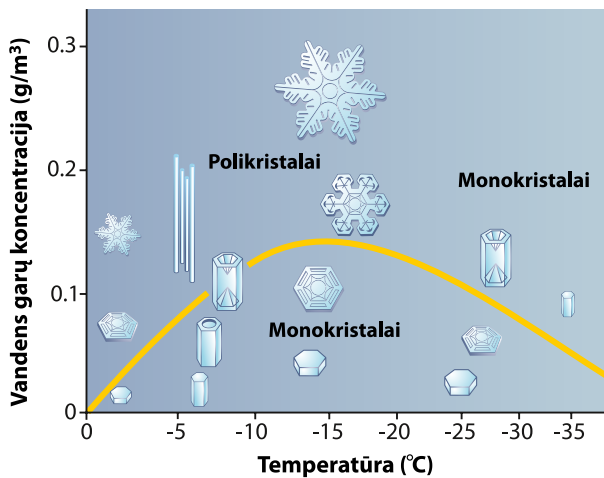
tebėra taikoma ir šių dienų atmosferos optikoje [4]. Remdamiesi R. Dekarto ir E. Marioto darbais, šimtmečiu vėliau Džiovani Venturis (*Giovanni Batista Venturi*) Italijoje ir Tomas Jungas (*Thomas Young*) Anglijoje padėjo mokslinės halų teorijos pagrindus. Kažkada halus stebėjo ir aprašė tokios iškilios mokslo asmenybės kaip Tichas Brahė (*Tycho Brahe*), Christianas Huiugensas (*Christian Huygens*) ir Džozefas Fraunhoferis (*Joseph von Fraunhofer*). Žymus anglų astronomas Edmundas Halis (*Edmund Halley*) taip pat buvo aistringas halų stebėtojas ir tyrinėtojas. Iki šiol išlikę nemažai jo laišku, siustų Karališkajai mokslo draugijai, kuriuose jis aprašė halų stebėjimus ir pastebėjimus.

Pirmąją halų teoriją, sistemiškai apibendrinusią tuometes mokslines žinias, 1845 m. sukūrė prancūzų fizikas Augustas Bravė (*Auguste Bravais*), laikomas vienu šiuolaikinės kristalografijos pradininkų. A. Bravės halų teorija ilgainiui tapo visuotinai priimtina, nors joje dar buvo likę nemažai spragų ir netikslumų. Išradus fotografiją, halų stebėjimai tapo kur kas kokybiškesni. XX a. pradžioje Amerikos meteorologų draugijos leidžiamas žurnalas „Monthly Weather Review“ buvo tiesiog užvertas halų nuotraukomis ir jų stebėjimų aprašymais. Žinias apie halus smarkiai praturtino ir poliarinės ekspedicijos. Dėl ypatingų oro sąlygų tiek Arktyje, tiek Antarktidoje matomi halai formų įvairove, dažniu ir išpūdingumu pranoksta bet kur kitur pasaulyje matomus. Halų teorijos kūrimas visiškai užbaigtas neseniai, XX a. paskutiniame dešimtmetyje, kai buvo sudarytas išsamus halų atlasas, kuriame kartu su visomis įmanomomis ledo kristalų modifikacijomis ir šviesos spindulių optiniais keliais priskaičiuojama daugiau nei 50 skirtingų halų tipų [5]. Nemažą jų dalį sudaro hipotetiniai halai, niekada dar nestebėti realiomis sąlygomis, tačiau pastaruoju metu jų skaičius akylų stebėtojų dėka ėmė sparčiai mažėti.

6.2 Ledo kristalai debesyse

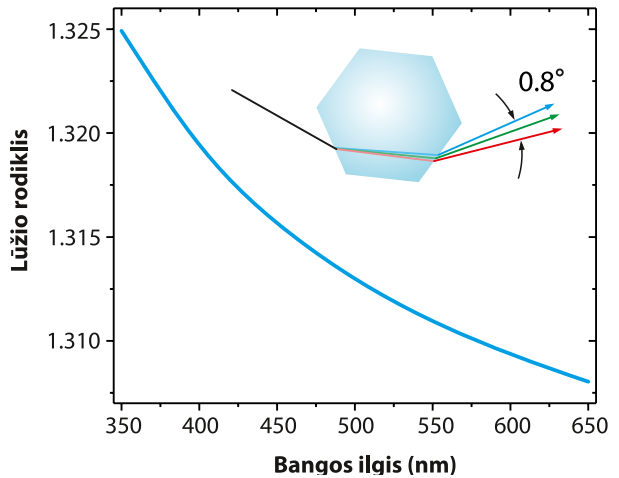
Halus su plunksniniais debesimis susiejo dar R. Dekartas, tačiau ilgas šimtmečius žinios apie šių debesų sandarą buvo labai skurdžios ir grindžiamos tik spėlionėmis. Dabar jau žinoma, kad oro temperatūra aukštyje, kuriame susidaro aukščiausiai troposferos debesys – plunksniniai debesys, nukrinta žemiau -50°C , todėl šie debesys, skirtingai nei apatinio ir vidurinio aukštų debesys, sudaryti vien tik iš ledo kristalų (3.6 posk.). Įdomu ir tai, kad tiesioginiai įrodymai apie ledinę-kristalinę aukštųjų debesų sandarą gauti tik XX a. aštuntajame dešimtmetyje [6]. Tyrimai atskleidė, kad aukštuosiuose debesyse aptinkami ne tik įvairiausių formų ir dydžių ledo polikristalai, bet ir gana dideli taisyklingos formos monokristalai. Idealūs ledo monokristalai yra šešiakampio formos, kurią lemia šešiakampė ledo kristalinės gardelės simetrija. Tokie kristalai vadinami heksagoniniais. Šešiakampę simetriją išlaiko ir ledo polikristalai (snaigės). Nors visos snaigės atrodo skirtingos, jos yra šešiakampės dėl heksagoninės kedo kristalų simetrijos. Pavyzdžiui, kiti gerai žinomi kristalai – valgomosios druskos – turi kubinę kristalinės gardelės simetriją. Tuo nesunkiai galima įsitikinti atidžiau patyrinėjus vadinamosios akmeninės druskos gabalėlius.

Ledo kristalai ima rasti, kai esant žemai temperatūrai vandens garų slėgis aplinkoje ima viršyti jų soties slėgį. Tokie vandens garai vadinami persotintais, jie kondensuojasi ir užšąla virsdami ledo kristalais. Ir nors visi ledo kristalai turi šešiakampę simetriją, aplinkos sąlygos (slėgis, temperatūra ir santykinė drėgmė) lemia stebėtiną jų formų įvairovę [7], kuri apibendrinta 1 pav. Vos žemiau užšalimo temperatūros (-2°C) susidarantys ledo kristalai yra plokštelių formos, o esant didelei santykinėi drėgmei, virsta žvaigždės formos polikristalais bei snaigėmis. Esant šiek tiek žemesnei temperatūrai (-5°C), ledo kristalai



↑ 1 pav.
Ledo kristalų morfologija
↗ 2 pav.

Lėdo lūžio rodiklio priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio [73]. Paveikslas intarpe pavaizduotas šviesos lūžis ledo kristale – mėlynos šviesos spinduliai lūžta ir atlenkiami didesniu kampu nei raudonos



užauga ir tampa pailgų strypelių pavidalo. Didėjant santykinei drėgmei, strypeliai tampa tuščiaviduriai, galiausiai virsta ilgomis adatomis. Dar žemesnėje temperatūroje (-15 °C) ledo kristalai augdami vėl įgyja plokštelių formą. Temperatūrai nukritus žemiau -25 °C, ledo kristalų pavidalas priklauso tik nuo santykinės drėgmės: esant mažai santykinei drėgmei, ledo kristalai yra plokštelių, o esant didelei santykinei drėgmei – strypelių pavidalo.

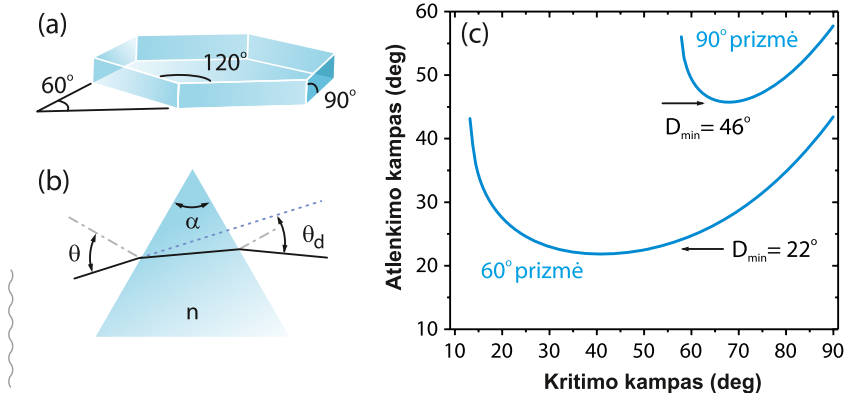
Taisykliausi ledo kristalai (monokristalai) susiformuoja tik tada, kai auga lėtai. Taip nutinka tuomet, kai santykinė aplinkos drėgmė yra maža, t. y. vandens garai mažai persotinti [8]. Aukštai debesyse ledo kristalų augimo dėsninėjimai išlieka labai panašūs [9]. Ne mažiau svarbią įtaką kristalų formai ir dydžiui turi ir kondensacijos centrai – atmosferoje pasklidusios smulkios dulkelės, aerosoliai ar net atskiros neorganinių druskų molekules. Kondensacijos

centrų cheminė sudėtis nulemia elektrocheminius procesus, o šie savo ruožtu – besiformuojančių ledo kristalų formą bei dydį [10, 11]. Įvairiais eksperimentais ir stebėjimais nustatyta, kad taisykliausi ir didžiausi ledo monokristalai užauga vandens garams kondensuojantis ant palyginti didelių jūros druskos dalelių ar tam tikros sudėties dulkelių, kurias po atmosferą išblaško smėlio audros. Tačiau kai kondensacijos centrais tampa sieros rūgštis ar kiti sulfatų junginiai, kurie plačiai pasklinda atmosferoje dėl ugnikalnių veiklos, ledo kristalai užauga arba netaisyklingos formos, arba labai maži. Laikui bėgant ir keičiantis aplinkos sąlygoms, kristalų augimo procesą keičia garavimas nesilydant (sublimacija). Dėl sublimacijos taisyklingų šešiakampių briaunos dyla, o kristalai virsta apvalainomis nodulėmis, kuriose vyksta tik šviesos sklaida [12].

6.3 Šviesos lūžis ledo kristaluose

Taisyklingi ledo monokristalai yra ne kas kita kaip mažytės prizmės, kurios atspindi, laužia ir atlenkia

→ 3 pav.
 (a) Šešiakampio ledo kristalo laužiamieji kampai.
 (b) Šviesos spindulio atlenkimas prizmėje.
 (c) Galimi šviesos spindulių kritimo ir atlenkimo kampai 60° ir 90° ledo prizmėse



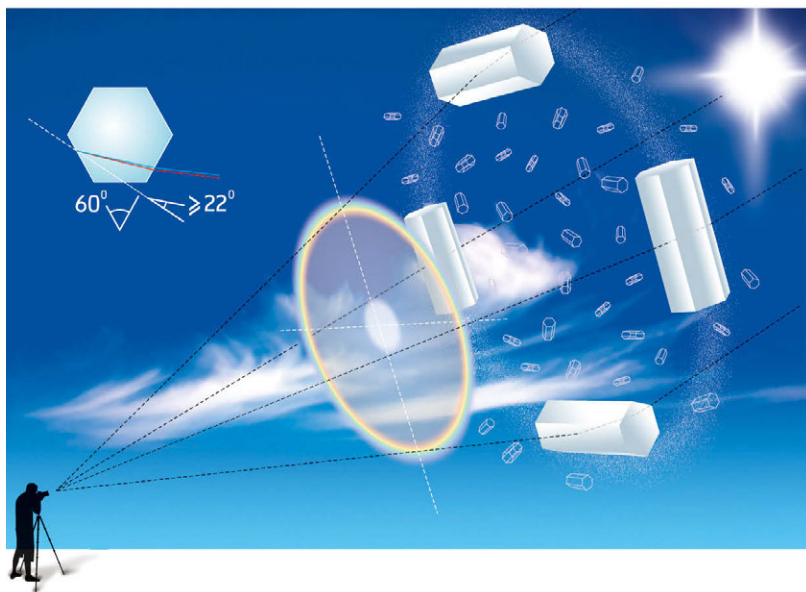
kritisius Saulės šviesos spindulius. Kadangi ledo, kaip ir visų kitų skaidrių medžiagų, lūžio rodiklis priklauso nuo šviesos bangos ilgio (2 pav.), kritusi balta šviesa ledo prizmėje išskaidoma į spektro spalvas. Remiantis šviesos lūžio dėsniu (2.1 posk.), raudonos šviesos spinduliai, kuriems lūžio rodiklis yra mažiausias, atlenkiami mažesniu, o mėlynos šviesos spinduliai, kuriems lūžio rodiklis yra didžiausias, – didesniu kampu pradinės krypties atžvilgiu, kaip parodyta paveikslu intarpe.

Šešiakampių ledo kristalų briaunos atitinka prizmes su 60°, 90° ir 120° laužiamaisiais kampais, kaip pavaizduota 3(a) pav., tačiau baltą šviesą į spalvas skaido tik pirmosios dvi, o 120° prizmėje bet kokių kampu kritusi šviesa grįžta atgal į šviesos šaltinį dėl visiško vidaus atspindžio. Šviesos spindulių atlenkimo kampą prizmėje θ_d , galima apskaičiuoti remiantis geometrine optika ir žinant prizmės viršūnės kampą α , medžiagos (mūsų atveju – ledo) lūžio rodiklį n ir spindulių kritimo kampą θ , kuris matuojamas nuo sta-

tmens paviršiui, kaip pavaizduota 3(b) pav. Šviesos kritimo ir atlenkimo kampų tarpusavio priklausomybė 60° ir 90° ledo prizmėse pavaizduota 3(c) pav. Matyti, kad skirtingo kampo prizmėms egzistuoja skirtingas vadinamasis mažiausias nuokrypio kampas D_{\min}^{15} . Paprastai tariant, tai – mažiausias įmanomas spindulių atlenkimo (nuokrypio) nuo pradinės krypties kampas, kuris, keičiant spindulių kritimo kampą (ar pačios prizmės orientaciją), tik padidėja. 60° ir 90° ledo prizmių mažiausio atlenkimo kampai yra atitinkamai 22° ir 46°. Tai ir yra pagrindiniai kampai, kuriais matomi refrakciniai (susidarantys dėl šviesos lūžio) halai [14].

Halų formavimosi principai iš esmės yra tokie patys, kaip ir vaivorykštės (5.1 posk.). Apskrito (koncentrinio) halo, kuris matomas kaip švytintis ratas aplink šviesulį, formavimosi geometrija, kai ledo prizmės laužiamasis kampas yra 60°, pavaizduota 4 pav. Toks halas vadinamas mažuoju arba 22° halu, o „22°“ žymi ir šio halo spindulį bei mažiausio atlenkimo kampą 60° ledo prizmėse. Šiuo atveju ledo kristalai debesyje orientuoti bet kaip (chaotiškai), tad jų laužiančiųjų briaunų atžvilgiu lygiagretūs Saulės spinduliai krinta ir atlenkiami įvairiausiais kampais. Halo ratą formuoja tik ledo kristalai, atlenkiantys šviesos spindulius mažiausio atlenkimo kampu, kuris šiuo atveju yra 22°

¹⁵ Bet kurios prizmės mažiausio atlenkimo kampą galima apskaičiuoti iš lygybės $\sin\left(\frac{\alpha + D_{\min}}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ žinant prizmės viršūnės kampą α ir lūžio rodiklį n .



← 4 pav.

Koncentrinio (apskrito) halo formavimosi geometrija.
J. Gričiaus pieš.

(3(b) pav.), o stebėtojas mato tik tuos šviesos spindulius, kurie pataiko tiesiai į jo akį (4 pav.). Šiuos spindulius į stebėtoją nukreipia tik tie ledo kristalai, kurie išsidėstę ant regimojo halo rato. Kadangi ledo lūžio rodiklis mėlynai šviesai yra didesnis negu raudonai (2 pav.), mėlynos šviesos mažiausio atlenkimo kampas yra šiek didesnis nei raudonos, o 60° ledo prizmėje šis atlenkimo kampų skirtumas sudaro $0,8^\circ$, kuris ir apibrėžia regimąjį halo rato storį. Dėl to vidinė halo rato pusė yra rausva, o išorinė – melsva. Panašiai kaip ir susidarant vaivorykštės spalvoms, skirtingas spektro spalvas į stebėtojo akį nukreipia skirtingi ledo kristalai, o kiekvienas stebėtojas mato savo halą. Vidinė halo rato dalis yra tamsesnė – ten matoma tik išsklaidyta šviesa, kadangi tokiais kampais, kurie mažesni už mažiausio atlenkimo kampą, ledo kristalai Saulės spindulių atlenkti negali. Tuo tarpu išorinė halo rato dalis yra labai šviesi ir balta – ten susideda visų spalvų šviesa, kuri daugybės chaotiškai išsidėsčiusių ledo kristalų atlenkiama didesniais nei mažiausio atlenkimo kampais.

Beje, kiekvieną halo rato dalį formuoja skirtingos orientacijos ledo kristalai: pačią viršutinę ir apatinę dalis formuoja kristalai, kurių laužiamoji briauna yra vertikalioje plokštumoje, šonines halo dalis – kristalai, kurių laužiamoji briauna yra horizontalioje plokštumoje ir t. t. (4 pav.). Iš to galima suprasti, kodėl halai, kuriuos formuoja dideli ir tvarkiai erdvėje orientuoti kristalai nėra apskriti. Pavyzdžiui, parhelius – menamas saulės (6.7 posk.) formuoja dideli tvarkiai horizontaliai orientuoti plokštelių formos ledo kristalai. Jie laužia šviesą tik horizontaliai, tad parheliai matomi kaip dvi spalvingos dėmės Saulės aukštyje. Tangentinius lankus formuoja dideli tvarkiai erdvėje orientuoti strypelių formos kristalai, kurie laužia šviesą tik vertikalioje plokštumoje (6.6 posk.), todėl tangentiniai lankai liečia mažąją halą jo viršutiniame ir apatiniame taškuose.

Kai ledo kristalo laužiamasis kampas yra 90° , mažiausio atlenkimo kampų skirtumas mėlynai ir raudonai šviesai yra didesnis, dėl to 90° ledo prizmių formuojami

halai spalvingesni. Beje, atkreipsime dėmesį, kad 90° prizmei galimų šviesos kritimo kampų diapazonas, kai neįvyksta visiškas vidaus atspindys, yra smarkiai ribotas, taigi halai, susidarantys 90° ledo prizmėse, matomi tik Saulei esant tam tikrame aukščių intervale (3(c) pav., 6.8 posk.).

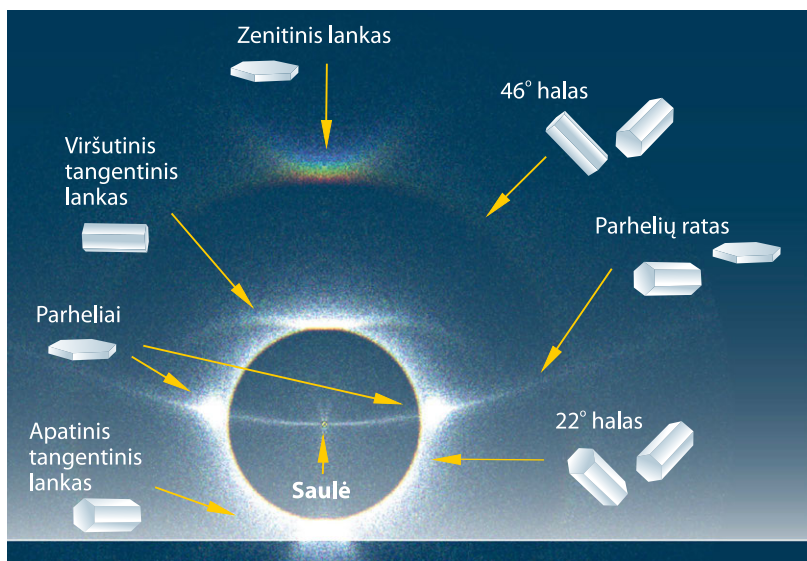
6.4 Halų morfologija

Halai susidaro tik tuomet, kai dangų dengia iš taisyklingų formų ledo kristalų sudaryti aukštieji debesys [15]. Skiriant aukštųjų debesų tipus (3.6 posk.), nesunku iš karto įvertinti halo atsiradimo tikimybę. Geriausiai ir dažniausiai halai matomi tada, kai dangų dengia ištisinis permatomų plunksninių sluoksninių debesų šydas. Šie debesys dažnai susidaro artėjant atmosferos frontams, tad ir halai neretai laikomi orų kaitos pranašais. Labai ryškius halus ar jų fragmentus galime matyti ir plunksniniuose debesyse, o labai retais atvejais – ir ant lėktuvų kondensacijos pėdsakų bei viršutinės priekališkųjų kamuolinių lietaus debesų dalies, kuri taip pat sudaryta iš ledo kristalų. Plunksniniuose kamuoliniuose debesyse halai niekada nesusidaro. Šie debesys yra labai dinamiški ir formuojasi esant didelei santykinėi drėgmei, tad juose ledo kristalų augimas yra labai spartus. Dėl to ledo kristalų formos būna labai netaisyklingos. Halų matomumo trukmė gali būti labai įvairi – nuo keleto minučių iki gero pusdienio ir priklauso nuo meteorologinių sąlygų, lemiančių debesų dinamiką.

Kai dangų dengia ištisinis plunksninių debesų sluoksnis, kuriuose esti ne tik įvairių dydžių, bet ir formų ledo monokristalų, susidaro įspūdingi kompleksiniai halai (angl. *halo displays*), susidedantys iš daugybės įvairiausių fragmentų, užpildančių nemažą dalį ar bemaž visą dangaus skliautą (7, 13, 16 pav.). Beje, ryškiausi ir kontrastingiausi halai matomi tuomet, kai plunksninių debesų sluoksnis

yra palyginti plonas (optinis tankis <1), nes būtent plonaime debesų sluoksnyje išvengiama daugkartinės šviesos sklaidos reiškinii, kurie sulieja spalvas ir sumažina halo kontrastingumą [16].

Halų morfologija (formų įvairovė) yra nepaprastai didelė, o visi halai sąlyginai gali būti skirstomi į šviesos lūžio (refrakcinius) ir atspindžio halus, taip pat pagal tai, kurios kristalo briaunos ar kampai (60° ar 90°) laužia šviesą. Be to, kaip jau minėta, pati halų išvaizda smarkiai priklauso nuo to, kaip – tvarkiai ar chaotiškai ledo – kristalai orientuoti erdvėje. Kadangi refrakciniai halai atsiranda dėl šviesos lūžio, juose daugiau ar mažiau aiškiai matomos Saulės spektro spalvos. Taisyklingų, halus formuojančių ledo monokristalų dydis svyruoja nuo $25\ \mu\text{m}$ iki $0,25\ \text{mm}$ [17]. Kol ledo kristalai yra labai maži ($25\text{--}50\ \mu\text{m}$ dydžio), jų briaunos lygiagrečių Saulės spindulių pluošto atžvilgiu orientuotos chaotiškai. Būtent chaotiška mažųjų ledo prizmių orientacija sukuria koncentrinis halus (švytinčius ratus), kurių centre yra šviesulys – Saulė arba Mėnulis (4 pav.). Tokie yra mažasis (22° spindulio) ir didysis (46° spindulio) halai. Kristalams augant, ima reikštis sunkio jėga, ir palaiptiesi jie ima kristi žemyn. Kristalų kritimo greitis priklauso nuo jų dydžio ir gali siekti kelias dešimtis centimetrų per sekundę [18]. Aerodinaminės jėgos kristalus orientuoja taip, kad oro pasipriešinimas būtų maksimalus. Kaip tik šioje vietoje halų teorijos pradininkai klydo manydami, kad yra atvirkščiai. Plokštelių formos ledo kristalai leidžiasi žemyn siūbuodami į šalį tarsi krintantys medžio lapai ramią rudens dieną, o vidutinė jų plokščiojo paviršiaus padėtis tampa lygiagrečiai žemės paviršiui. Strypeliai krisdami orientuojasi savo ilgąja ašimi horizontaliai žemės paviršiui, neretai įgaudami ir sukamąjį judesį. Dėl aerodinaminio pasipriešinimo $50\text{--}100\ \mu\text{m}$ dydžio ledo kristalai yra iš dalies orientuoti, o didesni nei $200\ \mu\text{m}$ kristalai įgauna visiškai tvarkingą orientaciją erdvėje.



← 5 pav.

Pagrindinės halų modifikacijos ir juos kuriančių ledo kristalų formos. Saulės padėtis parodyta rodykle. Vaizdas gautas modeliuojant „HaloSim“ programa

Orientuotų ledo kristalų kuriami halai yra daug sudėtingesni, o kai kurie jų labai spalvingi ir ryškūs. Tai – parheliai (menamos saulės), zenitinis ir tangentiniai lankai. Orientuoti ledo kristalai sukuria ir atspindžio halus – Saulės arba Mėnulio stulpus ir parhelių ratą. Šie halai yra bespalviai (balti), nes šviesulio šviesa tiesiog atspindima tvarkingai erdvėje orientuotų ledo kristalų plokštumų. Kuo tvarkingesnė kristalų orientacija, tuo ryškesnis jų kuriamas halas. Kaip žinoma, orientuotų ledo kristalų sąlygojamų halų forma ir ryškumas smarkiai priklauso nuo Saulės aukščio virš horizonto.

5 pav. pavaizduotos skaitmeniškai sumodeliuotos pagrindinės ir dažniausiai matomos halų modifikacijos: 22° ir 46° koncentriniai halai, 22° halo viršutinis bei apatinis tangentiniai lankai, parheliai, parhelių ratas ir zenitinis lankas (nepavaizduotas tik Saulės stulpas), kai Saulė pakilusi 25° virš horizonto. Nors halų kampus galima nesunkiai apskaičiuoti remiantis geometrine optika, norint gauti tikrą halo vaizdą, tenka griebtis gana sudėtingų skaitmeninio

modeliavimo metodų. Skaitmeninis halų modeliavimas remiasi matematiniu Monte-Karlo metodu, kai atsitiktiniu būdu įskaitomas daugelio šviesos spindulių atspindys ir lūžis bei ledo kristalų (prizmių) forma ir orientacija erdvėje, o halą formuoja visų spindulių suminis (integrinis) vaizdas [19]. Šis metodas dar vadinamas spindulių trasavimu (angl. *ray tracing*). Halų modeliavimo metodai plačiai taikomi šiuolaikiniams plunksninių debesų sandaros ir dinamikos tyrimams [20].

Išsamių statistinių duomenų apie halų dažnį nėra daug, tačiau palyginus turimus stebėjimų iš skirtingų vietovių duomenis galima padaryti kai kuriuos apibendrinimus. Pavyzdžiui, Olandijoje halai ar jų fragmentai gali būti matomi vidutiniškai 200 dienų per metus [21]. Suomijos šiaurėje sąlygos susidaryti halams yra idealios. Kai kuriais atvejais ten halai stebėti daugiau nei 250 dienų per metus. Jungtinėse Amerikos Valstijose, Solt Leik Sityje (Jutos valstijoje), atlikti tyrimai atskleidė, kad ten halai matomi vidutiniškai 95 kartus per metus [22].



6 pav.
Mažasis (22°) halas aplink Saulę. Viršuje matyti
neryškus spalvotas zenitinis lankas. A. Dubiečio nuotr.



↑ 7 pav.

Mažasis ir didysis halai aplink Mėnulį. Taip pat matyti horizontalūs mažojo halo paryškėjimai – parselenos (6.7 sk.). Iškart virš didžiojo halo švyti Didieji Grįžulo Ratai, o ryškus šviesulys kairėje – Arktūras (Jaučiaganio α).
T. Janušonio nuotr.

Labai panašus halų skaičius registruojamas ir Lietuvoje. Autoriaus stebėjimų 2007–2010 m. duomenimis, halai Lietuvoje matomi vidutiniškai 100 kartų per metus, t. y. kas trečią dieną. Tačiau halų dažnis per metus labai netolygus – mažiausiai halų stebima vėlyvą rudenį ir žiemą (lapkričio–sausio mėnesiais), o daugiausia – pavasarį ir vasarą. Tokių halų sezoniskumą lemia Lietuvos klimato ypatumai: rudenį ir žiemą vyrauja apsiniaukę ir dargano-

ti orai, kai žemų ir storų debesų sluoksnis neretai slepia Saulę ištisas dienas ar net savaites. Labai ryškių pavienių ar kompleksinių halų skaičius Lietuvos padangėje yra nedidelis – tokių gali būti matoma vos keletas per metus. Lietuvos padangėje, kaip, beje, ir visur kitur, dažniausiai sušvinta 22° halas (kartais visas, o kartais tik jo dalis), šio halo viršutinis bei apatinis tangentiniai lankai ir parheliai. Šie trys halų tipai sudaro beveik 80 % visų Lietuvoje matomų halų. Antrą grupę pagal dažnį sudaro zenitinis lankas, Saulės stulpas ir parhelių ratas, kuriems tenka 17 % visų halų. Šios 6 pagrindinės halų modifikacijos sudaro beveik 97 % visų halų, matomų Lietuvos padangėje. Likusios halų modifikacijos, įskaitant ir didįjį halą (46°), Lietuvoje labai retos ir tesudaro 3 % stebėtų halų.



6.5 Apskriti halai

Apskritus (koncentrinius) halus formuoja maži (25–50 μm), chaotiškai erdvėje išsidėstę ledo monokristalai. Geriausiai žinomas ir dažniausiai matomas yra 22° halas, dažnai vadinamas mažuoju halu (**6 pav.**). Tai – švytintis ratas apie šviesulį, kurio spindulys yra 22° , o skersmuo – 44° . Aiškiausiai šis halas matomas aplink Mėnulio pilnatį, o aplink Saulę jį įžiūrėti gana sunku dėl akinančios jos šviesos. Tačiau „palsėpus“ Saulę už pastatų, medžių, kitų kliūčių ar žiūrint pro saulės akinius, mažasis halas tampa aiškiai matomas.

22° halą kuria šviesa, atlenkiama chaotiškai erdvėje orientuotų mažyčių strypelių formos ledo kristalų, kurių laužiamasis kampas yra 60° (**4 pav.**). Dėl šiek tiek skirtingo raudonų ir mėlynų spindulių atlenkimo kampo vidinė halo apskritimo pusė yra rausva arba rausvai ruda, o išorinė – melsva arba balsva. Galima pastebėti ir tai, kad vidinis raudonas halo kraštas yra daug sodresnis nei išorinis mėlynas, nes išoriniame persikloja ir kitų spalvų šviesos spinduliai, atlenkiami didesniu kampu nei minimalus atlenkimo kampas. Atlenkimo kampų skirtumas bei šviesulio regimasis skersmuo lemia halo rato kampinį plotį, kuris

8 pav.

Viršutinis 22° halo tangentinis lankas, kai Saulė neaukštai. Taip pat gerai matomas pats 22° halas ir parheliai. *A. Dubiečio nuotr.*

9 pav.

Į apibrėžtinį halą susiliejęs viršutinis ir apatinis tangentiniai lankai. *T. Janušonio nuotr.*

nesiekia 1° ir į kurį sutelpa visos Saulės spektro spalvos. Be to, svarbu ir ledo kristalų dydis – jei jie labai maži (mažesni nei 20 μm), juose kartu vyksta ir šviesos bangų difrakcija, dėl ko regimasis halo rato storis padidėja. Kadangi šviesos spinduliai negali būti atlenkiami mažesniu nei minimalus atlenkimo kampas, vidinė ryškaus mažojo halo rato pusė visada yra tamsesnė už išorinę (**6 pav.**), o rato viduje matome tik išsklaidytą šviesą. Kai mažasis halas labai ryškus, jo vidinės ir išorinės pusių kontrastas tiesiog stublinamas, neretai žmonės teigia matantys tik labai tamsų ratą aplink Saulę. Mažojalo kontrastas ir šviesumas smarkiai priklauso nuo debesų šydo tolygumo. Dangumi praplaukiant nedideliams plunksniniams debesims, dažnai matomi tik atskiri nedideli puslankiai – mažojo halo fragmentai.

Kur kas rečiau matomas 46° halas, vadinamas didžiuoju halu (**7 pav.**). Jį kuria tie patys strypelių formos ledo kristalai, tačiau šiuo atveju šviesos spindulius laužia



↑ **10 pav.**
Ryškus ir spalvingas parhelis – mažųjų ledo prizmių
į spalvas išskaidyta balta Saulės šviesa.
A. Dubiečio nuotr.

stačiakampė (90°) kristalų briauna. Didžiojo halo kampinis skersmuo yra 92° . Tai ketvirtis visos dangaus sferos skersmens. Tuomet, kai ryškūs mažasis ir didysis halai matomi kartu, reginys ištis išpūdingas. Vienok strypelių pavidalo kristalai labai dažnai būna tuščiaviduriai ir neturi taisyklingų stačiakampių briaunų (**1 pav.**), tad ir didysis halas yra retas svečias mūsų padangėje.

6.6 Tangentiniai mažojo halo lankai

Dažnai galima pastebėti, kad viršutinė ir apatinė mažojo halo dalys yra kur kas ryškesnės ir spalvingesnės nei likusi halo rato dalis. Šie paryškėjimai vadinami tangentiniais lankais (angl. *tangent arcs*, **8, 9, 13 pav.**). Tangentiniai lankai, kaip ir 22° halas, atsiranda dėl šviesos lūžio strypelių formos ledo kristaluose, tačiau tangentinių lankų atveju šie kristalai yra dideli ($200\ \mu\text{m}$) ir dėl sunkio bei aerodinaminio

pasipriešinimo jėgų įgyja horizontalią orientaciją. Dėl šios priežasties tangentiniai lankai yra ryškesni ir nepalyginti spalvingesni už patį mažąjį halą.

Kol Saulė neaukštai, viršutinis ir apatinis tangentiniai lankai matomi kaip du atskiri lankai, liečiantys mažąjį halą pačiame viršutiniame ir apatiniame taškuose. Tangentiniai lankai išlinksta dėl to, kad šviesos spinduliai į horizontaliai orientuotus kristalus krinta įkypai, todėl jų laužiamasis ir atitinkamai mažiausio nuokrypio kampai sąlyginai padidėja [23]. Kadangi laikui bėgant kristalų orientacija erdvėje išlieka ta pati, o keičiasi tik Saulės aukštis ir jos spindulių kritimo kampas, tangentinių lankų forma keičiasi. Saulei esant žemai, matomas tik viršutinis tangentinis lankas, kuris išlinkęs į priešingą pusę nuo Saulės (**8 pav.**). Saulei kylant, jo išlinkio kreivumas tolydžio mažėja, kol galiausiai tangentinis lankas išlinksta į Saulės pusę. Lygiai taip pat keičiasi ir apatinio tangentinio lanko išlinkis. Saulei pakilus aukštai ($>45^\circ$ virš horizonto), viršutinis ir apatinis tangentiniai lankai susilieja į vientisą vertikaliai suplotą elipsę, kurios viduje matomas mažasis halas (**9 pav.**). Dažnai toks elipsinis halas vadinamas apibrėžtiniu halu (angl. *circumscribed halo*). Pasitaiko atvejų, kai mažojo halo beveik arba išvis nesimato, o jo tangentiniai lankai ar vienas jų švyti visu grožiu (**23 pav.**). Taip nutinka, kai plunksniniai debesys ar deimantų dulkelės (**6.11 posk.**) sudaryti tik iš gana didelių strypelių formos ledo kristalų, kurie visi yra tvarkiai orientuoti erdvėje. Kai Saulė neaukštai, ypač rudenį ir žiemą, matomas tik viršutinis tangentinis lankas, kadangi apatinis slepiasi už horizonto.

6.7 Menamos saulės (parheliai)

Parheliai (angl. *parhelia*) – tai ryškios ir spalvingos dėmės, išsidėsčiusios 22° kampiniu atstumu abipus Saulės. Parheliai visada yra Saulės aukštyje ir keliauja kartu su ja



dangaus skliautu, todėl dar kartais vadinami saulabroliais, arba Saulės šunimis (angl. *sun dogs*). Jei kartu matosi ir mažasis halas, parheliai atrodo kaip horizontalūs šio halo paryškėjimai (7 ir 8 pav.). Tačiau parhelių spalvos yra kur kas sodresnės ir intensyvesnės nei mažojo halo, kadangi juos formuoja horizontaliai orientuotų (taigi gana didelių) plokštelių formos ledo kristalai. Kadangi ir vienu, ir kitu atveju ledo prizmių laužiamasis kampas yra tas pats (60°), parhelių ir mažojo halo spalvų išsidėstymas yra identiškas (raudonas parhelio kraštas visada yra arčiau, o mėlynas – toliau nuo Saulės). Ryškiausi ir spalvingiausi parheliai matomi padrikuose plunksniniuose debesyse (10 pav.). Nelygu debesų forma, parheliai gali įgauti įdomius, o kartais ir neįtikėtinus pavidalus. Nedideliuose pavieniuose plunksniniuose debesyse labai dažnai matomas tik vienas parhelių.

Parheliai ryškiausi, kai Saulė yra pakilusi į maždaug 15° aukštį virš horizonto. Jai toliau kylant, parheliai palaipsniui silpsta, jų spalvos blykšta, o padėtis pamažu tolsta nuo mažojo halo rato. Kaip ir tangentinių lankų atveju, aukštai esančios Saulės spinduliai į horizontaliai orientuotus ledo kristalus krinta įkypai, dėl ko, kaip jau minėta anksčiau, santykinai padidėja šių mažų ledo priz-

mių laužiamasis, taigi ir mažiausio atlenkimo, kampas. Parheliai visiškai išnyksta Saulei pakilus aukščiau nei 60° virš horizonto [24]. Jei parhelius formuojantys ledo kristalai nėra idealiai orientuoti, parheliai ištįsta vertikalčiai, virsdami spalvotais puslankiais, kuriuos nepatyrę stebėtojai lengvai gali palaikyti vaivorykštės fragmentais (22 pav.). Kartais parhelių ryškumas būna tiesiog akinantis, tad jie gali būti palaikyti Saule (11 pav.), ypač jei šios tiesiogiai nesimato. Dėl to parheliai kartais vadinami menamomis saulėmis (angl. *mock suns*). Itin retais atvejais parheliai gali susidaryti ir ant lėktuvų kondensacijos pėdsakų, tačiau taisyklingi ledo kristalai kondensacijos pėdsakuose susidaro labai retai ir tik esant ypatingoms aplinkos sąlygoms [25].

Parheliai gali būti matomi ir mėnulio, ypač pilnatis, šviesoje. Tuomet jie vadinami parselenomis (angl. *parsele-na*, 7 pav.). Žiūrint plika akimi, parselenos neatrodo tokios spalvingos, nes tamsoje akis sunkiai skiria spalvas, tačiau nuotraukose ryškios parselenos spalvingumu nenusileidžia parheliams.

↑ 11 pav.
Tikroji (kairėje) ir menamoji (dešinėje) saulės, matomos pro siaurą plyšį tamsių debesų sluoksnyje.
A. Dubiečio nuotr.



↑ 12 pav.
Zenitinis lankas. A. Dubiečio nuotr.

6.8 Zenitinis lankas

Kai švyti ryškūs parheliai, o Saulė yra neaukštai, pažvelgus beveik tiesiai virš galvos, dažnai galima išvysti reto grožio ir spalvų sodrumo, išlinkusį į priešingą pusę nuo Saulės puslankį – zenitinį lanką (angl. *circumzenithal arc*, 12 pav.). Zenitinis lankas, kartais dar vadinamas Bravės lanku, neskaitant parhelių, yra pats įspūdingiausias ir spalvingiausias iš visų halų. Spalvų sodrumo ir ryškumo zenitinis lankas gali drąsiai varžytis su vaivorykšte. Jo spalvų įspūdį sustiprina ir tai, kad regimasis plunksninių debesų sluoksnio storis zenite yra ploniausias, tad dažnai atrodo, jog zenitinis lankas švyti visiškai giedrame danguje (12 pav.).

Zenitinį lanką, kaip ir parhelius, formuoja tos pačios horizontaliai orientuotos ledo kristalų plokštelės, tačiau šiuo atveju šviesą laužia stačiakampė (90°) jų briauna. Zenitinis lankas kartais klaidingai vadinamas didžiojo (46°) halo viršutiniu tangentiniu lanku, kadangi liečia didįjį halą, jei šis matomas, pačiame viršutiniame jo taške. Šis nuostabus grožio halas yra ryškiausias Saulei esant 22° aukštyje

virš horizonto [26]. Saulei kopiant aukštyn, zenitinis lankas pamažu plečiasi ir blėsta, kol visiškai išnyksta Saulei pakilus į 32° aukštį virš horizonto. Kodėl taip yra, matyti 3(c) pav. – 90° prizmė laužia šviesą tik tada, kai spindulių kritimo kampas (matuojamas nuo statmens paviršiui) yra tarp 58° ir 90° . Kadangi ledo prizmių paviršiai orientuoti horizontaliai, kritimo kampas bus lygus 90° ir Saulės aukščio virš horizonto skirtumui, taigi ir gautume 32° Saulės pakilimo aukštį, lemiantį ribinį spindulių kritimo į ledo kristalus kampą.

Zenitinį lanką yra matę, deja, nedaugelis, nes retai kada užverčiame galvą pasižiūrėti, kas gi dedasi ten, aukštai. Zenitinis lankas yra tikra bet kurio kompleksinio halo puošmena (13 pav.). Pats geriausias metas pamatyti zenitinį lanką – pavasaris, rudenį, ypač žiema, kai Saulė visą dieną neaukštai tepakyla virš horizonto. Panašiai kaip zenitinis lankas, formuojasi ir vadinamasis horizontinis lankas (angl. *circumhorizontal arc*). Tai spalvinga juosta palei horizontą. Tačiau horizontinis lankas tampa matomas tik Saulei pakilus labai aukštai – daugiau nei 57° virš horizonto. Pietų kraštuose horizontinio lanko pasirodymas simboliuoja vasaros pradžią. Lietuvoje net ir ilgiausią dieną maksimalus Saulės aukštis nesiekia 60° , tad horizontinis lankas mūsų platumose, deja, beveik nestebimas.

6.9 Atspindžio halai

Atspindžio haluose šviesa nėra išskaidoma į spalvas, tačiau šie halai yra ne mažiau įdomūs ir efektingi. Atspindžio halus formuoja dideli, taigi orientuoti erdvėje, tiek plokštelių, tiek strypelių formos ledo kristalai. Dažniausiai matomas atspindžio halas yra Saulės stulpas (angl. *sun pillar*, 14 pav.) – siauras vertikalus Saulės „spindulys“, atsirandantis dėl šviesos atspindžio nuo ledo kristalų plokštumų. Saulės stulpas matomas tik jai esant žemai – tekant ar leidžiantis,



● **13 pav.**
Kompleksinio halo fragmentas, kuriame matyti
zenitinis lankas, labai ryškus viršutinis tangentinis
lankas ir mažasis halas. *A. Dubiečio nuotr.*



↑ **14 pav.**

Saulės stulpas dėl atspindžio nuo horizontaliai orientuotų plokštelių formos ledo kristalų.
A. Dubiečio nuotr.

↗ **15 pav.**

Nedidelis nuo parhelio nutįsęs parhelių rato fragmentas. *A. Dubiečio nuotr.*



ir paprastai išnyksta Saulei pakilus į didesnę nei 60 aukštį virš horizonto. Saulės stulpo aukštis apytikriai lygus dvigubam šviesą atspindinčios kristalo plokštumos nuokrypio kampui nuo horizontalios padėties. Kai šviesą atspindinčios kristalų plokštumos nėra idealiai horizontaliai orientuotos, Saulės stulpas ištišta¹⁶. Plokštelių formos kristalų šviesą atspindinčių plokštumų nuokrypis nuo vertikalios padėties paprastai esti nedidelis, tad tokie kristalai formuoja tik palyginti neaukštus, bet ryškius Saulės stulpus (**14 pav.**). Pačius aukščiausius saulės stulpus formuoja orientuoti strypelių formos ledo kristalai, o retkarčiais jų kuriamus Saulės stulpus vainikuoja ryškus viršutinis tangentinis lankas [27]. Kuo ledo kristalai didesni, tuo Saulės stulpas yra siauresnis, ryškesnis ir kontrastingesnis. Efektingiausiai Saulės stulpas matomas, kai pati Saulė slepiasi už debesies ar jau yra nusileidusi. Kartais Saulės stulpas gali nutįsti tiek į viršų, tiek į apačią nuo Saulės. Kaip ir Saulės stulpai, matomi ir Mėnu-

lio stulpai, tačiau pastarieji dažniausiai būna ne tokie tokie ryškūs ir efektingi. Ypatingo grožio ir aukščio šviesos stulpai susidaro nuo dirbtinių šviesos šaltinių ore tvyrant lediniam rūkui – vadinamosioms deimantų dulkėms (6.11 posk.).

Ne mažiau įdomus, bet kur kas rečiau matomas atspindžio halas vadinamas parhelių ratu (angl. *parhelic circle*). Jei visą dangų dengia ištisinis plunksninių debesų sluoksnis, parhelių ratas matomas kaip siauras horizontalus švytintis ruožas, esantis Saulės aukštyje ir apjuosiantis visą dangaus skliautą. Taip nutinka gana retai, tad dažniausiai matomi tik didesni ar mažesni parhelių rato fragmentai, atrodantys kaip smarkiai horizontaliai ištišęs švytintis parhelio tęsinys (**15 pav.**). Parhelių ratą formuoja šviesos atspindys nuo vertikalų tvarkiai orientuotų plokštelių formos ledo kristalų briaunų (vertikalų plokštumų). Skirtingai nei Saulės stulpas, parhelių ratas gali būti matomas nepriklausomai nuo Saulės aukščio virš horizonto.

¹⁶ Panašiai formuojasi ir kitas labai gražus reiškinys – Saulės arba Mėnulio takas virš banguoto vandens. Tik šiuo atveju šviesą atspindi ne ledo kristalų plokštumos, o nedidelių bangelių keteros.



→ **16 pav.**

Nepaprastai ryškūs parhelių ratas. Pati Saulė pasislėpusi už pastato, o aplink ją švyti vos matomas mažasis halas, nuo jo nutolę parheliai ir ryškūs į Saulės pusę išlinkęs viršutinis tangentinis lankas. Ant parhelių rato matyti vienas iš paranthelių (viršuje dešinėje), taip pat neryškūs Vegenerio lankai.

A. Varanavičiaus nuotr.

Labai retais atvejais, kai ledo kristalai yra idealiai orientuoti ir užpildo visą dangų, parhelių rato kontrastas gali būti tiesiog stulbinamas (**16 pav.**). Tuomet ant parhelių rato galima pastebėti ir daugiau egzotiškų detalių – šviesesnes dėmes bei dangaus skliautu besidriekiančius neryškius lankus. Šviesesnė dėmė priešingame Saulei taške vadinama anthelium (angl. *anthelion*) arba antisaulė. Ji išryškėja tik tuomet, kai Saulė yra neaukštai. Be jos, ant parhelių rato gali būti matomos dar dvi ryškesnės šviesios dėmės, kurios išsidėsčiusios 120° kampiniu atstumu nuo Saulės. Tai – vadinamieji parantheliai (angl. *parant-*

helia). Būtent šiose dangaus skliauto vietose Saulės šviesos kritimo kampas į kristalus yra toks, kad šviesa gali ne tik atsispindėti nuo priekinių ledo kristalų briaunų, bet ir ta pačia kryptimi atsispindėti pačių kristalų viduje, dėl to parantheliai yra šviesesni už patį parhelių ratą [28]. Toks vidaus atspindys įvyksta tik labai siaurame šviesos spindulių kritimo kampų intervale, tad parantheliai yra labai kompaktiški. Atidžiai įsižiūrėjus, **16 pav.** matomi ir du neryškūs lankai, susikertantys priešingame Saulei taške. Tai – anthelių lankai (angl. *anthelic arcs*), dar vadinami Vegenerio lankais. Jų susidarymo geometrija yra sudėtinga.



● 17 pav.

Akinanti subsaulė, matoma pro lėktuvo langą.
P. Polesanos nuotr.



↑↗→ 18 pav.
Šerkšno kristalai ir snaižės. A. Dubiečio nuotr.

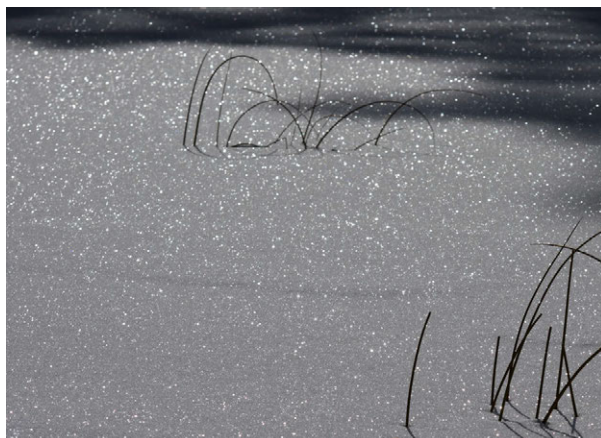


Iš lėktuvo gali būti matomi ir kur kas paprastesni atspindžio halai, susidarantys Saulei atsispindint nuo orientuotų ir taisyklingų plokštelių formos ledo kristalų, esančių debesies viršuje ar apačioje [29]. Dėl akinamo atspindžio šie halai vadinami subsaulėmis (angl. *subsuns*), kai atspindys yra žemiau tikrosios Saulės (17 pav.) ir supersaulėmis (angl. *supersuns*), kai atspindys yra virš Saulės.

6.10 Ledo kristalai ant žemės

Šerkšno kristalai, kuriais galima pasigrožėti šaltais pavasario, rudens ar žiemos rytais, išlaiko panašius simetrijos ir augimo dėsningumus kaip ir ledo kristalai debesyse. Kadangi viena briauna šerkšno kristalai liečiasi prie kokio nors paviršiaus, jie nėra labai taisyklingi, tačiau, esant skirtingai oro temperatūrai ir drėgmei, augdami jie išlaiko šešiakampės simetrijos bruožus ir įgauna didelių plokštelių ar strypelių pavidalą, o visos snaižės, kaip jau minėta, yra šešiakampės (18 pav.).

Šviesos atspindžio ir lūžio reiškiniais galima pasigrožėti po šaltos nakties ant žemės susidariusiuose mažyčiuose ledo monokristaluose ir net atskirose ant sniego pakloto pabirusiose snaižėse, jei tik jos turi aštrias ir nenudilusias briaunas. Vaiskų žiemos rytą ant lygaus sniego nukloto



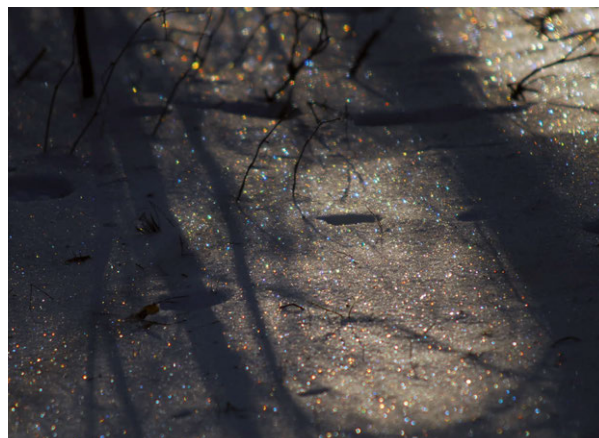
↑ 19 pav.

Sniego spindesys. A. Dubiečio nuotr.

↗ 20 pav.

Įvairiaspalvis sniego žėrėjimas. J. Galinio nuotr.

paviršiaus esantys ir mažičiai, plika akimi neįžiūrimi ledo monokristalai, ir didesnės snaižės, atspindėdamos Saulės šviesą, ima akinamai žvilgtėti (19 pav.). Tai – sniego spindesys (angl. *glint*). Sniego spindesys matomas bet kuria kryptimi Saulės spindulių atžvilgiu, tačiau išpūdingiausias akinantis spindesys matomas žvelgiant Saulės kryptimi, kai pati Saulė dar nėra aukštai. Spindint sniegui, galima pastebėti, kad, žvelgiant tam tikromis kryptimis, mažičiai ledo kristalai staiga tampa spalvoti. Palengva keičiant matymo kampą, pavyzdžiui, kraipant galvą, ledo kristalai spindi vis kita spalva, tarytum pusnys būtų nubertos mažičiais įvairiaspalviais brangakmeniais (20 pav.). Tai – sniego žaižaravimas arba žėrėjimas (angl. *sparkle*), kai mažičiai, plika akimi nematomi ledo monokristalai laužia baltus Saulės spindulius, išskaidydami juos į visas vaivorykštės spalvas (2 pav. int.). Sniego žaižaravimas ypač išpūdingai atrodo miške, Saulės spinduliams šviečiant pro medžių ar krūmų šakas, kur šešėliai kaitaliojasi su pusšešėliais ir tiesioginių Saulės spindulių apšviečiamais sniego ploteliais.



Kol Saulė nepakilusi aukštai, ant lygaus paviršiaus, pavyzdžiui, sniegu nukloto užšalusio ežero ar pievos, po šaltos nakties galima įžvelgti ir mažojo halo puslankį (21 pav.), kuris matomas kaip ryški žaižaruojančio sniego juosta. Statiniame vaizde puslankis nėra labai ryškus, tačiau jis gerai matomas judant. Jei visos ledo monokristalų briaunos taisyklingos, galima pastebėti netgi dalį didžiojo halo. Įdieniojus ir įšilus orui, mažičiai ledo monokristalai ima lydėtis ir garuoti, jų briaunos suapvalėja, tad pirmiausia išnyksta sniego žaižaravimas, po to ir spindesys.

6.11 Deimantų dulkės

Žiemą esant saulėtam ir ramiam orui, didelei oro drėgmei ir staiga atšalus, retkarčiais gali susidaryti ledinis rūkas. Tuomet ore sklando begalė mažičių ledo kristalėlių, kurie akinamai tarsi deimantai blykčioja Saulės šviesoje. Šis ledinis rūkas vadinamas deimantų dulkėmis (angl. *diamond dust*). Tai vos keleto mikrometrų skersmens ore plevenantys ledo monokristalai. Lietuvoje šis reiškinys gana retas. Deimantų dulkės susidaro tik labai šaltu oru,



● 21 pav.
Mažoji halo-puslankis ant sniego. *J. Galinio nuot.*



iki mūsų platumų atklydus šiaurės ar Sibiro anticiklonams. Tačiau kalnuose ar toli šiaurėje, kur vyrauja visai kitoks klimatas, deimantų dulkės yra gana įprastas reiškinys. Esant pakankamai oro drėgmei, deimantų dulkes sudarantys ledo monokristalai gali užaugti ir labai dideli – iki kelių

↑ **22 pav.**

Ryškūs vertikaliai ištęję parheliai deimantų dulkėse.
A. Dubiečio nuotr.

← **23 pav.**

Viršūtinis tangentinis lankas, kuriame galima įžiūrėti netgi atskirus deimantų dulkių ledo mikrokristalus.
A. Dubiečio nuotr.

dešimčių ar net šimtų mikrometrų. Tuomet žvelgiant į Saulę pro permatomą tokių deimantų dulkių šydą, susidaro neparastai ryškūs halai (**22, 23 pav.**). Deimantų dulkių halai yra patys didingiausi ir įspūdingiausi, kadangi susidaro visai arti, vos keli šimtai metrų atstumu nuo stebėtojo, o jų šviesa pakeliui nėra išsklaidoma ar nuslopinama. Deimantų dulkės yra dažnas reiškinys šiaurėje, todėl Skandinavijoje, Grenlandijoje, Aliaskoje ar Antarktidoje matomi įspūdingiausi kompleksiniai halai.

Mieste naktį susidarančios deimantų dulkės gali tapti nuostabaus ir neįprasto reginio priežastimi. Dideli ir orientuoti deimantų dulkių kristalai, atspindėdami gatvės žibintų šviesas, sukuria aukštus šviesos stulpus, kurie tarsi lazerio spinduliai skrodžia tamsų dangų (**24 pav.**). Šviesos stulpai susidaro lygiai taip pat, kaip ir Saulės stulpas, o daugybė vienu metu švytinčių šviesos stulpų sukuria išties užburiantį ir nepamirštamą reginį.



● 24 pav.
Šviesos stulpai virš Vidiškių miestelio.
R. Balčiūno nuotr.



↑ 25 pav.
Piramidės formos ledo kristaluose susidaręs
nejprasto spindulio (18°) halas, matomas mažoje
(22°) halo viduje. A. Dubiečio nuotr.

6.12 Ar viskas halų pasaulyje jau atrasta?

Halų stebėjimai ir tyrinėjimai iki šiol tebeturi mokslinę vertę, tad traukia ne tik smalsių dangaus tyrinėtojų, bet ir profesionalių mokslininkų dėmesį. Klaidinga būtų manyti, kad halų pasaulyje jau viskas atrasta. Bendradarbiaujant halų stebėjimo entuziastams ir mokslininkams, Suomijoje įsteigtas ir sėkmingai veikia gerai organizuotas halų stebėtojų tinklas, kurio tikslas – retų ir neįprastų halų stebėjimai [30]. Būtent šio tinklo gauti rezultatai visai neseniai padėjo įrodyti, kad, esant labai žemai temperatūrai (apie -80°C), aukštai troposferoje susidaro itin retos – kubinės simetrijos (stačiakampiai) ledo kristalai [31], kurių egzistavimo faktas ilgą laiką buvo ginčijamas. Kitais atvejais, taip pat esant ekstremalioms aplinkos sąlygoms, staiga smarkiai nukritus temperatūrai, ledo kristalų augimo greitis išilgai jų ašių ima labai skirtis, ir šešiakampiai ledo kristalai tampa kitokie – jų viršūnės nusmailėja, o patys kristalai tam-

pa panašūs į mažytes dvipuses piramides [32]. Piramidės formos ledo kristalų kampai yra įvairesni, pavyzdžiui, be įprastinių 60° ir 90° laužiamųjų kampų, piramidėse yra ir 52° laužiamasis kampas, formuojantis neįprasto spindulio (18°) koncentrinį halą (25 pav.). Vidutinėse platumose, taigi ir Lietuvoje, sąlygos susidaryti piramidžių formos ledo kristalams susiklosto labai retai, tad ir jų kuriami halai yra tikra retenybė. Įdomu tai, kad net ir mūsų laikais atrandama naujų, iki šiol nestebėtų halų formų ar jų fragmentų, pavyzdžiui, 2008 m. vasarą Suomijoje aplink Saulę stebėti net 8 skirtingo spindulio koncentriniai halai [33].

Jau kuris laikas manoma, kad halai, susidarantys kitų planetų ar jų palydovų atmosferose, gali padėti tiriant jų atmosferų cheminę sandarą, temperatūrų režimą ir ten susidarancius debesis [34]. Vienas įdomiausių tokių tyrimų objektų yra Saturno palydovas Titanas, turintis labai tankią atmosferą, kurios 98 % sudaro azotas, o likusią dalį metanas ir nedideli kiekiai įvairių organinių bei neorganinių anglies junginių. Šaltoje Titano atmosferoje metanas atlieka panašų vaidmenį, kaip ir vanduo Žemės atmosferoje (3.10 posk.). Visai tikėtina, kad metano garai Titano atmosferoje užšąla formuodami kubinės simetrijos metano kristalus, o pro tokius debesis prasišviečiant Saulei, gali susidaryti halai [35]. Kol kas šios idėjos yra iš fantastikos srities, bet kas žino, gal netrukus iš tikrųjų bus atrasti ir pamatyti pirmieji nežemiški halai.

Bibliografija

1. W. Tape, E. Seidenfaden, G. P. Können, *The legendary Rome halo displays*, *Applied Optics* **47**, 2008, H72–H84.
2. A. J. Weinheimer, C. A. Knight, *Scheiner's halo: cubic ice or polycrystalline hexagonal ice?*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **44**, 1987, 3304–3308.
3. M. G. J. Minnaert, *Light and color in the outdoors*, Springer-Verlag, New York, 1993.
4. W. Tape, *Analytic foundations of halo theory*, *Journal of the Optical Society of America* **70**, 1980, 1175–1192.
5. W. Tape, G. Können, *A general setting for halo theory*, *Applied Optics* **38**, 1999, 1552–1625.
6. A. Ono, *The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **26**, 1969, 138–147.
7. K. G. Libbrecht, *The physics of snow crystals*, *Reports on Progress in Physics* **68**, 2005, 855–895.
8. J. Hallett, *Faceted snow crystals*, *Journal of the Optical Society of America A* **4**, 1987, 581–588.
9. M. Bailey, J. Hallett, *Growth rates and habits of ice crystals between -20°C and -70°C*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **61**, 2004, 514–544.
10. K. Sassen, *Halos in cirrus clouds: why are classical displays so rare?*, *Applied Optics* **44**, 2005, 5684–5687.
11. W. Cantrell, A. Heymsfield, *Production of ice in tropospheric clouds*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **86**, 2005, 795–807.
12. J. Nelson, *Sublimation of ice crystals*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **55**, 1988, 910–919.
13. S. G. Warren, *Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave*, *Applied Optics* **23**, 1984, 1206–1225.
14. W. Tape, *Geometry of halo formation*, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1122–1132.
15. W. Tape, *Some ice crystals that made halos*, *Journal of the Optical Society of America* **73**, 1983, 1641–1647.
16. S. D. Gedzelman, *Visibility of halos and rainbows*, *Applied Optics* **19**, 1980, 3068–3074.
17. A. B. Fraser, *What size of the crystals causes the halos?*, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1112–1118.
18. R. List, R. S. Schemenauer, *Free-fall behavior of planar snow crystals, conical gaupel and small hail*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **28**, 1971, 110–115.
19. F. Pattloch, E. Tränkle, *Monte Carlo simulations and analysis of halo phenomena*, *Journal of the Optical Society of America A* **1**, 1984, 520–526.
20. K. Sassen, N. C. Knight, Y. Takano, A. J. Heymsfield, *Effects of ice-crystal structure on halo formation: cirrus cloud experimental and ray-tracing modeling studies*, *Applied Optics* **33**, 1994, 4590–4601.
21. P. P. Hattinga Verschure, *Thirty years of observing and documenting sky optical phenomena*, *Applied Optics* **37**, 1998, 1585–1588.
22. K. Sassen, J. Zhu, S. Benson, *Midlatitude cirrus cloud climatology from the Facility for Atmospheric Remote sensing. IV. Optical displays*, *Applied Optics* **42**, 2003, 332–341.
23. R. White, *An analytic theory of certain halo arcs*, *Journal of the Optical Society of America* **66**, 1976, 768–772.
24. R. S. McDowell, *The formation of parhelia at higher solar elevations*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **31**, 1974, 1876–1884.
25. R. Sussmann, *Optical properties of contrail-induced cirrus: discussion of unusual halo phenomena*, *Applied Optics* **36**, 1997, 4195–4201.
26. R. S. McDowell, *Frequency analysis of the circumzenithal arc: Evidence for the oscillation of ice-crystal plates in the upper atmosphere*, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1119–1123.
27. A. J. Mallmann, J. L. Hock, R. G. Greenler, *Comparison of Sun pillars with light pillars from nearby light sources*, *Applied Optics* **37**, 1998, 1441–1449.
28. A. J. Mallmann, R. G. Greenler, *Origins of anthetic arcs, the anthetic pillar and the antheion*, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1107–1112.
29. G. P. Können, S. Y. van der Werf, *Reflection halo twins: subsun and supersun*, *Applied Optics* **50**, 2011, F80–F88.
30. M. Pekkola, *Finnish Halo Observing Network: search for rare halo phenomena*, *Applied Optics* **30**, 1990, 3542–3544.
31. M. Riikonen, M. Sillanpää, L. Virta, D. Sullivan, J. Moilanen, I. Luukkonen, *Halo observations provide evidence of airborne cubic ice in the Earth's atmosphere*, *Applied Optics* **39**, 2000, 6080–6085.
32. W. Tape, J. Moilanen, *Atmospheric halos and the search for angle X*, American Geophysical Union, 2006.
33. J. Luomanen, *Rare display of eight concentric halos in Tampere, Finland, on 5 June 2008*, *Applied Optics* **47**, 2008, H199–H202.
34. E. Whaley, G. E. Mclaurin, *Refraction halos in the solar system. I. Halos from cubic crystals that may occur in atmospheres in the solar system*, *Journal of the Optical Society of America A* **1**, 1984, 1166–1170.
35. G. P. Können, *Symmetry in halo displays and symmetry in halo-making crystals*, *Applied Optics* **42**, 2003, 318–331.

7. Vainikai, aureolės ir vaivorykštiniai debesys



• *J. Galinio nuotr.*



↑ 1 pav.
Vainikas aplink Mėnulį. T. Janušonio nuotr.

7.1 Spalvoti ratilai aplink šviesulius

Kai dangų dengia pusiau skaidrūs viduriniojo aukšto debesys, žvelgiant pro juos į Saulę ar Mėnulį, kartais galima pastebėti efektingus šviesulį supančius spalvotus ratilus – vainiką (1 pav.) [1]. Pirmasis vainiko ratilas yra mėlvas ar net violetinis, vidurinis – žalsvas arba žaliai gelsvas, o išorinis – rausvas ar net raudonas. Toliau spalvos vėl atsikartoja ta pačia tvarka, tačiau jų ryškumas greitai silpsta, spalvos blunka. Ypatingais atvejais gali būti matomos trys ar daugiau tokių spalvotų kaskadų.

Balta ir labai šviesi sritis, esanti vainiko centre, vadinama aureole. Aureolės kampiniai matmenys dar mažesni nei vainiko, o jos spindesys beveik prilygsta paties šviesulio

spindesiui. Rausvas išorinis aureolės kraštas žymi ribą tarp jos ir vainiko (1 pav.). Lyginant su vainiku, aureolės šviesumas yra beveik 50 kartų didesnis. Tai yra viena priežasčių, kodėl dažnai matomos tik šviesulį supančios aureolės. Žvelgiant į Mėnulį pro dangumi slenkančius labai plonus viduriniojo aukšto debesis, kartais matomas vainikas be aureolės (2 pav.). Jo spalvos ne tokios sodrios, o išorinis kraštas dažnai įgauna purvinai rudą atspalvį.

Vainikai ir aureolės yra gana dažnas, tačiau menkai žinomas, retai pastebimas ir dar rečiau suprantamas optinis atmosferos reiškinys. Patys spalvingiausi ir efektingiausi vainikai žėri Saulės šviesoje, tačiau jie retai pastebimi, nes ryški Saulės šviesa akina, tad instinktyviai stengiamės į ją nežiūrėti. Tiesioginė Saulės šviesa yra labai pavojinga akims, ir žvalgantis vainikų visada derėtų turėti tai omenyje. Saulės akiniai ar tamsinti stiklai leidžia saugiai grožėtis sodriomis vainikų spalvomis, ypač pasislėpus Saulei už pastatų, medžių ar kitų kliūčių. Dar paprastesnis būdas – stebėti Saulės atspindį ramaus vandens paviršiuje, kai Saulė pakilusi aukštai, o jos šviesa krinta beveik statmenai vandens paviršiui. Taip vainikus kažkada stebėjo žymus mokslininkas, šiuolaikinės optikos pradininkas Isakas Niutonas (*Isaac Newton*). Žinoma, saugiausia stebėti Mėnulio arba dirbtinių šviesos šaltinių kuriamus vainikus. Be kita ko, vainikai ir aureolės kartais matomos ir kitų ryškių šviesulių – Veneros ir Jupiterio – šviesoje.

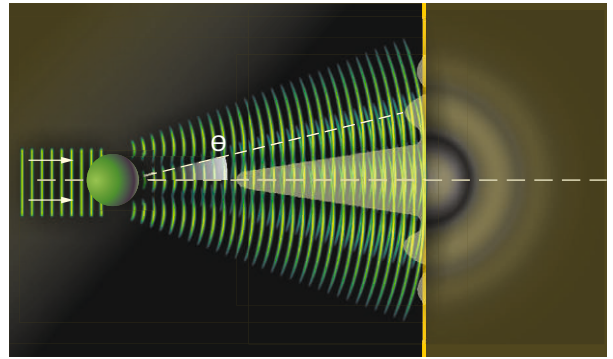
Vainikas – tai optinis atmosferos reiškinys, neturintis nieko bendra su Saulės viršutinių atmosferos sluoksnių vainiku, kuris tampa matomas tik per visišką Saulės užtemimą. Neretai vainikai painiojami su halais, nors tai visiškai skirtingi optiniai reiškiniai. Vainikas susidaro palei šviesulį, jo regimasis kampinis skersmuo tėra keletas laipsnių (palyginimui priminsime, kad Saulės ar Mėnulio kampinis skersmuo yra apie 0,5 laipsnio), o ir priežastys, dėl kurių susidaro vainikai bei halai yra labai skirtingos.



7.2 Šviesos bangų difrakcija

Fizikinė vainikų ir aureolių atsiradimo priežastis yra šviesos bangų difrakcijos reiškinys. Difrakcija – tai šviesos bangų užlinkimas už kliūčių. Dažnai visiškai nepagrįstai manoma, kad šviesos difrakcija yra reiškinys, kuris stebimas tik laboratorijos sąlygomis. Iš tikrųjų didžiausia laboratorija yra virš mūsų plytintis dangus, kuriame galime stebėti visų fundamentinių optikos dėsnų apraiškas, o vainikai aplink šviesulius yra puikus to pavyzdys. Kad vyktų šviesos bangų difrakcija, kliūčių matmenys turi būti palyginami su šviesos bangos ilgiu. Žinant, kad violetinės akimi dar matomos šviesos bangos ilgis yra apie 400 nm, o raudonos šviesos – 650 nm, panašių (paprastai kiek didesnių) matmenų turi būti ir fizinės kliūtys, kurios užlenkia tokio ilgio šviesos bangas.

Klasikinis pavyzdys, pateikiamas visuose optikos vadovėliuose, yra vienspalvės (monochromatinės) šviesos pluošto difrakcija jam sklindant pro mažą apvalų plyšį. Tolygaus pluošto vaizdas už plyšio pasikeičia – atsiranda ryški dėmė centre ir aplink ją tam tikru būdu išsidėstę šviesūs koncentriniai (vadinamieji difrakciniai) žiedai, kuriuos ski-



← 2 pav.

Mėnulio vainikas be aureolės. *A. Dubiečio nuotr.*

↑ 3 pav.

Šviesos bangų difrakcija nuo nedidelės apvalios kliūties (vandens lašo). Naujos šviesos bangos, atsiradusios lašo kraštuose, interferuoja, todėl už lašo susidaro difrakcinis vaizdas su minimumais (ten, kur naujų bangų fazės priešingos) ir maksimumais (ten, kur fazės sutampa). *J. Gričiaus pieš.*

ria tamsios zonos. Pirmasis šviesus žiedas atitinka pirmąją difrakcijos eilę, antrasis – antrąją ir t. t. Kuo siauresnis plyšys, tuo platesni ir tuo labiau vienas nuo kito nutolę difrakciniai žiedai. Susidaręs difrakcinis vaizdas beveik nesiskirs, jei plyšį pakeisime nedidele nepermatoma kliūtimi (3 pav.).

Jei į nedidelę kliūtį kritusi šviesa bus balta (o tokia yra Saulės ir Mėnulio šviesa), tai centrinė dėmė taip pat bus balta, o tamsios zonos už kliūties bus užpildytos spalvomis – atsiras spalvoti ratilai. Balta centrinė dėmė yra aureolė. Spalvoti ratilai atsiras dėl to, kad kiekvienos spalvos spinduliai dėl difrakcijos užlinks truputį skirtingais kampais: mėlyni – mažiausiai, o raudoni – daugiausia, tad difrakciniame baltos šviesos vaizde spalvos išsidėstys lygiai taip pat, kaip ir vainike. Tą pirmasis pastebėjo dar I. Niutonas, o matematiškai šį uždavinį, remdamasis bangine šviesos teorija, XIX a. pradžioje išsprendė vokiečių fizikas Jozefas Fraunhoferis (*Joseph von Fraunhofer*), todėl kartais

šis reiškinys vadinamas Fraunhoferio difrakcija. Visą šviesos difrakcijos teoriją keleriais metais vėliau sukūrė prancūzų fizikas Augustinas Frenelis (*Augustine-Jean Fresnel*), laikomas bangų optikos teorijos pradininku. Taigi vainiką kokybiškai galima aprašyti kaip šviesos difrakcijos reiškinį nuo mažų kliūčių. Šios kliūtys – tai debesys sudarantys 10–50 μm skersmens vandens lašeliai arba ledo kristalai. Esminis skirtumas nuo plyšio ar pavienės kliūtės ir debesyje formuojamo difrakcinio vaizdo yra tas, kad, formuojantis vainikui debesyje, šviesos kelyje tokių kliūčių yra daugybė. Tad vainikas yra kolektyvinis šviesos bangų difrakcijos ir interferencijos (bangų mūšos) rezultatas, kai kiekvienas kliūtės taškas laikomas nauju šviesos bangų šaltiniu. O tai optikoje žinoma kaip Hiuigenso principas, kurį dar XVII a. suformulavo iškilus olandų mokslininkas Christianas Hiuigenzas (*Christian Huygens*), be kita ko, atradęs didžiausią Saturno palydovą Titaną.

Vainiko ratilų kampinės padėties (atitinkamų spalvų atlenkimo kampai) yra tiesiog proporcingos šviesos bangos ilgiui ir atvirkščiai proporcingos kliūtės skersmeniui¹⁷. Taigi žinant kliūtės matmenis, galima nesunkiai sužinoti įvairių bangos ilgių šviesos difrakcijos kampus. Tačiau dar svarbiau yra tai, kad, sprendžiant atvirkštinį uždavinį, t. y. išmatavus skirtingų vainiko spalvų difrakcijos kampus, galima gana tiksliai ir paprastai nustatyti vandens lašelių dydį debesyje. Pirmieji tokie matavimai buvo atlikti dar XX a. pradžioje tyrinėjant debesų formavimosi ypatumus ir susiejant vandens lašelių dydį su debesų aukščiu ir temperatūra. Toks nuotolinis debesys sudarančių vandens lašų dydžio nustatymo metodas tebėra plačiai taikomas ir šiandien.

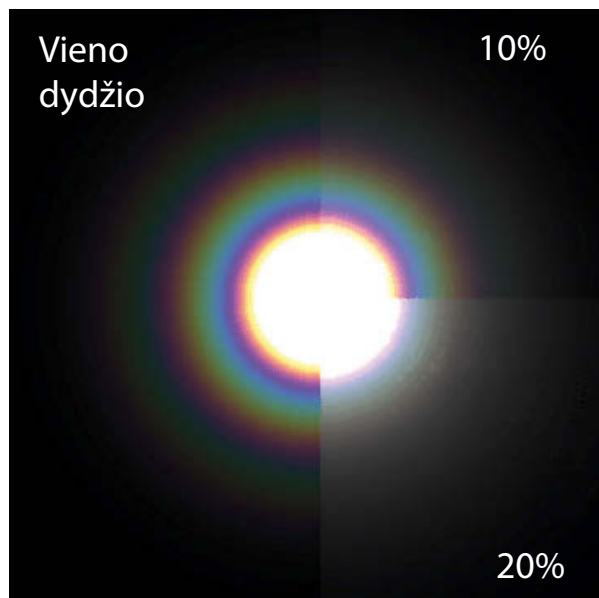
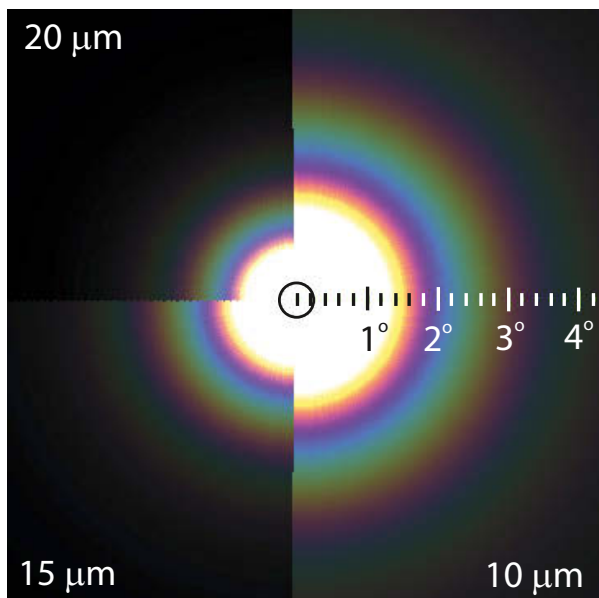
Kiekvienos spalvos intensyvumo skirstinys aprašomas gana sudėtinga Beselio funkcija¹⁸, kurios pavidalas schemiškai pavaizduotas **3 pav.** Verta pastebėti, kad tikrovię lyginant su centrinio maksimumo (aureolės) inten-

syvumu, pirmojo difrakcinio maksimumo, formuojančio vainiką, intensyvumas yra 50 kartų mažesnis, antrojo – 200 kartų mažesnis ir t. t. Dėl šios priežasties vainikus būna taip sunku įžiūrėti.

Minėtas kokybinis vainikų formavimo modelis tėra artutinis, nors kokybiškai jis gana gerai paaiškina stebimus reiškinius. Paprastumo dėlei buvo laikoma, kad vainiką formuojančios dalelės – vandens lašeliai ir ledo kristalai neturi tokių materialių savybių kaip forma, skaidrumas ar cheminė sudėtis. Šiuolaikinis matematinis vainikų aprašymas yra kur kas sudėtingesnis ir grindžiamas Mi šviesos sklaidos teorija, kurią dar 1908 m. suformulavo vokiečių mokslininkas Gutavas Mi (*Gustav Mie*), remdamasis elektromagnetinių bangų teorijos kūrėjo garsaus škotų fiziko Džeimso Maksvelo (*James Clerk Maxwell*) užrašytomis lygtimis. Savo pirmaisiais darbais G. Mi siekė paaiškinti spalvas ir optinius reiškinius, atsirandančius koloidinėse aukso dalelių suspensijose. Vėliau Mi teorija virto universalia šviesos sklaidos teorija, kuri įskaito visus įmanomus optinius reiškinius – šviesos bangų sklaidimą, atspindį, lūžį, interferenciją, difrakciją ir sklaidą, – o kartu ir šviesą sklaidančių dalelių formą bei kitas savybes. Šiuolaikinė Mi sklaidos teorija – tai universalioji šviesos sklaidos teorija,

¹⁷ Kokiu kampu θ bus atlenkiamos nuo savo pradinės krypties šviesos bangos, galima apskaičiuoti iš sąryšio $\theta = \frac{m\lambda}{2R}$, čia λ yra šviesos bangos ilgis, R – vandens lašo spindulys (skersmuo $d = 2R$), o m yra tam tikra konstanta, kurios vertės atitinkamai pirmajam, antrajam ir trečiajam difrakcijos maksimumams yra 1.635, 2.679 ir 3.699.

¹⁸ Kampu θ difragavusios šviesos intensyvumas $I(\theta)$ išreiškiamas kaip $I(\theta) = I(0) \left(\frac{2J_1(x)}{x} \right)^2$, čia $I(0)$ – kritusios šviesos intensyvumas, J_1 – pirmosios eilės Beselio funkcija, o jos argumentas $x = 2\pi R \sin\theta/\lambda$.



kuria remiantis galima tiksliai aprašyti daugelį šviesos sklaidimo uždavinių bei reiškinių ne tik optikoje [2–5] bet ir astrofizikoje ir net nanodalelių pasaulyje [6].

Nenuostabu, kad Mi sklaidos teorija tapo optinių atmosferos reiškinių skaitmeninio modeliavimo pagrindu. Šiuo metu yra laisvai prieinamų kompiuterinių programų, kuriomis galima ne tik modeliuoti vainikų susidarymą esant skirtingoms atmosferos sąlygoms, bet ir tiksliai atkurti stebėtą vainiką kompiuterio ekrane, gaunant naudingos mokslinės informacijos apie dalelių dydį, jų erdvinį pasiskirstymą, kondensacijos spartą bei debesų dinamikos ir mikrofizikos ypatumus. Vienas žymiausių skaitmeninio modeliavimo taikant Mi teoriją specialistų Filipas Lavenas (*Philipp Laven*) pajuokavo, kad šios teorijos taikymas atmosferos reiškiniams modeliuoti kai kuriais aspektais panašus į bandymą skaldyti riešutus kūju, tačiau mokslinė prasme jo nauda neabejotina. Skaitmeninio modeliavimo rezultatai byloja, kad sodriausių spalvų ir daugiau nei

4 pav.
Kairėje – 10, 15 ir 20 μm spindulio vandens lašelių formuojami vainikai. Juodas apskritimas centre – regimas Saulės skersmuo, dešinėje – vainiko spalvų sodrumas, kai jį formuoja vieno dydžio lašai ir kai vandens lašų dydžiai kinta 10 % bei 20 % ribose

keleto difrakcinių eilių vainikai stebimi, kai dalelių dydis debesyje yra vienodas (toks dalelių dydžių skirstinys vadinamas monodispersiniu). Jei debesys sudaryti iš labai skirtingo dydžio lašelių ar kristalų, vainiko spalvos išnyksta susiliedamos į vientisą baltą aureolę. **4 pav.** pavaizduoti Iris programa skaitmeniškai sumodeliuoti vainikai, iliustruojant pagrindinius jų dėsningumus. Paveikslo kairėje palyginti vainikų kampiniai matmenys, kuriuos formuoja 10, 15 ir 20 μm spindulio vandens lašeliai, o dešinėje parodyta, kaip kinta vainiko spalvų sodrumas, kai vandens lašų skirstinys yra monodispersinis (visi lašai yra vieno dydžio) ir kai lašų matmenys kinta atitinkamai 10 % ir 20 % ribose.



● 5 pav.

Dalinis vainikas aplink Saulę (pačią Saulę užstoja tamsi kliūtis). A. Dubiečio nuotr.

7.3 Vainikai ir aureolės

Vainikai dažniausiai matomi žvelgiant į Saulę ar Mėnulį pro skaidrius viduriniojo aukšto – aukštuosius sluoksnius (*altostratus*) arba aukštuosius kamuolinius (*altocumulus*) debesis, kurie dažnai pasižymi tolygiu bei vienodu juos sudarančių dalelių (vandens lašų ar ledo kristalų) dydžio pasiskirstymu. Dažnai vainikai gali atsirasti plunksniniuose kamuoliniuose (*cirrostratus*) debesyse, ypač lėšiškosios rūšies [7], o itin retais atvejais – net ir plunksniniuose (*cirrus*) debesyse, kai šie pakyla labai aukštai ir susidaro ledo kristalams kondensuojantis ant stratosferos aerozolių, dažniausiai sieros ar azoto rūgščių molekulių [8]. Efectingiausi vainikai susidaro jaunuose, dar tik besiformuojančiuose debesyse, kuriuose dalelės yra mažos, o jų dydis daugmaž vienodas. Jei debesis netolygiai dengia dangų ar yra nedideli, matomi tik atskiri vainikų fragmentai (5 pav.). Keistų formų, elipsiniai ar netgi asimetriniai vainikai kartais matomi debesyse, kuriuose vandens lašelių dydis laipsniškai kinta skersai debesies.

Vainiko spalvų ryškumas ir sodrumas smarkiai priklauso nuo optinio debesies tankio, kuris apibrėžiamas kaip atvirkštinis dydis debesies storiui, kuriame sugerama ar išsklaidoma maždaug trečdalis kritusios šviesos. Jei debesis labai skaidrus ir ploni (optinis tankis labai mažas), vainiko spalvos yra sodrios ir gerai išsiskiria, tačiau jų ryškumas menkas. Spalvos susilieja ir dėl daugkartinės sklaidos, esant labai storam debesų sluoksniui. Be to, storus debesis sudaro labai įvairaus dydžio dalelės, tad juose susidaro tik aureolės. Panašiai susidaro ir aureolės rūke, kai tarp stebėtojo ir šviesos šaltinio tvyro storas įvairaus dydžio vandens lašelių sluoksnis (6 pav.). Įvairiais stebėjimais nustatyta, kad egzistuoja tam tikras optimalus, t. y. artimas 1, debesies optinis tankis, kuriam esant stebimi įspūdingiausi ryškiaspalviai vainikai.



↑ 6 pav.
Aureolė aplink Mėnulį žvelgiant pro rūką.
A. Dubiečio nuotr.

Vainikus galima stebėti ir čia pat – žvelgiant į šviesulius ar dirbtinius ryškios šviesos šaltinius pro rasojančius langų stiklus. Pastarieji vainikai neturi aureolės, kaip ir vainikai, susidarantys labai ploname debesų sluoksnyje (2 pav.), kadangi šviesą atlenkiantys vandens lašeliai yra vienoje plokštumoje, o atstumai tarp jų bemaž vienodi [9]. Tad vietoj ryškios aureolės matysime tamsesnį lauką aplink šviesos šaltinį. Retais atvejais spalvingus vainikus galima pastebėti ir ant greitai užšalantių langų stiklų, tik šiuo atveju vainiką formuoja šviesos difrakcija ne nuo vandens lašelių, o nuo mažyčių ledo polikristalų. Savotiškus kryžiaus formos vainikus galima pamatyti žvelgiant į ryškius šviesulius ar kryptingus dirbtinės šviesos šaltinius pro lengvas permatomas užuolaidas. Šiuo atveju šviesos bangos užlinksta už mažyčių, tvarkingai išdėstytų užuolaidos medžiagos plaušelių. Vainikai gali susidaryti ir tiesiog pačioje akyje – žvelgiant į ryškios šviesos šaltinį, kartais galima pastebėti jį supančius spalvotus ratilus. Kad šie ratilai atsiranda akyje, galima įsitikinti labai



↑ 7 pav.
Vaivorykštiniai debesys. A. Dubiečio nuotr.

paprastai – uždengus patį šviesos šaltinį, ratilai išnyksta. Vainikų atsiradimo akyje priežastis – šviesos spindulių difrakcija ir sklaida pačioje akyje dėl fiziologinių akies sandaros ypatumų [10]. Neabejojama, kad garsaus olandų postimpresionisto Vincento van Gogo (*Vincent van Gogh*) autoportretas nutapytas imituojant dėl ryškios Saulės šviesos akyje susidariusį vainiką.

Aureolės gerai matomos tvyrant rūkui, miglai, dul-
kėms ar dūmams. Egzotiškiausia aureolė, kurios kampinis
skersmuo gali siekti kelias dešimtis laipsnių, vadinama Bi-
šopo žiedu (angl. *Bishop's ring*). Tokią aureolę po liūdnei
išgarsėjusio Krakatau ugnikalnio išsiveržimo 1883 m.

pirmą kartą stebėjo ir aprašė keliautojas ir misionierius
Serenas Bišopas (*Sereno Bishop*). Bišopo žiedas atsiranda
dėl Saulės šviesos difrakcijos nuo aukštai į atmosferą
ugnikalnio išmestų mažesnių nei 1 μm dydžio aerozolių
dalelių (sieros ir azoto junginių, jūros druskų kristalų ar
smulkių dulkelių) [11]. Po vieno didžiausių praėjusio am-
žiaus Pinatubo ugnikalnio Filipinuose išsiveržimo 1991
m. Bišopo žiedai stebėti daugelyje Europos šalių, net Suo-
mijoje. Panašios aureolės susidaro, kai Sacharos dykumoje
siaučiančios smėlio audros pakelia mažytes dulkeles aukš-
tai į troposferą, o vėjas jas atneša į Pietų ir Vidurio Euro-
pos kraštus. Aureolių intensyvumo skirstinių matavimai
tebėra aktualūs ir šiandien. Jie taikomi vertinant atmos-
feros skaidrumą [12], teršalų ir aerozolių pasiskirstymą,



koncentraciją bei dalelių dydį [13]. Įdomu ir tai, kad sukauptos žinios apie aureoles ir vainikus Žemės atmosferoje gali būti naudingos ir tyrinėjant kitų planetų bei jų palydovų atmosferas, pvz., Veneros ir Titano debesis, jų sudėtį bei struktūrą [14].

7.4 Vaivorykštiniai debesis

Labai dažnai palei Saulę esantys debesų kraštai, atskiri fragmentai ar net ištisi debesis nusidažo neįtikėtinais ryškiomis besikaitaliojančiomis purpurinėmis, raudonomis, žaliomis ir mėlynomis spalvomis, dažnai įgaunančiomis šaltą metalinį atspalvį (7 pav.). Tai vadinamieji vaivorykštiniai

↑ 8 pav.
Vaivorykštiniai debesis tarsi milžiniško vainiko fragmentas. A. Dubiečio nuotr.

niai debesis (angl. *iridescent clouds*), o jų spalvinimosi efektas vadinamas irisacija. Dinamiškiausia spalvų kaita vyksta plunksniniuose kamuoliniuose debesyse, kadangi jų raidos ciklas yra labai spartus – dažnai šie debesis atsiranda ir išnyksta tiesiog akyse. Kartais šiame spalvų žaisme galima įžvelgti vainikams būdingą spalvų išsidėstymą (8 pav.), tačiau dažniausiai spalvų kaita yra labai netaisyklinga, o susiliejančios spalvos sukuria fantastinius tonus ir atspalvius. Garsus anglų mokslininkas seras Džonas Heršelis (*John Frederick Herschel*) 1862 m. vienas pirmųjų paaiškino vaivorykštės spalvų atsiradimą debesyse. Jo manymu,



● 9 pav.

Nepaprastai ryškios arti Saulės esančių lešiškujų
plunksninių kamuolinių debesų spalvos.
A. Dubiečio nuotr.

toks debesų nuspalvinimas yra ne kas kita, kaip daugelio vainikų fragmentai, atsirandantys dėl itin netolygaus dalelių dydžių ir debesies optinio tankio pasiskirstymo.

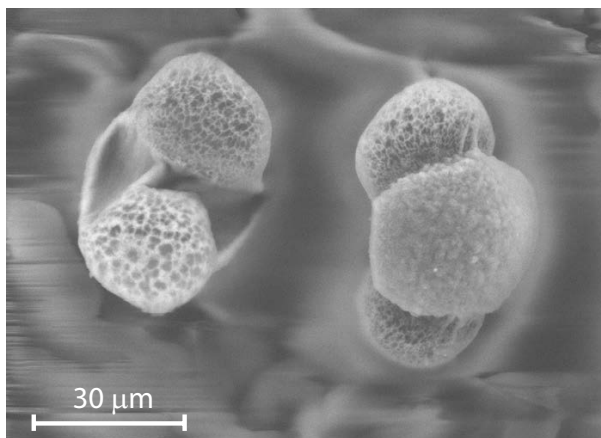
Ryškesniausiomis ir įspūdingiausiomis spalvomis pasidabina lęšiškieji (*lenticularis*) debesys [15, 16]. Dažniausiai lęšiškieji debesys formuojasi ties kalnų viršūnėmis arba pavėjiniais kalnų šlaitais dėl ten susidarancių stovinčių šilto ir šalto oro bangų (3.9 posk.). Šie debesys kartais vadinami tiesiog kalnų bangų debesimis (angl. *mountain wave clouds*). Ypač ryškios spalvos nusidažo poliariniai stratosferos debesys, vadinamieji perlamutriniai debesys (9 sk. 1–3 pav.). Kadangi perlamutriniai debesys susidaro labai aukštai (20–30 km aukštyje, t. y. stratosferoje), jų spalvų žaismas išlieka gerai matomas net gerokai po Saulės laidos. Tačiau apskritai spalvinasi beveik visų tipų debesys, išskyrus sluoksninius lietaus debesis, kuriuose vandens lašelių dydis gali siekti kelis milimetrus ir yra per didelis, kad vyktų šviesos difrakcija bent kiek didesniais kampais. Kaip žinoma, ryškiausiai spalvinasi debesų kraštai, kadangi kaip tik ten yra patys mažiausi vandens lašeliai ar ledo kristalai. Mūsų platumoje įspūdingiausiai spalvinasi jau minėti aukštieji kamuoliniai (7, 8 pav.) bei plunksniniai kamuoliniai (9 pav.) debesys. Neretai ryškios spalvos pasidabina draikytieji kamuoliniai debesys (*cumulus fractus*) ar jų fragmentai, tačiau šie debesys yra žemai ir labai greitai slenka dangumi, tad spalvos atsiranda, kaitosi ir išnyksta labai greitai. Ypač retais atvejais gali būti matomos plunksninių debesų, sudarytų iš labai mažų ledo kristalų [17] ar lėktuvų paliekamų kondensacijos pėdsakų [18] spalvos. Kaip ir stebint vainikus bei aureoles, nepatartina plika akimi bandyti išvelgti vaivorykštinius debesis, esančius arti Saulės. Jie švyti ir Mėnulio šviesoje, tačiau naktį regėjimas sunkiai skiria spalvas, tad Mėnulio vaivorykštinių debesų grožis atsiskleidžia tik nuotraukose.



↑ 10 pav.
Pušų žiedadulkių vainikas. A. Dubiečio nuotr.

7.5 Žiedadulkių vainikai

Ypatingi vainikai susidaro ore sklindant gausioms žiedadulkėms [19]. Žiedadulkės yra puiki kliūtis šviesos bangoms, kadangi tos pačios rūšies žiedadulkių dydis yra beveik identiškas, tad žiedadulkių vainikai yra ryškūs ir spalvingi, jei tik žiedadulkių koncentracija ore yra gana didelė, nors tuo visiškai nesidžiaugia alergiški žmonės. Dažniausiai dėl žiedadulkių susidarantys vainikai matomi Skandinavijoje ir Aliaskoje, kur plyti dideli borealinių miškų masyvai ir kur beržų, pušų bei eglių žiedadulkių koncentracijos, šiems medžiams žydint, dėl ten vyraujančių meteorologinių sąlygų paprastai būna labai didelės. Tačiau retkarčiais palankios sąlygos žiedadulkių vainikams susidaryti gali susiklostyti ir Lietuvoje. Vėlyvą pavasarį, nusistovėjus ramiems saulėtiems orams ir pražydus pušims, milžiniški pušų žiedadulkių debesys kartu su išilusio oro srautais pakyla aukštai į orą. Saulei šviečiant pro tokius žiedadulkių debesis, susidaro nepaprastai gražūs ir spalvingi vainikai (10 pav.). Pamatyti žiedadulkių



↑ **11 pav.**
Pušų žiedadulkių vaizdas, gautas elektroniniu mikroskopu

→ **12 pav.**
Vertikaliai ištyšęs žiedadulkių vainikas.
A. Dubiečio nuotr.



vainiką plika akimi beveik neįmanoma dėl mažų jo kampanių matmenų ir akinančios Saulės šviesos. Tačiau „palsėpus“ akinantį Saulės diską už tamsios kliūtis ir žvelgiant pro tamsintą stiklą (tam puikiai tinka saulės akiniai), galima grožėtis ryškiomis vainiko spalvomis.

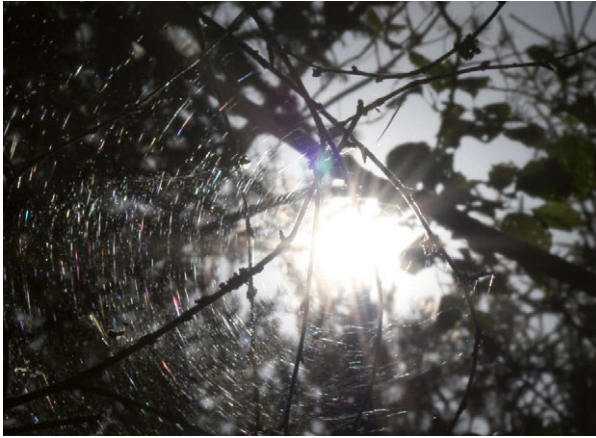
Vainiką formuojančios pušų žiedadulkės yra palyginti didelės, jų vidutinis skersmuo siekia apie 35 μm, tad jų kuriamo difrakcinio vainiko matmenys yra maži: išorinis raudono aureolės krašto skersmuo tėra apie 3,5°, o išorinio raudono vainiko ratilo skersmuo – tik 6°. Tai visai nedaug, palyginti su regimuoju Saulės disko skersmeniu (0,5°). Pušies žiedadulkę sudaro pailga sėklytė su dviem mažesnėmis atsikišusiomis „ausimis“ – oro pagalvėlėmis (11 pav.). Pušies žiedadulkės yra nesimetrinės, tačiau nešiojamos vėjo ar oro srautų jos chaotiškai orientuojasi erdvėje. Šiuo atveju galima sakyti, kad šviesos difrakcija vyksta nuo kažkokių statistinių „vidutinių matmenų“ žiedadul-

kių, tad jų kuriamas vainikas yra beveik apskritas. Vienok aukštai į orą pakilusias žiedadulkes ima veikti sunkio jėga ir jos ima kristi žemyn. Įdomumo dėlei pastebėsime, kad viena žiedadulkė sveria vos apie 40 nanogramų (1 nanogramas = 10^{-9} g). Aerodinaminis pasipriešinimas žiedadulkėms suteikia bemaž identišką orientaciją erdvėje – visų žiedadulkių lengvesnės oro pagalvėlės tampa nukreiptos į viršų, o sunkesnės sėklytės – į apačią. Taigi erdvėje tvarkiai orientuotų žiedadulkių matmenys vertikaloje ir horizontalioje plokštumoje skiriasi, ir šviesos difrakcijos kampai šiose plokštumose taip pat tampa šiek tiek skirtingi. Dėl to vainikas ištyšta vertikaliai ir tampa elipsinis [20, 21]. Šis efektas ypač išryškėja, kai Saulė yra neaukštai (12 pav.).

Įdomu ir tai, kad dėl savitos žiedadulkių formos ir tvarkios jų orientacijos erdvėje vainike atsiranda vertikalių ir horizontalių paryškėjimų [22], kurie matomi tuo aiškiau, kuo tvarkesnė žiedadulkių orientacija ir kuo žemiau Saulė.



● 13 pav.
Žiedadulkių vainikas leidžiantis Saulei.
A. Dubiečio nuotr.



↑ **14 pav.**
Koncentriniai ratilai, susidarantys žvelgiant į Saulę
pro voratinklį. A. Dubiečio nuotr.

Besileidžianti Saulė nurausta, todėl pasikeičia ir vainiko spalvų gama. Vidinė aureolės dalis iš baltos tampa gelsva, išorinis jos kraštas iš purpurinio – rausvas, žalias vainiko ratilas tampa vos įžiūrimas, o mėlynas – išnyksta. Tuo pat metu Saulės šviesa pakankamai nusilpsta ir jau nebeakina, tad Saulės laidos metu vainikas trumpam tampa matomas plika akimi (**13 pav.**).

7.6 Voratinklių spalvų pasaulis

Rudenėjant pirmiesiems rūkams nuklojus pievas ir pamiškes, nesuskaičiuojama gausybė ten slypinčių voratinklių pasidabina mažyčiais rasos karoliukais. Šie sklaido ir atspindi šviesą, jų dėka voratinklių pynės tampa gerai matomos, išryškėja ten vykstantis nepastebimas gyvenimas, o kartu atsiveria ir netikėtas spalvų pasaulis. Saulės spinduliams apšvietus rasotas voratinklius, juose galima išvysti vaivorykštę (**5 sk. 10 pav.**). Tačiau žvelgiant atidžiau,

pačiose voratinklių gijose galima pamatyti nepaprastai gražų ir spalvingą, tačiau kiek kitokią šviesos bangų difrakcijos reiškinio rezultatą.

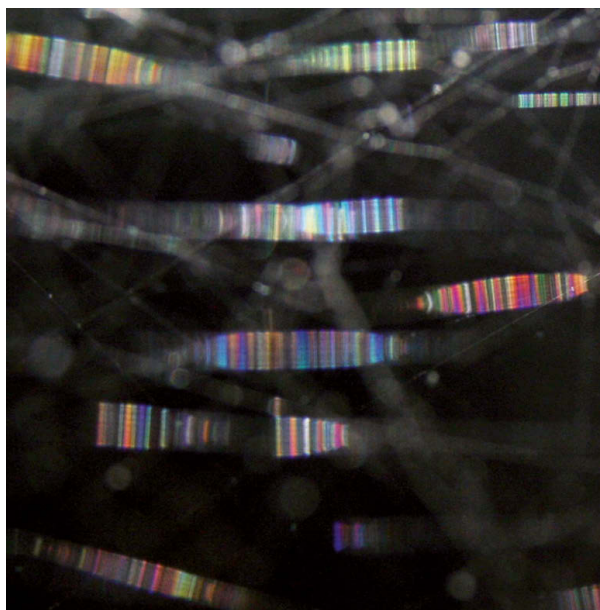
Voratinklio gijos yra labai plonos, jų šilko siūlai plonesni už plauką – vidutinis gijų skersmuo tėra 1 mikrometras (1 μm), t. y. tūkstantoji milimetro dalis. Dėl to įprastinėmis sąlygomis voratinkliai yra beveik nematomi ne tik žmogaus akiai, bet ir vabzdžiams, kurie į juos įkliūva. Tik Saulės šviesai kritus į voratinklį nedideliu kampū ar tiesiog žvelgiant pro voratinklį į pačią Saulę, jo gijos ima tviskėti, apjuosdamos šviesulį plonyčiais koncentriniais ratilais (**14 pav.**). Panašus reiškinys dažnai matomas darganotais rudens vakarais: žvelgiant pro plikas ir šlapias medžių šakeles į Mėnulį ar gatvės žibintus, šios žvilga, tarsi būtų apraizgytos milžinišku voratinkliu. Tačiau tikrajame voratinklyje slypi ir tai, ko nėra šakelių spindesyje. Pažvelgus atidžiau, galima pastebėti, kad voratinklio gijos žėri ir mirguliuoja įvairiausiomis spalvomis, sukurdamos nuostabius ir niekada neatsikartojančius spalvų derinius. Šis efektas labai subtilus, jį galima pastebėti tik žvelgiant į voratinklį nefokusuotu žvilgsniu (**15 pav.**). Tą, beje, lengviausia padaryti žiūrint pro fotoaparato objektyvą ar tiesiog fotografuojant.

Kaip plonytėse voratinklio šilko gijose gimsta besikaitančių spalvų gama? Patyrinėjus voratinklio giją pro mikroskopą, atsiskleidžia įstabi ir netikėta gijos smulkioji struktūra: plonytis šilko siūlas nusagstytas bemaž vieno dais tarpais išsidėsčiusiais šilko karoliukais (**16 pav.**). Šie karoliukai ir yra spalvų atsiradimo voratinklyje priežastis. 1 mm ilgio gijoje gali būti nuo keliasdešimties iki kelių šimtų karoliukų, tad toks darinys tampa tarsi vienmate difrakcine gardele. Atspindėdama kritusią šviesą, voratinklio gija, kaip ir bet kuri difrakcinė gardelė, skirtingos spalvos spindulius atlenkia skirtingais kampais – taip balta Saulės šviesa išskaidoma į spalvas [23]. Taip įvyksta dėl to, kad



- ↑ **15 pav.**
 Spalvų žaismas voratinklyje. *A. Dubiečio nuotr.*
 ↑↑ **16 pav.**
 Voratinklio šilko gija žvelgiant pro mikroskopą
 → **17 pav.**
 Brūkšninis spalvų kodas voratinklio gijose.
A. Dubiečio nuotr.

šviesa yra bangos, kurios, priklausomai nuo jų tarpusavio fazių skirtumo, viena kitą arba sustiprina, arba užgesina. Šis reiškinys plačiai žinomas optikoje ir vadinamas šviesos bangų interferencija. Kadangi tiek karoliukų dydžiai, tiek tarpai tarp jų nėra visiškai vienodi, matome ne įprastą vaivorykštės spalvų tvarką išdėstytą baltos šviesos spektrą, o keistus, tamsiomis juostomis (ten šviesos bangos viena kitą užgesina) atskirtus spalvų derinius (**17 pav.**). Tai lyg painiai užšifruotas brūkšninis kodas. Po truputį keičiant žvilgsnio



kampą ar lengvam vėjeliui švelniai judinant patį voratinklį, paslaptingo brūkšninio kodo spalvos keičiasi ir mirguliuoja, sukurdamos įstabų ir nepakartojamą šviesos ir tamsos, spalvų ir šešėlių žaismą.

Kaip ant voratinklio gijos atsiranda vienodais ar beveik vienodais tarpais išsidėstę šilko karoliukai? Viena vertus, galima teigti, kad smulkioji voratinklio gijos struktūra – tai voro pastangų ir jo voratinklių pynimo meistriško rezultatas. Juk lipnūs karoliukai gerokai padeda gaudant grobį – jie taip supančioja nelaimėlius vabzdžius, kad šie niekada nebeišsivaduoja iš lipnių ir klasingų tinklų. Kita vertus, karoliukų atsiradimo priežastis yra grynai fizikinė, o pats jų atsiradimo mechanizmas grindžiamas reiškiniu – Relėjaus nestabilumu [24]. Šį reiškinį XIX a. pabaigoje atrado 4 skyriuje minėtas garsus anglų fizikas lordas Relėjus (*Rayleigh*), kurio mokslinių atradimų sąrašas yra ilgas, įvairus ir įspūdingas. Tai lordas Relėjus sukūrė elektromagnetinių, taip pat ir šviesos, bangų sklaidos teoriją ir paaiškino, kodėl dangus yra žydras (4.1 posk.), atrado ir išgrynino argono dujas.

Lordas Relėjus, aišku, netyrinėjo voratinklių gijų ir galbūt niekada nesidomėjo jų spalvomis, tačiau jis paaiškino, kaip ir kodėl sutrūkinėja tolygi vandens čiurkšlė. Faktą, kad plona sodo purkštuvo vandens čiurkšlė palaipsniui praranda vientisumą ir galiausiai subyra į atskirus vandens lašelius, gerai žino sodininkai. Kuo siauresnė čiurkšlė ir kuo didesnis vandens slėgis, tuo greičiau čiurkšlė virsta atskirais lašeliais. Lašelių dydis priklauso nuo daugelio dalykų – čiurkšlės storio, greičio, ir, žinoma, vandens savybių: vandens paviršiaus įtempimo jėgos, klampumo ir pan. Remdamasis šių parametrų visuma, lordas Relėjus atskleidė vandens čiurkšlės nestabilumo priežastis. Jis nustatė, kad čiurkšlės storis tampa netolygus palaipsniui – iš pradžių ji tai sustorėja, tai suplonėja, o atsiradusi storio moduliacija yra periodinė ir gerai atsikartojanti. Vėliau

čiurkšlės storio netolygumas tolydžio didėja, kol ši galiausiai sutrūkinėja į atskirus lašus. Kitaip tariant, atsiranda tam tikri savieji (labiausiai palaikomi) dažniai arba būsenos, kurios ir lemia lašelių dydį bei atstumą tarp jų. Relėjaus atrastas nestabilumas yra universalus reiškinys, buityje ir gamtoje galima pastebėti įvairiausių jo apraiškų. Pavyzdžiui, dėl šio nestabilumo vanduo iš blogai užsukto čiaupo neteka plonyte srovele, bet įkyriai laša. Tas pat pasakytina ir apie prakiurusį stogą. Dėl panašios priežasties, esant rūkui, voratinklio gijos pasidengia ne ištisiniu plonu vandens sluoksniu, o vienodais tarpais išsidėščiusiais vandens lašeliais, atstumas tarp kurių atvirksčiai proporcingas jų dydžiui. Didelio mastelio Relėjaus nestabilumo rezultata galima išvysti danguje, stebint aukštai praskrendančių lėktuvų paliekamus kondensacijos pėdsakus. Kartkartėmis šie pėdsakai plečiasi labai nevienodai, suformuodami beveik taisyklingus periodinius darinius – besikondensuojančių garų burbulus, kurie tarsi karoliai suverti ant plono lėktuvo pėdsako. Panašiai nutinka ir voratinklio gijai: tempiamas ir reaguodamas su oru, lipnus skystis greitai stingsta virsdamas šilku, o karoliukai atsiranda dėl plonos gijos Relėjaus nestabilumo.

Šį šilką vorai labai brangina. Teko matyti, kaip, prasidejus lietui, rūpestingas voras greitai nurenka voratinklį, o lietui pasibaigus, jį vėl iš naujo nupina. Ne taip seniai atrasta, kad voratinklių šilkas būna dvejopas. Pirmojo tipo šilkas yra nelipnus ir mažiau elastingas. Iš tokio voras nupina spindulines gijas – voratinklio karkasą. Karkasas sutvirtinamas skersinėmis gijomis iš lipnaus šilko, kurios yra labai lanksčios. Nors spindulinių ir skersinių gijų šilkas skiriasi savo savybėmis, spindulinių gijų storis taip pat yra netolygus, o jose sukuriami panaši brūkšninio kodu įslaptinta spalvų gama. Abiejų rūšių voratinklio šilkas yra nepaprastai tvirtas ir pasižymi unikaliomis atsparumo tempimui ar kitokiam išoriniam poveikiui savybėmis.

Netgi taikant šiuolaikines medžiagų technologijas, voratinklio šilką sunku nukopijuoti, o šiuo metu kuriamos sintetinės medžiagos vis dar neprilysta milijonus metų tobulintiems vorų šilko gamybos technologijoms.

Bibliografija

1. L. Cowley, P. Laven, M. Vollmer, Rings around the sun and moon: coronae and diffraction, *Physics Education* **40**, 2005, 51–59.
2. J. Lock, T. Yang, Mie theory model of the corona, *Applied Optics* **30**, 1991, 3408–3414.
3. P. Laven, Simulation of rainbows, coronas and glories by use of Mie theory, *Applied Optics* **42**, 2003, 436–444.

4. P. Laven, Simulation of rainbows, coronas and glories using Mie theory and the Debye series, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* **89**, 2004, 257–269.
5. S. D. Gedzelman, J. A. Lock, Simulating coronas in color, *Applied Optics* **42**, 2003, 497–504.
6. M. I. Mischenko, L. D. Travis, Gustav Mie and the evolving discipline of electromagnetic scattering by particles, *Bulletin of the American Meteorological Society* **89**, 2008, 1853–1861.
7. J. A. Shaw, N. J. Pust, Icy wave-cloud lunar corona and cirrus iridescence, *Applied Optics* **50**, 2011, F6–F11.
8. K. Sassen, G. G. Mace, J. Hallett, M. R. Poellot, Corona producing ice clouds: a case study of a cold mid-latitude cirrus layer, *Applied Optics* **37**, 1998, 1477–1485.
9. J. A. Lock, C.-L. Chiu, Correlated light scattering by a dense distribution of condensation droplets on a window pane, *Applied Optics* **33**, 1994, 4663–4671.
10. C. Beckman, O. Nilsson, L.-E. Paulsson, Intraocular light scattering in vision, artistic painting, and photography, *Applied Optics* **33**, 1994, 4749–4753.
11. K. Sassen, T. Peter, B. P. Luo, P. J. Crutzen, Volcanic Bishop's ring: evidence for a sulphuric acid tetrahydrate particle aureole, *Applied Optics* **33**, 1994, 4602–4606.
12. F. R. Mims, Solar aureoles caused by dust, smoke and haze, *Applied Optics* **42**, 2003, 492–496.
13. H. Asseng, T. Rutz, J. Fisher, Sun and aureole spectrometer for airborne measurements to derive aerosol optical properties, *Applied Optics* **43**, 2004, 2146–2155.
14. M. Vollmer, Effects of absorbing particles on coronas and glories, *Applied Optics* **44**, 2005, 5658–5666.
15. P. J. Neiman, J. A. Shaw, Coronas and iridescence in mountain wave clouds over northeastern Colorado, *Bulletin of the American Meteorological Society* **84**, 2003, 1373–1386.
16. J. A. Shaw, P. J. Neiman, Coronas and iridescence in mountain wave clouds, *Applied Optics* **42**, 2003, 476–485.
17. K. Sassen, Cirrus cloud iridescence: a rare case study, *Applied Optics* **42**, 2003, 486–491.
18. K. Sassen, Iridescence in an aircraft contrail, *Journal of the Optical Society of America* **69**, 1979, 1080–1083.
19. E. Tränkle, B. Mielke, Simulation and analysis of pollen coronas, *Applied Optics* **33**, 1994, 4552–4562.
20. P. Parviainen, C. F. Bohren, V. Mäkelä, Vertical elliptical coronas caused by pollen, *Applied Optics* **33**, 1994, 4548–4551.
21. K. Sassen, Elliptical pollen corona from North American boreal paper birch trees (*Betula papyrifera*): strong fall orientations for near-spherical particles, *Applied Optics* **50**, 2011, F1–F5.
22. W. B. Schneider, M. Vollmer, Experimental simulations of pollen coronas, *Applied Optics* **44**, 2005, 5746–5753.
23. H. J. Schlichting, Farbenspiel im Spinnennetz, *Physik Unserer Zeit* **35**, 2004, 28–29.
24. J. A. Adam, A mathematical nature walk, Princeton University Press, 2009, 27–31.

8. Žaibai ir atmosferos elektra



● T. Janušonio nuotr.

8.1 Žaibai: gražu ir pavojinga

Žaibas yra išpūdingas (1 pav.), tačiau kartu ir pavojingas gamtos reiškinys. Žaibais galima grožėtis tik žvelgiant į juos iš saugaus atstumo. Nenuostabu, kad nuo seno buvo tikima, jog žaibas – tai dievų galios apraiška, davusi pirmųjų žmonėms ugnį, o kartu ir kaip siunčiama bausmė tiems, kurie nepaiso dievų valios. Tačiau kas iš tikrųjų yra žaibas ir kaip jis atsiranda, ilgus amžius buvo tik spėliojama. Pirmasis elektrinę žaibo prigimtį 1749 m. atskleidė amerikiečių mokslininkas ir politikas, vienas Amerikos nepriklausomybės deklaracijos akto kūrėjų, vėliau tapęs JAV prezidentu Bendžaminas Franklinas (*Benjamin Franklin*). Atlikęs daugybę pavojingų eksperimentų su tikrais žaibais, jis nustatė, kad žaibas yra elektrinis reiškinys. Tą jis sužinojo originaliu ir rizikingu būdu, sukūręs nesudėtingą konstrukciją, kuri vėliau buvo pavadinta Franklino aitvaru. Kaupiantis audros debesims, Franklinas paleido nedidelį ativarą, laidu sujungtą su Leideno stikline – mūsų laikais šis įrenginys žinomas kaip kondensatorius. Iš kondensatoriuje atsiradusio elektros krūvio Franklinas padarė išvadą, kad audros debesys yra įelektrinti, o žaibas yra ne kas kita, kaip savaiminė elektros iškrova. Kitaip tariant, tai milžiniška kibirkštis tarp įelektrinto debesies ir žemės paviršiaus. Franklinas taip pat pastebėjo, kad žaibas dažniausiai kerta į aukštus medžius ar pastatus, ypač turinčius atsikišusias smailas metalines konstrukcijas. Sugalvojęs, kad tokias konstrukcijas galima įžeminti, Franklinas išrado būdą, kaip apsisaugoti nuo žaibo – žaibolaidį. Žaibolaidis – tai įžemintas laidininkas, ties kurio laisvuju galu susidaro didelės elektrinio lauko anomalijos, pritraukiančios žaibą ir įžeminančios elektros išlydį.

Šiuolaikinių mokslinių atmosferos elektros tyrimų pradžia laikomas XX a. antrasis dešimtmetis, kai škotų fizikas Čarlzas Vilsonas (*Charles Wilson*), tyrinėdamas audros debesies, nustatė elektros krūvių radimosi atmosferoje dės-

ningumus, paaikšino daugelį stebimų su žaibais susijusių reiškinų ir sukūrė labai tikrovišką elektrinę atmosferos modelį. Kai kurios jo išvalgos buvo patvirtintos tik baigiantis XX a., naudojant šiuolaikiškiausią mokslinę įrangą. Norėdamas laboratorijos sąlygomis tyrinėti debesų susidarymą, Č. Vilsonas išrado vadinamąją debesų kamerą (angl. *cloud chamber*) – uždara rezervuarą, užpildytą prisotintais vandens garais. Ši kamera buvo labai naudinga ne tik debesų tyrimams. Netrukus buvo atrasta, kad joje gerai matosi praskriejusią elektringųjų dalelių pėdsakai – trekai¹⁹

Č. Vilsono kamerą imta naudoti aptinkant ir identifikuojant įvairias elektringąsias daleles, kurios atsiranda skylant radioaktyviems branduoliams. Pavyzdžiui, taip buvo atrasta iki tol nežinoma elementarioji dalelė – pozitronas (elektrono antidalelė). Už šį išradimą 1927 m. Vilsonas buvo apdovanotas Nobelio premija.

Kiekvieną akimirksnį virš Žemės planetos paviršiaus įvyksta iki tūkstančio žaibo iškrovų. Žaibai pridaro begalę nuostolių, sukeldami miškų ir pastatų gaisrus, pažeisdami elektros perdavimo linijas ir ryšių instaliacijas. Tikslūs finansiniai nuostoliai pasaulio mastu nėra žinomi, tačiau neabejojama, kad jie išpūdingi. Įvertinta, kad tiesioginiai nuostoliai vien JAV pramonei viršija milijardą dolerių per metus. Neseniai JAV buvo atliktas tyrimas, kuriuo nustatyta, kad nuo žaibo kasmet vidutiniškai nukenčia apie penkis tūkstančius žmonių, o nuo 50 iki 100 miršta [1]. Gal ir kurioziška, bet pagal mirčių skaičių dėl žaibo iškrovų golfas JAV laikomas pačia pavojingiausia sporto šaka.

¹⁹ Praskriejus didelės energijos elektringajai dalelei (elektronui, alfa dalelei ar kt.), ji išilgai savo lėkio trajektorijos jonizuoja vandens garų molekules, kurios tampa kondensacijos centrais. Persotinto vandens garai toje vietoje virsta mažyčių skysčio lašelių pėdsakais, kurie gerai matomi plika akimi.



● 1 pav.

Žaibas – įspūdingas gamtos reiškinys.

J. Paštuko nuotr.

Yra žinoma, kad žaibas gali smogti ne tik į žemės paviršiuje esančius objektus, bet ir į objektus, esančius erdvėje bei neturinčius tiesioginio kontakto su žeme. Tokie nutikimai nepaprastai pavojingi. Pirmasis tragiškas įvykis nutiko 1963 m., kai žaibas smogė į kylantį reisinį „Boeing 707“ lėktuvą, tuomet buvusį 1,5 km aukštyje. Elektros iškrova pažeidė degalų baką ir šis sprogo. Žuvo visi lėktuvu skridę keleiviai. Antrasis plačiai nuskambėjęs incidentas įvyko 1969 m., paleidžiant pilotuojamą kosminį laivą „Apollo 12“ į Mėnulį. Raketa nešėja, skrosdama debesį, vieną po kito sukėlė net du elektros išlydžius, kurie trumpam sutrikdė elektronines valdymo sistemas. Tik laimingo atsitiktinumo dėka laivo įgula nenukentėjo, astronautams pavyko atgauti laivo valdymą, ir kosminė misija buvo sėkmingai tęsiama. Liūdniau baigėsi raketos „Alpha Centaur“, nešusios į orbitą ryšių palydovą, skrydis 1987 m. Žaibo išlydis sutrikdė raketos navigacinę sistemą, raketa tapo nebevaldoma ir, atlikusi staigų manevrą, kartu su palydovu sudegė atmosferoje.

8.2 Globali elektrinė Žemės grandinė

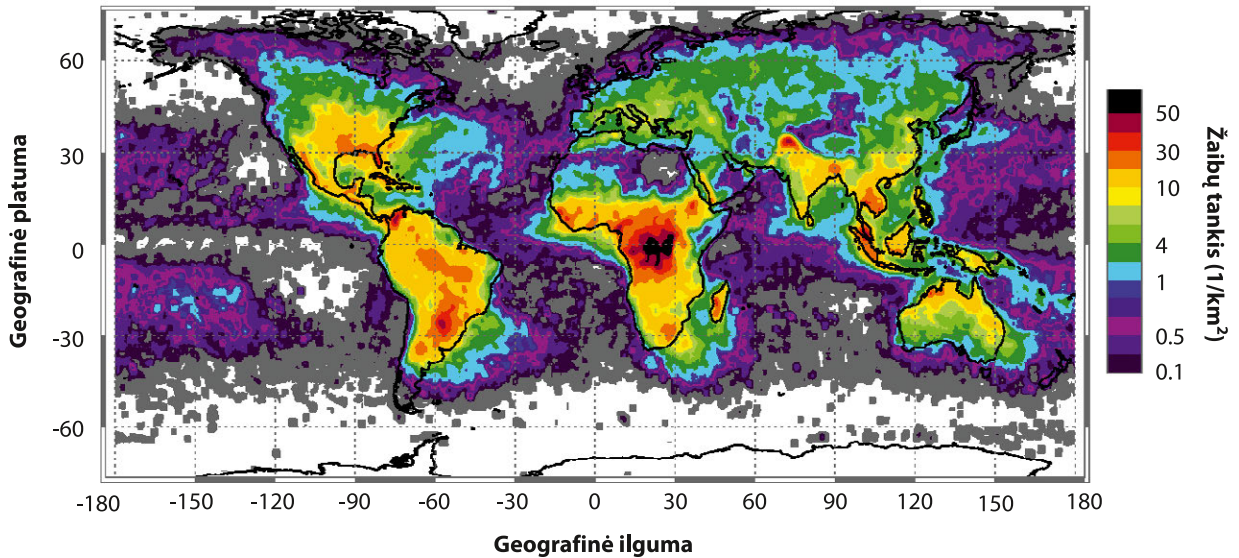
Elektros požiūriu Žemės paviršius ir jos atmosfera yra sudėtingas darinys, esantis tam tikroje elektrinėje pusiausvyroje. Atmosfera yra nuolat įelektrinta, o joje pasiskirstę elektros krūviai formuoja vadinamąją globalią atmosferos elektrinę grandinę [2]. Netgi esant visiškai giedram orui, elektrinio lauko stipris ties Žemės paviršiumi vidutiniškai siekia apie 130 V/m. Mes visą laiką būname šiame elektriniame lauke, bet tiesiogiai jo nejaučiame, nes mūsų kūnai yra kur kas geresni elektros laidininkai nei oras. Vis dėlto oras, kuris paprastai laikomas geru izoliatoriumi, taip pat šiek tiek laidus elektros srovei. Tą dar XVIII a. atrado gar-

sus prancūzų fizikas Šarlis Kulonas (*Charles-Augustin de Coulomb*), stebėdamas, kaip ore esantis įelektrintas laidininkas palaipsniui netenka krūvio. Beje, Š. Kulonas atrado, kad priešingo ženklo elektros krūviai vienas kitą traukia, vienodo ženklo – stumia, o vienas nuo kito nutolę elektros krūviai sukuria elektrinį lauką. Šiandien elektros krūvių traukos ir stūmos dėsnis vadinamas Kulono dėsniu.

XIX a. britų fizikas ir inžinierius Viljamas Tomsonas (*William Thomson*), vėliau už savo nuopelnus gavęs lordo Kelvino titulą, nustatė, kad Žemės paviršius turi neigiamą elektrinį potencialą atmosferos atžvilgiu, ir apskaičiavo, jog dėl oro elektrinio laidumo Žemės paviršius visą savo krūvį prarastų greičiau nei per valandą, jei nebūtų šaltinio, kuris jį papildytų²⁰. Kad geriau suprastume elektrinius reiškinius atmosferoje, jis pasiūlė atmosferą įsivaizduoti kaip milžinišką sferinį kondensatorių, kurio viena plokštelė yra elektros srovei laidus Žemės paviršius, o kita – „pakabinta“ jonosferoje. V. Tomsono pasiūlytas elektrinis atmosferos modelis, aišku, gerokai patobulintas, naudojamas ir šiandien.

Jonosfera, skirtingai nei žemiau esantys atmosferos sluoksniai, ypač priežeminiis oro sluoksnis, kuriame vyksta visas mūsų gyvenimas, yra labai laidus elektrai. Jonosferos, beje, kaip ir paties Žemės paviršiaus, elektrinis laidumas yra

²⁰ Įsivaizduojant, kad Žemės atmosfera yra milžiniškas kondensatorius, žinant jo varžą R ir elektrinę talpą C , galima nesunkiai apskaičiuoti, per kiek laiko jis išsikraus – $t = 2\pi RC$. Yra išmatuota, kad varža tarp viso Žemės rutulio ir jonosferos yra apie 200Ω (omų), o talpa – apytikriai $1 F$ (faradas), taigi gautume, kad Žemės atmosfera savaime turėtų išsikrauti per $t = 1256$ s, t. y. per beveik 21 min. Pastaba: 20 km^2 ploto oro stulpo nuo Žemės paviršiaus iki jonosferos varža yra milžiniška – apie $500 M\Omega$, tačiau visas Žemės paviršius ekvivalentus daugybei lygiagrečiai sujungtų tokių varžų, tad ir gauname bendrą 200Ω atmosferos varžą.



↑ 2 pav.
Pasaulio žaibų žemėlapis. Žaibų tankis vertinamas jų kiekiu per metus į km²

10^{12} (trilijoną) kartų didesnis nei priežeminio oro sluoksnio. Tai reiškia, kad jonosferoje yra daug laisvųjų krūvininkų – elektronų ir jonų. Šiuos laisvuosius krūvininkus sukuria Saulės vėjas (11.3 posk.), atomų ir molekulių fotojonizacija dėl ultravioletinės Saulės spinduliuotės ir kosminiai spinduliai – iš tarpžvaigždinės erdvės į atmosferą įskriejusios labai didelės energijos elementariosios dalelės, gimstančios per supernovų sproгимus. Nuolat įelektrinta jonosfera Žemės paviršiaus atžvilgiu turi 250 kV potencialą [3], kuris kuria nuolatinį elektrinį lauką visoje atmosferoje, o pačioje jonosferoje dėl elektringųjų dalelių sąveikos su Žemės magnetiniu lauku teka stiprios elektros srovės.

Mūsų įsivaizduojamame milžiniškame kondensatoriuje atmosfera iš esmės atlieka dielektriko vaidmenį, kuris užpildo tarpą tarp kondensatoriaus plokštelių. Kartu skirtingi atmosferos sluoksniai pasižymi labai skirtingu elektriniu laidumu. Kaip jau minėta, šiek tiek laidus elektros srovei yra net ir priežeminis oro sluoksnis. Viena pagrindinių priežeminio oro sluoksnio įsielektrinimo ir elektrinio

laidumo priežasčių yra skvarbūs kosminiai spinduliai ir natūralus grunto radioaktyvumas (radioaktyvių branduolių skilimas, daugiausia sunkesnių už orą radono dujų), dėl kurių atsiranda laisvos elektringosios dalelės ir jonizuojanti spinduliuotė. Išmatuota, kad 1 m³ oro, kuriuo kvėpuojame, nuolat yra apie 1 000 laisvųjų elektronų. Šis laisvųjų elektronų kiekis, kuris iš esmės ir lemia elektrinį priežeminio oro laidumą, yra labai mažas, palyginti su neutralių molekulių tankiu ties Žemės paviršiumi (3×10^{19} cm⁻³). Didėjant aukščiui, atmosferos elektrinis laidumas ima greitai didėti: stratosferos oro (50 km aukštyje) elektrinis laidumas yra didesnis apie 1 000 kartų, mezosferos (80 km aukštyje) – jau šimtą milijonų kartų didesnis, o jonosferos, kaip jau minėta, – net 10^{12} kartų didesnis nei priežeminio oro sluoksnis. Kadangi elektrinio lauko stipris atvirkščiai proporcingas elektriniam laidumui, stipriausias elektrinis



↑ 3 pav.
Žaibas debesies viduje. T. Janušonio nuotr.

laukas (apie 130 V/m) yra ties žemės paviršiumi ir greitai silpnėja kylant aukštyn, pavyzdžiui, 20 km aukštyje elektrinio lauko stipris yra apie 1 V/m, o 50 km aukštyje – tik 0,01 V/m. Jonosferos elektrinis potencialas paros bėgyje kinta maždaug 30 % ribose, tiek pat kinta ir elektrinio lauko stipris ties Žemės paviršiumi. Išmatuota, kad pats silpniausias elektrinis laukas yra naktį, o stipriausias – popiečio valandomis ir vakare. Toks periodinis elektrinio lauko kitimas aprašomas vadinamąja Karnegio kreive (angl. *Carnegie curve*). Įvertinta, kad dėl oro laidumo atmosferoje nuolat teka elektros srovė, vadinama giedro oro srove (angl. *fair weather current*), kurios tankis yra apie 2×10^{-12} A/m². Ši srovė lokaliai labai nedidelė, tačiau žvelgiant visos atmosferos mastu, būtent ji ir iškrauna atmosferos kondensatorių. Jei taip nutiktų, jonosferos ir Žemės paviršiaus potencialai susilygintų. Tačiau taip niekada nenutinka, kadangi šį kondensatorių nuolat įkrauna žaibai. Taigi žaibas gali būti suprantamas kaip natūralus planetos būdas išsaugoti elektrinę pusiausvyrą tarp jos paviršiaus ir atmosferos.

Ilgamečiai NASA meteorologinių palydovų vykdyti

stebėjimai iš kosmoso atskleidė, kad žaibų tankis ties Žemės paviršiumi pasiskirstęs labai netolygiai [4]. Virš sausumos kerta nepalyginti daugiau žaibų nei virš vandenynų. Šis faktas aiškinamas tuo, kad virš sausumos cirkuliuoja daug stipresni konvekciniai oro srautai, dėl kurių įsielektrina debesys. NASA duomenimis, žaibų dažnis ypač didelis virš tropinių Pietų Amerikos, Afrikos ir Pietryčių Azijos rajonų (2 pav.). Liepos ir rugpjūčio mėnesiais registruojamas padidėjęs žaibų intensyvumas šiauriniame mūsų planetos pusrutulyje. Pietų Europoje į kvadratinio kilometro plotą per metus vidutiniškai kerta 8 žaibai, Vidurio Europoje – 2–3, o Skandinavijos šalyse – mažiau nei vienas. Lietuvoje kvadratinio kilometro plotui vidutiniškai tenka 1–2 žaibai per metus. Pasaulio žaibų sostine pelnytai galima įvardyti Centrinę Afriką, kur per metus į vieno kvadratinio kilometro plotą kerta daugiau nei 50 žaibų.

Natūralu, kad viršutinių atmosferos sluoksnių, ypač jonosferos, laidumas keičiasi Saulės aktyvumo ciklo bėgyje, tačiau yra sukaupta pakankamai duomenų, rodančių, kad žmogaus veikla taip pat palieka pėdsaką globalioje elektrinėje Žemės grandinėje. Pavyzdžiui, praėjusio amžiaus viduryje intensyviai vykdyti branduolinio ginklo bandymai buvo gerokai paveikę globalios elektrinės Žemės grandinės pusiausvyrą. Nutraukus bandymus, viskas lyg ir stojo į savo vietas [5], tačiau pastaruoju metu ėmė ryškėti kiti įtakos veiksniai. Šiuo metu vis pagrįsčiau manoma, kad klimato kaita tiesiogiai įtakoja atmosferos elektrinę pusiausvyrą. Prognozuojama, kad, keičiantis klimatui, atsiras vis daugiau ekstremalių reiškinių (iš esmės tai pastebime jau dabar) – daugės temperatūros anomalijų, dėl kurių didės sausros, jas keis intensyvios liūtys, formosis didesni ciklonai ir uraganai. Kartu pastebėta, kad dėl nuolat didėjančių įvairių antropogeninės kilmės teršalų kiekių palaipsniui keičiasi ir žemutinių atmosferos sluoksnių elektrinis laidumas [6]. Kaip šie pokyčiai atsispindės pasauliniame žaibų



↑ **4 pav.**
Naktinis žaibas debesies viduje. A. Dubiečio nuotr.

žemėlapyje, gali būti, kad sužinosime jau artimiausiu metu.

Žaibai užregistruoti ir kitų Saulės sistemos planetų – Jupiterio, Saturno, Urano ir Veneros atmosferose. Taip šios planetos palaiko savo elektrinę pusiausvyrą. Manoma, kad elektros išlydis galėjo būti katalizatorius pirmiesiems organiniams junginiams bei gyvybei Žemėje atsirasti.

8.3 Kaip atsiranda žaibas?

Žaibas – tai savaiminis trumpalaikis didelės srovės elektros išlydis, kurio ilgis matuojamas kilometrais [7]. Fizikiniai vyksmai, lemiantys žaibo atsiradimą, yra įvairūs ir sudėtingi. Iki šiol žaibų atsiradimą gaubia daug mįslių

ir neatsakytų klausimų. Elektros iškrovos skirstomos į keturis tipus – debesies viduje (angl. *intracloud lightning*), tarp debesų (angl. *cloud-to-cloud lightning*), iš debesies į orą (angl. *cloud-to-air lightning*) ir iš debesies į žemę (angl. *cloud-to-ground lightning*). Apie 90 % visų žaibų įvyksta debesies viduje. Šie žaibai labai gražūs, neretai nusidriekia per didelę dangaus skliauto dalį (1, 3 pav.) ir yra mažiausiai pavojingi. Audros debesims tolstant, jų viduje vykstančių žaibų tiesiogiai nebesimato, tačiau jie labai įspūdingi naktį, kai žvaigždėto dangaus fone esančio debesies vidus ima blykčioti, tarsi jo viduje kažkieno nematoma ranka junginėtų šviesą (4 pav.). Žaibai tarp debesų ir iš debesies į orą yra

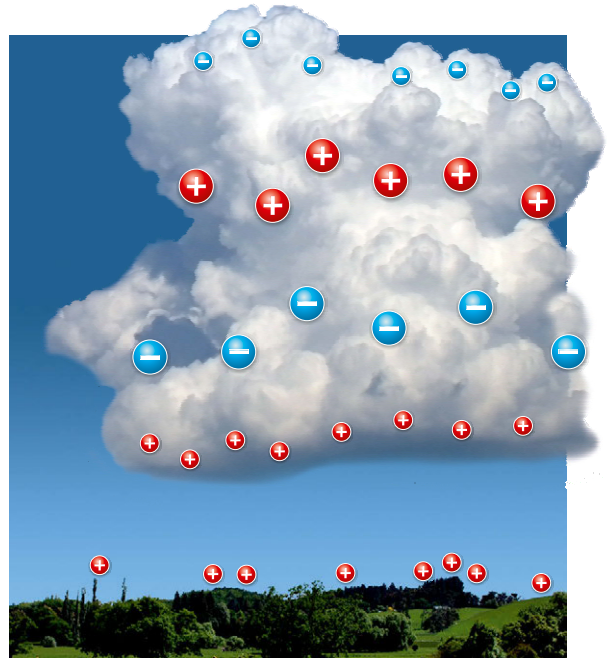


● 5 pav.

Iš debesies apačios į žemę kertantys (neigiami)
žaiibai. *T. Janušonio nuotr.*

labai reti ir sudaro vos keletą procentų viso žaibų. Aišku, pavojingiausi yra žaibai, kertantys iš debesies į žemę (5 pav.). Jie sudaro apie 10 % visų žaibų. Apie 9/10 tokių žaibų kerta iš debesies apačios ir perduoda žemės paviršiui neigiamą elektros krūvį, tad šie žaibai dažnai vadinami neigiamais. Likęs dešimtadalis iš debesies į žemę kertančių žaibų kerta iš debesies viršaus (8 pav.) ir perduoda žemės paviršiui teigiamą elektros krūvį, todėl vadinami teigiamais.

Sąlygos įvykti žaibui susidaro, kai debesys smarkiai įsielektrina. Apskritai įsielektrina visi vertikalios raidos (kamuoliniai) debesys, tačiau tik dideliuose kamuoliniuose lietaus debesyse susidaro stiprūs elektriniai laukai, kurių stipris pakankamas žaibui atsirasti. Formuojantis tokiems debesims, elektrinio lauko stipris ties žemės paviršiumi padidėja iki 100 ir daugiau kartų, nuo kelių šimtų V/m iki 4–10 kV/m ir net iki 300 kV/m kelių kilometrų aukštyje. Tuomet elektrinė pusiausvyra tarp debesies ir žemės paviršiaus yra pažeidžiama, o smogęs žaibas ją vėl atkuria. Kol kas nėra vienos nuomonės, kaip tiksliai vyksta debesų įsielektrinimas ir kaip debesyje juda elektros krūviai, dėl kurių atsiskyrimo susidaro stiprūs elektriniai laukai. Šie procesai labai įvairūs ir sudėtingi, tačiau įvairių tyrimų duomenys rodo, kad elektros krūviai atsiranda dėl stipraus skirtingos temperatūros oro masių maišymosi ir jose esančių dalelių (vandens lašelių, ledo kristalų, ledokšnių) tarpusavio sąveikos [8] – panašiai kaip velkantis sintetinį megztinį įsielektrina ir kūnas, ir megztinis. Lengvesni ledo kristalai įsielektrina teigiamai, o sunkesni vandens lašai ir ledokšniai – neigiamai, tad atsiradę elektros krūviai persiskirsto taip, kad debesies apačia tampa įelektrinta neigiamai, o viršus – teigiamai, ir debesis tampa panašus į milžinišką elektrinį dipolį (6 pav.). Šį dipolį papildomai ekranuoja nedideli teigiami elektros krūviai, išsidėstę debesies apačioje, ir neigiami elektros krūviai, esantys pačioje debesies viršūnėje.



↑ 6 pav.
Elektros krūvių pasiskirstymas įelektrintame debesyje. J. Griciaus pieš.

Giedru oru žemės paviršius įelektrintas neigiamai ir turi neigiamą potencialą atmosferos atžvilgiu, tačiau atsiradus dideliame nesubalansuotam neigiamam krūviui debesies apačioje, staiga tampa įelektrintas teigiamai. Labiausiai teigiamai įsielektrina aukštesni objektai – medžiai, pastatai ir, žinoma, žaibolaidžiai, o didžiausias teigiamas krūvis „suteka“ į pačias jų viršūnes. Natūralu, kad į tokius objektus dažniausiai ir trenkia žaibas. Nesulaukę žaibo, smarkiai įsielektrinę objektai savaime išsikrauna tiesiog į orą. Retkarčiais naktį jie ima švytėti blausia melsva šviesa. Šis švytėjimas atsiranda dėl lėtai vykstančio vainikinio išlydžio (angl. *corona discharge*) tarp įelektrinto paviršiaus ir oro, ir vadinamas šventojo Elmo ugnimis. Atsiradęs stiprus elektrinis laukas tarp debesies ir žemės prasklaido nedidelį

pačioje debesies apačioje susikaupusį teigiamą ekranuojantį krūvį ir priverčia laisvuosius elektronus, kurių krūvis neigiamas, judėti nuo debesies link žemės paviršiaus. Kartu elektrinis laukas įgreitina laisvuosius elektronus tiek, kad jų energija tampa pakankama jonizuoti neutralias oro molekules, taip išlaisvinant dar daugiau elektronų. Išlaisvintus elektronus vėl greitina elektrinis laukas, tad jų kiekis ir koncentracija nepaliaujamai didėja. Šis reiškinys vadinamas griūtine jonizacija. Tokia akiai nematoma jonizacijos banga vadinama lyderiu (angl. *leader*) ir sklinda maždaug 20 km/s greičiu, suformuodama kelių centimetrų pločio laidų kanalą tarp debesies ir žemės paviršiaus. Kadangi jonizacijos banga sklinda atsitiktiniu keliu, tarsi jo ieškodama, ji išsikreivina ir neretai išsišakoja. Po kelių akimirksnių šiuo kanalu ima tekėti galingas elektros srovės impulsas, kuris ir iškrauna debesyje susidariusį elektros krūvį. Elektros srovės impulsas sukelia galingą šviesos blyksnį, kuris matomas net ir dienos šviesoje. Srovės stipris impulso metu siekia keletą tūkstančių amperų, o jo sklidimo greitis pasiekia net 1/3 šviesos greičio. Įdomu tai, kad srovės tekėjimo kryptis pagal apibrėžimą yra priešinga elektronų judėjimo kryptčiai, tad, elektronams judant nuo debesies link žemės, elektros srovė teka nuo žemės link debesies.

Dažnai galima pastebėti, kad žaibo blyksnis mirga – taip matomi tuo pačiu kanalu sklindantys keli elektros srovės impulsai, kurie atsikartoja kas kelias šimtąsias sekundės dalis. Siauras išlydžio kanalas įkaista iki 30 000 laipsnių – tai net 5 kartus viršija Saulės fotosferos temperatūrą! Tad nenuostabu, kad žaibas padega pastatus, akimirksniu suskaldo ir išdžiovina medžius (7 pav.). Dėl ypač aukštos temperatūros žaibas sukelia ir daugybę specifinių cheminių reakcijų. Vienos jų metu susidaro trumpai gyvuojanti triatomė deguonies molekulė – ozonas. Po stiprios audros išėjus į lauką, dar kurį laiką galima užuosti ore tvyrantį specifinį aštrų ozono dujų kvapą.

Įkaitintas išlydžio kanalas dėl slėgių skirtumo žaibiškai plečiasi, sukeldamas galingas akustines (garso) bangas – griaustinę (perkūniją). Suskaičiavus, kiek laiko prabėga nuo žaibo žybsnio iki griaustinio, galima gana tiksliai įvertinti atstumą iki žaibo. Žinant, kad garso greitis ore yra apie 340 m/s, kiekvienos trys sekundės²¹ tarp žaibo blyksnio ir griaustinio lygios apytikriai 1 km. Atidžiau įsiklausius į griaustinę, galima išgirsti, kad jo garsas labai nevienodas: iš pradžių jis aukštas ir šaižus, o pabaigoje – žemas ir dundantis. Taip yra dėl oro dispersijos garso bangoms – aukšto dažnio bangos sklinda greičiau nei žemo dažnio. O jei žaibas kerta čia pat, visi garso dažniai girdimi tuo pat metu ir susilieja į kurtinantį trenksmą. Be to, aukšto dažnio garso bangos ore silpsta kur kas smarkiau – tolumas griaustinis girdisi tik kaip žemo dažnio grumėjimas. Jei žaibuoja labai toli, griaustinio išvis nebesigirdi. Karštomis vasaros naktimis, kai žaibuoja toli už horizonto, visas giedras dangaus skliautas blykčioja. Tokie žaibai be griaustinio kartais vadinami šiluminiais žaibais (angl. *heat lightning*) arba amalu.

Panašus įvykių scenarijus gerai tinka ir teigiamiems žaibams, kertantiems iš debesies viršaus, aprašyti. Vienok buvo išmatuota, kad teigiamo žaibo srovės impulsas yra kelis šimtus kartų didesnis nei neigiamo žaibo ir gali siekti 200–300 kA. Tad akivaizdu, kad teigiami žaibai yra patys pavojingiausi. Būtent jie sukelia didžiausius gaisrus ir padaro didžiausių nuostolių. Teigiami žaibai kartais vadinami žaibais iš giedro dangaus, nes paprastai turi žaibo atšaką, kuri nusidriekia per giedrą dangų (8 pav.). Teigiami žaibai nėra labai reti. Maždaug kas dešimtas į žemę smogiantis žaibas yra teigiamas, tačiau jį išvysti galima tik

²¹ Sekundes galima gana tiksliai apskaičiuoti ir be laikrodžio, skaičiuojant – šimtas dvidešimt vienas, šimtas dvidešimt du, šimtas dvidešimt tys ir t. t.



artėjant arba tolstant dideliems kamuoliniams lietaus debesims. Beje, nustatyta, kad teigiami žaibai dažniausi, kai audros su perkūnija kyla šaltuoju metų laiku (nors apskritai tokios audros retos).

Pateiktas savaiminio elektros išlydžio – žaibo – fizikinių vyksmų modelis, aišku, yra gerokai supaprastintas. Nesenai tyrimai atskleidė, kad pati jonizacijos banga yra laiptuota, pradinis elektros išlydis įvyksta tik nedideliu (apie 50 m ilgio) atstumu, kol palaipsniui keliaudamas žemyn pasiekia žemės paviršių. Visi minėti reiškiniai įvyksta per labai trumpą laiką, žaibas vidutiniškai tetrunka apie 0,05 s.

Radijo bangų trikdžius (radijo imtuvo garso traškėsį) perkūnijos metu yra girdėjęs kiekvienas, tačiau moderni mokslinė aparatūra registruoja ir Rentgeno bei gama spindulių pliūpsnius. Tiriant patį žaibo atsiradimą, susidurta su rimta fundamentine problema. Kadangi žaibas yra ne kas kita, kaip elektrinis oro pramušimas, „užtrumpinantis“

7 pav.

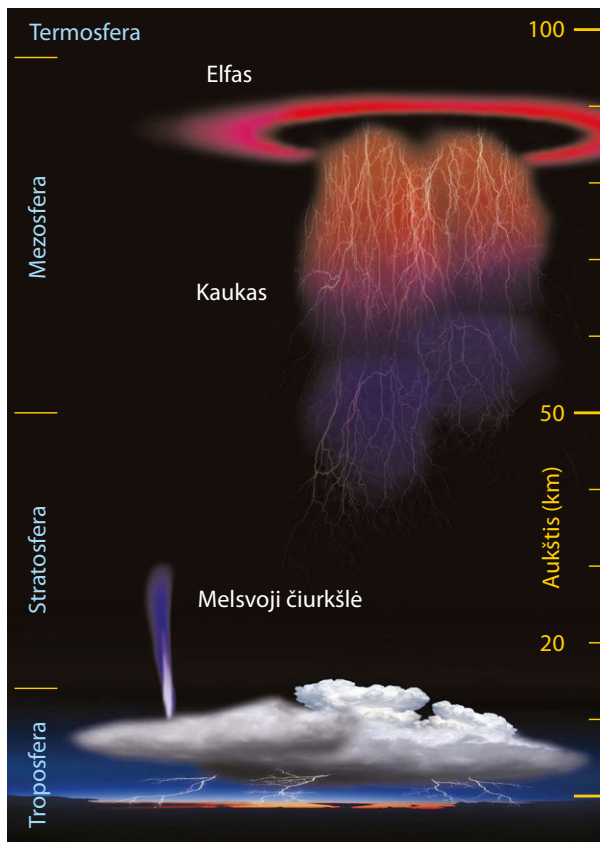
Žaibo kirčio suskaldytas medis. A. Dubiečio nuotr.

8 pav.

Žaibas, kertantis iš debesies viršaus (teigiamas žaibas), ir žaibas iš giedro dangaus. A. Dubiečio nuotr.

įsielektrinusį debesį ir žemės paviršių, elektrinio lauko stipris turi būti didesnis už elektrinio oro pramušimo vertę. Apskritai oras yra labai blogas elektros srovės laidininkas. Išmatuota, kad elektrinio lauko stipris, reikalingas elektriniam oro pramušimui ties žemės paviršiumi pasiekti, yra apie 20 kV/cm, arba 2 MV/m. Tačiau, kaip rodo elektrinių laukų matavimai, vykstant natūraliam žaibui, elektrinio lauko stipris yra dešimtis ar net šimtus kartų mažesnis. Kodėl žaibas prasideda esant tokiems „silpniesiems“ elektriniams laukams, iki šiol tebėra paslaptis.

Pirmieji žingsniai praskleidžiant šios paslapties skraistę žengti visai neseniai, kai buvo gauta naujų eksperimentinių faktų, bylojančių, kad pradinį išlydžio



↑ 9 pav.
Elektros išlydžiai aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose. J. Griciaus pieš.

momentą inicijuoja labai didelės energijos ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ir didesnės) kosminiai spinduliai, kurie Žemės atmosferoje jonizuoja neutralias oro molekules ir sukelia antrinių elektringųjų dalelių pliūpsnius – vadinamąsias atmosferos liūtis [9]. Pavyzdžiui, viena kosminė dalelė, kurios energija 10^{15} eV , gali sukurti iki 1 milijono antrinių dalelių. Įprastinėmis sąlygomis (nesant išorinio elektrinio lauko) antrinių elektringųjų dalelių, daugiausia elektronų, lėkio kelias atmosferoje tėra 1–2 m, tačiau jei išorinio elektrinio lauko

stipris viršija tam tikrą slenkstinę vertę, antriniai elektronai gali nulėkti net iki 50 m atstumą. Buvo atrasta, kad tuomet antriniai elektronai, kiekvieną kartą susidurdami su oro molekulėmis ir jas jonizuodami, ne lėtėja, o vis labiau greitėja, tad buvo pavadinti greitėjančiais elektronais (angl. *runaway electrons*). Sutapimas ar ne, bet labai panašaus ilgio yra vienas jonizacijos bangos „laiptas“, todėl pagrįstai manoma, kad būtent tokie nubėgantys kosminių spindulių sukurti antriniai elektronai ir duoda pradžią žaibui.

8.4 Elektros išlydžiai aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose

Dar 1925 m. Č. Vilsonas numatė, kad, vykstant žaibui, kartu turėtų įvykti ir elektros išlydis aukštyn nuo debesies, į aukštesnius atmosferos sluoksnius. Jo fundamentinės įžvalgos buvo patvirtintos XX a. devintajame dešimtmetyje, kai iš tiesų buvo pastebėti žaibavimą lydintys elektros išlydžiai stratosferoje, mezosferoje ir net jonosferoje (9 pav.). Visi šie elektros iškrovos reiškiniai aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose trunka nuo kelių milisekundžių iki kelių sekundžių, tad buvo pavadinti trumpalaikiais švytinčiais įvykiais (angl. *Transient luminous events – TLEs*). Atskiri trumpalaikiai švytintys įvykiai buvo pakrikštyti egzotiškais vardais – kaukais (angl. *sprite*), melsvosiomis čiurkšlėmis (angl. *blue jet*) ir elfais (angl. *ELVES*) [10]. Angliškas trumpinys ELVES neturi nieko bendra su mistinėmis pasakų būtybėmis elfas. Tai – Emissions of Light and Very low Frequency Perturbations due to Electromagnetic Pulsation Sources – išvertus į lietuvių kalbą, reiškia „spinduliuotė ir labai žemo dažnio trikdžiai, kylantys iš elektromagnetinių impulsinių šaltinių“. Nustatyta, kad kaukai ir elfai atsiranda vykstant tegiamiems

žaiabams, o melsvosiasis čiurkšlės sukelia neigiami žaibai.

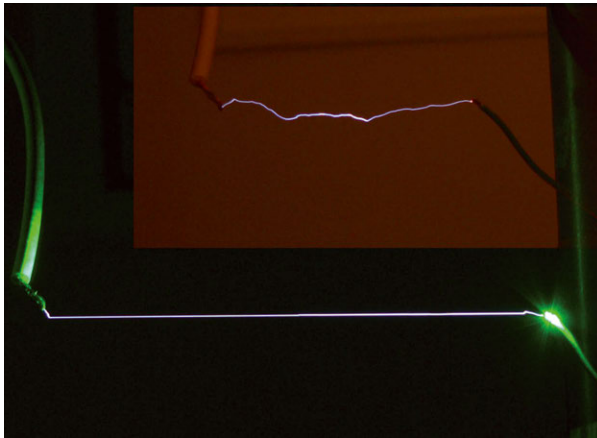
1989 m. filmuojant besiformuojantį uraganą, buvo atrasta, kad iš didžiulių kamuolinių lietaus debesų kartu su žaibais įvyksta elektrinis išlydis aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose [11]. Šis išlydis švyti blausia rausva šviesa ir driekiasi 50–90 km aukštyje (mezosferoje), užimdamas milžinišką (iki 1000 km³) erdvės tūrį. Jis buvo pavadintas kauku. Kaukai gali įgauti daugybę įvairiausių ir keisčiausių pavidalų. Klasifikuodami juos pagal išvaizdą, mokslininkai davė valią fantazijai ir humorui, pavadindami atskirus kaukus šakutėmis (angl. *wishbone*), medžiais (angl. *tree*), angelais (angl. *angel*), medūzomis (angl. *jellyfish*) ir net morkomis (angl. *carrot*). Rausvas kauko švytėjimas atsiranda elektrinio lauko greitinamiems elektronams susidūrus su azoto molekulėmis ir jas sužadinant. Sužadintos azoto molekulės ima švytėti, o pats reiškinys vadinamas fluorescencija. Žemame slėgyje vykstantis elektros išlydis yra „šaltas“, oras jam vykstant, priešingai nei žaibo atveju, neįkaista, o toks išlydis vadinamas rusenančiu (angl. *glow discharge*) [12]. Beje, remiantis rusenančio išlydžio principu veikia visos žemo slėgio fluorescencinės lempos, neono šviesos ir plazminių televizorių ekranai. Kaukas vidutiniškai švyti apie 60–100 ms (0,06–0,1 s), o jo švytėjimo intensyvumas ne didesnis nei gana vidutinio šviesumo šiaurės pašvaistės, tad akinančio žaibo fone plika akimi jį pamatyti gana sudėtinga. Tačiau, pavyzdžiui, Vengrijoje per trejus nuolatinių stebėjimų metus pavyko nufilmuoti ar nufotografuoti beveik 500 kaukų [13]. Dar trumpiau, maždaug 1 ms, trunka elfai – rausvas beveik šviesos greičiu besiplečiantis žiedo formos elektros išlydis jonosferoje. Optiškai užfiksuoti šį išlydį labai sudėtinga dėl mažo jo šviesumo ir labai trumpo gyvavimo laiko, tačiau elfą išduoda labai žemo dažnio (10 Hz – 1 KHz) radijo bangų pliūpsniai, kuriuos registruoja mokslinė aparatūra. Melsvosios čiurkšlės ištrykšta iš debesies viršaus

prabėgus 5–10 s po žaibo kirčio [14]. Melsvosios čiurkšlės nusidriekia į 18–21 km aukštį, užgesdamos stratosferoje. Tačiau visai neseniai užregistruotos ir milžiniškos melsvosios čiurkšlės, pasiekiančios net 90 km aukštį. Kaip ir kiti elektros išlydžiai aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose, melsvosios čiurkšlės atsiranda dėl po žaibo kirčio likusio didelio nesubalansuoto teigiamo elektros krūvio debesies viršuje.

8.5 Dirbtiniai žaibai

Šiuolaikiniai moksliniai žaibų tyrimai yra sudėtingi, o juos apsunkina ir tai, kad iš anksto tiksliai numatyti, kur ir kada trenks žaibas, beveik neįmanoma. Kita vertus, žaibo neprognozuojamumas kelia daug rūpesčių siekiant efektyviai nuo jo apsisaugoti. Lietuvoje žaibai didelio pavojaus nekelia, nors kiekvienais metais ir girdime pranešimų apie žaibo padegtus pastatus ar sugadintas elektros pastotes. Tačiau pasaulyje yra vietų, kur žaibai kelia iš tiesų rimtų problemų. Pavyzdžiui, JAV Floridos valstija, kurioje įrengtas Kenedžio kosmodromas, žaibų požiūriu yra pati aktyviausia vieta visame Šiaurės Amerikos žemyne (2 pav.). Jei pranešama, kad kosminės raketos skrydis atidedamas dėl blogų orų, vadinasi, jis atidedamas dėl žaibų, kurie gali lengvai pažeisti kylančią raketą nešėją ar patį kosminį aparatą, kaip jau buvo ne kartą nutikę.

Galimybė sukurti dirbtinį žaibą, kurio atsiradimo laikas ir vieta yra tiksliai žinomi, moksliniu požiūriu neįkainojama. Sudėtinga aparatūra gali nuosekliai fiksuoti įvairius parametrus (elektrinio lauko ir srovės stiprio kiti-mą, oro jonizaciją, elektros srovės stiprį išlydžio metu, chemines reakcijas, įvairių dažnių elektromagnetinę spinduliuotę ir pan.) ir taip atkurti visą žaibo vystymosi dinamiką. Tai savo ruožtu įgalina kurti ir tobulinti fizikinius žaibo



↑ 10 pav.

Dirbtiniai žaibai laboratorijoje: viršuje – savaiminis elektros išlydis tarp dviejų elektrodų, tarp kurių pridėta 100 kV įtampa, apačioje – intensyviu lazerio spinduliu sukeltas elektros išlydis.
G. Tamošausko nuotr.

radimosi modelius, atskleisti naujus, nestebėtus dėsningumus. 1967 m. buvo sugalvota „iškrauti“ išelektrinusius audros debesis, per juos paleidžiant nedidelę raketą, kuri įžeminta per išsivyniojantį laidą. Galima sakyti, kad įžeminta raketa yra moderni Franklino aitvaro versija. Kad raketa sukeltų elektros išlydį, jos greitis turi viršyti bent 200 m/s. Kitaip tariant, laidus kanalas – šiuo atveju raketos įžeminimo laidas – tarp priešingo ženklo potencialų turi atsirasti labai greitai, priešingu atveju krūviai spėja persiskirstyti ekranuodami laidą, ir išlydis įvykti nebegali. Pavyzdžiui, gerai žinoma, kad žaibas niekada netrenkia į aukštai pakilusius ir lėtai sklendžiančius įžemintus oro balionus, kurie naudojami įvairiems meteorologiniams tyrimams. Nedidele raketa sukelti dirbtinį žaibą pavyksta 6 atvejais iš 10, ir šis metodas jau kurį laiką sėkmingai naudojamas moksliniams žaibų tyrimams [15]. Ateityje šią dirbtinių žaibų technologiją numatoma diegti JAV kosmodromuose ir

kituose strateginės svarbos objektuose, siekiant apsaugoti juos nuo žaibo smūgių.

Kiek vėliau buvo sugalvotas ir kitas būdas dirbtiniams žaibams sukelti. Eksperimentuojant su intensyviais lazerio spindulių pluoštais, buvo pastebėta, kad galinga lazerio spinduliuotė jonizuoja neutralias dujų molekules ar atomus [16]. Jonizuotos dujos yra laidžios elektros srovei. Jei tokių jonizuotų dujų kanalas atsirastų tarp įelektrinto debesies ir žemės, juo imtų tekėti elektros srovė – įvyktų elektros išlydis. Taip gimė lazeriu valdomo žaibo idėja. Oras yra dujų mišinys, sudarytas iš azoto, deguonies, argono ir kitų elementų bei junginių (1 sk. 1 lentelė), tačiau jonizacinės oro savybes faktiškai lemia tik azotas ir deguonis, kurių koncentracija yra didžiausia. Šių dujų molekulių jonizacijos potencialai atitinkamai yra 15 eV ir 12 eV. Norint šias dujų molekules jonizuoti, vieno elektromagnetinės spinduliuotės fotono energija turi viršyti jų jonizacijos potencialą²². Tai nėra maža energija. Iš visų elektromagnetinių bangų tokią ar didesnę energiją turi tik Rentgeno ir gama spinduliai. Lazerių, spinduliuojančių artimojoje infraraudonojoje, matomoje ir ultravioletinėje spektro srityse, vieno fotono energija tesiekia nuo 1 eV iki 4 eV. Tačiau esant labai dideliame lazerio spinduliuotės intensyvumui, dujų molekulės ima sugerti po kelis fotonus iškart. Toks reiškinys vadinamas daugiafotone sugertimi. Keli ar keliolika vienu metu sugertų nedidelės energijos fotonų išlaisvina elektroną ir jis tampa laisvuoju krūvininku. Atsiradęs elektronas elektriniame lauke yra

²² Jonizacijos potencialas – tai energija, reikalinga atplėsti elektroną nuo atomo ar molekulės. Jonizacijos potencialas matuojamas elektronvoltais (eV). 1 eV atitinka energiją, kurią įgauna elektronas, judėdamas elektriniame lauke, kurį kuria 1 volto potencialų skirtumas.

greitinamas, ir, susidurdamas su neutraliomis molekulėmis, jau pats gali jas jonizuoti, išmušdamas vis naujus elektronus. Kadangi lazerio spindulys yra nedidelių skersinių matmenų (paprastai nuo kelių milimetrų iki kelių centimetrų skersmens), taip galima dirbtinai sukurti siaurą stipriai jonizuotų dujų kanalą, kuris yra laidus elektros srovei. Šiuolaikinių lazerių spinduliuotė yra tokia intensyvi, kad trumpas lazerio impulsas (šviesos pliūpsnis) savo kelyje gali jonizuoti kone visas neutralias oro molekules. Tačiau tai netgi nėra būtina. Neseni tyrinėjimai atskleidė, kad, norint sukelti elektros išlydį lazeriu, visiškai pakanka, kad laisvųjų elektronų tankis pasiektų „tik“ 10^{11} cm^{-3} (t. y. pakanka jonizuoti tik 1 oro molekulę iš 100 mln.). Nedidelį lazerio spinduliu valdomą žaibą nesunku sukelti laboratorijos sąlygomis. Toks elektros išlydis vyksta toje vietoje, kur yra lazerio spindulys, tad lazeriu sukurtas dirbtinis žaibas yra tiesus kaip styga (10 pav.).

Šiuo metu laboratorijoje pavyko pademonstruoti 4 m ilgio lazerio spinduliu valdomus megavoltinius (1 MV = 1 000 000 voltų) dirbtinius žaibus [17]. Vis dėlto pagrindinė problema kol kas siejama su labai trumpa jonizuotų dujų kanalo gyvavimo trukme, kuri neviršija keleto ar keliolikos nanosekundžių (10^{-9} s). Per tiek laiko laisvieji krūvininkai pradingsta – rekombinuoja, ir oro molekulės vėl tampa neutralios. Praskriejus trumpam lazerio šviesos blyksniui – impulsui, jonizuoto pėdsako ilgis tėra keli metrai. Tad, šviesos impulsui nuskriejus kelis šimtus metrų, pradiniame jo kelyje jonizuotas, laidus elektros srovei kanalas jau būna išnykęs. Šiuo metu aktyviai atliekami moksliniai tyrimai ir kuriami metodai, kurie įgalintų gerokai padidinti jonizuoto kanalo ilgį ar pailginti jo gyvavimo trukmę. Tai padaryti nėra paprasta, tačiau tikimasi, kad pirmasis lazerinis žaibolaidis bus sukurtas jau netoli moje ateityje.

Bibliografija

1. E. S. Ashley, C. W. Gilson, *A reassessment of U.S. lightning mortality*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**, 2009, 1501–1518.
2. E. A. Bering III, A. A. Few, J. R. Benbrook, *The global electric circuit*, *Physics Today* **51**(10), 1998, 24–30.
3. M. J. Rycroft, S. Israelsson, C. Price, *The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **62**, 2000, 1563–1576.
4. E. R. Williams, *Lightning and climate: A review*, *Atmospheric Research* **76**, 2005, 272–287.
5. R. Markson, *The global circuit intensity: its measurement and variation over last 50 years*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **88**, 2007, 223–241.
6. B. A. Tinsley, *On the variability of the stratospheric column resistance in the global electric circuit*, *Atmospheric Research* **76**, 2005, 78–94.
7. M. A. Uman, E. P. Krider, *Natural and artificially initiated lightning*, *Science* **246**, 1989, 457–464.
8. C. P. R. Saunders, *A review of thunderstorm electrification processes*, *Journal of Applied Meteorology* **32**, 1993, 642–655.
9. A. V. Gurevich, K. P. Zybin, *Runaway breakdown and the mysteries of lightning*, *Physics Today* **58**(5), 2005, 37–43.
10. T. Neubert, *On sprites and their exotic kin*, *Science* **300**, 2003, 747–748.
11. R. C. Franz, R. J. Nemzek, J. R. Winckler, *Television image of a large upward electrical discharge above a thunderstorm system*, *Science* **249**, 1990, 48–51.
12. E. R. Williams, *Sprites, elves, and glow discharge tubes*, *Physics Today* **51**(11), 2001, 41–47.
13. J. Bór, *Optically perceptible characteristics of sprites observed in central Europe in 2007–2009*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **92**, 2013, 151–177.
14. P. R. Krehbiel, J. A. Riousset, V. R. Pasko, R. J. Thomas, W. Rison, M. A. Stanley, H. E. Edens, *Upward electrical discharges from thunderstorms*, *Nature Geoscience* **1**, 2008, 233–237.
15. V. A. Rakov, M. A. Uman, K. J. Rambo, *A review of ten years of triggered-lightning experiments at Camp Blanding, Florida*, *Atmospheric Research* **76**, 2005, 503–517.
16. D. W. Koopman, T. D. Wilkerson, *Channeling of an ionizing electrical streamer by a laser beam*, *Journal of Applied Physics* **42**, 1971, 1883–1886.
17. O. Graydon, J. Kasparian, *Lightning control by lasers*, *Nature Photonics* **3**, 2009, 120–121.

9. Perlamutriniai debesys



● *P. Dalino nuotr.*



● **1 pav.**
Perlamutriniai debesys virš Kirunos (Švedija).
P. Dalino nuotr.



9.1 Stratosferos debesys

Susiklosčius tam tikroms sąlygoms, stratosferoje gali susidaryti spalvingi, neįprastos cheminės sudėties debesys. Tai – perlamutriniai debesys (angl. *mother-of-pearl* arba *nacreous clouds*). Tokių pavadinimą šie debesys gavo dėl ryškaus švytėjimo visomis vaivorykštės spalvomis, panašiai kaip Saulės šviesoje spindi perlai (1 pav.). Savo išvaizda perlamutriniai debesys panašūs į lęšiškuosius aukštuošius kamuolinius arba plunksninius kamuolinius debesis (3.9 posk.). Mokslinėje kalboje perlamutriniai debesys vadinami poliariniais stratosferos debesimis (angl. *Polar stratospheric clouds – PSC*), kadangi jie susidaro virš poliarinių Žemės rutulio rajonų ir tik žiemos mėnesiais. Ypač geros sąlygos perlamutriniais debesims susidaryti yra pačioje šiaurėje – Arktyje ir Antarktidoje, tačiau retkarčiais, bet atrodo, kad vis dažniau, šie paslaptingi ir egzotiški debesys atklysta ir į vidutinės platumas.

Tikslių duomenų, kas, kur ir kada pirmą kartą pastebėjo šiuos gražius ir keistus debesis, nėra, tačiau įvairūs šaltiniai byloja, kad perlamutriniai debesys buvo žinomi anksčiau nei kiti aukštieji – sidabriškieji (apie kuriuos

↖ 2 pav.

Perlamutrinųjų debesų spalvos leidžiantis Saulei.

P. Dalino nuotr.

↑ 3 pav.

Perlamutriniai debesys po Saulės laidos.

P. Dalino nuotr.

plačiau pasakojama 10 skyriuje), o reti jų pasirodymai dokumentuojami jau nuo XIX a. pabaigos [1]. Tuomet vakaro žaroje visomis vaivorykštės spalvomis švytintys debesys dažniausiai buvo registruojami virš Skandinavijos. Vieną pirmųjų preciziškai dokumentuotų perlamutrinųjų debesų vaizdų 1901 m. yra nutapęs danų dailininkas Helmutas Moltkė (*Helmuth Moltke*), kuris dalyvavo mokslinėje šiaurės pašvaisčių stebėjimo ekspedicijoje Suomijos šiaurėje ir kurio užduotis buvo tiksliai pavaizduoti šiaurės pašvaistes, kadangi anais laikais spalvota fotografija dar nebuvo išrasta [2]. Į neįprastus debesis virš Antarktidos atkreipė dėmesį ir garsiosios Roberto Skoto (*Robert Scott*) ekspedicijos nariai. Nors šie debesys matomi ir dieną, visas jų grožis išryškėja tik Saulei artėjant prie laidos ar jau nusileidus (2, 3 pav.). Po Saulės laidos troposferos debesys greitai panyra į šešėlį, tuo tarpu perlamutriniai debesys, esantys vidutiniškai 25 km aukštyje, vis dar maudosi Saulės spinduliuose

Tipas	Cheminė sudėtis	Dalelių tipas	Dydis	Temperatūra
I a	$\text{HNO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$	Kristalai	1 μm	-78 °C
I b	$\text{H}_2\text{O}/\text{HNO}_3/\text{H}_2\text{SO}_4$	Lašeliai	1 μm	-78 °C
II	H_2O	Kristalai	10 μm	-85 °C

← 1 lentelė.

Perlamutrinių debesų tipai ir cheminė sandara

ir nusidažo visomis vaivorykštės spalvomis temstančio dangaus fone. Perlamutrinius debesis sudarančios dalelės yra labai mažos (apie 1 μm dydžio), tad spalvų atsiradimo priežastis ir fizikinis mechanizmas yra lygiai toks pat, kaip ir vaivorykštinių debesų (7.4 posk.).

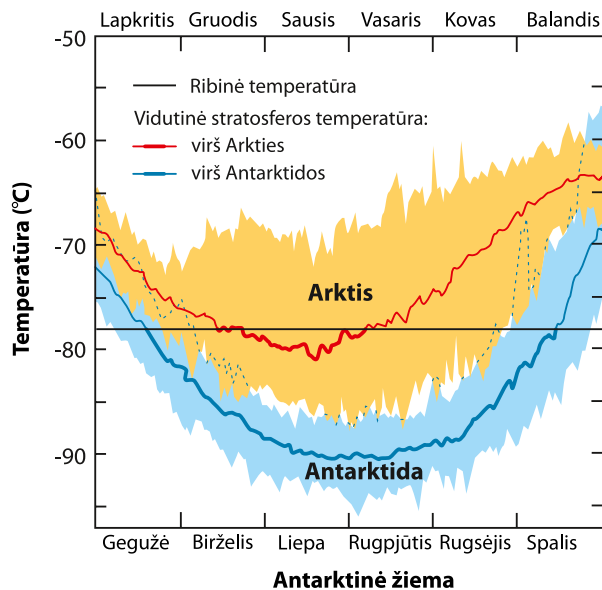
9.2 Perlamutrinių debesų sandara

Šiuolaikiniai moksliniai perlamutrinių debesų tyrimai, padėję atskleisti jų kilmę ir sandarą, pradėti 1982 m., atsiradus galimybei fiksuoti juos iš palydovų, taip pat naudojant antžeminius mokslinius prietaisus – lidarus, spektrometrus ir pan. [3]. Buvo nustatyta, kad šių paslaptinių debesų formavimasis yra glaudžiai susijęs su ekstremaliai žemomis stratosferos temperatūromis, kurias sąlygoja stabilų poliarinių sūkurių (angl. *polar vortex*) susidarymas virš poliarinių Žemės rutulio rajonų žiemos mėnesiais [4]. Kartu paaiškėjo, kad perlamutriniai debesis savo sandara smarkiai skiriasi nuo mums įprastų troposferos debesų, kurie sudaryti iš vandens lašelių (apatiniojo ir viduriniojo aukšto debesis) ar ledo kristalų (viršutiniojo aukšto debesis troposferoje ir patys aukščiausieji – sidabriškieji debesis, susidarantys mezosferoje). Tuo tarpu perlamutriniuose debesyse vanduo toli gražu nėra pagrindinis ir dažniausiai aptinkamas cheminis junginys. Pagal savo cheminę sudėtį, kuri lemia ir fizinius ypatumus, perlamutriniai debesis skirstomi į tris tipus [5]. Jie apibendrinti 1 lentelėje.

Dažniausiai formuojasi vadinamojo Ia tipo perlamutriniai debesis, sudaryti iš azoto rūgšties trihidrato ($\text{HNO}_3 \times 3\text{H}_2\text{O}$, sutrumpintai žymimo NAT). Temperatūrai nukritus žemiau -78 °C, šis cheminis junginys kristalizuojasi, ir perlamutriniuose debesyse aptinkamas mažiųjų, iki 1 μm dydžio, kristalų pavidalu. Ib tipo perlamutriniai debesis sudaryti iš sudėtingesnio, vadinamojo trejopo – azoto rūgšties, sieros rūgšties ir vandens garų – mišinio (angl. *supercooled ternary solution – STS*), kuris, esant -78 °C temperatūrai, kondensuojasi į maždaug 1 μm dydžio lašelius, tačiau neužšąla. Ir tik II tipo perlamutriniai debesis sudaryti iš nedidelių – iki 10 μm dydžio – ledo kristalų. Tačiau stratosferos sąlygomis (turint omenyje žemą slėgį) ledo kristalams atsirasti reikalinga dar žemesnė, -85 °C, temperatūra, todėl II tipo perlamutriniai debesis formuojasi kur kas rečiau. II tipo perlamutriniai debesis dažniausiai yra balti, o spalvinasi tik patys jų kraštai (1 pav.). Beje, dėl ekstremalių aplinkos sąlygų ledo kristalai II tipo perlamutriniuose debesyse turi kubinę (keturkampę) simetriją, skirtingai nei plunksninių debesų ledo kristalai, kurie yra heksagoniniai (šešiakampiai). Įdomu pastebėti, kad itin retais atvejais kubinės simetrijos ledo kristalai aptinkami ir labai aukštuose plunksniniuose debesyse, besiformuojančiuose virš tropopauzės. Jų kondensacijos centrais tampa sieros junginiai, kurių stratosferoje yra palyginti daug.

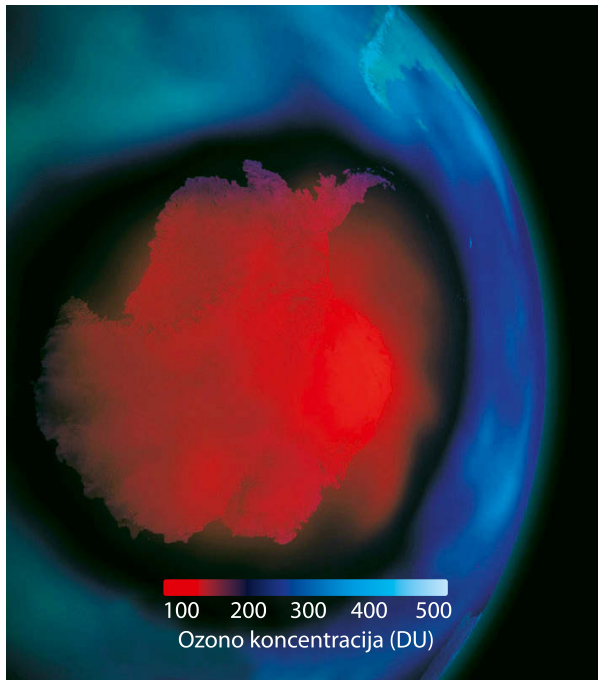
Savotišką perlamutrinių debesų cheminę sandarą lemia stratosferos – antrojo atmosferos sluoksnio, kuris plyti 15–50 km aukštyje, ypatumai. Stratosfera yra

dinamiškai stabili, ten beveik nevyksta konvekcijos ir turbulencijos (oro masių maišymosi) reiškiniai, kadangi aplinkos temperatūra dėl ultravioletinės ozono sugerties tolydžio auga didėjant aukščiui. Maždaug 50 km aukštyje stratosfera baigiasi stratopauze – sritimi, kur temperatūra pakyla beveik iki 0 °C. Nepaisant išoriškos ramybės, stratosfera – tai vieta, kurioje vyksta svarbūs cheminiai procesai. Pirmiausia stratosferoje plyti gyvybiškai svarbus triatomio deguonies – ozono (O₃) sluoksnis, kuris sugeria gyvybei ypač pavojingą ultravioletinę (280–310 nm bangos ilgio) Saulės spinduliuotę. Maksimali ozono koncentracija aptinkama 15–25 km aukštyje. Antra, stratosferoje vandens garų koncentracija yra labai maža (santykinė drėgmė čia neviršija 1 %), kadangi troposferoje esantys vandens garai beveik negali įveikti natūralaus šalčio barjero – tropopauzės. Tačiau stratosferoje gausu įvairių aerozolių – sieros ir azoto junginių bei įvairių kitų cheminių medžiagų, kurių pagrindą sudaro chloro ir fluoro junginiai. Aerozolių kiekius nuolat papildoma ugnikalnių išsiveržimai bei gamtą vis labiau niokojanti žmonijos ūkinė ir pramoninė veikla. Taigi aplinkos sąlygos stratosferoje smarkiai skiriasi nuo mums įprastų sąlygų troposferoje, kurioje vyksta intensyvi debesodara. Dėl žemo slėgio ir silpnos konvekcijos stratosferos „orai“ yra labai ramūs, o kondensacijos procesai čia gali vykti tik smarkiai nukritus temperatūrai. Stratosferos klimatas turi dar vieną labai svarbų ypatumą. Žiemos mėnesiais tiek virš pietų, tiek ir virš šiaurės ašigalių susiformuoja izoliuoti poliariniai sūkuriai (milžiniški stratosferos ciklonai), kurie įsiurbia orą iš viršutinių troposferos sluoksnių į stratosferą, taip kartu smarkiai pastarąją atšaldydami (4 pav.). Poliarinis sūkurys virš pietų ašigalio yra labai stabilus ir ilgai gyvuojantis, tad stratosfera virš Antarktidos atvėsta smarkiau, o itin žemos temperatūros išsilaiko ilgą laiką – net kelis mėnesius. Tuo tarpu poliarinis sūkurys virš šiaurės ašigalio yra



↑ 4 pav.
Vidutinė stratosferos temperatūra virš Arkties (raudona kreivė) ir virš Antarktidos (mėlyna kreivė). Nuspalvintos sritys vaizduoja temperatūros kitimo ribas, pastorintos linijos vaizduoja laikotarpį, kai temperatūra nukrinta žemiau -78 °C ribos, kuri užbrėžta juoda linija

dinamiškesnis ir kur kas mažiau stabilus, tad ir sąlygos perlamutriniais debesims formuotis šiaurės pusrutulyje yra labai permainingos. Poliarinio sūkurio zonoje temperatūra nukrinta žemiau -78 °C, kuri, kaip minėjome, laikoma ribine, kad prasidėtų kondensacijos procesai. Būtent tada ir formuojasi perlamutriniai debesys. Dėl minėtų skirtumų tarp šiaurės ir pietų pusrutulių, kuriuos lemia visiškai skirtingos klimato, meteorologinės bei geofizinės sąlygos ir kurios smarkiai veikia stratosferos temperatūrą, šie debesys net 10 kartų dažniau susidaro virš pietų ašigalio – Antarktidoje. Ten daug ilgesnis yra ir jų matomumo periodas, trunkantis bemaž 5 mėnesius.



↑ **5 pav.**
 Ozono skylė virš Antarktidos 2010 m. rugsėjo 26 d. Srities, kurioje ozono koncentracija mažesnė nei 220 DU, plotas viršija 20 milijonų km². Nacionalinės vandenynų ir atmosferos administracijos (NOAA) duomenys

9.3 Perlamutriniai debesys ir ozono skylė

Daugiau kaip šimtmetį perlamutriniai debesys buvo laikomi gražiu, įdomiu ir galbūt šiek tiek keistu, neturinčiu jokios reikšmės globaliems atmosferos procesams, reiškiniu. Tačiau 1985 m. reikalai pakrypo netikėta linkme, o perlamutrinių debesų svarba įgavo netgi grėsmingą atspalvį. Tuomet Britų Antarktidos tyrimo grupės (*British Antarctic Survey*) mokslininkai atrado, kad vidutinis ozono sluoksnio storis virš Antarktidos žiemos pabaigoje (spalio mėn.)

per gana trumpą laikotarpį – nuo 1968 iki 1985 m. – sumažėjo daugiau nei pusantro karto [6] – nuo 320 iki 190 Dobsono vienetų²³. Kadangi nuolatinis ozono sluoksnio monitoringas virš Antarktidos buvo vykdomas nuo 1957 m., užregistruoti ozono kiekio pokyčiai buvo daugiau nei akivaizdūs. Negana to, tolesnio ozono sluoksnio virš Antarktidos nykimo tendencija išliko iki pat 1995 m., kai minimali ozono koncentracija persirito per bauginamai žemą 100 DU ribą. Ženkliai sumažėjusi ozono koncentracija pavasarį virš Antarktidos registruojama kasmet (**5 pav.**), o pats reiškiny susidaręs buvo pavadintas ozono skylė (angl. *ozone hole*).

Įdomiausia šioje istorijoje buvo tai, kad per vasarą ozono kiekis didžiąja dalimi atsikurdavo, o artėjant pavasariui, ozonas ir vėl imdavo sparčiai nykti. Ozono sluoksnio nuskurdinimo greitis virš pietų ašigalio buvo tiesiog stulbinantis – milžiniška ozono skylė atsiverdavo per kelėtą savaitę, o suardyto ozono kiekis viršijo 50 % viso poliarinėje stratosferoje esančio ozono kiekio ir daugiau nei 5 % viso stratosferoje esančio ozono, gaubiančio Žemės rutulį [7]. Buvo išmatuota, kad didžiausias ozono sluoksnio nuskurdinimas įvyksta 17–22 km aukštyje – būtent ten, kur yra didžiausia jo koncentracija [8]. Ėmus ieškoti globalų ir katastrofišką mastą įgavusio reiškinių priežasčių, buvo pastebėta, kad ozono sluoksnio nuskurdinimas yra akivaizdžiai susijęs su itin žemomis stratosferos temperatūromis, kurias sąlygoja poliariniai sūkuriai, o chemiškai aktyvūs chloro bei bromo junginiai buvo identifikuoti kaip pagrindiniai elementai, atsakingi už ozono molekulių suardymą.

²³ Ozono sluoksnio storis matuojamas vadinamaisiais Dobsono vienetais (DU). 1 DU reiškia ozono sluoksnio storį šimtosiomis milimetro dalimis, jei suspaustume visą ozoną, esantį 1 cm² ploto atmosferos stulpe, iki 1 atm slėgio, esant 0 °C temperatūrai.

Netrukus buvo nustatyta, kad chloro ir bromo junginiai į stratosferą patenka iš troposferos, o pagindinis jų šaltinis yra antropogeninės (žmogaus veiklos sąlygojamos) kilmės chloro, fluoro ir anglies junginiai, angliškai vadinami chlorofluorocarbons ir sutrumpintai žymimi CFC – freonas-11 (CCl_3F) ir freonas-12 (CCl_2F_2), kurie plačiai naudojami pramonėje. CFC buvo sukurti taip, kad būtų labai stabilūs ir chemiškai pasyvūs esant įprastoms atmosferos sąlygoms (čia turima omenyje troposferą), o chemiškai aktyvus chloras juose yra stipriai surištas. Tačiau patekę į stratosferą šie junginiai dėl ultravioletinės Saulės spinduliuotės suyra, o chloras reaguoja su metanu sudarydamas druskos rūgštį (HCl) arba oksiduojasi ozono sąskaita. Susidaręs chloro monoksidas (ClO) taip pat yra labai chemiškai aktyvus, įprastomis sąlygomis jis greitai jungiasi su azoto dioksidu sudarydamas chloro nitratą (ClONO_2), kuris iš esmės gana inertiškas ir nereaguoja su ozonu. Buvo įvertinta, kad CFC (o kartu ir chloro) kiekiai stratosferoje yra tokie maži, kad paprasta cheminių reakcijų schema niekaip negali paaiškinti didžiulio ir staigaus ozono sluoksnio sumažėjimo. Tuomet kaip painingame detektyve dėmesio centre atsidūrė perlamutriniai debesys [9], tačiau tebeliko neaišku, kokį vaidmenį čia atlieka savita perlamutrinųjų debesų cheminė sudėtis. Darbo ėmėsi chemikai, kurie atskleidė netikėtus cheminius vyksmus. Jie atrado, kad, formuojantis perlamutriniais debesims, ant jų dalelių paviršių vyksta heterogeninės cheminės reakcijos. Tai tokios reakcijos, kai reaguoja dujinio, skysto ir kristalinio būvio medžiagos. Šių reakcijų metu chloro nitratas reaguoja su vandeniu ar druskos rūgštimi, sudarydamas metastabilų chloro junginį – chloro oksido dimerą (Cl_2O_2), kuris nėra aktyvus tamsoje (tvyrant poliarinei nakčiai) bei esant žemai temperatūrai. Nelygu perlamutrinųjų debesų dalelių tipas, cheminės reakcijos šiek tiek skiriasi, tačiau galutinis rezultatas yra toks pat. Kaip šalutinis reakcijų produktas atsiranda dideli azoto

rūgšties kiekiai. Šie junginiai ir toliau skatina perlamutrinųjų debesų dalelių augimą, kurios, veikiamos sunkio jėgos, pamažu ima kristi žemyn. Taip stratosfera netenka didelio kiekio azoto junginių (šis procesas vadinamas denitrifikacija), kurie svarbūs surišant chemiškai aktyvų chlorą. Tvyrant poliarinei nakčiai, įvykę svarbūs cheminiai pokyčiai kol kas nepastebimi, tačiau viskas staiga pasikeičia visą šį „cheminių katilą“ apšvietus pirmiesiems Saulės spinduliams [10]. Saulės šviesa sparčiai suardo metastabilius chloro junginius, išlaisvindama agresyvų chlorą, kuris gali tiesiogiai reaguoti su ozonu. Lokalus azoto trūkumas nebėgali surišti chloro, ir, negana to, chloro reakcija su ozonu yra katalizinė, t. y. tokia, kurią inicijavęs elementas (chloras) išlieka nesurįštas, o ozono molekulės sardomos viena po kitos. Vienas chloro atomas per trumpą laiką sunaikina tūkstančius ozono molekulių ir taip atsiveria didžiulė ozono skylė. Ilgainiui dėl šilumos poliarinis sūkurys suyra, o ozono skylė pamažu užsitraukia dėl atmosferos cirkuliacijos atplūstant ozonui iš pusiaujinių stratosferos sričių [11].

Vis dėlto fotocheminės reakcijos – deguonies fotodisociacija ir ozono susidarymas, dar vadinamos Čapmano ciklu – metų bėgyje nesugeba visiškai atkurti bendro ozono kiekio praradimo stratosferoje, o atėjus naujai poliarinei žiemai, virš Antarktidos ir vėl prasideda naujas ozono ardymo ciklas. Panašūs, tik daug mažesnio masto reiškiniai vyksta ir virš Arkties, tačiau čia poliarinis sūkurys nėra toks gilus ir stabilus, tad metinė ozono kiekio svyravimų amplitudė yra kur kas mažesnė. Vienok dėl pietų ir šiaurės ašigalių geofizinių skirtumų (sausumos ir vandens plotų, lemiančių atmosferos cirkuliacijos ypatumus) šiaurinis poliarinis sūkurys neretai nuklysta daug piečiau, ir ozono sluoksnis nuskurdinamas virš gyvenamų Europos regionų, taip sukeldamas nemenką pavojų. Pavyzdžiui, virš Lietuvos kiekvieną žiemą ozono koncentracija sumažėja iki 220–230 DU.

9.4 Perlamutriniai debesys vidutinėse platumose

Europinėje šiaurės pusrutulio dalyje perlamutrinį debesų matomumo zona driekiasi nuo Islandijos iki Skandinavijos ir Rusijos šiaurės. Kaip žinoma, šie debesys formuojasi ir gali būti matomi žiemos mėnesiais – nuo gruodžio iki vasario vidurio. Tačiau yra pasitaikę ir įdomių išimčių – stratosferos debesys, esantys 14 km aukštyje, pastebėti 1998 m. liepos mėn. Švedijoje, o jų atsiradimo priežastis iki šiol nėra iki galo nustatyta [12]. Statistiniai duomenys, bylojantys apie perlamutrinį debesų dažnį, iki šiol tėra gana apytiksliai, tačiau šių debesų pasirodymas netgi šiaurės šalių padangėje yra neabejotinai retas reiškinys. Vertinama, kad perlamutriniai debesys virš Norvegijos, Švedijos ir Suomijos susidaro vidutiniškai 2–5 kartus per metus, o geriausios sąlygos pavieniams perlamutriniais debesims atsirasti yra virš kalnuotų vietovių [13] (1–3 pav.). Ten oro masių judėjimas yra labai savitas: orografinis oro kilimas ties kalnų šlaitais sąlygoja adiabatinį vėsimą – kai į didelį aukštį pakilusi šiltesnio oro masė staiga plečiasi ir dėl to smarkiai atvėsta. Taip lokaliai atšaldomi ne tik viršutiniai troposferos sluoksniai, bet ir apatinė stratosfera, sudaranti puikias sąlygas formuoti perlamutriniais debesims.

Perlamutrinį debesų atsiradimas vidurinėse platumose yra išskirtinis reiškinys. Vidurinėse platumose per keltą pastarųjų dešimtmečių šie debesys buvo užregistruoti tik tris kartus – 1995 m. virš Anglijos, 1999 m. virš Vokietijos ir 2008 m. virš nemažos dalies Europos. Duomenų, ar kada nors šie egzotiški debesys būtų buvę pastebėti virš Lietuvos, deja, nėra. Tačiau pastarųjų metų instrumentiniai stebėjimai atskleidė, kad perlamutriniai debesys nebūtinai įgauna fizinę formą, būdingą įprastiniams debesims. Dažnai labai mažo tankio perlamutrinį debesų buvimo faktą

galima nustatyti tik prietaisais – registruojant padidėjusį lazerio spinduliuotės sklaidos signalą ir sklaidos šaltinio aukštį arba fiksuojant dangaus spalvinio indekso pokyčius po Saulės laidos. Kirunoje (Švedija) atlikti matavimai parodė, kad tokie, tik prietaisais registruojami debesys yra gana dažnas reiškinys ir šiaurinėse platumose aptinkami keliasdešimt kartų stebėjimo sezono metu [14]. Kurioziskas atvejis užfiksuotas 2002 m. gruodžio 6-osios rytą, kai dangus virš Norvegijai priklausančios Svalbardo salos, esančios už poliarinio rato (80° šiaurės platumos), nusižėdė kraujo raudonumo spalva [15]. Turint omenyje, kad tuomet tvyrojo poliarinė naktis (aukščiausiam savo taške Saulei išliekant apie 10° žemiau horizonto), netikėtas reiškinys jį mačiusiems iš pradžių įvarė nemažai baimės, tačiau greitai ji virto nuostaba. Saloje esanti mokslinė šiaurės pašvaisčių stebėjimo stotis nieko panašaus į šiaurės pašvaistei būdingus požymius – geomagnetinę audrą, charakteringas švytėjimo spektrines linijas ir pan. – neužfiksavo. Sensacijų besivaikantys žurnalistai net ėmė svarstyti apie galimą branduolinį sprogimą. Raudono dangaus mįslė buvo įminta pasitelkus iš palydovų gautus meteorologinius duomenis, kurie parodė, kad tuo pat metu piečiau Svalbardo maždaug 25 km aukštyje susidarė didelis poliarinis sukūrys, kurio centre temperatūra nukrito net iki -90°C ir taip susiklostė idealios sąlygos perlamutriniais debesims susidaryti. Lidaru buvo nustatyta, kad ištisinis perlamutrinį debesų sluoksnis buvo net 4 km storio ir plytėjo 23–27 km aukštyje, o kraujo raudonumo spalvą sąlygojo daugkartinės šviesos sklaidos reiškiniai storame perlamutrinį debesų sluoksnyje [16].

Vis dėlto yra pagrindo manyti, kad perlamutrinį debesų susidarymo zona pamažu plinta į pietus. 2006 m. sausio 19 d. virš visos Prancūzijos ir Britų salų teritorijos jautriais moksliniais prietaisais užfiksuotas plonytis, akimi nematomas perlamutrinį debesų šydas, kuris nusidriekė



iki pat Viduržemio jūros [17]. Tai pirmas toks atvejis per visą 25 metų reguliarių instrumentinių stebėjimų istoriją. Netruko paaiškėti, kad šis reiškinys nebuvo visiškai atsitiktinis. 2008 m. vasario 17–20 d. vakarais virš visos Vakarų Europos – Anglijos, Olandijos, Danijos ir Vokietijos – stebėtos neįprastai intensyvios purpurinės sutemos (1–2 val. po Saulės laidos), kurios, pasak šio įvykio liudininkų, nušvietė peizažą nežemiška šviesa. Saulei nyrant vis giliau už horizonto, dangaus spalva keitėsi iš geltonos į purpurinę ir galiausiai išblėso kaip kraujo raudonio žara. Neįtikėtinų spalvingų sutemų priežastis buvo ištisinis milžiniško dydžio perlamutrinių debesų sluoksnis, plytintis maždaug 20 km aukštyje. Gauta pranešimų, kad purpurinės sutemos stebėtos net Pirėnų kalnuose Ispanijos šiaurėje.



↑ **6 pav.**

Perlamutriniai debesys virš Oslo (Norvegija).
Nuotr. iš www.flickr.com

Tuo pat metu virš Pietų Norvegijos ir Olandijos stebėti ir „tikrieji“ perlamutriniai debesys, kurie švytėjo jiems būdingomis vaivorykštės spalvomis (6 pav.). Apibendrinus meteorologinius duomenis netruko paaiškėti ir perlamutrinių debesų priežastis – gilus poliarinis sukūrys, kurio centras buvo virš Šiaurės jūros tarp Norvegijos ir Škotijos. Jis smarkiai atšaldė apatinius stratosferos sluoksnius: virš Norvegijos 21 km aukštyje temperatūra nukrito net iki $-91\text{ }^{\circ}\text{C}$, o virš Olandijos – iki $-87\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ izoterma pateko didžioji Vakarų Europos dalis, įskaitant Pietų Prancūziją ir Šiaurės Italiją [18]. Lietuvą ši izoterma padalijo

perpus, todėl tikėtina, kad perlamutriniai debesys bent jau trumpam buvo susidarę ir virš Vakarų Lietuvos. Deja, tuo metu vyravę prasti ir debesuoti orai sutrukdė pastebėti ką nors neįprasta. Tuo pat metu virš Europos smarkiai – iki 220 DU – suplonėjo ozono sluoksnis. Tai kritinė riba, kada laikoma, kad atsivėrė ozono skylė! Šio neįprasto reiškinio aidas atsirito ir iki mūsų – tuo pat metu Lietuvos hidrometeorologijos tarnyba užfiksavo gana žymų, nors ir ne tokį smarkų ozono sluoksnio nusurdimimą virš Lietuvos.

9.5 Kas nutiks ozono skylėi ateityje?

Kadangi perlamutriniai debesys buvo žinomi dar iki atrandant ozono skylę, galima manyti, kad natūralūs ozono kiekio svyravimai vyksta nuolat. Tačiau ozono skylės istorija – akivaizdus gamtą niokojančios žmogaus veiklos pavyzdys. Yra įvertinta, kad daugiau kaip 80 % visų chloro ir 50 % bromo junginių, patekančių į stratosferą, yra antropogeninės kilmės, t. y. žmogaus ūkinės ir pramoninės veiklos produktai. Beje, bromas, kurio kiekiai, ačiū Dievui, yra daug mažesni, dar pavojingesnis elementas nei chloras, o jo ozono nusurdimimo potencialas yra 10 kartų didesnis. Cheminės bromo reakcijos yra analogiškos aprašytoms chloro atveju. Kaip jau minėjome, didžiąją ozonui pavojingų cheminių teršalų dalį sudaro freonai, kurių gyvavimo trukmė atmosferoje siekia 50–100 metų. Žvelgiant iš paprastos perspektyvos, maždaug tiek laiko ir teks palaukti, kol freonai visiškai suirs (su sąlyga, kad jų nebebus daugiau išmetama į atmosferą) ir atsikurs pirmapradis gyvybę Žemėje apsaugančio ozono kiekis.

Šiuo metu vertinama, kad bendras stratosferoje esančio ozono kiekis nuo 1968 m. sumažėjo beveik 6 %, o minimumas buvo pasiektas 1995 m. [19]. Pagal 1987 m.

Monrealio protokolą, pasaulio mastu buvo susitarta pamažu mažinti ir iki 2007 m. visiškai atsisakyti freonų ir panašių junginių naudojimo, juos pakeičiant kitais, tikimasi, kad darančiais mažesnę poveikį aplinkai ar bent jau suyrančiais arti žemės paviršiaus (troposferoje) cheminiais junginiais (pvz., HCFC ir HFC). Žengus šiuos žingsnius, prognozuojama, kad ozono kiekis pamažu atsikurs ir pirminę koncentraciją pasieks apie 2050 m. [20]. Nors jau fiksuojami pirmieji stratosferos ozono kiekio atsikūrimo ženklai, tebėra iki galo neaišku, ar šios prognozės nėra pernelyg optimistinės. Kadangi ozono kiekis svyruoja ir dėl natūralių veiksnių – Saulės aktyvumo, ugnikalnių išsiveržimų, atmosferos cirkuliacijos, kuri susijusi su šiltnamio efektu ir klimato kaitos reiškiniais, stebėjimo laikas kol kas pernelyg trumpas, kad būtų galima daryti toli siekiančias apibendrinančias išvadas. Kita vertus, žemės atmosfera – sudėtinga sistema, todėl sunku iš anksto prognozuoti, kokių dar teršalų bus prikurta ir kaip stipriai bus sujauktas žemės klimatas, kurio pokyčiai vienaip ar kitaip jau aiškiai pastebimi. Daug neatsakytų klausimų lieka ir tyrinėjant ilgalaikę stratosferos poliarinių sūkurių dinamiką bei jos kaitos tendencijas [21]. Klausimai, kaip ozono kiekio svyravimai veikia visą Žemės klimatą, taip pat tebėra diskusijų objektas. Ozono skylės pavyzdys visiems mums byloja, kad per daugelį šimtmečių susiklosčiusi atmosferos pusiausvyrą yra labai trapi. Kol daugelis manys, kad Žemės atmosfera – tai begalinis rezervuaras, kuriame galima be jokių pasekmių kaupti įvairiausių teršalus, neaišku, kokių netikėtumų galime sulaukti ateityje.

Bibliografija

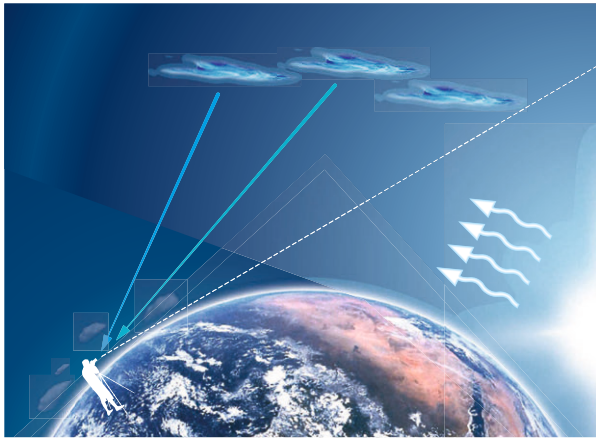
1. J. L. Stanford, J. S. Davis, *A century of stratospheric cloud reports: 1870-1972*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **55**, 1974, 213–219.
2. T. S. Jorgensen, *On particles in the Arctic stratosphere*, *Annals of Geophysics* **46**, 2003, 341–352.
3. M. P. McCormick, H. M. Steele, P. Hamill, W. P. Chu, T. J. Swissler, *Polar stratospheric cloud sightings by SAM II*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **39**, 1982, 1387–1397.

4. H. M. Steele, P. Hamill, M. P. McCormick, T. J. Swissler, *The formation of polar stratospheric clouds*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **40**, 1983, 2055–2068.
5. D. Lowe, A. R. MacKenzie, *Polar stratospheric cloud microphysics and chemistry*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **70**, 2008, 13–40.
6. J. C. Farman, B. G. Gardiner, J. D. Shanklin, *Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO/NO_x interaction*, *Nature* **315**, 1985, 207–210.
7. P. Hamill, O. B. Toon, *Polar stratospheric clouds and the ozone hole*, *Physics Today* **41**(12), 1991, 34–42.
8. D. J. Hofmann, *Direct ozone depletion in springtime Antarctic lower stratospheric clouds*, *Nature* **337**, 1989, 447–449.
9. P. J. Crutzen, F. Arnold, *Nitric acid cloud formation in the cold Antarctic stratosphere: a major cause for the springtime ozone hole*, *Nature* **324**, 1986, 651–655.
10. M. A. Tolbert, O. B. Toon, *Solving the PSC mystery*, *Science* **292**, 61–64 (2001).
11. M. L. Salby, R. R. Garcia, *Dynamical perturbations to the ozone layer*, *Physics Today* **40**(3), 1991, 38–46.
12. J. Siebert, C. Timmis, G. Vaughan, K. H. Fricke, *A strange cloud in the Arctic summer stratosphere 1998 above Esrange (68°N), Sweden*, *Annales Geophysicae* **18**, 2000, 505–509.
13. A. Dörnbrack, M. Leutbecher, *Relevance of mountain waves for the formation of polar stratospheric clouds over Scandinavia: a 20 year climatology*, *Journal of Geophysical Research* **106**, 2001, 1583–1593.
14. C.-F. Enell, A. Steen, T. Wagner, U. Friess, K. Pfeilsticker, U. Platt, K.-H. Fricke, *Occurrence of polar stratospheric clouds at Kiruna*, *Annales Geophysicae* **17**, 1999, 1457–1462.
15. F. Sigernes, N. Lloyd, D. A. Lorentzen, R. Neuber, U. P. Hoppe, D. Degenstein, N. Shumilov, J. Moen, Y. Gjessing, O. Havnes, A. Skartveit, E. Raustein, J. B. Orbaek, C. S. Deehr, *The red-sky enigma over Svalbard in December 2002*, *Annales Geophysicae* **23**, 2005, 1593–1602.
16. N. Lloyd, D. Degenstein, F. Sigernes, E. J. Llewellyn, D. A. Lorentzen, *The red sky enigma over Svalbard in December 2002: a model using polar stratospheric clouds*, *Annales Geophysicae* **23**, 2005, 1603–1610.
17. P. Keckhut, Ch. David, M. Marchand, S. Bekki, J. Jumelet, A. Hauchecorne, M. Hopfner, *Observation of Polar Stratospheric Clouds down to the Mediterranean coast*, *Atmospheric Chemistry and Physics* **7**, 2007, 5275–5281.
18. C. Hinz, P. Krämer, G. P. Können, *Polar Stratospheric Clouds over Western Europe*, *Weather* **64**, 2009, 87–92.
19. S. Solomon, *Stratospheric ozone depletion: a review of concepts and history*, *Reviews of Geophysics* **37**, 1999, 275–316.
20. E. C. Weatherhead, S. B. Andersen, *The search for signs of recovery of the ozone layer*, *Nature* **441**, 2006, 39–45.
21. U. Langematz, M. Kunze, *An update on dynamical changes in the Arctic and Antarctic stratospheric polar vortices*, *Climate Dynamics* **27**, 2006, 647–660.

10. Sidabriškieji debesys



● *A Dubiečio nuotr.*



↑ **1 pav.**
Sidabriškųjų debesų apšvietimo geometrija. Stebėtojas, esantis Žemės šešėlyje, mato aukštai esančių sidabriškųjų debesų išsklaidytą Saulės šviesą. J. Gričiaus pieš.

10.1 Naktį švytintys debesys

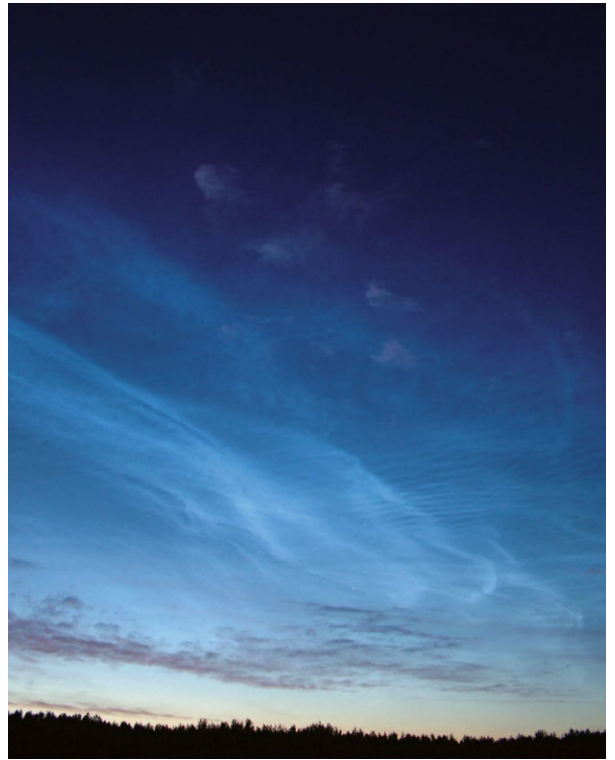
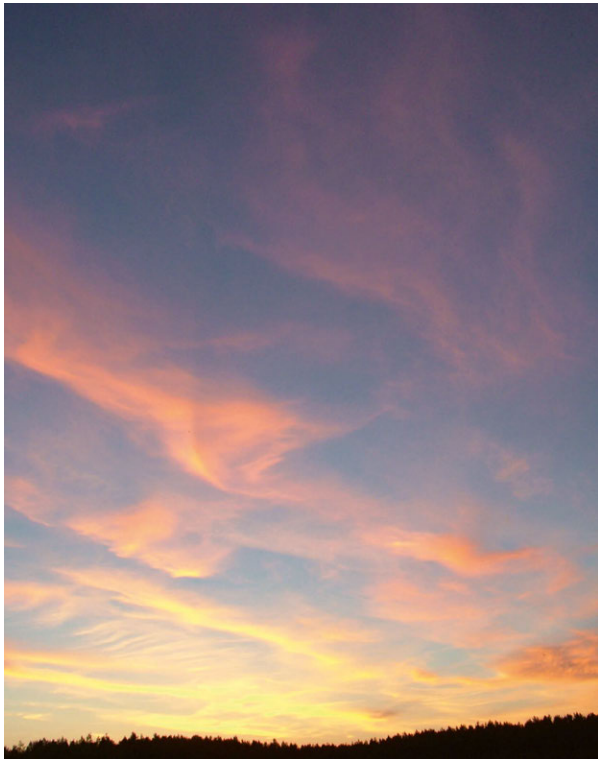
Sidabriškieji debesys yra įstabus trumpų ir šviesių vasaros naktų reiškiny. Tai patys aukščiausiai atmosferos debesys, susidarantys mezosferoje, 80–85 km aukštyje, ten, kur Žemės atmosfera labai reta. Galima sakyti, kad virš sidabriškųjų debesų jau atsiveria beribė kosminė erdvė. Sidabriškieji debesys sušvinta šiaurinėje naktinio dangaus skliauto pusėje, kai, nusileidus Saulei, apatiniai atmosferos sluoksniai panryja į šešėlį, o viršutiniai tebesimaudo Saulės spinduliuose (**1 pav.**). Dėl švytėjimo anglų ir vokiečių kalbose šie debesys vadinami naktį švytinčiais debesimis (angl. *noctilucent clouds*, vok. *leuchtenden Nachtwolken*). Lietuviškai ir rusiškai šie debesys vadinami sidabriškaisiais (rus. *serebrystyje*), taip pabrėžiant savitą jų spalvą.

Sidabriškieji debesys išryškėja temstančiame danguje apytikriai 1–1,5 val. po Saulės laidos, Saulei panirus daugiau nei 6° žemiau horizonto, kai sužimba pirmosios žvaigž-

dės ir prasideda vadinamoji navigacinė sutema (1.5 sk.). Savo išvaizda sidabriškieji debesys šiek tiek panašūs į aukščiausius troposferos debesis – plunksninius (**2 pav.**), kurie iškyla į maždaug 8–10 km aukštį. Tačiau atskirti sidabriškuosius debesis nuo plunksninių nesunku – pastarieji po Saulės laidos nusidažo gelsva spalva, po to parausta, o pradėjus temti, tampa pilki. Sidabriškieji debesys yra balkšvai melsvi ir nekeičia spalvos visą naktį (**2 pav.**). Temstant sidabriškieji tampa vis ryškesni ir kontrastingesni ir gali būti matomi visą trumpą vasaros naktį iki pat aušros.

Paprastai sidabriškieji debesys švyti neaukštai virš šiaurinio horizonto, vadinamajame sutemų segmente (angl. *twilight arch*). Kartais sidabriškieji debesys gali būti matomi rytinėje ar vakarinėje dangaus pusėje, o patys šviesiausiai nusidrieki net iki zenito. Artėjant astronominei sutemai, sidabriškieji debesys vis labiau glaudžiasi prie šiaurinio horizonto, o Saulei nusileidus žemiau horizonto daugiau nei 16°, sidabriškieji debesys patenka į Žemės šešėlį ir tampa nebeatomi. Naktį regimasis sidabriškųjų debesų vaizdas smarkiai keičiasi dėl Žemės sukimosi aplink savo ašį, be to, ir patys sidabriškieji debesys turi savo judėjimą. Kadangi sidabriškieji debesys yra labai aukštai, jie matomi milžinišku atstumu: pavyzdžiui, 5° virš horizonto iškilę sidabriškieji debesys yra nutolę nuo stebėtojo apie 600 km, o esantys palei pat horizontą – jau daugiau kaip 800 km [1]. Kai tokius debesis stebime Lietuvoje, iš tikrųjų jie plyti kažkur virš Latvijos, Estijos, Suomijos ar Švedijos.

Sidabriškieji debesys yra poliariniai debesys, susidarantys tik poliarinėse mezosferos srityse. Dėl savito mezosferos „klimato“ sidabriškųjų debesų matomumo laikotarpis trunka apie 3 mėnesius – nuo gegužės pabaigos iki rugpjūčio vidurio. Intensyviausias sidabriškųjų debesų formavimosi laikotarpis trunka nuo birželio 15 d. iki liepos 20 d., o didžiausia tikimybė pamatyti juos yra pirmąjį liepos dešimtadienį. Nuo Žemės paviršiaus sidabriškieji debesys gali



būti matomi iš vietovių, esančių 50–65° geografinėje platumoje šiaurės ir pietų pusrutuliuose [2]. Dar šiauriau (ar piečiau, kalbant apie pietų pusrutulį) šių debesų nebeįmanoma įžvelgti šviesiame, ne ką tesutemstančio dangaus fone. Taigi šiaurės pusrutulyje sidabriškųjų debesų matomumo zona apima Vidurio ir Šiaurės Europos šalis, Rusiją, JAV šiaurę, Aliaską ir Kanadą. Pietų pusrutulyje sidabriškieji debesys matomi tik iš gana retai apgyvendintų piečiausių Čilės ir Argentinos rajonų. Šie egzotiški debesys puikiai matomi trumpomis ir šviesiomis vasaros naktimis Lietuvoje; intensyvaus jų švytėjimo neužgožia net ryškūs miesto žiburiai (3 pav.).

Taip jau susiklostė, kad sidabriškaisiais debesimis tradiciškai labiau domėjosi astronomai, o ne meteorologai. Iš tiesų sidabriškieji debesys nedaug ką bendro turi su meteo-

↖ ↗ **2 pav.**
Troposferos debesų po Saulės laidos (kairėje) ir sidabriškųjų (dešinėje) debesų spalvų palyginimas.
A. Dubiečio nuotr.

rologija ir jos tyrinėjamais troposferos debesimis, lemiančiais mūsų orus. Antra vertus, sidabriškieji debesys – tai visiškai žemiškos kilmės objektas. Nepaisant to, sidabriškieji debesys yra puikus ir įdomus objektas astronominiams stebėjimams, juolab kad Šiaurės šalių astronomijos mėgėjai vasarą dažniausiai nuobodžiauja, nes jokie kiti rimtesni stebėjimai neįmanomi dėl šviesaus dangaus. Šiuolaikinio mokslo kontekste sidabriškieji debesys, kaip mokslinių tyrimų objektas, ženklina nuostabiai turtingą, atrodytų, visiškai skirtingų mokslo šakų – astronomijos, atmosferos fizikos ir chemijos, klimatologijos, plazmos bei bangų fizikos sankirtą [3].



3 pav.
Labai šviesūs sidabriški ir debesys virš naktinio
Vilniaus. G. Tamošausko nuotr.

10.2 Sidabriškieji debesys – naujausias šių laikų optinis atmosferos reiškinys

Sidabriškieji debesys neabejotinai yra pats naujausias atmosferos reiškinys, atrastas ir atsiradęs jau moderniais laikais. Pirmą kartą šie neįprasti naktį švytintys debesys buvo pastebėti 1885 m. vasarą beveik vienu metu virš daugelio Šiaurės ir Vidurio Europos šalių. Netrukus, 1889 m., sidabriškieji debesys buvo pirmą kartą pastebėti ir virš pietų pusrutulio – Čilėje. Vienas žymiausių sidabriškųjų debesų tyrinėjimo pionierių buvo vokiečių astronomas Otas Jesė (*Otto Jesse*), didžiąją savo gyvenimo dalį skyręs šių neįprastų ir egzotiškų debesų tyrinėjimams. 1887 m. jis netoli Berlyno įsteigė pirmąją sidabriškųjų debesų stebėjimų stotį. O. Jesė surinko daugybę vertingos mokslinės informacijos apie sidabriškuosius debesis – pirmą kartą išmatavo jų aukštį, judėjimo greitį ir sukaupė pirmuosius statistinius stebėjimų duomenis [4]. Jau pirmieji stebėjimų rezultatai atskleidė, kad sidabriškieji debesys yra neįprastas stebėjimų objektas. Trianguliacijos metodu²⁴ buvo nustatyta, kad sidabriškieji debesys susidaro neįtikėtina – vidutiniškai 83 km aukštyje, atmosferos sluoksnyje, kuris dabar vadinamas mezosfera. Taigi, atradus sidabriškuosius debesis, paaiškėjo, kad Žemės atmosfera driekiasi kur kas aukščiau, nei buvo manyta iki tol. Šis atradimas paskatino imtis tyrinėti aukščiausius atmosferos sluoksnius, na, ir, žinoma, pačius netikėtai atsiradusius sidabriškuosius debesis.

²⁴ Trianguliacijos metodas remiasi vienalaikiu to paties objekto padėties nustatymu žvaigždžių atžvilgiu iš dviejų vienas nuo kito 50–100 km atstumu nutolusių stebėjimo punktų. Įvertinus objekto padėties skirtumus, apskaičiuojamas jo aukštis.

Debesų atsiradimas mezosferoje to meto mokslininkams užminė nelengvą mįslę. Labiausiai intrigavo tai, kad iki tol nieko panašaus nebuvo stebėta, nors tuo metu visoje Europoje bei Šiaurės Amerikoje jau veikė dešimtys astronomijos observatorijų ir gerai išplėtotas meteorologinių stočių tinklas, kuris dieną ir naktį vykdė nenutrūkstamus troposferos debesuotumo stebėjimus. O ir patys sidabriškieji debesys atsirado gana neįprastomis aplinkybėmis. 1883 m. rugpjūčio 27 d. išsiveržė Indonezijoje esantis Krakatau ugnikalnis, kuris į atmosferą išmetė milijonus tonų suodžių, dulkių, aerozolių bei kitų cheminių junginių. Krakatau ugnikalnio išsiveržimas laikomas galingiausiu iš visų įvykusių per pastaruosius keletą šimtmečių, jo išmesti dujų, dulkių ir vandens garų stulpai iškilo net į 50 km aukštį ir netruko pasklisti po visą Žemės atmosferą, pritemdami net Saulės šviesą. Užregistruota, kad tuomet vidutinė metinė Žemės paviršiaus temperatūra nukrito apie 0,5 °C. Net ir prabėgus keletui metų po ugnikalnio išsiveržimo, įvairiuose pasaulio kampeliuose tebebuvo matoma daugybė anomalių optinių atmosferos reiškinių, susijusių su didele aukštesniųjų atmosferos sluoksnių tarša bei šviesos sklaida – neįprastai spalvingi saulėlydžiai, aureolės, švytėjimai, keistos spalvos dangus ir pan. Pirmoji išvada, kad sidabriškieji debesys taip pat yra vienas šio galingo ugnikalnio išsiveržimo padarinių. Imta manyti, kad sidabriškieji debesys sudaryti iš ugnikalnio išmestų dulkių, kurios kažkoku būdu pakilo į didelį aukštį ir švyti apšviestos Saulės spindulių [5]. Tačiau vis gausėjantys stebėjimų duomenys prieštaravo tokioms paprastoms prielaidoms. Pirmiausia buvo nustatytas akivaizdus sidabriškųjų debesų matavimo sezoniškumas ir tam tikra specifinė jų matavimo geografija. Juolab kad netrukus ugnikalnio išmestos dulkės išsisklaidė ir nusėdo, o sidabriškieji debesys išliko mūsų padangėje iki pat šių dienų. Atsisakius vulkaninės sidabriškųjų debesų kilmės aiškinimo, imta manyti, kad šie

debesys sudaryti ne iš dulkių, bet iš ledo kristalų, panašiai kaip ir plunksniniai debesys troposferoje. Vienas pirmųjų ledo kristalų hipotezę iškėlė vokiečių geologas ir meteorologas Alfredas Wegeneris (*Alfred Wegener*), išgarsėjęs kaip žemynų dreifo atradimo autorius. Laikas parodė, kad A. Wegeneris neklydo, ir pamažu ledo kristalų hipotezė tapo visuotinai priimtina, nors dar ilgą laiką sidabriškųjų debesų sandarą gaubė paslaptis. Paskutiniai neginčijami „ledinės“ sidabriškųjų debesų sandaros įrodymai gauti tik 2001 m., kai iš kosminio palydovo buvo išmatuoti charakteringi jų pralaidumo spektrai infraraudonojoje spektro srityje [6].

Gilėjant žinioms apie aukščiausių atmosferos sluoksnių sandarą, sidabriškųjų debesų susidarymas buvo susietas su itin žemomis temperatūromis, sezoniniais mezopauzės ypatumais, Saulės spinduliuotės intensyvumu ir t. t. Bene didžiausias žingsnis sidabriškųjų debesų kilmės supratimo link buvo žengtas jau kosminiame amžiuje. Stebėjimai iš dirbtinių Žemės palydovų atskleidė, kad vasaros mėnesiais virš šiaurės ir pietų ašigalių plyti milžiniški poliarinių mezosferos debesų (angl. *Polar Mesospheric Clouds – PMC*) masyvai [7]. Pačių poliarinių mezosferos debesų plika akimi pamatyti neįmanoma, kadangi vasarą virš ašigalių tvyro poliarinė diena, tad šie debesys aptinkami tik naudojant mokslinius prietaisus. Šia prasme naktį matomi sidabriškieji debesys panašūs į didžiulius ledkalnius, atitrūkusius nuo poliarinių mezosferos debesų masyvo ir nukelivusius tolyn į pietus. Nuo to laiko sidabriškųjų debesų tyrimai iš kosmoso tapo vienu pagrindinių instrumentų tyrinėjant šiuos paslaptinius debesis ir specifinę jų aplinką. Pabrėžtina, kad sidabriškieji debesys yra labai „neparankus“ tiesioginių tyrimų objektas – jie yra per aukštai meteorologiniams ir kitokiems zondams, tačiau per žemai kosminiams aparatams.

Taigi mokslininkams prireikė nemažai laiko ir išmonės, kad sudėliotų daugybę įvairiais būdais surinktu

žinių fragmentų į vientisą paveikslą. Galutinai sidabriškųjų debesų mįslė buvo įminta tik 1989 m., kai vienas žymiausių šių laikų sidabriškųjų debesų tyrinėtojų Garis Tomas (*Gary Thomas*) su bendraautoriais pasiūlė modelį, kuris susiejo sidabriškųjų debesų susidarymą su vandens garais ir jų koncentracijos kaita mezosferoje, identifیکavo pagrindinius mezosferos vandens šaltinius ir įtikimai paaiškino netikėto sidabriškųjų debesų atsiradimo aplinkybes [8]. Pagal šį modelį tam tikras vandens garų kiekis mezosferoje egzistavo dar iki atrandant sidabriškuosius debesis, tačiau jis buvo nepakankamas, kad susiformuotų plika akimi matomi debesys, kurių šviesumas viršytų nuosavą atmosferos foninį švytėjimą. Netikėtas sidabriškųjų debesų atsiradimas buvo taip pat susietas su dėl žmogaus ūkinės veiklos išaugusia ir nuolat didėjančia metano dujų koncentracija mezosferoje. Ši savo ruožtu sąlygojo vandens garų koncentracijos augimą, kadangi ekstremaliomis mezosferos sąlygomis metano dujos oksiduoja virsdamos vandens garais. Teoriškai įvertinta, kad būtent XIX a. pabaigoje vandens garų koncentracija mezosferoje kaip tik ir pasiekė tą ribinę vertę, kai sidabriškųjų debesų šviesumas viršijo atmosferos švytėjimo foną. Krakatau ugnikalnio išsiveržimas, su kuriuo ilgą laiką buvo siejamas sidabriškųjų debesų atsiradimas, atliko katalizatoriaus vaidmenį, išmesdamas tiesiai į stratosferą nemažą vandens garų kiekį. Prireikė dar dvejų metų, kol vandens garai iš stratosferos pasiekė mezosferą.

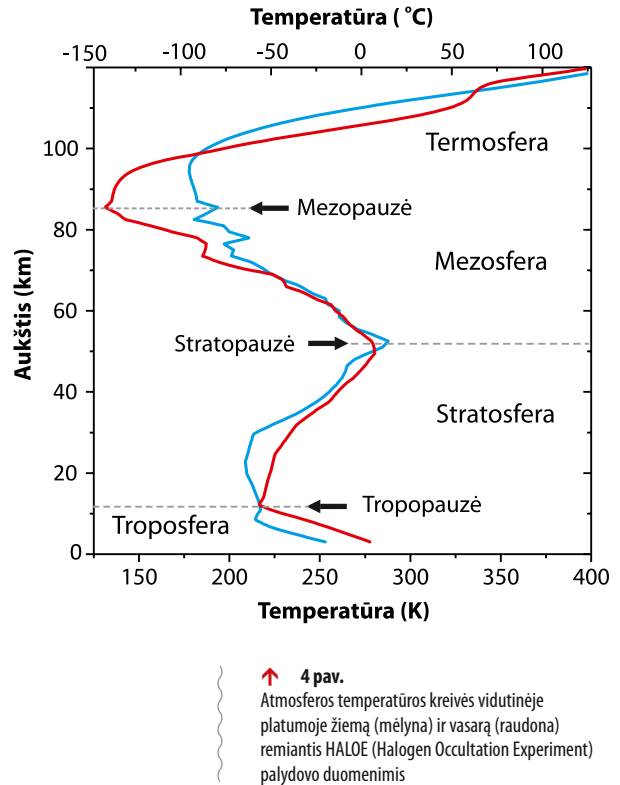
10.3 Sidabriškųjų debesų susidarymas

Mezosfera yra trečias Žemės atmosferos sluoksnis, plytintis 50–90 km aukštyje. Skirtingai nei stratosferoje, kuri baigiasi „šilta“ stratopauze, mezosferoje, didėjant aukščiui, temperatūra sparčiai krinta ir ties mezopauze –

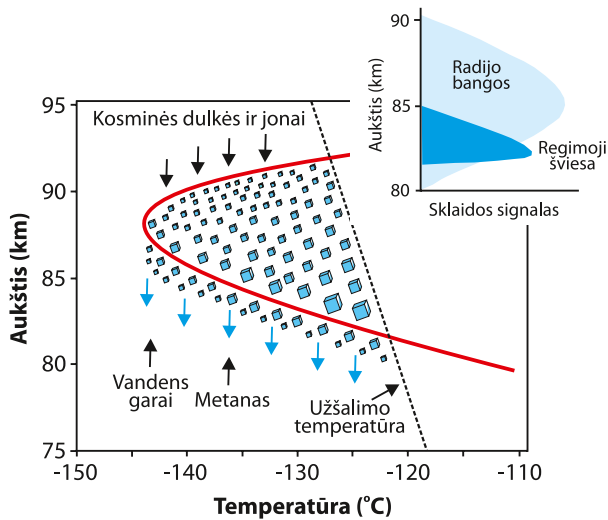
85 km aukštyje – pasiekia minimalią vidutinę $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ vertę (1 sk. 3 pav.). Tai šalčiausia vieta visoje Žemės atmosferoje. Šiame aukštyje atmosfera labai reta ir jau gali būti laikoma daliniu vakuumu – slėgis čia tėra 1.4 Pa , t. y. beveik $100\,000$ kartų mažesnis nei ties Žemės paviršiumi. Norint sukurti tokį žemą slėgį Žemės paviršiuje, reikia modernios laboratorinės įrangos.

Įdomu tai, kad mezopauzės temperatūra smarkiai kinta priklausomai nuo metų laiko, o poliarinės ir net vidutinių platumų mezopauzės aplinkoje registruojamos didelės sezoninės temperatūros anomalijos (4 pav.). Buvo atrasta, kad žiemą mezopauzė išyla, o vasarą atvėsta – visiškai priešingai nei oro temperatūra ties Žemės paviršiumi. Būtent vasarą mezopauzės temperatūra gali nukristi žemiau vandens garų užšalimo temperatūros, kuri, esant labai mažam slėgiui, yra ekstremaliai žema (apie $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$). Itin žema mezopauzės temperatūra vasarą iš pirmo žvilgsnio gali pasirodyti labai keista ir net paradoksali – juk tuo metu ten yra poliarinė diena, ir mezosfera nuolat apšviesta Saulės spindulių! Žemės atmosferos tyrimai atskleidė, kad sezoninės temperatūros anomalijas mezosferoje sąlygoja globali atmosferos dinamika, kuri yra labai sudėtinga. Kaip vienas svarbiausių veiksnių, lemiančių smarkų mezopauzės atšalimą vasarą, įvardijamos vadinamosios atmosferos sunkio bangos (angl. *gravity waves*) [9]. Šios bangos gimsta vasarą dėl Saulės išildyto poliarinio ir vidutinių platumų oro masių konvekcijos: milžiniškos įšilusio oro masės kyla aukštyn, jų sukelti atmosferos trikdžiai pasiekia mezosferą, ten šiltas oras dėl mažo aplinkos slėgio staigiai plečiasi ir dėl to smarkai atvėsta. Štai toks netikėtas mezosferos klimatas ir nulemia tai, jog sidabriškieji debesys gali susidaryti tik vasarą.

Mezopauzės temperatūrai nukritus žemiau $-125\text{ }^{\circ}\text{C}$, ten esantys vandens garai užšąla, virsdami mažyčiais ledo kristalais, kurių sanaukas ir matome kaip sidabriškuo-



sius debesis. Tokiomis ekstremaliomis sąlygomis užaugę ledo kristalai yra neįtikėtinais maži – vidutinis jų matmuo tesiekia 50 nm ($50\text{ nm} = 0,00005\text{ mm}$) [10]. Pačių kristalų tankis taip pat labai mažas – viename kubiniame metre tėra nuo kelių šimtų iki kelių tūkstančių šių mažyčių darinių. Tai reiškia, kad sidabriškieji debesys yra labai skaidrūs, o pro juos lengvai prasišviečia žvaigždės. Ledo kristalai dėl mažo dydžio (jie kelis kartus mažesni už regimosios šviesos bangos ilgį) sklaido Saulės šviesą. Ši sklaida vadinama Relėjaus sklaida, o jos efektyvumas yra atvirkščiai proporcingas sklaidomos šviesos bangos ilgio ketvirtajam laipsniui (4.1 posk.). Paprastai tariant, tokie mažyčiai ledo kristalai labai stipriai sklaido mėlyną šviesą (kaip, beje, ir



↑ 5 pav.
Sidabriškųjų debesų formavimosi diagrama. Raudona kreivė vaizduoja mezosferos temperatūrą, o brūkšninė linija – vandens garų užšalimo temperatūrą. Paveikslas interpe – labai aukšto dažnio radijo bangų ir regimosios šviesos sklaidos signalo priklausomybė nuo aukščio

pati atmosfera), o raudona šviesa juos pereina beveik neišsklaidyta. Ši aplinkybė ir sąlygoja neįprastą balkšvai melsvą sidabriškųjų debesų spalvą, kuri išlieka nepakitusi nepriklausomai nuo debesų aukščio virš horizonto. Tik labai žemai, ties pat horizontu, esantys sidabriškieji debesys dėl daugkartinės šviesos sklaidos storame atmosferos sluoksnyje, skiriančiame juos nuo ant Žemės paviršiaus esančio stebėtojo, įgauna žalsvą ar net gelsvą atspalvį.

Vandens garų koncentracija mezosferoje yra esminis parametras, lemiantis sidabriškųjų debesų susidarymą. Apskritai vandens garų koncentracija mezosferoje yra itin maža – 100 mln. molekulių tenka tik 1 vandens molekulei – tai milijoną kartų mažesnė santykinė drėgmė nei Sacharos dykumoje. Taip yra dėl to, kad troposferos drėgmė į mezosferą beveik neprasisiskverbia. Ją sulaiko natūralus barjeras –

šalta tropopauzė, esanti 10–15 km aukštyje. Taigi troposferoje esantys vandens garai ten pat ir kondensuojasi, anksčiau ar vėliau iškrisdami kaip krituliai. Šiuo metu nustatyta, kad egzistuoja trys mezosferinio vandens šaltiniai. Nedidelė, apie 30 %, viso mezosferoje esančio vandens garų kiekio dalis vis dėlto yra troposferinės kilmės. Ši vandens kiekis iš troposferos į mezosferą perneša jau minėtos atmosferos sunkio bangos. Antrasis ir pats svarbiausias mezosferinio vandens šaltinis yra metano dujų oksidacija. Šio proceso metu tiesiog pačioje mezosferoje „pasigamina“ beveik 50 % viso ten esančio vandens garų kiekio. Vertinant paprastai, viena metano molekulė dėl oksidacijos, t. y. reaguodama su atominiu deguonimi ar OH radikalais, virsta dviem vandens molekulėmis. Turint omenyje, kad metano dujų emisijos nepaliaujamai auga, pirminės medžiagos vandens garų produkcijai tikrai netrūksta.

Pastaraisiais metais ėmė ryškėti ir trečiasis vandens garų mezosferoje šaltinis. Nustatyta, kad apie 20 % (ir ši dalis tolydžio didėja) vandens garų į mezosferą injektuojama tiesiai iš kylančių kosminių aparatų, kadangi vienas pagrindinių raketinio kuro degimo produktų yra vandens garai. Netgi atrastas tiesioginis ryšys tarp raketų paleidimų ir sidabriškųjų debesų formavimosi [17]. Ne taip jau svarbu, kad raketos kyla tolokai nuo ašigalių – įvertinta, kad vandens garai mezosferoje „išsimaišo“ ir pasiekia poliarines sritis maždaug per 8 dienas. Vandens garų kiekio svarbą sidabriškųjų debesų formavimuisi patvirtina ir kitas dabar kiek primirštas faktas. 1908 m. vasarą, netrukus po Tunguskos meteorito sprogo, virš visos Europos ir Sibiro stebėti neįprastai šviesūs sidabriškieji debesys. Dabar jau beveik neabejojama, kad Tunguskos meteoritas buvo Enkės kometos skeveldra (plačiau apie tai – 12.7 posk.), kurioje, kaip ir visose kometose, ledas sudarė nemenką masės dalį. Nemaža dalis ledo išgaravo dar viršutiniuose atmosferos sluoksniuose, o vėliau kondensavosi šviesių sidabriškųjų debesų pavidalu.

Schemiškai sidabriškųjų debesų formavimasis pa-
vaizduotas **5 pav.** Kad susidarytų sidabriškieji debesys, turi
būti įvykdytos trys pagrindinės sąlygos: (1) temperatūra
(ištininė kreivė) turi nukristi žemiau vandens garų užša-
limo temperatūros (brūkšninė linija), taip pat turi būti
pakankamas (2) vandens garų ir (3) kondensacijos cen-
trų kiekis ledo kristalams susidaryti [12]. Kondensacijos
centrais tampa mikrometeoroidai ir kosminės dulkės, taip
pat atskiri jonai. Įdomu ir tai, kad tiesioginis sidabriškųjų
debesų ryšys su meteorų srautais kol kas nėra patikimai
nustatytas, nors dauguma smulkių iš kosmoso atskriejusių
dalelių – meteoroidų – kaip tik sudega panašiam aukštyje
(12 sk.). Be to, susidariusių ledo kristalų dydis (20–200 nm)
ir koncentracija turi būti pakankama, kad efektyviai sklai-
dytų Saulės šviesą, kurią galėtume pamatyti nuo Žemės pa-
viršiaus. Regimasis sidabriškųjų debesų sluoksnis tėra vos
3 km storio ir yra „įspraustas“ tarp iš viršaus šaltesnės ir iš
apačios šiltesnės oro masių. Viršuje plyti šalta mezopauzė,
kurioje prasideda vandens garų kondensacijos procesai ir
randasi ledo kristalų užuomazgos. Nustatyta, kad 5 nm dy-
džio ledo nanokristalai susidaro maždaug 90 km aukštyje.
Šie mažyčiai kristalai „įsielektrina“ prisijungdami laisvu-
sius elektronus, kurių šiame aukštyje gausu dėl jonizuojan-
čios Saulės spinduliuotės. Tokia medžiaga vadinama dul-
kėtąja plazma (angl. *dusty plasma*). Skirtingai nei grynoji
plazma, kuri sudaryta iš teigiamų jonų ir neigiamų elek-
tronų ir yra elektriškai neutrali, dulkėtoji plazma yra įelek-
trintų dalelių (dulkelių, aerolių ar nanokristalų) mišinys,
pasizymintis savitomis fizinėmis savybėmis, o dinaminis
procesas joje lemia ne tik elektrinės, tačiau ir sunkio jė-
gos. Dulkėtoji plazma pastaraisiais metais tapo įdomių
tyrinėjimų objektu astrofizikoje, branduolinėje fizikoje ir
net puslaidininkių technologijose [13]. Ryškiausi gamtiniai
dulkėtosios plazmos pavyzdžiai, be sidabriškųjų de-
besų, yra Saturno žiedai, kometų uodegos, kosminiai ūkai

bei kita tarpžvaigždinė medžiaga. Dėl turbulentiškumo
ir mezosferoje vykstančių banginių procesų dulkėtosios
plazmos tankis yra labai netolygus ir šie netolygumai gerai
atspindi labai aukšto (50–500 MHz) dažnio (angl. *very high
frequency, VHF*) radijo bangas. Šis reiškinys atrastas 1981
m. ir buvo pavadintas poliariniais mezosferos vasaros ai-
dais (angl. *Polar Mesospheric Summer Echoes – PMSE*) [14].
Stipriausias poliarinių mezosferos vasaros aidų signalas
registruojamas 85 km aukštyje (**5 pav.** intarpas).

Stebėjimais įrodyta, kad poliariniai mezosferos vasa-
ros aidai ir sidabriškųjų debesų atsiradimas yra glaudžiai
susiję. Ledo kristalams užaugus iki 20 nm dydžio, jie ima
efektyviai sklaidyti šviesą, taigi tampa matomi ir patys si-
dabriškieji debesys. Veikiami sunkio jėgos, ledo kristalai
palaipsniui ima kristi žemyn, savo maksimalų dydį bei
koncentraciją pasiekdami vidutiniškai 83 km aukštyje, ten
registruojamas didžiausias regimosios šviesos sklaidos si-
gnalas, kurį ir matome kaip sidabriškuosius debesis (**5 pav.**
intarpas). Dar žemiau, kur temperatūra yra jau aukštesnė,
ledo kristalai ima garuoti nesilydydami (toks procesas va-
dinamas sublimacija) kol galutinai išnyksta maždaug 80
km aukštyje. Priklausomai nuo temperatūros gradiento
bei kitų aplinkos sąlygų, ledo kristalų gyvavimo trukmė
svyruoja nuo keliolikos minučių iki keleto valandų. Panaši
yra ir pačių sidabriškųjų debesų matomumo trukmė.

Įdomu pažymėti, kad 2006 m. Marso mezosferoje
atrasti plika akimi nematomi debesys, kurie galėtų būti
žemiškųjų poliarinių mezosferos debesų atitikmuo [15].
Tačiau, skirtingai nei Žemėje, Marse mezosferos debesys
sudaryti iš anglies dioksido kristalų ir formuojasi 50 km
aukštyje virš pusiaujo, nes būtent ten Marso atmosferoje
susidaro didelės temperatūros anomalijos. Šiuos akimi ne-
matomus debesis pirmą kartą užfiksavo erdvėlaivis „Mars
Explorer“, registruodamas žvaigždžių spektrų pokyčius
okultacijų metu.



● 6 pav.

Vienalyčių (I tipo) sidabriškųjų debesų laukas su į jį įsirėžusiomis bangelėmis. A. Dubiečio nuotr.



10.4 Sidabriškųjų debesų morfologija

Savo išvaizda sidabriškieji debesys panašūs į aukščiausias troposferos debesis – plunksninius (2 pav.), kurie taip pat sudaryti iš ledo kristalų. Plonas, vos keleto kilometrų storio sidabriškųjų debesų sluoksnis – lyg vandens paviršius, kuriame bangų ar raibulių pavidalu atsispindi įvairių jį sutrikdžiusių veiksnių pėdsakai [16]. Šie veiksniai – tai atmosferos potvyniai ir atoslūgiai, įvairios kilmės atmosferoje gimstančios bangos, turbulentiškumas bei lokalūs vėjai [17]. Beje, 85 km aukštyje dažnai siautėja vėjai, kurių greitis gali siekti net 300 m/s. Žemės paviršiuje tai būtų neįsivaizduojamos jėgos uraganas. Sidabriškieji debesys klasifikuojami pagal regimąją bangų struktūrą. Skiriamos keturių tipų morfologinės sidabriškųjų debesų formos [18].

I tipas – vienalyčiai sidabriškieji debesys. Jie tarsi blausus, beformis, bemaž vienodo intensyvumo švytėjimas. Paprastai vienalyčiai sidabriškieji debesys retai kada būna labai šviesūs, tad juos nelengva identifikuoti vis dar šviesiame sutemų segmento fone. Šią užduotį labai palengvina kitų formų buvimas tuo pat metu, pavyzdžiui, į vienalytį

sidabriškųjų debesų lauką įsirežusios nedidelės bangelės ar ryškesni debesų fragmentai (6 pav.). I tipo sidabriškieji debesys dažniausiai simbolizuoja labai ramius mezosferos orus.

II tipas – juostos. Šie sidabriškieji debesys sudaryti iš ilgų, įvairaus pločio, bemaž lygiagrečių horizontui ar nedideliu kampu į jį pasvirusių juostų ar jų fragmentų. Juostinė sidabriškųjų debesų struktūra atsiranda dėl mezosferoje gėstančių atmosferos sunkio bangų. Atskirų juostų ilgis gali siekti nuo keliasdešimties iki kelių šimtų kilometrų, o ypatingais atvejais juostos gali nusidriekti net iki 1000 km. Bėgant laikui, juostų struktūra kinta nedaug ir paprastai matoma keletą ar daugiau valandų. Pagal juostų išvaizdą papildomai skiriami Ila tipo (plačios difuzinės juostos neryškiomis kraštais, 7 pav.) ir I Ib tipo (ryškios, siauros juostos, 8 pav.) sidabriškieji debesys.

III tipas – bangos. Tai – labai dinamiški sidabriškieji debesys, pasižymintys ryškia ir aiškia smulkiaja struktūra. Skiriami du papildomi banginių struktūrų tipai: IIIa – trumpos, tiesios bangelės (9 pav.) ir IIIb – sudėtingesnės

- ↖ 7 pav.
Ila tipo sidabriškieji debesys. A. Dubiečio nuotr.
- ↗ 8 pav.
I Ib tipo sidabriškieji debesys. R. Balčiūno nuotr.



● 9 pav.
Illa tipo sidabriškųjų debesų bangos.
R. Balčiūno nuotr.

formos bangelių struktūros bei raibuliai (10 pav.). Sidabriškųjų debesų bangos kinta labai greitai, jos gali atsirasti ir išnykti per keliolika minučių. Smulkias, keletu kilometrų ilgio bangas sąlygoja oro masių šlytis dėl lokalių vėjų ir vadinamojo Kelvino-Helmholtzo nestabilumo. Šios bangos labai efektingos žvelgiant pro žiūroną arba kai apima didelį dangaus plotą. Tuomet sidabriškųjų debesų bangų laukas tampa panašus į raibuliuojantį vandens paviršių.

IV tipas – sūkuriai. Tai – vingiuojančios, bemaž vertikalios orientuotos juostos, kartkartėmis formuojančios tikrus, uždaro kontūro sūkurius. Tokie sidabriškieji debesys papildomai skirstomi į tris tipus pagal regimuosius sūkurių kampinius matmenis. IVa tipo sidabriškieji debesys – tai nedideli sūkurėliai, kurių kampiniai matmenys neviršija 1°. IVb tipo sūkurių kampiniai matmenys siekia 3–5°, o IVc tipo sūkurinės struktūros yra milžiniškos, jų kampiniai matmenys gali siekti keliasdešimt laipsnių (11 pav.). Sūkurius formuoja keletas tuo pat metu veikiančių atmosferos sunkio bangų šaltinių, taip pat stiprus turbulentiškumas viršutiniuose atmosferos sluoksniuose, atsirandantis dėl didelio temperatūrų skirtumo.

Nors grynosios (tik vieno kurio nors tipo) sidabriškųjų debesų formos nėra retas reiškinys, dažniausiai vienu metu matoma besikaitanti formų įvairovė, kurių savo ruožtu paįvairina ir nuolat besikeičianti sutemų segmento apšvietimo geometrija. Tačiau kartais regimosios sidabriškųjų debesų formos būna tokios painios ir sudėtingos, kad nebegali būti aiškiai priskirtos nė vienam iš keturių tipų (12 pav.). Tokie sidabriškieji debesys priskiriami 0 tipui. Manoma, kad kai kurie 0 tipo sidabriškieji debesys formuojasi šiek tiek skirtingo aukščio sluoksniuose vienu metu, neatmetama ir jų tarpusavio sąveikos galimybė.

Trumpalaikė sidabriškųjų debesų masyvo ar atskirų jo fragmentų dinamika teikia neįkainojamos informacijos apie mezoferos vėjus, jų kryptį ir greitį, trumpalaikius ir il-



↑ 10 pav.
IIIb tipo raibuliuojančios sidabriškųjų debesų bangos.
A. Dubiečio nuotr.

galaikius temperatūros pokyčius, vandens garų koncentracijos svyravimus ir pan. Tiriant sidabriškųjų debesų bangų dinamiką, nustatyta, kad mezopauzėje pučia stiprūs vėjai, kurių greitis keičiasi nuo kelių dešimčių iki kelių šimtų metrų per sekundę. Vasarą mezopauzės aplinkoje vyrauja vakarų krypties vėjai, tad visas sidabriškųjų debesų masyvas naktį slenka iš rytų į vakarus. Tačiau pastebėta, kad kartais atskiros bangos ar net ištisas jų laukas gali judėti ir priešinga kryptimi. Kas sąlygoja tokias judėjimo anomalijas, iki galo nėra aišku. Įdomu ir tai, kad sidabriškųjų debesų masyve gali formuotis labai siauros, keletu kilometrų pločio ir šimtų kilometrų ilgio stabilios pavienės bangos (angl. *solitary waves*), kurių keteros iškyla į 2–4 kilometrų aukštį (13 pav.). Šios bangos yra netiesinės, jos juda nekeisdamos savo matmenų, panašiai kaip ritininiai debesys troposferoje, aprašyti 3.9 poskyryje. Pavienės sidabriškųjų debesų bangos gyvuoja iki valandos, per tą laiką nusklisdamos šimtus kilometrų ir yra dar vienas puikus netiesinių bangų, dar vadinamų solitonais, Žemės atmosferoje pavyzdys.



↑ **11 pav.**
IVc tipo sidabriškųjų debesų sukūriai.
A. Dubiečio nuotr.

Kita svarbi sidabriškųjų debesų charakteristika yra jų šviesumas. Regimasis sidabriškųjų debesų šviesumas didele dalimi priklauso nuo ledo kristalų tankio ir temperatūros mezopauzėje. Tiksliai sidabriškųjų debesų šviesumą galima įvertinti fotometriniiais metodais, kurie yra gana sudėtingi. Vizualiai sidabriškųjų debesų šviesumas vertinamas kur kas paprasčiau – pagal 5 balų skalę. Vos įžiūrimų sidabriškųjų debesų šviesumas vertinamas 1 balu, nekontrastingu, bet aiškiai matomu – 2 balais, kontrastingu ir vidutinio šviesumo – 3 balais. Labai šviesių, patraukiančių dėmesį sidabriškųjų debesų šviesumas vertinamas 4 balais,

o ypač šviesių, apšviečiančių aplinkinius objektus, – 5 balais (**11 pav.**). Aišku, šviesumo vertinimams nemažą įtaką turi dangaus skaidrumas, troposferos debesuotumas ar Mėnulio pilnaties šviesa. Įgudę stebėtojai gali įvertinti sidabriškųjų debesų šviesumą 0,5 balo tikslumu, nepriklausomai nuo stebėjimo sąlygų kokybės.

10.5 Sidabriškieji debesys Lietuvos padangėje

Lietuvos geografinė padėtis idealiai tinka sidabriškųjų debesų stebėjimams. Šį gražų atmosferos reiškinį galima stebėti dažną giedrą birželio ir liepos naktį. Sidabriškieji



debesys puikiai matomi plika akimi, jiems aptikti nereikia jokių įmantrių prietaisų ar sudėtingos mokslinės aparatūros. Pats geriausias laikas pamatyti sidabriškuosius debesis yra nuo vasaros saulėgrąžos iki liepos vidurio, tačiau pirmieji ir paprastai ne itin šviesūs sidabriškieji debesis gali pasirodyti jau gegužės pabaigoje, o paskutiniai – netgi rugpjūčio viduryje. Nuo 1991 iki 2012 m. sidabriškieji debesis Lietuvos padangėje buvo užregistruoti daugiau nei 400 kartų. Šiuos duomenis sukaupe ir apibendrina dr. K. Černis, R. Balčiūnas ir šios knygos autorius [19]. Remiantis šių stebėjimų duomenimis, per vasarą Lietuvos padangėje sidabriškuosius debesis vidutiniškai galima pamatyti apie 20 kartų. Ramios Saulės laikotarpiu šis skaičius beveik 2 kartus padidėja, o Saulės aktyvumo maksimumo

metu – tiek pat sumažėja (**14 pav.**). Ypač derlingi stebėjimams buvo 1994, 2008, 2009 ir 2012 m., kai sidabriškieji debesis švytėjo daugiau nei po 30 naktų. Kartu paveikslė pateiktas ir Saulės aktyvumo kitimas, išreikštas Tarptautiniu Saulės dėmių skaičiumi. Nesunku įžvelgti ryškias ilgalaikes sidabriškųjų debesų matomumo variacijas, kurios ženklina jų matomumo sumažėjimą Saulės aktyvumo maksimumų metais (1991–1993 ir 2001–2003 m.). Panašūs dėsningumai būdingi ir labai šviesių sidabriškųjų debesų skaičiui. Labai šviesūs sidabriškieji debesis iškart patraukia dėmesį. Tokie sidabriškieji debesis sušvinta vidutiniškai kelis

↑ **12 pav.**
Ypač šviesūs 0 tipo sidabriškieji debesis.
A. Dubiečio nuotr.



↑ **13 pav.**
Pavienė sidabriškųjų debesų banga.
A. Dubiečio nuotr.

kartus per metus. Vieni šviesiausių pastarojo meto sidabriškųjų debesų Lietuvos padangėje užregistruoti 2009 m. liepos 13–14-osios naktį (**12 pav.**). Tuomet sidabriškųjų debesų švytėjimas buvo toks intensyvus, kad apšvietė pastatus ir medžius, užliedamas visą naktinį peizažą nežemiška šviesa. Itin šviesūs sidabriškieji debesys dažniausiai atsiranda pirmoje nakties pusėje ir neretai švyti visą naktį. Pradedant paskutine liepos savaite, kai vis labiau temsta, sidabriškųjų debesų matomumo laikas naktį trumpėja ir pasidalina į vakarinį (iki pusiaunakčio) ir rytinį (iki aušros) matomumo periodus. Beje, šiuo laikotarpiu sidabriš-

kieji debesys kur kas dažniau matomi paryčiais.

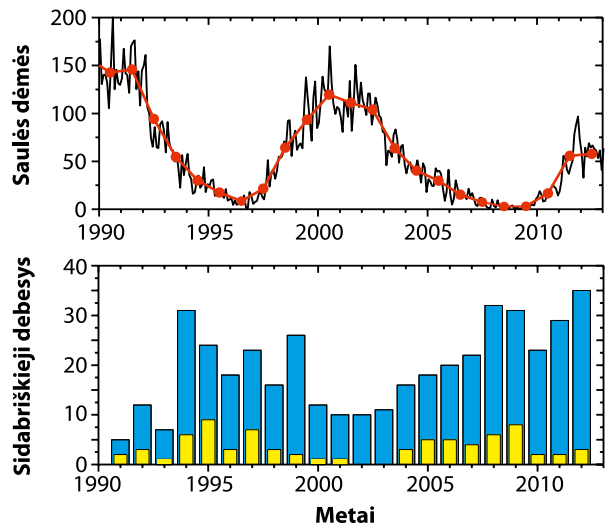
Registruojamas sidabriškųjų debesų skaičius smarkiai priklauso ne tik nuo Saulės aktyvumo, bet ir nuo meteorologinių sąlygų palankumo, kurios metai iš metų gali labai smarkiai skirtis. Ilgamečių stebėjimų duomenimis, per visą sidabriškųjų debesų matomumo sezoną, kurio apytikrė trukmė yra 85 naktys, t. y. beveik 3 mėnesiai, giedrų ar su pragiedruliais naktų skaičius Lietuvoje svyruoja nuo 40 iki 70.

15 paveiksle pavaizduota 2008 m. stebėtų sidabriškųjų debesų chronologija, kuri susieta su lokaliais mezopauzės ir vandens garų užšalimo temperatūros svyravimais 85 km aukštyje [20]. Temperatūros duomenys gauti iš „Aura“ palydovo, kuris yra šiuo metu vykdomos didelės atmosferos

tyrimų programos dalis. Šį palydovą 2004 m. į orbitą iškėlė Nacionalinė aeronautikos ir kosmoso agentūra (NASA). 705 km aukštyje skriejantis „Aura“ palydovas du kartus per parą (maždaug vidurdienį ir vidurnaktį) praskrieja ir virš Lietuvos, registruodamas įvairius duomenis iš aukštųjų atmosferos sluoksnių. Buvo nustatyta, kad 85 km aukštyje virš Lietuvos temperatūra kartais gali nukristi net iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kaip tik tuomet stebimi patys šviesiausieji ir įspūdingiausiai sidabriškieji debesys.

2005 m. birželio 14–15-osios naktį Lietuvos padangėje užfiksuotas labai retas sutapimas, kai vienu metu švytėjo ir sidabriškieji debesys, ir šiaurės pašvaistė. Kaip žinoma, šiaurės pašvaistę sąlygoja aktyvi Saulė (jos žybsniai ir vainiko medžiagos pliūpsniai), todėl dviejų visiškai skirtingos kilmės reiškinių, vykstančių aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose, atsiradimas vienu metu yra tikra retenybė Lietuvos padangėje. Kitaip yra Kanadoje ir Aliaskoje, kur šie reiškiniai neretai stebimi kartu, kadangi minėtos vietovės pakliūva į pašvaisčių ovalo zoną, ir šiaurės pašvaistės netgi santykinai ramios Saulės periodu ten yra gana įprastas reiškinys.

Ypatingi sidabriškieji debesys švytėjo 2010 m. birželio 28–29-osios naktį (16 pav.). Šiaurės pusėje dangus atrodė tarsi padalintas per pusę. Viršutinė sidabriškųjų debesų masyvo dalis atrodė tarsi nurėžta aštriu peiliu. Toks vaizdas išliko beveik nepakitęs visą naktį iki pat aušros. Panašūs reiškiniai kartais registruojami atmosferos švytėjime, kuris driekiasi dar aukščiau nei sidabriškieji debesys (11.6 posk.) ir vadinami „mezosferos siena“ (angl. *mesospheric wall*) [21]. Mezosferos siena skiria dvi dideles labai skirtingų temperatūrų mezosferos sritis. Temperatūrų skirtumas, kuris gali siekti net iki $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, atsiranda veikiamas stiprioms atmosferos sunkio bangoms. Tačiau tokios didelės temperatūros anomalijos yra labai retos aukštyje, kur susidaro sidabriškieji debesys.

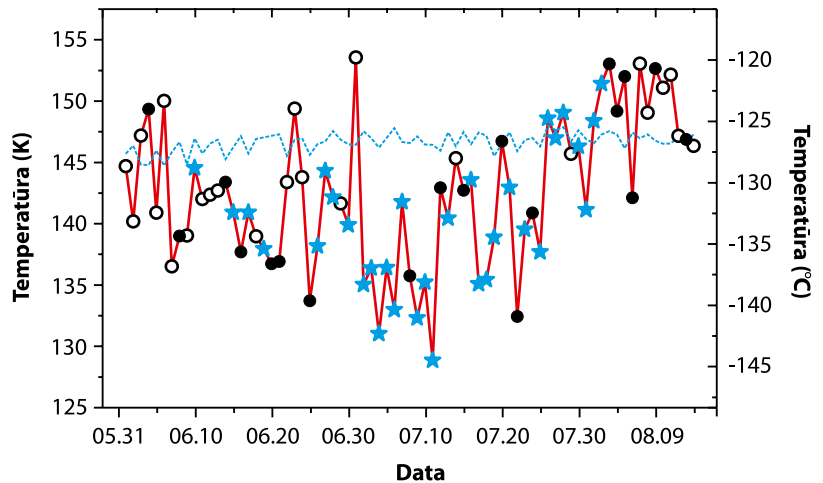


↑ 14 pav.
Sidabriškųjų debesų statistika Lietuvos padangėje. Viršuje – Saulės aktyvumo kitimas, išreikštas Tarptautiniu Saulės dėmių skaičiumi, apačioje – metinis sidabriškųjų debesų skaičiaus kitimas Lietuvos padangėje 1991–2012 metais (mėlyni stulpeliai). Geltoni stulpeliai vaizduoja labai šviesių (4 ir 5 balų šviesumo) sidabriškųjų debesų skaičiaus kitimą

10.6 Šiuolaikiniai sidabriškųjų debesų tyrimai pasaulyje

Sidabriškieji debesys ne tik puošia romantišką vasaros nakties dangų, bet yra ir nepaprastai įdomus mokslinių tyrinėjimų objektas. Sidabriškieji debesys žinomi ir tyrinėjami jau daugiau nei 120 metų, bet susidomėjimas šiuo įdomiu reiškiniu ne tik neslūgsta, bet ir tolydžio auga. Nepaisant to, kad gyvename kosminiame amžiuje, kai dirbtiniai Žemės palydovai siunčia nenutrūkstamą informacijos srautą apie mūsų gimtąją planetą bei artimiausią jos aplinką, antžeminiai sidabriškųjų debesų stebėjimai iki šiol tebetiekia neįkainojamų žinių apie šį įdomų reiškinį. Svarų indėlių čia įneša ir astronomijos mėgėjai.

→ 15 pav.
Sidabriškųjų debesų chronologija (pažymėta žvaigždutėmis) ir mezopauzės temperatūros (raudona kreivė) kaita virš Lietuvos 2008 metais pagal fotografinių stebėjimų ir „Aura“ palydovo duomenis. Mėlyna kreivė vaizduoja vandens garų užšalimo temperatūrą. Tuščiaiduriai taškai – giedros naktys be sidabriškųjų debesų, pilnaviduriai taškai žymi apsiniaukusias naktis



Fundamentalūs antžeminių stebėjimų uždaviniai yra nustatyti ilgalaikes sidabriškųjų debesų dažnio bei šviesumo kitimo tendencijas, išsiaiškinti, ar keičiasi vietų, iš kurių jie pastebėti, geografija ir matomumo sezono trukmė, kokie geofiziniai veiksniai lemia trumpalaikes sidabriškųjų debesų charakteristikų variacijas ir pan.

Sidabriškųjų debesų kaitos klausimu plačiau susidomėta jau praėjusio amžiaus viduryje. Tačiau tuomečiai istoriniai stebėjimų duomenys buvo surinkti iš labai skirtingų šaltinių, nebuvo vienos stebėjimų metodologijos, tad mokslinė prasme šie rezultatai buvo labai margi ir nelabai patikimi. Nors ir paaiškėjo, kad sidabriškųjų debesų dažnis metai iš metų smarkiai keičiasi, duomenų nevienalytiškumas sutrukdė atskleisti šios kaitos pobūdį bei priežastis. 1957–1958 metus paskelbus Tarptautiniais geofizikos metais, pasaulyje pradėti gerai koordinuoti nuolatiniai sidabriškųjų debesų stebėjimai. Bendradarbiaujant astronomijos mėgėjams, astronomams profesionalams, geofizikams ir netgi meteorologams, buvo įsteigti ir iki šiol veikia gerai organizuoti sidabriškųjų debesų stebėjimo tinklai Šiaurės Amerikoje (*NLC CAN AM Network*), Europoje (*NLC Net*,

buvęs Vakarų Europos tinklas), taip pat nacionalinės sidabriškųjų debesų stebėtojų asociacijos Rusijoje, Vokietijoje, Danijoje, Skandinavijos šalyse ir Didžiojoje Britanijoje. Šių tinklų tikslas – rinkti, kaupti ir apibendrinti vizualinių ir fotografinių sidabriškųjų debesų stebėjimų, atliekamų pagal vieną programą, duomenis. Tokie stebėjimai nereikalauja kažkokios sudėtingos mokslinės aparatūros, o vykstant minimalią stebėjimo programą, pakanka registruoti datą ir laiką, sidabriškųjų debesų šviesumą, morfologines formas bei meteorologines stebėjimo sąlygas (troposferos debesuotumą).

Šių ilgamečių tyrimų rezultatai atskleidė, kad iš skirtingų vietų atliktų sidabriškųjų debesų stebėjimų duomenys gerai sutampa, o sidabriškųjų debesų dažnis kinta periodiškai – maždaug 10,5 metų periodu, kuris beveik sutampa su Saulės aktyvumo ciklu [22–25]. Be to, nustatyta, kad sidabriškųjų debesų dažnis kinta priešfaze Saulės aktyvumo kaitai – jis gerokai (bemaž dvigubai) išauga Saulės aktyvumo minimumo metu ir sumažėja, kai Saulės aktyvumas maksimalus. Šį faktą patvirtina ir stebėjimų Lietuvoje duomenys (12 pav.). Saulės ciklo ir sidabriškųjų



16 pav.
„Mezosferos siena“ sidabriškųjų debesų masyve.
R. Balčiūno nuotr.

debesų ryšys nėra netikėtas, kadangi aukštųjų atmosferos sluoksnių „klimatas“ yra smarkiai lemiamas kosminių orų, kurių valdovas yra mūsų artimiausia žvaigždė – Saulė. Išmatuota, kad regimosios Saulės spinduliuotės srautas beveik nekinta viso aktyvumo ciklo metu, tačiau registruojamos smarkios periodinės Saulės spinduliuotės srauto variacijos likusiame elektromagnetinių bangų spektro ruože – rentgeno, ultravioletiniame ir radijo bangų diapazone. Saulės aktyvumo maksimumo metu išauga rentgeno ir ultravioletinių spindulių srautas, kuris gerokai paspartina vandens garų molekulių fotodisociacijos procesus aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose, t. y. didelės energijos fotonai lengvai nutraukia ryšius tarp vandenilio ir deguonies atomų, taip suardydami vandens molekules. Įvertinta, kad vidutinė vandens molekulės gyvavimo trukmė mezosferoje keičiasi nuo 3 iki 10 dienų, atitinkamai aktyvios ir ramios Saulės metu. Antrasis veiksnys taip pat susijęs su padidėjusiu rentgeno ir ultravioletinės spinduliuotės intensyvumu Saulės aktyvumo maksimumo metu. Kadangi trumpabangę spinduliuotę gerai sugeria mezosfera, dėl to šiek tiek pakyla ir mezopauzės temperatūra. Taigi sąlygos kondensuotis vandens garams tampa mažiau palankios. Tačiau, matyt, veikia ir kiti dar neidentifikuoti, tačiau labai svarbūs veiksniai. Mat paaiškėjo, kad sidabriškųjų debesų dažnio kitimo ciklas yra šiek tiek pasislinkęs Saulės ciklo atžvilgiu, sidabriškųjų debesų maksimumui vėluojant 1–2 metus Saulės aktyvumo minimumo atžvilgiu. Šis faktas vėliau daug kartų buvo patvirtintas įvairiais stebėjimais, tačiau tokio vėlavimo priežastis kol kas lieka neaiški.

Modernūs fotografiniai sidabriškųjų debesų stebėjimai atvėrė naujas galimybes. Atsiradus ir sparčiai tobulėjant skaitmeninei fototechnikai, 2005 m. astronomijos mėgėjų ir atmosferos fizikų pastangomis įsteigtas pasaulinis automatinių fotografinių antžeminių sidabriš-

kųjų debesų stebėjimo tinklas [26]. Šio tinklo stotys yra išsidėstę ant 54–56° šiaurės platumos rato ir yra Glazge (Škotija), Orhuse bei Silkeborge (Danija), Lunde (Švedija), Maskvoje, Novosibirske ir Kamčiatkoje (Rusija), Atabaskoje (Kanada). Nuo 2008 m. prie šio tinklo prisijungė ir Lietuva [27]. Paleistos trys automatinės skaitmeninės kameros Šiaurės rytų Lietuvoje – Vidiškėse (Ignalinos r.), Salake (Zarasų r.) ir Vilniuje. Geografinis stebėjimo punktų išsidėstymas įgalina be pertrūkių registruoti sidabriškuosius debesis kiaurą parą, jei tik stebėjimams netrukdo prasti orai. Pavyzdžiui, pradėjus švisti kur nors Novosibirske, stebėjimai tęsiasi iš Maskvos, o ėmus ten aušti, stebima jau Lietuvoje, vėliau estafetę perima danai, po jų – škotai ir t. t. Taip sudaromas globalus, kontinentinio mastelio sidabriškųjų debesų vaizdas. Šio vaizdo detalės ir ypatumai leidžia atskleisti kol kas dar nedaug tyrinėtų planetinių bangų judėjimą. Planetinės bangos – tai slėgio ir temperatūros trikdžiai, kurie atsiranda panašiai kaip potvyniai ir atoslūgiai vandenyne dėl Mėnulio traukos. Yra užfiksuotos net 20 000 km ilgio aplink visą Žemės rutulį lėtai judančios planetinės bangos.

Poliarinių mezosferos debesų albedo (atspindžio) matavimai iš dirbtinių Žemės palydovų atskleidė, jog vidutinis šių debesų šviesumas, nors ir nežymiai, tačiau nuolat didėja [28]. Deja, šio rezultato kol kas nepatvirtino antžeminių sidabriškųjų debesų stebėjimų duomenys. Kartu stebėjimai iš palydovų atskleidė, jog šiaurės pusrutulyje sidabriškieji debesis yra gerokai šviesesni, o tai lemia šiaurinės ir pietinės vasaros mezopauzės temperatūrų skirtumai. Šiuo metu NASA vykdo specialią brangiai kainuojančią programą, kuri išimtinai skirta poliarinių mezosferos debesų, taip pat ir sidabriškųjų, tyrimams iš kosmoso. Ši programa buvo pavadinta „Mezosferos ledo aeronomija“ (angl. *The Aeronomy of Ice in the Mesosphere – AIM*) ir pradėta vykdyti 2007 m., iškelus į orbitą specialų

mokslinį palydovą, kuris tiria ledo kristalų susidarymo dinamiką mezosferoje virš šiaurės ir pietų poliarinių sričių [29].

Kitas svarbus klausimas, kuris tebėra atviras, susijęs su sidabriškųjų debesų matomumo geografija. Kaip jau minėjome, Šiaurės pusrutulyje šie debesys matomi gana kompaktiškoje geografinėje zonoje, kuri driekiasi nuo 50° iki 65° šiaurės platumos. Tačiau pastaruoju metu gausėja pranešimų apie sidabriškųjų debesų stebėjimus iš kur kas piečiau, net 40° šiaurės platumoje esančių vietovių [30]. Vien 2007 m. sidabriškieji debesys keletą kartų buvo pastebėti virš Italijos ir Portugalijos, o 2008 m. gauti pranešimai iš šiaurinių Ispanijos ir net Turkijos (!) vietovių. Kas lemia tokią sidabriškųjų debesų stebėjimų geografijos plėtrą į pietus ir ar tai susiję su kokybiniais pokyčiais mezosferoje, mokslininkams dar teks iširti.

10.7 Sidabriškieji debesys ir klimato kaita

Pastaruoju metu ilgalaikių sidabriškųjų debesų dažnio ir šviesumo kitimo tendencijų tyrimai įgavo naują prasmę globalių klimato pokyčių kontekste. Sidabriškieji debesys yra labai jautrus temperatūros kaitos aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose indikatorius. Manoma, kad sidabriškųjų debesų susidarymas yra glaudžiai susijęs su šiuo metu vykstančiais visos mūsų planetos temperatūrų režimo pokyčiais arba, kitaip tariant, globalia klimato kaita. Globalūs klimato pokyčiai ima reikštis daugeliu aspektų, pradedant Žemės paviršiaus šilimu, ledynų tirpimu ir baigiant lokaliais ekstremaliais orais – sausromis, liūtimis ir potvyniais, sustiprėjusiais ir padažnėjusiais uraganais. Tai kelia vis didesnę susirūpinimą. Šie pokyčiai siejami su nuolat didėjančiomis vadinamųjų šiltnamio

dujų, pirmiausia anglies dioksido ir metano, emisijomis, kurias lemia žmogaus ūkinė veikla. Be natūralaus metano šaltinio – pelkių, metano dujas išskiria didėjantys ryžių pasėlių plotai, intensyvėjanti gyvulininkystė, biomasės deginimas ir anglies bei dujų gavybos pramonės augimas. Metano kiekis, palyginti su priešindustrine era, padidėjo dvigubai, o ypač smarkiai šių dujų emisija išaugo per pastaruosius 50 metų. Anglies dioksido kiekiai taip pat nuolat didėja, ir toli gražu ne paskutinį vaidmenį čia atlieka beatodairiškas tropinių miškų naikinimas. Šiltnamio efektą sąlygojančių dujų molekulės yra daugiaatomės, taigi turinčios mažos energijos vibracinių ir rotacinių lygmenų struktūrą. Kaip tik todėl tokios dujos gerai sugeria Saulės šviesą ir perspinduliuoja ją kaip vidurinę ir tolimąją infraraudonąją (šiluminę) 10–20 μm bangos ilgio spinduliuotę (1.3 posk.). Vandens garai, be kita ko, taip pat yra šiltnamio efektą sąlygojančios dujos, o jų koncentracijos didėjimas aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose – stratosferoje ir mezosferoje – gali turėti kol kas sunkiai nuspėjamų pasekmių. Padidėję šiltnamio dujų kiekiai ima keisti nusistovėjusią energijos pusiausvyrą tarp Žemės paviršiaus, atmosferos ir kosminės erdvės. Dėl to Žemės paviršius ir žemiausi atmosferos sluoksniai palaipsniui šyla, tačiau viršutiniai – atvirkščiai, vis labiau vėsta. Taigi globalus klimato šiltėjimas ties Žemės paviršiumi sąlygoja globalų atšalimą mezosferoje. Jei registruojamas vidutinės temperatūros padidėjimas ties Žemės paviršiumi tesiekia +0,5 °C, manoma, kad mezosferoje atsiradę neigiami temperatūros pokyčiai turėtų būti kur kas didesni. Sidabriškieji debesys, jų dažnis bei šviesumas, galėtų būti tas lakmuso popierėlis, kuris vykstančius klimato šiltėjimo procesų aidus ties Žemės paviršiumi keleriopai ryškiau atspindi mezosferoje [31]. Iš tiesų nuolatinis sidabriškųjų ir poliarinių mezosferos debesų šviesėjimas rodo, kad mezosfera vis labiau drėksta, o kartu ir krinta temperatūra mezopauzėje.

Tačiau išryškinti žmogiškąjį veiksnių tiriant sidabriškųjų debesų kaitą nėra paprasta, kadangi mezosfera yra labai savitas atmosferos sluoksnis, jautrus tiek išoriniams (kosminiams), tiek vidiniams (žemiškos ir žmogiškos kilmės) trikdžiams. Tad ir sidabriškųjų debesų formavimasi lemia įvairių, kartais ir labai skirtingų veiksnių visuma: atmosferos potvyniai ir atoslūgiai, atmosferos bangų intensyvumas bei Saulės aktyvumas ir manoma, kad žmogaus veikla. Tačiau stebimi pokyčiai, kaip ir visi globalaus masto procesai, yra gana lėti ir reikia mažiausiai dešimtmečių nuolatinių stebėjimų. Šia prasme kol kas nėra patikimų duomenų apie ilgalaikius vidutinės mezosferos temperatūros pokyčius, tad tenka kliautis kol kas labai apytikrėmis skaitmeninių modelių prognozėmis, kurios numato mezosferos temperatūros kritimą plačiose ribose – nuo 0,8 iki 5 °C per 10 metų. Kad ir kaip būtų, visiškai tikėtina, kad tolydžio šviesėjantys ir vis piečiau stebimi sidabriškieji debesys – tai pirmieji pastebimi ženklai, signalizujantys apie žmogaus ūkinės veiklos įtaką Žemės klimatui globaliu mastu. Kita vertus, iki šiol nėra aišku, ar globali klimato kaita vyksta natūraliai, kaip tam tikri ilgi atšalimo ir atšilimo ciklai, kokių ne vieno būta praeityje, ar ją paskatino žmogaus pramoninė ir ūkinė veikla. Tikimasi, kad sidabriškųjų debesų tyrimų rezultatai prisidės ieškant atsakymų į šiuos svarbius visai žmonijai klausimus.

Bibliografija

1. B. Fogle, B. Haurwitz, *Noctilucent clouds*, *Space Science Reviews* **6**, 1966, 279–340.
2. M. Gadsden, *Noctilucent clouds*, *Journal of the British Astronomical Association* **99**, 1989, 210–214.
3. G. E. Thomas, *Mesospheric clouds and the physics of mesopause region*, *Reviews of Geophysics* **29**, 1991, 553–575.
4. W. Schroeder, *Otto Jesse and the investigation of noctilucent clouds 115 years ago*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **82**, 2001, 2457–2468.
5. W. Schroeder, *Were noctilucent clouds caused by the Krakatoa eruption? A case study of the research problems before 1885*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **80**, 1999, 2081–2085.
6. M. Hervig, R. E. Thompson, L. L. Gordley, J. M. Russel, M. E. Summers, *First confirmation that water ice is the primary component of polar mesospheric clouds*, *Geophysical Research Letters* **28**, 2001, 971–974.
7. T. M. Donahue, B. Guenther, J. E. Blamont, *Noctilucent clouds in daytime: circumpolar particulate layers near the summer mesopause*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **29**, 1972, 1205–1209.
8. G. E. Thomas, J. J. Olivero, E. J. Jensen, W. Schroeder, O. B. Toon, *Relation between increasing methane and the presence of ice clouds at the mesopause*, *Nature* **338**, 1989, 490–492.
9. D. C. Fritts, M. J. Alexander, *Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere*, *Reviews in Geophysics* **41**, 2003, 1003.
10. A. A. Kokhanovsky, *Microphysical and optical properties of noctilucent clouds*, *Earth-Science Reviews* **71**, 2005, 127–146.
11. M. H. Stevens, C. R. Englert, M. T. DeLand, M. Hervig, *The polar mesospheric cloud mass in the Arctic summer*, *Journal of Geophysical Research* **110**, 2005, A02306.
12. M. Rapp, G. E. Thomas, *Modelling the microphysics of mesospheric ice particles: assessment of current capabilities and basic sensitivities*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **68**, 2006, 715–744.
13. R. L. Merlino, J. A. Goree, *Dusty plasmas in the laboratory, industry and space*, *Physics Today* **57**(7), 2004, 32–38.
14. T. Hartquist, O. Havnes, M. Kassa, *Exploring polar mesospheric summer echoes*, *Astronomy & Geophysics* **50**, 2009, 1.8–1.14.
15. F. Montmessin, J.-L. Bertaux, E. Quemerais, O. Korabiev, P. Rannou, F. Forget, S. Perrier, D. Fussen, S. Lebonnois, A. Rebereac, E. Dimarellis, *Subvisible CO₂ ice clouds detected in the mesosphere of Mars*, *Icarus* **183**, 2006, 403–410.
16. G. Witt, *Height, structure and displacements of noctilucent clouds*, *Tellus* **14**, 1962, 1–18.
17. C. O. Hines, *A possible source of waves in noctilucent clouds*, *Journal of the Atmospheric Sciences* **25**, 1968, 937–942.
18. M. Gadsden, P. Parviainen, *Observing noctilucent clouds*, *The International Association of Geomagnetism and Aeronomy*, 2006.
19. A. Dubietis, P. Dalin, R. Balčiūnas, K. Černis, *Observations of noctilucent clouds from Lithuania*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **72**, 2010, 1090–1099.
20. P. Dalin, N. Pertsev, A. Dubietis, M. Zalcik, A. Zadorozhny, M. Connors, I. Schofield, T. McEwan, I. McEachran, S. Frandsen, O. Hansen, H. Andersen, V. Sukhodoev, V. Perminov, R. Balčiūnas, V. Romejko, *A comparison between ground-based observations of noctilucent clouds and Aura satellite data*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **73**, 2011, 2097–2109.
21. F. Li, G. R. Swenson, A. Z. Liu, M. Taylor, Y. C. Zhao, *Investigation of a "wall" wave event*, *Journal of Geophysical Research* **112**, 2007, D04104.
22. M. Gadsden, *The North-West Europe data on noctilucent clouds: a survey*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **60**, 1998, 1163–1174.
23. V. A. Romejko, P. A. Dalin, N. N. Pertsev, *40 years of Noctilucent Cloud observations near Moscow: database and simple statistics*, *Journal of Geophysical Research* **108**, 2003, 8443.
24. P. Dalin, S. Kirkwood, H. Andersen, O. Hansen, N. Pertsev, V. Romejko, *Comparison of long-term Moscow and Danish NLC observations: statistical results*, *Annales Geophysicae* **24**, 2006, 2841–2849.
25. S. Kirkwood, P. Dalin, A. Rechou, *Noctilucent clouds observed from the UK and Denmark – trends and variations over 43 years*, *Annales Geophysicae* **26**, 2008, 1243–1254.
26. P. Dalin, N. Pertsev, A. Zadorozhny, M. Connors, I. Schofield, I. Shelton, M. Zalcik, T. McEwan, I. McEachran, S. Frandsen, O. Hansen, H. Andersen, V. Sukhodoev, V. Perminov, V. Romejko, *Ground-based observations of noctilucent clouds with a northern hemisphere network of automatic digital cameras*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **70**, 2008, 1460–1472.
27. A. Dubietis, P. Dalin, R. Balčiūnas, K. Černis, N. Pertsev, V. Sukhodoev, V. Perminov, M. Zalcik, A. Zadorozhny, M. Connors, I. Schofield, T. McEwan, I. McEachran, S. Frandsen, O. Hansen, H. Andersen, J. Gronne, D. Melnikov, A. Manevich, V. Romejko, *Noctilucent clouds: modern ground-based photographic observations by a digital camera network*, *Applied Optics* **50**, 2011, F72–F79.
28. M. T. DeLand, E. P. Shettle, G. E. Thomas, J. J. Olivero, *A quarter-century of satellite mesospheric cloud observations*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **68**, 2006, 9–29.
29. J. M. Russel, S. M. Bailey, M. Horanyi, L. L. Gordley, D. W. Rusch, M. E. Hervig, G. E. Thomas, C. E. Randall, D. E. Siskind, M. H. Stevens, M. E. Summers, M. J. Taylor, C. R. Englert, P. J. Espy, W. E. McClintock, A. W. Merkel, *Aeronomy of ice in the mesosphere (AIM): overview and early science results*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **71**, 2009, 289–299.
30. M. J. Taylor, M. Gadsden, R. P. Lowe, M. S. Zalcik, J. Brausch, *Mesospheric cloud observations at unusually low latitudes*, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* **64**, 2002, 991–999.
31. G. E. Thomas, *Are noctilucent clouds harbingers of global change in the middle atmosphere?*, *Advances in Space Research* **32**, 2003, 1737–1746.

11. Šiaurės pašvaistės



● R. Balčiūno nuotr.

11.1. Nuo mistikos iki mokslinio supratimo

Šiaurės pašvaistė (*aurora borealis*) yra vienas įspūdingiausių ir didingiausių naktinio dangaus reginių. Neseniai Babilono astronominiuose tekstuose aptiktas pats seniausias dokumentas, kuriame aprašytas šis paslaptingas gamtos reiškinys. Jis datuojamas 567 m. prieš Kristų ir yra rašytas ant molio lentelių [7]. Šiaurės pašvaistės minimos senovės graikų, kinų, japonų ir korėjiečių istoriniuose šaltiniuose. Daugelį amžių apie pašvaisčių kilmę buvo tik spėliojama. Pavyzdžiui, senovės graikų filosofas Aristotelis teigė, kad šiaurės pašvaisčių švytėjimą sukuria į viršų kylantys atmosferos garai, kurie užsiliepsnoja pasiekę dangaus sferą. Romėnų filosofas Seneka manė, kad raudonas šiaurės pašvaisčių švytėjimas simbolizuoja atsivėrusį dangų. Viduramžiais šis nepaaiškinamas reiškinys žmonėms keldavo baimę ir buvo laikomas karų, epidemijų, kitokių nelaimių ar dievo bausmių pranašu. Šiaurės šalyse (Skandinavijoje), kur pašvaistės buvo matomos dažnai, požiūris į jas buvo kiek kitoks. Šis reiškinys nekėlė tokios didelės baimės ir susipynė su vietinių gyventojų tautosaka bei mitologija.

Vieną pirmųjų mokslinių šiaurės pašvaistės kilmės hipotezių dar XVIII a. nepriklausomai iškėlė žymusis anglų astronomas Edmondas Halis (*Edmod Halley*) ir prancūzų mokslininkas Žanas de Mairanas (*Jean-Jacques de Mairan*). Jie manė, kad šiaurės pašvaistės yra susiję su Žemės magnetiniu lauku, o jų atsiradimą lemia Žemės magnetinio lauko kaita. Ž. de Mairanas atrado dabar jau gerai žinomą šiaurės pašvaisčių sezoniškumą ir netgi pamėgino išmatuoti pašvaisčių švytėjimo aukštį.

Magnetinę šiaurės pašvaisčių kilmės hipotezę netrukus patvirtino švedų astronomas Alfredas Celsijus (*Alfred Celsius*), pastebėjęs, kaip danguje švytint ryškiai pašvaistei ima blaškytis kompas rodyklė. XIX a. pabaigoje gamtos

moksluose buvo padaryta daugybė svarbių atradimų, kurie padėjo įminti šiaurės pašvaisčių mįslę. Garsus norvegų fizikas Andersas Angstromas (*Anders Jonas Ångström*) pirmasis pažvelgė į pašvaistės spalvas per prizmę ir atrado, kad pašvaistės švytėjimo spalvų spektrą sudaro vos kelios atskiros siauros spektrinės linijos. Netrukus pavyko identifikuoti ir šias linijas spinduliuojančius cheminius elementus.

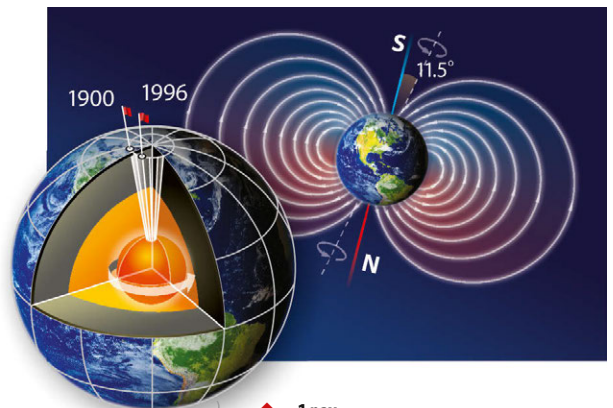
Pirmuosius laboratorinius eksperimentus, kurie tiesiogiai įrodė magnetinę šiaurės pašvaisčių prigimtį, 1896 m. atliko norvegų fizikas Kristianas Birkelandas (*Kristian Olaf Birkeland*). Patalpinęs įmagnetintą rutulį į žemo slėgio išlydzio lempą, jis išvydo erdvinius elektros išlydzio darinius, kurių forma buvo labai panaši į šiaurės pašvaistės švytėjimą. Remdamasis šių tyrimų rezultatais, K. Birkelandas atskleidė, kad šiaurės pašvaistę kuria elektronai, nukreipiami Žemės magnetinio lauko link Žemės magnetinių polių ir toliaregiškai numatė, jog šių elektronų šaltinis galėtų būti Saulė. Už šiuos darbus K. Birkelandas buvo net septynis kartus nominuotas Nobelio fizikos premijai, tačiau jos taip ir negavo. Vis dėlto norvegai rado būdą, kaip įamžinti savo garsųjį mokslininką – K. Birkelando atvaizdas šiuo metu puikuoja ant 200 Norvegijos kronų banknoto.

K. Birkelando darbus pratęsė jo mokinys Karlas Stormeris (*Carl Størmer*). Šiaurės pašvaisčių tyrinėjimams skyręs daugiau nei 30 metų, įvairiose Norvegijos vietose jis padarė daugiau nei 20 000 šiaurės pašvaisčių nuotraukų ir trianguliacijos metodu nustatė, kad vidutinis šiaurės pašvaisčių švytėjimo aukštis yra 100–120 km. Jau šiuolaikiniais kosminės fotometrijos metodais nustatyta, kad pašvaisčių švytėjimas driekiasi dar aukščiau – net iki 1 000 km virš Žemės paviršiaus. Taigi šiandien žinome, kad šiaurės pašvaistės – tai pačių aukščiausių Žemės atmosferos sluoksnių švytėjimas, kurį sąlygoja sudėtinga Žemės magnetinio lauko ir iš Saulės atskriejančių elektringųjų dalelių srauto, vadinamo Saulės vėju, sąveika.

11.2 Žemės magnetinis laukas

Apie magnetus ir metalų įmagnetinimą žinojo jau senovės graikai ir kinai. Manoma, kad kompasas, kurio neturint net nebuvo galima svajoti apie didžiuosius geografinius atradimus, buvo išrastas maždaug prieš 1 000 metų Kinijoje. 2000-aisiais sukako lygiai 400 metų, kai Anglijos karalienės Elžbietos I asmeninis fizikas (anuomet buvo ir tokių!) Viljamas Džilbertas (*William Gilbert*) paskelbė savo žymųjį veikalą „De Magnete“, kuriame teigė, kad pats Žemės rutulys yra milžiniškas magnetas, turintis šiaurinį ir pietinį polius ir nukreipiantis kompasrodyklę. Jis net atliko eksperimentą su didžiuliu įmagnetintu rutuliu ir kompasu, akivaizdžiai pademonstruodamas, kaip kompasrodyklė keičia kryptį, kai kompasas judinamas skersai ir išilgai rutulio paviršiaus. Tačiau V. Džilbertas negalėjo paaiškinti, nei kaip atsiranda Žemės magnetinis laukas, nei kodėl tikrovėje kompasrodyklė rodo nevisiškai tiesiai į šiaurę, kitaip tariant, kodėl nesutampa Žemės magnetiniai ir geografiniai poliai. Pirmasis Žemės magnetinio lauko kilmės paaiškinimą pasiūlė jau minėtas E. Halis, teigdamas, kad Žemė viduje sudaryta iš besisukančių koncentrinų įmagnetintų sferų. Aišku, tai buvo tik spėjimas, tačiau jame glūdėjo ir kruopelė tiesos.

Jau XIX a., mokslo ir technikos suklestėjimo laikais, žymus vokiečių fizikas ir matematikas Karlas Gausas (*Carl Friedrich Gauss*) ir jo kolega Vilhelmas Vėberis (*Wilhelm Eduard Weber*) pirmą kartą išmatavo Žemės magnetinio lauko stiprį ir įsteigė nuolat veikiančią Žemės magnetinio lauko stebėjimų tinklą. Beje, kiek vėliau jiedu išrado pirmąjį elektromagnetinį telegrafą. Jau pirmasis magnetinio lauko stebėjimo tinklo stebėjimų gautas rezultatas buvo labai svarbus – įsitikinta, kad magnetinis laukas susidaro pačiose Žemės gelmėse. Netrukus buvo atskleistas glaudus elektros ir magnetizmo ryšys, įrodyta, kad magnetinio



↑ 1 pav.

Vidinė Žemės rutulio sandara, Žemės magnetinis laukas ir pietinio magnetinio poliaus judėjimas 1900–1996 metais. *J. Griciaus pieš.*

lauko šaltinis yra elektros srovė, o kai žymus anglų fizikas ir chemikas Maiklas Faradėjus (*Michael Faraday*) atrado elektromagnetinės indukcijos reiškinį, buvo išrastos dinamo mašinos, dabar vadinamos elektros generatoriais. Visas šias žinias pritaikius Žemės rutuliui, paaiškėjo, kad Žemės magnetinį lauką kuria jos gelmėse veikianti milžiniška dinamo mašina [2].

Apytikriai prieš 4,5 milijardo metų, formuojantis Žemės planetai, sunkesnieji cheminiai elementai geležis ir nikelis pamažu nugrimzdo gilyn link Žemės centro. Dabar 3 000 km gylyje tyvuliuoja didžiausias vandenynas – 3 400 km skersmens karšto ir skysto metalo sfera, vadinama išoriniu branduoliu, kurio temperatūra siekia apie 3000 °C. Šio vandenyno gelmėse esantys metalai ir jų lydiniai dėl milžiniško slėgio sukietėja, suformuodami maždaug 1 200 km skersmens kietą vidinį Žemės branduolį. Žemei sukantis, skystasis ir kietasis branduoliai taip pat sukasi, tačiau šiek tiek skirtingais greičiais, dėl to ima tekėti stiprios elektros srovės, kurios ir kuria Žemės magnetinį lauką. Taigi Žemė yra milžiniškas magnetinis dipolis (1 pav.). Žemės branduolio ir paties Žemės rutulio sukimosi



↑ 2 pav.
Saulės dėmės 2012 m. gegužės 9 d. R. Balčiūno nuotr.

ašys nesutampa. Žemės magnetinė ašis yra pasvirusi sukimosi ašies, einančios per šiaurės ir pietų ašigalius, atžvilgiu, todėl geografinių ir magnetinių polių padėtys skiriasi. Šis skirtumas sudaro 11°. Beje, magnetinis pietų polius yra šiaurės pusrutulyje, Grenlandijos šiaurės vakarų pakrantėje, o magnetinis šiaurės polius – pietų pusrutulyje, rytiniame Antarktidos pakraštyje.

Nustatyta, kad Žemės magnetiniai poliai palengva keičia savo padėtį (1 pav.), o jų judėjimas pamažu greitėja. XIX a. vidutinis magnetinių polių judėjimo greitis buvo apie 15 km per metus, tačiau per pastaruosius ketelį dešimtmečių jis padidėjo iki 40 km per metus [3]. Negana to, nustatyta, kad Žemės magnetinis laukas palengva, tačiau nenumaldomai silpsta: nuo jo matavimų pradžios 1832 m. iki dabar Žemės magnetinio lauko stipris sumažėjo 10 % ir tebemažėja toliau. Kartu registruojamos ir vis didėjančios

Žemės magnetinio lauko anomalijos – sritys su padidėjusiu ar sumažėjusiu magnetinio lauko stipriu. Viena tokių sričių yra Atlanto vandenyne šalia Pietų Amerikos, o jos plotas prilygsta paties žemyno dydžiui. Visi šie ženklai byloja, jog po kurio laiko Žemės magnetiniai poliai apsisuks vietomis – apsivers: šiaurinis magnetinis polius taps pietiniu, ir atvirkščiai. Mokslininkai prognozuoja, kad tai gali įvykti jau per artimiausius 1 000 metų. Matuojant geofiziniu laiko masteliu, tai tėra akimirka. Tyrinėjant įsiamagnetinančias uolienas [4] nustatyta, kad praicityje Žemės magnetinio lauko poliarumas ne kartą keitėsi²⁵. Įvertinta, kad paskutinį kartą tai įvyko maždaug prieš 800 000 metų, tačiau kokie vyksmai Žemės gelmėse lemia tokius pasikeitimus, iki šiol tebėra paslaptis. Taip pat sunku prognozuoti ir būsimo įvykio padarinius. Neatmetama tikimybė, kad kažkuriam laikui Žemė neteks magnetinės apsaugos nuo Saulės vėjo.

11.3 Saulės vėjas

Saulės vėjas – tai elektringųjų dalelių srautas, kurio šaltinis yra Saulė. Saulės vėjas buvo atrastas 1960 m., paleidus pirmuosius kosminius aparatus. Galima sakyti, kad tai buvo vienas reikšmingiausių atradimų kosminės

²⁵ Įsiamagnetinančių uolienu tyrimas sudaro paleomagnetizmo mokslo pagrindą. Po ugnikalnių išsiveržimų, vėstant uolienoms, jose esantis mineralas magnetitas (Fe_3O_4) įsiamagnetina, „įrašydamas“ tuo metu esančio Žemės magnetinio lauko kryptį. Magnetitas savo magnetinę „atmintį“ išlaiko milijonus metų. Bėgant laikui, jo įsiamagnetinimas laipsniškai mažėja, ir pagal tai nustatomas uolienu amžius. Taip atkuriamą planetos magnetinio lauko istorija.

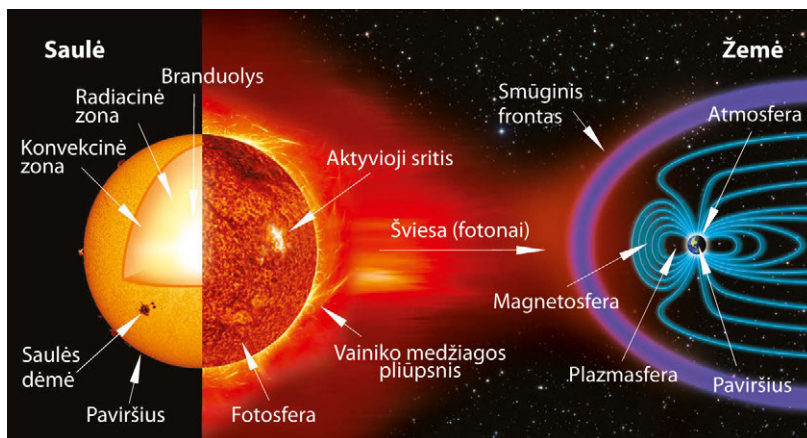
eros aušroje. Saulės vėjas kyla aktyviose Saulės fotosferos (regimosios atmosferos) srityse, kur susidaro nepaprastai stiprūs magnetiniai laukai. Kai kurios aktyviosios sritys Saulės paviršiuje gerai matomos pro nedidelį teleskopą. Tai – Saulės dėmės (**2 pav.**). Pačios didžiausios Saulės dėmės gali būti matomos net plika akimi, kai Saulė teka ar leidžiasi, ar tiesiog žvelgiant į ją pro tamsintą stiklą. Taip Saulės dėmės stebėjo jau senovės kinai.

Kad Saulės dėmių skaičius yra efektyvus Saulės aktyvumo matas, XIX a. viduryje aptiko vokiečių astronomas Samuelis Švabė (*Samuel Schwabe*), kuris kartu atrado ir 11 metų Saulės aktyvumo kitimo ciklą. Apskritai šiandien naudojama daug ir įvairių Saulės aktyvumo matų, kurie vertinami remiantis įvairių mokslinių prietaisų rodmenimis. Tai – vienos iš vandenilio spinduliavimo ultravioletinių linijų (Laimano- α , bangos ilgis 121 nm) ar radijo dažnio ties 10,6 cm bangos ilgiu intensyvumai, ir įvairūs kiti, remiantis magnetinio lauko iškraipymų matavimais nustatomi geomagnetinio aktyvumo indeksai [5]. Tačiau paprasčiausias ir suprantamiausias iš jų yra Tarptautinis Saulės dėmių skaičius (*International sunspot number*), anksčiau vadintas Volfo arba Ciuricho skaičiumi, kuris nuolat pateikiamas Saulės poveikio duomenų analizės centro (*Solar Influences Data Analysis Center – SIDC*) biuleteniuose, kurie skelbiami internete <http://sidc.oma.be>. Tarptautinis Saulės dėmių skaičius R apskaičiuojamas pagal paprastą formulę $R = k(10g+f)$, kur k yra tam tikras parametras, nusakantis stebėjimo instrumento charakteristikas (paprastai $k \approx 1$), g yra Saulės dėmių grupių, o f – visų Saulės dėmių skaičius. Šią formulę 1848 m. pasiūlė vienas Saulės aktyvumo stebėjimo pradininkų šveicarų astronomas Rudolfas Volfas (*Rudolph Wolf*). Saulės aktyvumui įvertinti ji naudojama iki šiol. Remiantis esamo Saulės aktyvumo ciklo Saulės dėmių skaičiaus kitimo forma ir kitais parametrais, galima gana tiksliai prognozuoti

ateinančio Saulės aktyvumo ciklo ypatumus [6].

Saulės dėmių paviršiaus temperatūra yra beveik 1000 °C žemesnė nei aplinkinėje fotosferoje (vidutinė fotosferos temperatūra yra apie 5800 °C), todėl Saulės dėmės mums atrodo tamsios. Būtent jose atsiranda galingos magnetinio lauko anomalijos, kurių dėka elektringosios dalelės (elektronai, protonai ir helio branduoliai, dar vadinami α -dalelėmis) išsiveržia iš Saulės magnetinio lauko ir pasiekia net pačius tolimiausius Saulės sistemos kampelius. Saulės vėjas „pučia“ nuolat, o jo stiprumas priklauso nuo Saulės aktyvumo. Esant dideliame Saulės aktyvumui, Saulė per trumpą laiką į kosminę erdvę gali išspjauti milžiniškus elektringųjų dalelių kiekius. Tai – vadinamieji vainiko medžiagos pliūpsniai (angl. *coronal mass ejection – CME*), sukeltys Saulės vėjo „gūsius“. Vieno tokio pliūpsnio metu į kosminę erdvę gali būti išmetama iki milijardo tonų elektringųjų dalelių. Panašius, tačiau mažesnės energijos elektringųjų dalelių kiekius į erdvę išspjauna ir vadinamieji Saulės žybsniai (angl. *solar flare*), kurie kyla aktyviose aukštesnės temperatūros Saulės fotosferos srityse. Saulės žybsniai yra „nematomi“ regimajame spektro diapazone, tačiau jų metu registruojamas smarkiai padidėjęs ultravioletinių ir Rentgeno spindulių bei centimetrinių radijo bangų srautas.

Pastovus Saulės vėjas „pučia“ maždaug 400 km/s greičiu, tačiau jo greitis „gūsių“ metu padidėja iki 1000–1200 km/s. Tokiu greičiu skriejančios Saulės vėjo dalelės Žemę pasiekia po keleto dienų. Žemės magnetinis laukas jas nukreipia išilgai savo linijų, tolyn nuo Žemės [7] (**3 pav.**). Taigi magnetinis laukas atlieka tarsi neregimo skydo vaidmenį, apsaugodamas Žemę nuo tiesioginio Saulės vėjo poveikio. Tačiau ir Saulės vėjas savo ruožtu veikia Žemės magnetinį lauką. Dieninėje, į Saulę atsuktoje pusėje Žemės magnetinio lauko linijos yra suspaudžiamos, čia formuojasi didžiulis lanko formos smūginis frontas. Naktinėje



← 3 pav.
Saulės vėjo ir Žemės magnetinio lauko sąveika.
J. Griciaus pieš.

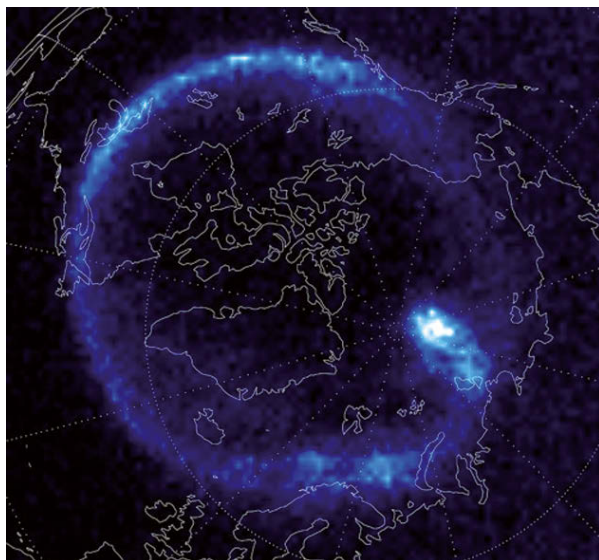
pusėje – atvirksčiai, magnetinio lauko linijos nutįsta tolyn, net iki 100 000 km atstumu nuo Žemės. Taip atsiranda vadinamasis plazmos šleifas [8]. Nedidelis lengvesnių Saulės vėjo dalelių (elektronų ir protonų) kiekis yra „pagaunamas“ ir sulaikomas plazmos šleifo šerdyje ir Van Aleno radiacinėse juostose, pavadintose jas 1958 m. atradusio amerikiečių mokslininko Džeimso van Aleno (*James van Allen*) vardu. Van Aleno radiacinėse juostose elektringosios dalelės juda pirmyn ir atgal uždaromis spiralinėmis trajektorijomis, atsispindėdamos ties Žemės magnetiniais poliais. Kai Saulės vėjo dalelių srautas labai didelis, pagautų dalelių kiekis Van Aleno juostose labai išauga, ir Žemės magnetinis laukas ties jos paviršiumi yra smarkiai iškraišomas. Tuomet kyla vadinamosios magnetinės audros, kurios gali trukti keletą dienų. Likusios Saulės vėjo dalelės juda išilgai magnetinio lauko linijų: iš pradžių jos nutolsta nuo Žemės, tačiau tam tikra nedidelė jų dalis vėliau grąžinama atgal dėl magnetinio perjungimo (angl. *magnetic reconnection*) reiškinio, kuris vyksta ten, kur susikerta nematomos Saulės ir Žemės magnetinių laukų linijos [9]. Sugrįžtančios elektringosios dalelės yra greitinamos ir, įgijusios papildomos energijos, pasiekia aukščiausius

Žemės atmosferos sluoksnius ties magnetiniais poliais. Magnetinio perjungimo vyksmas yra labai dinamiškas ir trumpalaikis, dėl jo kyla vadinamosios magnetosferos subaudros (angl. *magnetic substorms*) [10]. Būtent tuomet Žemės atmosferoje išsižiebia pačios ryškiausios pašvaisstės.

Sritys, kuriose įvyksta elektringųjų Saulės vėjo dalelių sąveika su atmosferos dujų atomais, yra žiedo formos. Jos vadinamos pašvaisčių ovalu, o jo centre yra magnetinis polius. Pašvaisčių ovalo skersmuo ramios Saulės metu yra apie 3 000 km, tad šiaurės pusrutulyje jis apima šiaurinius Skandinavijos ir Rusijos rajonus, Kanadą ir Aliaską (4 pav.). Pašvaisčių ovalo zonoje šiaurės pašvaisstės galima stebėti vos ne kasnakt. Magnetinių audrų metu pašvaisčių ovalo skersmuo smarkiai padidėja. Tuomet šiaurės pašvaisstės tampa matomos daug piečiau. Įvertinta, kad šiaurės kraštuose (šiauriau 60° šiaurės platumos) šiaurės pašvaisstės vidutiniškai sušvinta iki 10 kartų per mėnesį, Lietuvos platumoje – maždaug kartą per du mėnesius, Vidurio Europos kraštuose – kartą ar du per metus, Pietų Europoje – tik kartą ar du per dešimt metų, Šiaurės Afrikoje – keliskart per šimtmetį, o ant ekvatoriaus – tik kartą per 200 metų. Be to pastebėta, kad įspūdingos šiaurės pašvaisstės dažnai

atsikartoja kas 27 dienas – toks yra vidutinis Saulės apsisukimo apie savo ašį periodas. Pašvaistės matomos ir pietų pusrutulyje. Čia jos vadinamos pietų pašvaistėmis (aurora australis). Beje, pirmasis europietis, stebėjęs pietų pašvaistę 1773 m. ir aprašęs ją laivo žurnale, buvo garsus anglų kapitonas ir kartografas Džeimsas Kukas (*James Cook*). Keičiantis Žemės magnetinių polių padėčiai, atitinkamai keičiasi ir pašvaisčių ovalo padėtis. Kadangi pietinis magnetinis polius palengva tolsta nuo Amerikos ir artėja link Europos, tikėtina, kad jau šio amžiaus antroje pusėje šiaurės pašvaistės bus vis dažniau matomos iš vidutinių Europos platumų.

Šiaurės pašvaisčių dažnis ir intensyvumas tiesiogiai priklauso nuo Saulės aktyvumo, kuris kinta apytikriai 11 metų periodu. Akivaizdu, kad ryškiausios ir dažniausiai matomos šiaurės pašvaistės išsižiebia Saulės aktyvumo ciklo maksimumų metu. Beje, yra nustatytas ryšys tarp Saulės aktyvumo ir Žemės klimato [11]. Pastebėta, kad Saulės aktyvumo minimumo metais vidutinė temperatūra ties Žemės paviršiumi sumažėja. Paprastai šis temperatūros pokytis yra labai mažas, tačiau tampa ženklus, jei minimumas užsitęsia. Vienok 11 metų Saulės aktyvumo ciklas atspindi tik labai trumpalaikius Saulės gelmėse vykstančius procesus, o Saulės aktyvumo lygis ne visuomet buvo toks, koks yra dabar. Pavyzdžiui, 1645–1715 m. laikotarpis, kuris vadinamas Maunderio minimumu, Saulės dėmės buvo beveik išnykę, o šiaurės pašvaistės tuomet buvo ypač retas reiškinys [12]. Maunderio minimumo laikotarpis dažnai vadinamas mažuoju ledynmečiu, nes vidutinė metinė oro temperatūra buvo net keletu laipsnių žemesnė už vidutinę daugiametę. Tuo metu visą Europą kaustė ilgos ir atšiaurios žiemos. Panašiai nutiko ir XVIII ir XIX a. sankirtoje (1793–1816 m.), kai Saulės aktyvumas taip pat buvo neįtikėtinai žemas [13]. Prognozuojama, kad jau netolimoje ateityje panašus Saulės aktyvumo minimumas ir vėl gali



↑ 4 pav.
Pašvaisčių ovalas ramios Saulės periodu

pasikartoti, tačiau kokie vyksmai Saulėje lemia tokį smarkų aktyvumo sumažėjimą, iki šiol nėra tiksliai žinoma. Pagrįstai manoma, kad, be 11 metų ciklo, egzistuoja ir kiti daug ilgesni Saulės aktyvumo kaitos ciklai, kurių trukmė siekia šimtus ar tūkstančius metų. Ilgųjų ciklų kaita lemia ledynmečius, o istoriniai šiaurės pašvaisčių stebėjimai suteikia neįkainojamos informacijos apie Saulės aktyvumo kaitą ir Žemės klimatą praeityje [14].

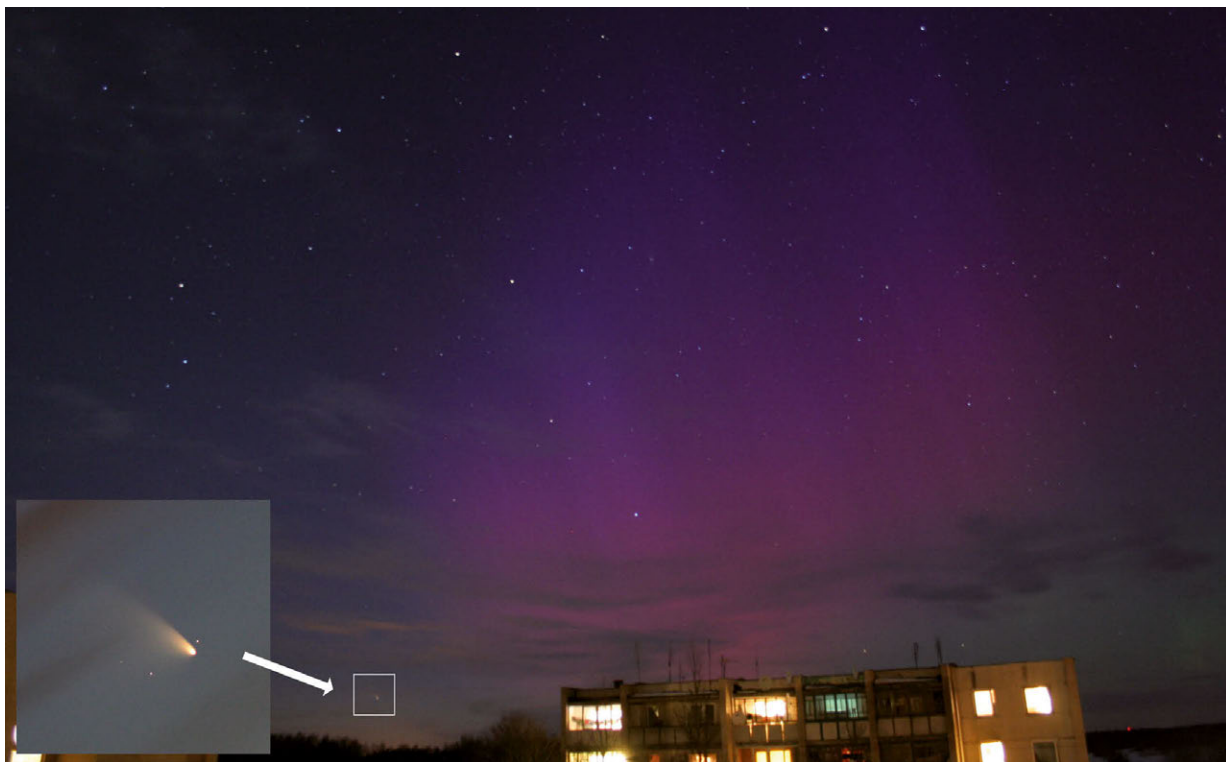
11.4 Pašvaisčių spalvos

Įskriejusios į Žemės atmosferos viršutinius sluoksnius, Saulės vėjo dalelės daug kartų susiduria su atmosferos dujų atomais ir molekulėmis, ir perduodamos jiems savo energiją, juos sužadina. Perteklinę energiją atomai ir molekulės išspinduliuoja šviesos kvantų (fotonų) pavidalu,



● 5 pav.

Šiaurės pašvaistės spalvos. Viena gražiausių pastarojo
meto šiaurės pašvaisčių Lietuvos padangėje, sušvitusi
2011 m. rugpjūčio 6-osios naktį. *R. Balčiūno nuotr.*



kuriuos akis mato kaip pašvaistės švytėjimą. Pašvaistės švyti dideliame aukštyje – 100–500 km, ten, kur atmosfera labai reta (jos tankis 10^9 – 10^{11} kartų mažesnis nei ties Žemės paviršiumi), dėl to sužadinti atomai ir molekulės papildomos energijos gali „atsikratyti“ tik spinduliuodami šviesą, o ne susidurdami tarpusavyje. Beje, kad pašvaistė būtų matoma plika akimi, vienu metu išspinduliuojamų fotonų kiekis turi būti milžiniškas – apie 100 milijonų.

Kiekvienas atomas ar molekulė turi savitą energijos lygmenų struktūrą ir spinduliuoja tik tam tikrų bangos ilgių šviesą, tad pašvaistės spalvos yra aukščiausių atmosferos sluoksnių sudedamųjų dalių „pirštų atspaudai“, pagal kuriuos galima atpažinti, kokie cheminiai elementai ar junginiai švyti. Vertėtų pastebėti, kad aukščiausių atmo-

feros sluoksnių cheminė sudėtis ir pačių cheminių elementų proporcijos skiriasi nuo mums įprastų, ties Žemės paviršiumi sudarančių orą, kuriuo kvėpuojame. Aukštyje, kuriame išsibėbia šiaurės pašvaistės, intensyvi ultravioletinė Saulės spinduliuotė suardo daugelį molekulių (šis reiškinys vadinamas fotodisociacija), tad pagrindinės paties aukščiausio Žemės atmosferos sluoksnio, vadinamo termosfera arba jonosfera, sudėtinės dalys yra atominis deguonis ir jonizuotos (netekusios vieno elektrono) azoto

↑ 6 pav.

Šiaurės pašvaistė, užfiksuota 2013 m. kovo 17-osios naktį. Apatiniame kairiajame paveikslė kampe rodykle pažymėta tuo metu plika akimi matoma Panstars kometa (C/2011 L4 Pan-STARRS), kurios padidintas vaizdas pateiktas paveikslė intarpe. R. Balčiūno nuotr.



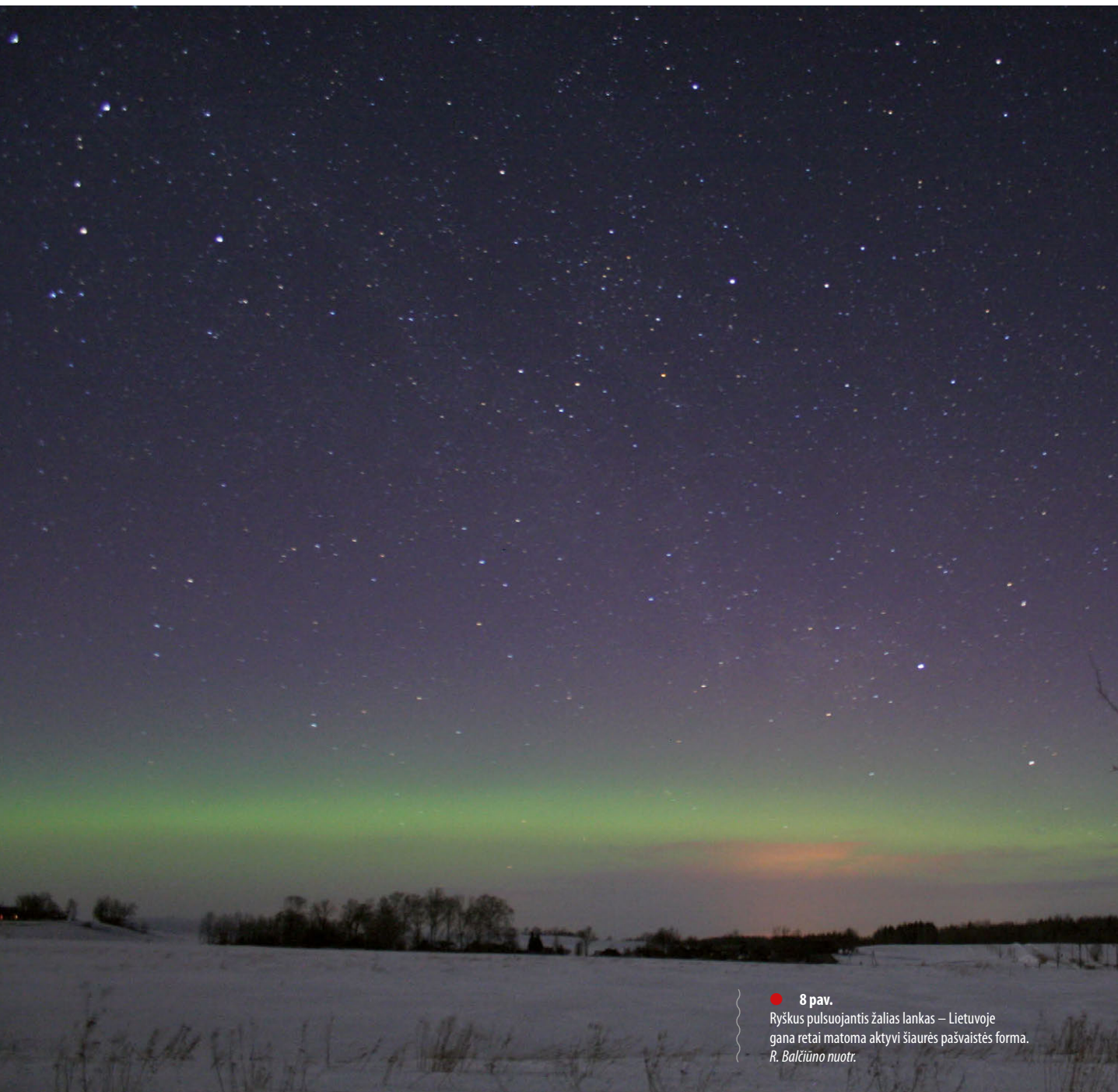
↑ **7 pav.**
 Bepormis žalias ir raudonas šiaurinės dangaus pusės
 švytėjimas – rami šiaurės pašvaisčių forma.
R. Balčiūno nuotr.

molekulės. Beje, maždaug 400 km aukštyje atominio deguonies yra 10 kartų daugiau nei azoto, o molekulinio deguonies, kuriuo kvėpuojame, tokiam aukštyje jau išvis nėra (1.1 posk.).

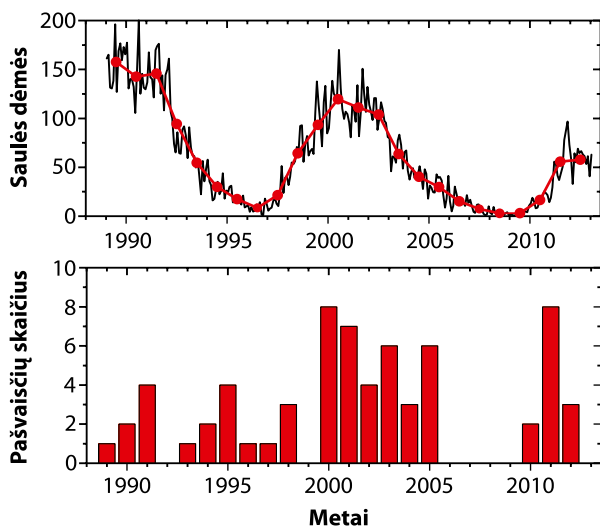
Pašvaisčių švytėjimo spektre išsiskiria trys pagrindinės spalvos, atitinkančios keturias siauras spektrines linijas: žalia (bangos ilgis 558 nm), tamsiai raudona (630 ir 636 nm) ir rečiau atsirandanti violetinė (428 nm, **5 ir 6 pav.**). Žalią ir raudoną šviesą spinduliuoja į ilgai gyvuojančius, vadinamuosius metastabilius, lygmenis sužadinti deguonies atomai. Deguonies atomas, kol išspinduliuoja žalios šviesos kvantą, sužadintos būsenos išbūna apie 0,7 s, o sužadintas atominio deguonies lygmuo, spinduliuojantis raudoną šviesą, gyvuoja net apie 2 minutes. Dėl skirtingos sužadintų atominio deguonies lygmenų gyvavimo trukmės žalias ir raudonas pašvaisčių švytėjimas dangaus skliaute dažnai įgauna skirtingas formas. Violetinę spalvą spinduliuoja jonizuotos ir sužadintos azoto molekulės, kurios yra labai stabilios ir atsparios jonizuojančiai Saulės

spinduliuotei. Žalia spalva švyti maždaug 100 km aukštyje, o raudonas ir violetinis švytėjimas driekiasi net iki 500 km ar net aukščiau, todėl matomas iš toliau. Dėl šios priežasties vidutinėse platumose esančiam stebėtojui žalios spalvos švytėjimas visuomet atrodo arčiau horizonto nei raudonos ar violetinės. Dažnai raudonas ir violetinis švytėjimas persikloja, tuomet pašvaisčių tampa purpurinė. Šiaurės pašvaisčių švytėjime spektriniais prietaisais registruojama dar keletas silpnesnių spektrinių linijų, kurios pakliūva į regimos šviesos diapazoną – geltona natrio atomų, žydra vandenilio molekulių, žalia ir gelsva dukart jonizuoto azoto atomų. Šiaurės pašvaisčių spektre taip pat yra akiai nematomos infraraudonosios (bangos ilgis >650 nm) bei ultravioletinės (bangos ilgis <400 nm) šviesos, kurias spinduliuoja sužadintos nejonizuotos ir jonizuotos azoto bei sužadintos vandenilio molekulės [15].

Šiaurės pašvaisčių klasifikuojamos pagal jas sukeliančių elektringųjų dalelių tipus ir energijas, taip pat remiantis geofiziniais pašvaisčių kilmės ypatumais. Skiriama ne mažiau kaip 14 skirtingų šiaurės pašvaisčių tipų [16]. Regimosios šiaurės pašvaisčių formos smarkiai priklauso nuo į atmosferą įlekiančių elektringųjų dalelių energijos ir tankio, taip pat lokalių Žemės magnetinio lauko iškraipymų bei trikdžių. Jos skirstomos į ramias ir aktyvias. Ramios pašvaisčių formos – tai beformis švytėjimas, matomas kaip blausi vienalytė šviesa, kurios intensyvumas laikui bėgant beveik nekinta (**7 pav.**). Aktyvios formos žymiai išpūdingesnės. Tai – šviesos stulpai, pulsuojantys spinduliai ar lankai (**8 pav.**), virstantys plevenančiomis ir vinguriuojančiomis juostomis (**5 pav.**), kurios vadinamos skraistėmis ir vėliavomis. Rečiau mūsų platumose įsižiebia vainikas – tarsi iš vieno taško danguje išeinantys spinduliai. Neretai ant žemės esančiam stebėtojui pašvaisčių spalvos ir formos persikloja, taip sukurdamos fantastinių pulsuojančių įvairiaspalvį reginį.



8 pav.
Ryškus pulsuojantis žalias lankas – Lietuvoje
gana retai matoma aktyvi šiaurės pašvaisės forma.
R. Balčiūno nuotr.



↑ 9 pav.
Saulės aktyvumo (Tarptautinio Saulės dėmių skaičiaus) ir Lietuvoje stebėtų šiaurės pašvaisčių skaičiaus kitimas 1989–2012 metais. R. Balčiūno, K. Černio ir A. Dubiečio stebėjimų duomenys

11.5 Šiaurės pašvaisčių Lietuvos padangėje

Nors šiaurės pašvaisčių garsėja kaip įstabus Šiaurės kraštų reiškinys, kartais jas galima matyti ir Lietuvos padangėje. Aišku, Lietuvoje matomos šiaurės pašvaisčių savo grožiu ir ryškumu retai kada prilygsta toms, kuriomis grožisi šiaurės kraštų gyventojai. Dažniausiai Lietuvoje galima pamatyti kraujo raudonumo dangų šiaurinėje pusėje, o žalias švytėjimas matomas neaukštai virš šiaurinio horizonto. Kai pašvaisčių intensyvumas yra silpnas, žmogaus akis sunkiai beskiria spalvas. Dėl to žalia pašvaisčių spalva dažniausiai matoma tik kaip balzganas švytėjimas, o violetinė spalva išryškėja tik ilgos ekspozicijos nuotraukose. Esant geroms stebėjimo sąlygoms – skaidriam orui, toli nuo miesto žiburių, nesunku pastebėti net menkiausias

naktinio dangaus spalvų ir šviesumo pokyčius šiaurinėje dangaus pusėje ir aptikti net ir silpną pašvaisčių švytėjimą. Kitaip yra mieste, kur vadinamoji šviesos tarša (1.6 posk.) tokia didelė, kad išsklaidytos miesto šviesos nustelbia net ir gana ryškių šiaurės pašvaisčių švytėjimą. Mūsų krašte matomų šiaurės pašvaisčių švytėjimo trukmė yra labai įvairi – nuo keliolikos minučių iki keleto valandų.

Nors Saulės aktyvumo maksimumo metu šiaurės pašvaisčių Lietuvos geomagnetinėje platumoje galima matyti vidutiniškai kartą per du mėnesius, šių skaičių gero pakoreguoja Lietuvos astroklimato ypatumai (giedrų naktų skaičius ir jų kokybė metų bėgyje) [17], tad pastebėti šiaurės pašvaisčių pavyksta ne taip jau dažnai. Ryškios ir išpūdingos šiaurės pašvaisčių mūsų šalyje yra išties labai retas reiškinys. Jos dažniausiai susijusios su labai stipriomis magnetinėmis audromis. Nepaisant „nepatogios“ Lietuvos geomagnetinės platumos, nuo 1989 m. šiaurės pašvaisčių Lietuvos padangėje užregistruotos daugiau nei 50 kartų. Šie stebėjimų duomenys, aišku, nėra labai išsamūs, tačiau jie gerai iliustruoja šiaurės pašvaisčių ir Saulės aktyvumo ryšį bei pagrindines pašvaisčių matomumo mūsų platumoje tendencijas (9 pav.).

Pastarieji Saulės aktyvumo maksimumai 1991 ir 2001 m. padovanojo keletą išties įsimintinų reginių ir Lietuvos padangėje. Išpūdinga pašvaisčių stebėta 1991 m. lapkričio 1-osios vakare, kai kraujo raudonumo liežuviai buvo nutįsę iki pat zenito, o visa šiaurinė dangaus pusė alsavo ryškiomis spalvomis. Panašus reginys pasikartojė po savaitės, lapkričio 9-osios naktį. Šių dviejų pašvaisčių priežastis taip ir liko iki galo neaiški, mat nebuvo užregistruotas nei galingas Saulės žybsnis, nei vainiko medžiagos plūpsnis, nors pati Saulė tuomet buvo gana aktyvi.

Kito Saulės aktyvumo maksimumo laikotarpiu, 2000–2001 m., šiaurės pašvaisčių Lietuvos padangėje sušvito net 15 kartų. 2000 m. liepos 15-osios naktį sužibo



reto grožio šiaurės pašvaistė, kurios pulsuojantys spinduliai driekėsi per visą dangų. Tąkart stebėta Lietuvos padangėje itin retai matoma pašvaistės forma – vainikas, kurio centras buvo beveik tiesiai virš galvos, Lyros žvaigždyne. Šio ypatingo reginio neužgožė nei šviesi ir trumpa vasaros naktis, nei Mėnulio pilnatis šviesa. Šią pašvaistę sukėlė nepaprastai stiprus ir tiesiai į Žemę nukreiptas Saulės vainiko medžiagos pliūpsnis, įvykęs liepos 14 d. Pliūpsnio išmestų Saulės vėjo dalelių greitis buvo beveik rekordinis ir siekė net 1800 km/s, o pliūpsnio data sutapo su Prancūzijos nacionaline švente – Bastilijos diena. „Bastilijos dienos“ pašvaistė buvo gerai matoma visoje Europoje.

2001 m. spalio mėn. šiaurės pašvaistės, nors ir ne tokios ryškios, Lietuvoje buvo matomos net tris naktis iš

eilės (spalio 20–22 d.). Jos išsiskyrė savita labai ryškių ir dinamiškų raudonų spindulių struktūra, o šiaurės pašvaistės matomumo zona siekė Pietų Vokietiją, Prancūziją ir net šiaurinę Viduržemio jūros pakrantę bei Ispaniją. Bene išpūdingiausia pastarojo meto šiaurės pašvaistė Lietuvos padangėje išžiobė 2003 m. spalio 30-osios vakare (10 pav.) ir buvo matoma visą naktį. Šios pašvaistės priežastis buvo galingas Saulės žybsnis ir po jo sekę dar keliolika silpnesnių žybsnių, kurie sukėlė didžiulę magnetinę audrą. Kadangi šios magnetinės audros data sutapo su Helovino švente, ji

↑ 10 pav.

„Helovino“ audros sukelta šiaurės pašvaistė Lietuvos padangėje. R. Balčiūno nuotrauka, daryta 2003 m. spalio 30-osios vakare Ignalinos r., netoli Vidiškių miestelio



↑ **11 pav.**

Ryški naujojo, 24-ojo, Saulės aktyvumo ciklo šiaurės pašvaistė, sušvitusi Lietuvos padangėje 2011 m. rugsėjo 26-osios naktį. Viršutiniame kairiajame kampe matomi Didieji Grįžulo Ratai.
R. Balčiūno nuotr.

buvo pavadinta „Helovino“ audra. Tuo pat metu įspūdingos šiaurės pašvaistės stebėtos įvairiuose Žemės rutulio kampeliuose ir net Australijoje [18].

Pastarasis Saulės aktyvumo minimumas buvo labai gilus ir truko beveik ketverius metus, kai ilgą laiką tarpą Saulėje nebuvo pastebėta nė vienos dėmės (!). Dėl to nuo 2005 m. rudens iki pat 2010 m. vasaros šiaurės pašvaistės Lietuvos padangėje nebuvo pastebėtos nė karto (**9 pav.**). Tačiau jau 2010 m. pradžios Saulės aktyvumas ėmė sparčiai

didėti, ir Lietuvos padangėje netruko sužibti pirmosios naujojo Saulės aktyvumo ciklo šiaurės pašvaistės. Pirmoji naujojo ciklo (jau 24-ojo iš eilės, skaičiuojant nuo 1755 m., kai pradėti nuolatiniai Saulės aktyvumo stebėjimai) sušvito 2010 m. rugpjūčio 4-osios naktį. 2011 m. apie pastebimai suaktyvėjusią Saulę pranešė net 8 kartus Lietuvos padangėje sušvitusios ir kaskart vis ryškesnės šiaurės pašvaistės (**11, 5 pav.**).

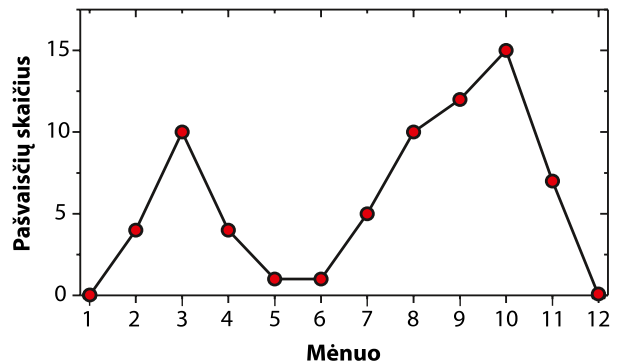
Kartu kyla natūralus klausimas, kuris metų laikas yra palankiausias metas šiaurės pašvaisčių stebėjimams Lietuvoje? Kad ir kokia būtų nenuspėjama Saulė, pasirodo, toks metas iš tiesų yra. Jau seniai pastebėta, kad vidutinėse platumose šiaurės pašvaistės dažniausiai švyti pavasarį (kovo mėn.) ir rudenį (spalio mėn.), o tai susiję su Žemės

magnetinio dipolio orientacija Saulės ekvatoriaus ir Saulės vėjo krypties atžvilgiu [19]. Kadangi Žemės sukimosi ašis pasvirusi į ekliptikos plokštumą 23° , Saulės sukimosi ašis – 7° , o Žemės magnetinis dipolis pasviręs 11° sukimosi ašies atžvilgiu, per pavasario ir rudens lygiadienius Žemės ašis būna orientuota taip, kad Žemės magnetinio lauko išskrypimai dėl Saulės vėjo būna sąlyginai didžiausi. **12 paveiksle** pavaizduotas Lietuvoje pastebėtų šiaurės pašvaisčių skaičiaus pasiskirstymas metų bėgyje, iš kurio gerai matyti, kad iš tiesų šiaurės pašvaistės Lietuvos padangėje dažniausiai sušvinta kovo ir rugsėjo–spalio mėnesiais.

Aktyvumo maksimumą Saulė turėjo pasiekti 2013 m. Bent jau kol kas atrodo, kas Saulė truputį vėluoja, tačiau prognozuojama, kad naujojo ciklo metu Saulės aktyvumas bus didelis, tad tikrai verta dažniau pasidairyti po naktinį dangų ir, jei pasiseks, pasigrožėti nepakartojamu reginiu – šiaurės pašvaiste.

11.6 Atmosferos švytėjimas

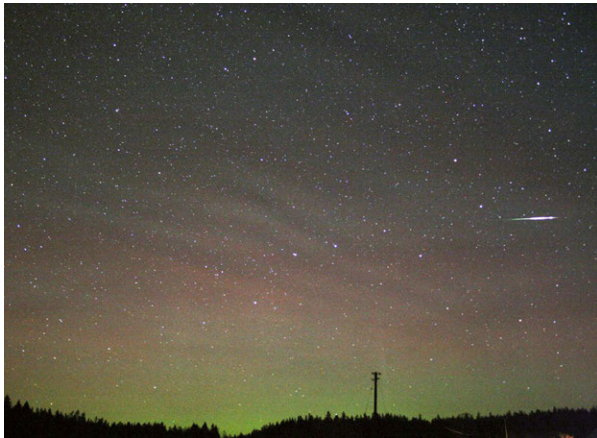
Net ir pačią tamsiausią giedrą naktį dangus nebūna visiškai juodas. Neskaitant žvaigždžių ar Mėnulio šviesos, išsklaidytos dirbtinės šviesos ar iš toli matomų miestų pašvaisčių, pats dangus nuolat švyti silpna, dažniausiai plika akimi beveik nematoma šviesa. Tai – atmosferos švytėjimas (angl. *airglow*). Atmosferos švytėjimą, skirtingai nei šiaurės pašvaistes, galima matyti iš bet kurios Žemės rutulio vietos. Paprastai atmosferos švytėjimas užfiksuojamas ilgos ekspozicijos nuotraukose ar naudojant sudėtingesnę mokslinę aparatūrą, tačiau kai kuriais gana retais atvejais intensyvių atmosferos švytėjimą galima išvysti ir plika akimi [20], jai visiškai pripratus prie tamsos. Intensyviausias atmosferos švytėjimas matomas $10\text{--}15^\circ$ virš šiaurinio horizonto, nors kai kada gali driektis per visą dangų. Daž-



12 pav.
Šiaurės pašvaisčių skaičiaus pasiskirstymas metų bėgyje pagal stebėjimų Lietuvoje 1989–2012 metais duomenis

nai atmosferos švytėjimas turi daugiau ar mažiau aiškiai išreikštą bangų struktūrą (**13, 14 pav.**), kurios kilmė yra tokia pati, kaip ir sidabriškųjų debesų bangų [21]. Žvelgiant atidžiau, galima pastebėti, kaip ši bangų struktūra laikui bėgant lėtai juda ir keičiasi.

Atmosferos švytėjimas turi savitą spalvas, kurių, deja, akis tamsoje negali skirti. Pagrindinės atmosferos švytėjimo spalvos yra raudona ir žalia – lygiai tokios pat, kokios matomos ir šiaurės pašvaisčių spektre. Tai – $90\text{--}100$ km aukštyje esančių sužadintų deguonies atomų spinduliavimas. Tačiau, skirtingai nei šiaurės pašvaisčių, kur deguonies atomus sužadina susidūrimai su didelės energijos Saulės vėjo dalelėmis, atmosferos švytėjimo atveju deguonies atomai sužadinami cheminiu būdu, vykstant įvairių junginių fotodisociacijai bei cheminėms reakcijoms, kurias sukelia intensyvi ultravioletinė Saulės spinduliuotė. Toks reiškinys vadinamas chemoluminescencija. Be jau minėtų intensyviausių atominio deguonies spinduliavimo linijų, atmosferos švytėjime savo pėdsaką palieka ir kiti cheminiai junginiai bei elementai [22]. Atmosferos švytėjimo spektre dažnai gerai matoma siaura geltona 589 nm bangos ilgio



↑ **13 pav.**
 Atmosferos švytėjimas ir jo bangų struktūra
 2005 m. spalio 30-osios naktį. Paveikslą dešinėje
 matyti tuo metu praskriejęs ryškus bolidas.
S. Jurkevičiaus nuotr.

spektrinė linija. Tai – sužadintų lengvojo metalo natrio atomų spinduliavimas. Natrio atomai patenka į žemės atmosferą sudegant iš kosmoso platybių atskriejusiems mažiems kosminiams kūnams – meteoroidams, kurių sudėtyje vienas labiausiai paplitusių cheminių komponentų yra natrio hidrokarbonatas (NaHCO_3). Šiam laipsniškai yrant, atsiranda natrio garai, kurie lengvesni už orą, todėl maždaug 92 km aukštyje aptinkama nemaža natrio koncentracija – vadinamasis natrio garų sluoksnis. Natrio garų sluoksnio savybės šiuo metu yra plačiai tyrinėjamos, kadangi natrio atomų švytėjimą jau imta naudoti tiksliai didelių teleskopų nustatymui ir jų vaizdų korekcijai, lazerio spinduliu natrio garuose įžiebiant dirbtinę žvaigždę. Be siaurų spinduliavimo linijų, atmosferos švytėjimo spektre registruojamos ir plačios spinduliavimo juostos. Plati, tačiau labai silpna violetinė–mėlyna juosta (380–490 nm diapazone) – tai sužadinto molekulinio deguonies švytėjimas. Kur kas intensyvesnė, tačiau jau akiai beveik nematoma

(645–690 nm) raudona hidroksilo radikalo (OH) juosta, susidedanti iš daugybės smulkių, persiklojančių linijų, spinduliuojamų šio radikalo vibracinių lygmenų.

Dėl cheminės sužadavimo prigimties atmosferos švytėjimas yra intensyviausias dieną, t. y. į Saulę atgręžtoje Žemės atmosferos pusėje. Tačiau tuomet jį galima užregistruoti tik naudojant mokslinius prietaisus. Naktinis atmosferos švytėjimas yra bemaž 1 000 kartų silpnesnis. Kadangi atmosferos švytėjimas yra Saulės ultravioletinės spinduliuotės padarinys, jo, kaip ir pačios ultravioletinės spinduliuotės intensyvumas, smarkiai kinta Saulės aktyvumo ciklo metu. Intensyviausias atmosferos švytėjimas matomas kaip tik Saulės aktyvumo maksimumo metu, tuomet gali pasisekti šį subtilų reiškinį išvysti ir plika akimi.

11.7 Kosminiai orai

Nuolat kintantys Žemės magnetinį lauką trikdančių elektringųjų dalelių srautai formuoja vadinamuosius kosminius orus [23]. Kosminių orų šaltinis yra Saulė, kuri laikas nuo laiko išspjauna milžiniškus elektringųjų dalelių debesis, sukeliančius magnetines audras. Stiprios magnetinės audros gali gerokai sutrikdyti ar net visai nutraukti ryšių, elektros perdavimo linijų, kosminių palydovų ir kitų elektroninių sistemų darbą ir taip pridaryti daug žalos, juolab kad šiuo metu gyvename globaliame pasaulyje, kuriame viskas tiesiogiai ar netiesiogiai tarpusavyje susiję. Pastaruoju metu daugėja duomenų, kad magnetinės audros daro nemenką įtaką žmonių savijautai ir sveikatai. Ypač jautrūs staigiems ir dideliems magnetinio lauko svyravimams yra širdies ir kraujagyslių ligomis sergantys žmonės.

Viena galingiausių pastarojo meto magnetinių audrų įvyko 1989 m. kovo mėn. Keletą dienų siautėjusi magnetinė audra Kanados Kvebeko provincijoje, kuri yra



● **14 pav.**
Žalsvas atmosferos švytėjimas 2012 m. rugpjūčio
24-osios naktį. *T. Janušonio nuotr.*

arčiausiai magnetinio poliaus tankiai gyvenama vietovė, pažeidė visas elektros tiekimo sistemas, kurių visiškas atstatymas užtruko mėnesius. 2003 m. stiprią magnetinę audrą sukėlė vienas galingiausių kada nors stebėtų Saulės žybsnių. Žybsnio sukelta magnetinė audra prasidėjo prieš pat Helovino šventę ir siautėjo ilgiau nei 10 dienų, o jos atgarsiai buvo gerai matomi ir Lietuvos padangėje (8 pav.). Tik laimingo atsitiktinumo dėka „Helovino“ audros elektroninėms ir ryšio sistemoms padaryti nuostoliai buvo nedideli, elektros tiekimas buvo nutrūkęs „tik“ 20 000 namų Švedijos Malmės mieste. Beje, „Helovino“ audra sukėlė stiprias pašvaistes Jupiterio atmosferoje, o padidėjusį elektringųjų dalelių srautą praėjus net metams po audros užregistravo legendinis kosminis aparatas „Voyager 1“, tuo metu buvęs 90 astronominių vienetų (1 a. v. lygus atstumui nuo Žemės iki Saulės, t. y. maždaug 150 000 000 km) atstumu nuo Saulės [24]. Beje, „Voyager 1“ iki šiol siunčia į Žemę duomenis apie kol kas netyrinėtą Saulės sistemos pakraščių aplinką. Šiuo metu „Voyager 1“ yra nutolęs maždaug 122 a. v. atstumu nuo Saulės. Tai milžiniškas atstumas: kosminio aparato radijo signalas, sklisdamas šviesos greičiu, Žemę pasiekia tik po 17 valandų. 2004 m. „Voyager 1“ detektoriai ėmė registruoti vis didėjantį galaktinės kilmės (labai didelės energijos) elektringųjų dalelių srautą. Šios elektringosios dalelės vadinamos kosminiais spinduliais ir gimsta supernovų sprogamų metu, kai savo gyvavimą baigia masyvios žvaigždės. Nuo šių labai pavojingų dalelių mus saugo Saulės magnetinis laukas, nors labai nedidelis dalelių kiekis geba pro jį prasiskverbti ir pasiekti net mūsų planetą. Tokiai dalelei įskriejus į Žemės atmosferą ir sąveikaujant su atmosferos dujomis, sukeliama vadinamosios atmosferos liūtys (angl. *air showers*) – kryptingi antrinių, jau mažesnės energijos dalelių srautai, kurie kartais pasiekia net Žemės paviršių. Manoma, kad šios antrinės dalelės gali būti ir žaibų atsiradimo priežastis (8.3 posk.). „Voyager 1“ registruojamas

labai didelės energijos kosminių dalelių skaičiaus augimas byloja apie tai, kad kosminis aparatas artėja prie Saulės magnetosferos ribos ir kartu prie Saulės sistemos ribos. Netrukus jis visiems laikams paliks Saulės sistemą, įskries į beribę tarpžvaigždinę erdvę ir taps kosminiu klajūnu.

Šiaurės pašvaistės yra tiesioginis kosminių orų atspindys ne tik Žemės atmosferoje. Šiaurės pašvaisčių švytėjimas užregistruotas ir kitose Saulės sistemos planetose ir net kai kuriuose jų palydovuose. Kosminiai aparatai užfiksavo itin galingas pašvaistes didžiosiose Saulės sistemos planetose – Jupiteryje, Saturne, Urane ir Neptūne [25]. Kadangi šių planetų atmosferų cheminė sudėtis smarkiai skiriasi nuo Žemės atmosferos sudėties, ten pašvaisčių švytėjimą kuria daugiausia vandenilio dujos, kurios švyti akiai nematomame ultravioletiniame ir infraraudonajame spektro diapazone. Pašvaisčių švytėjimas užregistruotas ir kai kuriuose didžiųjų planetų palydovuose – Titane, Tritone ir Ijo. Ijo pašvaistės itin įdomios, nes švyti ties pat paviršiumi. Šis Jupiterio palydovas neturi nuolatinės atmosferos, tačiau laikina atmosfera laikas nuo laiko atsiranda dėl daugybės ten veikiančių ugnikalnių. Ijo ugnikalnių aktyvumą palaiko milžiniška Jupiterio gravitacijos jėga, kuri periodiškai deformuoja šio nedidelio palydovo gelmes. Mūsų kaimynėse Žemės tipo planetose Marse ir Veneroje pašvaisčių nebūna. Manoma, kad Marsas kažkada turėjo magnetinį lauką, tačiau jis laikui bėgant nusilpo ir išnyko. Veneros magnetinis laukas yra labai silpnas, 25 000 kartų silpnesnis už Žemės, greičiausiai dėl labai lėto Veneros sukimosi aplink ašį. Nematomos pašvaistės ir Merkurijuje. Nors ši maža Saulės kepinama planetėlė turi magnetinį lauką, tačiau ji neturi atmosferos.

Šiuolaikiniame technikos amžiuje kosminių orų stebėjimai ir išankstinės prognozės įgauna vis didesnę svarbą. Stebint Saulės aktyvumą ir jos paviršiuje vykstančius procesus, apie artėjančią magnetinę audrą galima įspėti prieš

keletą dienų [26]. Dirbtiniai Žemės palydovai teikia nenutrūkstamą informacijos srautą tiek apie pačios Saulės paviršiuje vykstančius reiškinius, tiek apie Saulės spinduliuotės ir elektringųjų dalelių srautus Žemės aplinkoje. Iš palydovų fiksuojama pašvaisčių ovalo padėtis ir jo skersmuo, o pagal tai galima prognozuoti, kur ir kada bus matoma pašvaistė. Šią informaciją galima rasti internete <http://www.swpc.noaa.gov/> ir <http://spaceweather.com/>. Tuo tarpu ilgalaikės kosminių orų prognozės yra kur kas sudėtingesnės ir mažiau patikimos, kadangi gyvename neramios ir kartais nenuspėjamos žvaigždės – Saulės – pašonėje.

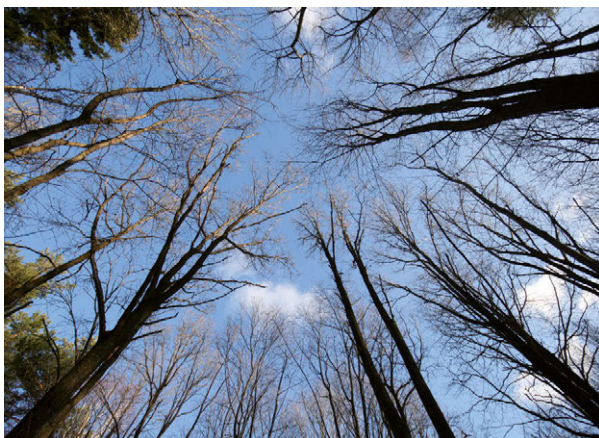
Bibliografija

1. F. R. Stephenson, D. M. Willis, T. J. Hallinan, *The earliest datable observation of the aurora borealis*, *Astronomy & Geophysics* **45**, 2004, 6.15–6.17.
2. D. P. Stern, *A millenium of geomagnetism*, *Reviews of Geophysics* **40**, 2002, 1007–1036.
3. E. Dormy, *The origin of the Earth's magnetic field: fundamental or environmental research?*, *Europhysics News* **37**(2), 2006, 22–25.
4. D. J. Dunlop, *Magnetic recording in rocks*, *Physics Today* **65**(6), 2012, 31–37.

5. J. Lean, *The Sun's variable radiation and its relevance for Earth*, *Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics* **33**, 1997, 33–67.
6. D. H. Hathaway, R. M. Wilson, E. J. Reichmann, *The shape of the sunspot cycle*, *Solar Physics* **151**, 1994, 177–190.
7. J. Lean, *Living with a variable Sun*, *Physics Today* **58**(6), 2005, 32–38.
8. S. Chapman, *Auroral physics*, *Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics* **8**, 1970, 61–86.
9. D. A. Bryant, *Electron acceleration in the aurora*, *Contemporary Physics* **35**, 1994, 165–179.
10. R. J. Strangeway, *How do auroras form?*, *Physics Today* **61**(7), 2008, 68–69.
11. W. Schröder, N. N. Shefov, H.-J. Treder, *Estimation of past solar activity and upper atmospheric conditions from historical and modern auroral observations*, *Annales Geophysicae* **22**, 2004, 2273–2276.
12. L. Schlamminger, *Aurora borealis during the Maunder minimum*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **247**, 1990, 67–69.
13. W. Schroeder, *Missing auroras and sunspots at the end of the 18th century*, *Astronomy & Geophysics* **44**, 2004, 3.6.
14. M. A. Shea, D. F. Smart, *The use of geophysical data in studies of the historical Solar-terrestrial environment*, *Solar Physics* **224**, 2004, 483–493.
15. F. Sigernes, Y. Ivanov, S. Chernouss, T. Trondsen, A. Roldugin, Y. Fedorenko, B. Kozelov, A. Kirillov, I. Kornilov, V. Safargaleev, S. Holmen, M. Dyrland, D. Lorentzen, L. Baddeley, *Hyperspectral all-sky imaging of auroras*, *Optics Express* **20**, 2012, 27650–27660.
16. D. A. R. Simmons, *A classification of auroral types*, *Journal of the British Astronomical Association* **108**, 1998, 247–257.
17. K. Černis, *Orų kaita astronomo akimis per 50 metų laikotarpį*, *Lietuvos dangus 2011*, 2010, 107–116.
18. N. Bone, *Aurora. Observing and recording Nature's spectacular light show*, Springer, NY, 2007.
19. L. Svalgaard, E. W. Clive, A. G. Ling, *The semiannual variation of great geomagnetic storms*, *Geophysical Research Letters* **29**, 2002, 1765–1768.
20. A. W. Peterson, *Airglow events visible to the naked eye*, *Applied Optics* **18**, 1979, 3390–3393.
21. M. J. Taylor, M. A. Hapgood, *On the origin of ripple-type wave structure in the OH nightglow emission*, *Planetary and Space Science* **38**, 1990, 1421–1430.
22. J. Kaplan, C. A. Barth, *Chemical aeronomy*, *Proceedings of the National Academy of Sciences* **44**, 1958, 105–112.
23. K. Strong, J. Saba, T. Kucera, *Understanding space weather: The Sun as a variable star*, *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 2012, 1327–1335.
24. D. N. Baker, S. G. Kanekal, X. Li, S. P. Monk, J. Goldstein, J. L. Burch, *An extreme distortion of the Van Allen belt arising from the Halloween solar storm in 2003*, *Nature* **432**, 2004, 878–881.
25. A. Bhardway, G. R. Gladstone, *Auroral emissions of the giant planets*, *Reviews of Geophysics* **38**, 2000, 295–353.
26. D. N. Baker, *How to cope with space weather*, *Science* **297**, 2002, 1486–1487.

12. Meteorai ir jų srautai

● A. Dubiečio nuotr.



↑ 1 pav.
Perspektyvos efektas miške. A. Dubiečio nuotr.

12.1. Krintančios žvaigždės

Žodis *meteoros* graikų kalboje reiškia „orė“, kitaip tariant, atmosferos reiškinių. Ilgą laiką meteorais buvo vadinami visi atmosferos reiškiniai: žaibai, pašvaistės, halai, vaivorykštės ir netgi tiesiog sniegas ar lietus. Pastarieji iki šiol vadinami hidrometeorais. Tačiau ilgainiui nusistovėjusi terminologija susiaurino meteorų sąvoką iki „krintančių žvaigždžių“. Nepaisant to, kad žvaigždės iš tiesų nekrinta, antraip visos jau seniai būtų nukritusios, ir toli gražu ne visi norai, sugalvoti pamačius meteorą, išsipildo, meteoras yra labai gražus ir įdomus reiškinys.

Remiantis senovės graikų filosofo Aristotelio idėjomis, ilgus amžius meteorai buvo laikomi paslaptiniais, tačiau žemiškos kilmės atmosferos reiškiniais, priklausančiais ugnies sferai ir kažkuo panašiais į žaibą. Vienas pirmųjų, pabandžiusių kitaip pažvelgti į meteorus ir jų kilmę, buvo žymus anglų astronomas Edmondas Halis (*Edmond Halley*). 1714 m. jis stebėjo ryškų bolidą ir apskaičiavo, kad šis, lėkdamas 8 km/s greičiu, užsiziebė 119 km aukštyje.

Nors Halio vertinimai tebuvo labai apytiksliai, jie neginčijamai bylojo apie kosminę šio reiškinio kilmę. E. Halis tuomet buvo vienas pagrindinių Britanijos mokslo stulpų, tačiau netgi milžiniškas jo autoritetas Karališkojoje mokslo draugijoje neišjudino giliai įsišaknijusio įsitikinimo, kad meteorai – tai žemiškos kilmės reiškiniai.

Prabėgus beveik šimtui metų Prancūzijoje, L'Eglio miestelio apylinkėse, įvyko labai retas reiškinys, kai iš dangaus tikraja to žodžio prasme pabiro akmenys – praūžė intensyvus meteoritų lietus. Šviesiausiems ano meto protams šis netikėtas įvykis užminė išties nelengvą galvosūkį ir paskatino permąstyti tuometį meteorų kilmės supratimą. Bemaž tuo pat metu, 1798 m., du Leideno universiteto studentai Johannesas Bencenbergas (*Johannes Benzenberg*) ir Heinrichas Brandsas (*Heinrich Brandes*) atliko meteorų stebėjimus iš dviejų punktų, ir trianguliacijos metodu tiksliai nustatė jų aukštį bei greitį, tuo galutinai įrodydami kosminę meteorų kilmę.

1799 m. žymus vokiečių keliautojas ir gamtininkas Aleksandras fon Humboldtas (*Alexander von Humboldt*), vienos savo kelionių po Pietų Ameriką metu lankydamasis Venesueloje, stebėjo išpūdingą meteorų lietų. Apklausęs vietos gyventojus, jis sužinojo, kad panašus reiškinys ten buvo stebėtas ir 1733 bei 1766 m. Savaimė piršosi išvada, kad meteorų lietus turėtų pasikartoti po 33 metų. Ir iš tiesų 1833 m. lapkričio 13 d. galingas meteorų lietus praūžė Šiaurės Amerikos padangėje. Daugelis šio neįprasto įvykio liudininkų atkreipė dėmesį, kad visi meteorai tarsi išlekia iš vieno taško, esančio Liūto žvaigždynė. Šis taškas buvo pavadintas radiantu. Be to, buvo pastebėta, kad radianto padėtis per visą naktį žvaigždžių atžvilgiu nekinta – sukantis Žemei, dangaus skliaute jis juda kartu su žvaigždėmis. Taip buvo nustatyta, kad to paties srauto meteorai atmosferoje juda lygiagrečiomis trajektorijomis, o regimasis taškas danguje – radiantas – atsiranda dėl perspektyvos efekto, panašiai kaip



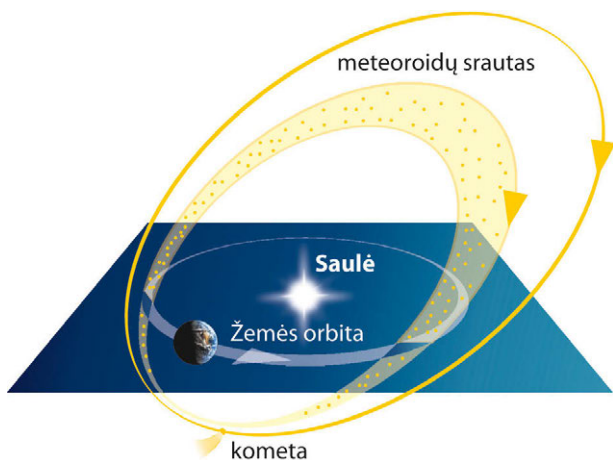
tolumoje į vieną tašką sueina lygiagretūs bėgiai ar medžių kamienai miške žvelgiant užvertus galvą (1 ir 2 pav., taip pat 4.6 posk.). Nuo to laiko meteorų srautai imti vadinti pagal žvaigždynų, kuriuose yra jų radiantus, vardus. Leonidų meteorų srauto radiantus yra Liūto žvaigždyne, perseidų – Persėjo ir t. t. Jei pasitaiko, kad tame pačiame žvaigždyne yra keli skirtingų srautų radiantai, srautų pavadinimuose pridedamas ir artimiausios radiantui ryškios žvaigždės pavadinimas, pavyzdžiui, eta ir delta akvaridai yra du skirtingi meteorų srautai, kurių radiantai yra tame pačiame Vandens žvaigždyne. Kartais, pavadinant mažuosius meteorų srautus, prie jų pavadinimo pridedamas mėnesio vardas, pavyzdžiui, rugsėjo perseidai, kad nesusipainioti jo su garsiuoju perseidų srautu, matomu rugpjūčio mėnesį.

↑ 2 pav.

Perspektyvos efektas žvaigždėtame danguje: perseidų srauto meteorų, nufotografuotų 2010 m. rugpjūčio 12 ir 13-osios naktimis, trajektorijų fotomontažas. A. Dubiečio nuotr.

12.2 Meteorų srautai ir kometos

Daugiau ar mažiau sistemiški meteorų stebėjimai buvo pradėti XIX a. viduryje, kai belgų astronomas ir Briuselio observatorijos įkūrėjas Adolfas Ketele (*Adolphe Quetelet*) apibendrino turimus stebėjimų duomenis ir sudarė pirmąjį meteorų srautų katalogą. Nors to meto rezultatų patikimumas buvo menkas ir neegzistavo viena stebėjimų metodika, per gana trumpą laiką iki XX a. pradžios jau buvo atrasti visi šandien žinomi didieji ir dauguma



↑ 3 pav.
Taip formuojasi meteoroidų srautas. *J. Griciaus pieš.*

↗ 4 pav.
Šviesiausia pastarųjų dešimtmečių viešnia mūsų padangėje – Hale-Boppo kometa (D/Halle-Bopp), puošusi mūsų padangę 1997 metais.
R. Balčiūno nuotr.

mažųjų meteorų srautų. Tikras perversmas, žymintis meteorų astronomijos, kaip atskiros astronomijos šakos, atsiradimą, įvyko 1867 m., kai italų astronomas Džiovanis Šiaparelis (*Giovanni Schiaparelli*), vėliau atradęs Marso kanalus, apskaičiavo, kad leonidų meteorų srauto orbita beveik sutampa su tuomet vos prieš metus atrastos periodinės Tempelio-Tutlio (55P/Tempel-Tuttle) kometos orbita. Netrukus jis nustatė ir neabejotiną orbitų panašumą tarp perseidų meteorų srauto bei Svifto-Tutlio (109P/Swift-Tuttle) kometos, kuri buvo atrasta 1862 m. Taip buvo atrastas glaudus ryšys tarp kometų ir meteorų srautų.

Ypatingą vaidmenį meteorų astronomijoje atliko anglų astronomas mėgėjas Viljamas Deningas (*William Frederick Denning*), visą savo gyvenimą skyręs astronominiams, ypač meteorų, stebėjimams. Jis pelnytai laikomas šiuolaikinės meteorų astronomijos tėvu. Neturėda-



mas universitetinio išsilavinimo, jis paskelbė apie 400 mokslinių straipsnių geriausiose to meto moksliniuose žurnaluose. Visą gyvenimą praleidęs gimtajame mieste Bristolyje, iki pat gilios senatvės V. Deningas savo namų kieme vykdė astronominius stebėjimus. Jis stebėjo ne tik meteorus, bet ir kometas, planetas ir t. t. Jis sudarė išsamų meteorų srautų katalogą, kuriame pateikė daugiau nei 500 veikiančių radiantų sąrašą. Už šiuos rezultatus ir begalinį atsidavimą 1906 m. V. Deningas buvo apdovanotas Karališkosios mokslo draugijos aukso medaliu ir ilgą laiką gavo Anglijos karalienės vardinę stipendiją. Įdomu tai, kad V. Deningą galima atpažinti kaip „meteoritų eksperto“ personažą garsiajame H. Velso „Pasaulių kare“.

Paskutinį tašką, įtvirtinant kometų ir meteorų srautų ryšį, padėjo žymus meteorų tyrinėtojas Fredas Viplas (*Fred Whipple*). 1950 m. jis pasiūlė garsųjį kometos – „purvinos sniego gniūžtės“ – modelį, kuriuo detalai paaiškino, kaip iš tikrųjų gimsta meteorų srautai [1]. Pagal šį modelį kometos branduolys – tai ledo matrica su išalusiomis dulkelėmis ir uolienu fragmentais. Kometai artėjant prie perihelio – artimiausio Saulei orbitos taško, – jos paviršius dėl intensyvaus Saulės spinduliavimo ima kaisti, ledas garuoja,



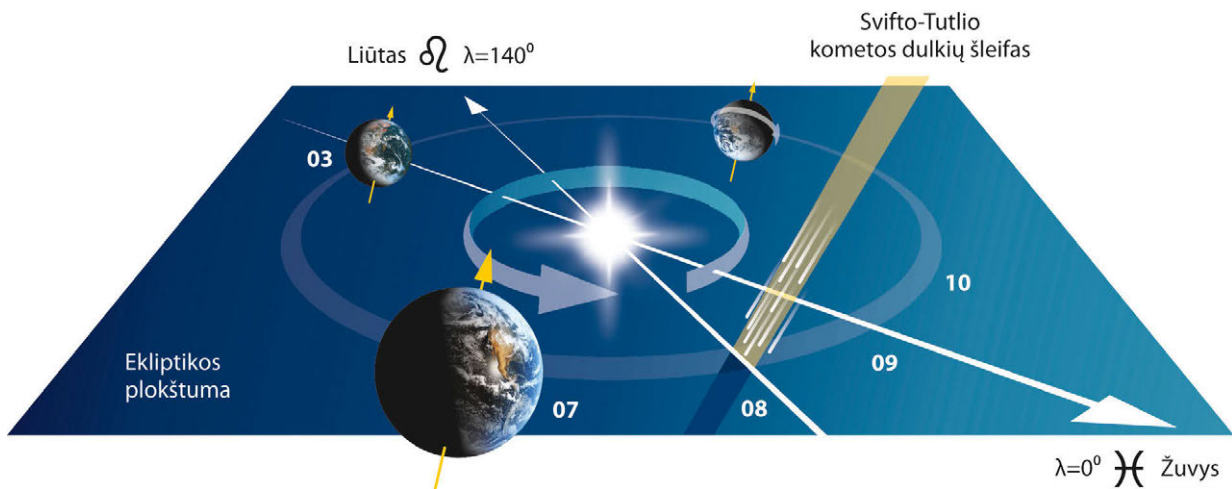
o smulkios dulkelės ir uolienų fragmentai atsiskiria nuo kometos paviršiaus. Šios smulkios skeveldros, priklauso-
mai nuo jų masės ir įkaitusių vandens garų bei kitų dujų
slėgio, į kosminę erdvę išmetamos 10–100 m/s greičiu.
Taip gimsta mažičiai kosminiai kūnai – meteoroidai,
kurie nuo šiol pradeda savistovią evoliuciją. Ilgainiui,
veikiant Saulės ir planetų gravitacinėms jėgoms bei švie-
sos slėgiui, meteoroidai vis labiau tolsta nuo kometos,
palengva nukrypdami ir nuo pradinės kometos orbitos
(3 pav.). Kiekvieną kartą kometai praskriejant perihelij, pas-
kui ją nutįšęs meteoroidų šleifas periodiškai papildomas
vis naujomis dalelėmis ir galiausiai užpildo visą kometos
sukimosi aplink Saulę orbitos elipsę [2]. Ką tik atsiradusi
tankiausia šio šleifo dalis matoma kaip švytinti kometos

↑ 5 pav.

Panstarrs kometa (C/2011 L4 Pan-STARRS), kuri buvo
gerai matoma plika akimi ankstyvą 2013 m. pavasarį.
R. Balčiūno nuotr.

uodega (4, 5 pav.). Kiekviena kometa turi savo meteoroi-
dų srautą. Netgi kometai visiškai suirus, jos meteoroidų
srautas egzistuoja dar tūkstančius metų. Kai meteoroidų
srautas kerta Žemės orbitą, mes jį matome kaip meteorų
srautą. Beje, dalis meteoroidų srautų kildinama ne iš ko-
metų, o iš mažųjų planetų – asteroidų.

Meteoroidų srauto evoliucijos tempas labai pri-
klauso nuo kometos orbitų parametrų. Jei kometos orbita
yra stipriai pasvirusi į ekliptikos plokštumą, kurioje juda
Saulė, Žemė ir visos kitos planetos, didžiųjų Saulės siste-
mos planetų sąlygojamą gravitacinį poveikį patiria tik ta



↑ 6 pav.

Perseidų meteoroidų srauto susikirtimas su Žemės orbita. λ yra Saulės ilguma, skaičiuojama nuo pavasario lygiadienio. 1 Saulės ilgumos laipsnis maždaug atitinka 1 dieną. J. Griciaus pieš.

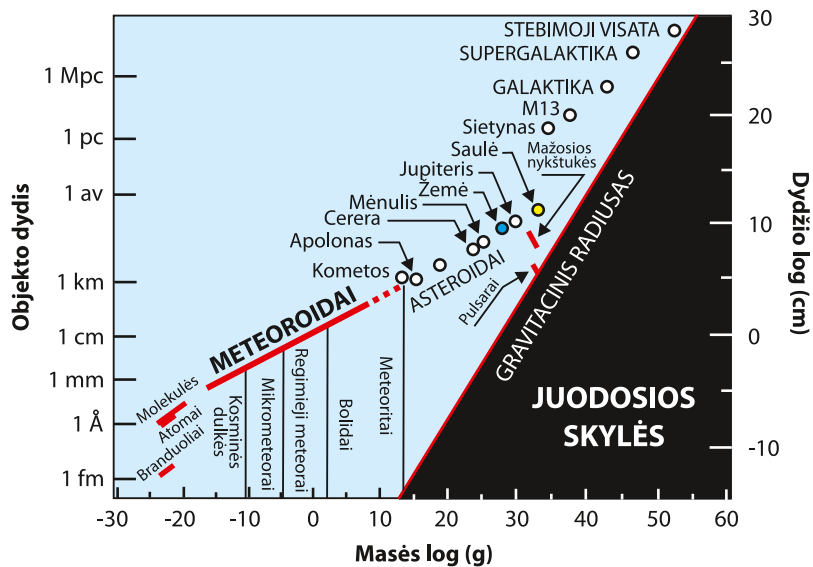
meteoroidų srauto dalis, kuri yra arti perihelio. Toks srautas evoliucionuoja ilgai, pvz., garsusis kiekvienais metais rugpjūčio mėnesį matomas perseidų srautas, kurio susikirtimas su Žemės orbita pavaizduotas 6 pav. Ir atvirkščiai, srautai, kurių orbita yra beveik ekliptikos plokštumoje, evoliucionuoja daug sparčiau. Be to, srauto orbita precesuoja, dėl to jo stebėjimo sąlygos laikui bėgant gali smarkiai keistis.

Bene ryškiausias glaudaus kometų ir meteorų srautų tarpusavio ryšio ir didingos dangaus mechanikos pavyzdys – Bielos kometos (3D/Biela) ir dabar jau nebematomo andromedidų meteorų srauto istorija. 1826 m. čekų astronomas mėgėjas Vilhelmas fon Biela (*Wilhelm von Biela*) atrado nedidelę kometą, kuri skriejo aplink Saulę 6,6 metų periodu. 1846 m. buvo pastebėta, kad kometos branduolys suskilo į dvi dalis, o kai kometa vėl pasirodė 1852 m., šios dvi dalys jau buvo nutolusios viena nuo kitos

per 2 mln. km ir skriejo gerokai pasikeitusia orbita. Po to kometa prapuolė ir daugiau niekas jos nebematė. Tačiau 1872 m., kai kometa eilinį kartą turėjo praskrieti netoli Žemės, netikėtai iš Andromedos žvaigždynė esančio radianto pabiro išspūdinga gausybė lėtų meteorų. Apskaičiavus meteorų srauto orbitą, paaiškėjo, kad ji beveik identiška pradingusios Bielos kometos orbitai. Toks pat meteorų lietus pasikartojo po 13 metų – 1885-aisiais, tuomet buvo gautos ir pirmosios meteorų nuotraukos. Vėliau srautas išnyko taip pat netikėtai, kaip ir atsirado – didžiųjų planetų traukos poveikis nulėmė, kad andromedidų meteoroidų srauto ir Žemės orbitos daugiau nebesusikerta.

Žinomas ir kitas pavyzdys, kai iš naujo atrandama prapuolusi kometa, o kartu atgyja ir laikytas išnykusiu meteorų srautas. Taip nutiko 1998 m., kai perihelyje iš naujo buvo atrasta iki tol laikyta dingusia Ponso-Vinekės (7P/Pons-Winnecke) kometa, kurios orbita per keletą pastarųjų dešimtmečių patyrė didelių gravitacinių perturbacijų. Tais pačiais metais (po 70 metų pertraukos!) atgijo ir su šia kometa siejamas bootidų meteorų srautas, kurio radiantas yra Jaučiaganio žvaigždynė [3].

→ 7 pav.
 Visatos objektų masės ir dydžio diagrama.
 Kairėje ašyje atidėti matmenys:
 1 fm (femtometras) = 10^{-15} m,
 1 Å (angstremas) = 10^{-10} m,
 1 μm (mikrometras) = 10^{-6} m,
 1 av (astronominis vienetas) = 150 000 000 km,
 1 pc (parsekas) = $3,1 \times 10^{13}$ km,
 1 Mpc (megaparsekas) = 10^6 pc.
 Gravitacinis radiusas – tai spindulys sferos,
 iki kurios turėtų susitraukti tam tikros masės
 objektas, kad taptų juodąja skylė.
 Pavyzdžiui, Žemės gravitacinis radiusas
 yra apie 9 mm



12.3 Meteoroidai – mažiausi Saulės sistemos kūnai

Meteoro ir meteoroido sąvokos kartais painiojamos, klaidingai suteikiant joms tą pačią prasmę. Meteoroidas – tai nedidelis kosminis kūnas, atsiradęs yrant kometoms ar asteroidams ir skriejantis tam tikra orbita aplink Saulę. Meteoras – tai reiškinys, kai meteoroidas įskrieja į Žemės atmosferą. Meteoroidas savo orbitoje iki susidurdamas su kitu kosminiu kūnu gali gyvuoti laiko tarpą, matuojamą kosminiais masteliais, tuo tarpu meteoras – tai labai trumpalaikis švytintis reiškinys atmosferoje, kurio trukmė vos keli akimirksniai. Trumpas meteoro žybsnis žvaigždėtame danguje simbolizuoja nedidelę kosminę katastrofą – meteoroido egzistavimo pabaigą. Nors ir būdami maži, visatos objektų masės ir dydžio diagramoje meteoroidai užima nemažą sekos dalį nuo molekulinio dydžio objektų iki asteroidų bei kometų [4] (7 pav.).

Meteorai išsižiebia vidutiniškai 100–110 km aukšty-

je. Tai žemutiniai termosferos arba jonosferos sluoksniai. Panašiam aukštyje švyti ir šiaurės pašvaistės. Patys smulkiausi meteoroidai vadinami kosminėmis dulkėmis. Jos yra tokios mažos (vidutinis jų matmuo apie 1 μm), kad, nepriklausomai nuo jų pradinio greičio, įskriejusios į atmosferą jos nesukelia jokio regimojo efekto. Mikrometeoroidai, kurių vidutiniai matmenys siekia 100 μm, o vidutinė masė apie 0,001 g, įlėkę į atmosferą jau gali būti registruojami radarais (vadinamieji radijo meteorai) ar matomi pro teleskopą. Plika akimi matomus meteorus sukuria dar didesni meteoroidai, kurių masė siekia nuo šimtųjų dalių iki keletogramų, o skersmuo gali siekti keletą centimetrų. Vienas šios knygos autoriaus kolega ilgai negalėjo nuslėpti nuostabos ir sumišimo sužinojęs, kad tokie maži kosminiai kūnai gali taip ryškiai šviesti skriedami Žemės atmosferoje.

Meteorai, kurių regimasis ryškis viršija maksimalų Jupiterio ryškį (-3^m), vadinami bolidais. Ryškiausių bolidų masė siekia kelis kilogramus ir daugiau, o ryškaus bolido skrydis palieka neišdildomą įspūdį (8 ir 9 pav.).



↑ 8 pav.
Bolidas, praskriejęs virš Andromedos ūko
(paveikslu centre). R. Balčiūno nuotr.

Kiek giliai meteoroidui pavyks įsiskverbti į atmosferą, priklauso ne tik nuo jo masės, bet ir nuo pradinio greičio Žemės atžvilgiu. Maksimalų meteoroido greitį galima apskaičiuoti laikant, kad jis skrieja paraboline orbita, t. y. atvira orbita, ir gali nutolti nuo Saulės be galo toli. Kad galėtų judėti tokia trajektorija, meteoroidas turi turėti tam tikrą energiją, kitaip tariant, greitį. Šis greitis arti Žemės orbitos yra 42,5 km/s. Žinant, kad Žemės orbitinis greitis yra 30,3 km/s, meteoroidui kaktomuša susidūrus su Žeme, gautume maksimalų 72,8 km/s greitį, kuriuo jis galėtų įskrieti į atmosferą. Minimalų meteoroido greitį galima rasti laikant, kad jis skrieja panašia orbita bei greičiu, kaip ir Žemė. Tai antrasis kosminis greitis, kuris lygus 11,2 km/s. Tokiu greičiu kristų begaliniu atstumu esantis

kosminis kūnas, veikiamas tik Žemės traukos. Kadangi Žemė aplink Saulę skrieja rytų kryptimi, greičiausi meteoroidai stebimi rytinėje dangaus skliauto pusėje, o lėčiausi – vakarinėje. Kol visiškai sudega ir išgaruoja, atmosferoje meteoroidas vidutiniškai nuskrieja maždaug 20 km, o kai kurie bolidai pasiekia netgi viršutinius stratosferos sluoksnius (1 sk. 2 pav.). Tačiau jei meteoroidas yra masyvus, o jo greitis neviršija 25 km/s, liekanos gali nukristi ir ant Žemės paviršiaus. Toks objektas vadinamas meteoritu. Meteoritai nėra labai reti, per metus Europos plote nukrinta bent keletas nedidelių meteoritų. Ištyrus jų cheminę sandarą, nustatomas amžius ir kilmė. Tai leidžia giliau pažvelgti į mūsų gimtosios planetos ir visos Saulės sistemos atsiradimo istoriją bei raidą. Kai kuriuose meteorituose aptinkama net organinių junginių. Viena gyvybės Žemėje atsiradimo hipotezių (panspermijos hipotezė) kaip tik teigia, kad gyvybės užuomazgos į mūsų planetą atkeliavo su tokiais meteoritais.

Meteoroido sąveiką su atmosfera sąlyginai galima suskirstyti į 4 pakopas – kaitimą, abliaciją (garavimą), tamsųjį lėkį ir smūgį į paviršių. Meteoroidui įskriejus į pačius aukščiausius atmosferos sluoksnius (apie 300 km aukštyje), dėl susidūrimų su atmosferos dujų atomais ir molekūlėmis jis ima kaisti. Jo paviršiaus temperatūra ima sparčiai didėti, o vidus išlieka šaltas. Atmosferai tolydžio tankėjant, susidūrimai tampa tokie dažni, kad 90–110 km aukštyje meteoroido paviršius ima lydėtis, o pasiekus 2500 °C temperatūrą, meteoroido medžiaga ima sparčiai garuoti. Tad skriejantį meteoroidą apgaubia dujų debesėlis, kuris sudarytas iš jonizuotų ir sužadintų atmosferos dujų ir paties meteoroido medžiagos. Įvertinta, kad susidūrimas su viena atmosferos molekule išgarina net 80 molekulių nuo meteoroido paviršiaus. Sužadinti atomai ir molekūlės spinduliuoja šviesą, o matomą šviesą, kurią ir stebime kaip meteorą, sąlygoja metalų, daugiausia geležies ir magnio, bei deguonies atomų ir azoto molekulių spinduliuavimas.



● **9 pav.**
Ryškus bolidas, sušvitęs pro perregimus debesis.
A. Dubiečio nuotr.



← **10 pav.**

Ryškus bolidas (kairėje) ir jo pėdsakas po 10 sek. (viduryje) ir 20 sek. (dešinėje).
S. Jurkevičiaus nuotr.

Šis švytėjimas užgesa per sekundės dalis, išgaravus visai meteoroido masei. Beje, tik labai maža dalis – apie 0,2 % – kinetinės meteoroido energijos virsta šviesa. Jei meteoroido pradinis greitis didelis, susidūrimų su oro molekulėmis metu deguonies atomai gali būti sužadunami į metastabilų lygmenį. Tada matomi keletą sekundžių, o itin retais atvejais ir ilgiau gyvuojantys pėdsakai, kurių švytėjimo bangos ilgis yra 557 nm ir 635 nm – toks pat, kaip ir intensyvių spinduliuotės linijų, registruojamų siaurės pašvaisčių švytėjimo spektre (11.4 posk.). Meteorų pėdsakai kartais įgauna keistas formas (10 pav.), bylojančias apie mezosferoje, o kartais ir stratosferoje, pučiančių vėjų kryptį bei greitį. Dar Antrojo pasaulinio karo metais tobulinant radarus pastebėta, kad meteorų paliekami jonizuotų dujų pėdsakai gerai atspindi radijo bangas. Meteorų stebėjimai naudojami radarus plačiai taikomi ir mūsų laikais.

Kaip buvo minėta, kol visiškai sudega ir išgaruoja, atmosferoje meteoroidas vidutiniškai nuskrieja maždaug 20 km, tačiau jei pradinė jo masė yra didelė, skrydis užtrunka ilgiau. Įskriejęs į tankius atmosferos sluoksnius toks meteoroidas dėl oro pasipriešinimo greitai lėtėja. Meteoroidui sulėtėjus iki 3 km/s, garavimas baigiasi. Toks

kūnas nebespinduliuoja jokios matomos šviesos. Prasideda tamsiojo lėkio fazė – meteoroidas ima vėsti, nors jį stipriai stabdo jau gana tanki atmosfera. Greičiui sumažėjus iki kelių šimtų metrų per sekundę, prasideda laisvasis kritimas. Nelygu likusi meteoroido masė, toks kūnas nukrinta ant Žemės paviršiaus 10–100 m/s greičiu. Pabrėžtina, kad tik labai mažai daliai meteoroidų pavyksta įveikti visas šias pakopas. Paprastai visa medžiaga išgaruoja jau 80 km aukštyje (mezosferoje), ir tik retas bolidas pasiekia viršutinius stratosferos sluoksnius (40–50 km aukštį).

12.4 Meteorų stebėjimai

Didžiąją dalį žinių apie meteoroidus gauname būtent stebėdami meteorus, kadangi aptikti šiuos mažus beribėje kosmoso platybėje skriejančius objektus praktiškai neįmanoma. Meteorų spektrai byloja apie cheminę jų sudėtį, o regimasis ryškis, vertinamas pagal žvaigždinio ryškio skalę ir nustatomas lyginant su žvaigždžių ryškiu, tiesiogiai susijęs su jų mase ir greičiu. Stebint meteorus iš dviejų geografinių punktų, galima tiksliai nustatyti ne tik jų radianto

padėtį dangaus skliaute, bet ir apskaičiuoti orbitą. O tai labai svarbu identifikuojant jų ryšį su kometomis ar asteroidais. Šiuo metu pasaulyje daugiausia astronomijos mėgėjų ir meteorų astronomijos entuziastų pastangomis yra įkurti bolidų stebėjimo tinklai, automatizuotos vaizdo kamerų stebėjimo stotys, apimančios didžiąją dalį Europos, taip pat esančios JAV ir Australijoje. Atsiradus aukštos kokybės skaitmeninėms fotokameroms, į kokybiškai naują lygmenį pakilo fotografiniai meteorų stebėjimai.

Meteorų stebėjimas yra labai įdomus ir romantiškas, tačiau nemažai kantrybės ir laiko atimantis užsiėmimas. Vizualiai meteorus gali stebėti kiekvienas, tam nereikia jokios specialios įrangos ar aparatūros. Žmogaus akis yra nuostabus optinis instrumentas, užtikrinantis didelį jautrumą ir platų regėjimo lauką, o to kaip tik ir reikia stebint meteorus. Šiltai apsirengus ir patogiai įsitaisius, dangus už kantrybę visuomet atsilygins puikiu reginiu. Vizualinius meteorų stebėjimus koordinuoja Tarptautinė meteorų organizacija (angl. *International Meteor Organization – IMO*), vienijanti daugiau nei tūkstantį po visą Žemės rutulį išsibarsčiusių meteorų stebėtojų. Stebėtojų geografijos įvairovė užtikrina, kad ištisus metus kiekvieną naktį kas nors kuriame nors Žemės kampelyje stebi meteorus. Nenutrūkstami stebėjimai įgalina gauti unikalią informaciją ne tik apie meteorų srautų aktyvumą, bet ir užfiksuoti trumpalaikes jų aktyvumo variacijas, kurti ir tobulinti esamus meteoroidų srautų modelius, numatyti jų dinamiką Saulės sistemoje, geriau suprasti ir pačių kometų bei asteroidų evoliuciją. Visi stebėjimų duomenys apibendrinami dinaminėje duomenų bazėje, kuri laisvai prieinama visiems besidomintiems.

Būtent remiantis vizualiniais stebėjimais vertinamas meteorų srautų aktyvumas. Tuo tikslu IMO yra pasiūliusi bendrą stebėjimo metodiką. Apdorojus tokių stebėjimų duomenis, gaunami mokslinę vertę turintys rezultatai. Bendros metodologijos būtinumas pagrįstas tuo, kad

kiekvienas stebėtojas dangų stebi labai skirtingomis sąlygomis (skiriasi dangaus skaidrumas, meteorų srauto radianto aukštis virš horizonto ir pan.), skiriasi ir kiekvieno stebėtojo regos ypatumai ir t. t. Tinkamai neįvertinus visų šių aplinkybių, smarkiai išauga paklaidos, o stebėjimų duomenys tampa nebeapatikimi. Meteorų srauto aktyvumas vertinamas zenitiniu valandiniu skaičiumi (angl. *Zenithal hourly rate – ZHR*), kuris reiškia vieno stebėtojo registruojamą srauto meteorų skaičių per valandą, esant idealioms stebėjimo sąlygoms – kai regimasis žvaigždžių ryškis zenite yra $6,5^m$, srauto radiantas yra zenite (tiesiai virš galvos), o regėjimo lauko neriboja pastatai, medžiai ar dalinis debesuotumas [5]:

$$ZHR = \frac{Nr^{6.5-lm}}{t \sin h_R}$$

Čia N žymi vieno stebėtojo pastebėtų srauto meteorų skaičių per stebėjimo laiką t , h_R yra radianto aukštis virš horizonto, kurį galima nesunkiai apskaičiuoti remiantis dangaus trigonometrija, lm – ribinis regimasis žvaigždžių ryškis zenite, kuris nustatomas pagal matomų žvaigždžių skaičių tam tikruose dangaus sklypuose [6]. Patyrę stebėtojai ribinį žvaigždžių ryškį gali įvertinti $0,05^m$, o kartais ir dar didesniu tikslumu. Esant skaidriam dangui, toli nuo miesto žiburių plika akimi galima išvelgti net $6,8$ ryškio žvaigždes, o mieste net ir geriausiomis sąlygomis vargiai matosi net ir $5,5$ ryškio žvaigždės. r yra stebimo srauto meteorų pasiskirstymo pagal ryškį indeksas, kuris svarbus ir savitas kiekvieno srauto parametras. Meteorų ryškis nustatomas pagal žvaigždės ir vertinamas pagal žvaigždinio ryškio skalę. Tikslesniam zenitinio valandinio skaičiaus vertinimui papildomai atsižvelgiama į pataisas dėl debesuotumo ar kitų regėjimo lauko apribojimų. Aišku, idealios stebėjimo sąlygos toli gražu ne visada pasitaiko, tačiau, tinkamai įvertinus minėtus parametrus, atskirų stebėtojų rezultatai gerai sutampa.

Srautas	Tr.	Veikimo laikas	Maks. data	α	δ	V (km/s)	ZHR	Kosminis kūnas
Kvadrantidai	QUA	01.01–01.05	01.03	230°	+49°	41	120	2003EH1
Lyridai	LYR	04.16–04.25	04.22	271°	+34°	49	18	C/1861 G1 Thatcher
η -Akvaridai	ETA	04.19–05.28	05.05	338°	-01°	66	60	1P/Halley
*Bootidai	JBO	06.26–07.02	06.27	224°	+48°	18	–	7P/Pons-Winnecke
δ -Akvaridai	SDA	07.12–08.19	07.27	339°	-16°	41	20	96P/Machholz 1
Perseidai	PER	07.17–08.24	08.12	46°	+58°	59	100	109P/Swift-Tuttle
Aurigidai	AUR	08.25–09.08	09.01	84°	+42°	66	7	C/1911 N1 Kiess
*Drakonidai	GIA	10.06–10.10	10/08	262°	+54°	20	–	21P/Giacobini-Zinner
Orionidai	ORI	10.02–11.07	10/21	95°	+16°	66	25	1P/Halley
Tauridai	TAU	10.01–11.25	11/05	55°	+18°	27	10	2P/Encke
*Leonidai	LEO	11.14–11.21	11/17	153°	+22°	71	15	55P/Tempel-Tuttle
Geminidai	GEM	12.07–12.17	12/14	112°	+33°	35	100	3200 Phaeton
Ursidai	URS	12.17–12.26	12/22	217°	+76°	33	10	8P/Tuttle

↑ 1 lentelė.

Pagrindiniai meteorų srautai, jų parametrai ir jų kilmės kosminiai kūnai (Tr. – tarptautinis srauto trumpinys, radianto koordinatės: α – rektascensija, δ – deklinacija, V – įskriejimo greitis į atmosferą. Žvaigždute pažymėti periodiniai srautai)

12.5 Meteorų srautai

Pagrindinis kriterijus identifikuojant meteorų srautą yra jo aktyvumas ir orbitos elementų žinojimas, t. y. patikimai nustatytas ryšys su kilmės kūnu – kometa ar asteroidu. Kita sąlyga – srauto aktyvumas maksimumo metu turi siekti bent kelis meteorus per valandą. Srautų, tenkinančių minėtas sąlygas, sąrašas nėra ilgas – šiuo metu jų žinoma apie 40 [7]. Pagal aktyvumą visus meteorų srautus galima suskirstyti į didžiuosius, mažuosius ir periodinius. Pastebimiausi yra didieji meteorų srautai, kurių aktyvumas maksimumo metu vertinant zenitiniu valandiniu skaičiumi siekia daugiau nei 50 meteorų per valandą ir kasmet yra daugumą pastovus. Mažųjų meteorų srautų aktyvumas

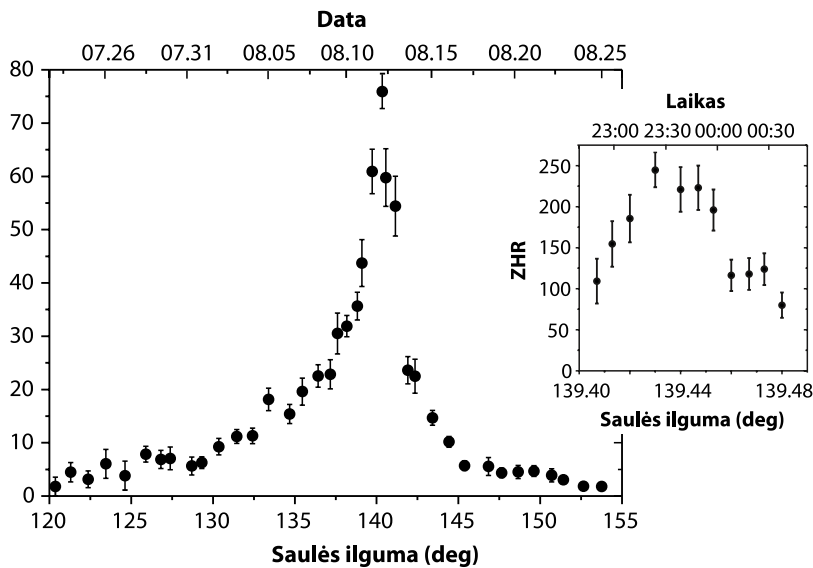
maksimumo metu paprastai neviršija 5–10 meteorų per valandą, tad norint atpažinti tokiems srautams priklausančius meteorus, jau reikalinga tam tikra stebėjimų patirtis. Žinoma, patys išpūdingiausi yra periodiniai meteorų srautai, kurių kasmetis aktyvumas dažniausiai yra menkas, tačiau šimtus ar net tūkstančius kartų sustiprėja, kai juos pagimdžiusios kometos praskrieja perihelij, o Žemė susiduria su tankia meteoroidų srauto sritimi [8]. Tokiais atvejais dažnai stebimi meteorų lietūs. Meteorų lietus – tai išskirtinis reto grožio reiškinys, kai galima matyti 1 ar daugiau meteorų per sekundę.

Pagrindinių meteorų srautų, kuriuos galima stebėti Lietuvoje, sąrašas pateiktas 1 lentelėje. Radiantų padėtys nurodytos srauto maksimumui, tačiau reikia turėti omenyje, kad radiantas dangaus skliaute per parą vidutiniškai pasislenka 1° į rytus pagal rektascensiją ir 0.1–0.2° į šiaurę ar pietus pagal deklinaciją.

Didieji meteorų srautai pasižymi daugumą pastoviu aktyvumu. Daugiausia tai seni srautai, kuriuose



● **11 pav.**
Ryškios perseidų meteorų strėlės – rugpjūčio
naktų puošmena. *T. Janušonio nuotr.*



← 12 pav.

Suvidurkinta perseidų meteorų srauto aktyvumo kreivė pagal knygos autoriaus stebėjimų 1988–2003 m. duomenis. Papildomame paveiksle – neįprastai aukšto perseidų aktyvumo kitimo kreivė 2004 m. rugpjūčio 11–12-osios naktį. Vertikalūs brūkšniai ant taškų žymi zenitinio valandinio skaičiaus įvertinimo paklaidas

meteoroidai gana tolygiai pasiskirstę išilgai srauto orbitos. Meteorų srauto aktyvumas ir matomumo trukmė priklauso ne tik nuo jo amžiaus, bet ir nuo to, kiek tankią srauto dalį kerta Žemės orbita ir kiek plačiai meteoroidai pasklidę kosminėje erdvėje. Svarbu ir tai, kokių kampu srauto orbita pasvirusi į ekliptikos plokštumą – paprastai nedidelis pokrypio kampas sąlygoja ilgesnį srauto matomumo laikotarpį. Jei srauto orbita sąlyginai nutolusi nuo didžiųjų Saulės sistemos planetų ir jos periodas yra ilgas, toks srautas nepatiria didesnio gravitacinio poveikio ir gali būti stabilus tūkstantmečius. Tokie yra perseidų, eta akvaridų ir orionidų srautai, kurie buvo žinomi jau gilioje senovėje.

Vienas žinomiausių didžiųjų meteorų srautų – perseidų srautas, kurio radiantas yra Persėjo žvaigždynė [9]. Šis srautas yra tikra tamsių rugpjūčio naktų puošmena. Tai vienas seniausių, aktyviausių ir ilgiausiai veikiančių (daugiau nei mėnesį) meteorų srautų, kurio ryškios meteorų strėlės be perstojo raizgo tamsių rugpjūčio dangų (2, 11 pav.). Viduramžiais Vakarų Europoje šis srautas buvo

vadinamas Šv. Lauryno ašaromis, kadangi jo maksimumo data sutapo su šv. Lauryno diena. Esant geroms stebėjimo sąlygoms, toli nuo didžiųjų miestų šviesų, maksimumo metu – rugpjūčio 11–13-osios naktimis – galima priskaičiuoti net iki 100 perseidų srauto meteorų per valandą. Perseidų srauto meteoroidai įskrieja į Žemės atmosferą 60 km/s greičiu, tad stebimi meteorai yra labai greiti, ryškūs ir dažnai palieka švytinčius pėdsakus. Perseidų srautas kilęs iš Svifto-Tutlio kometos, kurios apskriejimo aplink Saulę periodas yra 130 metų. Kometą paskutinį kartą praskriejo perihelij 1992 m. Tuomet beveik dešimtmetį perseidų meteorų srautas viso pasaulio stebėtojus džiugino daugiau nei dvigubai išaugusiu aktyvumu [10]. Paskutinis perseidų meteorų lietus įvyko 2004 m. rugpjūčio 13-osios naktį ir buvo gerai matomas Lietuvoje [11], kai per valandą buvo galima priskaičiuoti iki 250 perseidų meteorų (12 pav.). Nustatyta, kad tuomet Žemės orbitą kirtę kometos medžiaga, išmesta į kosminę erdvę dar 1862 m., per priešpaskutinį jos apsilankymą perihelyje. Šiuo metu perseidų

srauto aktyvumas jau grįžo į savo įprastines vėžes, o giedros ir šiltos rugpjūčio naktys kasmet kviečia pasigrožėti šiuo nuostabiu reginiu.

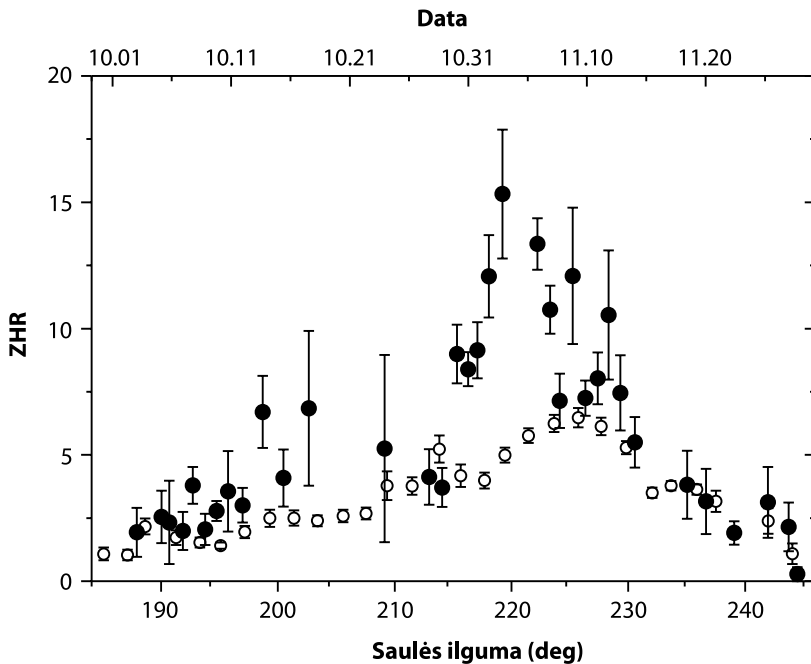
Šiuo metu pats intensyviausias yra geminidų meteorų srautas, kildinamas ne iš kometos, o iš asteroido Fajetono (3200 Phaeton). Dar XIX a. geminidų srautas buvo labai silpnas ir net nebuvo įtrauktas į to meto katalogus. Tačiau jau XX a. pradžioje jo aktyvumas pastebimai išaugo, o šiuo metu tai vienas gražiausių meteorų srautų, kasmet gruodžio 13–14-osios naktį pažeriantis daugiau nei 100 lėtų, skriejančių 35 km/s greičiu gelsvos spalvos meteorų per valandą.

Ilgamečiai stebėjimų duomenys byloja, kad geminidų srauto aktyvumo lygis ir maksimumo laikas laipsniškai kinta [12]. Matuojant kosminiais masteliais, šis kitimas yra labai greitas. Prognozuojama, kad dėl orbitos precesijos geminidų srautas ims silpti apie 2050 m. ir galiausiai išnyks, nes jo ir Žemės orbitos daugiau nebesusikirs. Lietuvoje šio srauto radiantas, esantis Dvynių žvaigždynė, pateka anksti vakare, todėl geminidų meteorais galima grožėtis visą ilgą žiemos naktį. Vis dėlto šio gražaus žiemos srauto stebėjimo sąlygas dažnai sugadina prasti gruodžio orai ar tiesiog labai šaltos naktys.

Dar vienas labai aktyvus didysis meteorų srautas yra kvadrantidai, kurio radiantas yra tarp Jaučiaganio, Drakono (Slibino), Heraklio ir Didžiųjų bei Mažųjų Grįžulo Ratų žvaigždynų. Šio srauto pavadinimas kilo iš kadaise buvusio Kvadranto žvaigždyno, kuris astronomų sutarimu buvo panaikintas, o jo žvaigždės „išdalintos“ jau minėtiems kaimyniniams žvaigždynams. Gražu, kad istorinis meteorų srauto pavadinimas išliko iki šiol. Maksimumo metu sausio 3–4-osios naktį kvadrantidų aktyvumas siekia iki 120 meteorų per valandą, tačiau pats maksimumas yra labai trumpas, trunka vos keletą valandų, o ir pats srautas aktyvus tik savaitę. Kadangi žiema Lietuvoje giedromis

naktimis nelepina, dažniausiai kvadrantidų žybsnius nuo mūsų slepia storas žemų debesų sluoksnis. Kvadrantidų srautas įdomus ir tuo, kad ilgą laiką tai buvo vienintelis didysis srautas, kurio kilmė nežinoma. Dabar laikoma, kad kvadrantidų srautą suformavo nedidelis 2003 m. atrastas asteroidas 2003 EH1, kuris, kaip spėjama, gali būti kadaise egzistavusios didelės kometos nuolauža [13].

Eta-akvaridai, matomi gegužės pradžioje, ir orionidai, matomi spalio antrojoje pusėje, yra garsiosios Halio kometos (1P/Halley) sukurti srautai. Taip jau susiklostė, kad Žemės ir Halio kometos atplaišų orbitos kertasi du kartus per metus – gegužės ir spalio mėnesiais – tik Žemės orbita kerta šiek tiek skirtingo tankio srauto dalis. Dėl susikirtimo su Žemės orbita geometrijos ypatumų eta-akvaridų srautas yra aktyvesnis, maksimumo metu jo zenitinis valandinis skaičius siekia iki 60 meteorų, o orionidų srautas – silpnesnis, jo vidutinis aktyvumas yra apie 20–30 meteorų per valandą. Abiejų srautų meteorai yra labai greiti (į atmosferą jie įskrieja 66 km/s greičiu), paliekantys net kelias sekundes, o kartais ir dar ilgiau švytinčius jonizuotų dujų pėdsakus. Dėl stipraus gravitacinio Jupiterio poveikio abiejų srautų aktyvumas sinchroniškai kinta 12 metų periodu. O Halio kometos meteoroidų srautas erdvėje yra stipriai fragmentuotas skersai savo orbitos: meteoroidai yra susigrupavę į gijas, kurios viena po kitos kerta Žemės orbitą. Dėl to eta-akvaridų ir orionidų meteorų srautams būdingas neįprastai ilgas maksimumas, trunkantis bemaž 3 naktis, kurio metu srautų aktyvumas tai sumažėja, tai vėl padidėja. Pastarąjį kartą Halio kometa praskriejo perihelij 1985 m., tačiau tuomet dauguma stebėtojų liko nusivylę, nes jokie padidėjusio nei eta-akvaridų, nei orionidų meteorų aktyvumo nebuvo neužregistruota. Tačiau dėl jau minėto Jupiterio poveikio 2006 ir 2007 m. orionidų aktyvumas buvo išaugęs iki 60–70 meteorų per valandą [14, 15], o eta-akvaridų – net iki 100. Lietuvoje orionidų



← 13 pav.

Tauridų meteorų srauto aktyvumo kreivės: vidutinė daugiametė (tuščiaiduriai taškai) ir 2005 metų (pilnaviduriai taškai), kai Žemės orbita kirta rezonansinę srauto dalis (*IMO duomenys*)

srauto stebėjimo sąlygos yra labai geros. Jo radiantas, esantis ant Dvynių ir Oriono žvaigždynų ribos, pateka vėl vakarą, tad orionidų meteorai gerai matomi visą ilgą rudens naktį. Tuo tarpu eta-akvaridų srauto stebėjimo sąlygos Lietuvoje yra kur kas blogesnės – jo radiantas, esantis Vandens žvaigždyne, pateka jau pradėjus švisti, tad ryškios eta-akvaridų strėlės greitai išnyksta ryto aušros šviesoje.

Kai kurie mažieji meteorų srautai taip pat žinomi nuo gilių senovės, mat tada jie buvo kur kas aktyvesni, tačiau dėl didžiųjų planetų traukos poveikio gerokai nusilpo. Ryškiausias pavyzdys yra lyridų meteorų srautas, kurio radiantas yra Lyros žvaigždyne. Šis srautas kildinamas iš ilgo periodo (apie 400 metų) Tečer (*C/Thatcher*) kometos, o jo meteorai matomi balandžio antrojoje pusėje.

Tolimųjų Rytų kronikos byloja apie kadaise galingą

lyridų meteorų srautą, kuris savo grožiu ir intensyvumu galėjo varžytis su perseidais. Šių dienų lyridų srauto aktyvumas gerokai prablėšęs, maksimumo metu balandžio 21–22-osios naktį nesiekiantis nė 20 meteorų per valandą [16]. Tačiau 1982 m., daugelio nuostabai, lyridai netikėtai buvo pažerę net 100 meteorų per valandą.

Pastarųjų metų tyrinėjimai atskleidė, kad senų srautų suaktyvėjimas nėra atsitiktinis reiškinys, jį sąlygoja visiškai neseniai išmesta (paskutinio perihelio praskriejimo metu) kometos medžiaga, kuri užima kompaktišką erdvės tūrį. Panašia dinamika pasižymi ir šiaip jau silpnas aurigidų meteorų srautas, kurio radiantas yra Vežėjo žvaigždyne ir kuris 2007 m. rugsėjo 1 d. pažerė ryškių meteorų lietu. Deja, jo grožį šiek tiek užgožė Mėnulio pilnatis [17].

Labai gražus yra delta-akvaridų meteorų srautas, kurio maksimumas stebimas liepos pabaigoje. Lietuvos

padangėje Vandens žvaigždynė esantis šio srauto radiantas tik neaukštai pakyla virš pietinio horizonto, tad maksimumo metu galima pamatyti ne daugiau kaip 10 šio srauto meteorų. Tačiau palyginti menką kiekybę kompensuoja kokybė: ilgos delta-akvaridų trajektorijos yra nukreiptos iš apačios į viršų, o ryškūs meteorai palieka iš tiesų neišdildomą įspūdį. Pietų pusrutulyje delta akvaridų stebėjimo sąlygos yra idealios. Tai vienas gražiausių pietinio dangaus meteorų srautų.

Vienas įdomiausių mažųjų meteorų srautų yra tauridų srautas. Jo radiantas yra Tauro (Jaučio) žvaigždynė. Šis srautas susiformavo prieš maždaug 10 000 metų, kaip manoma, subyrėjus milžiniškai kometai. Didžiausia tos kometos liekana yra trumpiausia periodą iš visų žinomų turinti Enkės (2P/Encke) kometa. Tauridų meteoroidų srautas ypatingas tuo, kad jame tebeegzistuoja daug stambių asteroidinės ir kometinės kilmės kosminių kūnų, galinčių susidurti su Žeme. Garsusis Tunguskos meteoritas, 1908 m. sproges virš Sibiro taigos, taip pat priskiriamas tauridų srautui. Tauridų srautas turi dvi atskiras šakas, taip pat ir radiantus – šiaurės ir pietų, susiformavusias veikiant Jupiterio gravitacinėms jėgoms. Nors tauridų srauto aktyvumas maksimumo metu – lapkričio pradžioje – tesiekia 10 meteorų per valandą, retkarčiais jis beveik padvigubėja dėl srauto orbitos rezonansų su Jupiterio planeta [18] (13 pav.). Tačiau įdomiausia tai, kad tuomet srautas gausiai pažeria įspūdingo ryškio bolidų. 2005 m. užregistruota net keliolika šio srauto bolidų, šviesumu prilygstančių Mėnulio pilnačiai. Tauridų srautas yra ilgiausiai, net du mėnesius, veikiantis meteorų srautas, matomas spalio–lapkričio mėnesiais. Šio srauto stebėjimo sąlygos Lietuvoje yra bemaž idealios – jo radiantas pateka ankstų vakarą ir matomas visą naktį.

Periodiniai meteorų srautai suaktyvėja tik juos sukūrusiems kometoms priartėjus prie perihelio ir neretai

padovanoja įspūdingą meteorų lietu. Pastarųjų kelių dešimtmečių laikotarpis buvo išskirtinis, pasižymėjęs kaip reta didele tokių įvykių gausa. Pats žymiausias periodinis srautas yra leonidai, turintys bene ilgiausią ir spalvingiausią istoriją, kuri trumpai minėta šio skyriaus pirmajame skyrelyje [19]. Leonidų srauto meteoroidai su Žeme susiduria kaktomuša, įskriedami į Žemės atmosferą 71 km/s greičiu. Leonidų meteorų lietūs ypatingi intensyvumu.

1998 m. Tempelio-Tutlio (55P/Tempel-Tuttle) kometai, kurios periodas yra 33 metai, praskriejus perihelį, leonidai net 7 metus iš eilės džiugino viso pasaulio meteorų stebėtojus ar šiaip smalsuolius, lapkričio viduryje pažerdami gausybę ryškių meteorų ir bolidų. 1999–2002 m. lapkričio 17–19-osios naktimis buvo galima pamatyti daugiau nei 3 500 leonidų meteorų per valandą (vidutiniškai po vieną meteorą per sekundę), tačiau pabjurusi Lietuvos padangė neleido ilgai grožėtis šiuo nuostabiu reginiu. Modeliavimo rezultatai parodė, kad tuomet Žemės orbita kliudė labai įvairaus amžiaus meteoroidų šleifo dalis, kai kurie meteoroidai atitrūko nuo kometos paviršiaus prieš 700 metų, o kiti tik paskutinio kometos apsilankymo perihelyje metu, t. y. 1965 m. 2004 m. leonidų srautas nusilpo, grįždamas į savo įprastinę aktyvumo vagą. Dabar maksimalus zenitinis valandinis leonidų skaičius neviršija 15 meteorų per valandą. Prognozuojama, kad leonidų srautas vėl suaktyvės 2032 m., Tempelio-Tutlio kometai eilinį kartą praskriejant perihelį, ir vėl padovanos naujų įstabių reginių.

Kitas gerai žinomas ir įdomus periodinis srautas yra drakonidai. Jų radiantas yra Drakono (Slibino) žvaigždynė. Drakonidai siejami su trumpo periodo (6,5 metų) Džakobinio-Cinerio (21P/Giacobini-Zinner) kometa. Šį periodinį srautą atrado jau minėtas V. Deningas, kuris taip pat nustatė, kad drakonidų srautas suaktyvėja tik kas 13 metų, kai kometa praskrieja visai netoli (aišku, kosminiais

masteliais) Žemės orbitos. Drakonidų srauto aktyvumas trunka labai trumpai – tik keletą naktų (spalio 8–10 d.). Tai rausvi ir labai lėti, pasivejantys Žemę meteorai, skriejantys 20 km/s greičiu. Pastarąjį kartą trumpas bet labai intensyvus drakonidų lietus pliūptelėjo 1998 m. Tuomet labiausiai pasisėkė Japonijos stebėtojas, kurie priskaičiavo net iki 800 drakonidų meteorų per valandą [20]. Drakonidų srautui būdinga ir tai, kad jame yra galybė labai smulkių meteoroidų, fiksuojamų tik radarais. Kaip tik toks radijo bangomis užregistruotas drakonidų lietus įvyko 2012 m., kai tuomet plika akimi buvo pastebėta tik kelios dešimtys srauto meteorų.

Šiuolaikinis meteorų srautų evoliucijos ir dinamikos prognozavimas sparčiai progresuoja. Pirmieji šiuolaikiški skaitmeniniai modeliai, įgalinę tiksliai numatyti pastarojo dešimtmečio leonidų meteorų lietus [21] dabar taip patobulėjo, kad srauto maksimumo laiką galima prognozuoti kelių minučių tikslumu. Skaitmeninis meteorų srautų modeliavimas yra labai sudėtingas uždavinys. Jo esmė – atskirų meteoroidų, atitrūkusių nuo kosminio kūno įvairiais jo evoliucijos laikotarpiais, orbitų skaičiavimas ir atstumo nuo Žemės orbitos įvertinimas, įskaitant meteoroidų pasiskirstymą pagal masę, kuris nustatomas iš meteorų stebėjimų, nuolat kintantis gravitacinių jėgų, orbitų precesijos, Saulės slėgio poveikis ir pan. Atsiradus superkompiuterių tinklams, galima tiksliai modeliuoti daugybės statistinių meteoroidų orbitas, jų kitimo dėsninumus ir tiksliai prognozuoti ne tik meteorų srautų maksimumo laiką, bet ir jų intensyvumą. Šiuos išpūdingus pasiekimus sąlygojo glaudus meteorų astronomijos profesionalų ir mėgėjų bendradarbiavimas, kai modeliai tobulinami ir tikslinami remiantis meteorų stebėjimo entuziastų rezultatais. Tiksliai žinant kometų ir asteroidų orbitas, galima nesunkiai patikrinti, ar toks meteoroidų srautas kirs Žemės orbitą ir ar gali būti matomas su šiais

kūnais susijęs meteorų srautas. Tačiau dar daug objektų neatrasta, planetų perturbacijos irgi daro poveikį – meteoroidų srautas, daugelį amžių skriejęs pro šalį, vieną gražią naktį netikėtai gali pasirodyti mūsų padangėje. Taip 2005 m. spalio 5-osios naktį buvo atrastas iki tol nestebėtas srautas – kamelopardidai [22], kurio radiantas yra Žirafos žvaigždynė. Po metų srautas vėl buvo aktyvus ir nudžiugino visa virtine ryškių bolidų. Nustačius srauto orbitą, dabar ieškomas jo kilmės kosminis kūnas.

Tačiau tik maždaug penktadalis visų registruojamų meteorų priklauso žinomiems didiesiems, mažiesiems ar periodiniams srautams. Likusi didžioji meteorų dalis nepriskiriama jokiems srautams. Jie vadinami atsitiktiniais arba sporadiniais. Kiekvieną naktį galima pastebėti apie 10 tokių meteorų per valandą. Bėgant metams, sporadinių meteorų skaičius šiek tiek kinta. Daugiausia jų matoma rugpjūčio–lapkričio (vidutiniškai 15 per valandą), mažiausiai, apie 7, – kovo–birželio mėnesiais. Radarais ir vaizdo kameromis užfiksuota, kad sporadinių meteorų radiantai nėra visiškai atsitiktinai išsibarstę dangaus skliaute, tačiau grupuojasi tam tikrose dangaus srityse [23]. Viena kompaktiškiausių sporadinių meteorų radiantų sankau-pų yra priešingame Saulei taške – antihelyje. Tai meteoroidai, kurių orbitos guli bemaž ekliptikos plokštumoje. Jie yra daugelio praeityje suirusių kometų ar kitų smulkesnių Saulės sistemos kūnų liekanos, o pats sporadinių meteorų „srautas“ kartais vadinamas ekliptikidais (angl. *antihelion source*), nes jo radiantai projektuojasi ant regimojo Saulės kelio dangaus skliaute – ekliptikos. Ekliptikidų aktyvumas yra menkas, tesiekiantis vidutiniškai vos 2–3 meteorus per valandą, tačiau pats srautas aktyvus ištisuos metus. Kitos dvi radiantų sankaupos nėra tokios kompaktiškos ir užima keliasdešimties laipsnių skersmens sritis danguje, kurių centrai atitinkamai yra apeksa (menamo dangaus sferos taško, kurlink skrieja Žemė) ir antiapeksa (priešingo



apekso taško) kryptimis. Naktį antiapexo srities radiantai leidžiasi, o apexo – pateka ir kyla vis aukšty. Nesunku pastebėti, kad tik sutemus vyrauja lėtesni, atskriejantys iš vakarinės dangaus pusės, o paryčiui – greitesni, atskriejantys iš rytinės dangaus pusės, sporadiniai meteorai. Visai neseniai atrasta, kad registruojamas sporadinių meteorų skaičius periodiškai kinta priklausomai nuo Saulės aktyvumo [24]. Nustatyta, kad Saulės aktyvumo maksimumo metu registruojamas sporadinių meteorų skaičius yra beveik 20 % didesnis nei minimumo metu. Šį kitimą lemia ne fizinis sporadinių meteorų kiekio kitimas, o dėl Saulės aktyvumo besikeičiančios sąlygos viršutiniuose Žemės atmosferos sluoksniuose, kurios savo ruožtu daro įtaką užsižiebiančių meteorų šviesumui.

↑ 14 pav.
Zodiako šviesa. Ryškus šviesulys prie horizonto – Jupiteris, o šiek tiek virš jo – Sietynas – gražus padrikasis žvaigždžių spiečius Tauro žvaigždyne.
R. Balčiūno nuotr.

12.6 Zodiako šviesa

Skaidriomis pavasario ar rudens naktimis kartais galima pastebėti blyškų dangaus švytėjimą rytinėje arba vakarinėje dangaus pusėje. Šis švytėjimas intensyviausias prie horizonto ir panašus į Paukščių Tako (14 pav.). Tai – Zodiako šviesa (angl. *zodiacal light*). Ji geriausiai matoma netoli pusiaujo, atogrąžų juostoje. Lietuvoje Zodiako šviesą geriausia stebėti rudenį, likus keletui valandų iki Saulės tekos, arba pavasarį, praėjus tiek pat laiko po Saulės laidos.

Dėl to Zodiako šviesa kartais vadinama „netikra aušra“. Zodiako šviesos šaltinis yra Saulės šviesa, išsklaidyta kosminių dulkių debesies, esančio tarpplanetinėje erdvėje tarp Marso ir Jupiterio orbitų.

Zodiako šviesos kilmę dar 1683 m. pirmasis paaškino italų astronomas Žanas Kasinis (*Jean-Dominique Cassini*), kurio garbei pavadintas tamsus tarpas tarp Saturno žiedų. Gausybė kosminių dulkių ir mažiausių meteoroidų, kurių vidutinis matmuo tėra apie 100 μm ir kurių orbitos susispietę ekliptikos plokštumoje, sklaido nedideliu kampu kritusią Saulės šviesą, kurią iš Žemės matome kaip neryšką, iš už horizonto išskylančią šviesos kūgį. Šie maži meteoroidai atsirado dėl daugybės stambesnių meteoroidų, nedidelių asteroidų ir kometų liekanų tarpusavio susidūrimų, po kurių pastarieji kūnai pamažu virto dulkių debesimi, dar vadinamu Zodiako debesimi (angl. *zodiacal cloud*). Nors Zodiako debesis užima milžinišką erdvės tūrį, vertinama, kad bendra jį sudarančių dalelių masė tėra apie 5×10^{19} g. Tai atitinka tik 37 km skersmens kosminio kūno masę [25]. Zodiako debesis nesunkiai aptinkamas iš kosminių aparatų pagal intensyvią šiluminę (infraraudonąją) spinduliuotę. Kur kas rečiau (tam reikalingas idealiai skaidrus dangus) priešingoje Saulei pusėje galima pamatyti atošvaistę – ir atgaline kryptimi išsklaidytą Saulės šviesą, kurią sklaido tas pats Zodiako debesis.

12.7 Kosminės katastrofos

Apytiksliais vertinimais, per metus į Žemės atmosferą patenka iki 40 000 t kosminės medžiagos [26]. Didžiąją šios medžiagos masės dalį sudaro kosminės dulkės ir mikro-meteoroidai, tik palyginti nedidelė jos dalis tenka regimojo ryškio meteorams, o dar mažesnė – žinomiems meteorų srautams. Ir tik nykstamai maža bendros masės dalis ten-

ka tokiems objektams kaip bolidai ar meteoritai. Kosminės dulkės yra pagrindinis kosminės medžiagos šaltinis, pavasarį ir rudenį sukuriantis subtilų naktinio dangaus švytėjimą – Zodiako šviesą, o jose gausiai aptinkami lengvojo metalo natrio junginiai tampa pagrindiniais kondensacijos centrais susidarant sidabriškiems debesims mezosferoje.

Įvertinta, kad per metus į Žemės atmosferą įskrieja apie 100 000 meteoroidų, kurių masė didesnė nei 10 g. Priklausomai nuo jo pradinio greičio, toks kūnas matomas kaip maždaug -5 ryškio bolidas. 1–2 metrų skersmens objektas įskrieja į Žemės atmosferą vidutiniškai kartą per mėnesį, o kartą per metus Žemė susiduria su 5 metrų skersmens meteoroidu [27]. Ekstrapoliuodami Žemės susidūrimo su didesniais – Tunguskos tipo – objektais tikimybę, gautume, kad tokie susidūrimai turėtų vykti kartą per 1 000 metų.

Kosminių katastrofų tema jau seniai kaitina mokslininkų ir visos žmonijos vaizduotę, suteikdama daug peno mokslinės fantastikos mėgėjams [28]. Didžiausia modernių laikų kosmine katastrofa laikomas 1908 m. virš Sibiro praskriejęs Tunguskos meteoritas, kurio kilmė iki šiol yra diskusijų objektas. Moderniausios hipotezės teigia, kad Tunguskos meteoritas – tai Enkės kometos skeveldra [29], sprogsi maždaug 6–8 km aukštyje virš Žemės paviršiaus. Manoma, kad objekto masė buvo keli tūkstančiai tonų, skersmuo apie 60 metrų, o sprogo galia prilygo 10 megatonų trotilo ekvivalentui. Pats sprogo nepaliko jokio žymesnio kraterio, kadangi beveik visa meteorito medžiaga išgaravo keleto kilometrų aukštyje virš Žemės paviršiaus ir pasklido atmosferoje, mėnesiams pritemdydama Saulės šviesą virš viso Žemės rutulio. Tuo pat metu virš Sibiro ir Europos buvo matomi neįprastai šviesūs sidabriškieji debesis.

O štai visai neseniai, 2013 m. vasario 15 d., virš Čeliabinsko (Rusija) sprogo dar vienas meteoritas, kurio

skersmuo, manoma, buvo apie 20 metrų, o masė – apie tūkstantį tonų [30]. Meteoritas į Žemės atmosferą įskriejo 18 km/s greičiu ir sprogo keleto kilometrų aukštyje virš Žemės paviršiaus, Čeliabinsko pakraštyje. Sprogimo būta tokio stipraus (jo galia siekė 500 kilotonų trotilo ekvivalento), kad smūginė oro banga (angl. *airburst*) buvo registruojama visame pasaulyje. Žmonių aukų išvengta, tačiau, griūvant pastatams ir dūžtant langų stiklams, buvo sužeista apie 1 000 žmonių.

Tad kyla natūralus klausimas, kiek reali yra Žemės susidūrimo su tokiu ar dar didesniu objektu tikimybė ir kaip tiksliai galima ją įvertinti. Tikslaus atsakymo, žinoma, nėra, bet jau įsibėgėjo tarptautinė programa „Spacewatch“, kurios tikslas – inventorizuoti visus potencialiai pavojingus Žemei asteroidus ar kitus objektus (angl. *Near-Earth Objects* – *NEO*), kurių skersmuo yra didesnis nei keli šimtai metrų. Potencialiai pavojingais laikomi visi objektai, kurių perihelio atstumas $<1,3$ a. v., o afelio $>0,983$ a. v. (1 a. v. yra astronominis vienetas, lygus vidutiniam atstumui nuo Žemės iki Saulės, t. y. 150 mln. km). LINEAR (angl. *Lincoln Near-Earth Asteroid Research*) projekto duomenimis, tokių objektų gali būti apie 1 200, nors šis skaičius nėra galutinis ir gali dar didėti [31]. Pavojingiausiu iš iki šiol atrastų objektų laikomas apie 300 m skersmens asteroidas Apofis (2004 MN4 Apophis), pavadintas senovės egiptiečių blogio dievo Apepo vardu. Prognozuojama, kad 2029 m. šis asteroidas praskries viso labo 35 000 km atstumu nuo Žemės [32]. Jei jis bent kiek nukryptų nuo savo orbitos, Žemę sukrėstų maždaug 1 000 megatonų (100 kartų stipresnis nei Tunguskos meteorito) smūgis, kurio pasekmes prognozuoti sunku. Tačiau tikra katastrofa Žemės civilizaciją ištiktų susidūrus su 10 km skersmens kometa ar asteroidu. Šia prasme didžiausią potencialią grėsmę kelia ilgo periodo kometos, kurių afelis yra Saulės sistemos pakraštyje, už Plutono orbitos, ir apie kurių egzistavimą iš anksto sužinoti neįmanoma.

Tikėtina, kad panašus susidūrimas galėjo įvykti prieš 65 mln. metų, kai Žemėje išnyko dinosaurai. Apytikriais vertinimais, Žemė su tokiais objektais galėtų susidurti kartą per 150 mln. metų. O kad tokie susidūrimai yra visai realūs, buvo galima įsitikinti, kai visai neseniai, 2004 m., į Jupiterį nukrito Šumeikerio-Levio kometa (D/Shoemaker-Levy 9), kuri net tokios planetos milžinės atmosferoje paliko ryškų pėdsaką, o kai kurie Jupiterio atmosferos sudėties pokyčiai tebėra stebimi net ir šiandien.

Per visą stebėjimų istoriją arčiausiai Žemės praskriejo Lekselio (D/1770 Lexell) kometa, kuri 1770 m. buvo priartėjusi iki pavojingai „mažo“, matuojant kosminiu masteliu, 0,015 a. v. (maždaug 2,2 mln. km) atstumo. Tuomet ši kometa buvo matoma net dieną ir iki šiol laikoma pačia šviesiausia mus aplankiusia dangaus viešnia. Tačiau įdomiausia tai, kad ši kometa per kelis dešimtmečius dukart praskriejo arti Jupiterio, kuris pirmą kartą ją nukreipė Žemės link, o antrą kartą švystelėjo į beribes kosmoso platybes. Tokie Lekselio kometos kosminiai virazai įspėja, kad susidūrimo pavojus yra visai realus, o svarbiausia, kad jis gali iškilti staiga ir netikėtai.

Mėnulio kraterių amžius ir dydis taip pat leidžia apytikriai įvertinti Žemės susidūrimo su kosminiais objektais tikimybę. Neseniai nustatyta, kad per pastaruosius 100 000 metų ant Mėnulio paviršiaus atsirado bent 25 nauji tokių smūgių pėdsakai – krateriai. Žinodami, kad Žemės paviršiaus plotas yra 13,5 karto didesnis nei Mėnulio, gautume, jog vienas Tunguskos dydžio objektas turėtų susidurti su Žeme vidutiniškai kartą per 300 metų (!) – kur kas dažniau nei manyta. Visai neseniai įsitikinta, kad ir didieji meteorų srautai palieka pėdsaką Mėnulyje. Nors jis neturi atmosferos, iš Žemės pro teleskopą galima pastebėti jame žybsnius, kuriuos sukelia į Mėnulio paviršių atsitenkę stambūs meteoroidai. Visą seriją tokių žybsnių stebėjo Ispanijos astronomai

per 2000 m. leonidų meteorų lietu [33]. Panašūs žybsniai stebėti neįprastų perseidų 2004 m. ir tauridų 2005 m. meteorų srautų maksimumų metu. Stebėtojų vertinimais, optiškai jau galima užregistruoti 1 kg meteoroido sukeltą žybsnį mūsų Žemės palydovo paviršiuje. Pastaruoju metu teoriškai nustatyta, kada ir kokie meteorų srautai gali būti matomi mūsų kaimyninėse planetose – Veneroje [34] ir Marse [35], o 2005 m. Marso visureigis „Spirit“ optiškai užfiksavo pirmąjį meteorų žybsnį Marso padangėje [36].

Žinios, gaunamos iš meteorų stebėjimų, praturtina mūsų supratimą apie kometų, asteroidų ir meteoroidų srautų evoliuciją, visos Saulės sistemos kilmę bei vystymąsi. Meteorų tyrimai turėtų atsakyti į daugybę šiandien aktualių klausimų. Ar meteorų stebėjimų rezultatai gali iš anksto pranešti apie kosminių kūnų susidūrimą su Žeme? Kurios ilgo periodo kometos ir apie kurias galbūt dar nieko nežinome yra potencialiai pavojingos? Kokie yra tarpžvaigždinės kilmės meteorų šaltiniai ir kaip tai susiję su Saulės sistemos kilme? Kas atsitinka organinėms medžiagoms, kurių aptinkama meteoroiduose, kai šie įskrieja į Žemės ar kitų planetų atmosferas, ir ar tokios medžiagos galėjo praityje būti gyvybės atsiradimo Žemėje šaltinis? Kaip prognozuoti meteorų keliamą pavojų palydovams, be kurių sunkiai įsivaizduojame šiuolaikinį ryšį, tiksliai meteorologines prognozes ir pan.? Kokį pavojų kelia meteoroidai Mėnulyje, kur ateityje svajojama įrengti nuolat veikiančias kosmines bazines? Tikslių atsakymų į šiuos klausimus kol kas, deja, nėra, tačiau nebeįtina, kad nuo meteorų astronomijos žinių žymia dalimi priklauso net tik kosminių skrydžių saugumas, bet ir galbūt pačios civilizacijos Žemėje išlikimas. Prisiliesti prie šių dangaus paslapčių gali kiekvienas – tereikia pakelti akis į žvaigždėtą dangų, nes kiekvieną naktį ištiesus metus virš mūsų verda nuostabus ir nepakartojamas dangaus gyvenimas.

Bibliografija

1. F. L. Whipple, *A comet model. II. Physical relations for comets and meteors*, *Astrophysical Journal* **133**, 1951, 464–473.
2. P. Jenniskens, *Meteor showers and their parent comets*, Cambridge University Press, 2008.
3. R. Arlt, J. Rendtel, P. Brown, V. Velkov, W. K. Hocking, J. Jones, *The 1998 outburst and history of the June Bootid meteor shower*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **308**, 1999, 887–896.
4. Z. Ceplecha, J. Borovička, W. G. Elford, D. O. ReVelle, R. L. Hawkes, V. Porubčan, M. Šimek, *Meteor phenomena and bodies*, *Space Science Reviews* **84**, 1998, 327–471.
5. P. Jenniskens, *Meteor stream activity. I. Annual showers*, *Astronomy & Astrophysics* **287**, 1994, 990–1013.
6. R. Arlt, *New limiting magnitude tables*, *Journal of the International Meteor Organization* **27**, 1999, 6–18.
7. R. Arlt, J. Rendtel, *A new working list of meteor showers*, *Journal of the International Meteor Organization* **34**, 2006, 77–84.
8. P. Jenniskens, *Meteor stream activity. II. Meteor outbursts*, *Astronomy & Astrophysics* **295**, 1995, 206–235.
9. P. Brown, J. Rendtel, *The Perseid meteoroid stream: characterization of recent activity from visual observations*, *Icarus* **124**, 1996, 414–428.
10. P. Jenniskens, H. Betlem, M. de Lignie, C. Ter Kuile, M. C. A. Van Vliet, J. Van't Leven, M. Koop, E. Morales, T. Rice, *On the unusual activity of the Perseid meteor shower (1989–96) and the dust trail of comet 109P/Swif-Tuttle*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **301**, 1998, 941–954.
11. A. Dubietis, *The 2004 Perseid outburst from Lithuania*, *Journal of the International Meteor Organization* **32**, 2004, 129–130.
12. J. Rendtel, *Evolution of the Geminids observed over 60 years*, *Earth, Moon, Planets* **95**, 2004, 27–32.
13. P. Jenniskens, *2003 EH1 is the Quadrantid shower parent comet*, *The Astronomical Journal* **127**, 2004, 3018–3022.
14. J. Rendtel, *Three days of enhanced Orionid activity in 2006 - meteoroids from a resonance region?*, *Journal of the International Meteor Organization* **35**, 2007, 41–45.
15. R. Arlt, J. Rendtel, P. Bader, *The 2007 Orionids from visual observations*, *Journal of the International Meteor Organization* **36**, 2008, 55–60.
16. A. Dubietis, R. Arlt, *Thirteen years of Lyrids from 1988 to 2000*, *Journal of the International Meteor Organization* **29**, 2001, 119–133.
17. P. Atreya, A. A. Christou, *The 2007 Aurigid meteor outburst*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **393**, 2009, 1493–1497.
18. A. Dubietis, R. Arlt, *Taurid resonant-swarm encounters from two decades of visual observations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **374**, 2007, 890–894.
19. P. Brown, *The Leonid meteor shower: historical visual observations*, *Icarus* **138**, 1999, 287–308.
20. R. Arlt, *Summary of 1998 Draconid outburst observations*, *Journal of the International Meteor Organization* **26**, 1998, 256–259.
21. R. H. McNaught, D. J. Asher, *Leonid dust trails and meteor storms*, *Journal of the International Meteor Organization* **27**, 1999, 85–105.
22. P. Jenniskens, J. Moilanen, E. Lyytinen, I. Yrjölä, J. Brower, *The 2005 October 5 outburst of October Camelopardalids*, *Journal of the International Meteor Organization* **33**, 2005, 125–128.
23. M. D. Campbell-Brown, J. Jones, *Annual variation of sporadic radar meteor rates*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **367**, 2006, 709–716.
24. A. Dubietis, R. Arlt, *Periodic variability of visual sporadic meteor rates*, *Earth, Moon, Planets* **106**, 2010, 105–111.
25. D. Nesvorný, P. Jenniskens, H. F. Levison, W. F. Bottke, D. Vokrouhlický, M. Gounelle, *Cometary origin of the Zodiacal cloud and carbonaceous micrometeorites. Implications for hot debris disks*, *The Astrophysical Journal* **713**, 2010, 816–836.
26. S. G. Love, D. E. Brownlee, *A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust*, *Science* **262**, 1993, 550–553.
27. P. Brown, R. E. Spalding, D. O. ReVelle, E. Tagliaferri, S. P. Worden, *The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth*, *Nature* **420**, 2002, 294–296.
28. E. M. Shoemaker, *Asteroid and comet bombardment of the Earth*, *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* **11**, 1983, 461–494.
29. D. J. Asher, D. I. Steele, *On the possible relation between the Tunguska bolide and comet Encke*, *Planetary and Space Science* **46**, 1998, 205–211.
30. P. Brown, *A preliminary report on the Chelyabinsk fireball/airburst*, *Journal of the International Meteor Organization* **41**, 2013, 22.
31. J. S. Stuart, *A Near-Earth Asteroid population estimate from LINEAR survey*, *Science* **294**, 2001, 1691–1693.
32. D. J. Asher, M. Bailey, V. Emelyanenko, B. Napier, *Earth in the cosmic shooting gallery*, *The Observatory* **125**, 2005, 319–322.
33. J. L. Ortiz, P. V. Sada, L. R. Bellot Rubio, F. J. Aceituno, J. Aceituno, P. J. Gutierrez, U. Thiele, *Optical detection of meteoroidal impacts on the Moon*, *Nature* **405**, 2000, 921–923.
34. M. Beech, *Venus-intercepting meteoroid streams*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* **294**, 1998, 259–264.
35. A. A. Christou, K. Beule, *Meteoroid streams at Mars: possibilities and implications*, *Planetary and Space Science* **47**, 1999, 1475–1485.
36. F. Selsis, M. T. Lemont, J. Vaubaillon, J. F. Bell, *A martian meteor and its parent comet*, *Nature* **435**, 2005, 581.

Terminų žodynas

A

Abliacija – smarkiai įkaitusio paviršiaus išgarinimas

Adiabatinis vėsimas – dujų atvėsimas joms staigiai plečiantis

Advekcinis rūkas – rūkas, atsirandantis šilto (šalto) oro masei užslinkus ant šalto (šilto) paviršiaus

Aerozoliai – atmosferoje sklindančios įvairios dalelės ir cheminiai junginiai

Afelis – labiausiai nutolęs nuo Saulės kosminio kūno orbitos taškas

Aklasis ruožas – apatinio miražo dalis, kurioje pranyksta objekto vaizdas

Albedas – atspindžio nuo nelygių paviršių koeficientas (kritusios ir atspindėtos šviesos intensyvumų santykis)

Alfa dalelė – helio atomo branduolys, atsirandantis branduolinių reakcijų metu

Amalas – giedro dangaus blykčiojimas naktį

Andromedos ūkas – pliki akimi matoma galaktika Andromedos žvaigždynė, esanti 2,5 mln. šviesmečių nuo Žemės

Antisutemų segmentas – žr. Veneros juosta

Antrinė vaivorykštė – vaivorykštė, susidaranti šviesos spinduliui vandens lašo viduje atsispindint du kartus

Antisaulė – žr. *antheis*

Antheis – šviesi dėmė ant parhelių rato priešingoje Saulei pusėje

Apatiniojo aukšto debesys – žr. žemieji debesys

Apatinis miražas – miražas, kai objekto vaizdas matomas žemiau, nei jis yra iš tikrųjų

Apibrėžtinis halas – susiliečiantys viršutinis ir apatinis tangentiniai lankai

Asteroidas – mažoji saulės sistemos planeta

Astronominė naktis – metas, kai Saulė yra daugiau nei 16 laipsnių žemiau horizonto

Astronominė refrakcija – žr. atmosferos refrakcija

Astronominė sutema – metas, kai Saulė yra 12–16 laipsnių žemiau horizonto

Astronominis vienetas – vidutinis atstumas nuo Žemės iki Saulės, kuris apytikriai lygus 150 mln. km

Atmosferos ekstinkcija – šviesos intensyvumo nuostoliai dėl sugerties ar sklaidos atmosferoje

Atmosferos liūtis – antrinių dalelių srautas, kurį sukelia į atmosferą iš kosmoso įskriejusios didelės energijos elektringosios dalelės (kosminiai spinduliai)

Atmosferos refrakcija – šviesos spindulių sklaidimo krypties pasikeitimas dėl jų lūžio atmosferos ore

Atmosferos slėgis – jėga, kuria vertikalus oro stulpas slegia Žemės paviršiaus ploto vienetą

Atmosferos sunkio bangos – troposferoje atsirandančios ir į viršų kylančios tankio bangos, kurios užgęsta ties mezopauze

Atmosferos skaidrumas – žr. atmosferos ekstinkcija

Atmosferos švytėjimas – pačių viršutinių atmosferos sluoksnių švytėjimas dėl Saulės ultravioletinės spinduliuotės poveikio

Atošvaistė – Zodiako debesies atgaline kryptimi išsklaidyta Saulės šviesa

Atspindžio halas – halas, susidarantis tik dėl šviesos atspindžio nuo ledo kristalų plokštumų

Aukštieji kamuoliniai debesys – 2–7 km aukštyje esantys balti ar melsvai pilkšvi debesys, sudaryti iš nedidelių apskritų fragmentų

Aukštieji sluoksniniai debesys – 2–7 km aukštyje susidarantys išsisiniai melsvai pilki debesys

Aukštieji debesys – *debesys, susidarantys 5–13 km aukštyje*

Aura – *ant rasotos žolės krintantį šešėlį supantis švytėjimas*

Aureolė – *keleto laipsnių skersmens palei pat šviesulį esanti balta vainiko sritis*

Aurigidai – *rugsėjo pradžioje matomas mažasis meteorų srautas, kurio radiantas yra Vežėjo žvaigždyne*

B

Bišopo žiedas – *didelė, keliolikos laipsnių skersmens blyški aureolė, atsirandanti dėl šviesos difrakcijos mažose dulkelėse*

Briusterio kampas – *kampas, kuriuo nuo paviršiaus atspindima tik tam tikros poliarizacijos šviesa, arba nepoliarizuota šviesa yra poliarizuojama*

Bravės lankas – *žr. zenitinis lankas*

Brokeno vaiduoklis – *žr. glorijs*

Bokštiškieji debesys – *konvekciniai debesys, kurių vertikalus matmuo kur kas didesnis nei horizontalus*

Bolidas – *meteoras, kurio regimasis ryškis didesnis už maksimalų regimąjį Jupiterio ryškį*

Č

Čapmano ciklas – *deguonies ir ozono tarpusavio virsmų ciklas*

D

Daugkartinė šviesos sklaida – *daug kartų vykstanti sklaida, kai sklaidoma jau kartą išsklaidyta šviesa*

Debesys – *ore sklandančios vandens lašų ar ledo kristalų sancaupos*

Debesų kontrasto lankai – *rūko juostos atitikmuo debesyse*

Deimantų dulkės – *mažyčiai ore sklendantys ledo monokristalai, ledinis rūkas*

Delta akvaridai – *liepos mėnesį matomas mažasis meteorų srautas, kurio radiantas yra Vandenio žvaigždyne*

Didysis halas – *46° spindulio halas aplink šviesulį*

Didieji meteorų srautai – *meteorų srautai, kurių zenitinis valandinis skaičius maksimumo metu didesnis nei 50 meteorų per valandą*

Difrakcija – *šviesos bangų užlinkimas už mažų kliūčių, pvz., vandens lašelių*

Difrakcijos kampas – *kampas, kuriuo už kliūties užlinksta šviesos spindulys*

Dispersija – *medžiagos lūžio rodiklio priklausomybė nuo šviesos bangos ilgio*

Dobsono vienetas – *ozono sluoksnio storio matavimo vienetas*

Drakonidai – *spalio pradžioje matomas periodinis meteorų srautas, kurio radiantas yra Drakono (Slibino) žvaigždyne*

Dulkėtoji plazma – *jsielektrinusų dulkių ir kitų dalelių mišinys*

E

Ekliptika – *regimasis Saulės kelias dangaus skliaute*

Ekliptikos plokštuma – *plokštuma, kurioje yra Žemės ir kitų planetų orbitos*

Ekstinkcija – *žr. atmosferos ekstinkcija*

Elektromagnetinė banga – *energijos forma, kurią spinduliuoja arba sugeria atomai ir molekulės. Vakuume sklinda šviesos greičiu,*

o skaidrioje medžiagoje – n kartų lėčiau nei vakuume, čia n – medžiagos lūžio rodiklis

Elektromagnetinė indukcija – *reiškinys, kai elektros srovė kuria magnetinį lauką ir atvirkščiai*

Elektronas – elementarioji dalelė, turinti mažiausią neigiamą elektros krūvį

Elfai – spinduliuotė ir labai žemo dažnio trikdžiai, kylantys iš elektromagnetinių impulsinių šaltinių, elektros išlydis jonosferoje

Eta akvaridai – gegužės pradžioje matomas didysis meteorų srautas, kurio radiantas yra Vandenio žvaigždyne

Eteris – neegzistuojanti substancija, užpildanti kosminę erdvę

F

Fata Morgana – didelis plevenantis viršutinis mirażas

Fluorescencija – sužadintų atomų ar molekulių švytėjimas

Fotodisociacija – molekulių suardymas veikiant šviesai

Fotonas – šviesos kvantas; dalelė, atitinkanti elektromagnetinę bangą

Fotosfera – regimoji Saulės atmosfera

Fraunhoferio linijos – įvairių cheminių elementų sugerties linijos Saulės fotosferos spektre

Fraunhoferio difrakcija – žr. difrakcija

Freonai – pramonėje naudojami ar naudoti chloro, fluoro ir vandenilio junginiai, kurie patekę į stratosferą suyra ir ardo ozono sluoksnį

G

Gama spinduliai – paties mažiausio bangos ilgio elektromagnetinės bangos, pasižyminčios labai stipriu jonizuojančiu poveikiu

Geminidai – gruodžio mėnesį matomas didysis meteorų srautas, kurio radiantas yra Dvynių žvaigždyne

Giedro oro srovė – elektros srovė, nuolat tekanti atmosferoje dėl potencialų skirtumo tarp Žemės paviršiaus ir jonosferos

Glorija – spalvoti ratilai aplink rūkė ar debesyse esantį stebėtojo šešėlį

Gravitacinis radiusas – spindulys sferos, iki kurios turi būti suspaustas objektas, kad taptų juodąja skylė

Griaustinis – garso (akustinės) bangos, atsirandančios plečiantis smarkiai įkaitusiam elektros išlydžio kanalui

H

Halas – švytintys ratai, lankai, puslankiai, spalvotos ir nespaltvotos dėmės, išsidėstę aplink šviesulį

Hidrologinis ciklas – nuolat vykstantis uždaras vandens garavimo, kondensacijos ir kritulių iškritimo ciklas

Hidrometeorai – krituliai

Helovino pašvaistė – 2003 metais labai stiprios magnetinės audros sukelta šiaurės pašvaistė

Horizontas – regimoji riba tarp žemės ir dangaus

Horizontinis lankas – spalvingas halo lankas, nutolęs 46o atstumu į apačią nuo Saulės

I

Inertinės dujos – dujos, sudarytos iš atomų, kurie nesijungia tarpusavyje ir nesudaro junginių su kitais cheminiais elementais

Infraraudonoji spinduliuotė – akiai nematoma spinduliuotė, kurios bangos ilgis didesnis nei raudonos šviesos (650 nm–100 μm)

Interferencija – šviesos bangų mūša, kai vienodos fazės bangos viena kitą stiprina, o priešingos fazės gesina

Interferenciniai vaivorykštės lankai – šviesos ir tamsios juostos, esančios po vaivorykštės lanku

Inversijos sluoksnis – oro sluoksnis, kuriame temperatūra didėja didėjant aukščiui

Irisacija – debesų spalvinimasis dėl difrakcijos reiškinio

Įsimagnetinančios uolienos – mineralai, kurie atvėsdami įsimagnetina pagal Žemės magnetinio lauko kryptį

J

Jonas – atomas, netekęs bent vieno elektrono ir turintis teigiamą elektros krūvį

Jonizacija – reiškinys, kai nuo atomo ar molekulės atplėšiamas elektronas

Jonizacijos banga – akiai nematoma banga (lyderis), formuojanti laidų kanalą, kuriuo sklinda žaibo iškrova

Jonizuojanti spinduliuotė – žr. rentgeno ir gama spindulius

Jonosfera – žr. termosfera

K

Kamuoliniai debesys – 0,5–6 km aukštyje susidarantys įvairaus dydžio debesys, savo išvaizda panašūs į dangumi plaukiančius vatos gumulus ar nemažus dribsnius

Kamuoliniai lietaus debesys – kamuoliniai debesys, turintys pačių didžiausių vertikalių raidą

Karnegio kreivė – kreivė, vaizduojanti elektrinio lauko kitimą ties Žemės paviršiumi per parą

Kaukas – rusenantis elektros išlydis mezosferoje

Ketvirtosios eilės vaivorykštė – vaivorykštė, susidaranti, kai šviesos spindulys vandens lašo viduje atsispindi 4 kartus

Kintamieji atmosferos komponentai – dujos, kurių tūrio dalys keičiasi keičiantis aukščiui ar bėgant laikui

Kometa – uždara arba paraboline orbita aplink Saulę skriejantis nedidelis kosminis kūnas, sudarytas iš uolienų ir ledo

Koncentrinis halas – apskritas halas, kurio centre yra šviesulys

Kondensacija – procesas, kai, nukritus temperatūrai, vandens garai virsta lašeliais

Kondensacijos centrai – mažos dalelės, kurios yra kondensacijos ar užšalimo katalizatoriai

Kondensacijos pėdsakai – aukštai skrendančių lėktuvų danguje paliekami pėdsakai

Konvekcija – įkaitusio (atvėsusio) oro masių kilimas (leidimasis)

Kosminės dulkės – patys smulkiausieji meteoroidai, kurių vidutinis matmuo apie 100 μm

Kosminiai spinduliai – labai didelės energijos elektringosios dalelės, atsirandančios sprogių supernovoms

Krūvininkas – judri elektringoji dalelė

Kvadrantidai – sausio pradžioje matomas didysis meteorų srautas, kurio radiantas yra tarp Jaučiaganio, Drakono (Slibino), Heraklio ir Didžiųjų bei Mažųjų Grįžulo Ratų žvaigždynų

L

Laisvojo lėkio kelias – vidutinis atstumas, kurį nusukria dalelė, kol susiduria su kita dalele

Laužiamoji geba – medžiagos ir vakuume lūžio rodiklių skirtumas

Ledinis rūkas – žr. deimantų dulkės

Leonidai – lapkričio viduryje matomas periodinis meteorų srautas, garsus meteorų lietumis, kurio radiantas yra Liūto žvaigždyne

Lęšiškieji debesys – debesų rūšis, apibūdinanti lęšio formos debesis

Lyderis – žr. jonizacijos banga

Lygiadienis – laikas pavasarį ir rudenį, kai susilygina dienos ir nakties ilgumas

Lyridai – balandžio mėnesį matomas mažasis meteorų srautas, kurio radiantas yra Lyros žvaigždyne

Lūžio rodiklis – parametras, apibūdinantis šviesos sklaidimo greitį ir šviesos spindulių lūžį medžiagoje

M

Magnetinis perjungimas – *reiškinys, kai jau nuo Žemės nutolusios Saulės vėjo dalelės gražinamos atgal iš sričių, kur susikerta Žemės ir Saulės magnetinių laukų linijos*

Magnetinis poliūs – *sritis, iš kurios išeina (šiaurinis poliūs) arba į kurią sueina (pietinis poliūs) Žemės magnetinio laiko linijos*

Magnetinio lauko anomalijos – *Žemės paviršiaus sritys su padidėjusiu ar sumažėjusiu magnetinio lauko stipriu*

Magnetinė audra – *stiprus Žemės magnetinio lauko iškraipymas dėl Saulės vėjo*

Magnetinė subaudra – *Žemės magnetinio lauko iškraipymas dėl magnetinio perjungimo reiškinio*

Maunderio minimumas – *gilus Saulės aktyvumo minimumas, kuris truko nuo 1645 iki 1715 m. Tuomet Saulės dėmės buvo beveik visai išnykusios*

Mažasis halas – *22^o spindulio halas aplink šviesulį*

Mažiausio nuokrypio kampas – *žr. minimalaus atlenkimo kampas*

Mažieji meteorų srautai – *meteorų srautai, kurių zenitinis valandinis skaičius maksimumo metu siekia 5–10 meteorų per valandą*

Melsvoji čiurkšlė – *elektros išlydis nuo debesies viršaus į stratosferą*

Mėlynasis žybsnis – *žr. žaliasis žybsnis*

Menama Saulė – *žr. parheliai*

Metastabilūs energijos lygmenys – *ilgai gyvuojantys sužadinti atomų ar molekulių energijos lygmenys*

Meteoras – *trumpas šviesos žybsnis, kurį sukelia į atmosferą įlėkęs meteoroidas*

Meteorų lietus – *itin didelis meteorų srauto aktyvumas*

Meteorų srautas – *iš to paties regimojo taško dangaus skliaute išlėkiantys meteorai, turintys beveik identiškas orbitas ir kilę iš to paties kosminio kūno*

Meteoritas – *ant Žemės paviršiaus nukritęs kosminis kūnas*

Meteoroidas – *mažos kometų ir asteroidų skeveldros, judančios elipsinėmis orbitomis aplink Saulę*

Meteoroidų srautas – *iš to paties kosminio kūno kilusios mažos skeveldros, judančios panašiomis orbitomis*

Mezopauzė – *šalčiausia mezosferos vieta, esanti 85 km aukštyje (viršutinė mezosferos riba)*

Mezosfera – *trečiasis atmosferos sluoksnis, esantis 50–85 km aukštyje*

Mezosferos debesys – *žr. sidabriškieji debesys*

Mezosferos siena – *sritis, skirianti dviejų labai skirtingų temperatūrų oro masės mezosferoje*

Mėnulio iliuzija – *optinė apgaulė, kai ties horizontu esančio Mėnulio diskas atrodo didesnis nei tuomet, kai Mėnulis būna pakilęs aukštai*

Mėnulio vaivorykštė – *vaivorykštė, susidaranti Mėnulio šviesoje*

Mi sklaida – *šviesos sklaida nuo bet kokių mažų objektų, pvz., vandens lašelių, dulkių, aerozolių*

Minimalaus atlenkimo kampas – *mažiausias galimas šviesos spindulių atlenkimo nuo jų pradinės krypties kampas vandens lašuose ar ledo kristaluose (prizmėse)*

Miražas – *dėl neįprastos atmosferos refrakcijos išnykęs, atsiradęs ar smarkiai iškraipytas objekto vaizdas*

Monochromatinė šviesa – *vienspalvė šviesa*

Monodispersinis skirstinys – *vienodo dydžio dalelių skirstinys*

Monokristalas – *visiškai taisyklingos formos kristalas be defektų*

N

Natrio garų sluoksnis – 90–95 km aukštyje esantis sluoksnis, kuriame palyginti didelė natrio garų koncentracija

Naujosios Žemės efektas – viršutinis poliarinis mirażas esant ypač didelei atmosferos refrakcijai

Navigacinė sutema – metas, kai Saulė yra 6–12 laipsnių žemiau horizonto

Netikra aušra – žr. Zodiako šviesa

O

Opozicinis taškas – menamas taškas, esantis priešingoje Saulei pusėje

Optinis tankis – dydis, nusakantis kritusios (pradinės) ir praėjusios (pasiekusios stebėtoją) pro optinę terpę – atmosferą, debesį, rūką ar dulkių stulpą – šviesos kiekio, pvz., intensyvumo, santykį

Oras – atmosferos dujų mišinys, kuriuo kvėpuojame

Orbita – trajektorija, kuria juda kosminis kūnas

Oro švytėjimas – ore išsklaidyta Saulės šviesa, kuri patenka į žvilgsnio liniją ir sumuojasi su stebimo objekto šviesa

Orionidai – spalio mėnesį matomas didysis meteorų srautas, kurio radiantas yra Oriono žvaigždyne

Ozonas – nestabili triatomė deguonies molekulė, gerai sugerianti ultravioletinę Saulės šviesą

Ozono sluoksnis – sluoksnis stratosferoje, kuriame yra didelė ozono dujų koncentracija

Ozono skylė – smarkus ir staigus sezoninis ozono sluoksnio nusurdimas ties poliarinėmis sritimis

P

Padengtieji debesys – virš storųjų ir bokštiškųjų kamuolinių debesų viršūnių susidariusios „kepurės“ (debesų atmaina)

Paleomagnetizmas – įsmagnetinančių uolienų tyrimo pagrindu nustatyta Žemės magnetinio lauko istorija

Panspermija – hipotezė, teigianti, kad gyvybė į Žemę atkeliavo iš kosmoso su kometomis ir meteoritais

Papildomi vaivorykštės lankai – žr. interferenciniai vaivorykštės lankai

Paranhelis – šviesi dėmė ant parhelių rato, esanti 120° kampiniu atstumu nuo Saulės

Parheliai – abipus Saulės 22° kampiniu atstumu nutolusios ryškios ir spalvingos dėmės

Parhelių ratas – šviesus nespaltotas ratas, esantis Saulės aukštyje ir juosiantis visą dangaus sferą

Parselena – Mėnulio parhelis

Pastovieji atmosferos komponentai – dujos, kurių tūrio dalys pastovios visame aukštyje

Pašvaisčių ovalas – ovalo formos sritys ties Žemės magnetiniais poliais, kuriose švyti pašvaisčių

Paukščių Takas – per visą dangų nusidriekusi blausi netaisyklinga juosta, kurios švytėjimą sukuria mūsų galaktikos vijų plokštumoje esančios žvaigždės

Pelenų šviesa – saulės neapšviestos Mėnulio disko dalies švytėjimas

Perihelis – arčiausias Saulei kosminio kūno orbitos taškas

Periodiniai meteorų srautai – meteorų srautai, kurie periodiškai suaktyvėja juos sukūrusioms kometoms praskriejant perihelij

Perkūnija – žr. griaustinis

Perlamutriniai debesys – stratosferoje 20–30 km aukštyje susidarantys poliariniai debesys

Perseidai – rugpjūčio mėnesį matomas vienas didžiausių ir gražiausių meteorų srautų, kurio radiantas yra Persejo žvaigždyne

Perspektyvos efektas – *regimasis geometrinis lygiagrečių trimačių objektų vaizdo iškreipimas projektuojant juos ant dvimačio paviršiaus, pvz., ant dangaus sferos*

Peršaldytas skystis – *skystis, kuris, esant žemai temperatūrai, negali užšalti dėl kondensacijos centrų trūkumo*

Pėdsakiniai atmosferos komponentai – *dujos, kurių kiekiai atmosferoje yra labai maži*

Pietų pašvaistė – *Pietų pusrutulyje matoma pašvaistė*

Pilietinė sutema – *metas, kai Saulė yra 0–6 laipsniai žemiau horizonto*

Planetinės bangos – *didžiulės aukštuosiuose atmosferos sluoksniuose atsirandančios bangos dėl Mėnulio kuriamų atmosferos potvynių ir atoslūgių*

Plazmos šleifas – *tolyn nuo Žemės palei magnetinio laiko linijas nusidrikęs Saulės vėjo dalelių šleifas*

Plejados – *žr. Sietynas*

Plunksniniai debesys – *5–13 km aukštyje esantys iš ledo kristalų sudaryti ploni, padriki debesys, savo išvaizda panašūs į plunksnas*

Plunksniniai kamuoliniai debesys – *5–8 km aukštyje susidarantys smulkių, pusiau skaidrių (baltų) mažyčių apvalių elementų masių pavidalo debesys*

Plunksniniai sluoksнинiai debesys – *plonas ir permatomas ištisinis aukštųjų debesų šydas*

Poliarinis sukuryš – *žiemos mėnesiais virš poliariinių sričių susidarantis milžiniškas stratosferos ciklonas*

Poliariniai mezosferos debesys – *žr. sidabriškieji debesys*

Poliariniai mezosferos vasaros aidai – *radarais registruojamas radijo bangų atspindys nuo mezosferoje esančių ledo kristalų sankaupų*

Poliariniai stratosferos debesys – *žr. perlamutriniai debesys*

Polidispersinis skirstinys – *skirtingo dydžio dalelių skirstinys*

Polikristalas – *netaisyklingos ar sudėtingos formos kristalas, pvz., snaigė*

Potencialiai pavojingi objektai – *nedideli kosminiai kūnai, kurių orbitos labai priartėja prie Žemės orbitos arba ją kerta*

Pozitronas – *elektrono antidalelė, turinti teigiamą elektros krūvį ir atsirandanti radioaktyvaus skilimo metu*

Pramuštųjų skylių debesys – *iš peršaldyto skysčio lašelių sudaryti viduriniojo aukšto debesys, per kuriuos praskrisdami lėktuvai „išmuša“ ilgai išliekančias skyles*

Prieblandos antispuinduliai – *prieblandos spinduliai, matomi priešingoje Saulei pusėje*

Prieblandos spinduliai – *šviesūs ir tamsūs danguje nutįsę Saulės spinduliai – debesų šešėliai*

Purpurinės sutemos – *purpurinis dangaus švytėjimas po Saulės laidos dėl šviesos sklaidos stratosferoje*

R

Radiantas – *dėl perspektyvos efekto atsirandantis regimasis taškas dangaus sferoje, iš kurio išlekia to paties srauto meteorai*

Radio bangos – *elektromagnetinė spinduliuotė, kurio bangos ilgis didesnis nei 1 cm*

Radioaktyvumas – *savaiminis sunkesniųjų atomų branduolių virsmas lengvesniais, kartu išspinduliuojant elektringąsias daleles ir skvarbius spindulius*

Regimoji šviesa – *akiai matoma elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgiai yra 420–650 nm intervale*

Refrakcinis halas – *halas, susidarantis dėl šviesos spindulių lūžio ledo kristaluose*

Refrakcijos kampas – *skirtumas tarp regimosios ir tikrosios šviesulio padėčių dangaus skliaute*

Relėjaus sklaida – *šviesos sklaida nuo oro molekulių ir mikroskopinių oro tankio netolygumų*

Rentgeno spinduliuotė – *trumpabangė jonizuojanti elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis nuo 0,01 iki 10 nm*

Ritininiai debesys – didžiuliai, pailgi ritinio formos debesys

Rusenantis išlydis – šaltas elektros išlydis žemo slėgio dujose

Rūkas – priežeminiame oro sluoksnyje susidariusių vandens lašelių sankaupa

Rūko spinduliai – žr. *prieblandos spinduliai*

Rūko juosta – rūke susidaranti bespalvė vaivorykštė

S

Saulabrolis – žr. *parhelis*

Saulės ciklas – apytiksliai 11 metų ciklas, per kurį kinta Saulės aktyvumas

Saulės dėmė – Saulės fotosferos sritis su sumažėjusia temperatūra ir magnetinio lauko anomalija

Saulėgrąža – laikas, kai yra ilgiausia diena (vasaros saulėgrąža) arba ilgiausia naktis (žiemos saulėgrąža). Vasaros saulėgrąžos metu Saulė pasiekia patį aukščiausią pakilimo tašką, o žiemos saulėgrąžos metu – patį žemiausią pakilimo tašką

Saulės ilguma – astronomijoje naudojamas laiko matas, skaičiuojamas laipsniais pagal Saulės padėtį dangaus skliaute. 1 Saulės ilgumos laipsnis atitinka maždaug 1 parą

Saulės stulpas – siauras Saulės „spindulys“, atsiradęs dėl šviesos atspindžio nuo ledo kristalų plokštumų

Saulės vainikas – Saulės plazminė atmosfera

Saulės vėjas – iš Saulės nuolat sklindantis elektringųjų dalelių srautas

Saulės žybsnis – per trumpą laiką išmestų elektringųjų dalelių debesys, susidarantis aukštesnės temperatūros aktyviosios Saulės fotosferos srityse

Sidabriškieji debesys – ledo kristalų debesys, susidarantys mezosferoje 80–85 km aukštyje

Sietynas – gražus padrikasis žvaigždžių spiečius, esantis Tauro žvaigždyne

Skylėtieji debesys – debesų porūšis, apibūdinantis debesis, kuriuose atsiranda nedidelių skylių

Sluoksniniai debesys – kelių šimtų metrų – 2 km aukštyje esantis tamsiai pilkas vienalytis žemų debesų sluoksnis

Sluoksniniai kamuoliniai debesys – žemi balkšvos ar pilkos spalvos debesys, sudaryti iš viename sluoksnyje išsidėsčiusių pailgų ar apvalių elementų

Sluoksniniai lietaus debesys – žemi, stori, beformiai, tolygiai pilki debesys, iš kurių krinta krituliai

Sniego spindesys – akinantis spindesys, Saulės šviesai atspindint nuo ant sniego paklotės esančių snaigių ir ledo monokristalų

Sniego žaižaravimas – žr. *sniego žerėjimas*

Sniego žerėjimas – įvairiaspalvis sniego švytėjimas dėl šviesos spindulių lūžio ant sniego paklotės esančiuose ledo monokristaluose

Solitonas – stabilus, ilgai išliekanti pavienė banga, susidaranti dėl aplinkos netiesiškumo

Spinduliavimas – reiškinys, kai sužadinta medžiaga energijos perteklių išspinduliuoja šviesos kvanto (fotono) ir jį atitinkančios elektromagnetinės bangos pavidalu

Spinduliuotinis rūkas – žemumose, atvėsus priežemiam oro sluoksniui, besiformuojantis rūkas

Sporadiniai meteorai – atsitiktiniai pavieniai meteorai, nepriskiriami jokiems meteorų srautams

Standartinė atmosfera – atmosfera, kurioje, didėjant aukščiui, temperatūra mažėja 6,5 °C/km sparta

Stratosfera – antrasis atmosferos sluoksnis, esantis 15–50 km aukštyje

Stratopauzė – šilčiausia stratosferos vieta, esanti 50 km aukštyje (viršutinė stratosferos riba)

Stratosferos debesys – žr. *perlamutriniai debesys*

Sublimacija – garavimas nesilydant

Subsaulė – akinantis Saulės atspindys nuo iš ledo kristalų sudarytų debesų viršutinės dalies, matomas žemiau nei tikroji Saulė

Sugertis – reiškinys, kai šviesos kvantas ir jį atitinkanti elektromagnetinė banga išnyksta savo energiją perduodama medžiagai ir ją sužadindama

Supersaulė – akinantis saulės atspindys nuo iš ledo kristalų sudarytų debesų apatinės dalies, matomas aukščiau nei tikroji Saulė

Sutema – paros metas tarp Saulės laidos (tekos) ir nakties

Sutemų segmentas – dangaus skliauto sritis Saulės pusėje, kuri sutemos metu yra šviesesnė už likusią dangaus skliauto dalį

Š

Šiaurės pašvaistė – Saulės vėjo dalelių sukeltas viršutinių atmosferos sluoksnių švytėjimas

Šiltnamio efektas – atmosferos įšilimas dėl molekulių dujų perspinduliuojamos šiluminės spinduliuotės

Šiluminė spinduliuotė – ilgabangė infraraudonoji spinduliuotė, kurios bangos ilgiai yra 5–100 μm intervale

Šiluminis žaibas – žr. amalas

Šluotiškieji debesys – debesų atmaina, apibūdinanti debesį, iš kurių nusidriekia kritulių juostos, nepasiekiančios žemės paviršiaus

Šventojo Elmo ugnys – smarkiai įelektrintų objektų švytėjimas dėl vainikinio išlydžio

Šviesos bangų difrakcija – žr. difrakcija

Šviesos bangų interferencija – žr. interferencija

Šviesos sklaida – reiškinys, kai šviesos, bangos sųveikaudamos su oro molekulėmis, aerozoliais, dulkėmis ir pan., pakeičia sklaidimo kryptį

Šviesos stulpas – siauras „spindulys“, atsiradęs dėl dirbtinių šviesos šaltinių spindulių atspindžio nuo ledo kristalų

Šviesos tarša – naktį matoma atmosferoje išsklaidyta dirbtinių šviesos šaltinių šviesa

T

Tamsioji Aleksandro juosta – tamsi juosta, skirianti pagrindinę ir antrinę vaivorykštes

Tangentiniai lankai – kreivi lankai, liečiantys mažąjį halą jo viršutiniame (viršutinis tangentinis lankas) ir apatiniame (apatinis tangentinis lankas) taškuose

Tarptautinis Saulės dėmių skaičius – Saulės aktyvumo matas, apskaičiuojamas pagal Saulės dėmių ir jų grupių skaičių

Tauridai – spalio–lapkričio mėnesiais matomas mažasis meteorų srautas, kurio radiantas yra Tauro žvaigždynė

Tešmeniškieji debesys – debesų atmaina, apibūdinanti į didžiulį pritvinkusį karvės tešmenį panašius debesis

Termosfera – ketvirtas, pats aukščiausias, atmosferos sluoksnis, esantis aukščiau kaip 90 km

Trianguliacija – metodas, naudojamas atmosferoje esančių objektų aukščiui nustatyti

Trečiosios eilės vaivorykštė – vaivorykštė, susidaranti šviesos spinduliui atsispindint vandens lašo viduje 3 kartus

Tropopauzė – šalčiausia troposferos vieta, esanti 10–15 km aukštyje (viršutinė troposferos riba)

Troposfera – žemiausias ir tankiausias atmosferos sluoksnis

Trumpalaikiai švytintys įvykiai – bendras elektros išlydžių aukštesniuose atmosferos sluoksniuose pavadinimas

Tunguskos meteoritas – 1908 m. virš Sibiro sprogęs milžiniškas meteoritas, didžiausia modernių laikų kosminė katastrofa

Turbulentiškumas – greitas skirtingos temperatūros oro masių maišymasis

U

Ultravioletinė spinduliuotė – akiai nematoma elektromagnetinė spinduliuotė, kurios bangos ilgis trumpesnis nei violetinės šviesos (10–420 nm)

V

Vainikas – spalvoti ratilai aplink šviesulį

Vainikinis išlydis – nuo įelektrinto paviršiaus į orą vykstantis išlydis, nesant elektriniam oro pramušimui

Vainiko medžiagos pliūpsnis – milžiniškas per trumpą laiką išmestų elektringųjų dalelių debes, atsirandantis ties Saulės dėmėmis

Vaivorykštė – spalvingas puslankis, susidarantis priešingoje Saulei pusėje Saulės šviesai lūžtant ir atsispindint vandens lašuose

Vaivorykštės integralas – matematinė išraiška, kuria remiantis galima apskaičiuoti vaivorykštės spalvų intensyvumą

Vaivorykštės spindulys – spindulys, vandens laše sklindantis mažiausio atlenkimo kampu

Vaivorykštiniai debesys – dėl šviesos difrakcijos reiškinio vaivorykštės spalvomis nusidažantys arti Saulės ar Mėnulio esantys debesys

Vakuumas – tuščioji arba laisvoji erdvė

Van Aleno radiacinės juostos – sritys, kuriose juda Žemės magnetinio lauko „sugautos“ elektringosios dalelės

Venera Aušrinė – Veneros planeta, matoma prieš aušrą

Venera Vakarinė – Veneros planeta, matoma po Saulės laidos

Veneros juosta – rausva juosta, esanti virš Žemės šešėlio

Vertikalios raidos debesys – debesys, kurių vertikalus matmuo yra didesnis nei horizontalus

Viduriniojo aukšto debesys – 2–7 km aukštyje susidarantys debesys

Viršutinis mirażas – objekto vaizdas, kuris matomas aukščiau, nei jis yra iš tikrųjų

Visiškas vidaus atspindys – reiškinys, kai visa nedideliu kampu kritusi šviesa atspindima dviejų skirtingų medžiagų sandūroje

Volfo skaičius – žr. Tarptautinis Saulės dėmių skaičius

Z

Zenitas – menamas dangaus sferos taškas, esantis tiesiai virš galvos

Zenitinis lankas – spalvingas halo lankas, nutolęs 46o kampiniu atstumu į viršų nuo Saulės

Zenitinis valandinis skaičius – meteorų srauto aktyvumo matas, reiškiantis vieno stebėtojo matomą meteorų skaičių per valandą, esant idealioms stebėjimo sąlygoms

Zodiako debesis – tarp Marso ir Jupiterio orbitų esantis kosminių dulkių debesis, sklaidantis Saulės šviesą

Zodiako šviesa – naktinio dangaus švytėjimas dėl Saulės šviesos sklaidos kosminių dulkių debesyje

Ž

Žaibas – savaiminis elektros išlydis atmosferoje

Žaibolaidis – įžemintas laidininkas, skirtas pritraukti žaibą apsaugant pastatus ar kitus objektus

Žalioji žybsnis – mirażas, kai pati viršutinė besileidžiančios Saulės disko dalis trumpam sužimba žaliai

Žemieji debesys – 0–2 km aukštyje susidarantys debesys

Žemės šešėlis – tamsi Saulės neapšviesta atmosferos sritis priešingoje Saulei pusėje, kuri išryškėja prieš pat patekiant ar tik nusileidus Saulei

Žemės švytėjimas – žr. pelenų šviesa

Žiedadulkių vainikas – vainikas, susidarantis dėl šviesos difrakcijos reiškinio nuo ore sklindančių žiedadulkių

Žvaigždžių mirgėjimas – labai greitai besikeičiantis arti horizonto esančių žvaigždžių šviesumas ir spalva

Priedai

Dydis	Priešdėlis	Žymėjimas	Skaičius	Daugiklis
Trilijonas	tera	T	1 000 000 000 000	10^{12}
Milijardas	giga	G	1 000 000 000	10^9
Milijonas	mega	M	1 000 000	10^6
Tūkstantis	kilo	k	1 000	10^3
Vienas	–	–	1	10^0
Tūkstantoji dalis	mili	m	0.001	10^{-3}
Milijoninė dalis	mikro	μ	0.000 001	10^{-6}
Milijardinė dalis	nano	n	0.000 000 001	10^{-9}
Trilijoninė dalis	piko	p	0.000 000 000 001	10^{-12}

Spalva	Bangos ilgis (nm)
Violetinė	420
Mėlyna	450
Žydra	470
Žalia	520
Geltona	570
Oranžinė	600
Raudona	630

↑ **1 lentelė.**
Dideli ir maži dydžiai

← **2 lentelė.**
Regimosios šviesos spalvos

Dubietis, Audrius

Du21 Nuostabūs švytėjimas : padangių fizika be formulių / Audrius Dubietis ; dailininkė Ona Liugailienė. – Vilnius : Versmė, 2014. – 256 p. : iliustr.

ISBN 978-609-8148-02-2

Ši knyga – tai kelionė po nuostabų mus supantį ir nuolat besikeičiantį šviesos ir spalvų pasaulį. Knygoje, remiantis asmeniniais autoriaus įspūdžiais, aprašomi ir paprastai paaiškinami patys įvairiausi optiniai reiškiniai, vykstantys oro sluoksnyje, gaubiančiame mūsų planetos Žemės paviršių – atmosferoje. Čia skaitytojas ras atsakymus į klausimus, kokie būna debesys, kaip susidaro vaivorykštės, halai ir vainikai, kodėl skiriasi dangaus ir debesų spalvos, kaip gimsta mirazai, kodėl mirga žvaigždės, ar galima pamatyti šiaurės pašvaitę Lietuvoje, kas matosi naktiniame danguje, ir daugybę kitų. Knyga skirta visiems, kurie norėtų daugiau sužinoti, geriau suprasti ar tiesiog savo akimis išvysti ir pasigrožėti nuostabiais optiniais gamtos reiškiniais.

UDK 535

Audrius Dubietis

Nuostabūs švytėjimas: padangių fizika be formulių

Kalbos redaktorė Aukšė Gasperavičienė

Dailininkė ir maketuotoja Ona Liugailienė

Spaudai parengė „Versmės“ leidykla

Geležinkelio g. 6, 02100 Vilnius

www.versme.lt

Pasirašyta spaudai 2014 09 17

Spausdino UAB „Balto print“

Utenos g. 41A, 08217 Vilnius

www.baltoprint.lt

Tiražas 500 egz.

Knyga elektroniniu formatu išleido

„Versmės“ leidyklos Elektroninių knygų

rengimo centras. Vilnius, 2016-02-03



Audrius Dubietis (gim. 1964 m.) yra Vilniaus universiteto Fizikos fakulteto profesorius, Nacionalinės mokslo premijos laureatas, Amerikos optikų draugijos narys. Profesinėje veikloje tyrinėja lazerinės spinduliuotės ir skaidrių medžiagų sąveiką, su ja susiju-

sčius netiesinius optinius reiškinius. Šia tema yra paskelbęs daugiau nei 100 mokslinių straipsnių recenzuojamuose tarptautiniuose mokslo žurnaluose.

Dangaus reiškiniai yra autoriaus hobis, kuriam jis skiria didžiąją savo laisvalaikio dalį. Ši knyga gimė apibendrinus per daugelį metų sukauptus Lietuvos dangaus ir įvairių jame vykstančių reiškinių stebėjimų rezultatus. Paprastai ir suprantamai paaiškintos ne visai paprastos, o kartais ir labai sudėtingos šių reiškinių fizikinės priežastys, šiuolaikinio mokslo pasiekimai atskleidžiant mus supančio šviesos ir spalvų pasaulio grožį ir svarbą. Tai knyga apie nuostabų Lietuvos dangų ir visa, kas jame vyksta.